

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可能な  
単一結線識別子

船越 南斗

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

2021年3月

## 概要

紙は薄く，軽く，そして柔らかいため，切断，折り曲げ，および貼り付けなどによって様々な形を作ることができる．そのため，折り紙や切り絵など紙を使ったものづくりは広く親しまれている．そこで，紙を材料とした入力装置の作製方法があれば，人々は容易に様々な形状の入力装置を容易に作製することが可能になると考えられる．本研究は，作成および使用が容易な紙製の入力装置の作製方法の開発を目指す．そこで本研究にて，指にてなぞることによって作製可能な識別子の集まりである SilverCodes を提案する．SilverCodes は静電容量計測に基づいて入力を読み取られており，SilverCodes と静電容量を計測するためのモジュールは単一結線により接続される．また，SilverCodes は重ねることによって冊子状にすることが可能である．冊子状にした SilverCodes の識別子の読み取り精度を調査し，平均 95.3%の精度にて読み取り可能であることが分かった．

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的およびアプローチ	1
1.3	本研究の貢献	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	識別子	3
2.2	紙を用いたインタラクティブなシステム	3
2.3	タッチ認識手法	4
2.4	提案手法の位置付け	4
<b>第3章</b>	<b>事前調査</b>	<b>5</b>
3.1	導電性インクを用いた識別子の試作	5
3.1.1	紙を切り取ることにより作製される識別子	5
3.1.2	両面印刷を用いることにより作製される識別子	5
3.2	印刷回数による静電容量の計測	10
<b>第4章</b>	<b>実装</b>	<b>12</b>
4.1	システム全体の概要	12
4.2	SilverCodes	12
4.2.1	1つの識別子の構造	14
4.2.2	識別子の積み重ね	14
4.3	ソフトウェア	14
4.3.1	$\phi$ のキャリブレーション	15
4.3.2	識別子の読み取り	15
<b>第5章</b>	<b>実験</b>	<b>19</b>
5.1	実験に用いた SilverCodes	19
5.2	実験参加者およびタスク	19
5.3	結果	19
5.3.1	議論	20

<b>第 6 章</b>	<b>アプリケーション</b>	<b>22</b>
6.1	音の出る絵本 . . . . .	22
6.2	個人が作成可能なリモコン . . . . .	22
6.3	掲示板 . . . . .	22
6.4	なぞる速度を利用したインタラクティブな本 . . . . .	22
<b>第 7 章</b>	<b>議論と今後の展望</b>	<b>26</b>
7.1	導電性インクの劣化および指への付着 . . . . .	26
7.1.1	導電性ラミネートフィルム . . . . .	26
7.1.2	非導電性のラミネートフィルム . . . . .	27
7.1.3	スマートフォン用フィルム . . . . .	27
<b>第 8 章</b>	<b>おわりに</b>	<b>30</b>
	謝辞	31
	参考文献	32
<b>付録 A</b>	<b>実験に用いた識別子</b>	<b>36</b>
A.1	上部の紙の表面 . . . . .	37
A.2	上部の紙の裏面 . . . . .	38
A.3	下部の紙の表面 . . . . .	39
A.4	下部の紙の裏面 . . . . .	40

# 目次

1.1	提案手法のコンセプト . . . . .	2
3.1	紙の一部を切り取ることにより作製した識別子の構成 . . . . .	6
3.2	紙の一部を切り取ることにより作製した識別子 . . . . .	6
3.3	紙の一部を切り取ることにより作製した識別子をなぞることによって計測された静電容量 . . . . .	7
3.4	両面に導電性インクを印刷したパターン . . . . .	8
3.5	両面に導電性インクを印刷した識別子をなぞることによって計測された静電容量 . . . . .	8
3.6	両面に導電性インクを印刷することによって作製した識別子 . . . . .	9
3.7	両面に導電性インクを印刷することによって作製した識別子を指にてなぞることにより得られる静電容量 . . . . .	9
3.8	1-8 層印刷を行った銀インクタッチ電極 . . . . .	10
3.9	1-8 層印刷を行った銀インクタッチ電極を各 5 秒間触れた際の静電容量の平均値	11
4.1	試作したシステム全体 . . . . .	13
4.2	識別子の構造 . . . . .	15
4.3	2つの識別子が印刷された SilverCodes の実装例 . A) 上部の紙の表面 (1 層目) . B) 上部の紙の裏面 (2 層目) . C) 下部の紙の表面 (3 層目) . D) 2 枚の紙を重ね合わせた様子 . . . . .	16
4.4	識別子読み取りのための状態遷移図 . . . . .	17
4.5	識別子をなぞることによって計測される静電容量の変化 . . . . .	18
5.1	実験に用いた識別子の変数 . . . . .	20
6.1	音の出る絵本 . . . . .	23
6.2	個人で作製可能なりモコンの例 . ユーザは識別子を指にてなぞることにより , 音量を操作できる . . . . .	23
6.3	SilverCodes を用いた掲示板の例 . ユーザは識別子をなぞることにより音声情報を受け取れる . . . . .	24
6.4	ディスプレイを用いた絵本の動作 . . . . .	25
7.1	調査に用いた SilverCodes . . . . .	26

7.2	表面加工無しの SilverCodes を指でなぞった時の静電容量値 . . . . .	27
7.3	導電性ラミネートフィルムを用いて加工した SilverCodes を指でなぞった時の 静電容量 . . . . .	28
7.4	非導電性のラミネートフィルムを用いて加工した SilverCodes を指でなぞった 時の静電容量値 . . . . .	28
7.5	スマートフォン用のフィルムを用いて加工した SilverCodes を指でなぞった時 の静電容量値 . . . . .	29

# 表目次

5.1 実験結果. . . . .	20
-------------------	----

# 第1章 はじめに

本章では，本研究の背景，目的とアプローチ，貢献，および本論文の構成を示す．

## 1.1 背景

紙は薄く，軽く，そして柔らかいため，切断，折り曲げ，および貼り付けなどによって様々な形を作ることができる．そのため，折り紙や切り絵など紙を使ったものづくりは広く親しまれている．そこで，紙を材料とした入力装置の作製方法があれば，人々は容易に様々な形状の入力装置を容易に作製することが可能になると考えられる．紙を材料として入力のみならずインタラクティブな装置を作る手法はこれまで以下のように提案されてきた．

1. RFID を紙に貼り付ける手法 [LBC<sup>+</sup>16]
2. LED やマイコンを紙に取り付ける手法 [QB10]
3. 導電性インクによってタッチ電極を作る手法 [YOT17]

RFID やマイコンなどの回路素子を紙に取り付ける手法 [LBC<sup>+</sup>16, QB10] によって，ユーザは紙に対してタッチ以外の複雑な入力ができる．しかし，回路素子を紙に取り付けることにより紙の柔軟性を失う恐れがある．導電性インクを用いて紙にタッチ電極を取り付ける手法 [YOT17] は，紙を用いたタッチ入力を可能にする．しかし，多数のタッチ電極を紙に取り付けることによって，紙とタッチを検出するためのモジュールを接続するための結線の数が多くなる問題がある．これにより，多数のタッチ電極が取り付けられた紙とモジュールとの接続が複雑になる．

## 1.2 本研究の目的およびアプローチ

本研究は，作成および使用が容易な紙製の入力装置の作製方法の開発を目指す．そこで本研究にて，指にてなぞることによって作製可能な識別子の集まりである SilverCodes を提案する．提案手法のコンセプトを図 1.1 に示す．SilverCodes は複数の識別子によって構成されており，冊子などの形状に加工することができる．また，SilverCodes は静電容量計測に基づいて入力を読み取られており，SilverCodes と静電容量を計測するためのモジュールは単一結線により接続される．これによって，モジュールとの接続が容易になる．



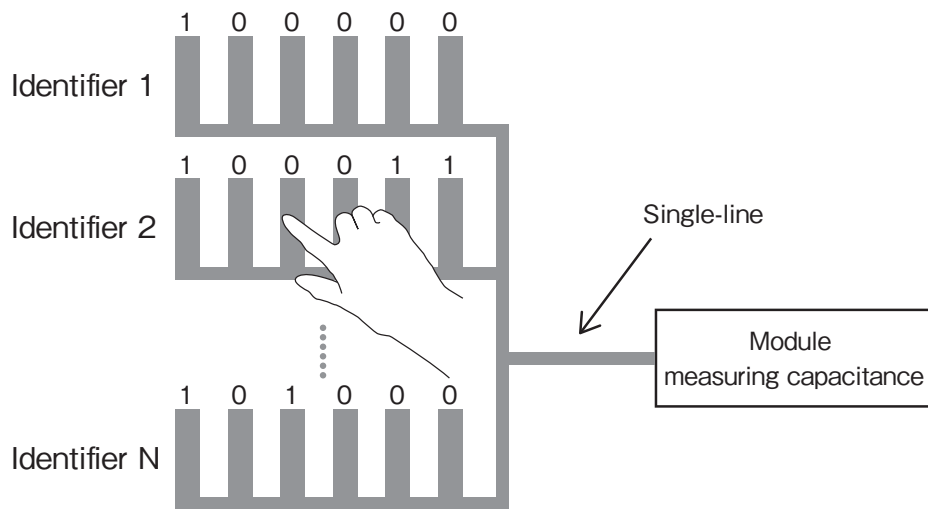


図 1.1: 提案手法のコンセプト .

### 1.3 本研究の貢献

本研究の貢献は以下に列挙する .

- 単一の結線にて複数種類の入力可能な識別子の作成方法の提示
- 識別子を印刷した紙を重ねて本のようにした状態にて、識別子の読み取りが可能であることの提示

### 1.4 本論文の構成

本論文の構成について述べる . 第 1 章にて、本論文の背景、目的およびアプローチを述べる . 第 2 章にて、本研究の関連研究および位置付けについて述べる . 第 3 章にて、識別子を作製するための事前調査について述べる . 第 4 章にて、本研究のシステム全体の実装について述べる . 第 5 章にて、本研究の識別子の読み取り精度について調査した実験について述べる . 第 6 章にて、SilverCodes を用いて作製可能なアプリケーションについて述べる . 第 7 章にて、本研究の議論および今後の課題について述べる . 最後に第 8 章にて、本研究のまとめについて述べる .

## 第2章 関連研究

本研究では，導電性インクを紙に印刷することによって識別子を作成し，紙にインタラクティブ性を持たせている．そのため，本章では識別子に関する研究を挙げ，それらと本手法の識別子の違いを述べる．次に，紙を用いたインタラクティブなシステムについて挙げ，これらのシステムと本手法との相違を述べる．最後に本研究を位置づけについて述べる．

### 2.1 識別子

Harrisonら [HXH12] の Acoustic Barcodes は，物体に対して縞模様の溝をつけることにより実現可能なバーコードである．バーコードは紙，木，ガラスのような様々な物体に刻むことが可能であり，指爪などにてなぞるときに生じる音をもとに読み取りを行う．また，Fetterら [FBG13] は，磁力センサを備えたスマートフォンにて読み取り可能なタグである MagnetiCode を提案している．タグは Arduino，ソレノイドおよびソレノイドの駆動回路から構成されており，ソレノイドによって周囲の磁場を変化させることによって識別子の情報を送信する．

### 2.2 紙を用いたインタラクティブなシステム

Jacobyら [JB13] は導電性インクにて描かれた図版を音声の録音および再生のインタフェースにする StoryClip というツールを開発している．Klamkaら [KD17] は，スタイラスおよびタッチによる入力および発光ディスプレイによる視覚的フィードバックが可能なインタフェースである IllumiPaper を提案している．この研究では発光ディスプレイおよびタッチパッドの配線に導電性インクを利用している．Liら [LBC<sup>+</sup>16] は，導電性インクにて印刷可能でありユーザが触れることによって特性が変化する RF アンテナを備えた RFID タグによるタッチインタフェースを提案している．RF アンテナの特性の変化を検出することによりアンテナに対するタッチダウン，スワイプのようなジェスチャの識別ができることを示した．

Qiら [QB10] は，銅箔テープ，導電布，導電性インクおよび電子部品によって構成されるインタラクティブな要素を持つ飛び出す絵本である Electronic Popables を提案している．各ページにはスイッチ，ボタン，LEDをはじめとする入出力要素が配置されており，それぞれ閲覧するたびに磁石付きの電子モジュールを毎回取り付ける必要がある．発光ディスプレイおよびタッチパッドの配線に導電性インクを利用している．Yoshinoら [YOT17] は，導電性インクを用いた静電容量式のタッチパッドを各ページに印刷し FPC で結線した公共空間向けの本型のインタフェースである FLIPPIN ' を提案している．

電氣的な配線が不要なインタラクティブな本型のシステムとして，RFID タグを用いてどのページをユーザが見ているのかを識別し，閲覧しているページに合わせた視覚的あるいは聴覚的フィードバックを行う手法が提案されている [BCG<sup>+</sup>01, Yam10]．また，Figueiredo ら [FPB<sup>+</sup>13] は，各ページに取り付けタブレットに搭載された磁力センサを用いてユーザが閲覧しているページを識別している．

本研究では，紙に印刷された導電性インクによる識別子を用いたインタラクティブな紙を提案する．識別子およびそのページ内での結線は導電性インクによるインクジェット印刷のみによって行われるため，製作は容易である．

## 2.3 タッチ認識手法

Karataş ら [KG15] は，導電性インクによる抵抗を印刷することによって単一結線にてマルチタッチを認識する手法を提案した．Manabe ら [MY17] はコンデンサを用いることによって，単一結線接続にて複数の電極のマルチタッチを認識する手法を提案した．RootCap [TNS16] では，紙に印刷した導電性インクによって作製したコンデンサの大きさを変えることにより，単一結線にてマルチタッチを認識する手法を提案した．MonoTouch [TST16] では，導電性フィラメントを用いたなぞった方向を検出可能なタッチセンサを提案している．

## 2.4 提案手法の位置付け

提案手法は，静電容量計測モジュールと単一結線によって接続された複数の識別子を指にてなぞることにより入力を行う．Acoustic Barcodes [HXH12] や Fetter ら [FBG13] らの手法は識別子と認識のためのデバイスを物理的に接続する必要がない．提案手法は識別子とモジュールを接続する必要があるが，指にてなぞることにより入力するためなぞる速度を入力のパラメータとして利用できる点が異なる．

Jacoby ら [JB13] や Qi ら [QB10] の手法では，紙に回路素子を取り付けることによって，インタラクティブな紙製の装置を実現している．紙に回路素子を取り付けると豊富な種類の入出力が実装できるが，一方で紙に素子を取り付ける必要が生じたり，紙の柔軟性を失う恐れがあったりする．提案手法の識別子は，導電性インクを紙に印刷することによって作製されるため，紙に素子を取り付ける必要や紙の柔軟性を失うことがない．

Karataş ら [KG15] らおよび Manabe ら [MY17] らは，単一結線による接続にてどの電極をタッチしたか認識する手法を実現している．提案手法も複数の識別子のうち，どの識別子をなぞったかを単一結線による接続にて認識する．提案手法は指にてなぞることによって入力を行う点が異なる．また，ビット列の入力を行うため，より多くの種類の入力が可能である点も異なる．

## 第3章 事前調査

本研究では、複数の電極を指にてなぞることによって計測される静電容量の変化に基づいて読み取られる識別子を実現する。本章では、そのために行った事前調査について述べる。

### 3.1 導電性インクを用いた識別子の試作

本研究では指にてなぞることにより、入力可能な静電容量に基づいた識別子を作成する。そのために、2状態のタッチが識別可能な電極の試作を行った。本節では、試作した2種類の識別子について述べる。

#### 3.1.1 紙を切り取ることにより作製される識別子

なぞっている際に3種類の静電容量が計測される識別子の試作として図3.1のような識別子を作成した。この識別子は2枚の紙によって構成されており、なぞっている際に以下の3種類の電極に指が触れる。

ボタン1 下の紙に導電性インクが存在し、上の紙を切り取った電極。

ボタン2 両方の紙に導電性インクが存在する電極。

ボタン3 両方の紙に導電性インクが存在しない電極。

この3つのボタンのうち、ボタン1を1の入力、ボタン3を0の入力、およびボタン2を一つ前の入力と同じ入力をする際の区切りと用いる。このボタンによって識別子をなぞることによって、図3.3のような3種類の静電容量が計測される。この静電容量波形から1011100001が入力されていることが確認できる。

しかし、この識別子は紙を切り取ることにより作成されているため、なぞる際に指が引っかかる問題がある。また、識別子を作製するために紙を切り取る必要があるため、作製コストの増加に繋がる問題がある。

#### 3.1.2 両面印刷を用いることにより作製される識別子

紙の一部を切り取ることにより作製される識別子の問題を解決するために、両面印刷を用いた識別子を試作した。実験的に作製した識別子を図3.4に示す。この識別子は、



図 3.1: 紙の一部を切り取ることで作製した識別子の構成 .

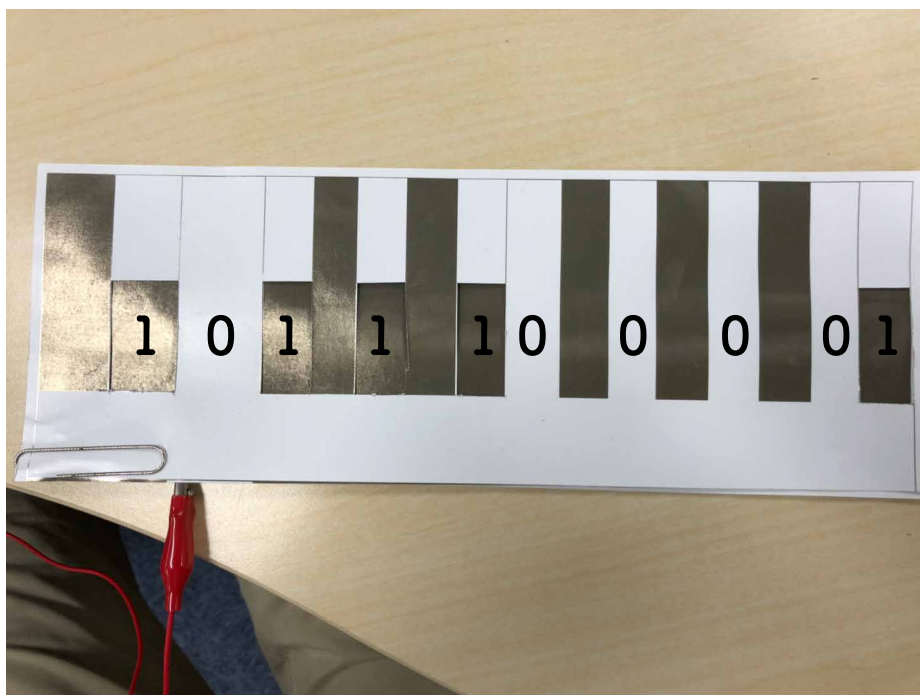


図 3.2: 紙の一部を切り取ることで作製した識別子 .

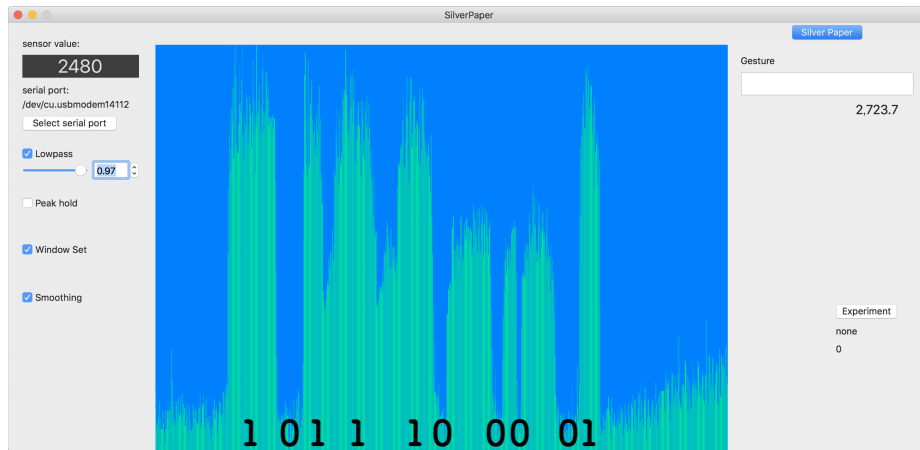


図 3.3: 紙の一部を切り取ることで作製した識別子をなぞることによって計測された静電容量。

- a 1 枚目のみに導電性インクが存在する部分
- b 1 枚目と 2 枚目の裏側に導電性インクが存在する部分
- c 1 枚目と 2 枚目の表側に導電性インクが存在する部分
- d 1 枚目と 2 枚目の両側に導電性インクが存在する部分

のように構成されている。

図 3.4 の電極に触れた際に得られる静電容量を図 3.5 に示す。a および b の構成については、触れていない状態と比較して静電容量の変化が小さく、識別子として使用した際に入力エラーが頻繁に発生する可能性がある。しかし、c および d の構成については触れた際の静電容量の変化が大きくなった。これにより、

1. 1 枚目に導電性インクが存在し、2 枚目の両面に導電性インクが存在する部分
2. 1 枚目に導電性インクが存在し、2 枚目の上面に導電性インクが存在する部分
3. 1 枚目、2 枚目ともに導電性インクが存在しない部分

として、3 値の入力を紙の一部分を切り取らずに実現可能である。実際に、両面印刷を用いた識別子を図 3.6、この識別子を指にてなぞった際の静電容量値を図 3.7 に示す。図より、0 および 1 をはっきりと区別できることがわかる。

また、指にてなぞったところ、紙の一部を切り取って作製される識別子にあった指が引っかかる問題が解消されていることがわかった。したがって、今後は c および d の構成を用いた、識別子を用いることとする。

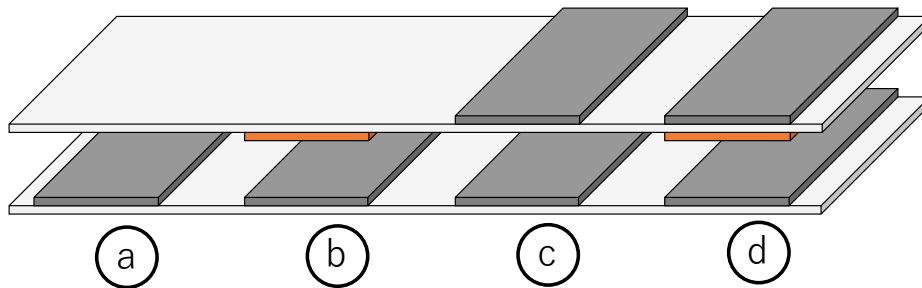


図 3.4: 両面に導電性インクを印刷したパターン .

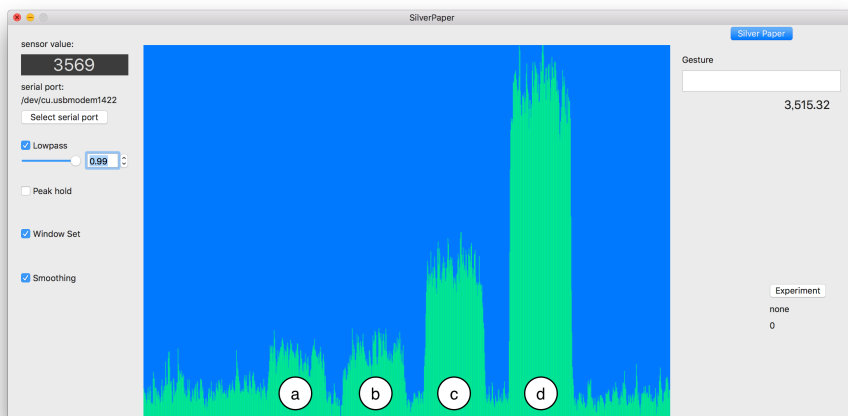


図 3.5: 両面に導電性インクを印刷した識別子をなぞることによって計測された静電容量 .

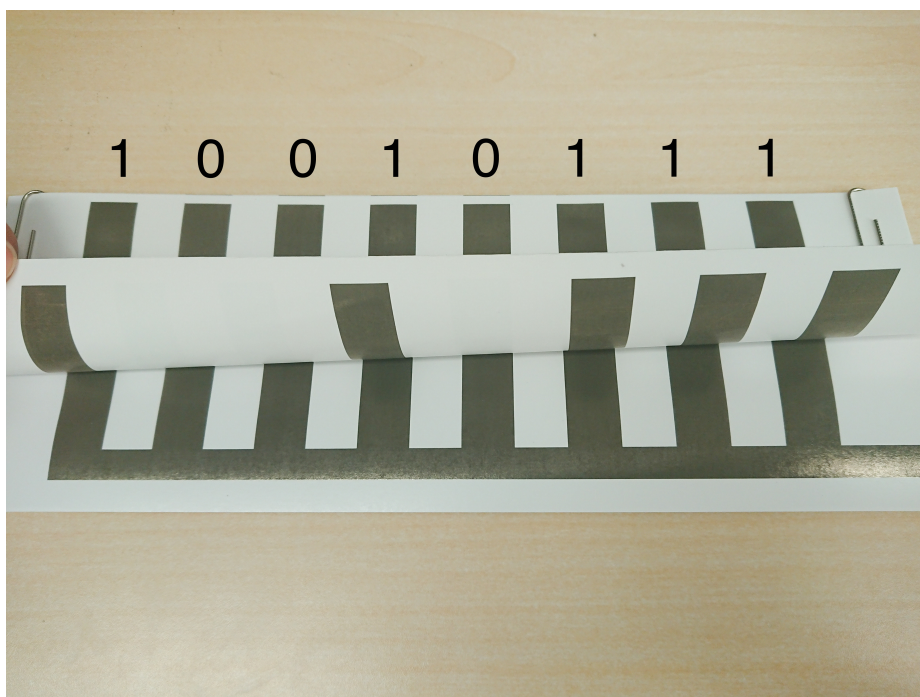


図 3.6: 両面に導電性インクを印刷することによって作製した識別子 .

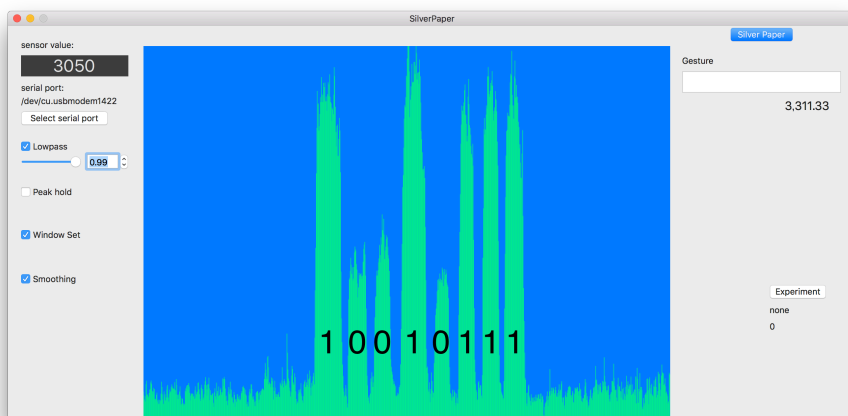


図 3.7: 両面に導電性インクを印刷することによって作製した識別子を指にてなぞることにより得られる静電容量 .



### 3.2 印刷回数による静電容量の計測

導電性インクを多層印刷することにより，計測される静電容量の変化が大きくなるのかについて調査した．多層印刷を行った電極を図 3.8 に示す．図 3.8 の各部分に電極を取り付け，約 5 秒間タッチをし続けた際の静電容量値を記録し，グラフにしたものを図 3.9 に示す．

静電容量値の計測実験では，5 層印刷した時に最も静電容量値が高くなった．しかし，印刷回数が 1 層から 2 層間では静電容量値は約 6.5% 上昇したが，2-8 層の印刷ではほとんど変化しなかった．そのため，今後の識別子では作製コストを考慮して 2 層印刷を用いて識別子を作成する．



図 3.8: 1-8 層印刷を行った銀インクタッチ電極 .

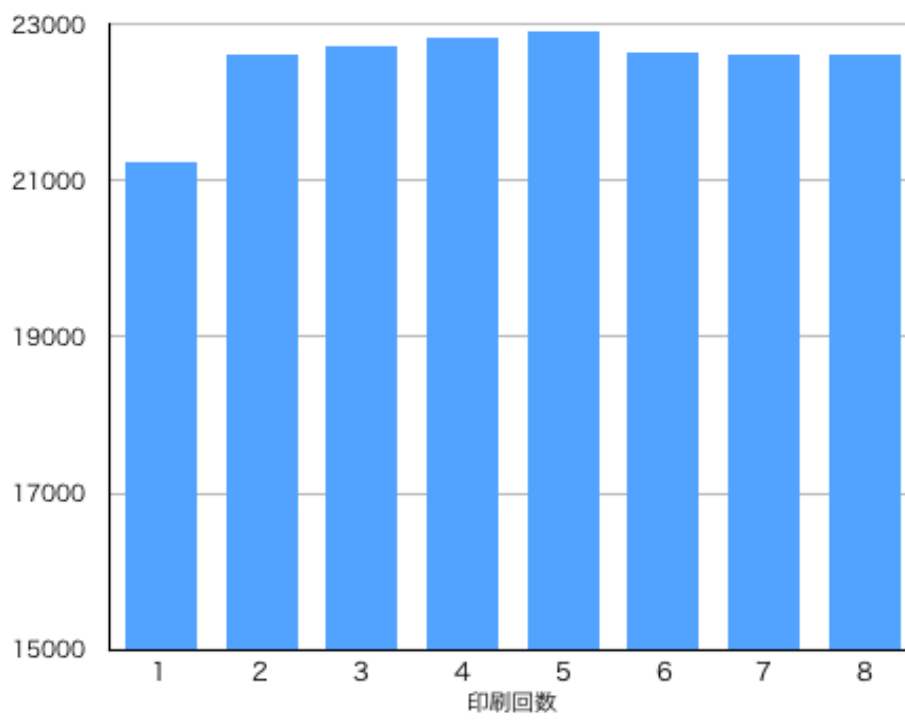


図 3.9: 1-8 層印刷を行った銀インクタッチ電極を各 5 秒間触れた際の静電容量の平均値

## 第4章 実装

本章では，SilverCodes の実装とスワイプされた識別子を認識するためのシステムについて述べる．図 4.1 に，試作した本研究のシステム全体図を示す．本システムは，静電容量を測定するためのモジュール，静電容量を解析するための PC，および SilverCodes から構成されている．モジュールはマイコン（Arduino Mega 2560 R3）を用いて実装し，静電容量を測定するためのライブラリとして Capacitive Sensing Library<sup>1</sup>を使用した．モジュールと SilverCodes はワニ口クリップを用いて単一結線により接続されている．また，モジュールと PC は USB ケーブルを用いて接続されている．

### 4.1 システム全体の概要

本システムの全体図を図 4.1 に示す．本システムは，識別子，静電容量計測モジュールおよび PC によって構成される．

本システムは，ユーザがなぞった識別子のデータを静電容量に基づいて読み取る．識別子はバーコード状の電極として，導電性インクを用いて印刷される．ユーザが電極に触れると識別子は誘電体である人体と電氣的に結合し地面と接地する．この時の識別子と地面の静電容量を計測することにより，システムは識別子のデータを読み取る．我々は識別子の印刷方法を工夫することにより，ユーザが電極に触れた際に計測される静電容量を変化させた．これによって，ユーザが識別子をなぞることによるデータの入力を可能にした．

1つの静電容量計測モジュールは，単一の結線を用いて複数の識別子と結線される．この複数の識別子は電氣的に並列に接続されている．静電容量計測モジュールは，PC に静電容量を送信する．ソフトウェアでは送られてきた静電容量を基に，なぞられた識別子のデータを読み取る．

### 4.2 SilverCodes

本システムの識別子は，導電性インク（三菱製紙社，銀ナノ粒子インク NBSIJ-MU01）を用いて A4 用紙（コクヨ S&B，KJ-G23A4）に印刷される．導電性インクにて印刷された 2 枚 1 組の紙から構成される識別子はそれぞれを重ねることができ，また 1 組の紙の上に複数配置することが可能である（図 4.3）．識別子を重ね，それぞれを導通させることによって単一結

---

<sup>1</sup><https://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor/>

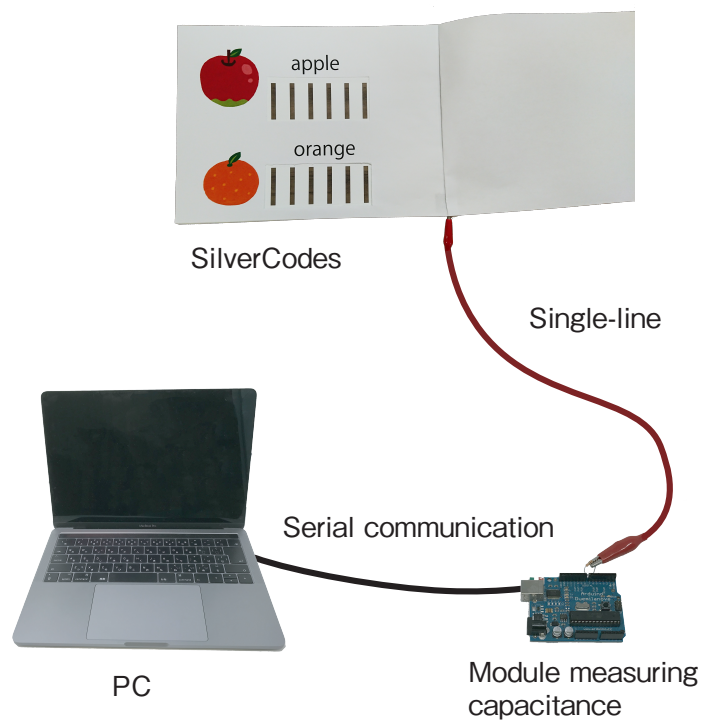


図 4.1: 試作したシステム全体 .

線による識別子の読み取りが実現される．本節では，識別子単体の構造および識別子の重ね合わせについて述べる．

#### 4.2.1 1つの識別子の構造

識別子は導電性インクにて両面印刷された上部と下部の紙を重ねることで構成される．識別子の構造を図 4.2 に示す．上部表面には等間隔に棒状の電極が印刷されており，ユーザがこの電極に触れたとき下部表面の電極に結線している静電容量計測モジュールから測定される静電容量値が上昇する．この静電容量値の変化をもとに識別子の読み取りが行われる．

ユーザが識別子をなぞる間，指は電極に触れた状態と触れていない状態を交互に繰り返す．ユーザが電極に触れていない場合，静電容量は低い値を示す．以降，この時の静電容量を下回る状態を  $\phi$  と呼ぶ．また，ユーザが電極に触れた時の静電容量は上部裏面に電極がある場合とない場合で異なるため，それぞれ識別が可能である．以降，上部裏面に電極がある箇所に触れた時の静電容量の状態を 1，電極がない箇所に触れた時の静電容量の状態を 0 と呼ぶ．この 3 種類の静電容量を用い，識別子にてビット列を表現することができる．

電極に触れた時の静電容量は触れるユーザおよびその姿勢によって異なるため，あらかじめ決定した閾値による 1 および 0 状態の判定は困難である．そのため，読み取りごとに 1 および 0 状態の静電容量をシステムが把握する必要がある．そこで，我々は入力する識別子の印刷パタンの先頭を 10 (以降，ヘッダ) から始め，ヘッダ以降に識別子のデータを印刷した．これにより，ユーザ毎の 1 および 0 状態の識別が可能になる．

#### 4.2.2 識別子の積み重ね

紙を重ねた際，全ての識別子を導通させるためには紙に穴を開け両面を導通させる必要がある．我々は，穴を開けるための道具として針なしホッチキス ( プラス社，SL-106A ) を用いた．さらに，紙の両面を導通させるために導電性インク ( Bare Conductive 社，Electric Paint ) を用いた．このインクは乾いていない状態では粘性があり，2 枚の紙の電極を電氣的に繋げやすいという利点がある．そして，2 枚の紙の両面の端に四角を印刷し，そこに穴を開け導電性インクを塗布することにより全ての識別子を導通させる．

事前調査に基づいて，認識精度を向上させるために 1 枚の紙に同じパターンを 2 回印刷した．これにより，印刷した箇所の抵抗値が下がるため，計測される静電容量が増加する．

図 4.1 に示すように SilverCodes の 3 層目とモジュールを単一結線にて接続することにより，識別子を認識することが可能になる．モジュールと接続された識別子を指にてなぞることにより，図 4.5 のような静電容量が計測される．

### 4.3 ソフトウェア

本システムのソフトウェアは，モジュールから送られてきたセンサ値を基に識別子の識別を行う．識別子の識別アルゴリズムは大きく分けて， $\phi$  のキャリブレーションおよびビット列

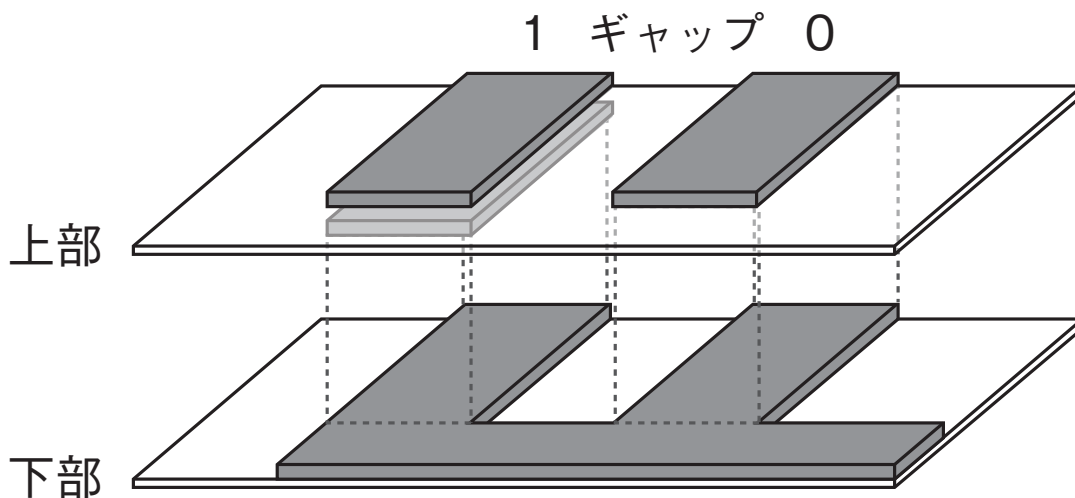


図 4.2: 識別子の構造 .

の読み取りの 2 段階に分かれる .

#### 4.3.1 $\phi$ のキャリブレーション

このシステムでは、 $\phi$  状態とそれ以外 (0 もしくは 1 状態) を識別するために識別子に触れていない状態における静電容量値を 100 回計測し、その平均値を保存する . そして、静電容量がこの平均値から 20% 以上増加した場合に、システムは 0 もしくは 1 状態になったと識別する . この 20% は、識別子上空に手がある場合に増加する静電容量を 0 もしくは 1 状態と誤認識しないよう経験的に決定した .

#### 4.3.2 識別子の読み取り

$\phi$  の静電容量を計測した後に、本システムはデータの読み取りを開始する . ビット列は、図 4.4 に示す状態遷移に従って読み取られる . 状態遷移は、前回の遷移から一定時間経過、 $\phi$  以外 (0 もしくは 1)、および  $\phi$  への静電容量の変化の 3 つのトリガによって遷移先が決まる .

識別子の読み取りはまず最初に、1 および 0 状態における静電容量の計測から始まる . ユーザが識別子をなぞることにより、指が電極に触れ静電容量が増加し、システムは 1 状態における静電容量の平均値を計測する (図 4.4, 1 の読み取り) . その後、識別子のギャップ部分に指が移動することにより静電容量が減少し 1 状態の読み取りが終了し、0 状態の読み取りを待機する (図 4.4, 0 の読み取り待機) . その次に 0 を表す電極に指が触れると、システムは 0 状態における静電容量の平均値を計測する (図 4.4, 0 の読み取り) . 再びギャップ部分に指が移動すると、システムはデータの読み取りの待機を行う (図 4.4, データ読み取り待機) .

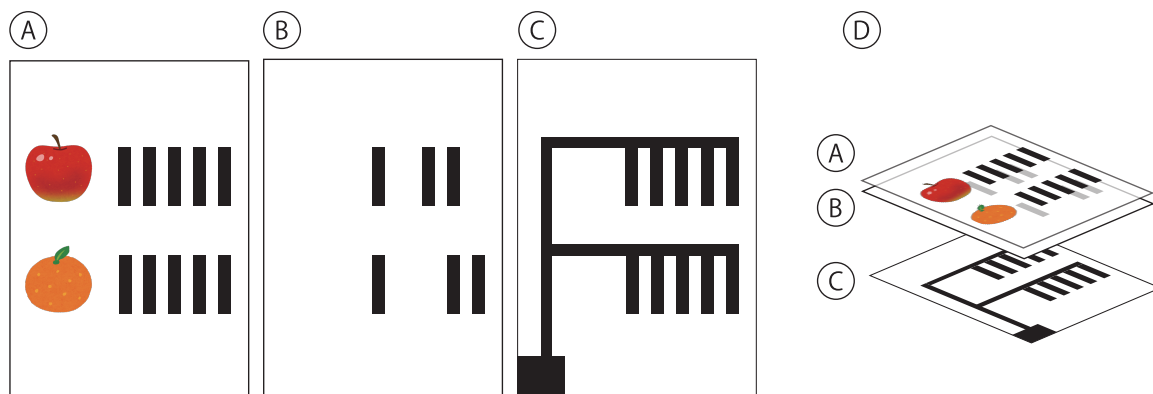


図 4.3: 2 つの識別子が印刷された SilverCodes の実装例 . A ) 上部の紙の表面 ( 1 層目 ) . B ) 上部の紙の裏面 ( 2 層目 ) . C ) 下部の紙の表面 ( 3 層目 ) . D ) 2 枚の紙を重ね合わせた様子 .

の後，印刷部分に触れることにより静電容量の平均を計測し 0 および 1 の内，静電容量が近い値の状態をビットデータとして読み取る（図 4.4，データ読み取り）．ギャップに触れることで再びデータの読み取りを待機し，静電容量が増加すればビットデータの読み取りを行う．読み取りの待機と読み取りを繰り返した後，一定時間静電容量の変化が発生しない場合，システムはデータの読み取りを終了する．一連のデータの読み取り時に計測される静電容量の波形を図 4.5 に示す．また誤って手が印刷部分に触れた状況のために，どの遷移状態においても一定時間遷移が発生しなかったら待機状態に遷移する．

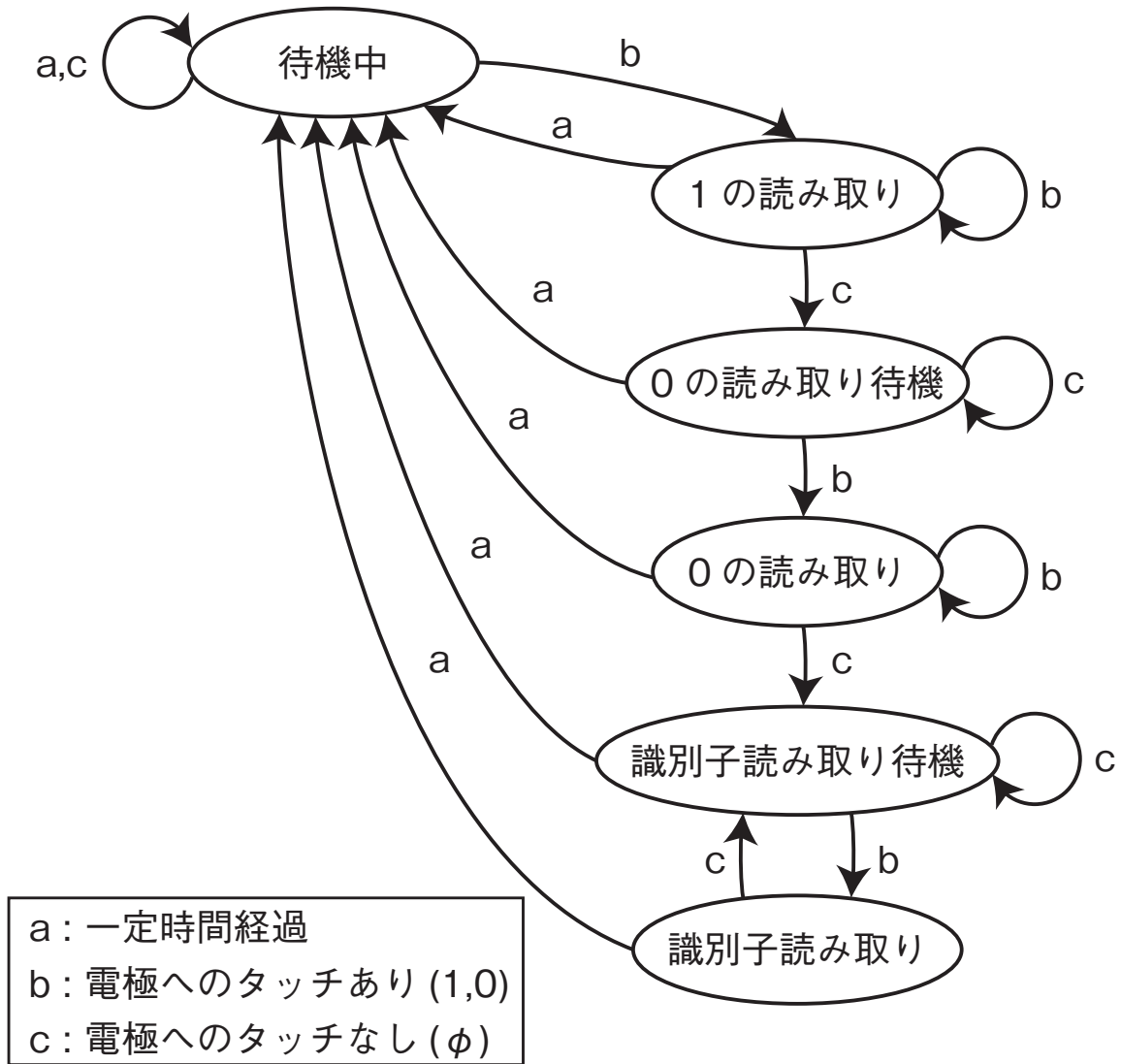


図 4.4: 識別子読み取りのための状態遷移図 .



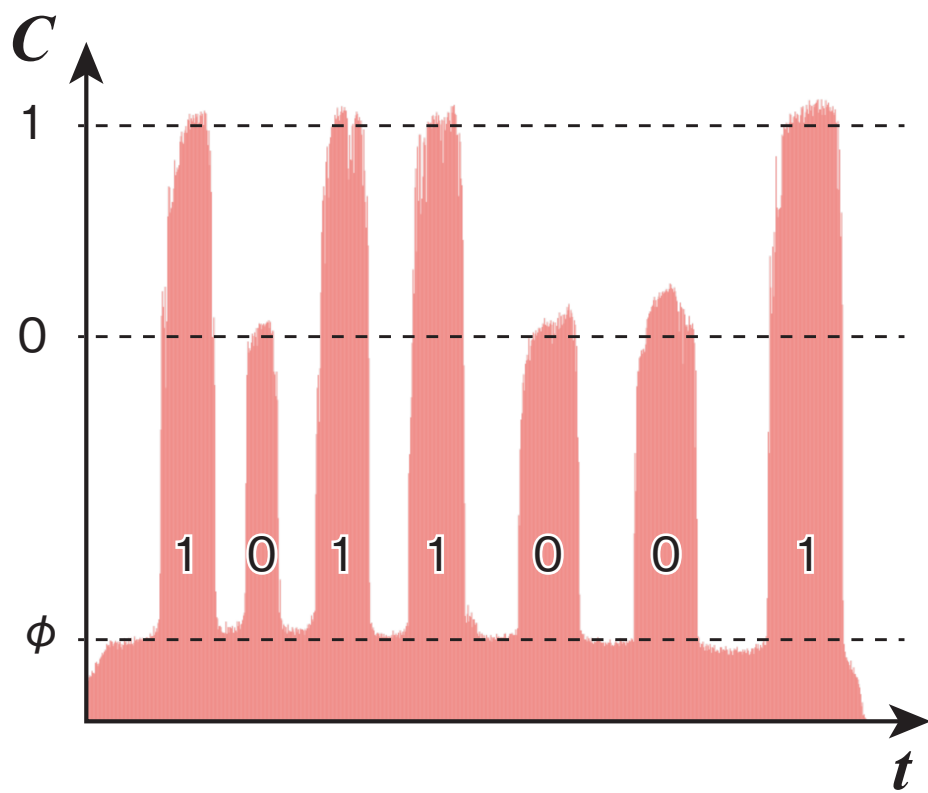


図 4.5: 識別子をなぞることによって計測される静電容量の変化

## 第5章 実験

本章では SilverCodes の識別子の読み取り精度を調査するために実施した実験について述べる．SilverCodes は，3 層目の印刷箇所を通電させることによって重ねて冊子にすることができる．重ねることによって冊子にした SilverCodes の識別子の読み取り精度の調査を行った．本実験では，ページ数および識別子の棒状に印刷された部分の幅と読み取り精度の関係を評価した．

### 5.1 実験に用いた SilverCodes

実験のために 2 枚 1 組の SilverCodes を 4 つ重ね，端をホッチキスにて留めた冊子を作製した．また，冊子と静電容量を計測するためのモジュールの接続にはワニ口クリップを用いた．

各 SilverCodes には 4 つの識別子が印刷されている．実験に用いた識別子の変数を図 5.1 に示す．識別子の長方形と長方形の隙間幅  $W_{\text{gap}}$  は 15mm とし，長方形の高さ  $H$  は 40mm とした．また，長方形の幅  $W_{\text{bar}}$  は 5, 7.5, 10, または 15mm とした．各識別子のデータとして 1001101 を使用した．付録 A にて実験に使用した SilverCodes のデータを示す．

### 5.2 実験参加者およびタスク

実験参加者は著者を含む 3 名 (22-23 才，平均 22.3 才，全員右利き，男性 2 名，女性 1 名) である．実験は後述する本型システムを卓上 (高さ 70cm) に乗せ，椅子に腰掛け床に足をつけた状態にて実施した．

実験では，各参加者に 1 つの識別子あたり右手人差し指にて 20 回なぞってもらった．識別子の読み取り結果は毎回参加者にフィードバックされる．参加者には表紙から 1 枚ずつ， $W_{\text{bar}}$  が 5mm, 7.5mm, 10mm, 15mm である識別子を順に 20 回ずつなぞってもらった．結果として，本実験では合計 960 回 (20 回  $\times$  4 識別子  $\times$  4 枚  $\times$  3 人) の識別子の読み取りを行った．なお各参加者毎に実験開始時に  $\phi$  のキャリブレーションを実施した．

### 5.3 結果

実験結果を表 5.1 に示す．重ねた SilverCodes の識別子の読み取り精度は平均 95.3% であった．また， $W_{\text{bar}}=15\text{mm}$  での読み取り精度が平均 91.3% と最も低い結果となった．これは，識

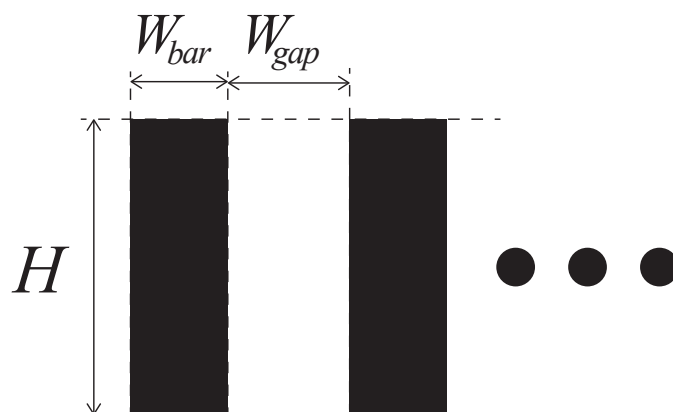


図 5.1: 実験に用いた識別子の変数.

別子をめくることによって電極に触れていない状態における静電容量が増加したことが原因だと考えられる.

また, 読み取りに失敗した識別子のデータの 31.1% は 111111 や 000000 などの全て同じビット列が読み取られた. これは, 読み取りの際にデータの最初の 10 の読み取りに失敗したため発生したと考えられる.

表 5.1: 実験結果.

幅	精度 (%)									
	1 ページ目		2 ページ目		3 ページ目		4 ページ目		平均	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散	平均	分散	平均	分散
5 mm	96.7	2.36	98.3	2.36	100	0.00	95.0	7.07	97.5	4.33
7.5 mm	100	0.00	93.3	9.43	98.3	2.36	96.7	4.71	97.1	5.94
10 mm	100	0.00	98.3	2.36	96.7	4.71	86.7	9.43	95.4	7.49
15 mm	88.3	13.1	90.0	4.08	96.7	2.36	90.0	14.1	91.3	10.4
平均	96.3	8.20	95.0	6.45	97.9	3.20	92.1	10.3	95.3	7.80

### 5.3.1 議論

実験より, エラーの 31.1% が全て同一の値のビット列として読み取られたため, そのようなデータを識別子に用いるのは適していないと考えられる. そのため, 111111 や 000000 などのデータが読み取られた場合, ユーザに再び識別子をなぞるように促すことにより誤認識を減らすことができると考えられる.

また, 積み重ねた SilverCodes は 90% 以上の精度にて読み取ることが可能であり, 識別子の幅が小さいほど読み取り精度が高い傾向にあることが分かった. そのため, より小さい幅に

て識別子を作製した場合の読み取り精度を調査する必要がある．しかし，あまりに小さい識別子は印刷のズレにより電極が上部と下部で重ならず作製が難しいという問題がある．

## 第6章 アプリケーション

本章では，SilverCodes のアプリケーションについて述べる．

### 6.1 音の出る絵本

児童書の読者が単語もしくは文章などのテキストの読み方を音声によって確認できれば便利である．図 6.1 に，本システムを応用した読み上げ機能付きの本を示す．この本では，テキストに識別子が付記されている．ユーザは読み方がわからないテキストについて，識別子をなぞることによって外部に取り付けられたスピーカから再生される音声を通じて読み方を確認することができる．

### 6.2 個人が作成可能なリモコン

物体に貼り付けることができるリモコンを個人が作製できれば，家の様々な場所にリモコンを設置できる．SilverCodes は紙に導電性インクを印刷することによって作製される．そのため，SilverCodes によって様々な形状の物体に貼り付けることができるリモコンを作製することが可能になる．例えば，図 6.2 に示したボトル容器に SilverCodes を取り付けることによって円筒状のリモコンが作製できる．

### 6.3 掲示板

SilverCodes によって，図 6.3 に示すような掲示物とのインタラクションが可能な掲示板が作製できる．掲示板上の導線と SilverCodes は単一結線によって接続可能なため，掲示物の張替えが容易である．例えば，掲示物の識別子をなぞることにより，掲示板のシステムが音声を読み上げることが可能となる．

### 6.4 なぞる速度を利用したインタラクティブな本

本システムを応用することによって，Bridging Book [FPB<sup>+</sup>13] のように，外部ディスプレイから視覚的フィードバックを提供するインタラクティブな絵本を作製することが可能である（図 6.4）．

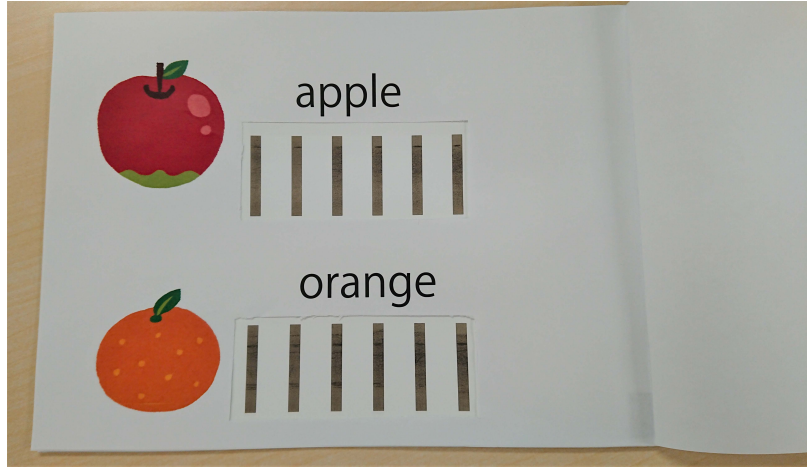


図 6.1: 音の出る絵本 .



図 6.2: 個人で作製可能なリモコンの例 . ユーザは識別子を指にてなぞることにより , 音量を操作できる .

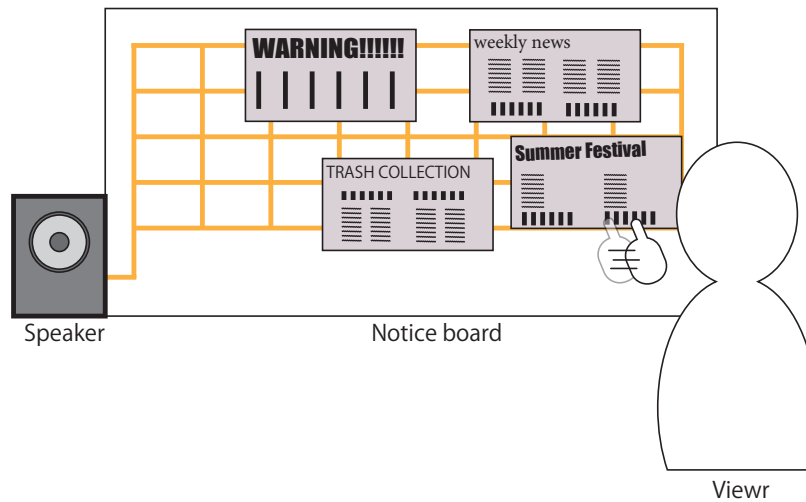


図 6.3: SilverCodes を用いた掲示板の例．ユーザは識別子をなぞることにより音声情報を受け取れる．

本アプリケーションにおいて識別子の役割は2つ存在する．1つはユーザが閲覧しているページの識別である．アプリケーションはユーザが各ページ下部の識別子をなぞることによってページの識別を行う．もう1つはスワイプジェスチャの認識である．識別子をなぞることをスワイプジェスチャとみなすと，識別子の読み取りにかかる所要時間を測ることによって，スワイプジェスチャの速さの検出が可能である．例えば，図6.4のようなボールを投げる例では，識別子の読み取り時間をスワイプジェスチャの速さとみなすことにより，ボールの軌跡を変えることができる．

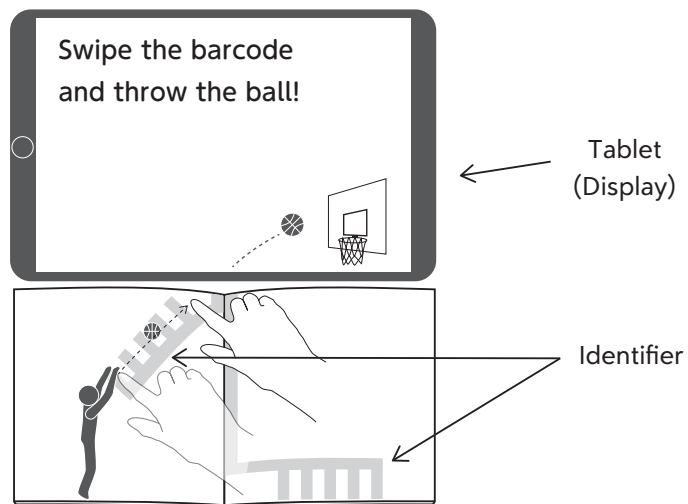


図 6.4: ディスプレイを用いた絵本の動作 .



## 第7章 議論と今後の展望

本章にて議論および今後の展望について述べる。

### 7.1 導電性インクの劣化および指への付着

本手法の識別子をなぞることによって、指に導電性インクが付着する問題がある。また、インクが錆びによって劣化する問題もある。この問題を解決するために SilverCodes に対してラミネートを用いた加工とスマートフォン用のフィルムを用いた加工を行なった。それぞれの加工を施した SilverCodes を作成し、指でなぞった際の静電容量値の変化を確認した。なお、今回、実験に使用した SilverCodes (図 7.1) をなぞった時の結果を図 7.2 に示す。

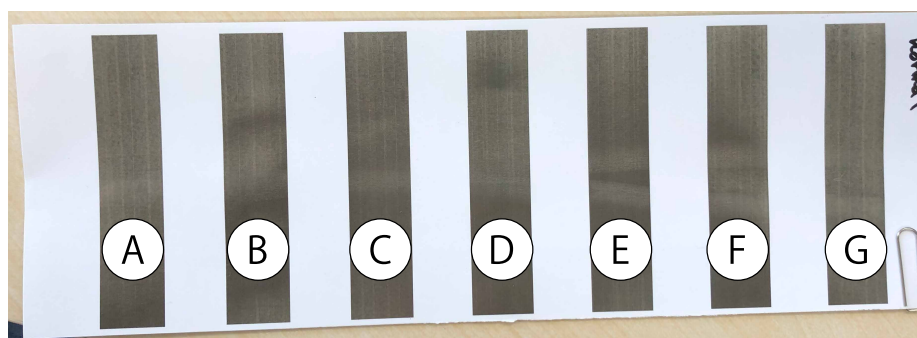


図 7.1: 調査に用いた SilverCodes .

#### 7.1.1 導電性ラミネートフィルム

導電性ラミネートフィルムを用いて加工した SilverCodes をなぞった結果を図??に示す。導電性ラミネートフィルムを用いてラミネート加工を行った場合、全体が導電し一枚の導電板になったため導電性インクが塗布された部分と塗布されていない部分、どちらを触れた場合も静電容量が上昇した。そのため、紙に触れていることしか検出出来なくなり、SilverCodes の加工としては使用できないことがわかった。

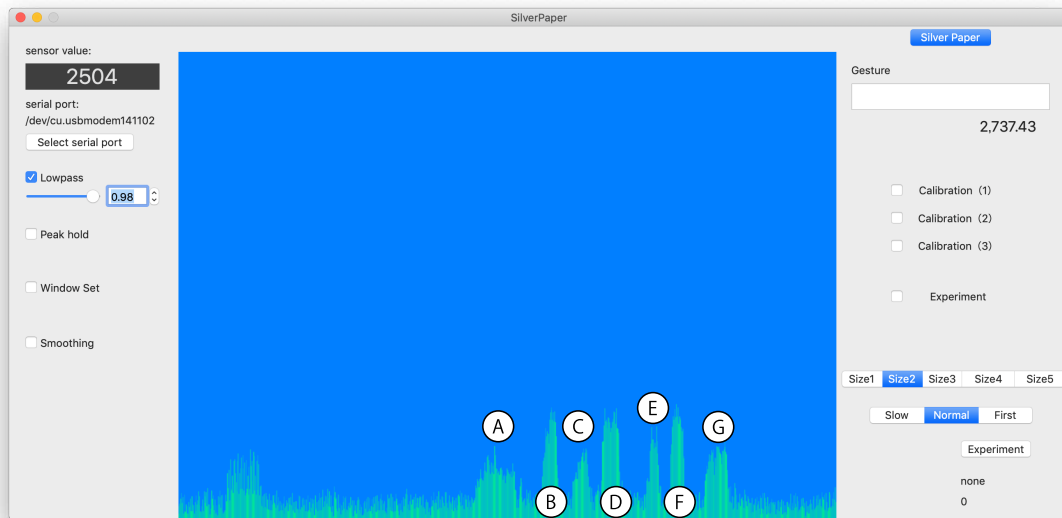


図 7.2: 表面加工無しの SilverCodes を指でなぞった時の静電容量値 .

### 7.1.2 非導電性のラミネートフィルム

非導電性のラミネートフィルムを用いて加工した SilverCodes をなぞった結果を図 7.4 に示す . 非導電性のラミネートフィルムを用いてラミネート加工を行った場合 , タッチした時としていない時の静電容量値の差がかなり小さくなっていることがわかる . ノイズの高さに比べて , 差が小さいため通常のラミネートフィルムを用いた場合 , 誤認識が多くなることが予測される .

### 7.1.3 スマートフォン用フィルム

スマートフォン用フィルムを用いて加工した SilverCodes をなぞった結果を図 7.5 に示す . スマートフォン用のフィルムを用いて加工を行った場合 , タッチした時としていない時の静電容量値の差が小さく , 今回用いている識別子は 3 値の入力が可能となっているが , 2 値の入力を識別することも困難である .

これらの結果から , ラミネートおよびスマートフォンの画面フィルムを用いて , 表面を加工した SilverCodes では 3 値の入力が難しい . そのため , 今後は導電性インクの劣化および指への付着を軽減することができる表面加工についてさらなる調査が必要である .

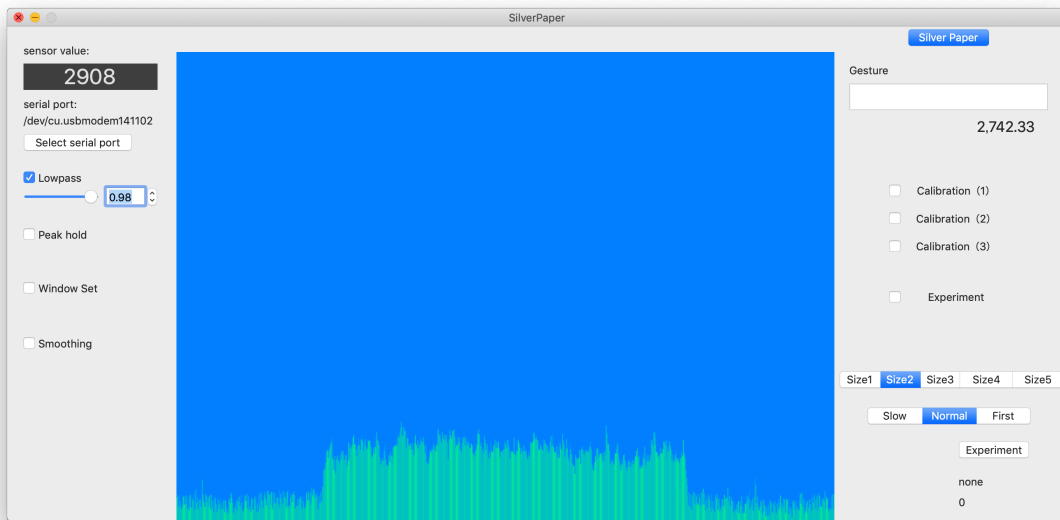


図 7.3: 導電性ラミネートフィルムを用いて加工した SilverCodes を指でなぞった時の静電容量 .

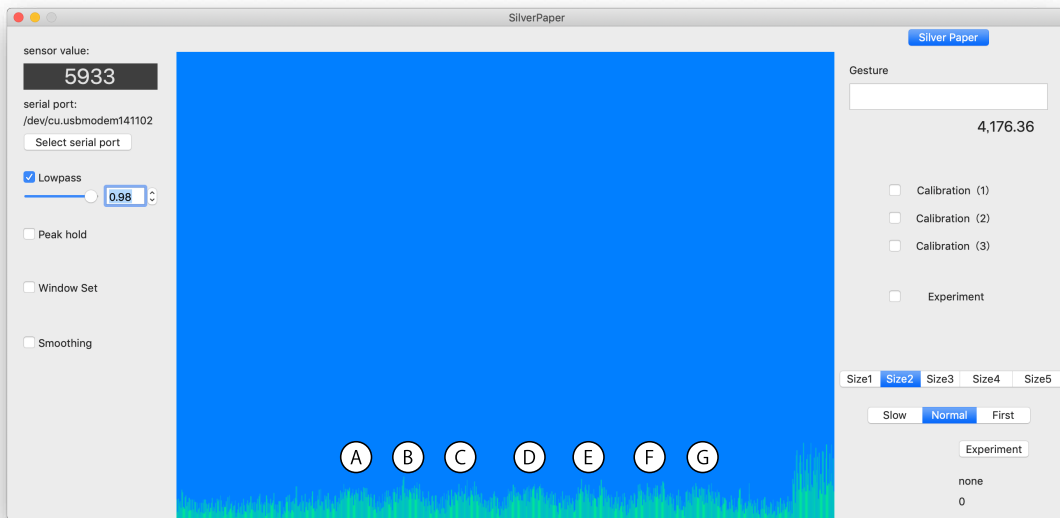


図 7.4: 非導電性のラミネートフィルムを用いて加工した SilverCodes を指でなぞった時の静電容量値 .

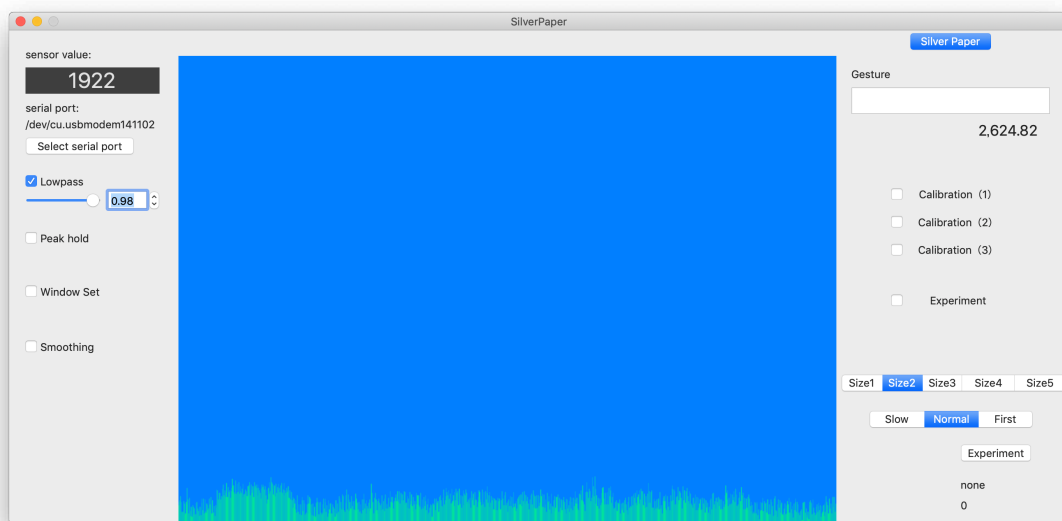


図 7.5: スマートフォン用のフィルムを用いて加工した SilverCodes を指でなぞった時の静電容量値 .

## 第8章 おわりに

本論文にて、指にてなぞることによって入力可能な識別子の集まりである SilverCodes を示した。SilverCodes は静電容量計測に基づいて入力を読み取られており、SilverCodes と静電容量を計測するためのモジュールは単一結線により接続される。また、SilverCodes は導電性インクを光沢紙に印刷することによって作製可能である。識別子の作製のために事前調査を行い2枚の紙を用いた両面印刷によって、識別子が作製可能であることを示した。事前調査を元に SilverCodes およびその識別子を読み取るためのシステムの作製を行い、実験にて識別子の読み取り精度を調査した。実験の結果、95.3%の精度にて識別子の読み取りが可能であることが分かった。今後の課題として、識別子の劣化や銀インクが指に付着するなどの問題を解決するために印刷方法や印刷後の処理について改善を進めていく必要がある。

## 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，川口一画先生，VASILACHE SIMONA MIRELA 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，大学4年生のときから精力的に指導していただき数多くの助言をいただきました。本論文に限らず，これまで執筆してきたその他論文を無事に執筆することができたのは志築文太郎先生の助力があったことです。深く感謝致します。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩，同期，先輩方には様々な面で多くの助言を頂きました。特に WAVE チームの皆様には，論文の添削や研究に対する意見を下さり大変お世話になりました。中でも，池川航史氏には研究に関するアドバイスのみならず，学生生活に関する助言も頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

また，研究生生活に限らず多くの面で支えて頂いた友人方，大学生活にてお世話になった皆様に非常に感謝申し上げます。最後に様々な面で私を支えて頂いた家族に深く感謝致します。

## 参考文献

- [BCG<sup>+</sup>01] Maribeth Back, Jonathan Cohen, Rich Gold, Steve Harrison, and Scott Minneman. Listen Reader: An electronically augmented paper-based book. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '01, pp. 23–29, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [FBG13] Mirko Fetter, Christoph Beckmann, and Tom Gross. MagnetiCode: Physical mobile interaction through time-encoded magnetic identification tags. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, pp. 205–212, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [FPB<sup>+</sup>13] Ana Carina Figueiredo, Ana Lúcia Pinto, Pedro Branco, Nelson Zagalo, and Eduarda Coquet. Bridging Book: A not-so-electronic children's picturebook. In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '13, pp. 569–572, New York, NY, USA, 2013. 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.
- [JB13] Sam Jacoby and Leah Buechley. Drawing the Electric: Storytelling with conductive ink. In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '13, pp. 265–268, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [KD17] Konstantin Klamka and Raimund Dachsel. IllumiPaper: Illuminated interactive paper. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 5605–5618, 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. Association for Computing Machinery.
- [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.
- [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. Association for Computing Machinery.
- [QB10] Jie Qi and Leah Buechley. Electronic Popables: Exploring paper-based computing through an interactive pop-up book. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pp. 121–128, New York, NY, USA, 2010. 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. Association for Computing Machinery.
- [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. Association for Computing Machinery.
- [Yam10] Hiroki Yamada. SequenceBook: Interactive paper book capable of changing the story-lines by shuffling pages. In *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, pp. 4375–4380, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [YOT17] Koichi Yoshino, Koichi Obata, and Satoru Tokuhisa. FLIPPIN': Exploring a paper-based book ui design in a public space. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1508–1517, New York, NY, USA, 2017. ACM.



# 著者論文リスト

## 本論文に関する論文および発表

- 査読あり国際会議

1. Minto Funakoshi, Shun Fujita, Kaori Minawa, Buntarou Shizuki. SilverCodes: Thin, Flexible, and Single-Line Connected Identifiers Inputted by Swiping with a Finger. HCI International 2020 (HCII 2020), Copenhagen, Denmark, July 2020, Vol. 2, LNCS 12182, pp.350-362, Springer.

- 査読なし国内会議論文

1. 小林 孝基, 八箇 恭平, 船越 南斗, 志築 文太郎指にてなぞることにより入力可能な単一結線識別子の検討情報処理学会第 81 回全国大会, 情報処理学会, 2019 年 3 月, 2 pages.
2. 指にてなぞることにより入力可能な単一結線識別子の検討(2) ~ 識別子の重ね合わせ ~ . ヒューマンインタフェース 2019 ( HIS2019 ) , pp.717-723 . ヒューマンインタフェース学会 , 京都 , 2019 年 9 月

## その他論文

- 査読あり国際会議

1. Minto Funakoshi, Koshi Ikegawa, Buntarou Shizuki. Capacitance- and Phase-Based Detection Technique of Finger Bend and Touched Hand Using Ring-Shaped Device. CHI 2019 symposia on Asian CHI Symposium: Emerging HCI Research Collection, May 2019 .
2. Yusuke Sei, Minto Funakoshi, Buntarou Shizuki. Expanding One-Handed Touch Input Vocabulary Using Index Finger on and Above Back-of-Device. 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction (OzCHI '19), pp. 585–589, December 2019.
3. Yusuke Sei, Minto Funakoshi, Buntarou Shizuki. Expanding Input Vocabulary Using Index Finger on and Above Back of Smartphone. CHI 2020 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, April 2020, 4 pages.

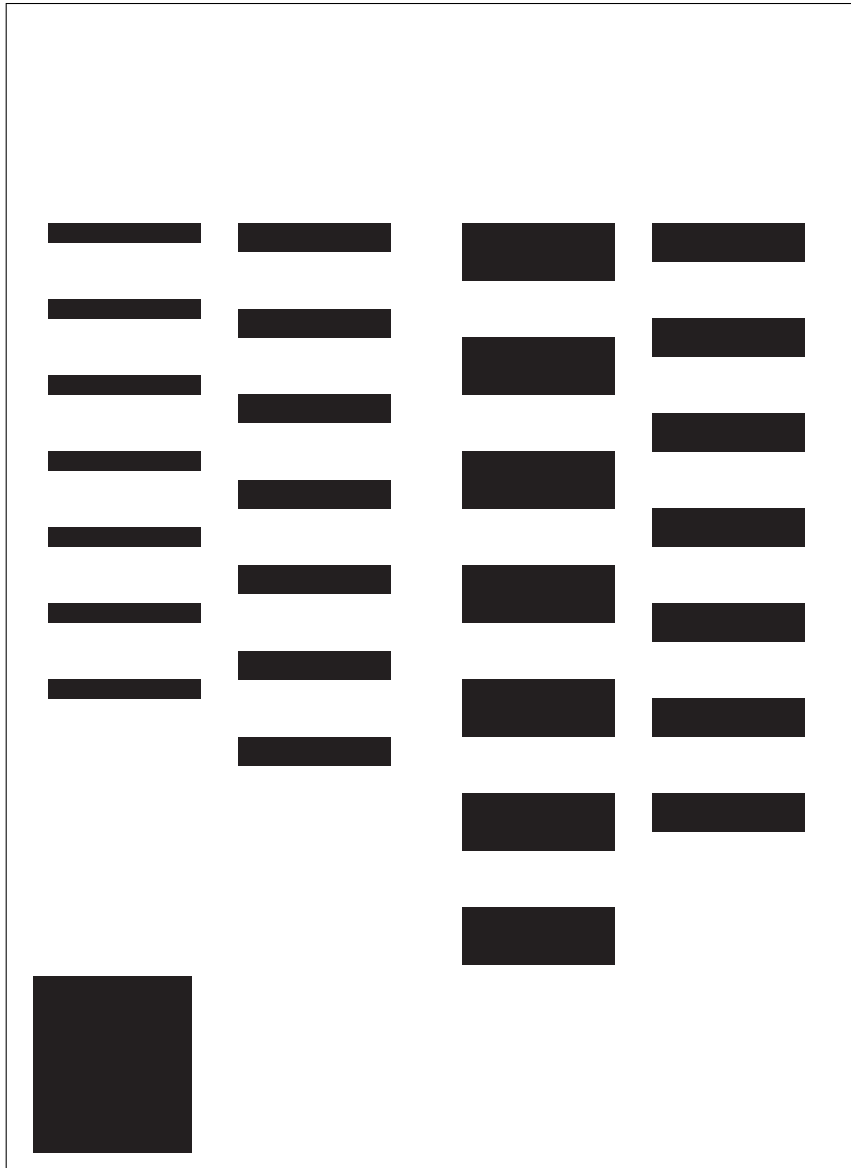
- 査読なし国内会議論文

1. 船越南斗, 池川航史, 志築文太郎, 高橋伸位相に基づく指輪型入力デバイスの検討情報処理学会研究報告, Vol.2019-HCI-182 No34, 6 pages, 情報処理学会, 東京, 2019年3月.
2. 小林孝基, 八箇恭平, 船越南斗, 志築文太郎指にてなぞることにより入力可能な単一結線識別子の検討情報処理学会第81回全国大会, 情報処理学会, 2019年3月, 2 pages.
3. 船越南斗, 志築文太郎指の曲げおよびタッチに使用した手を検出可能な指輪型デバイスの検討. 第27回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2019), 日本ソフトウェア科学会, 2019年9月, 2pages.
4. 清佑輔, 船越南斗, 志築文太郎片手操作時の端末背面における人差し指を用いたタッチ入力拡張手法の提案. 第27回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2019), 日本ソフトウェア科学会, 2019年9月, 2pages.

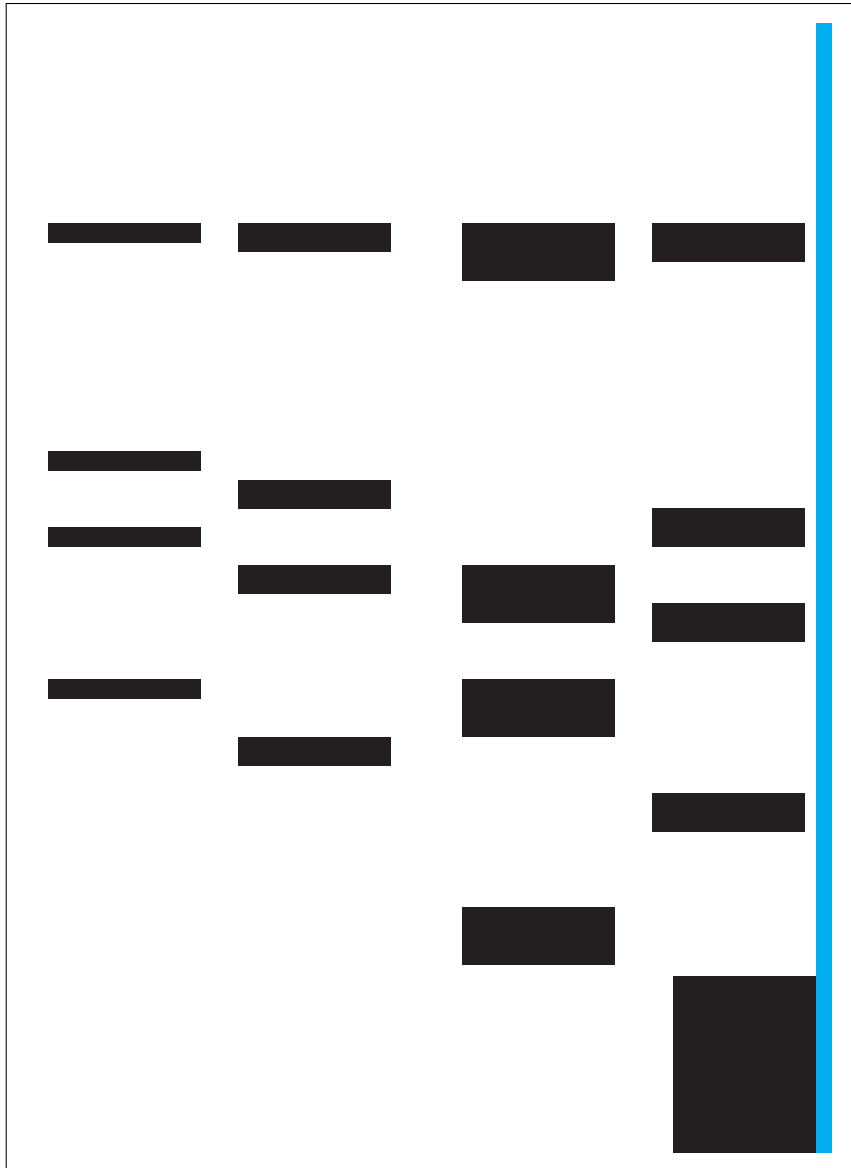
## 付録A 実験に用いた識別子

本付録にて、実験に用いた識別子の構成を示す。これらを A4 の光沢紙に印刷して実験を実施した。

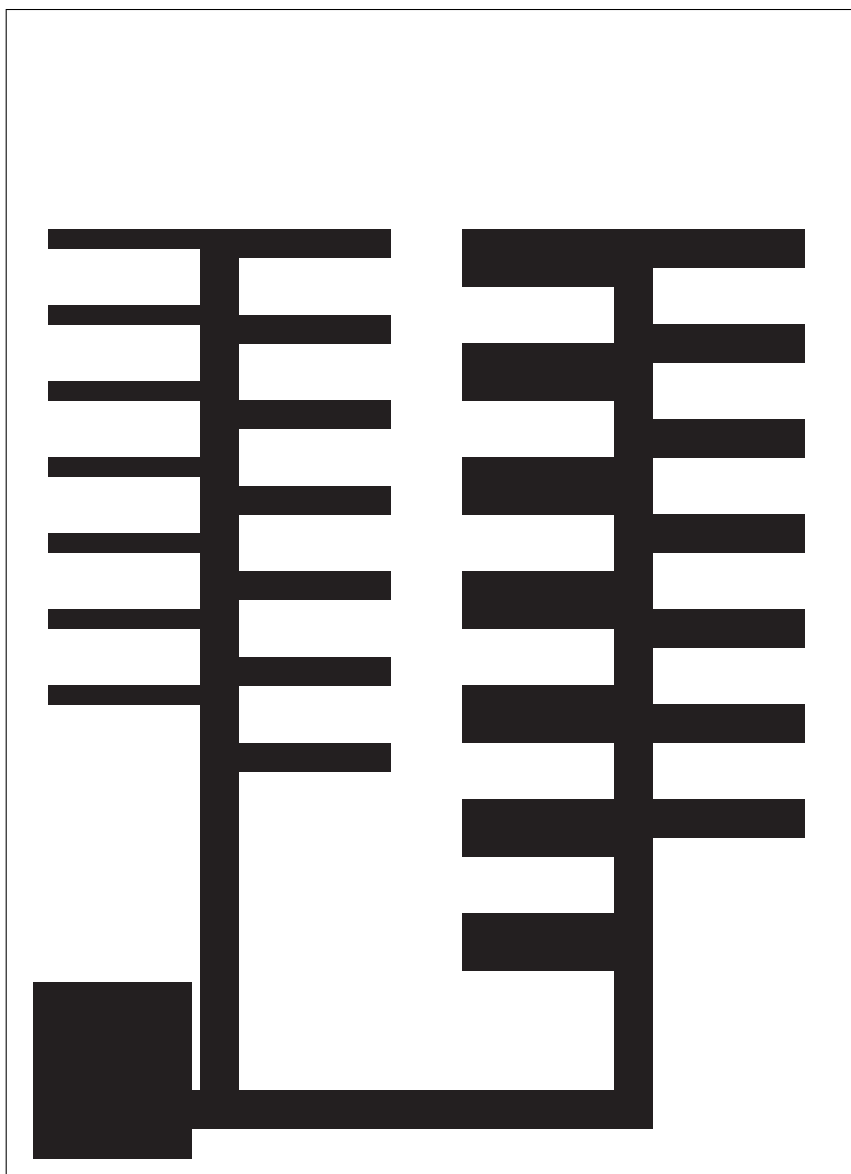
## A.1 上部の紙の表面



## A.2 上部の紙の裏面



### A.3 下部の紙の表面



#### A.4 下部の紙の裏面

