

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～

船越 南斗*¹ 藤田 俊*¹ 三縄 香織*¹ 志築 文太郎*²

Exploring Single-Line Connected Identification Tags Inputted by Swiping with a Finger (2) -Stacked Tag Identification-

Minto Funakoshi*¹, Shun Fujita*¹, Kaori Minawa*¹, and Buntarou Shizuki*²

Abstract – We are developing an identifier that can be input by swiping with a finger. Our identifier is in the form of a barcode and is printed on paper using conductive ink. Using a capacitance measurement module, our system reads data based on the capacitance change as the identifier is swiped. Also, two or more identifiers and the capacitance measurement module can be connected by a single-line connection. In this study, we newly developed an algorithm to read the data of the identifier from the capacitance obtained as an identifier is swiped. Moreover, we found that it is possible to read the data even when the identifiers are stacked. As a result of our preliminary investigation of reading accuracy, it was found that the reading was possible with the accuracy of 95.3% in this paper, we also show example applications of stacked identifiers.

Keywords : conductive ink, augmented paper, tangible user interface, prototyping

1. はじめに

我々是指にてなぞることにより入力可能な識別子の開発を行ってきた^[1]。我々の識別子のコンセプトを図1に示す。この識別子は導電性インクを用いて紙に印刷されたバーコード状の電極であり、ユーザは識別子をなぞることによりビット列で表されるデータの入力ができる。複数の識別子は静電容量計測モジュール1個と単一の結線により接続される。そのため、モジュールに接続された識別子を別の識別子へ取り替えることは容易であり、1つのモジュールに接続される識別子の数を容易に増やすことができる。

今回、我々は識別子のこれらの特徴に加え、識別子が重ねられることに着目し、インタラクティブな本型システムの作製に応用できると考えた。これまでも導電性インクを用いた本型システムが研究されてきた^{[2],[3]}。Yoshinoら^[2]は、導電性インクにより印刷されたセンサを組み込むことにより、インタラクティブな本を作製した。Yoshinoらのシステムではタッチ入力が可能だが、センサが多くなるとモジュールとの結線数が増える問題がある。これに対して、我々のシステムでは、タッチに対してなぞることによる入力を行う必要があるが、複数の識別子とモジュールが単

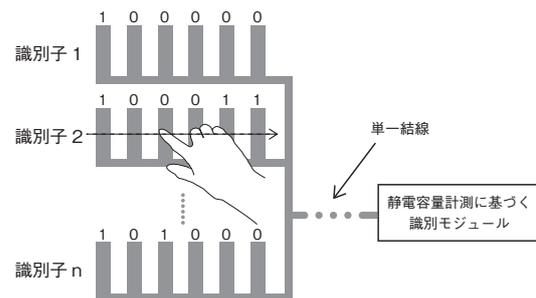


図1 識別子のコンセプト。
Fig.1 Concept of our identifiers.

一の結線により接続される。Qiら^[3]は、本の各ページに銅箔テープおよび導電性インクなどを用いて作製されたスイッチ、スライダー、圧力センサ、曲げセンサ、タッチセンサおよびLEDなどの入出力要素が取り付けられている飛び出す絵本を作製した。Qiらのシステムは、ページから着脱することが可能なモジュールを使用しているが、各ページにLEDなどの回路素子を取り付ける必要がある。これに対して、我々のシステムでは入出力要素が限定されるが、本のページに回路素子を取り付ける必要がない。そのためこれらの研究に対して、我々のインタラクティブな本型システムは構造が単純であり製作も容易である。

今回、識別子をなぞっている際に変化する静電容量に基づいてデータの読み取りを行うアルゴリズムを開発した。また、我々は重ねた識別子の読み取り精度の調査を行った。本論文では、識別子の実装とその識別

*1: 筑波大学コンピュータサイエンス専攻

*2: 筑波大学システム情報系

*1: Department of Computer Science, University of Tsukuba

*2: Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

子を重ねた際の読み取り精度の調査について報告する。

2. 関連研究

本節では、既存の識別子に関する研究、導電性インクによるインタラクティブな紙に関する研究およびインタラクションが可能な本型システムについて議論する。

2.1 識別子

Harrison ら^[4]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^[5]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。

本研究では、導電性インクにて印刷された識別子をなぞることによって発生する静電容量の変化を検出して識別子の読み取りを行う。

2.2 導電性インクを用いたインタラクティブな紙

Jacoby ら^[6]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^[7]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^[8]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。

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 インタラクティブな本型システム

Qi ら^[3]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^[2]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。

電気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^{[9],[10]}。また、Figueiredo ら^[11]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。

本研究の本型システムは、紙と導電性インクによって構成された各ページを本として綴じ、結線することで製作される。結線は各ページに穴をあけ導電性インクを流し込むことによって行われているため、先行研究に比べ構造が単純であり製作は容易である。

3. 実装

本節では、まず本システム全体の概要について述べ、その後本システムの構成要素である識別子、静電容量計測モジュールおよびソフトウェアなどのシステムの構成要素の実装について述べる。

3.1 システム全体の概要

本システムの全体図を図 2 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。

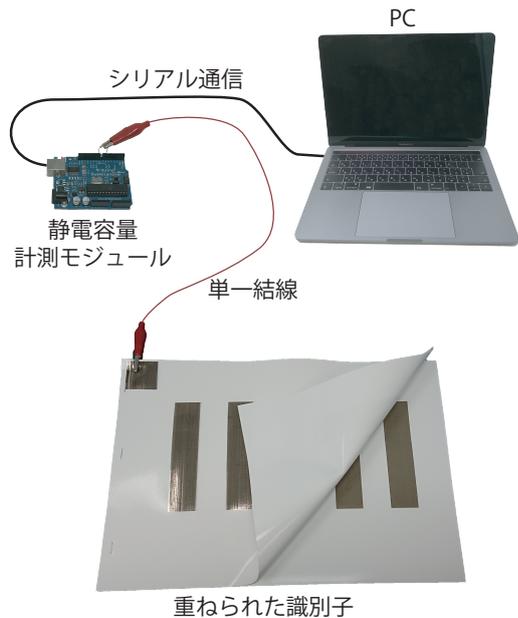


図2 システムの外観.
Fig. 2 Overview of our system.

3.2 識別子

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。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。

3.2.1 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3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 ϕ 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

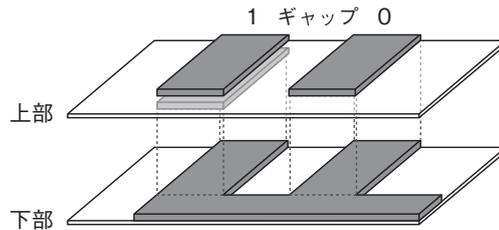


図3 識別子の構造.
Fig. 3 Structure of our identifier.

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。

3.2.2 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。

3.3 静電容量計測モジュール

本システムでは静電容量の計測を行うために Arduino およびそのライブラリの Capacitive Sensing Library¹を用いた。このライブラリはマイコンの送信ピンの状態を変更し、受信ピンの状態が送信ピンの状態になるまでの時間 t を計測することにより静電容量を計測する。 t は、識別子により形成されるキャパシタンス C と抵抗 R によって定まる時定数 $R \times C$ によって変化する。 R は $1\text{ M}\Omega$ にて固定しており、 C は識別子に指が触れたか触れてないかおよびどの印刷パタンの電極に触れたかによって変化するため、この静電容量計測モジュールは 3 状態を識別するための静電容量が計測可能になる。

3.4 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

¹ <https://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor/> (2019 年 7 月 8 日最終閲覧)

の識別アルゴリズムは大きく分けて、 ϕ のキャリブレーションおよびビット列の読み取りの2段階に分かれる。

3.4.1 ϕ のキャリブレーション

このシステムでは、 ϕ 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。

3.4.2 識別子の読み取り

ϕ 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、 ϕ 以外(0もしくは1)、および ϕ 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, 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, 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, 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, データ読み取り待機)。その後、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, 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。

4. 予備実験

提案システムにおいて、識別子を重ねることによる読み取り精度への影響および適切な識別子のパターンを調査するために、形状の異なる識別子を複数配置した本型システムを製作し、それぞれをなぞることにより

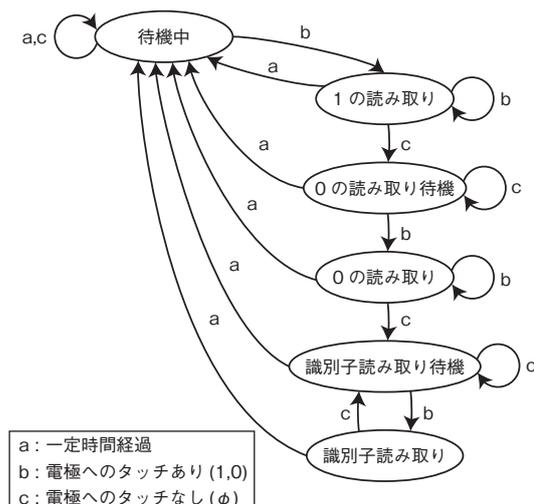


図4 識別子の読み込みのための状態遷移図。
Fig. 4 State diagram for reading an identifier.

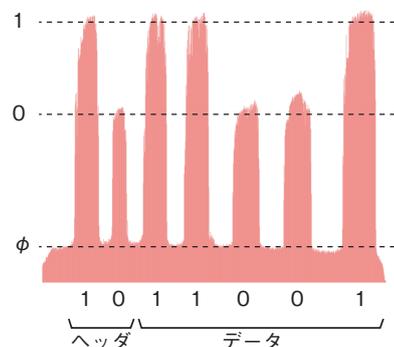


図5 静電容量の波形。
Fig. 5 Waveform of the capacitance.

読み取り精度を測定した。

4.1 実験参加者および実験環境

実験参加者は著者ら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。

4.2 内容

実験に用いた本型システムはA4用紙短辺をステープラにて左綴じした4枚の識別子からなる冊子である。1枚につき4種類の識別子が印刷されている。識別子と静電容量計測モジュールとの結線は4枚目の識別子に対してワニ口クリップを用いて行った(図6)。

本実験において用いた識別子の各部の名称を図7に示す。本実験では識別子の電極の間隔 W_{gap} を15mm, 識別子の幅 H を40mmとし、電極の幅 W_{bar} を5mm, 7.5mm, 10mm, 15mmとした。各識別子は重ねの影響および W_{bar} の影響による読み取りエラー率を比較するため全て同一の印刷パターンであり、データは11001とした。



図6 識別子とワニ口クリップの接続.
Fig. 6 Connection of an identifier and an alligator clip.

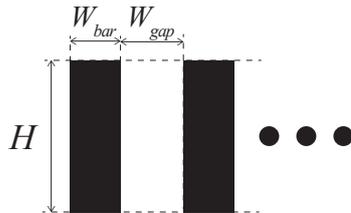


図7 識別子の各部の寸法の名称.
Fig. 7 Dimention names of an identifier.

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_{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×4識別子×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φのキャリブレーションを実施した。

4.3 結果

読み取り結果を表1に示す。電極幅については15mmにおける読み取り精度が平均91.3%と最も低くなった。このことから、電極幅が太いほど認識精度が低くなる可能性がある。しかし、識別子の印刷位置が影響している可能性も考えられるため今後更なる調査が必要である。また、枚数については4枚目の識別子における読み取り精度が他に比べ低くなった。これは、識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。今後はより多くの実験参加者に識別子をなぞってもらい、このような読み取り精度になった原因を調査する。

また、読み取りエラーの内、31.1%が11111もしくは00000という全て同じビットにより構成されるデータと誤認識した。この原因としてヘッダの内、1もしくは0の読み取りに失敗したことによって、データの読み取りエラーが発生したこと考えられる。ヘッダの読み取りの際、1もしくは0の静電容量が極端に異なる、もしくは近似している場合に読み取りエラーとし、ユーザに識別子をなぞりなおさせるシステムを作る必要がある。

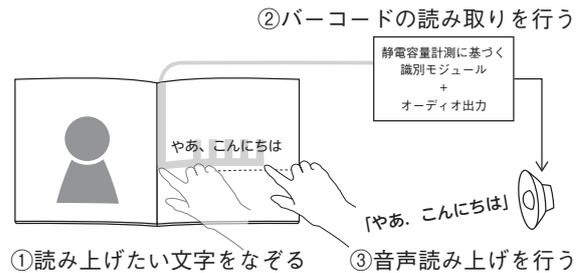


図8 文章の音声読み上げを行う本.
Fig. 8 Book with voice reading function.

5. アプリケーション

本システムを応用して製作可能なアプリケーション例を挙げる。

5.1 読み上げ機能付きの本

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8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。

5.2 外部ディスプレイを用いたインタラクティブな絵本

本システムを応用することによって、Bridging Book [11]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9)。

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9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。

6. 議論および今後の課題

実験にてシステムは、11001というデータを111111や00000などの全てのビットが同じデータと誤認識するケースが多かった。このため、このようなデータの識別子は、読み取りの誤認識に繋がるため使用に適さないことが考えられる。今回の実験では、識別子の幅が小さいほど読み取り精度が高かった。そのため、

表 1 予備実験の結果.

Table 1 Result of the preliminary experiment.

電極の幅 W_{bar}	読み取り精度									
	1 枚目		2 枚目		3 枚目		4 枚目		合計	
	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
5mm	96.7%	2.36%	98.3%	2.36%	100.0%	0.00%	95.0%	7.07%	97.5%	4.33%
7.5mm	100.0%	0.00%	93.3%	9.43%	98.3%	2.36%	96.7%	4.71%	97.1%	5.94%
10mm	100.0%	0.00%	98.3%	2.36%	96.7%	4.71%	86.7%	9.43%	95.4%	7.49%
15mm	88.3%	13.12%	90.0%	4.08%	96.7%	2.36%	90.0%	14.14%	91.3%	10.43%
合計	96.3%	8.20%	95.0%	6.45%	97.9%	3.20%	92.1%	10.30%	95.3%	7.80%

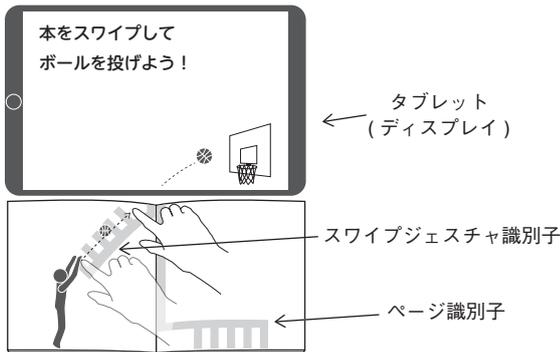


図 9 ディスプレイを用いた絵本の動作.

Fig. 9 Picture book with an external display.

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. また, 識別子の上部にプリント用紙を乗せた状態にて読み取りが可能なシステムの実装を目指す. これにより, プリント用紙に印刷された絵をなぞることにより入力可能な絵本の作製が可能になる. これは, 静電容量計測モジュールの抵抗 R を変更し, センサの感度を上げることにより, 紙を状態においても識別子の読み取りの実現可能性がある.

7. まとめ

導電性インクにより印刷可能な識別子の読み取りアルゴリズムおよび識別子を重ねた際の読み取り精度の調査を示した. 複数の識別子は1つの静電容量計測モジュールと単一の結線により接続され, さらに識別子を重ねられることが分かった. 識別子に10のヘッダを付けることにより, ユーザおよびその姿勢によって計測される静電容量が異なる問題を解決した. 識別子の読み取りアルゴリズムは, 識別子の電極に指が触れていない状況における静電容量を予め計測し, ヘッダの静電容量からビットデータの読み取りを行う. 重ねた識別子の読み取り精度を調査を行った結果, 認識精度95.3%であった. 今後は, 絵もしくは文をなぞることによって読み取り可能な識別子を作製するために,

上に紙を敷いた状態にて読み取り可能な識別子の実現を目指す.

参考文献

- [1] 小林, 八箇, 船越, 志築: 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; 第81回全国大会講演論文集, Vol. 4, 情報処理学会, pp. 275–276 (2019).
- [2] Yoshino, K., Obata, K. and Tokuhisa, S.: FLIP-PIN: 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, ACM, pp. 1508–1517 (2017).
- [3] Qi, J. and Buechley, L.: 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, ACM, pp. 121–128 (2010).
- [4] Harrison, C., Xiao, R. and Hudson, S.: 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, ACM, pp. 563–568 (2012).
- [5] Fetter, M., Beckmann, C. and Gross, T.: Magneti-Code: Physical Mobile Interaction Through Time-encoded Magnetic Identification Tags; In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, ACM, pp. 205–212 (2013).
- [6] Jacoby, S. and Buechley, L.: Drawing the Electric: Storytelling with Conductive Ink; In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '13, ACM, pp. 265–268 (2013).
- [7] Klamka, K. and Dachselt, R.: IllumiPaper: Illuminated Interactive Paper; In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, ACM, pp. 5605–5618 (2017).
- [8] Li, H., Brockmeyer, E., Carter, E. J., Fromm, J., Hudson, S. E., Patel, S. N. and Sample, A.: 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, ACM, pp. 5885–5896 (2016).
- [9] Back, M., Cohen, J., Gold, R., Harrison, S. and Minneman, S.: Listen Reader: An Electronically Augmented Paper-based Book; In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '01, ACM, pp. 23–29 (2001).

- [10] Yamada, H.: SequenceBook: Interactive Paper Book Capable of Changing the Storylines by Shuffling Pages; In *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, ACM, pp. 4375–4380 (2010).
- [11] Figueiredo, A. C., Pinto, A. L., Branco, P., Zalgalo, N. and Coquet, E.: Bridging Book: A Not-so-electronic Children's Picturebook; In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '13, ACM, pp. 569–572 (2013).