

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

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認識システム

川畑 裕也

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

2017年3月

概要

本研究において、静電容量方式マルチタッチパネルを用いて検出可能なマーカを示す。本研究にて示すマーカは複数の導電体と非導電体を交互に並べた構造を持つ。マーカを構成する際に長さの異なる非導電体を用いることにより、導電体間の距離を変化させることができる。ユーザは、マーカをタッチパネル上に設置し、マーカ表面に対してスワイプ操作を行う。これにより、マーカの導電体の位置に対応するタッチ点が連続してタッチパネル上に発生する。システムはこのタッチ点間の距離の長短の組み合わせを用いてマーカの認識を行う。本手法は1つずつ発生したタッチ点間の距離を用いて認識を行うため、タッチを発生させ続けることなくマーカの認識を行うことができる。このため、タッチパネルの同時に認識できるタッチ点の数に制限されることなくマーカの検出を行うことができる。本研究においてマーカのプロトタイプを作製し、プロトタイプを用いた実験を行い、マーカの設計指針を示した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	2
1.3	本研究の貢献	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	関連研究	5
2.1	導電体を用いてタッチを拡張する研究	5
2.2	実物体ウィジェットを検出する研究	6
2.3	タッチ点の位置関係を用いて物体や手の検出を行う研究	7
2.4	連続したタッチ点を検出する手法	7
第3章	検出手法	9
3.1	マーカの検出手法	9
3.2	指によるタッチとマーカによるタッチの識別手法	11
第4章	マーカ素材の検討	12
4.1	導電フィラメント, 非導電フィラメント	12
4.1.1	プロトタイプ1	12
4.1.2	プロトタイプ2	14
4.1.3	プロトタイプ3	17
4.2	金属箔テープ, 木製棒	18
4.3	アルミ板, アクリル板	18
4.4	銀ナノインク	21
第5章	評価実験	22
5.1	実験概要	22
5.2	実験結果	23
5.3	考察	26
第6章	議論	28
6.1	マーカの素材	28
6.2	マーカの拡張性	28

6.2.1	左右スワイプの検出	28
6.2.2	検出可能なマーカの種類	28
第7章	アプリケーション	31
7.1	機能呼び出し	31
7.2	マーカによるユーザ認証	31
7.3	端末連携システム	32
第8章	まとめ	36
	謝辞	37
	参考文献	39
付録A	実験に使用したマーカ	45

目次

1.1	作製したマーカの一例（導電部：アルミ板，非導電部：アクリル板）	3
1.2	タッチパネル上にてマーカにスワイプ操作を行っている写真	4
3.1	マーカの構成	9
3.2	マーカによるタッチ発生	10
3.3	マーカによるタッチの発生順	10
3.4	指によるスワイプ操作とマーカへのスワイプ操作により発生したタッチ	11
4.1	3Dプリンタを用いて実装したマーカのモデル	13
4.2	3Dプリンタを用いて実装したマーカ（表面）	13
4.3	3Dプリンタを用いて実装したマーカ（裏面）	13
4.4	プロトタイプ1の実験の様子	14
4.5	プロトタイプ2のモデル	14
4.6	マーカによるタッチ点の発生順	15
4.7	マーカごとのタッチ点の距離	15
4.8	3種類のプロトタイプ2	16
4.9	プロトタイプ2の実験の様子	17
4.10	プロトタイプ3	18
4.11	アルミ箔テープと木製棒を用いたマーカ	19
4.12	マーカの導電部間の距離ごとのタッチ点間の距離の平均（エラーバーは標準偏差を表す）	19
4.13	木製棒と金属箔テープを用いたマーカの試作品群	20
4.14	アルミ板，アクリル板を用いたマーカ	21
4.15	銀ナノインクを用いたマーカ	21
5.1	実験に使用したマーカの模式図（導電部が4 mm，非導電部が12 mmの場合）	22
5.2	実験に使用したマーカの一例	23
5.3	各導電部にて算出した導電部間距離の平均（エラーバーは標準偏差を表す）	24
5.4	各導電部にて算出した導電部間距離の最大値，最小値	25
5.5	各導電部にて算出した導電部間距離の有意確率	27
6.1	マーカによる左右スワイプの検出	29
6.2	2種類の非導電部2つによって作製可能なマーカ	29

6.3	3種類の非導電部2つによって作製可能なマーカ	30
6.4	2種類の非導電部3つによって作製可能なマーカ	30
7.1	アプリケーション（機能呼び出し）	32
7.2	ユーザ認証システムの概要	33
7.3	端末連携システムの概要	34
7.4	端末連携システムのイメージ図	35
7.5	端末ケース（A：背面，B：表面）	35
A.1	導電部 6 mm，非導電部 1 mm	45
A.2	導電部 6 mm，非導電部 2 mm	45
A.3	導電部 6 mm，非導電部 3 mm	46
A.4	導電部 6 mm，非導電部 4 mm	46
A.5	導電部 7 mm，非導電部 1 mm	47
A.6	導電部 7 mm，非導電部 2 mm	47
A.7	導電部 7 mm，非導電部 3 mm	48
A.8	導電部 7 mm，非導電部 4 mm	48
A.9	導電部 8 mm，非導電部 1 mm	49
A.10	導電部 8 mm，非導電部 2 mm	49
A.11	導電部 8 mm，非導電部 3 mm	50
A.12	導電部 8 mm，非導電部 4 mm	50
A.13	導電部 9 mm，非導電部 1 mm	51
A.14	導電部 9 mm，非導電部 2 mm	51
A.15	導電部 9 mm，非導電部 3 mm	52
A.16	導電部 9 mm，非導電部 4 mm	52
A.17	導電部 10 mm，非導電部 1 mm	53
A.18	導電部 10 mm，非導電部 2 mm	53
A.19	導電部 10 mm，非導電部 3 mm	54
A.20	導電部 10 mm，非導電部 4 mm	54
A.21	導電部 11 mm，非導電部 1 mm	55
A.22	導電部 11 mm，非導電部 2 mm	55
A.23	導電部 11 mm，非導電部 3 mm	56
A.24	導電部 11 mm，非導電部 4 mm	56
A.25	導電部 12 mm，非導電部 1 mm	57
A.26	導電部 12 mm，非導電部 2 mm	57
A.27	導電部 12 mm，非導電部 3 mm	58
A.28	導電部 12 mm，非導電部 4 mm	58
A.29	導電部 13 mm，非導電部 1 mm	59
A.30	導電部 13 mm，非導電部 2 mm	59

A.31 導電部 13 mm, 非導電部 3 mm	60
A.32 導電部 13 mm, 非導電部 4 mm	60
A.33 導電部 14 mm, 非導電部 1 mm	61
A.34 導電部 14 mm, 非導電部 2 mm	61
A.35 導電部 14 mm, 非導電部 3 mm	62
A.36 導電部 14 mm, 非導電部 4 mm	62
A.37 導電部 15 mm, 非導電部 1 mm	63
A.38 導電部 15 mm, 非導電部 2 mm	63
A.39 導電部 15 mm, 非導電部 3 mm	64
A.40 導電部 15 mm, 非導電部 4 mm	64

表 目 次

4.1	プロトタイプ2のマーカの検出精度	16
5.1	各導電部, 各非導電部の組み合わせにおける3点のタッチ発生の可否	23

第1章 はじめに

本論文において、複数のタッチ点を同時に発生させることなく、かつユーザの任意のタイミングにて検出を行うことができるマーカを示す。本章にて、背景として静電容量方式タッチパネル上にて用いる実物体オブジェクトの検出手法とその課題を述べる。次に、本研究の目的とアプローチ、貢献を示し、最後に本論文の構成を述べる。

1.1 背景

近年、スマートフォンやタブレット端末など、静電容量方式マルチタッチディスプレイ（以降、タッチパネル）を搭載したデバイスが普及している。タッチパネルはボタンやスライダなど様々な操作用オブジェクトを表示できるため、アプリケーションは用途毎に適したインタフェースを提供できる。一方、タッチパネルは平坦であるため、タッチパネルに表示された操作用オブジェクトに指で触れた際の触覚的なフィードバックが乏しい。

この問題を解決するため、タッチパネル上にて検出可能な実物体オブジェクトに対して機能を割り当て、ユーザが直感的に操作を行う実物体ユーザインタフェースが研究されてきた [YCL⁺11, CMRB12, KWRE11, TKKN05, LCT⁺14, VNT⁺13]。これらの手法はタッチパネル上にて実物体オブジェクトを操作するため、タッチパネルの利点とユーザによる入力に触覚的なフィードバックを与えることができる実物体オブジェクトの利点を併用することができる。また、形のない情報に物理的実体を与えることができるため、ユーザが端末とオブジェクトの対応関係が把握しやすくなるという利点がある。しかし、タッチパネル上の導電体を電氣的に接続することによりタッチパネルに複数のタッチ点を発生させ続け、これを用いてマーカの位置認識を行う PUCs [VNT⁺13] において、タッチパネルの検出可能なタッチ点の数は一定であるため、同時に多くの PUCs を検出することができないという問題があった。また、TUIC [YCL⁺11], Virtual Tangible Widgets [TKKN05], および Gauss Brick [LCT⁺14] は実物体オブジェクトの検出にはタッチパネル以外に追加センサを必要とした。CapStones and ZebraWidgets [CMRB12], および CapWidgets [KWRE11] は1つのウィジェットにて触り方を変えることにより複数の入力を行うことができるが、ウィジェット本体の区別をつけることはできなかった。

また、これらのオブジェクトは、オブジェクトによって発生した静電容量の変化を用いてタッチパネル上での検出を行う。そのため、ユーザが誤ってオブジェクトに指が触れてしまった場合、もしくはユーザがタッチパネル上のオブジェクトを移動させる場合にもマーカの検出を行う。この仕組みは、オブジェクトの設置や移動を検出する場合には有効であるが、例

例えば端末へのログイン（個人認証）や、操作ウィンドウの呼び出しなど、複数回同じ入力が行われることが望ましくない機能をオブジェクトに割り当てる場合に不都合となる。

本研究はこれらの課題を解決するため、複数のタッチ点を同時に発生させることなく、かつユーザの任意のタイミングにて検出を行うマーカを実装する。

1.2 目的とアプローチ

本研究の目的は、背景において述べた課題を解決し、複数のタッチ点を同時に発生させることなく、かつユーザの任意のタイミングにて検出を行うマーカを実装することである。この目的を達成するアプローチとして、タッチパネルの他に追加のセンサを必要とせず、スワイプ操作により検出可能な実物体マーカを実装する。

本研究はタッチパネル上に連続的にタッチ点を発生させ、その発生位置の距離を用いてタッチパネル搭載端末が検出を行うマーカ（図 1.1）を実装した。本研究が示すこのマーカは交互に並べられた複数の導電体と非導電体から構成される（導電体：図 1.1 銀色部分，非導電体：図 1.1 透明部分）。システムにマーカを検出させるために、ユーザは、マーカをタッチパネルに設置し、マーカ表面に対してスワイプ操作を行う（図 1.2）。この際、ユーザの指がマーカを構成する導電体に触れると、指がタッチパネルに直接触れた場合と同様にタッチパネルにタッチ点が発生する。このため、スワイプ操作を行った際にマーカの導電体の位置に対応したタッチ点が連続してタッチパネルに発生する。システムはこのタッチ点間の距離の長短の組み合わせを用いてマーカを検出する。また、ユーザがスワイプ操作を行った場合、タッチパネルに 1 点のタッチが発生するが、連続したタッチが発生しないためマーカによるタッチとして認識されることはない。タッチパネルにマーカがタッチ点を発生させ続けることはないため、ユーザはタッチパネルに同時に多くのマーカを設置できる。

1.3 本研究の貢献

本研究の貢献を以下に示す。

- 連続した複数のタッチ点の距離関係を用いたマーカの検出手法を示した。
- 複数の素材を用いてマーカのプロトタイプを作製し、マーカの検出可能なタッチ点間の距離を明らかにした。
- 本研究のマーカ検出手法を用いたアプリケーション例を示すことにより、本研究の有用性を示した。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

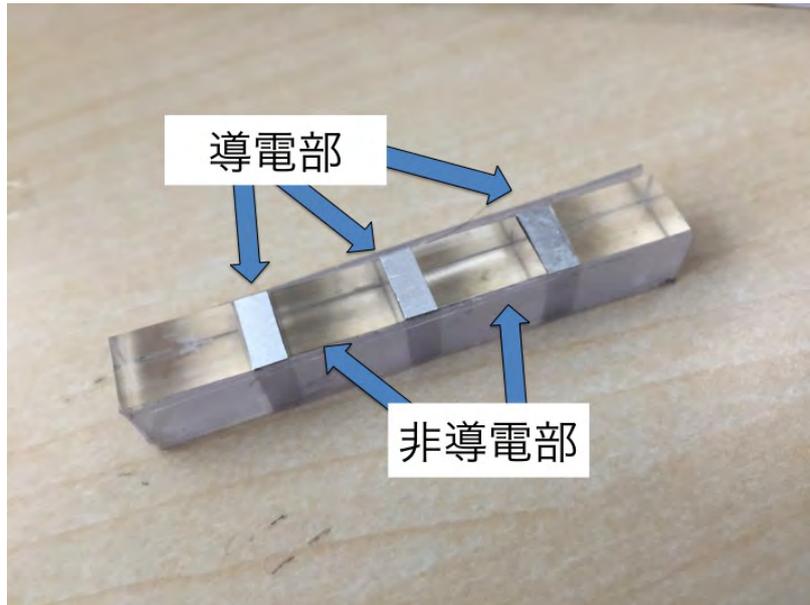


図 1.1: 作製したマーカの一例（導電部：アルミ板，非導電部：アクリル板）

第 1 章では，研究背景，目的，本研究の貢献を述べた．第 2 章では，関連研究を述べる．第 3 章では，本研究が示すマーカの検出手法を述べる．第 4 章では，このマーカの素材を検討を述べる．第 5 章では，このマーカの評価実験を述べる．第 6 章では，このマーカについての議論を行う．第 7 章では，このマーカを活用したアプリケーション例を述べる．第 8 章では，本研究の結論を述べる．

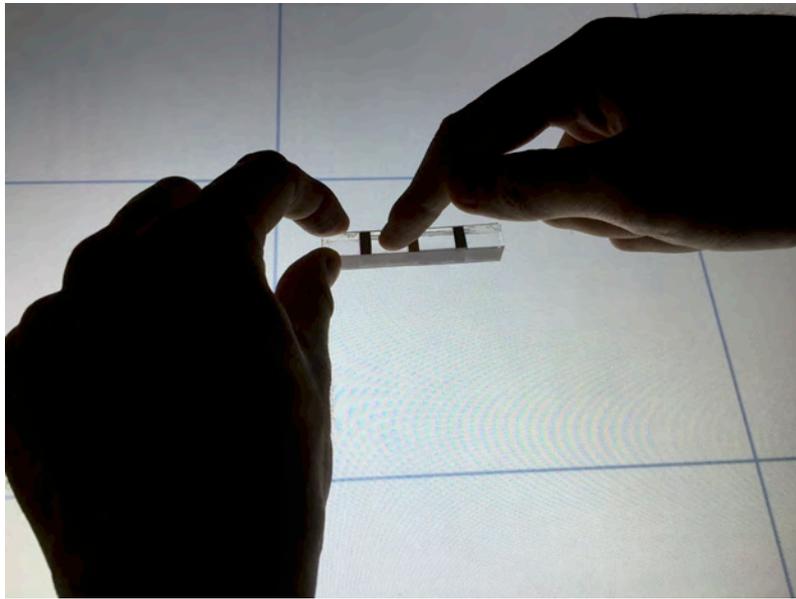


図 1.2: タッチパネル上にてマークにスワイプ操作を行っている写真

第2章 関連研究

本研究は導電体を用いてタッチの発生する位置を制御し、マーカの検出を行う。本章においては導電体を用いてタッチを拡張する研究、および実物体ウィジェットの検出を行う研究を述べる。また、タッチ点の位置関係を用いて物体や手の検出を行う研究、および連続して発生した入力を用いた研究を述べ、本研究の立ち位置を示す。

2.1 導電体を用いてタッチを拡張する研究

本研究の示すマーカは導電体と非導電体により構成されている。ユーザがタッチパネルに設置したマーカの導電体に触れることにより、タッチパネルに直接接触することなくタッチ点を発生させる。このように導電体を用いてタッチパネルに間接的に発生させたタッチを用いて物体の検出を行う研究がある。

Clip-on Gadgets [YTH⁺11] はタッチパネルの端に導電ゴムを含む物理ボタンを取り付け、導電ゴムを介してタッチパネルへ入力を行うウィジェットである。Kawaharaらは導電性インクを用いて電気回路を印刷する手法を示した [KHC⁺13]。この手法を用いて、ExtensionSticker [KM14, KM15] は導電インクを介してタッチパネル外の領域を操作領域として拡張する。これにより、タッチパネル外の領域においてもタッチパネルへと同様のタッチ入力を行うことができる。加藤らは導電性インクを用いてタッチパネル上に設置したシートの1点を触れることにより複数のタッチを発生させる手法を示した [加藤 14]。3Dプリンタを用いてこの検出手法を利用可能なオブジェクトを作製する研究も示されている [KM16, 上野 16]。また、Chanらの作製したマーカ [CMRB12]、Bianchiらの作製したマーカ [BBO15]、および紙窓 [加藤 13] は導電体を用いてウィジェットの表面とタッチパネルとの接触面を電気的に接続することにより指が触れた際に静電容量の変化を発生させ、マーカの検出を行うことができる実物体ウィジェットである。また、池松らはタッチパネルへの押下面積を用いて指によるタッチとスタイラスペンによるタッチの識別を行った [池松 14a]。このシステムはユーザが導電体に触れることによりタッチパネルに発生するタッチ点を用いて実物体ウィジェットの位置を検出する。Wiethoffらは紙に導電インクを塗布することによってマーカを作製する手法を示した [WSR⁺12]。Sungiuneらは金属製のピンをスマートフォンの側面に並べ、端末の側面を用いた操作手法を示した [JKT⁺16]。Martinらは3Dプリンタを用いて導電フィラメントと非導電フィラメントを用いてオブジェクトを作製し、これを実物体マーカとして用いる手法を示した [SKB⁺15]。

本研究もこれらの研究と同様に導電体を介してタッチを発生させる。本研究は導電フィラメントやアルミ板を導電体として用いたマーカを作製した。タッチパネル上のマーカに指に

て触れることにより、導電体を通してタッチパネル上に複数の連続したタッチ点を発生させる。これにより発生したタッチを用いてマーカの検出を行う。

2.2 実物体ウィジェットを検出する研究

Ishii らは実物体オブジェクトにてデジタルな情報に実体を与えるインタフェースを示した [IU97]。これをタッチパネル端末に適用し、タッチパネル上にて実物体ウィジェットを検出する研究が多くなされている。Liang らはタブレットに接続したホールセンサアレイを用いてマーカに埋め込んだ磁石の磁力を測定することにより、マーカの位置検出を行う GaussBricks [LCT⁺14]、および GaussStones [LKC⁺14] を示した。GaussBits [LCC⁺13] および GaussMarbles [KLLC16] はタッチパネル上にて磁石の埋め込まれたウィジェットをタッチパネル背面に設置した磁気センサアレイを用いて検出し、インタラクションを行う。Malte らは半透明のシリコンの実物体オブジェクトをタッチパネルに設置することによりキーボードやスライダ、ボタンなどの機能に応じた操作が可能である SLAP を示した [WWJ⁺09b, WWJ⁺09a]。青木らはタブレット端末に円形のオブジェクトを設置し、回す操作によって操作を行うくるみるを示した [青木 11]。赤外線センサを用いてタッチパネル上の実物体マーカの検出を行う研究も存在する [中林 11, 高田 15a, BBR10]。reacTable はテーブルトップ上のマーカをカメラを用いて検出し、音楽演奏のためのインタフェースとして用いるシステムである [JGAK07]。SurfaceFusion はカメラと RFID タグを用いてオブジェクトの検出を行い、オブジェクトの移動を追跡するシステムである [OW08]。TalkingCards は NFC タグを用いてマーカの ID を認識し、スマートフォンにて記録した音声とタグ付けを行うシステムである [RMST16]。

これらの研究の他に、追加のタッチセンサを使用せず、タッチパネルへの入力のみを用いて実物体ウィジェットの検出を行う研究も示されている。著者らは端末ケースを装着したスマートフォンをタッチパネル上に設置し、端末ケースを通してスマートフォンとタッチパネルを電氣的に接続し、タッチを発生させることによりスマートフォンの検出を行った [川畑 15]。暦本らはタッチパネルを用いて金属箔を貼り付けた実物体ウィジェットを検出する手法を示した [Rek02]。また、Yu らが作製したマーカ [YCC⁺10, YCL⁺11] は電流を流すことによりタッチパネルとマーカ間の静電容量を変化させ、タッチパネルにタッチ点を発生させる。これによりマーカの位置と種類を検出することができる。Chan らの作製したマーカ [CMRB12] はマーカの表面とタッチパネルとの接触面を電氣的に接続している。このため、ユーザがマーカをタッチパネルに設置する時にマーカの表面に指が触れるため、マーカを通してタッチパネルにタッチ点が発生する。システムはこのタッチ点の数と位置からマーカを検出する。Kratz らはタッチパネル上において積み重ねて使用するブロック型コントローラを作製した [KWRE11]。Tokunaga らはタッチパネルにて使用するタンジブルなマーカを作製した [TKKN05]。CapCodes [GS16] は 3D プリンタによって導電体と非導電体を組み合わせたオブジェクトである。CapCodes の表面の導電部に触れた場合、裏面の導電部を通して複数のタッチ点が発生する。このタッチ点同士の位置関係を用いてマーカの検出を行う。Voelker らはタッチパネル上の 2 点を電氣的に接続することによりユーザが接触することなく検出可能なウィジェットを示した [VNT⁺13, VCT⁺15]。TouchToken は実

物体オブジェクトを操作する際に指がタッチパネルに触れることに着目し、タッチ点の位置関係からオブジェクトの検出を行う研究である [MGABP16, 池松 14b]. CapacitiveMarker [IT15] は導電性インクと AR マーカを用いて、マーカとタッチパネルと接触している時と接触していない時の両者の場合においてマーカを検出する. Tangible Remote Controllers はタッチパネル上にて用いるスライダーである [JDF12]. このスライダーは、タッチパネルと触れる部分のうち両端と導電部と可動部を導電性パーツを用いて構成し、それ以外の部分を非導電性パーツを用いて構成することにより位置およびスライダへの入力を検出する. Transporters は光ファイバと導電ワイヤを用いて束ねることにより、タッチパネルにタッチ入力を行うことができる半透明のマーカである [HVWB15]. Mads らは表面の 1 つの導電体と背面の複数の導電体を接続し、指が触れた時に位置検出を行うゲームコントローラを示した [BFTK15].

本研究はこれらの研究と同様に、タッチパネル上にて用いる実物体マーカを作製した. 本研究においてはマーカの検出をタッチパネルへの入力のみを用いて行う. 一方、これらの研究と異なり、マーカの検出を行う際にマーカへのスワイプ操作によって発生したタッチ点の位置関係を用いる.

2.3 タッチ点の位置関係を用いて物体や手の検出を行う研究

本研究の示すマーカはタッチ点の位置関係を用いてマーカの検出を行う. 同様にタッチ点の位置関係を用いて物体や手の検出を行う研究がある. これまでに挙げた著者らの研究 [川畑 15], Kratz らによるブロック型コントローラ [KWRE11], PUCs [VNT⁺13, VCT⁺15], Capacitive-Marker [IT15], および TouchToken [MGABP16] はタッチパネルに発生したタッチ点の位置関係を用いて物体の検出を行う. CapAuth はタッチパネルへのタッチ位置の関係から手の識別を行う [GXH15]. また、タッチパネルへのタッチと赤外線により検出した空中の指の位置を組み合わせて手のジェスチャを認識する研究も示されている [竹岡 12].

これらの研究は同時に発生したタッチ点の位置関係を用いて生体や物体の識別を行う. 一方、本研究はマーカによって発生した連続して異なる場所にて発生したタッチ点間の距離を用いてマーカの検出を行う.

2.4 連続したタッチ点を検出する手法

本研究は、マーカの検出を行う際に連続して発生したタッチ点の位置関係を用いる. 連続して発生した入力として音を用いた研究として Acoustic Barcodes [HXH12] および TapSense [HSH11] が挙げられる. Acoustic Barcodes は実物体表面に刻まれた凹凸から構成されるマーカである. この刻まれた凹凸をユーザが指にてなぞった際に連続して発生する音からマーカの認識を行う. また、同様の仕組みを用いて 3D プリントしたオブジェクトの検出を行う研究も存在する [SHH⁺15]. TapSense は指によるタッチジェスチャの音をマイクによって検出することにより、ジェスチャ固有の音声パターンと比較してジェスチャの認識を行う. また、Mono-Touch [高田 15b] は複数に分割された電極から構成されたタッチセンサである. ユーザが電極

をなぞった際に複数回のタッチを発生させることにより複数種類のタッチジェスチャを検出する。

これらの研究と同様に、本研究も同様に連続した入力の検出を行うが、タッチパネル上で連続した複数のタッチ点の位置関係を用いてマーカの検出を行う点において異なる。

第3章 検出手法

本章にてタッチパネル端末がマーカを検出する手法および指とマーカの識別手法を述べる。

3.1 マーカの検出手法

タッチパネルに設置されたマーカを検出するために、マーカにより発生したタッチとユーザの指によって発生したタッチを区別する必要がある。本手法は、ユーザの指によるタッチと異なるタッチ点をマーカへのスワイプ操作を通して発生させることにより、マーカの検出を行う。

マーカは、交互に並べられた複数の導電部とそれらを隔てる非導電部から構成される（図 3.1）。ユーザが導電部に触れると、マーカの導電部を介して、タッチパネルにユーザが直接触れた場合と同様に静電容量の変化が起こり、導電部とタッチパネルが触れている箇所にタッチが発生する（図 3.2）。ユーザがタッチパネル上のマーカの表面に対してスワイプ操作を行うことにより、マーカの導電部の位置に対応するタッチ点が連続してタッチパネル上に発生する。そのため、タッチパネル上に発生するタッチ点間の距離はマーカの導電部間の距離と等しくなる。例えば、導電部を3つ持つマーカの場合、発生するタッチ点は3点となる（図 3.3）。1点目と2点目のタッチ点間の距離と2点目と3点目のタッチ点間の距離はそれぞれ対応する非導電部の長さと同じ。この時に発生するタッチ点間の距離が、既知であるマーカの導電部間隔と一致した場合にシステムはマーカによるタッチであると認識する。

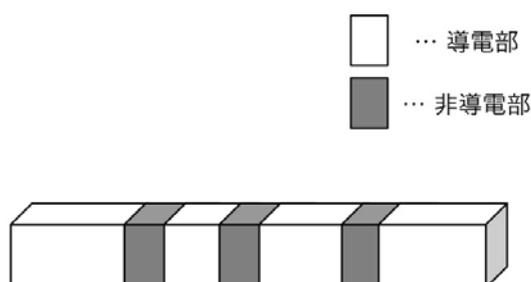


図 3.1: マーカの構成

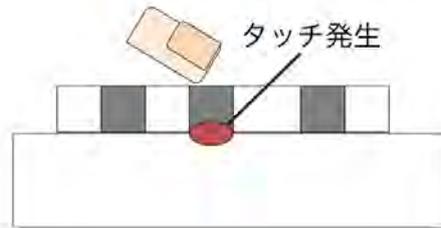


図 3.2: マーカによるタッチ発生

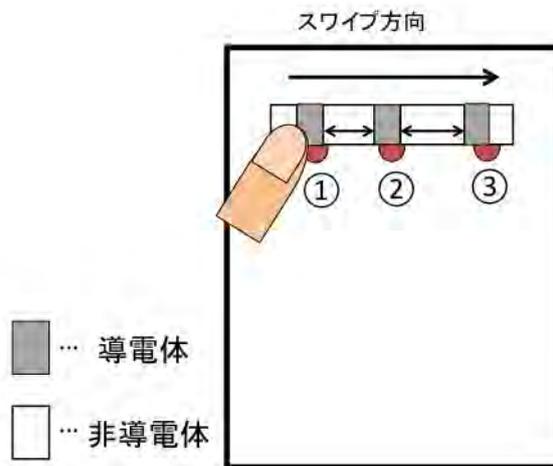


図 3.3: マーカによるタッチの発生順

3.2 指によるタッチとマーカによるタッチの識別手法

指によるタッチパネルへのスワイプ操作を行った場合、タッチは1点発生する（図3.4A）。これに対し、マーカにスワイプ操作を行った場合、マーカの方向にマーカの導電部と同数のタッチ点が発生する（図3.4B）。このため、タッチパネル端末は指によるスワイプ操作とマーカによって発生したタッチを区別することができる。また、マーカによる複数のタッチはマーカの直下に発生する。指で導電部と同じ位置を連続してタッチした場合、指によるタッチとマーカによって発生したタッチは同様の反応を示すが、指によるタッチが同一箇所にはタッチが発生するのに対し、マーカによるタッチはタッチ点の発生箇所が異なる。そのため、本手法はマーカによって発生したタッチと指によるタッチを区別することができる。

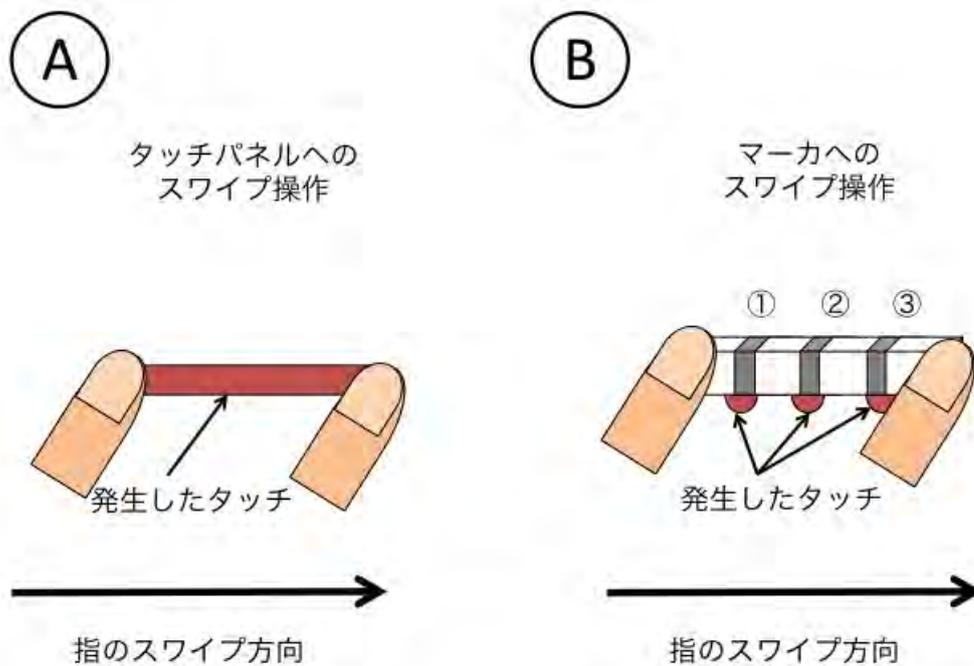


図 3.4: 指によるスワイプ操作とマーカへのスワイプ操作により発生したタッチ

第4章 マーカ素材の検討

マーカの素材として導電フィラメントおよび非導電フィラメントの組み合わせ、木製棒および金属箔テープの組み合わせ、アルミ板およびアクリル板の組み合わせ、および銀ナノインクによる印刷の4種類の素材の組み合わせを用いてマーカのプロトタイプを作製した。

4.1 導電フィラメント, 非導電フィラメント

4.1.1 プロトタイプ1

本手法のマーカの素材として、導電フィラメントと非導電フィラメントを用いてマーカの試作を行った。マーカの作製に用いたモデルを図4.1に示す。プロトタイプ1の出力には熱溶解積層法式の3DプリンタであるFLASHFORGE社製Dreamerを用いた。素材として導電PLAフィラメントおよび非導電PLAフィラメントを用いた。

出力したマーカを図4.2, 図4.3に示す。図4.2の青色および白色の部分が非導電フィラメントであり、黒色の部分が導電フィラメントである。図4.2A, B, Cのそれぞれのマーカの指の触れる非導電部の長さはそれぞれ異なる。Aの指の触れる非導電部の長さは5mm, Bの指の触れる非導電部の長さは10mm, Cの指の触れる非導電部の長さは15mmである。これは、指と非導電体の触れる面積が小さくなった場合も静電容量の変化をタッチパネルへ伝える事ができるかを調査するためである。

また、タッチパネルとマーカが触れる部分に1辺が10mmの正方形の導電パーツを設けた(図4.3)。これは導電部とタッチパネルの接触面積を減らすことにより、タッチの発生位置を制御するための機構である。

3種類のプロトタイプ1をそれぞれタッチパネル上に設置し、導電部に触れた。この結果、すべてのマーカにおいて指が導電部に触れた場合にタッチを発生させることができた。これにより、導電フィラメントを通してタッチパネルに静電容量の変化を発生させ、タッチを発生させることができることを確認した。その後、図4.2のマーカA, B, Cをこの順に並べ、スワイプ操作を行った(図4.4)。この結果、以下のことがわかった。

1. マーカが軽いため、スワイプ操作中にタブレットのタッチパネル上から浮いてしまい、がたついてしまうことがあった。
2. スワイプ操作中、タブレットのタッチパネルにマーカを押さえるための指が触れてしまうことがあった。

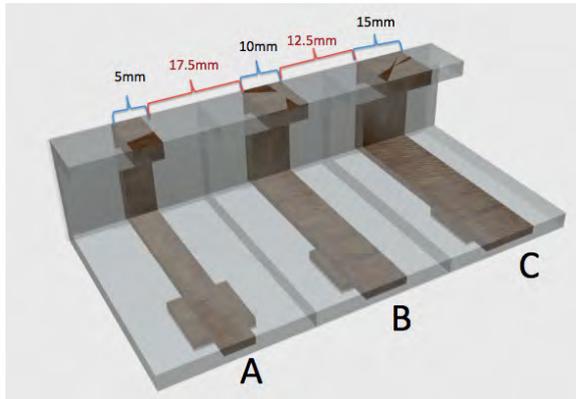


図 4.1: 3D プリンタを用いて実装したマーカのモデル

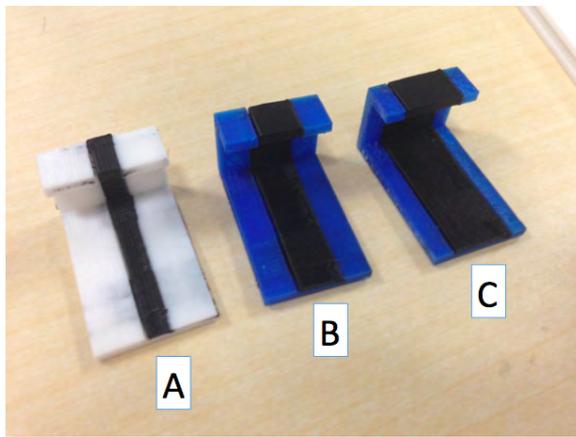


図 4.2: 3D プリンタを用いて実装したマーカ（表面）

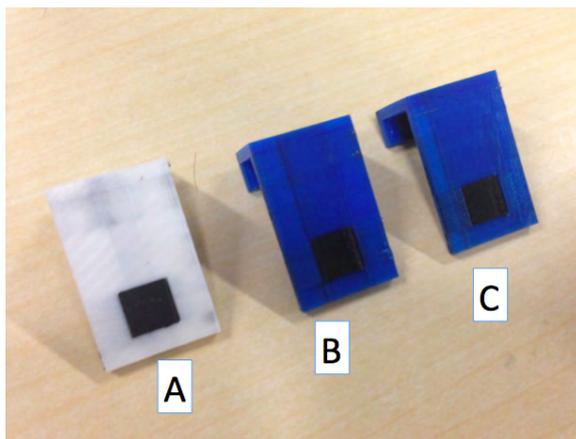


図 4.3: 3D プリンタを用いて実装したマーカ（裏面）

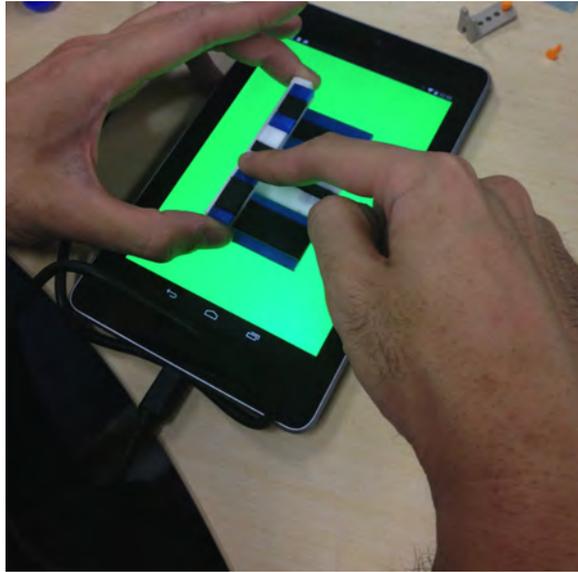


図 4.4: プロトタイプ 1 の実験の様子

プロトタイプ 1 はタッチパネル上にて安定して設置、および操作できないことが問題であると考えられる。

4.1.2 プロトタイプ 2

プロトタイプ 1 によってわかった問題点を踏まえ、プロトタイプ 1 と同様に導電フィラメントと非導電フィラメントを用いてマーカを再作製した。マーカの作製に用いたモデルを図 4.5 に示す。プロトタイプ 2 はプロトタイプ 1 よりも大きく幅を取ることで、スワイプ操作中にタッチパネルと指が触れにくい形状とした。プロトタイプ 2 の非導電部を上から指で押さえることによりプロトタイプ 1 と比較して指がタッチパネルと触れにくい。

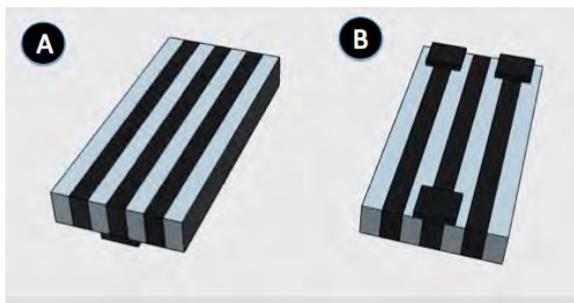


図 4.5: プロトタイプ 2 のモデル

プロトタイプ 2 は複数の導電部（図 4.5 の黒色部分）とそれらを隔てる非導電部（図 4.5 の

白色部分)の2つの部分の組み合わせにより構成されている。ユーザは、プロトタイプ2の上面もしくは側面にスワイプ操作をすることにより利用できる。この操作により、タッチパネル上にて3点のタッチが1つずつ順に発生する。この3つのタッチ点の発生位置のパターンを用いてタッチパネルはマーカの検出を行う。図4.4の矢印の方向にスワイプ操作を行った場合、1から3の順にタッチが発生する。プロトタイプ2においては1および3を固定点、2を可変点としプロトタイプ2を3種類作製した。マーカによって図4.4におけるタッチ点1と2、2と3の距離が異なるように設計する。このため、ユーザがタッチパネルにプロトタイプ2を設置し、スワイプ操作を行った場合、図4.6における2のタッチ点の位置がそれぞれ異なる(図4.7)。

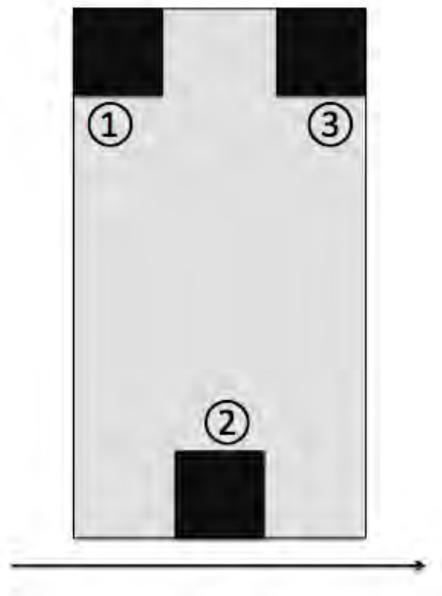


図 4.6: マーカによるタッチ点の発生順

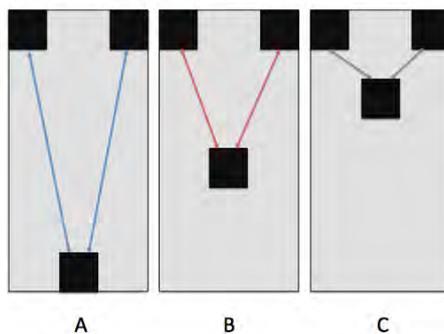


図 4.7: マーカごとのタッチ点の距離

プロトタイプ2全体のサイズは縦70mm×横40mm×高さ10mmである。導電部および非導電部はそれぞれ5mm幅である。またプロトタイプ1と同様にタッチパネルとマーカが触れる部分に導電性フィラメントを用いて10mm四方のタッチ発生部を作製した。これはマーカ表面の導電部のどの部分に触れた場合においてもタッチ発生部の位置にタッチを発生させることを目的としている。

図4.8に示すようにプロトタイプ2のマーカを3種類作成した。プロトタイプ1と同様に3Dプリンタを用いて出力を行った。作製に用いた素材は図4.2Aと同じ導電PLAフィラメントおよび非導電PLAフィラメントである。3種類のマーカは、中央のタッチ発生部の位置がそれぞれ異なる。また、検出にAndroidタブレット（Acer Iconia Tab A500, 端末サイズ：高さ177mm×幅260mm×13mm, 画面サイズ：10.1インチ, OS：Android 3.2.1, 静電容量方式タッチパネル搭載）を用いた。マーカを検出するためのソフトウェア開発環境としてAndroid Studioを使用し、Javaを用いて開発した。

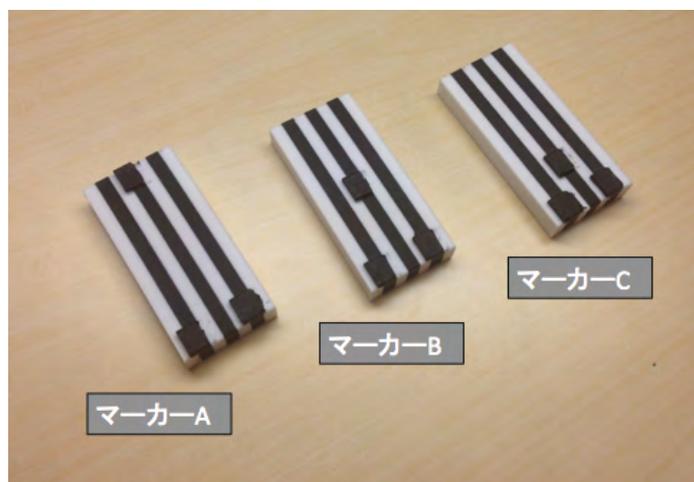


図 4.8: 3種類のプロトタイプ2

プロトタイプ2の検出精度を確かめるために被験者実験を行った。被験者は著者を含む同じ研究室の大学生、大学院生3名（21-23歳，男性）である。実験者は被験者にマーカの検出方法について説明した。その後、被験者は数分間プロトタイプ2を用いたマーカ検出のためスワイプ操作の練習を行った。その後、被験者は各マーカにそれぞれ10回ずつスワイプ操作を行った。実験者はタッチパネルの検出の成否を記録した。実験の様子を図4.9に、実験の検出精度を表4.1に示す。

表 4.1: プロトタイプ2のマーカの検出精度

検出したマーカ	マーカ A	マーカ B	マーカ C	検出失敗
マーカ A	86.7%	-	-	13.3%
マーカ B	-	70.0%	6.7%	23.3%
マーカ C	-	3.3%	23.3%	73.3%



図 4.9: プロトタイプ 2 の実験の様子

3つのプロトタイプ2のマーカ全体における検出精度は60%であった。検出に失敗した原因は3つのタッチ点が連続で発生しなかったためであった。マーカこれは、マーカ表面にスワイプ操作を行った場合、中央の導電部に触れる時間は他の2つに触れる時間と比べて短く、静電容量の変化が小さかったためであると考えられる。また、実験の結果からマーカCの検出精度が他の2つのマーカに比べて著しく低いことがわかる。これは、マーカCの3つのタッチ発生部の位置が密集しており、タッチ発生部が片側に寄っているため、スワイプ操作中にマーカが傾いたと考えられる。実際に著者がマーカCにスワイプ操作を行った場合にマーカが傾くことを確認した。このことから、マーカをタッチパネルに安定した状態にて設置できるように設計するべきであると考えられる。

4.1.3 プロトタイプ3

プロトタイプ2の問題点を踏まえて、プロトタイプ3を作製した。作製したプロトタイプ3の写真を図4.10に示す。プロトタイプ3は青色の非導電部分と黒色の導電部分に分かれている。導電フィラメント、非導電フィラメントを用いて3Dプリンタにて1cmの立方体を印刷した。導電性の立方体と非導電性の立方体を交互にアセトンを用いて接着した。図4.10の白い部分はマーカ表面に付着したアセトンが乾いたものである、

プロトタイプ3をタッチパネル上に設置し、スワイプ操作を行うことによりタッチ点を発生させることができた。しかし、3Dプリンタによる成形の際の余熱によってマーカの縁が歪んでしまい、タッチパネルと接触しない部分があることがわかった。



図 4.10: プロトタイプ 3

4.2 金属箔テープ，木製棒

導電フィラメントおよび非導電フィラメントを用いたマーカはタッチパネルと触れる部分が安定しないという問題があった。そこで、非導電性である木製の棒に導電性を持つ金属箔テープを巻くことによりマーカを作製した。作製した2つのマーカを図4.11に示す。木製棒および金属箔テープは表面が滑らかであるため、タッチパネルに安定して設置することができる。金属箔テープとして幅1cmのアルミ箔テープを用いた。また、非導電部として用いた木製棒は1cm×1cm×13cmである。木製棒には1cmごとに目印の線を入れた。マーカの1つには図4.11左側から順に2cmと3cm間隔（図4.11上）、もうひとつには2cmと4cm間隔（図4.11下）にてアルミ箔を巻いた。

iPad（端末サイズ：高さ241mm×幅186mm×奥行き9.4mm，画面サイズ：9.7インチ，OS：iOS8.3，静電容量方式タッチパネル搭載）を用いてマーカの検出を行った。マーカにより発生した3つのタッチ点間の距離を測定した。マーカの検出ソフトウェアの開発環境としてXcodeを使用し，Swiftを用いて開発した。著者を含む2人の被験者が，タッチパネルに2つのマーカを設置し，5回ずつスワイプ操作を行った。マーカの導電部間距離ごとのタッチ点間の距離の平均を図4.12に示す。

この結果から，導電部間の距離を1cm以上変えてマーカを作製した場合，閾値を設定することによって2つのマーカは判別可能であると考えられる。一方，テープを貼る作業が手作業であるため，簡易的にマーカを作製する場合に有効であるが，精度を保証できないことがわかった。木製棒と金属箔テープを用いたマーカの検討に用いた試作品群の写真を図4.13に示す。

4.3 アルミ板，アクリル板

これまでに作製したマーカは本手法による検出を行うことはできたが，工作精度の点に不安が残った。そこで，導電部としてアルミ板，非導電部としてアクリル板を用いて作製を行った。



図 4.11: アルミ箔テープと木製棒を用いたマーカ

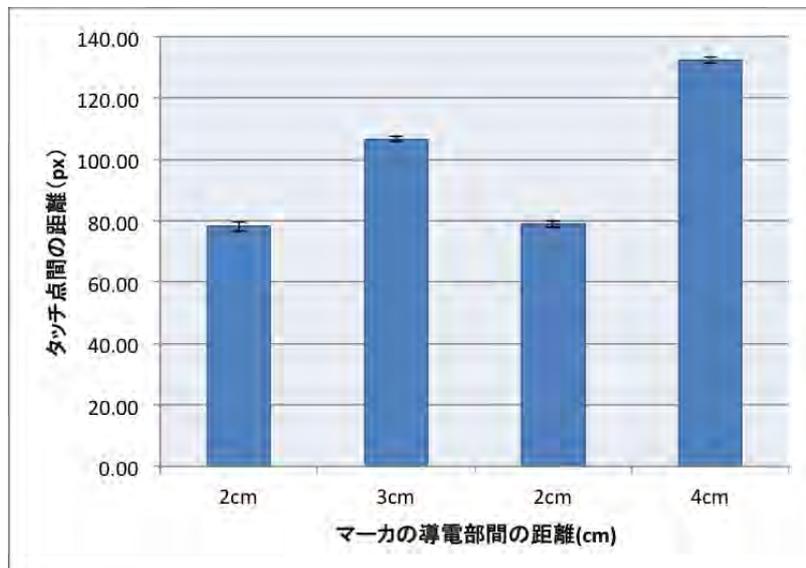


図 4.12: マーカの導電部間の距離ごとのタッチ点間の距離の平均（エラーバーは標準偏差を表す）



図 4.13: 木製棒と金属箔テープを用いたマーカの試作品群

アルミ板およびアクリル板は加工の際に形状が変化しづらい。また、加工の際にそれぞれの面が平面になるように加工した。1辺が10mm、長さが1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mmの5種類のアルミ板および1辺が10mm、長さが5mm, 6mm, …, 15mmの10種類のアクリル板を用いた。また、これらの板を組み合わせるために、アルミ板とアクリル板を厚さ0.7mmのポリ塩化ビニル板に両面テープ（ニチバン株式会社 NW15SECOSE）を用いて貼り付けて固定した（図4.14）。

導電部と非導電部の長さを決めるための予備調査を行った。まず、1辺が10mm、長さが5mm, 10mm, 15mmのそれぞれ3種類のアルミ板とアクリル板を導電部および非導電部として用いてマーカを作製した。調査に用いたマーカは図4.14のように同じ長さの3つの導電部とその間を埋める同じ長さの2つの非導電部とによって構成した。これをiPad（第4世代, 9.7インチ, 解像度2048×1536ピクセル, iOS8.4.1）および3MマルチタッチディスプレイC3266PW（32インチ, 解像度1920×1080ピクセル）上に設置し、表面に対してスワイプ操作を行った。

予備調査の結果、非導電部として長さが5mmのアクリル板を用いた場合、導電部と対応する3つのタッチ点を発生させることができなかった。これは、導電部同士の距離が近いと、タッチパネルが隣り合うタッチ点を同一のものとして判定したためであると考えられる。一方、非導電部として、長さが10mmや15mmのアクリル板を用いた場合はこの現象は見られなかった。そのため、非導電部の長さが5mmから10mmの間に、タッチパネルが2つのタッチ点を1点として認識する距離と異なる点として認識する距離の境界があると考えられる。この

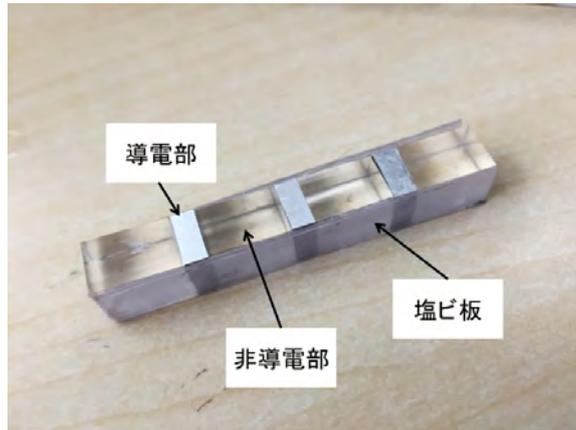


図 4.14: アルミ板, アクリル板を用いたマーカ

境界を調査するための実験について 5 章にて述べる。

4.4 銀ナノインク

マーカの工作精度を上げるため, 銀ナノインクを用いたマーカの検討を行った. 作製したマーカを図 4.15 に示す. 銀ナノインクを用いて導電部を印刷したシートを木製棒に沿うように折り曲げて接着することによりマーカを作製した. しかし, 銀ナノインクを印刷したシートを折り曲げると, 折り目の部分にて断線してしまい, 指によるタッチをタッチパネルに伝えることができなかった. シートを折り曲げない場合はタッチをタッチパネルに伝えることができたため, 軸となる棒に対して直接銀ナノインクを塗布することによりマーカを作製できる可能性があると考えられる.



図 4.15: 銀ナノインクを用いたマーカ

第5章 評価実験

マーカの非導電部として用いるために適切な長さを調査するため，評価実験を行った．

5.1 実験概要

4章にて作製したプロトタイプを用いた実験から，タッチパネルのタッチ点間の距離が近すぎる場合に2つのタッチ点が同一のタッチ点として認識されることがわかった．2つのタッチ点が同一のタッチ点としてタッチパネルに認識される境界を調べるための実験を行った．実験に用いたマーカの導電部として1辺が10 mm，長さが1 mm，2 mm，3 mm，4 mmのアルミ板，非導電部として1辺が10 mm，長さが6 mm，7 mm，…，15 mmの亚克力板を用いた．実験に用いたマーカは図5.2のように同じ長さの3つの導電部とその間を埋める同じ長さの2つの非導電部によって構成される（図5.1）．そのため，各マーカの検出に用いる導電部間距離は2箇所存在する．導電部として4種類，非導電部として10種類を組み合わせると40種類のマーカを作製した（図A.1–図A.40）．

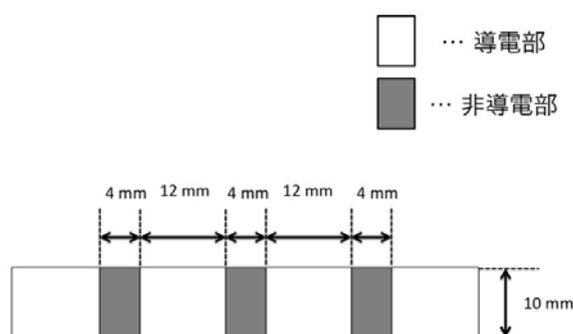


図 5.1: 実験に使用したマーカの模式図（導電部が4 mm，非導電部が12 mmの場合）

実験は，著者がマーカをタッチパネルに設置し，それぞれ異なる場所で10回のスワイプ操作を行った．各マーカに対して10スワイプ×2箇所の計20箇所の導電部間距離を測定した．

マーカのタッチ点の検出を行うタッチパネルとして，予備調査と同様に3MマルチタッチディスプレイC3266PWを用いた．また，タッチ点を記録し，導電部間距離を算出するアプリ

ケーションについては Windows Presentation Foundation を用いて実装を行い，上記のタッチパネルと接続した ThinkPad X220i 上にて実行した。



図 5.2: 実験に使用したマーカの一例

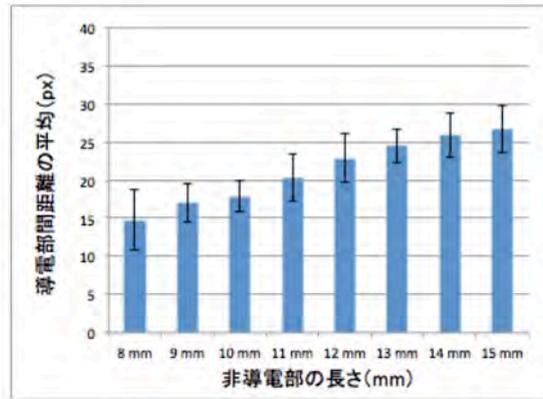
5.2 実験結果

マーカによるタッチ点の発生位置が近すぎる場合，タッチパネルはこれらのタッチ点を同一のタッチ点であると認識する．この場合，本手法によるマーカの検出を行うことはできない．マーカによる3つのタッチ点の認識の成否を表 5.1 に示す．導電部が 1 mm の場合と非導電部が 5 mm，6 mm の場合はすべての導電部，非導電部の場合において導電部間距離を測定することができなかった．また，導電部が 2 mm，非導電部が 7 mm のマーカにおいて，導電部間距離を測定することができなかった．

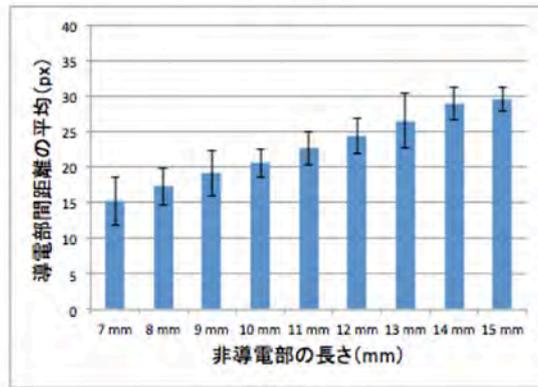
表 5.1: 各導電部，各非導電部の組み合わせにおける3点のタッチ発生の可否

		非導電部の長さ (mm)											
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
導電部の長さ (mm)	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	2	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	4	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

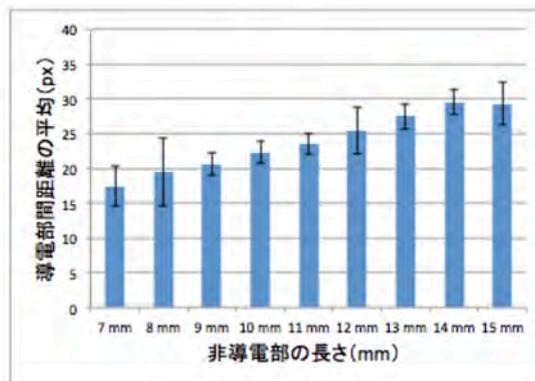
各導電部における導電部間距離の平均を図 5.3 に，導電部間距離の最大値，最小値を図 5.4 に示す．図 5.3 のエラーバーは標準偏差を示す．



導電部：2 mm

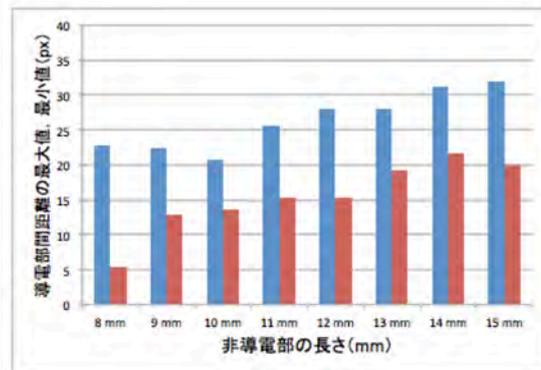


導電部：3 mm

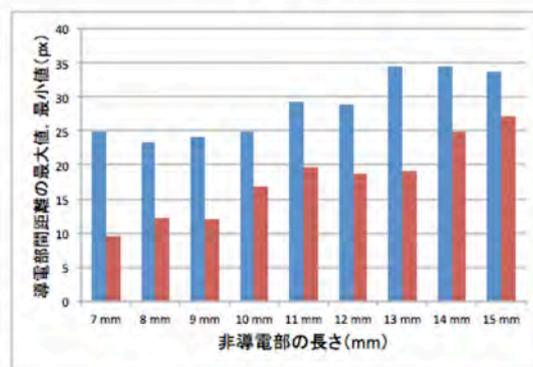


導電部：4 mm

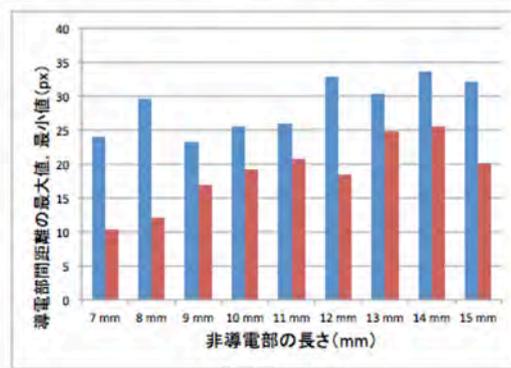
図 5.3: 各導電部にて算出した導電部間距離の平均（エラーバーは標準偏差を表す）



導電部：2 mm



導電部：3 mm



導電部：4 mm

図 5.4: 各導電部にて算出した導電部間距離の最大値，最小値

5.3 考察

1 mm 以外のいずれの導電部を用いた場合においても，非導電部の長さが長くなるごとに導電部間距離の平均が長くなっていくことがわかった．一方で，非導電部の長さが長くなって導電部間距離の最大値，最小値は長くない場合があった．このため，1 回のスワイプによって測定できる導電部間距離は平均から離れた値が出ることもあるが，検出回数を増やした場合は非導電部の長さを長くするほど導電部間距離は長くなると考えられる．

また，非導電部の長さが導電部間距離に有意な差を及ぼすか検討を行った．IBM SPSS Statistics Version 22 を用いて，ノンパラメトリック検定である Kruskal-Wallis 検定を行った．各非導電部の組み合わせにおける有意確率を図 5.5 に示す．

この結果から，非導電部の長さが 4 mm 以上離れているすべての組み合わせにおいて導電部間距離に有意差があるといえる．そのため，4 mm ずつ長さの異なる非導電部を用いてマーカを構成することにより検出可能であると考えられる．例えば，長さが 3 mm の導電部と長さが 7 mm，11 mm，15 mm の 3 種類の非導電部を組み合わせる用いることにより，それぞれ識別可能なマーカを作製することができると考えられる．

非導電部の長さ (mm)

	9	10	11	12	13	14	15
8	1.000	1.000	0.102	0.000	0.000	0.000	0.000
9		1.000	0.967	0.003	0.000	0.000	0.000
10			1.000	0.024	0.000	0.000	0.000
11				1.000	0.132	0.015	0.002
12					1.000	1.000	0.810
13						1.000	1.000
14							1.000

非導電部の長さ (mm)

導電部：2 mm

非導電部の長さ (mm)

	8	9	10	11	12	13	14	15
7	1.000	1.000	0.382	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
8		1.000	1.000	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000
9			1.000	0.829	0.023	0.000	0.000	0.000
10				1.000	0.347	0.010	0.000	0.000
11					1.000	1.000	0.011	0.002
12						1.000	0.480	0.132
13							1.000	1.000
14								1.000

非導電部の長さ (mm)

導電部：3 mm

非導電部の長さ (mm)

	8	9	10	11	12	13	14	15
7	1.000	1.000	0.108	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
8		1.000	1.000	0.444	0.006	0.000	0.000	0.000
9			1.000	1.000	0.029	0.000	0.000	0.000
10				1.000	1.000	0.015	0.000	0.000
11					1.000	0.275	0.006	0.003
12						1.000	0.434	0.272
13							1.000	1.000
14								1.000

非導電部の長さ (mm)

導電部：4 mm

	... p < 0.05 (*)
	... p < 0.01 (**)
	... p < 0.001 (***)

図 5.5: 各導電部にて算出した導電部間距離の有意確率

第6章 議論

本章では，本手法について議論する．

6.1 マーカの素材

本研究の検出手法は導電体によってタッチの発生位置を制御することによりマーカの検出を行う．非導電体は指による静電容量の変化をタッチパネルに伝えることができない．そこで，本研究においては，プロトタイプとして用いた素材として導電性フィラメント，アルミ箔テープ，銀ナノインク，アルミ板を用いた．

この他にもマーカの非導電部の素材として導電ゴムや導電スポンジを利用することも可能であると考えられる．一方，タッチパネルにタッチを伝えるために，マーカを安定して設置し，十分にタッチパネルと接触させる必要がある．そのため，タッチパネルと触れる面積が増えるように平坦に加工しやすい素材であることが望ましい．

6.2 マーカの拡張性

6.2.1 左右スワイプの検出

左右に非対称なマーカを構成することにより，ユーザがマーカにスワイプ操作を行った方向を検出することができる．例えば，長さの異なる2種類の非導電部 A, B を1つずつ用いる場合，左方向からスワイプすると導電部間距離が A, B の順になるようにタッチが発生し，右方向からスワイプすると導電部距離が B, A の順になるようにタッチが発生する（図 6.1）．これにより，1つのマーカから2種類の入力を行うことができる．

6.2.2 検出可能なマーカの種類

検出可能なマーカの数を増やすには次の2種類の方法がある．1つは非導電部の長さを変える，もしくは組み合わせて用いる方法である．例えば，長さの異なる2種類の非導電部 A, B を2つ用いる，3種類のマーカを作製することができる（図 6.2）．この時，長さの異なる非導電部 C を含む3種類の非導電部を2つ用いてマーカを作製した場合，6種類のマーカを作製することができる（図 6.3）もう1つは，マーカ作製に用いる導電部の数を増やす方法

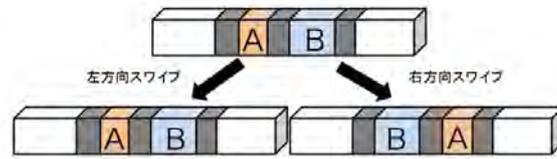


図 6.1: マーカによる左右スワイプの検出

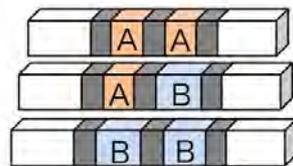


図 6.2: 2 種類の非導電部 2 つによって作製可能なマーカ

である。長さの異なる 2 種類の非導電部 A, B を 3 つ用いると, 6 種類のマーカを作製することができる (図 6.4)。

この 2 種類の手法を組み合わせることによりマーカの区別可能な種類を大幅に増やすことができる。

非導電部の長さの種類を増やした場合, 検出可能なマーカの種類を増やすことができる。一方, 実験から非導電部を区別するためには 4 mm 以上長さの異なる導電体を用いる必要がなかった。そのため, 判別可能な非導電部の種類を増やした場合, 非導電部の長さが長くなる。また, 導電部の数を増やした場合, 検出可能なマーカの種類を増やすことができる。この場合も導電部の数を増やした場合, マーカ全体の長さが長くなる。そのため, 検出可能なマーカの種類を増やした場合, マーカ全体の長さは長くなると言える。

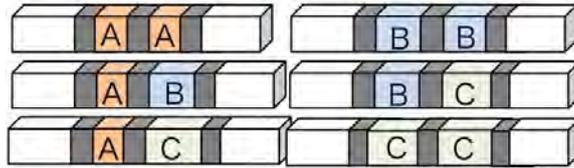


図 6.3: 3 種類の非導電部 2 つによって作製可能なマーカ

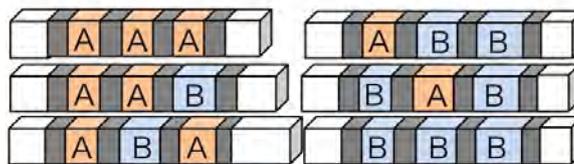


図 6.4: 2 種類の非導電部 3 つによって作製可能なマーカ

第7章 アプリケーション

本研究にて実装したマーカを用いたアプリケーションとして機能呼び出し，ユーザ認証，および端末連携システムを述べる．

7.1 機能呼び出し

暦本らの DataTiles[RUO01] を参考に，タイル型のマーカを作製した．作製したタイル型マーカは，評価実験に使用したタッチパネルである 3M マルチタッチディスプレイ C3266PW の画面を 3×4 に分割したサイズである $129 \text{ mm} \times 177 \text{ mm}$ のプラスチック板，およびその長辺に沿うように載せられ，両面テープで接着されている導電部，非導電部から構成される（図 7.1）．

アプリケーションの実行環境として，実験と同様にタッチパネルとして 3M マルチタッチディスプレイ C3266PW を用いた．アプリケーションを Windows Presentation Foundation を用いて実装を行い，タッチパネルと接続した ThinkPad X220i 上にて実行した．

それぞれのタイル型マーカには固有の機能を割り当てた．これまでに電卓機能アプリケーションと画像表示アプリケーションを実装し，割り当てた．また，その機能を操作するのに適した触覚フィードバックを与えられるように，プラスチック板に加工を施した．具体的には，電卓機能を割り当てられたタイル型マーカのプラスチック板にはキーの周囲に溝を掘った．

7.2 マーカによるユーザ認証

本研究が示すマーカを用いたアプリケーションとしてマーカを物理的な鍵として利用するユーザ認証手法が考えられる．このアプリケーションは複数のユーザが一つのタッチパネル搭載デバイスを利用する場合を想定する．複数のユーザがそれぞれ固有の導電部間距離のパターンを持つマーカを所持する（図 7.2A）．デバイスのログイン画面においてユーザはタッチパネルにマーカを設置し，スワイプ操作を行う．この操作によりタッチパネルはマーカのパターンを検出し，これに対応するユーザとして認証する．そのため，ユーザは認証されたユーザとしてデバイスにログインすることができる（図 7.2B, C）．

本アプリケーションは，スワイプ操作を用いてマーカの認証を行うため，ユーザが認証を行いたいタイミングでユーザ認証を行うことができる．本アプリケーションは，パスコード認証と異なり，マーカへスワイプ操作を行うことによりユーザの認証ができるため，他のユー

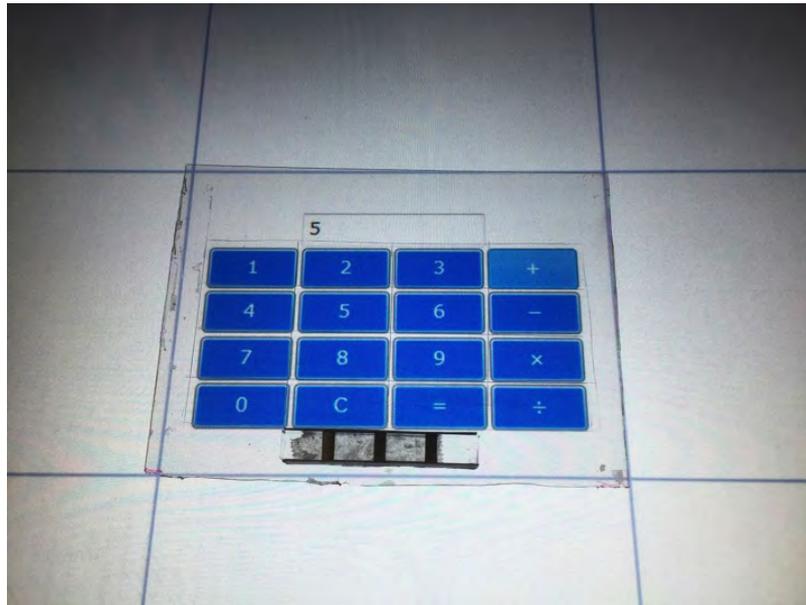


図 7.1: アプリケーション（機能呼び出し）

ザに入力時にパスコードを盗み見られることはない。また、指紋認証と異なり、タッチパネルのみで認証を行うことができるため、追加のデバイスを必要としないという利点がある。

7.3 端末連携システム

2つのタッチパネル端末の連携にマーカを応用可能であると考えられる。現在、スマートフォンやタブレットなどのタッチパネル端末が普及し、個人が複数のタッチパネル端末を所有するようになった。これらの端末において、写真やなどの情報はそれぞれの端末に独立して保存されている。そのため、1つの端末に保存されている情報を異なる端末において閲覧したい場合は、記憶媒体を用いたデータの受け渡しや無線、有線端末通信によりデータを情報保存端末から閲覧端末へ移動する必要がある。しかし、記憶媒体を用いたデータの受け渡しはファイルの移動元および移動先の端末の他に物理媒体を必要とし、有線の端末通信はケーブルを必要とする。これらの物理媒体を用いない手法として無線通信が挙げられる。無線通信には1対1の通信およびサーバを介したファイル共有が用いられている。しかし、無線通信において複数の端末が存在する状況で端末の連携を行う際には、「どの端末とどの端末が接続している」状態であるのかということがわかりづらいという問題があった。図 7.3A に示すように、タブレット端末は端末 A, B, C のいずれの端末と連携を行うかを指定するかがわかりづらい。

この問題を解決する手法として、マーカを用いた2端末を重ねる操作による端末連携を示す。この連携手法において、重なっている2つの端末が連携状態であることを示す。図 7.4B に示すように、端末それぞれに対応したマーカを設定する。それぞれのスマートフォンに対

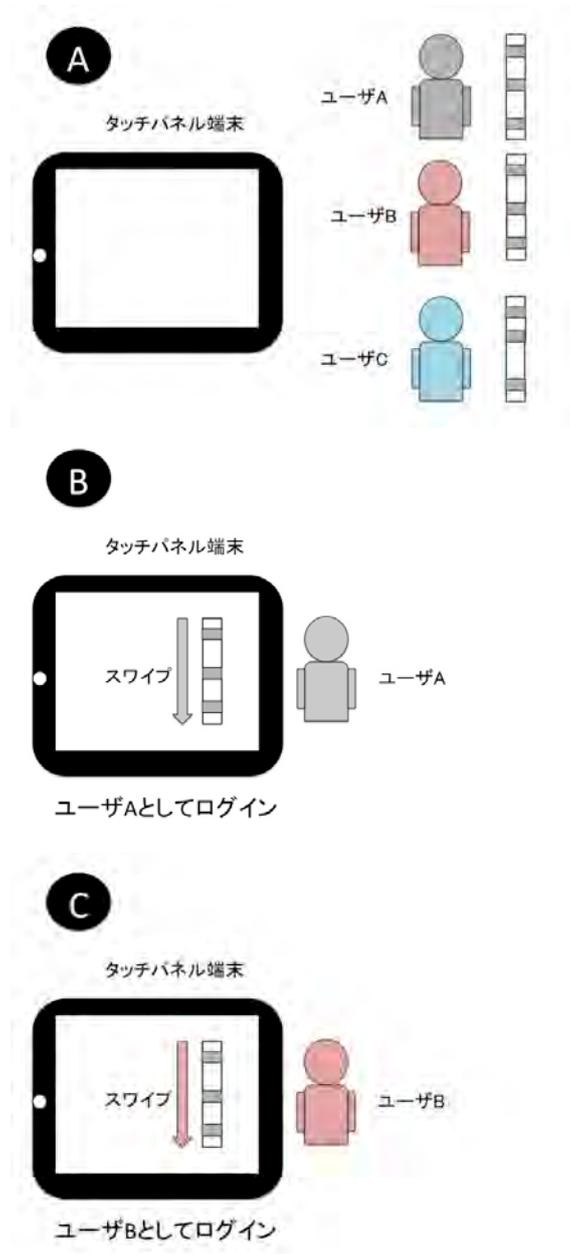


図 7.2: ユーザ認証システムの概要

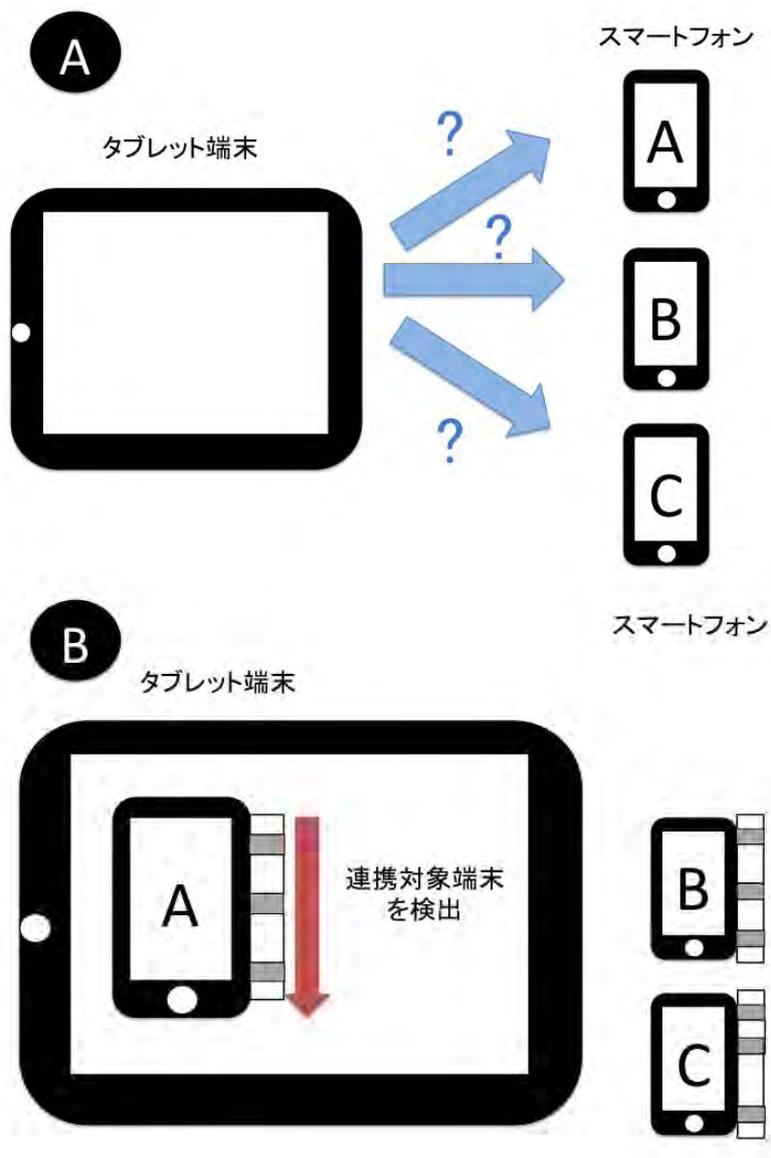


図 7.3: 端末連携システムの概要

応するマーカを組み込んだ端末ケースを装着する（図 7.5）．端末ケースを装着した端末をタブレット端末のタッチパネル上に設置し，マーカ部分にスワイプ操作を行う．この操作により端末は端末ケースの ID を認識することができる．この ID と対応する端末を対象に Bluetooth 通信を用いて接続を行う（図 7.4）．ユーザは連携したい端末に端末を重ね，ケースに内蔵されたマーカに対してスワイプ操作を行うことにより容易に連携対象端末を指定することができる．



図 7.4: 端末連携システムのイメージ図



図 7.5: 端末ケース（A：背面，B：表面）

第8章 まとめ

本研究は、タッチパネル上に連続的にタッチ点を発生させ、その発生位置の距離を用いてタッチパネル搭載デバイスが検出を行うマーカの認識手法を示し、この手法を用いたマーカのプロトタイプを作製した。本研究にて作製したプロトタイプは導電フィラメントと非導電フィラメント、金属箔と木製棒、およびアルミ板とアクリル板の組み合わせを用いて作製した。プロトタイプを用いてマーカの素材および導電部、非導電部の長さの比較を行い、考察した。タッチパネル上のタッチ点は発生した位置が近すぎる場合、同一のタッチ点として認識され、本研究の検出手法を用いることができない場合があることが実験にて示された。プロトタイプを用いた実験によりタッチ点が同一として認識される距離を求め、マーカの設計方針を示した。このマーカを用いたアプリケーションを示し、マーカの有用性を示した。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，指導教員である志築文太郎准教授には，研究への姿勢，論文執筆の方法，研究発表について数多くのご指導と助言を賜りました．また，高橋伸准教授，嵯峨智准教授，Simona Vasilache 助教には，研究室内の発表において様々なご助言をいただきました．先生方に深く感謝申し上げます．

また，研究室の皆様には，研究活動および日々の生活において大変お世話になりました．特に，WAVE チームの皆様には研究テーマ，実験，論文の執筆，発表練習まで数多くのアドバイスをいただきました．被験者実験，ソフトウェアの実装，3D プリンタを用いたプロトタイプの実装，また日々の生活においても研究室の皆さまに助けていただきました．研究室の皆さまに感謝申し上げます．

最後に，6年間の学生生活を共に過ごした様々な面でお世話になった友人や近隣住人の皆様，および著者の生活面および経済面を支えてくださった家族に心より感謝申し上げます．

著者論文リスト

本論文に関する論文

該当なし

その他の論文

公表済み論文

1. Yuya Kawabata, Daisuke Komoriya, Yuki Kubo, Buntarou Shizuki, Jiro Tanaka. "Effects of Holding Ring Attached to Mobile Devices on Pointing Accuracy." Proc. of 18th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2016), HCI(2), pp.309-319, July 2016.

査読のない発表論文

1. 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", 情報処理学会, 第 171 回 ヒューマンコンピュータインタラクション研究会, 沖縄, 2017 年, 1 月, 6p.
2. 川畑 裕也, 志築文太郎, 田中二郎, "2 つの静電容量式マルチタッチパネルにおける導電体位置検出現象を用いた端末連携システム", 情報処理学会第 77 回大会, pp. 4-291 - 4-292, 2015 年 3 月.
3. 埜田 一貴, 山路 大樹, 菅野 恭平, 川畑 裕也, "VACUUU(・▽・)UUUM.", 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 12E-7, 2014 年 09 月.

参考文献

- [BBO15] Andrea Bianchi, So-Ryang Ban, and Ian Oakley. Designing a physical aid to support active reading on tablets. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 699–708, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [BBR10] Patrick Baudisch, Torsten Becker, and Frederik Rudeck. Lumino: Tangible building blocks based on glass fiber bundles: Invited demo. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '10, pp. 299–299, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [BFTK15] Mads Bock, Martin Fisker, Kasper Fischer Topp, and Martin Kraus. Tangible widgets for a multiplayer tablet game in comparison to finger touch. In *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '15, pp. 755–758, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [CMRB12] Liwei Chan, Stefanie Müller, Anne Roudaut, and Patrick Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: Sensing stacks of building blocks, dials and sliders on capacitive touch screens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2189–2192, 2012.
- [GS16] Timo Götzelmann and Daniel Schneider. CapCodes: capacitive 3D printable identification and on-screen tracking for tangible interaction. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '16, pp. 32:1–32:4, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [GXH15] Anhong Guo, Robert Xiao, and Chris Harrison. CapAuth: identifying and differentiating user handprints on commodity capacitive touchscreens. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, ITS '15, pp. 59–62, New York, NY, USA, 2015. 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.

- [HVWB15] Florian Heller, Simon Voelker, Chat Wacharamanatham, and Jan Borchers. Trans-
porters: Vision & touch transitive widgets for capacitive screens. In *Proceedings of
the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Comput-
ing Systems*, CHI EA '15, pp. 1603–1608, New York, NY, USA, 2015. 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.
- [IT15] Kohei Ikeda and Koji Tsukada. CapacitiveMarker: Novel interaction method using vi-
sual marker integrated with conductive pattern. In *Proceedings of the 6th Augmented
Human International Conference*, AH '15, pp. 225–226, New York, NY, USA, 2015.
ACM.
- [IU97] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible Bits: towards seamless interfaces between
people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human
Factors in Computing Systems*, CHI '97, pp. 234–241, New York, NY, USA, 1997.
ACM.
- [JDF12] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, and Jean-Daniel Fekete. Tangible remote con-
trollers for wall-size displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human
Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2865–2874, New York, NY, USA, 2012.
ACM.
- [JGAK07] Sergi Jordà, Günter Geiger, Marcos Alonso, and Martin Kaltenbrunner. The re-
acTable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible
interfaces. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Em-
bedded Interaction*, TEI '07, pp. 139–146, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [JKT⁺16] Sungjune Jang, Lawrence H. Kim, Kesler Tanner, Hiroshi Ishii, and Sean Follmer.
Haptic edge display for mobile tactile interaction. In *Proceedings of the 2016 CHI
Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 3706–3716, New
York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KHC⁺13] Yoshihiro Kawahara, Steve Hodges, Benjamin S. Cook, Cheng Zhang, and Gre-
gory 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.
- [KLLC16] Han-Chih Kuo, Rong-Hao Liang, Long-Fei Lin, and Bing-Yu Chen. GaussMarbles:
spherical magnetic tangibles for interacting with portable physical constraints. In

Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16, pp. 4228–4232, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [KM14] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. Extension sticker: A method for transferring external touch input using a striped pattern sticker. In *Proceedings of the Adjunct Publication 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. ExtensionSticker: A proposal for a striped pattern sticker to extend touch interfaces and its assessment. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1851–1854, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [KM16] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. 3D printed physical interfaces that can extend touch devices. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, pp. 47–49, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KWRE11] Sven Kratz, Tilo Westermann, Michael Rohs, and Georg Essl. CapWidgets: Tangible widgets versus multi-touch controls on mobile devices. In *Proceedings of CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, pp. 1351–1356, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [LCC⁺13] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Liwei Chan, Chuan-Xhyuan Peng, Mike Y. Chen, Rung-Huei Liang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBits: magnetic tangible bits for portable and occlusion-free near-surface interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 1391–1400, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [LCT⁺14] Rong-Hao Liang, Liwei Chan, Hung-Yu Tseng, Han-Chih Kuo, Da-Yuan Huang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBricks: Magnetic building blocks for constructive tangible interactions on portable displays. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 3153–3162, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LKC⁺14] Rong-Hao Liang, Han-Chih Kuo, Liwei Chan, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussStones: shielded magnetic tangibles for multi-token interactions on portable displays. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 365–372, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [MGABP16] Rafael Morales González, Caroline Appert, Gilles Bailly, and Emmanuel Pietriga. TouchTokens: guiding touch patterns with passive tokens. In *Proceedings of the 2016*

- CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 4189–4202, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [OW08] Alex Olwal and Andrew D. Wilson. SurfaceFusion: unobtrusive tracking of everyday objects in tangible user interfaces. In *Proceedings of Graphics Interface 2008*, GI '08, pp. 235–242, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2008. Canadian Information Processing Society.
- [Rek02] Jun Rekimoto. SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [RMST16] Georg Regal, Elke Mattheiss, David Sellitsch, and Manfred Tscheligi. TalkingCards: Using tactile NFC cards for accessible brainstorming. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, AH '16, pp. 18:1–18:7, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [RUO01] Jun Rekimoto, Brygg Ullmer, and Haruo Oba. DataTiles: A modular platform for mixed physical and graphical interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '01, pp. 269–276, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [SHH⁺15] Valkyrie Savage, Andrew Head, Björn Hartmann, Dan B. Goldman, Gautham Mysore, and Wilmot Li. Lamello: Passive acoustic sensing for tangible input components. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1277–1280, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [SKB⁺15] Martin Schmitz, Mohammadreza Khalilbeigi, Matthias Balwierz, Roman Lissermann, Max Mühlhäuser, and Jürgen Steimle. Capricate: A fabrication pipeline to design and 3d print capacitive touch sensors for interactive objects. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 253–258, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [TKKN05] Eiji Tokunaga, Hiroaki Kimura, Nobuyuki Kobayashi, and Tatsuo Nakajima. Virtual Tangible Widgets: Seamless universal interaction with personal sensing devices. In *Proceedings of the 7th International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI '05, pp. 325–332, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [VCT⁺15] Simon Voelker, Christian Cherek, Jan Thar, Thorsten Karrer, Christian Thoresen, Kjell Ivar Overgrd, and Jan Borchers. PERCs: Persistently trackable tangibles on capacitive multi-touch displays. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 351–356, New York, NY, USA, 2015. ACM.

- [VNT⁺13] Simon Voelker, Kosuke Nakajima, Christian Thoresen, Yuichi Itoh, Kjell Ivar Overgrd, and Jan Borchers. PUCs: Detecting transparent, passive untouched capacitive widgets on unmodified multi-touch displays. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '13*, pp. 101–104, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [WSR⁺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 Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '12*, pp. 309–312, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [WWJ⁺09a] Malte Weiss, Julie Wagner, Yvonne Jansen, Roger Jennings, Ramsin Khoshabeh, James D. Hollan, and Jan Borchers. SLAP Widgets: Bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '09*, pp. 481–490, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [WWJ⁺09b] Malte Weiss, Julie Wagner, Roger Jennings, Yvonne Jansen, Ramsin Khoshabeh, James D. Hollan, and Jan Borchers. SLAPbook: Tangible widgets on multi-touch tables in groupware environments. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI '09*, pp. 297–300, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [YCC⁺10] Neng-Hao Yu, Li-Wei Chan, Lung-Pan Cheng, Mike Y. Chen, and Yi-Ping Hung. Enabling tangible interaction on capacitive touch panels. In *Adjunct Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '10*, pp. 457–458, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [YCL⁺11] Neng-Hao Yu, Li-Wei Chan, Seng Yong Lau, Sung-Sheng Tsai, I-Chun Hsiao, Dian-Je Tsai, Fang-I Hsiao, Lung-Pan Cheng, Mike Chen, Polly Huang, and Yi-Ping Hung. TUIC: Enabling tangible interaction on capacitive multi-touch displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pp. 2995–3004. ACM, 2011.
- [YTH⁺11] Neng-Hao Yu, Sung-Sheng Tsai, I-Chun Hsiao, Dian-Je Tsai, Meng-Han Lee, Mike Y. Chen, and Yi-Ping Hung. Clip-on Gadgets: Expanding multi-touch interaction area with unpowered tactile controls. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp. 367–372, New York, NY, USA, 2011. ACM.

- [加藤 13] 加藤邦拓, 宮下芳明. 紙窓: そこに置くだけで操作可能なカードインタフェース. WISS '13: 第 21 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, pp. 163–164, 2013.
- [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. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) , Vol. 2014, No. 29, pp. 1–6, 2014.
- [高田 15a] 高田悠太, 中林隆介, 福地健太郎. 立体映像表示が可能なタンジブルデバイス Ficon へのペン入力の統合. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 4, pp. 1184–1192, 2015.
- [高田 15b] 高田峻介, 志築文太郎, 田中二郎. MonoTouch : 複数ジェスチャ判別が可能な単一電極タッチセンサ. WISS '15: 第 23 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, pp. 91–96, 2015.
- [上野 16] 上野新葉, 加藤邦拓, 宮下芳明. オブジェクト上でのタッチ操作を実現するタンジブルインタフェース. インタラクシオン 2016 論文集, pp. 872–877, 2016.
- [青木 11] 青木良輔, 宮下広夢, 井原雅行, 大野健彦, 千明裕, 小林稔, 鏡慎吾. くるみる : 複数導電部もつ枠型物理オブジェクトを用いたタブレット操作. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクシオン (HCI) , Vol. 2011, No. 6, pp. 1–8, 2011.
- [川畑 15] 川畑裕也, 志築文太郎, 田中二郎. 2 つの静電容量式マルチタッチパネルにおける導電体位置検出現象を用いた端末連携システム. 情報処理学会第 77 回全国大会講演論文集, 第 4 巻, pp. 291–292, 2015.
- [池松 14a] 池松香, 椎尾一郎. Multi-Press Interaction: 疑似押下圧力を用いたマルチタッチ技法. 情報処理学会 インタラクシオン 2014, pp. 401–404, 2014.
- [池松 14b] 池松香, 椎尾一郎. 記憶の石 : マルチタッチを利用したデバイス間情報移動. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1344–1352, 2014.
- [竹岡 12] 竹岡義樹, 味八木崇, 暦本純一. 指先の 3 次元姿勢を検出する 3 次元マルチタッチ z-touch. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 1338–1348, 2012.
- [中林 11] 中林隆介, 佐藤俊樹, 福地健太郎, 高田悠太. Ficon : テーブルトップシステム向けの光ファイバを用いた映像提示可能な操作デバイス. Technical Report 17, 明治大学理工学研究科, 電気通信大学情報システム学研究科, 明治大学理工学研究科, 明治大学理工学研究科, jul 2011.

付録A 実験に使用したマーカ

導電部 6 mm



図 A.1: 導電部 6 mm, 非導電部 1 mm



図 A.2: 導電部 6 mm, 非導電部 2 mm



図 A.3: 導電部 6 mm, 非導電部 3 mm



図 A.4: 導電部 6 mm, 非導電部 4 mm

導電部 7 mm



図 A.5: 導電部 7 mm, 非導電部 1 mm



図 A.6: 導電部 7 mm, 非導電部 2 mm



図 A.7: 導電部 7 mm, 非導電部 3 mm



図 A.8: 導電部 7 mm, 非導電部 4 mm

導電部 8 mm



図 A.9: 導電部 8 mm, 非導電部 1 mm



図 A.10: 導電部 8 mm, 非導電部 2 mm



图 A.11: 导电部 8 mm, 非导电部 3 mm



图 A.12: 导电部 8 mm, 非导电部 4 mm

導電部 9 mm



図 A.13: 導電部 9 mm, 非導電部 1 mm



図 A.14: 導電部 9 mm, 非導電部 2 mm



図 A.15: 導電部 9 mm, 非導電部 3 mm



図 A.16: 導電部 9 mm, 非導電部 4 mm

導電部 10 mm



図 A.17: 導電部 10 mm, 非導電部 1 mm



図 A.18: 導電部 10 mm, 非導電部 2 mm



図 A.19: 導電部 10 mm, 非導電部 3 mm



図 A.20: 導電部 10 mm, 非導電部 4 mm

導電部 11 mm



図 A.21: 導電部 11 mm, 非導電部 1 mm



図 A.22: 導電部 11 mm, 非導電部 2 mm



図 A.23: 導電部 11 mm, 非導電部 3 mm



図 A.24: 導電部 11 mm, 非導電部 4 mm

導電部 12 mm



図 A.25: 導電部 12 mm, 非導電部 1 mm



図 A.26: 導電部 12 mm, 非導電部 2 mm



図 A.27: 導電部 12 mm, 非導電部 3 mm



図 A.28: 導電部 12 mm, 非導電部 4 mm

導電部 13 mm



図 A.29: 導電部 13 mm, 非導電部 1 mm



図 A.30: 導電部 13 mm, 非導電部 2 mm



図 A.31: 導電部 13 mm, 非導電部 3 mm



図 A.32: 導電部 13 mm, 非導電部 4 mm

導電部 14 mm



図 A.33: 導電部 14 mm, 非導電部 1 mm



図 A.34: 導電部 14 mm, 非導電部 2 mm



図 A.35: 導電部 14 mm, 非導電部 3 mm



図 A.36: 導電部 14 mm, 非導電部 4 mm

導電部 12 mm



図 A.37: 導電部 15 mm, 非導電部 1 mm



図 A.38: 導電部 15 mm, 非導電部 2 mm



図 A.39: 導電部 15 mm, 非導電部 3 mm



図 A.40: 導電部 15 mm, 非導電部 4 mm