

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

単一電極を用いたタッチジェスチャ認識手法

高田 峻介

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

ハードウェア製作において、素早く試作を行うラピッドプロトタイピングは、ハードウェアの使用感およびサイズ感を知るのに重要である。このラピッドプロトタイピングを行うための3Dプリンタやレーザカッタなどの機器が安価に販売されるようになり、さらに容易に制御可能なマイコンボードの普及により、ハードウェアプロトタイピングを行う人が増えている。また、昨今のスマートフォンおよびタブレット等のタッチパネル搭載端末の普及により、タップやスワイプなどのタッチジェスチャが広く用いられるようになった。インタフェースの設計者が、このタッチジェスチャを入力に用いるインタフェースを構築するためには、通常タッチパネルのようなデバイスを用いればよい。しかし、タッチパネルは複数の配線を必要とし、形状も平面かつ四角形のものが多いため、作りたいものによっては不適切な場合がある。さらにタッチパネルの入力を認識するための回路は複雑であり、構築することが難しい。そのため本研究にて、設計および開発が容易であり、様々な場面に応じて形状を変えることが可能な、タッチインタフェース構築用のタッチジェスチャ認識手法を開発した。本手法を用いたインタフェースは、電気を通す導電部を非導電部を用いて区切る様な構造の電極を、指が接触しているかどうかを検出するタッチセンサに単一の結線にて接続することにより構築可能である。さらに、電極は用途およびインタフェース設計者が所持しているプロトタイピング環境に応じて様々な手法にて製作可能であり、最も簡単に製作する場合には、金属製の物体に非導電性のテープを貼り付けるだけで良い。つまり本手法を用いるインタフェース設計者は素早く、容易に、かつ用途に応じたタッチジェスチャ認識用のインタフェースを構築できる。本研究にて、用途に応じた電極及びタッチセンサの構築手法を示し、本手法を用いてタッチジェスチャ認識が可能であることを実験により明らかにした。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	目的およびアプローチ	4
1.2	本研究の貢献	5
1.3	本論文の構成	5
第2章	関連研究	6
2.1	タッチ操作に関する研究	6
2.1.1	タッチ検出手法	6
2.1.2	接触した際に生じる波形を利用する研究	7
2.1.3	タッチ操作を拡張する研究	8
2.2	ファブリケーション手法に関する研究	9
2.2.1	3Dプリンタを用いたファブリケーション手法	9
2.2.2	導電素材を用いたファブリケーション手法	10
2.3	周辺環境のインタフェース化手法	10
2.4	本研究の位置づけ	11
第3章	MonoTouch	12
3.1	タッチジェスチャ判別の方法	12
3.2	タッチ検出手法	14
3.2.1	静電容量計測回路を用いる手法	14
3.2.2	タッチパッドおよびタッチパネルを用いる手法	16
3.2.3	マイク端子を用いる手法	16
3.3	MonoTouchの電極	19
3.3.1	電極の構築方法	19
	3Dプリンタを用いる手法	19
	レジンキャストを用いる手法	20
	アセトンを用いる手法	20
	オープンを用いる手法	20
	レーザカッタを用いる手法	20
	その他の導電物質を用いる手法	24
3.3.2	電極パターン	27
3.4	指のまたがり問題	30

第4章	評価実験	31
4.1	評価実験1：タッチジェスチャ認識精度評価	31
4.1.1	実装	31
	電極の製作	31
	静電容量の検出	32
	ジェスチャの認識方法	32
4.1.2	実験設計	33
4.1.3	実験結果および考察	33
4.2	評価実験2：電極サイズおよび形状を変えた際のタッチジェスチャ認識精度評価	34
4.2.1	実装	34
	サイズ条件	34
	形状条件	34
	製作した電極	36
4.2.2	実験設計	36
	被験者	36
	実験手順	36
4.2.3	実験結果	38
4.2.4	考察	38
4.3	評価実験3：導電部幅および非導電部幅を変えた際の影響評価	42
4.3.1	実装	42
	電極の製作	42
	静電容量の検出	42
4.3.2	実験設計	43
4.3.3	実験結果	44
4.3.4	考察	44
4.3.5	デザイン指針	44
第5章	アプリケーション	46
5.1	ヘッドホン	46
5.2	スマートフォンカバー	48
5.3	インタラクティブなフィギュア	48
5.4	周辺環境のインタフェース化	50
第6章	議論	51
6.1	電極の形	51
6.1.1	縦型の MonoTouch 電極	51
6.1.2	スライダ	51
6.1.3	溝	53
6.2	他のタッチ検出回路用電極	53

光学方式タッチ検出を用いた MonoTouch	53
気圧方式タッチ検出を用いた MonoTouch	54
6.3 関連研究との組み合わせ	54
第7章 結論	56
参考文献	58
著者論文リスト	66
付録A 実験2において使用した書類	69

目次

1.1	タッチパネルの例	1
1.2	タッチジェスチャを認識するうさぎ形オブジェクト	2
1.3	MonoTouch のセンサの構成	3
1.4	MonoTouch 用の電極の構造	3
1.5	電極上にてスワイプを行った際の時間的な応答の変化のイメージ	3
1.6	MonoTouch を用いたタッチインタフェースの構築	4
3.1	MonoTouch のタッチインタフェース	13
3.2	MonoTouch の原理 (a : タップ操作, b : 順方向スワイプ操作, c : 逆方向スワイプ操作)	13
3.3	上下左右スワイプを認識できる電極およびタッチジェスチャ時の応答波形	14
3.4	静電容量計測回路	15
3.5	RC 回路の電圧グラフ (非タッチ時)	15
3.6	RC 回路の電圧グラフ (タッチ時)	15
3.7	タッチパッドを用いた MonoTouch の例	16
3.8	タッチパネルを用いた MonoTouch の例	17
3.9	マイク端子と電極の接続方法	17
3.10	マイク端子と電極の接続	18
3.11	非タッチ時のマイク端子の入力波形およびタッチ時の入力波形	18
3.12	マイク端子を用いる MonoTouch のプロトタイプ例	18
3.13	電極の 3D データおよび 3D プリントして製作した電極	19
3.14	レジンキャストを用いた電極製作手法	21
3.15	アセトンに溶かした導電性フィラメントを用いた電極製作手法	22
3.16	アセトンに溶かした導電性フィラメントを用いて製作した電極	22
3.17	オーブンを用いた加温による電極製作手法	23
3.18	オーブンを用いて加温し, 製作した電極	23
3.19	3D プリントペンを用いた電極製作	24
3.20	3D プリントペンを用いて製作した電極	25
3.21	CNC フライスを用いて製作した電極	25
3.22	導電インクを用いて印刷した電極	26
3.23	銅板を用いて製作した電極	26
3.24	4 方向スワイプ用電極パターン	27

3.25	8方向スワイプ用電極パターン	27
3.26	スワイプ距離計測用電極パターン	27
3.27	回転スワイプ用電極パターン	28
3.28	スワイプ位置判別用電極パターン	29
3.29	個体識別用電極パターン	29
3.30	MonoTouch を用いたレジのイメージ	29
3.31	各電極形状におけるスワイプ操作時に導電部に触れる指の部位	30
4.1	実験に用いた電極 (a: 電極パターンの設計, b: 製作した電極)	32
4.2	評価実験 1 の認識システムの構成	32
4.3	それぞれのタッチジェスチャを行った際に得られる波形	33
4.4	サイズ条件ごとの電極パターンのサイズ	35
4.5	盛り上げによる指のまたがりの解消	35
4.6	盛り上げの付与位置	35
4.7	製作した電極の一覧	36
4.8	測定した指の位置	37
4.9	実験の様子	38
4.10	指の断面積ごとの各電極条件における認識精度と線形近似	41
4.11	評価用電極の形状	42
4.12	製作した評価用電極	43
4.13	評価実験 3 の認識システムの構成	43
4.14	電極を固定するための土台	44
4.15	電極導電部の間隔と認識率の関係	45
4.16	電極導電部の幅と認識率の関係	45
5.1	音楽プレイヤーに用いられている入力インタフェースの例	47
5.2	MonoTouch の電極を搭載したヘッドホン用入力インタフェース	47
5.3	ヘッドホン例における入力の割り当て一覧	47
5.4	MonoTouch の電極を搭載したヘッドホン用入力インタフェースの拡張例	48
5.5	MonoTouch の電極を搭載したスマートフォンカバー	49
5.6	MonoTouch の電極を搭載した恐竜のフィギュア	49
5.7	MonoTouch の電極を搭載した梟のフィギュア	49
5.8	金属製のドアノブをタッチインタフェース化した例	50
5.9	アルミシンクをタッチインタフェース化した例	50
6.1	縦型の MonoTouch 電極	52
6.2	電極読み取り部の構造	52
6.3	MonoTouch を利用した直線スライダ機構	52
6.4	電極表面の溝	53
6.5	光学方式タッチ検出手法を用いたタッチジェスチャ認識用システム	54

6.6	気圧方式タッチ検出手法を用いたタッチジェスチャ認識用システム	55
6.7	関連研究 [SPH12, TNS16] と組み合わせた際の信号処理のイメージ	55

表目次

4.1	評価実験 1 の認識結果の混同行列	34
4.2	被験者の右手人指し指のサイズ	37
4.3	各電極条件におけるジェスチャ認識の混同行列	39
4.4	被験者ごとの各電極条件における正答率	40
4.5	被験者ごとの各電極条件における平均入力速度 [s]	40

第1章 はじめに

スマートフォンならびにタブレットといったタッチパネルを入力装置として用いる情報端末が普及し、指および手の接触（タッチ）ならびに動きを伴うタッチ（タッチジェスチャ）が、機器への入力操作として広く用いられるようになった。その際、一般的に用いられているタッチジェスチャとして、一度タッチパネルにタッチした後すぐに指を離すタップや、指をタッチパネルに触れさせたまま表面をなぞるスワイプなどが挙げられる。これらのタッチジェスチャは例えば Web ブラウザアプリケーションにおいて、URL の選択（タップ）、一つ前のページに戻る（スワイプ）といった操作に利用することができる。

タッチを検出する手法として、圧力を用いたもの、光の反射を用いたもの、ならびに静電容量を用いたものなど、様々な方式のセンサが用いられている [RP09, 真鍋 15, SPH12]。さらにタッチセンサを配列状に並べることにより、タッチ位置を認識可能なタッチパネルを構築できる。またタッチパネルを構築することにより、タッチジェスチャの認識が可能となる。しかしタッチパネルを構築するためには、多数のセンサを接続するための結線が必要となる。さらに、昨今のスマートフォンなどに搭載されている相互誘導方式の静電容量タッチパネルの場合、多量のセンサ入力の切り替えのためにマルチプレクサを用いた高速なスイッチングが必要となる。これらの理由より、タッチパネルは自作の難易度が高い。また市販されている図 1.1 に示すようなタッチパネルは平面かつ、四角形の物が多い。

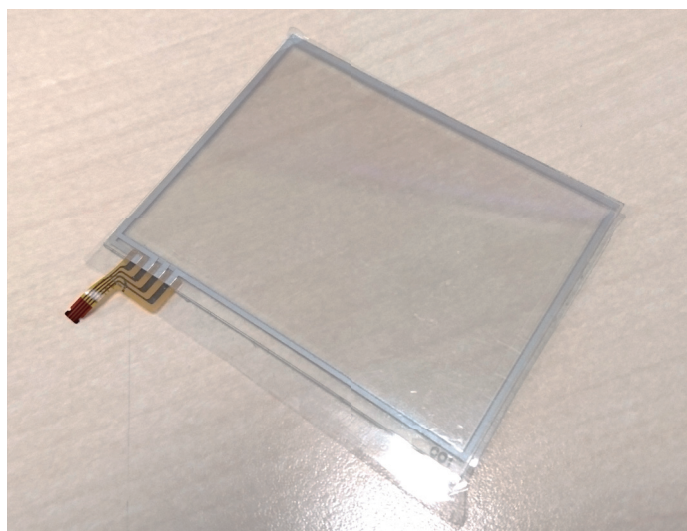


図 1.1: タッチパネルの例

製品の試作，趣味ならびに研究用途などにて，アイデアを素早く形にするための手法であるラピッドプロトタイピングがある．ハードウェア製作のラピッドプロトタイピングツールである，Arduino [Ard] および mbed [ARM] のように簡単にプログラミングや電子工作が可能なマイコンボードならびに，家庭用の安価な 3D プリンタ [XYZ] が売られるようになり，個人でも容易かつ迅速にハードウェアが開発できるようになった．ラピッドプロトタイピング環境において，タッチ操作を入力として用いたいという需要は高く，これまでにタッチインタフェースを容易に構築可能なプロトタイピングツールが数多く提案されている [OST13, SPH12, TNS16, CS12]．これらの研究は，指が触れているかどうか，どのように触れているか（人差し指のみを用いて触れている，手のひら全体を用いて触れている）といった動きを伴わない，タッチ操作の認識を主に行っている．しかし，用途によってはスワイプのような動きを伴う，タッチジェスチャを入力として用いたインタラクティブなおもちゃのプロトタイプを製作したい場合がある．例えば図 1.2 に示すような，うさぎの形をしたオブジェクトの背中をなでた際の向きを認識し，向きによって異なるうさぎの鳴き声を再生したい場面である．

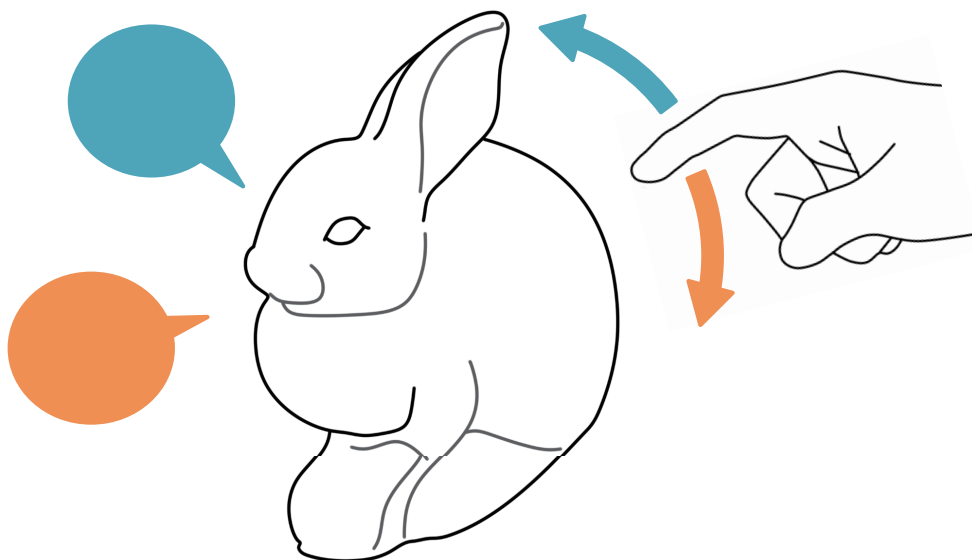


図 1.2: タッチジェスチャを認識するうさぎ形オブジェクト

このプロトタイピングを行う場面にて利用可能な，容易に構築可能かつ安価な，タッチジェスチャ認識を行うためのタッチインタフェース構築技術が求められる．さらに様々な環境および形の物体にタッチインタフェースを組み込むことを想定した場合，四角形のみではなく，円形および星形などの平面形状，ならびに立体的な形状のタッチインタフェースが構築できる方が好ましい．そこで本研究は，容易に構築可能かつ形状を自由に設計可能なタッチジェスチャ認識用のセンシング手法である「MonoTouch」を開発した．

MonoTouch のセンサの構成を図 1.3 に示す。図 1.3 に示すとおり，MonoTouch のセンサは電極，タッチ検出部ならびにジェスチャ認識部から構成される。また電極およびタッチ検出部は単一結線のみを用いて接続されている。そのため金属製のドアなどの導電性の物体を単一結線とみなすことにより，導電性の物体上の 2 点にそれぞれ電極およびタッチ検出部を貼り付け，MonoTouch のセンサを構築することもできる。ジェスチャ認識部はユーザが電極上にてタッチジェスチャを行った際に生じる，タッチの ON/OFF 情報をもとにジェスチャ認識を行う。

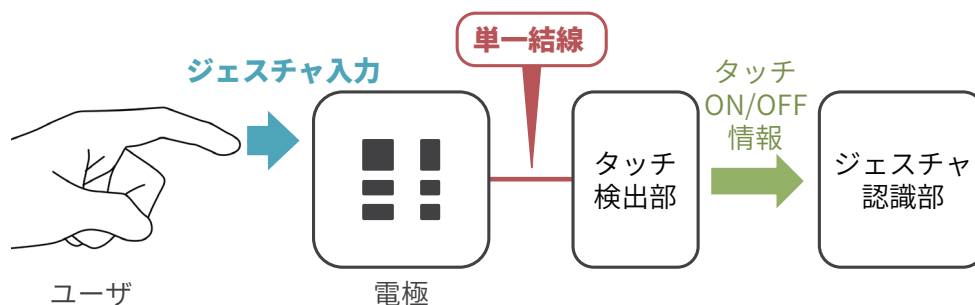


図 1.3: MonoTouch のセンサの構成

MonoTouch に用いられる電極について説明する。MonoTouch は図 1.4 のように，導電性の物体を非導電性の物体を用いて区切る様な導電パターンを有する電極を用いる。この導電パターンは 3D プリンタ，導電インク印刷などを用いて製作可能であり，最も簡単に行う場合，導電性の物体を非導電性のテープを用いて区切るにより構築できる。この電極を単一結線を用いてタッチ検出部に接続することにより，電極表面の導電部にユーザの指がタッチしたかどうかの ON/OFF 情報を検出できる。電極上にて指をすべらせる，スワイプを行った際のタッチ検出部の時間的なタッチの ON/OFF の変化のイメージを図 1.5 に示す。図 1.5 のように，電極の導電部の形状を工夫することにより，スワイプする方向によって異なる応答が発生するため，この応答をもとにスワイプ方向の認識が可能となる。

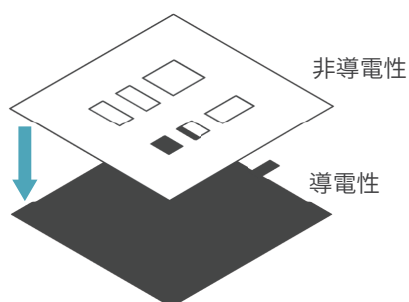


図 1.4: MonoTouch 用の電極の構造

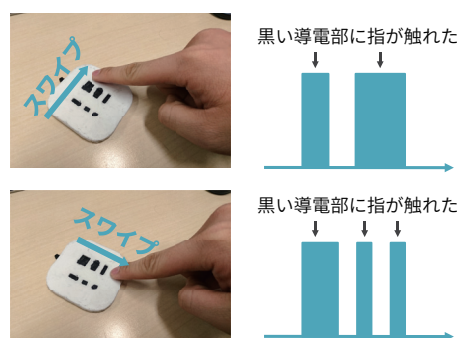


図 1.5: 電極上にてスワイプを行った際の時間的な応答の変化のイメージ

本手法を用いるタッチインタフェース設計者は、図 1.6 のように製作したいタッチインタフェースに応じて電極パターンを設計し、3D プリンタならびに導電インク印刷などのプロトタイプング手法を用いて電極を製作できる。さらにインタフェースの使用環境に応じたタッチ検出手法を用いることができる。

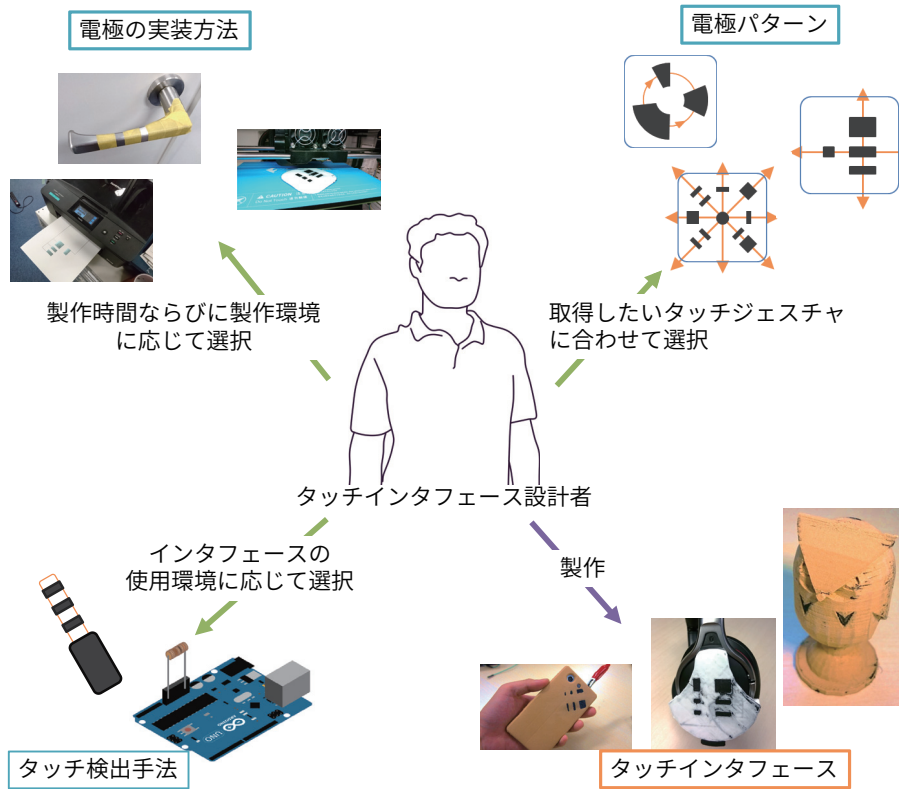


図 1.6: MonoTouch を用いたタッチインタフェースの構築

なお、本研究の成果の一部はヒューマンインタフェースシンポジウム 2015 (HIS2015) [高田 15a] および第 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 (WISS2015) [高田 15b] にて登壇発表により発表済みであり、The 34th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16) [TST16] にてポスター発表により発表済みである。さらに成果の一部を特許出願中である [高田 16b]。

1.1 目的およびアプローチ

本研究の目的は、ラピッドプロトタイプングを行うユーザ向けの、容易にタッチインタフェースを構築可能なタッチジェスチャ認識手法を開発することである。そのために、ユーザがタッチインタフェースにタッチしているかどうかという、タッチの ON/OFF 情報を基にタッチジェスチャを認識する手法である「MonoTouch」を開発した。

1.2 本研究の貢献

本研究の貢献は、タッチインタフェースの構築が容易なタッチジェスチャ認識手法を開発し、実際にジェスチャ認識が可能であることを被験者実験により実証したことである。またタッチインタフェースを構築する際に、最適な電極のレイアウトを設計するための指針を評価実験をもとに明らかにした。さらに、様々な用途および場面に応じて本研究を利用することができるように、複数の実装方法を示した。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2章においては、本研究を行うにあたって参考にした関連する研究を挙げ、本研究の位置づけを行う。第3章においては、MonoTouchを設計および製作するための原理や手法を述べる。第4章においては、MonoTouchを用いたタッチジェスチャ認識精度を評価した実験、MonoTouchに用いる電極形状を変えた場合のタッチジェスチャ認識精度を評価した実験、ならびに最適な電極の設計指針を明らかにするために行った実験を述べる。第5章においては、MonoTouchの応用例等を議論する。第6章においては、結論を述べる。また、付録Aとして実験2に用いた書類を示す。

第2章 関連研究

本手法はタッチ検出が可能なセンサおよび導電部を非導電部にて区切るような構造を持つ電極を用いて、スワイプ方向などのタッチジェスチャを認識する手法である。また電極は3Dプリンタなどのファブリケーション手法を用いて自由な形状にて製作することができる。関連研究として、タッチ操作に関する研究、ファブリケーション手法に関する研究、周辺環境のインタフェース化手法が挙げられる。

2.1 タッチ操作に関する研究

本論文にて示すタッチジェスチャ認識は、タッチジェスチャを入力するユーザの指が電極の導電部にタッチしたかどうかという ON/OFF 情報をもとに行われる。本手法はユーザの指のタッチはタッチ検出回路を用いて検出し、その時間的变化である応答波形を利用してタッチジェスチャ認識を可能とする。そのため本研究と関連する研究として、タッチを検出するためにどのような手法を用いる研究、タッチした際のセンサの応答波形を利用する研究、ならびにタッチ操作を拡張する研究が挙げられる。

2.1.1 タッチ検出手法

押した圧力によって抵抗値が変化する圧力センサを用いてタッチを検出できる。圧力センサを用いたタッチインタフェースとして、The UnMousePad [RP09]、および PreSenseII [RS06] が挙げられる。The UnMousePad は平面形状の圧力センサにかかっている圧力を、場所ごとに計測可能な圧力センサである。PreSenseII はタッチし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により、タッチした際の強弱をインタラクションに利用している。

気圧センサを用いることによりタッチを検出できる。Emoballoon は空気を充満させた風船の中に気圧センサを閉じ込め、風船に触れた際の内部気圧の変化を計測することにより、風船を押す、撫でる、抱きしめるといったジェスチャを認識している [中島 13]。

センサに指を近づけた際の光の反射を利用することによりタッチを検出できる。光学式のセンサを用いたタッチインタフェースとして、ThinSight [HIB⁺07]、および Printed Optics [WBHP12] が挙げられる。ThinSight は液晶ディスプレイ背面部から表面向きに配置した複数の赤外線フォトリフレクタを用いて、液晶ディスプレイをタッチパネル化する研究である。Printed Optics は光を透過する素材を用いて、3D プリントしたオブジェクトを製作する研究であり、応用例の一環として光の反射を利用したタッチ検出インタフェースを構築している。

光学式カメラを用いてタッチを検出する研究がなされている。光学式カメラを用いたタッチインタフェースとして、Han らの手法 [Han05]、および OmniTouch が挙げられる。Han らは透明なアクリル板の側面より光を照射し、アクリル板の内部にて光を反射させることにより、アクリル板に触れた手や指先が明るくなる現象を、カメラを用いて撮影することにより、タッチした位置を検出可能なタッチパネルを構築している。OmniTouch はユーザの肩に装着した深度カメラセンサを用いて手を撮影し、手が紙やもう片方の手のような面状の物体に触れた際の位置を検出している。

指もしくは手が金属等の導電性物質によってできた電極に触れた際に、指と電極との間に生じる静電容量を計測することによりタッチを検出できる。静電容量を用いたタッチインタフェースとして Holleis らの手法 [HSP⁺08] および PrintSense [GSO⁺14] が挙げられる。Holleis ら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製作している。PrintSense は導電インク印刷により製作した曲げられるタッチ電極を用いた、静電容量方式のタッチセンサである。

物体に手や指が触れた際の音響の変化を用いてタッチの検出を行う研究や製品がある。音響特性を用いたタッチインタフェースとして Skinput [HTM11] および PseudoButton [HW12] が挙げられる。Skinput は指を用いて肌を叩いた際に生じる皮膚の振動を、皮膚に貼り付けた音響センサを用いて検出し、インタフェースに利用している。PseudoButton はスマートフォンなどの携帯端末のマイクを指を用いてふさいだ際の入力音声信号の減衰を用いてタッチを検出している。また超音波表面弾性波 (SAW) 方式のタッチパネルディスプレイが市販されている [Iiy]。SAW 方式のタッチパネルは指が画面にタッチした際に、画面上を伝搬している超音波が減衰する現象を用いてタッチを検出している。

前段落までに述べたタッチ検出手法以外の手法を述べる。Raphael らは電極にタッチした際の時間領域反射を測定することによりタッチを検出している [WB11]。Gabe らは室内のコンセントや家電機器が発する電磁ノイズを、ユーザの体を一種のアンテナとして用いることにより受信し、解析することにより、壁にタッチしたかどうかおよび壁までの距離を認識している [CMPT11]。TempTouch はペルチェ素子にタッチした際の、指の体温によりペルチェ素子の温度が上がる現象を用いてタッチを検出している [PN13]。

本研究にて示す手法は電極にタッチしたかどうか、というタッチの ON/OFF 情報をもとにタッチジェスチャを認識できる。本項にて示した手法はタッチの ON/OFF を検出可能であり、本研究にて示す手法に利用できる可能性がある。本論文においては、特に静電容量タッチセンサは単一結線のみを用いてタッチを検出可能であり、インタフェース構築の容易さを持つため実装に利用した。

2.1.2 接触した際に生じる波形を利用する研究

2.1.1 項にて述べたように、音、光、静電容量などを用いてタッチを検出できる。本研究にて示す手法はタッチの ON/OFF 情報の時間的変化を解析することによりタッチジェスチャを認識している。本研究と同様に、タッチした際のセンサの応答を解析することによりタッチ入力を拡張する研究を述べる。

波形を基に物体の種類および物体への入力を認識する研究を述べる。Acoustic Barcodes はアクリル板の表面上に一定のパターンになるように間隔を空けながら溝を設け、板が引っ掻かれた際の音の波形を基に、引っ掻かれた板を識別している [HXH12]。同様のインタラクションを 3D プリントしたオブジェクトを用いて行う研究もある [SHH⁺15]。Acoustruments はスマートフォンに内蔵されたマイクおよびスピーカの間を 3D プリントした管を用いて接続することにより、管を押す、捻るなどの動作を応答波形を基に認識している [LBHH15]。EM-Sense はタッチした電気機器ごとに固有の、電磁波を解析することにより、タッチした電気機器を認識している [LYX⁺15]。

応答波形を基に物体への触れ方を認識する研究を述べる。Sato らの Touché [SPH12] および Poupyrev らの Botanicus Interacticus [PSLS12] は電極に手が触れた際に生じる静電容量によって変化する周波数特性を、周波数が連続的に変化する掃引信号およびフーリエ変換を用いて解析し、電極への触れ方を認識している。本手法を応用することにより、誰が触れているかも認識できる [HSP12]。同様のことは、音響特性を用いても可能であり、Touch&Activate は、ユーザが物体に触れた際の音響的な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。本手法を応用することにより物体にタッチした際の押下圧力を計測することも可能である [OST14]。

真鍋らの手法は静電容量方式および光学式のタッチセンサを用いて、センサに触れた際の応答波形の立ち上がりおよび立ち下がりの急峻さを用いて、指を用いて電極表面をなぞるスワイプジェスチャやなぞる指の本数を認識可能である。

本研究は真鍋らの手法のように、タッチした際の応答波形の変化をもとに、タッチジェスチャを認識している。しかし、タッチの応答波形の急峻さを計測するためには、複雑な回路が必要なのに対し、本研究はタッチの ON/OFF という単純な応答を用いてタッチジェスチャを認識できるため、構築が容易である。

2.1.3 タッチ操作を拡張する研究

タッチセンサを用いて指や手の接触を検出する際に、他のセンサを組み合わせることによりタッチ操作の拡張が可能である。本論文にて述べる手法においても以下に述べる研究を参考にタッチ操作を拡張できる可能性がある。

タッチ時に押下圧力を計測する研究を述べる。BaroTouch はタッチパネル押下時の気圧センサの応答波形を基に押下圧力を取得する研究である [高田 16a]。Expressive Touch はタッチパネルを押下した際に生じる音の大きさを基に押下圧力を取得している [PH14]。ForcePhone は Touch&Activate [OST14] の様に、スマートフォン内蔵のマイク、スピーカを用いた超音波音響センシングにより、押下圧力を計測している [TS16]。GripSense は端末内蔵の振動モータおよびスマートフォンを指にてタッチした際の角速度を計測し、端末の把持状態ならびにタッチの強弱を識別可能にした研究である [GWP12]。ForceTap は端末をタッチした際の加速度変化を基にタッチの強さを推定している [HL11]。

押下圧力以外のタッチ操作拡張を行う研究を述べる。TapSense は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、指の先端や第一関節といった触れた手の部位を、タップし

た際に生じる音の波形を基に認識する研究である [HSH11]. Expressy はタッチパネルを操作する手の腕に装着したスマートウォッチのセンサを用いて、タッチしている指の角度を認識する研究である [WKH⁺16].

2.2 ファブリケーション手法に関する研究

本研究のタッチジェスチャ認識手法に用いる電極は3Dプリンタや導電インク、カッティングプロッタ等のファブリケーション手法を用いて製作可能である。これまでに、多くのファブリケーション手法を用いた研究が提案されている。本研究の電極を製作する際の参考にした、インタフェース構築のためのファブリケーション手法に関する研究を述べる。

2.2.1 3Dプリンタを用いたファブリケーション手法

3Dプリンタは立体的に物体を造形可能な印刷機であり、熱積層方式の3Dプリンタは安価であるため他の方式に比べて特に用いられている。熱積層方式の3Dプリンタはフィラメントと呼ばれる樹脂を200℃–300℃に熱し、溶かした状態にて動かしながら射出することにより、任意の造形物を製作できる。また、一部の熱積層方式の3Dプリンタは同時に2種類のフィラメントを造形に用いることができる。本項にて、3Dプリンタを用いたインタフェース構築のためのファブリケーション手法を述べる。

2種類のフィラメントを用いた3Dプリントに関する研究を述べる。Capricateは導電および非導電フィラメントを用いて、3次元構造を有する電極を設計するためのツールである [SKB⁺15]. CapCodesは、導電および非導電フィラメントを用いて3Dプリントしたタンジブルマーカであり、タッチパネル上に載せた際にマーカを個別に識別できる [GS16].

3Dプリント中に、造形物に細工を行う研究を述べる。Liquidoは3Dプリント中に導電及び非導電フィラメントを用いて製作しているオブジェクトの中に液体を注入し、印刷後の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角度などを検出可能にしている [SLD⁺16]. Pengらは3Dプリントする際に、オブジェクトの一部に鉄線を巻くことによりコイルを形成し、動的なオブジェクトを製作している [PGMH16].

3Dプリンタを用いて特殊な機構およびセンサを構築する研究を述べる。Printed OpticsおよびPAPILLONは透明なフィラメントを用いて、光が進む角度を変更するプリズムなどを製作している [WBHP12, BPH13]. Vázquezらは、3Dプリントした空洞を有するオブジェクトに空気を充填し、空気圧の変化によって操作の認識が可能なインタフェースを構築している [VBD⁺15]. 高橋らは、3Dプリンタを用いて造形する際の造形エラーを利用し、射出する樹脂の振る舞いを制御し、造形物に質感を与えている [高橋 16]. 上野らは、硬さの異なる2種類のフィラメントの相溶性を調整することにより、造形物の硬さを設計する手法を提案している [上野 16]. Leighらは導電フィラメントを用いて曲げセンサやタッチ電極を製作し、その特性を評価している [LBP⁺12].

2.2.2 導電素材を用いたファブリケーション手法

前節にて導電フィラメントおよび3Dプリンタを用いたセンサもしくは電極の製作手法を述べた。本研究においてもタッチセンシングのための電極を製作しており、導電フィラメントおよび3Dプリンタを用いて行っている。これらのファブリケーション手法以外にも、さらに他の手法を用いて電極を製作できれば、本研究の適応先を広げることができる。そこで、本研究にも活用可能な導電素材を用いたセンサ製作に関する研究を以下に述べる。

Kawaharaらは銀ナノ粒子を配合した導電インクを家庭用プリンタを用いて印刷する技術を開発した [KHC⁺13]。本技術を用いることにより、簡単かつ素早く電子回路や導電パターンを製作することが可能であり、本技術を利用した様々な研究がなされている。ExtensionStickerは導電インクを用いて印刷した、並行に並んだ導電性の配線パターンを有するシート的一端を静電容量方式のタッチパネルに貼り付けることにより、もう片方のシートの端にある配線パターンへのタッチ操作を、タッチパネル上に転送することにより、タッチ領域を拡張する研究である [KM14]。この手法は3Dプリンタを用いても行うことができる [KM16]。本技術をモバイル向けのVRゴーグルに適応することにより、VRゴーグル側面の導電パターンへのタッチを、指が届かない領域にあるタッチパネル上に、転送できる [KM15]。Karatasらは導電インクを用いてタッチする電極によって抵抗値が異なる電極を印刷し、抵抗値を計測することによりタッチした位置の認識を行っている [KG15]。Foldioは導電インクを用いて印刷した回路をペーパークラフトの様に折り曲げて立体的なインタフェースとして利用する研究である [OSOHS15]。Simonらは静電容量タッチセンサアレイの配線を一部に集約することにより、導電インクを用いて印刷可能かつ外形を自由にカットすることが可能なマルチタッチセンサを提案している [OGT⁺13]。PrintScreenは有機ELを印刷した導電インクシートを用いて挟むことにより配線を行い、ディスプレイ化する研究である [OWS14]。

導電インクペンを用いてインタフェースを自作するファブリケーション手法である Shrinky-Circuitsは、導電性インクを用いて紙に回路を描くことにより、自由に形状設計が可能な電子回路製作手法である [LP14]。

カッティングプロッタを用いたファブリケーションを利用する研究である Midasは、導電性のシールをカッティングプロッタを用いて任意のパターンに切り取ることにより、スマートフォン背面部にタッチ電極を追加している [SZH12]。

2.3 周辺環境のインタフェース化手法

本研究は導電性の物体（金属製のドアノブ、壁、PCの一部）に、非導電性のテープ等を貼り付け、タッチ検出回路を接続することにより、導電性の物体をタッチインタフェース化できる。本手法以外に、容易に周辺環境をインタフェース化できる研究を述べる。

Sugiuraらはぬいぐるみやクッションのような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た [SLW⁺11, SKW⁺11, LSF113]。Scratch Inputは物体を引っ掻くようになぞった際の音をコンタクトマイクで検出することにより、タッチジェスチャを認識する研究である [HH08]。Makey Makeyはワニ口クリップを導電性の物体に接続することによ

り，タッチ入力インタフェース化するためのツールキットである [CS12]. Sony の Mesh は既存の物体に装着することにより入力インタフェース化することができるツールである [SON]. Lego Mindstorms はブロックを組み立てる玩具である LEGO への，モータなどのアクチュエータの組み込みおよびプログラミングを行うことができるツールである [LEG].

2.4 本研究の位置づけ

本研究はタッチジェスチャの認識を行うために，センサとして，単一タッチセンサのみを必要とするため，センサ出力の解析や複数センサを用いる場合に比べて，安価に構築可能である．さらにタッチの検出に単一結線のみを要する利点から，静電容量センサを主に利用している．

本研究では，どのように電極にタッチしているかという動きを伴わない静的な触れ方の認識ではなく，スワイプのように動きを伴う動的なタッチジェスチャ認識を行っている．またその際に，真鍋らの手法と異なり波の傾きの急峻さではなく，センサの応答波形の単純な ON/OFF の時間的変化のみを用いているため，ジェスチャ認識を行うための計算処理および回路を簡単に構築できる．さらに，Touché のような波の形を用いた触れ方認識手法，RootCap のような波の高さを用いた触れた電極認識手法と組み合わせることにより，動的なタッチジェスチャおよび静的な触れ方ならびに触れた位置を同時に認識可能になると考えられる．

第3章 MonoTouch

本研究にてユーザのタッチジェスチャ認識が可能な単一結線のみを用いた、タッチジェスチャ認識手法「MonoTouch」を示す。MonoTouch に用いられる電極は導電性物質を非導電性物質を用いて区切るにより製作できる。この電極にタッチしたかどうか、という ON/OFF 情報を検出可能なタッチセンサを単一結線を用いて接続する。その上で、MonoTouch はタッチの ON/OFF の時間的变化をもとに、電極に触れる指がどのような動きをしたかというタッチジェスチャを認識できる。

3.1 タッチジェスチャ判別の方法

MonoTouch はタッチの ON/OFF の時間的变化に基づいてタッチジェスチャを認識する手法である。図 3.1 に MonoTouch を用いたタッチインタフェースを示す。MonoTouch は特定のパターンを有する電極、静電容量計測回路、およびこれらを接続する単一結線から構成される。MonoTouch の電極は図 3.1 に示すとおり、電気を通す導電部（黒塗りの矩形）および電気を通さない非導電部（白塗りの矩形）からなり、導電部は内部にて導通している。ユーザが電極の導電部をタッチした際に、導電部と指の間に生じる静電容量を、静電容量計測回路を用いて計測することにより、タッチを検出できる。

図 3.2 に MonoTouch においてタッチジェスチャを認識するための原理を示す。図 3.2 上部のイラストは電極上にて、タッチジェスチャを行う際の様子を表しており、下部のグラフは各タッチジェスチャを行った際に生じる、静電容量計測回路の応答波形を表している。図 3.2a のように、ユーザが電極に指を一度触れてから指を離すというタップ操作を行った際は、導電部に指が触れる回数は一度のみとなるため、応答波形の山の数は1つのみとなる。図 3.2b および c のように、ユーザが電極上にて指をなぞるスワイプ操作を行った場合、一度導電部に指が接触し、その後非導電部のみに触れ、もう一度導電部に指が触れる。そのため、応答波形の山の数は2つとなる。このように、応答波形の山の数から、ユーザが行ったタッチジェスチャが、タップなのかスワイプなのかを認識できる。

次に応答波形の山の数が等しいスワイプ操作において、スワイプ操作を行った方向を認識する手法を説明する。図 3.2b のように、ユーザがある方向にスワイプを行った場合、ユーザの指は幅が狭い導電部に触れた後、幅の長い導電部に触れる。そのため、先に時間幅の短い山が発生し、その後時間幅の長い山が発生する。逆方向にスワイプ操作を行った場合は図 3.2c のように、順方向とは逆の順番となり、時間幅の長い山の後に時間幅の短い山が発生する。このように一度のスワイプ操作にて、発生した応答波形の山の時間幅を比較することにより、ス

ワイプ方向を認識できる。

さらに本手法にて、電極の非導電部にて区切られた導電部の数を増やすことにより、応答波形の山の数を調整できるため、複数のスワイプ方向を認識できる。図3.3に上下左右スワイプを認識できる電極および、電極上にてタッチジェスチャを行った際の応答波形を示す。図3.3の電極は上下スワイプの場合は応答波形の山の数が3つとなり、左右スワイプの場合は応答波形の山の数が2つとなる。また、上記にて述べたとおり、スワイプ方向によって応答波形の山の時間幅が異なるように電極が設計されているため、上および下、あるいは左および右のスワイプ方向を認識できる。このように電極の設計によって複数の方向のスワイプが認識できる。

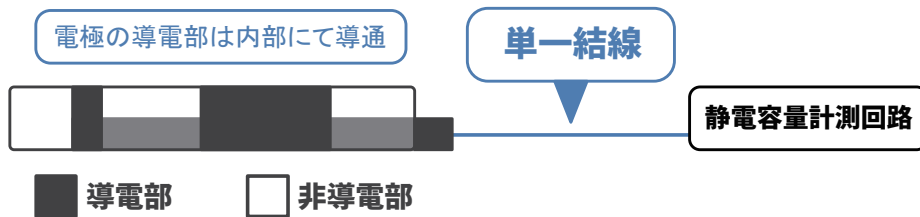


図 3.1: MonoTouch のタッチインタフェース

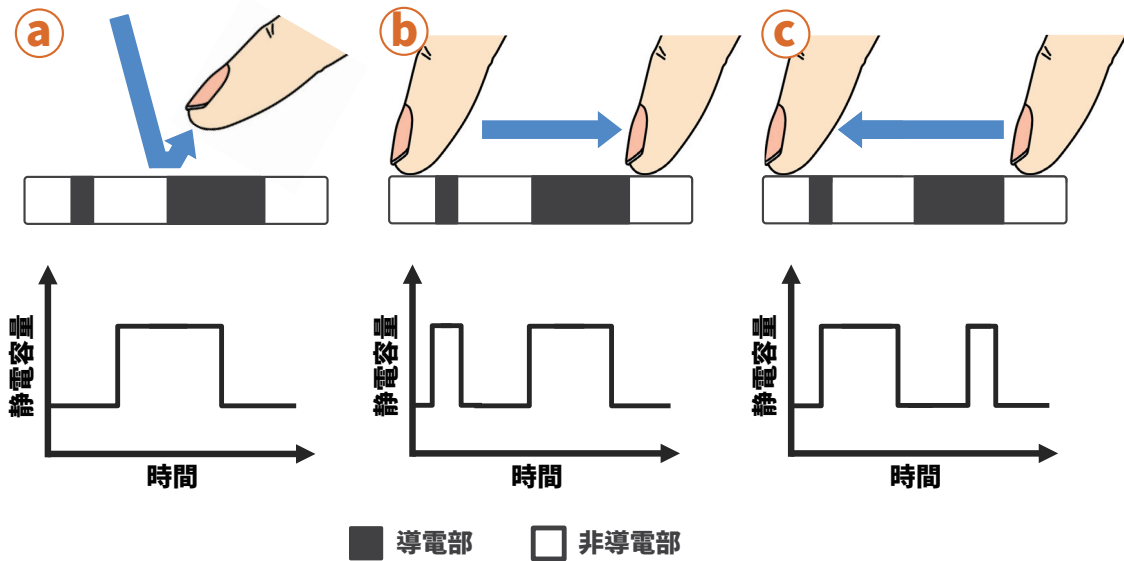


図 3.2: MonoTouch の原理 (a: タップ操作, b: 順方向スワイプ操作, c: 逆方向スワイプ操作)

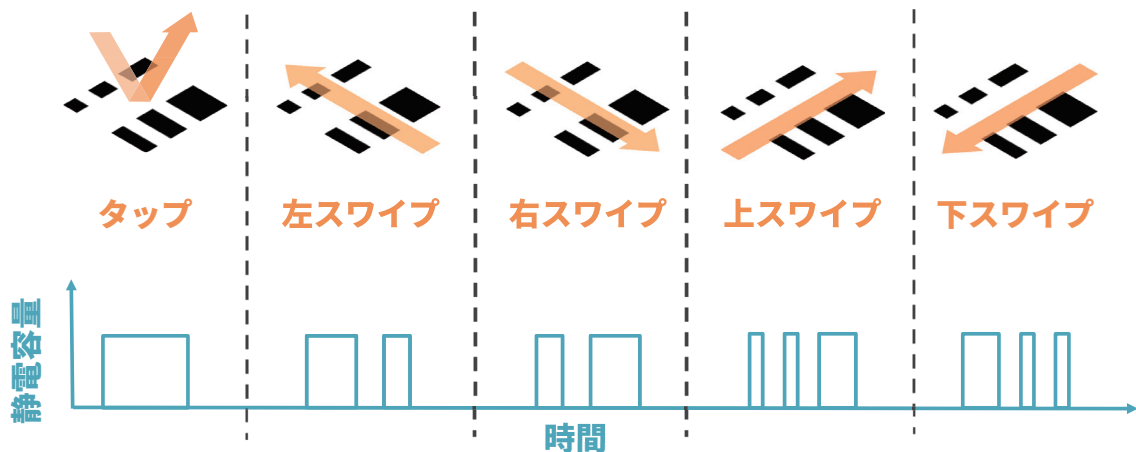


図 3.3: 上下左右スワイプを認識できる電極およびタッチジェスチャ時の応答波形

3.2 タッチ検出手法

3.1 節にて述べた通り，MonoTouch は単一結線のみを用いて電極の導電部へのタッチを検出し，その接触の時間的変化をもとにタッチジェスチャの認識を行う手法である．本節にてタッチを検出するための静電容量計測回路の原理を説明し，次に PC や携帯電話といった情報端末のマイク端子を用いる手法，および情報端末に備えられたタッチセンサを用いる手法を説明する．

3.2.1 静電容量計測回路を用いる手法

本節にて静電容量計測回路を用いてタッチを検出する手法を原理を説明する．図 3.4 のように静電容量計測回路はマイコンの 2 つのデジタル送受信ピン間に抵抗 R を接続し，受信ピン側に電極が接続されたものである．この送信ピンからは矩形波が定期的に印可されており，受信ピン側にて常に印可された矩形波の観測を行っている（図 3.5）．この静電容量計測回路の電極に指がタッチした際に，電極および指の間に静電容量 C が形成される．この静電容量 C が形成されている間，送信ピン側から出力された矩形波の電荷が静電容量 C に充電されるため，図 3.6 のように矩形波が変形する（図 3.6）．この現象を利用して静電容量計測回路は，送信ピンが矩形波を印可してから受信ピン側の入力があるしきい値を超えるまでかかる遅延時間を用いて，静電容量の計測を行う．この時の遅延時間は $R \times C$ によって定まる時定数に依存し，送信ピン側の出力電圧を V_{send} とすると，受信ピン側にて観測される電圧 $V_{receive}$ は以下の式によって求められる．

$$V_{receive}(s) = \frac{1}{1 + RC} V_{send}(s) \quad (3.1)$$

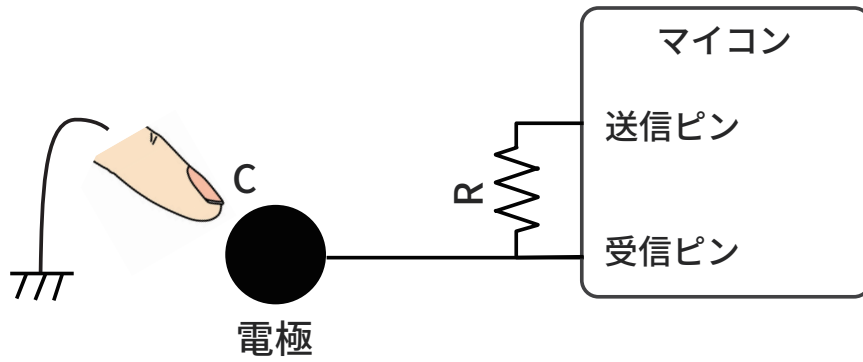


図 3.4: 静電容量計測回路

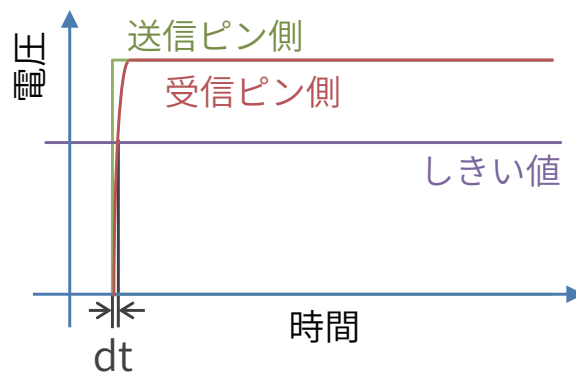


図 3.5: RC 回路の電圧グラフ (非タッチ時)

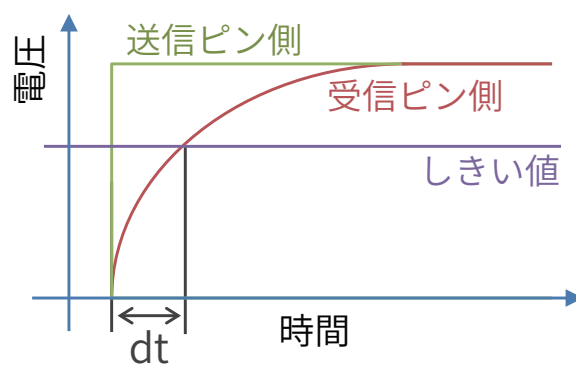


図 3.6: RC 回路の電圧グラフ (タッチ時)

3.2.2 タッチパッドおよびタッチパネルを用いる手法

本節にて，スマートフォン，タブレット，およびノート PC などの情報端末に搭載されている，タッチパッドおよびタッチパネルといったタッチセンサの一部を用いた MonoTouch の構成方法を述べる．加藤らは，タッチパネルに導電インクを塗布したシートを貼り付けることにより，タッチ領域を拡張可能な Extension Sticker [KM14] を提案している．この先行研究のように，本手法においても単一結線の片方の端子をタッチパッドおよびタッチパネルに貼り付けることにより，指のタッチ検出が可能である．

このタッチ検出手法を用いた MonoTouch の例を図 3.7 および図 3.8 に示す．図 3.7 の例は，MonoTouch を用いた十字カーソル入力を行うためのタッチインタフェースを構築したものである．図 3.8 の例は，MonoTouch を用いた端末背面操作を行うためのタッチインタフェースを構築したものである．このように MonoTouch を用いることにより，タッチパッドやタッチパネルの一部を利用し，タッチ領域を拡張するのみではなく，タッチジェスチャ判別が可能となり，端末背面部の様なセンサが搭載されていない領域にてタッチジェスチャ認識が可能な例を容易に製作することができる．さらに本電極例は電極の導電部にアルミ箔テープを，非導電部にマスキングテープを用いているため，製作が容易である．

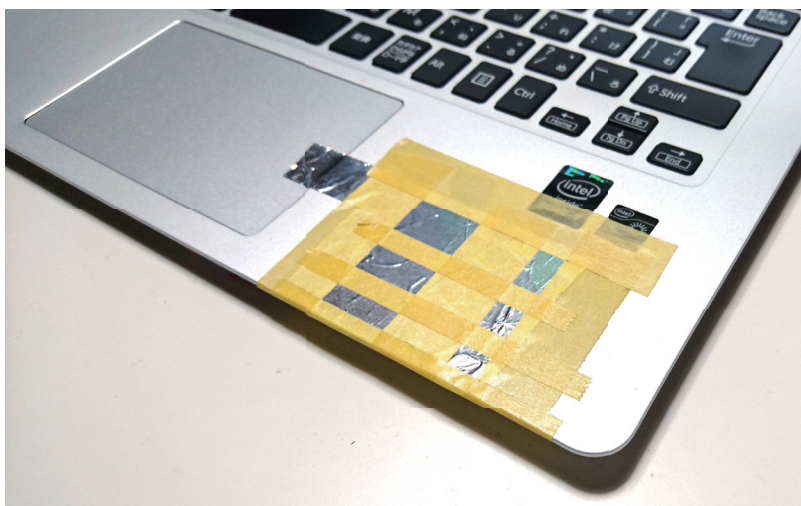


図 3.7: タッチパッドを用いた MonoTouch の例

3.2.3 マイク端子を用いる手法

PC や携帯電話といった情報端末に搭載されているマイク端子を用いて指のタッチを検出する手法を述べる．この手法は電源を入れたスピーカの入力端子を素手で握った際に，ザザツというノイズ音がスピーカから発せられる現象を利用する手法である．この現象は，人体が一種のアンテナとなっており，受信した電波等のノイズが手を通して入力端子に流れ込んだ際に起きる現象であり，このノイズの有無を基にタッチを検出できる．



図 3.8: タッチパネルを用いた MonoTouch の例

図 3.9 にマイク端子および電極の接続方法を示し、図 3.10 に実際にノート PC (Vaio 株式会社, VJZ13A1) の 4 極端子 (マイク端子+ステレオ端子) のマイク端子に電極を接続し、ステレオ端子にヘッドホンを接続した際の写真を示す。図 3.10 の環境にて、なにも電極に触れていない際のマイク端子の入力波形、および電極に指が接触した際のマイク端子の入力波形を図 3.11 に示す。図 3.11 に示すとおり、指が電極に接触した際はノイズの影響により強く入力波形が波打つため、この波の振幅がしきい値を超えたかどうかを判別することによりタッチを検出可能である。

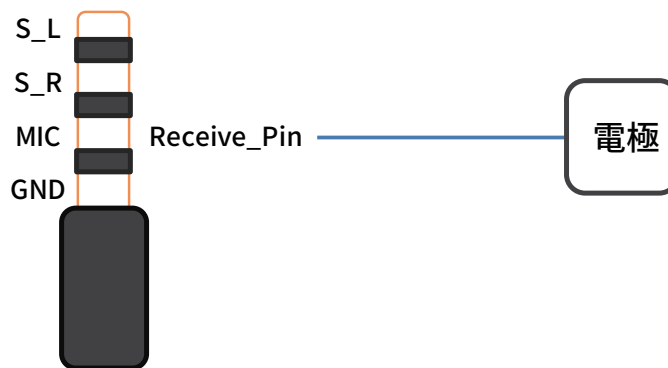


図 3.9: マイク端子と電極の接続方法

本手法を用いたプロトタイピングの例として、スマートフォンのマイク端子およびスマートフォンカバーに埋め込まれた電極を接続した例を図 3.12 に示す。この例において、マイク端子の入力波形のノイズをもとにタッチを検出し、MonoTouch を用いてタッチジェスチャを認識することにより、スマートフォン背面部を利用した入力 (例えば音楽プレイヤーアプリケーションの音量および選曲操作) を行うことができる。

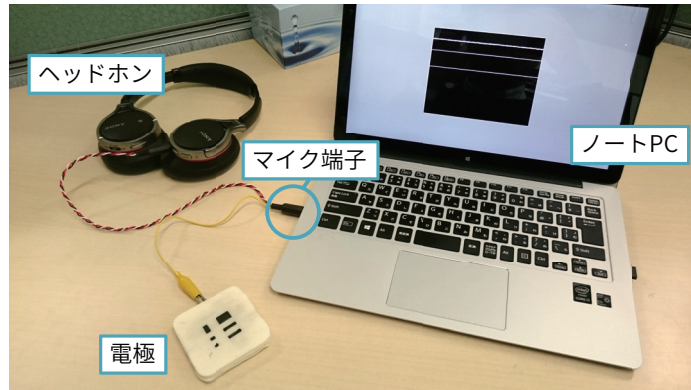


図 3.10: マイク端子と電極の接続

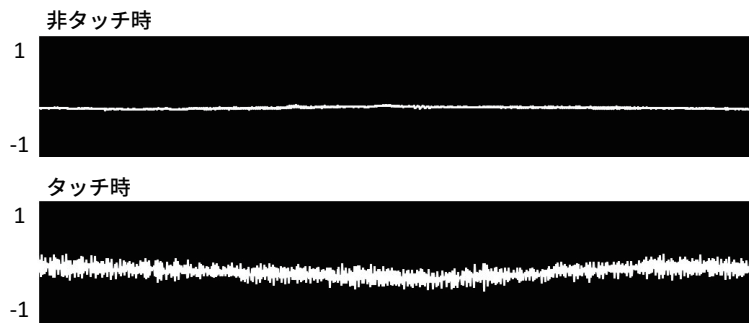


図 3.11: 非タッチ時のマイク端子の入力波形およびタッチ時の入力波形

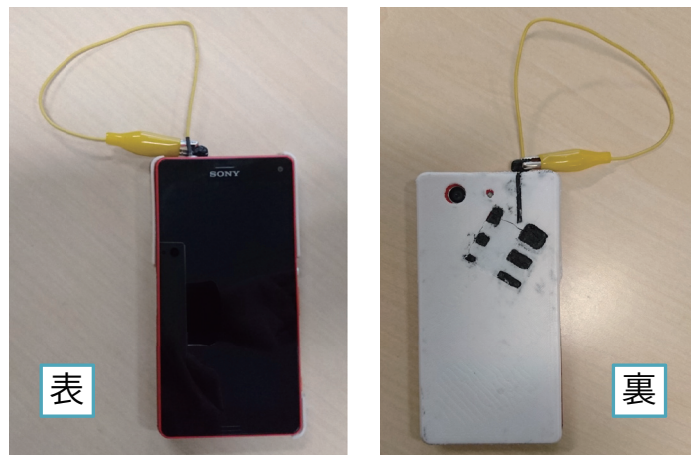


図 3.12: マイク端子を用いる MonoTouch のプロトタイプ例

3.3 MonoTouch の電極

MonoTouch は導電部および非導電部からなる電極を用いてタッチジェスチャ認識を行う手法である。この電極の導電部および非導電部の組み合わせ（電極パターン）を工夫することにより、様々な軌跡のスイープを認識できる。また本手法にて非導電部の間隔が狭い場合、指が非導電部をまたぎ複数の導電部に同時に指が触れることにより、想定される応答回数よりも少ない応答回数となる「指のまたがり問題」が発生する。この問題を解決するために、非導電部の表面をわずかに盛り上げる手法を考案したため、この盛り上げ形状を述べる。

3.3.1 電極の構築方法

MonoTouch に用いる電極は様々な方法を用いて製作可能である。3.2 節にて述べたタッチ検出手法を用いる場合、導電性物質を非導電性物質を用いて区切る様な構造を有する電極をジェスチャ認識に用いることができる。用途やインタフェース設計者のプロトタイプング環境に応じて、利用できる電極の製作方法は異なるため、インタフェース設計者の参考となるように、これまでに試みた様々な製作方法を本節にて示す。なお、もっとも精度良く電極を製作できたのは3.3.1 項にて述べるレーザカッタおよび3D プリントペンを用いる手法であった。

3D プリントを用いる手法

本節にて、3D プリントを用いて電極を製作する手法を述べる。

図 3.13 に 3DCAD ソフトウェアを用いて制作した電極の 3D データおよび、3D プリントした電極の写真を示す。本電極は黒色の導電性 PLA フィラメントおよび白色の非導電性 PLA フィラメントを材料とし、2 色成型可能な熱積層タイプの 3D プリンタ（FLASHFORGE 社製、Dreamer [App]）を用いて 3D プリントした。図 3.13 のとおり、白色の非導電部の表面に黒色の導電性フィラメントが付着し、汚れてしまっていることがわかる。これは、白色の非導電部分を印刷する際に、黒色の導電フィラメントがわずかに溶けだし、表面に付着したためである。ただし、電極をタッチ検出回路に接続し、表面の汚れに触ったところ、内部にて他の導電部と導通していないため問題がないことを確認した。

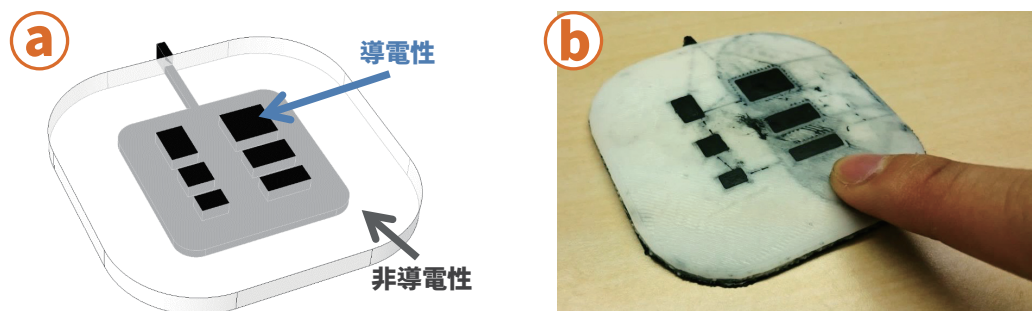


図 3.13: 電極の 3D データおよび 3D プリントして製作した電極

レジンキャストを用いる手法

レジンキャストとは、工業デザイン試作ならびに歯科技工などに用いられる、合成樹脂の成型方法である。導電部分のみを3Dプリントし、非導電部分をレジンを用いて製作することにより、表面が汚れる問題の解決を図った。図3.14に3Dプリントおよびレジンキャストを用いた電極の製作手法を示す。まず図3.14のとおり、3Dプリントした型の中に、同じく3Dプリントした導電部分を入れ、混ぜ合わせたレジン液を流し込み、冷え固まるまで180秒程度放置する。その後、型から固まったレジンを取り出し、カッターややすりといった工具を用いて整形することにより電極を製作した。本手法にて製作した電極は、導電部と非導電部に段差および隙間が無く製作できるものの、外部の気温や混ぜ合わせるレジン液の混合比率によって電極の非導電部の強度が変わる点に気を付ける必要がある。

アセトンを用いる手法

非導電部の強度を保ちつつ、表面が汚れずに済む手法を試みた。図3.15にアセトンに溶かした導電性フィラメントを用いた電極製作手法を示し、実際に製作した電極を図3.16に示す。本手法はアセトンに溶かしたABS樹脂タイプの導電性フィラメントを、孔が空いている3Dプリントした非導電部分に流し込むことにより製作する手法である。本手法は溶かしたフィラメントが完全に硬化するまでに1~2日程度かかり、かつ水分が抜けることによって導電部の体積が目減りするため、非導電部との間の隙間が生じたり、へこみが生じ、精度が低くなった。また市販されているABS樹脂タイプの導電性フィラメントの抵抗値はPLAタイプのフィラメントに比べ、100倍以上の抵抗率を有するため、電極導電部の抵抗値が高くなった。さらに図3.16のとおり、アセトンの一部が非導電性のPLA樹脂に染み込むことにより、導電部の周りの樹脂が割れやすくなった。

オープンを用いる手法

図3.17に、非導電性フィラメントおよび導電性フィラメントを別々に3Dプリントし、その後オープンを用いて加温してから一体化する手法を示し、実際に製作した電極を図3.18に示す。本手法は2色成型の3Dプリンタを用いて印刷した際に、表面が汚れてしまう問題を解決するために行った手法である。しかし本手法を用いて電極を製作したところ、オープンによる加温時に、樹脂が熱により曲がってしまうため、湾曲した電極になった。さらに図3.18のとおり、導電部および非導電部に隙間や段差が生じた。

レーザーカッタを用いる手法

本節にてレーザーカッタを用いて切り出したアクリル製の非導電部に導電部を加えることによる電極の製作手法を述べる。本研究において用いたレーザーカッタはシステムクリエイト社製Cut-key [シス] である。

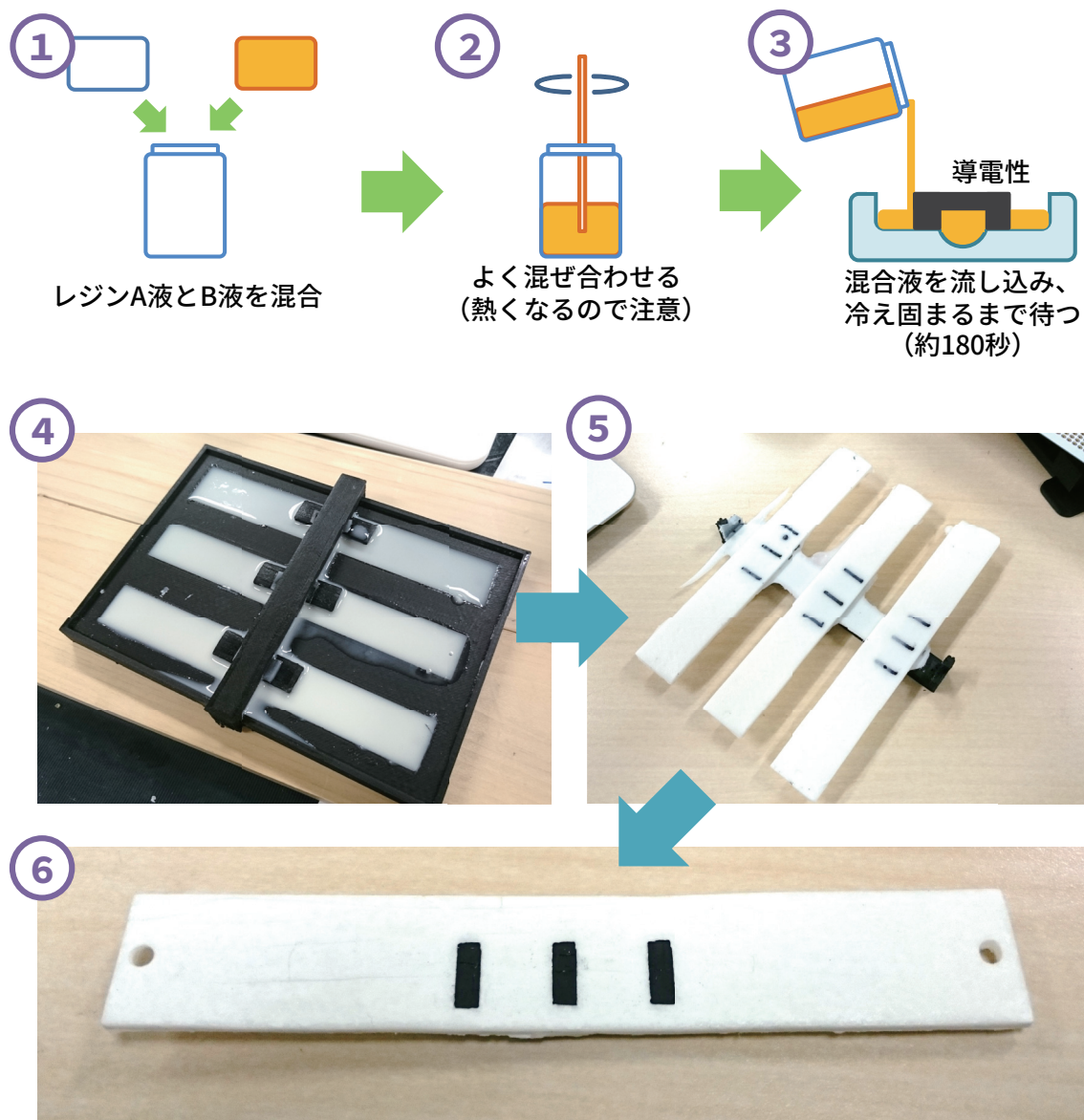


図 3.14: レジンキャストを用いた電極製作手法

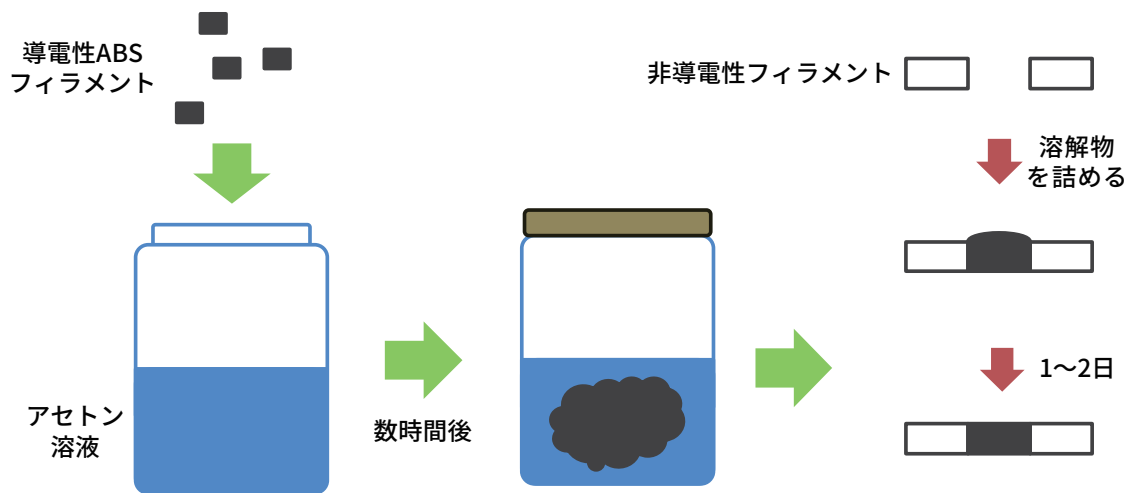


図 3.15: アセトンに溶かした導電性フィラメントを用いた電極製作手法

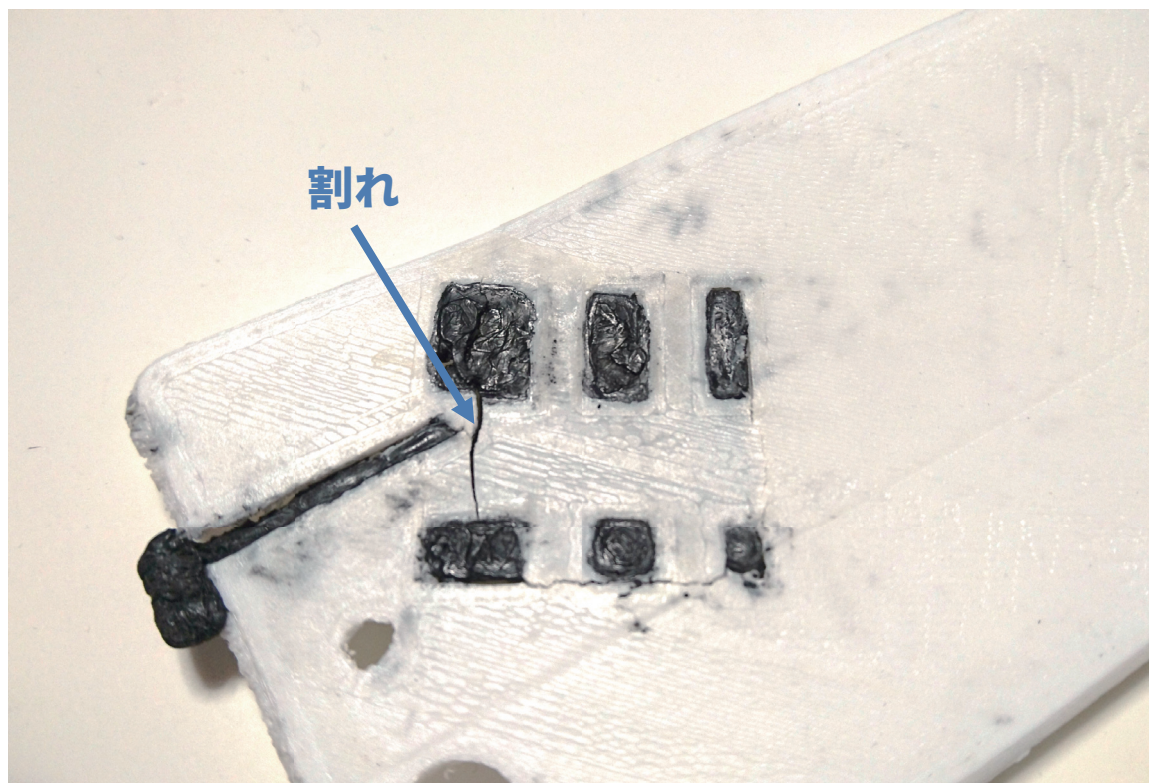


図 3.16: アセトンに溶かした導電性フィラメントを用いて製作した電極

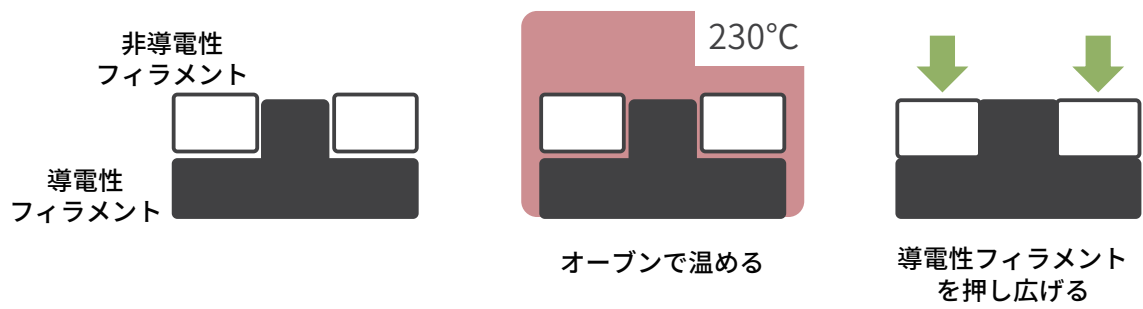


図 3.17: オープンを用いた加温による電極製作手法

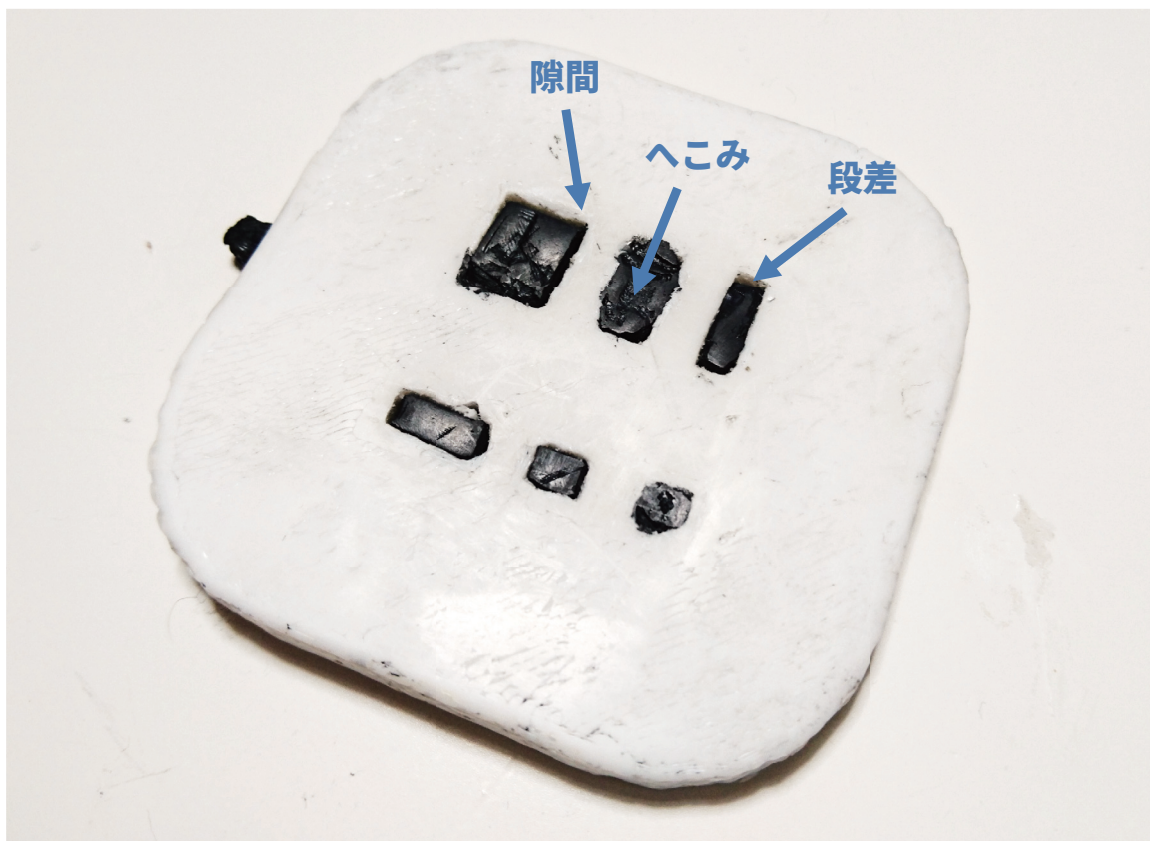


図 3.18: オープンを用いて加温し，製作した電極

図 3.20 に導電フィラメントおよび 3D プリントペンを用いて、切り出した非導電部の孔に導電部を加えて電極を注入し製作した電極を示す。製作する際の作業の様子を図 3.19 に示す。本手法を用いて電極を製作する際は、アクリルの非導電部の孔の奥まで導電フィラメントが入り込むように、3D ペンの先端を押し付けるようにして導電部を注入する必要がある。本手法は、他の製作手法にて見られたような段差や隙間が生じず、へこみも生じないため、精度の高い電極を製作することができる。



図 3.19: 3D プリントペンを用いた電極製作

図 3.21 に CNC フライスを用いて削り出したアルミの導電部をアクリルの非導電部にはめ込むことにより製作した電極を示す。本手法はレーザーカッタおよび CNC フライスそれぞれの工具にて製作した部品を組み合わせるため、それぞれの精度の違いにより、導電部および非導電部の間に段差や隙間が生じた。アルミの導電部は導電フィラメントを用いて製作した導電部よりも抵抗値を低く製作することができる。

その他の導電物質を用いる手法

図 3.22 に導電インクとして AgIC 社製の銀ナノ粒子配合インクを用いて製作した電極を示す。本手法は、短時間かつ高い精度にて電極を製作できる。また電極が薄いため、曲面に貼り付けたり、図 3.17 のようにスマートフォンの背面部に貼り付けることができる。

図 3.23 に銅板に養生テープを貼り付けることにより電極を製作する手法を示す。養生テープを貼り付けることにより導電部および非導電部間に段差が生じるため、導電部の上に銅箔テープを貼り付け、段差を埋めるように工夫した。

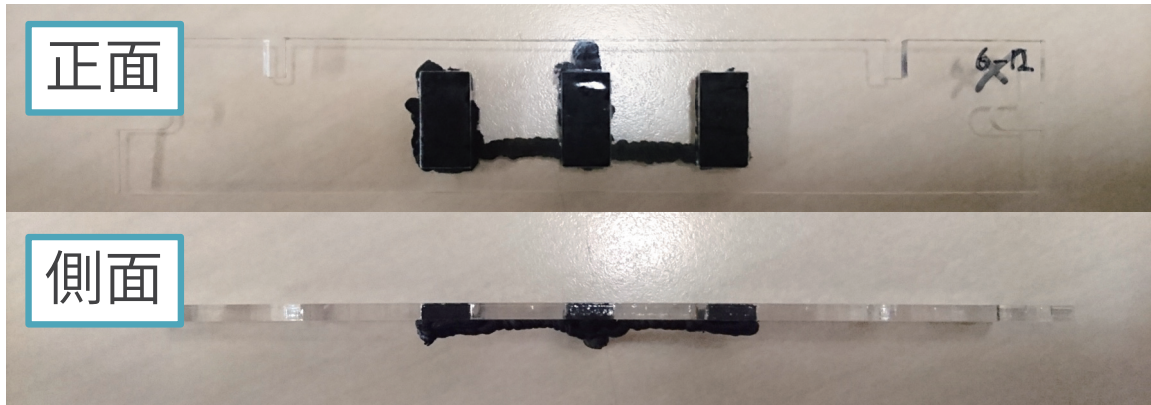


図 3.20: 3D プリントペンを用いて製作した電極

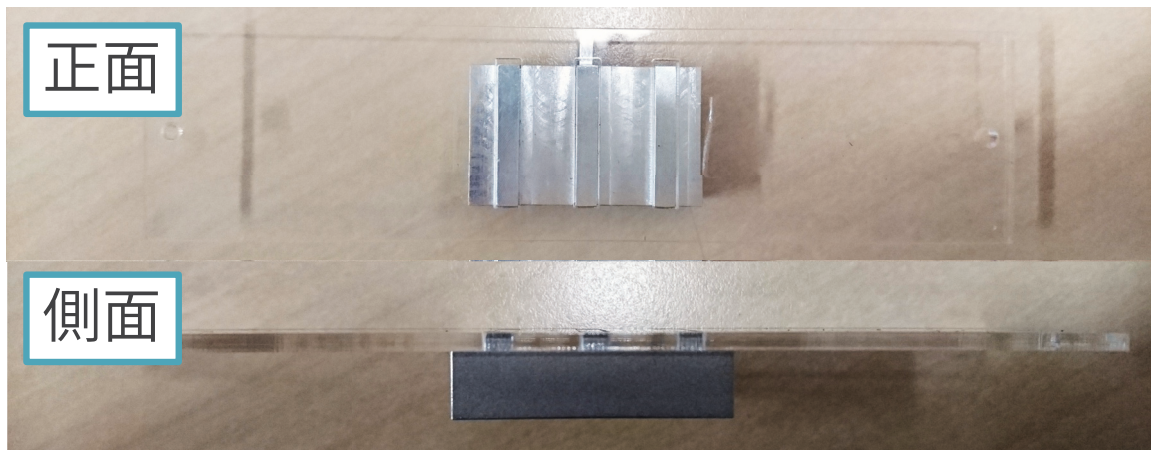


図 3.21: CNC フライスを用いて製作した電極

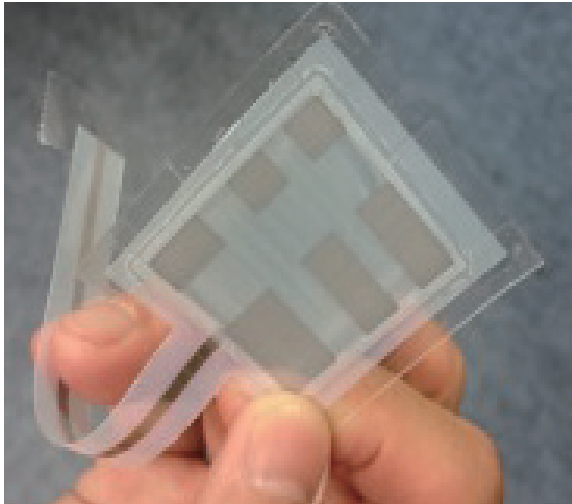


図 3.22: 導電インクを用いて印刷した電極

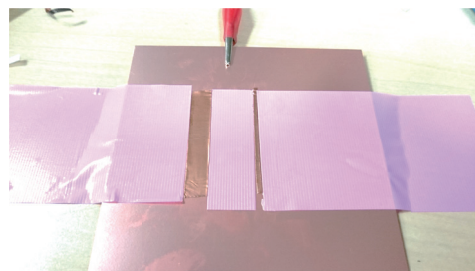
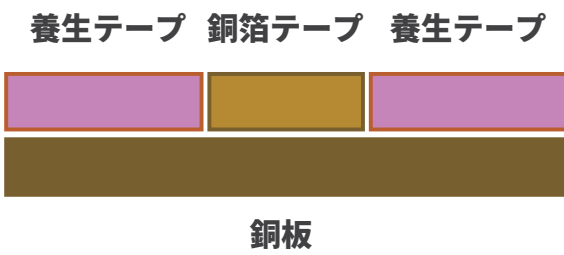


図 3.23: 銅板を用いて製作した電極

3.3.2 電極パターン

MonoTouch に用いる電極の電極パターンを工夫することにより、様々な軌跡のスイープ操作を認識可能である。本節にて電極パターンの例を述べる。

図 3.24 に上下左右スイープ操作認識可能な電極パターンを示す。本電極は左右スイープ操作時に応答回数が2回，上下スイープ操作時に応答回数が3回となる。さらに左右もしくは上下スイープにおいて導電部の長さが非対称になっているため，左もしくは右，ならびに上および下スイープ操作をそれぞれ認識可能である。さらにこれを拡張し，斜め方向も加えた8方向のスイープ操作を認識可能にした電極パターンを図 3.25 に示す。

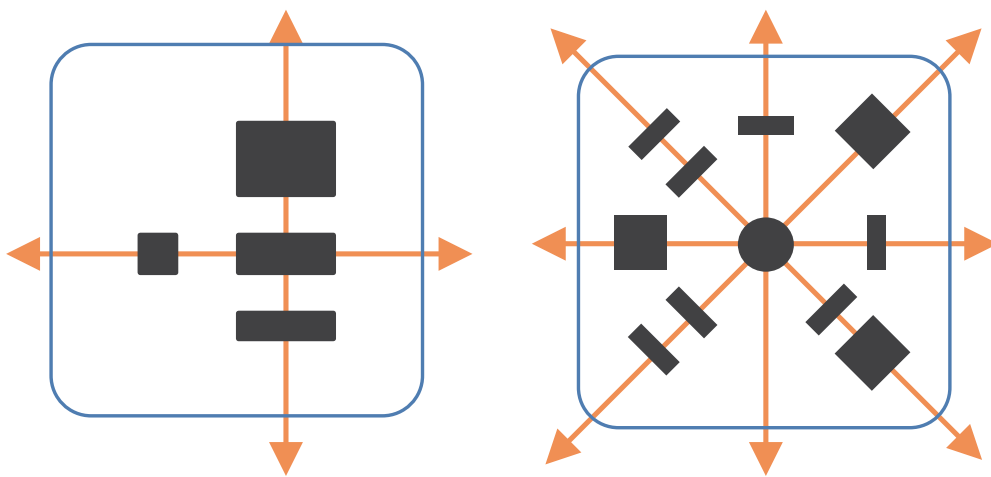


図 3.24: 4 方向スイープ用電極パターン 図 3.25: 8 方向スイープ用電極パターン

図 3.26 にスイープ距離計測が可能な電極パターンの例を示す。本電極パターンは，電極の左側から右側にかけて徐々に幅が短くなっていくような導電部を有している。この電極上にてスイープを行った際に，応答波形の山の幅が長 → 短，もしくは短 → 長のどちらかであることを認識することにより左もしくは右スイープの認識が可能であり，応答回数を計数することにより指をスイープさせた距離を計測可能である。また，隣り合う応答波形の山の幅の長短からスイープ方向を認識可能であるため，電極上の任意の点からスイープを行うことが可能である。本電極パターンは例えば音量を調整するためのボリュームとして利用することができる。その場合スイープ方向が音量の上げ下げに対応し，応答回数が音量の変化量に対応する。

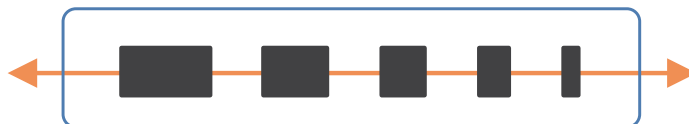


図 3.26: スイープ距離計測用電極パターン

図 3.27 に指を円周に沿うように回転させる，回転スイープを認識可能な電極パターンを示

す。本電極パターンは、順時計回りの回転スワイプ時は、短 → 中 → 長 → 短 → 中…といった応答波形となり、逆時計回りの回転スワイプ時は、短 → 長 → 中 → 短 → 長…といった順序が入れ替わった応答波形となるため、順および逆時計回りの回転方向を認識できる。また、応答回数を計数することにより、回転スワイプが行われた回数を認識できる。さらに、演習場の導電部の個数を増やすことにより、回転スワイプを行った際の、細かい回転角度を推定できる。

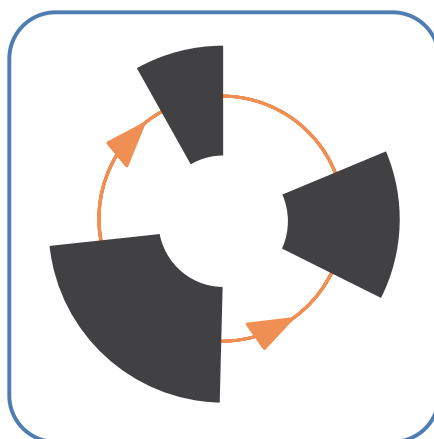


図 3.27: 回転スワイプ用電極パターン

図 3.28 にスワイプした位置を認識できる電極パターンを示す。本電極パターンは左右スワイプを認識でき、左右スワイプを行う列によって応答回数が異なる。図 3.28 の場合は、電極の上列にて左右スワイプを行った場合は応答回数が 3 回、中列の場合は応答回数が 2 回、下列の場合は応答回数が 4 回となる。例えば、本電極パターンは複数の照明を制御するためのスイッチとして用いることができる。この場合、スワイプを行った上中下の列がそれぞれ個別の照明と対応しており、右スワイプ操作時は点灯、左スワイプ操作時は消灯といった操作の割り当てを行う。さらに、電極パターンの列数を増やすことにより、より多くの照明を操作できる。

図 3.29 に電極の個体識別が可能な電極パターンを示す。本電極は異なる幅を持つ 2 種類の導電部の組み合わせになっており、1 次元のバーコードのように、電極上にて指をスワイプさせた際の応答波形からどの電極を用いているか識別が可能となる。また、導電部の組み合わせを左右非対称となるように設計することにより、スワイプ方向の認識が可能となる。

例えば図 3.29 の電極パターンは商品の売買時にバーコードとして利用することができる。図 3.30 に MonoTouch を用いたレジのイメージを示す。本レジにて商品の識別に用いられるバーコードは導電テープおよび非導電性のテープの組み合わせ、もしくは導電インク印刷により製作できるため、安価かつ容易に複数の商品ごとに異なる電極を準備できる。バーコードは面の上部が商品ごとに異なる電極パターンになっており、下部にて電極パターンの導電部同士がつながるような構造である。商品の売買時には、まずバーコード下部をタッチ検出部と接続された導電テーブルに接触するように商品を設置し、バーコード上部の電極パターン

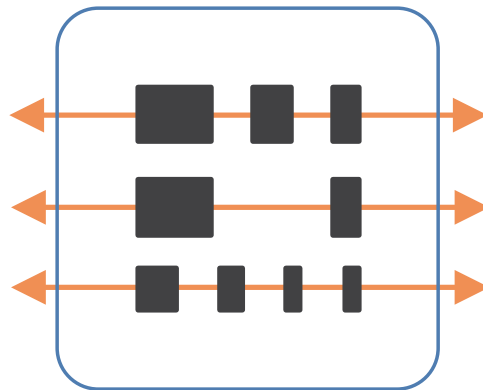


図 3.28: スワイプ位置判別用電極パターン

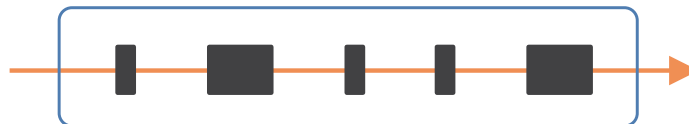


図 3.29: 個体識別用電極パターン

上にて指をスワイプさせることにより商品の識別を行う。右スワイプを行った場合は購入品の識別が可能であり、同一商品を複数購入する場合は、複数回スワイプを行うことにより加算可能である。さらに、左スワイプを行った場合は減算処理を行うことができる。MonoTouchはタッチ検出が可能であれば電極パターンの認識が可能であるため、カメラセンサを用いるバーコードリーダに比べて容易かつ安価に電極リーダを製作可能である。

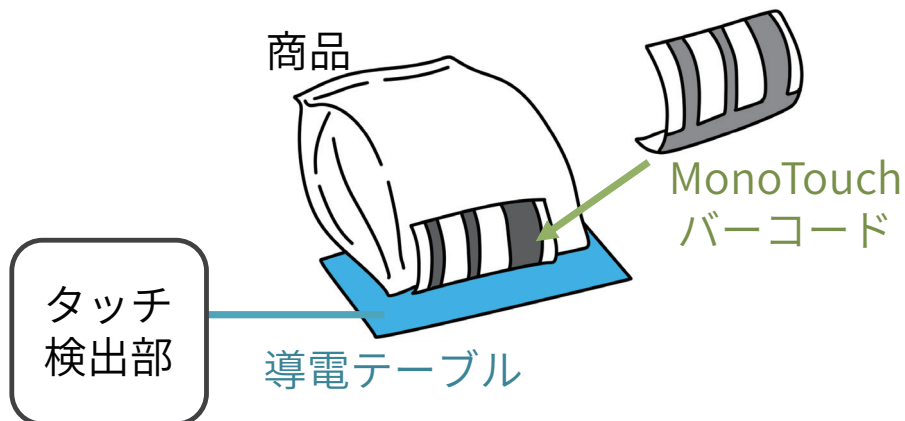


図 3.30: MonoTouch を用いたレジのイメージ

3.4 指のまたがり問題

本研究において導電部間の間隔が狭い場合、電極上にてスワイプ操作を行う際に、図 3.31a のように指を立てた場合は、複数の導電部に指が触れることはない、しかし、指を寝かせた場合には図 3.31b のように複数の導電部に同時に指が触れることにより、応答回数が減少するという「指のまたがり問題」が発生する。この問題は、非導電部の幅を、図 3.31c のように電極および指の接触面の幅よりも長くすることにより解決することができる。しかし、非導電部の幅を長くした場合、電極パターンが大きくなってしまう。この問題を解決するために、図 3.31d のように非導電部をわずかに隆起させ、指が複数の導電部に同時に触れないようにするための盛り上げ形状を電極に付与する手法を考案した。なお電極の導電部を盛り下げる機構を試したところ、指が引っかかりスワイプし難くなったため、本研究において盛り上げ形状を採用することにした。

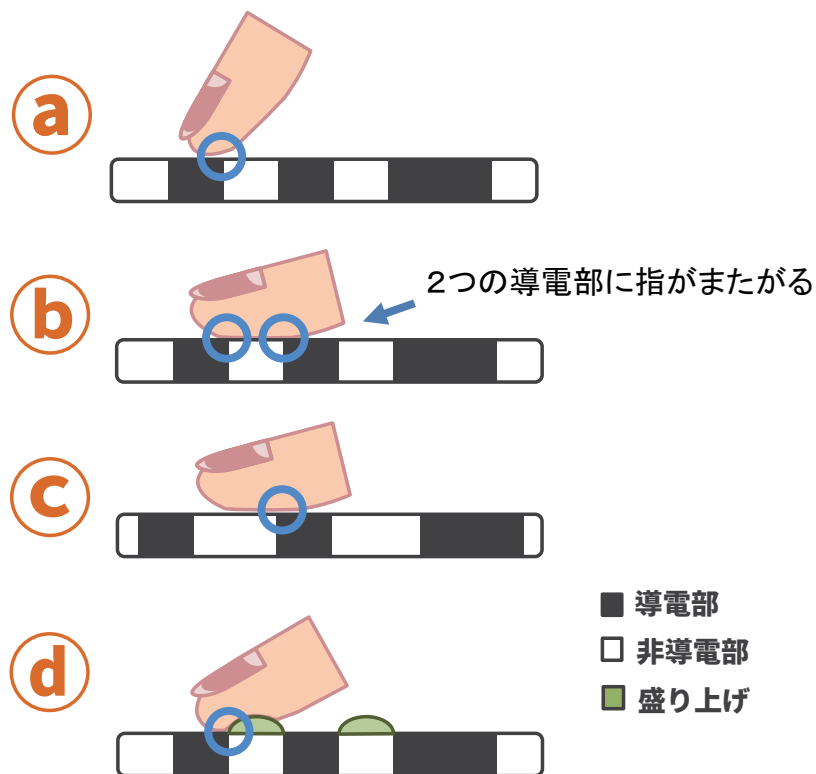


図 3.31: 各電極形状におけるスワイプ操作時に導電部に触れる指の部位

第4章 評価実験

評価実験により，MonoTouch を用いるユーザのタッチジェスチャをどの程度の精度にて認識可能であるかを調査した．次に，電極のサイズおよび電極表面の盛り上げ形状の有無を変えた場合，認識精度の影響を調査した．さらに 3.4 節にて述べたまたがり問題が発生する非導電部の幅を調査した．本章にてこれまでに行った評価実験を実験設計，結果ならびに考察を述べる．

4.1 評価実験 1：タッチジェスチャ認識精度評価

静電容量方式のタッチセンサおよび 3D プリントした電極を用いた際の，タッチジェスチャ認識精度を被験者実験により評価したため，実験を行うための実装，実験設計，結果ならびに考察を述べる．

4.1.1 実装

本節にて評価実験を行うための評価用電極および回路の実装を述べる．

電極の製作

評価実験を行うために，3D プリンタを用いて電極を製作した．設計した電極パターンを図 4.1a に，3D プリントした電極の写真を図 4.1b に示す．図 4.1b の電極は図 3.13a のように，内部の導電部分が全てつながるような構造になっている．電極パターンの製作には，熱積層方式の 3D プリンタ（FLASHFORGE 社製，Dreamer）を用い，素材として導電性 PLA フィラメント（ProtoPasta Conductive PLA）および非導電性 PLA フィラメント（FLASHFORGE 社製）を用いた．

電極は全体が 70mm 四方となるよう設計し，電極パターンを中心に配置した．電極パターンは図 4.1a の様に，上下スワイプの際は応答回数が 3 回，左右スワイプの際は 2 回となるように設計した．これは，人差し指先端が楕円形状をしており，指を電極表面上に載せた際に，上下方向の厚みの方が左右方向の幅より狭いため，左右スワイプより上下スワイプに用いる非導電部を細くしても，複数の導電部に指がまたがりやすいと考えたためである．

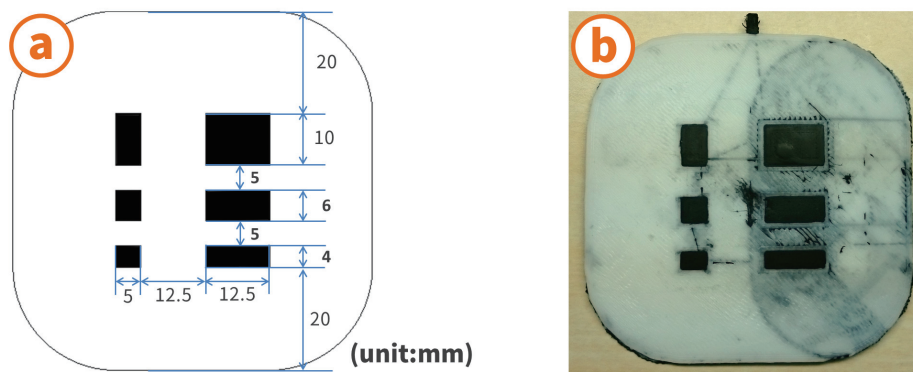


図 4.1: 実験に用いた電極 (a: 電極パターンの設計, b: 製作した電極)

静電容量の検出

タップおよび上下左右スワイプを、電極の静電容量の変化に基づき認識するシステムを構築した。図 4.2 に、製作した電極を組み込んだ認識システムの構成を示す。本システムにおいては静電容量の計測を行うために、Arduino 用の静電容量計測ライブラリである CapSense [Bad] を用いた。これは、3.2.1 節にて述べた、送信ピンの状態を変化させた際に、受信ピンの状態が変化するまでの遅延時間を用いた静電容量計測手法である。この遅延時間はユーザの指が電極に触れた際に形成されるキャパシタンス C と、 $10k\Omega$ の抵抗 R によって決まる時定数 $R \times C$ に依存しており、タッチした際に C が大きくなることにより遅延時間が長くなるため、この遅延時間を計測することにより電極に触れたことを検出する。

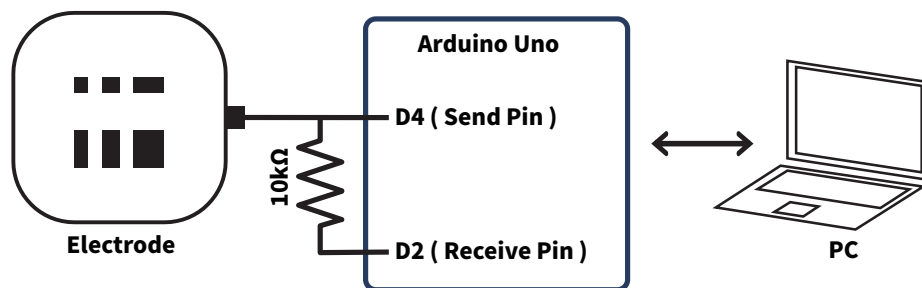


図 4.2: 評価実験 1 の認識システムの構成

ジェスチャの認識方法

電極上にてタッチジェスチャを行った際に、観測された波形を図 4.3 に示す。図 4.3 中の下側は一つ前の静電容量との差分値の波形である。差分値が正の区間を橙色、負の区間を紫色、零の区間を緑色を用いて波形を着色している。この差分値において、1 回のジェスチャを行っ

た際に正の符号の区間が何回出現したかという情報と、さらに先頭の正の符号の連続区間と、末尾の正の符号の連続区間のどちらの方が時間が長かったかという情報を用いてジェスチャの認識を行った。

4.1.2 実験設計

製作したタッチセンサの認識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、研究室の大学院生3名（22～23歳、男性）であった。実験は全て静かな屋内にて行われた。被験者は初めに数分間システムを用いてジェスチャ入力を行う練習を行い、その後実験者の指示に従って、タップ→右スワイプ→左スワイプ→上スワイプ→下スワイプの順にタッチジェスチャ入力を行った。各被験者は1ジェスチャにつき10回のジェスチャ入力を行い、実験者は各ジェスチャ入力ごとに認識正否の記録を行った。総試行回数は

$$\begin{aligned} \text{総試行回数} &= 150 \text{ 回} = 3 \text{ 名} \\ &\quad \times 5 \text{ ジェスチャ} \\ &\quad \times 10 \text{ 回} \end{aligned}$$

であった。

4.1.3 実験結果および考察

実験結果の混同行列を表4.3に示す。認識精度は80.0%であった。表4.3に示すとおり、左スワイプの認識精度が最も低いことが分かった。その誤認識の内訳として最も多かったのはタップとの誤認識である。これは電極表面にて指をスワイプした際に、指のまたがり問題により、応答回数が2回にならず、1回になるというまたがり問題が発生したためである。この問題は右スワイプがタップに誤認識されていることにも表れている。

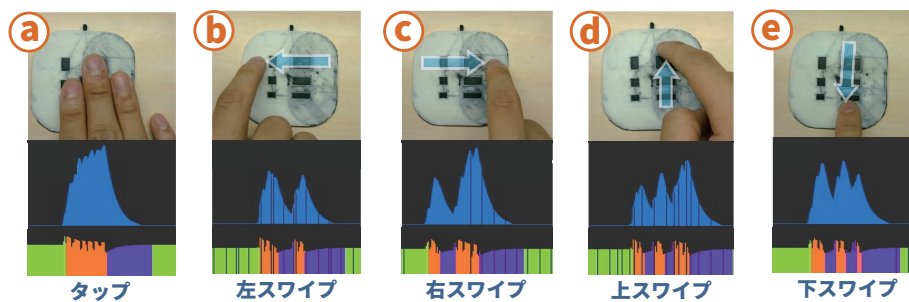


図 4.3: それぞれのタッチジェスチャを行った際に得られる波形

表 4.1: 評価実験 1 の認識結果の混同行列

		認識ジェスチャ				
		タップ	右スワイプ	左スワイプ	上スワイプ	下スワイプ
入力ジェスチャ	タップ	93.3%	6.70%	0.00%	0.00%	0.00%
	右スワイプ	16.7%	80.0%	3.30%	0.00%	0.00%
	左スワイプ	33.3%	0.00%	66.7%	0.00%	0.00%
	上スワイプ	20.3%	0.00%	3.33%	70.00%	7.00%
	下スワイプ	3.30%	0.00%	16.7%	0.00%	80.00%

4.2 評価実験 2: 電極サイズおよび形状を変えた際のタッチジェスチャ認識精度評価

評価実験 1 にて、指のまたがり問題により認識精度が低下することを述べた。この問題は電極の非導電部の幅が狭い場合により顕著に起こると予想される。また 3.4 節にて述べた通り、この指のまたがり問題を解決するために、電極の非導電部の表面をわずかに盛り上げる手法を考案した。非導電部の間隔を変えた場合および非導電部を盛り上げた場合の影響を調査するための評価実験を行ったため、以下に述べる。

4.2.1 実装

本節においては実験 2 のための電極の設計および製作を述べる。また実験に用いた回路及びジェスチャの認識方法は 4.1 節に述べた手法と同じである。

サイズ条件

電極は実験 1 と同様に 3D プリンタを用いて製作した。本実験は、スワイプ時に応答回数が減少することによる誤認識の原因がまたがり問題であるか検証することを目的としている。そのため、導電部に挟まれた非導電部の間隔を実験 1 よりも狭くした Small 条件および、大きくした Large 条件をサイズ条件として設定した。それぞれのサイズ条件における電極の設計を図 4.4 に示す。

形状条件

非導電部を盛り上げることにより、指が図 4.5 のように盛り上げに阻まれ、2 つの導電部に同時に触れにくくなると予想される。またがりの問題が盛り上げの付与により解決できるかどうか調査するために、盛り上げの無い Flat 条件および盛り上げを追加した Embossed 条件を形状条件として設定した。盛り上げを付与する位置は図 4.6 に示す上下スワイプに用いる導電部間の非導電部とし、盛り上げの高さは 0.3mm とした。

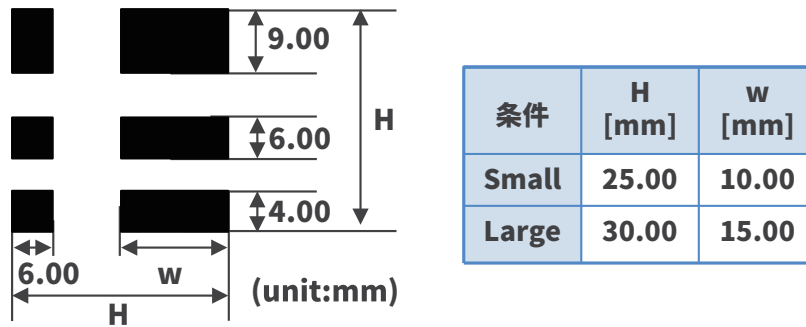


図 4.4: サイズ条件ごとの電極パターンのサイズ

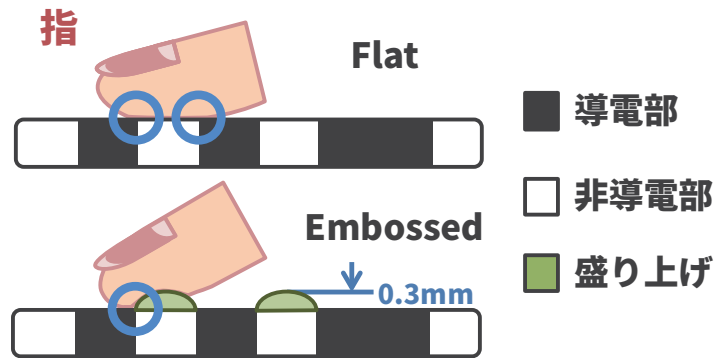


図 4.5: 盛り上げによる指のまたがりの解消

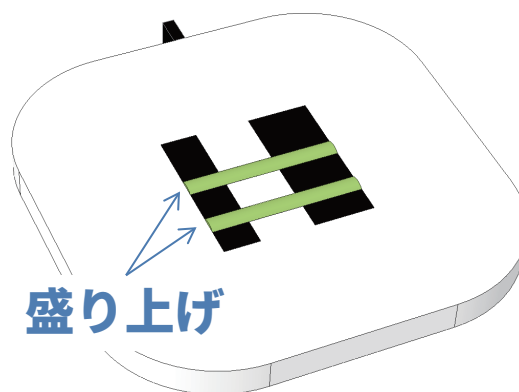


図 4.6: 盛り上げの付与位置

製作した電極

サイズ条件および形状条件を変え、計4つの電極を導電性 PLA フィラメント (ProtoPasta Conductive PLA) および非導電性 PLA フィラメント (FLASHFORGE 社製) を材料とし、3D プリンタ (FLASHFORGE 社, Dreamer) を用いて製作した。図 4.7 に製作した電極の一覧を示す。

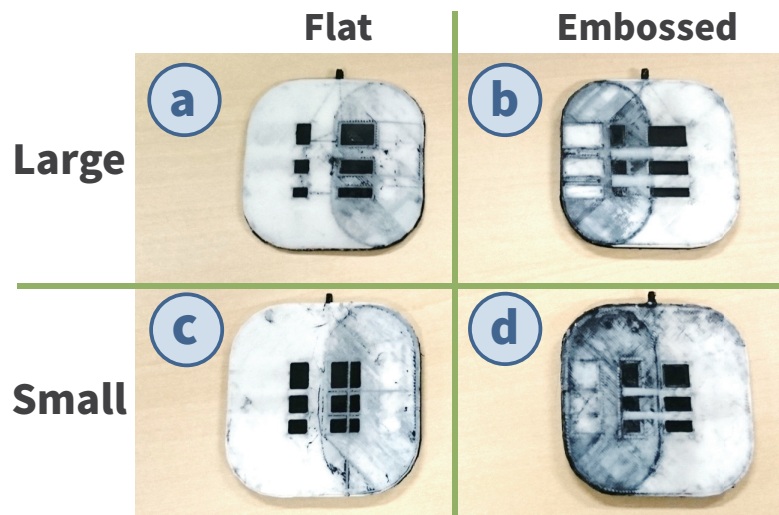


図 4.7: 製作した電極の一覧

4.2.2 実験設計

本節にて実験 2 を行った際の被験者、実験条件、実験手順を述べる。また、実験中に被験者に提示した資料を本論文の付録 A にて示す。

被験者

実験は全て静かな屋内にて行われた。被験者は大学院生のボランティア 8 名 (P1-P8, 男性 8 名, 22-24 歳) であった。全ての被験者は、スマートフォンを用いたタップおよびスワイプの利用経験があった。また、実験を行う際に全ての被験者の右手人差し指のサイズ (指の腹の幅, 指の厚さ, および指の先端面積として幅 × 厚さ) を測定した。表 4.2 に各被験者の指のサイズを示す。

実験手順

実験の様子を図 4.9 に示す。被験者には実験中、常に椅子に座るよう指示した。実験者は実験の準備として実験内容の説明をした後、被験者の右手人差し指の先から 10 mm 程度内側の

表 4.2: 被験者の右手人差し指のサイズ

被験者	幅 [mm]	厚さ [mm]	面積 [mm ²]
P1	13.87	8.20	113.73
P2	13.36	7.26	96.99
P3	12.84	8.72	111.96
P4	10.98	7.19	78.95
P5	13.39	7.38	98.82
P6	12.40	8.17	101.31
P7	12.59	8.36	105.25
P8	12.40	8.28	102.67

図 4.8 の位置にて、指の厚みおよび幅をデジタルノギスを用いて測定した。次に練習タスクに用いる練習プログラムの提示内容を説明した。この練習プログラムは MonoTouch の電極に触れた際に現れるセンサ応答と、センサ応答ごとに検出されるジェスチャを提示する。

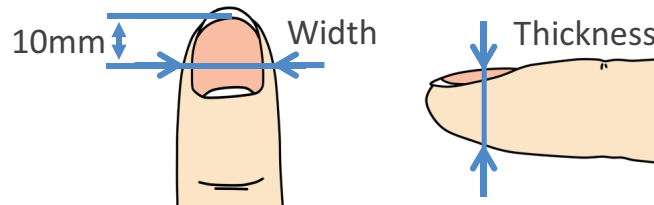


図 4.8: 測定した指の位置

次に我々は被験者に 4 つの電極を 1 つ提示するごとに練習タスクと実験タスクを行って貰った。練習タスクは、被験者がジェスチャを一通り入力できると感じるまで行った。実験タスクにおいては、練習プログラムを用いずにジェスチャを行って貰った。また、スワイプジェスチャを行う際は右手の人差し指のみを用い、かつ電極に対して指の先端部分が触れるように指を立てて入力するように、被験者に指示した。タップジェスチャを行う際は右手指全体を用いて電極を覆うように触れるよう指示した。

実験タスクにおける 1 試行は被験者が 1 つのジェスチャを指示されてから入力を完了するまでである。被験者は各ジェスチャをタップ、上スワイプ、下スワイプ、右スワイプ、左スワイプの順に 10 試行ずつ行い、これを 1 セッションとした。4 つの電極条件ごとに、練習タスクと実験タスクを行った。したがって、各被験者は

$$\begin{aligned}
 \text{総試行回数} &= \text{計 } 1600 \text{ 回} = 8 \text{ 名} \\
 &\quad \times 4 \text{ 電極条件} \\
 &\quad \times 5 \text{ ジェスチャ} \\
 &\quad \times 10 \text{ 試行}
 \end{aligned}$$

を行った。

疲労による入力速度への影響を抑えるため、実験タスクを終えるごとに3分以上の休息を挟んだ。

なお電極上にてスワイプすることに慣れる可能性を考慮し、カウンターバランスをとるためにP1-4へは電極を条件A→B→C→Dの順番に、P5-8へは電極を条件B→A→D→Cの順番に提示し、練習と実験を行った。タスク終了後に被験者はアンケートに回答した。実験に要した時間は50分程度であった。

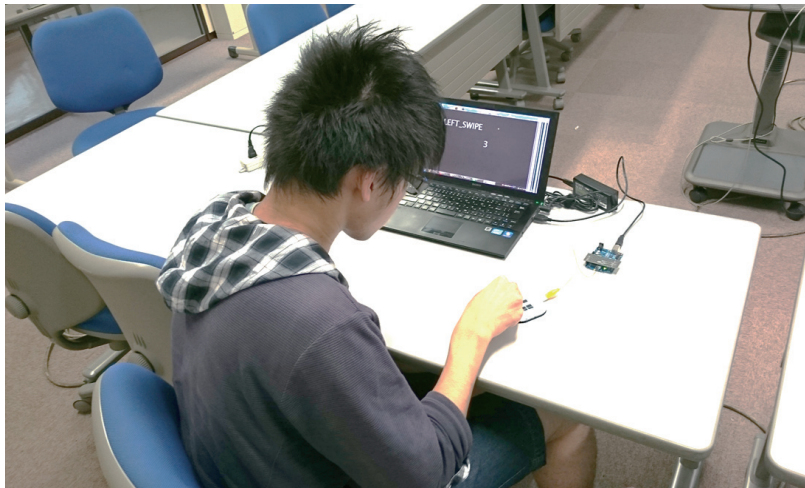


図 4.9: 実験の様子

4.2.3 実験結果

各電極条件ごとの認識精度を表 4.3 に示す。また、被験者ごとの各電極条件における正答率を表 4.4 に、入力速度を表 4.5 に示す。結果、条件 B の認識精度が最も高く、電極パターンを小さくすると認識精度が落ちるといった結果を得た。

4.2.4 考察

表 4.3 に示す電極条件ごとの混同行列の内訳を見ると、表 4.3B において下スワイプが左スワイプと誤認識されていることがわかる。これは図 4.3b および図 4.3e のとおり、左スワイプと下スワイプはセンサ応答が大きな波形から小さな波形へと変化することを利用して認識しており、ユーザがジェスチャ入力を行う際に、盛り上げ部分に指が引っかかり、下スワイプ入力が途中で終わると判断されたためである。この問題は特に P3 と P7 の実験の際に生じた。この入力途中でジェスチャ認識を終えてしまったことは、表 4.5 の P3, P7 の 1 入力当たりの時間が他の被験者に比べて短くなっていることからわかる。また、P3, P7 のアンケートによると、指が引っかかり操作しづらいという意見が得られた。

表 4.3: 各電極条件におけるジェスチャ認識の混同行列

		正答率(Large, Flat) 認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	100.00%	-	-	-	-
	UP	1.25%	93.75%	3.75%	1.25%	-
	DOWN	1.25%	6.25%	86.25%	-	5.00%
	RIGHT	6.25%	-	-	92.50%	1.25%
	LEFT	3.75%	-	-	11.25%	85.00%
						Total

		正答率(Large, Embossed) 認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	98.75%	-	-	-	1.25%
	UP	1.25%	92.50%	-	6.25%	-
	DOWN	1.25%	-	80.00%	-	18.75%
	RIGHT	1.25%	-	-	96.25%	2.50%
	LEFT	3.75%	-	1.25%	1.25%	93.75%
						Total

		正答率(Small, Flat) 認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	97.50%	-	-	1.25%	1.25%
	UP	42.50%	35.00%	6.25%	7.50%	8.75%
	DOWN	41.25%	-	45.00%	1.25%	11.25%
	RIGHT	2.50%	-	-	68.75%	28.75%
	LEFT	6.25%	-	1.25%	2.50%	90.00%
						Total

		正答率(Small, Embossed) 認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	98.75%	-	-	-	1.25%
	UP	-	76.25%	13.75%	3.75%	1.25%
	DOWN	3.75%	5.00%	75.00%	-	16.25%
	RIGHT	40.00%	1.25%	1.25%	35.00%	22.50%
	LEFT	41.25%	-	1.25%	6.25%	51.25%
						Total

表 4.4: 被験者ごとの各電極条件における正答率

被験者	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
P1	0.98	0.98	0.50	0.80
P2	0.90	0.92	0.80	0.56
P3	0.96	0.72	0.84	0.80
P4	1.00	0.98	0.82	0.68
P5	0.70	1.00	0.68	0.68
P6	0.96	0.98	0.48	0.74
P7	0.84	0.82	0.54	0.46
P8	0.98	0.98	0.72	0.66

表 4.5: 被験者ごとの各電極条件における平均入力速度 [s]

被験者	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
P1	2.509	2.268	1.941	2.125
P2	1.957	2.260	2.390	2.301
P3	1.226	0.989	1.675	1.471
P4	1.839	2.084	2.166	2.043
P5	2.227	2.051	2.247	1.982
P6	1.882	1.736	1.620	1.836
P7	1.880	1.594	1.410	1.721
P8	1.614	1.757	1.716	1.696

表 4.3A と表 4.3C から、形状条件が同じであっても、電極を小型化すると上下スワイプの認識精度が低下することがわかる。これはサイズが小さくなると非導電部の間隔（Small 条件：3.0mm，Large 条件：5.5mm）が狭くなり、指が図 4.5 のように複数の導電部にまたがる問題が表れているためである。

表 4.3C と表 4.3D より、盛り上げを電極表面に付与することにより、条件 D の上下スワイプの認識精度が、同サイズである条件 C に比べて向上していることが分かる。これにより電極を小型化した際に、盛り上げを付与することがジェスチャの認識精度向上に有効であることが示唆された。しかし、他の電極条件に比べ、左右スワイプの認識精度が著しく低下していることがわかる。これは、条件 D の電極の 3D プリント精度が悪く、左右スワイプに用いる導電部の反応が悪かったためである。

指の断面積と各電極条件における正答率の関係を調べるために、表 4.2 と表 4.4 から相関係数を求めた。結果は、それぞれ条件 A：-0.029，条件 B：-0.428，条件 C：-0.421，条件 D：0.272 となった。この条件 C と条件 D の相関係数より、Small 条件において盛り上げを付与することにより、導電部に指がまたがる問題の影響を減らし、認識精度を向上させる可能性があると示された。

また被験者アンケートから、盛り上げを付与することにより触覚フィードバックが得られるため、アイズフリーな操作が可能ではないかという意見を得たため、この意見から、盛り上げがまたがり問題だけではなく、人が電極表面上のどの位置に触れているかどうかを知る手掛かりになる可能性があることが分かった。この知見については 6 章にて議論する。

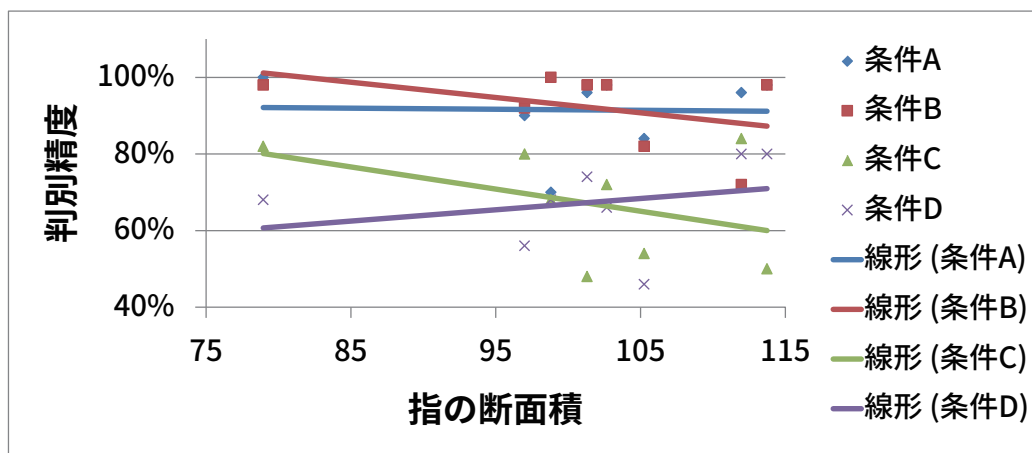


図 4.10: 指の断面積ごとの各電極条件における認識精度と線形近似

4.3 評価実験3：導電部幅および非導電部幅を変えた際の影響評価

電極の導電部の幅および間隔を変えた際に、ジェスチャの認識率にどのように影響を与えるか調査するために著者を含む研究室の被験者7名（大学生および大学院生，21–24歳）に対し，実験を行った。

4.3.1 実装

本節にて評価実験を行うための評価用電極および回路の実装を述べる。

電極の製作

評価実験を行うために，レーザカッタ（システムクリエイイト社，CutKey 900N）および3Dプリントペン（ウンカン社，RP-100B）を用いて電極を製作した。設計した電極パターンを図4.11に，製作した電極の写真を図4.12に示す。図4.12の電極は，内部の導電部分が全てつながるような構造になっている。電極パターンの製作には，レーザカッタおよび3Dプリントペンを用い，素材として導電部分は導電性PLAフィラメントを用い，非導電部分は厚さ2mmの亚克力板を用いた。

電極は全体が20mm×120mmとなるよう設計し，電極パターンを中心に配置した。電極パターンは図4.11の様に，スワイプの際は応答回数が3回となるように設計した。また電極は導電部の幅を6mmに固定し，間隔を1–16mmの範囲にて1mmずつ変えた物，および導電部の間隔を10mmに固定し，幅を1–8mmの範囲にて1mmずつ変えた物の計24枚の電極を製作した。

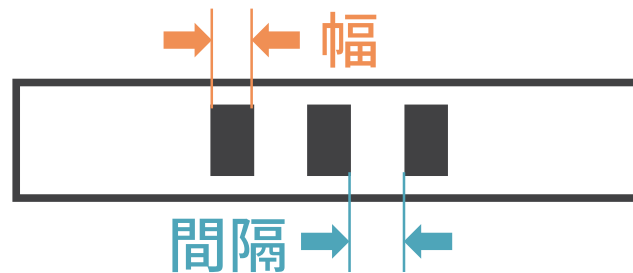


図 4.11: 評価用電極の形状

静電容量の検出

スワイプ時の応答回数を，電極の静電容量の変化に基づき認識するシステムを構築した。図4.13に，製作した電極を組み込んだ認識システムの構成を示す。評価実験3においては，静電容量計測用のマイコンボードとして Arduino を用いた評価実験1とは異なり，Intel Edison



図 4.12: 製作した評価用電極

Kit for Arduino (以下 Edison) をマイコンボードとして用いた。これは、Edison の方がクロックが非常に高く (Arduino : 16MHz, Edison : 500MHz), より高精度に静電容量計測が可能である。また静電容量計測には, 3.2.1 節にて述べた, 送信ピンの状態を変化させた際に, 受信ピンの状態が変化するまでの遅延時間を用いた静電容量計測手法を用いた。



図 4.13: 評価実験 3 の認識システムの構成

4.3.2 実験設計

製作したタッチセンサの認識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, 研究室内の大学院生 7 名 (21-24 歳, 男性) であった。実験は全て静かな屋内にて行われた。被験者は 24 枚の電極上にて, タップ → 右スワイプ → 左スワイプ → 上スワイプ → 下スワイプの順にタッチジェスチャ入力を行った。各被験者は 1 ジェスチャにつき 10 回のジェスチャ入力を行い, 実験者は各ジェスチャ入力ごとに応答回数の記録を行った。総試行回数は

$$\begin{aligned}
 \text{総試行回数} &= 25200 \text{ 回} = 7 \text{ 名} \\
 &\quad \times 24 \text{ 電極} \\
 &\quad \times 5 \text{ ジェスチャ}
 \end{aligned}$$

× 10回

であった。また実験の際に、3Dプリントした土台を用いて図4.14に示すように電極を机に固定した。



図 4.14: 電極を固定するための土台

4.3.3 実験結果

導電部の間隔を変えた物の評価結果を図4.15に、幅を変えた物の評価結果を図4.16に示す。結果、導電部の間隔が13mm以上の場合99%以上の精度にて認識が可能であった。また、図4.16から導電部の幅と認識率の相関を調べたところ、特に相関がみられなかった(相関係数0.03676)。

4.3.4 考察

図4.15から、導電部の間隔が5-9mmの範囲において線形に認識率が変わることが分かる。また、10mm以上にした際は80%以上の認識率となり、100%に収束していくような曲線が得られた。さらに被験者を増やすことにより認識率と間隔の関係が明らかとなれば、インタフェース設計の際に電極サイズと求められる認識率から導電部の間隔を決定することができる。また、図4.16より導電部の幅は1-8mmの範囲において相関係数が見られなかったことから、1mm以上であれば指の接触の検出精度に差異が無いことが分かった。

4.3.5 デザイン指針

実験3の結果より、電極の導電部の幅は1mm以上あれば良く、非導電部の幅が10mm以上あれば良いと考えられる。

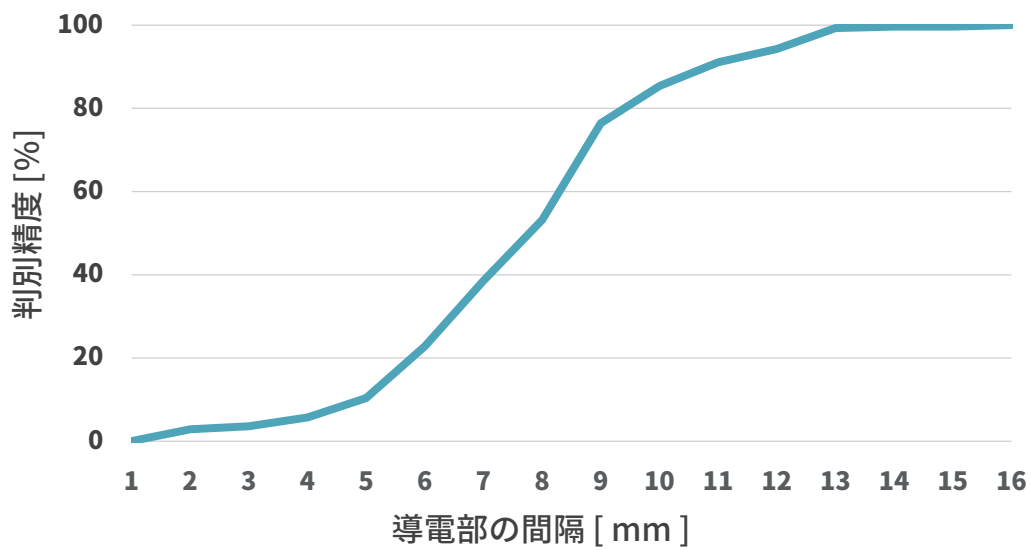


図 4.15: 電極導電部の間隔と認識率の関係

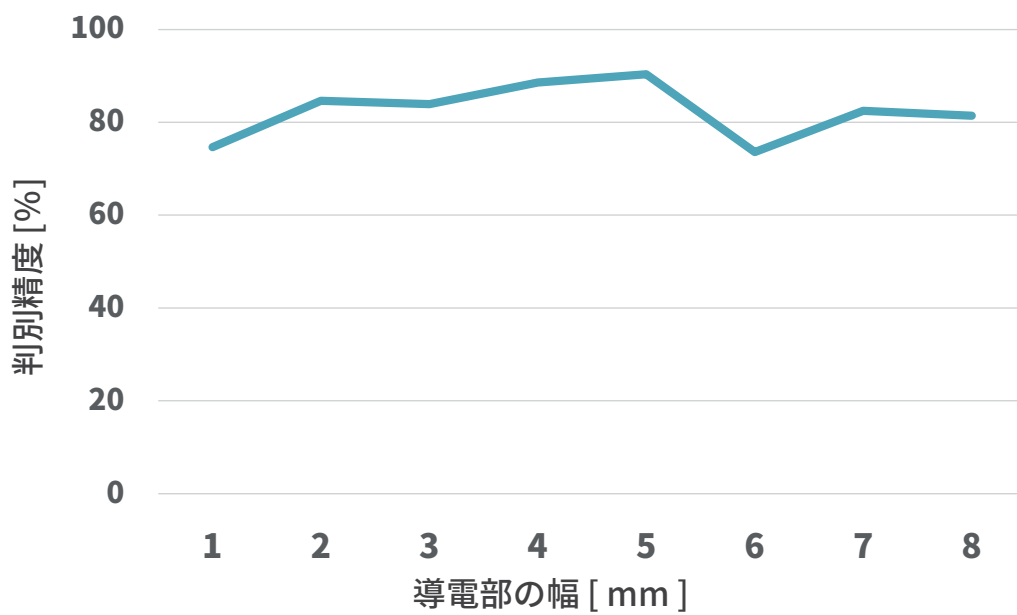


図 4.16: 電極導電部の幅と認識率の関係

第5章 アプリケーション

MonoTouch はタッチインタフェース設計者向けのタッチジェスチャ認識手法である。本手法を用いることにより、自由な形状のタッチインタフェースを容易に製作することができる。タッチインタフェースの一例として、MonoTouch を利用したアプリケーション例を本章にて示す..

5.1 ヘッドホン

一部の市販されているイヤホンおよびヘッドホンには、物理的なボタンを用いて音楽プレイヤーを操作可能な入力インタフェースが搭載されている。この入力インタフェースを用いることにより、音楽の再生/停止、曲の送り/戻し、音量の上げ/下げを行うことができる。本インタフェースは、無線通信を用いてボタンの押下情報を音楽プレイヤーに送られている場合と、マイク端子-GND 間を短絡する場合がある。無線通信を用いる場合はイヤホンおよびヘッドホンにバッテリーを搭載する必要がある、マイク端子-GND 間を短絡する場合は、ユーザが行いたい操作ごとに、ボタンを定められた回数分押下する必要がある。そこでバッテリーが不要かつボタンを何度も押下しなくてよい、音楽プレイヤー操作用のインタフェースを図 5.2 に示す。

本インタフェースは、ヘッドホンカバー内に MonoTouch の電極を搭載している。本インタフェースを用いるユーザは、音楽の再生/停止、曲の送り/戻し、音量の上げ/下げを、電極上にて指をスワイプすることにより行うことができる。またスワイプの方向と各操作の対応は、図 5.1 に示す入力インタフェース (Apple 社の iPod shuffle) に基づき、図 5.3 のような割り当てとした。さらに本インタフェースの電極は単一結線のみを用いて音楽プレイヤーのマイク端子に接続することにより、3.2.3 節にて述べたタッチ検出手法を用いて、タッチジェスチャ認識を行うことができる。

さらに、回転スワイプを用いた曲の再生位置の移動も行うことができる入力インタフェース例を図 5.4 に示す。本入力インタフェースにて、橙色に着色された円周上の回転スワイプを同様の再生位置の変更に利用することができる。この例は、iPod の一部の機種にて、図 5.1 の音量の上げ下げ、曲送り戻しが配置されている外側の円上にて、指をぐるぐると回す様になぞる回転スワイプを用いて、再生している曲の再生位置を移動する機能より着想を得たものである。

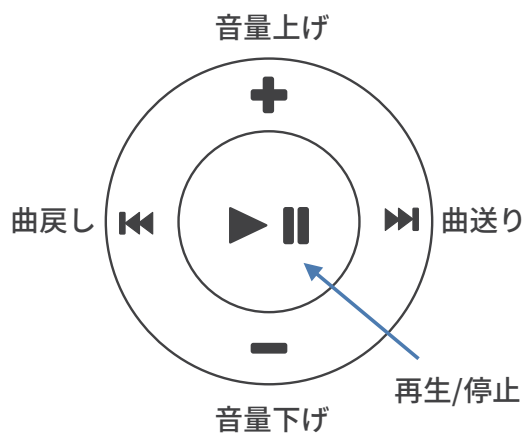


図 5.1: 音楽プレイヤーに用いられている入力インターフェースの例



MonoTouchの電極

図 5.2: MonoTouch の電極を搭載したヘッドホン用入力インターフェース



図 5.3: ヘッドホン例における入力の割り当て一覧

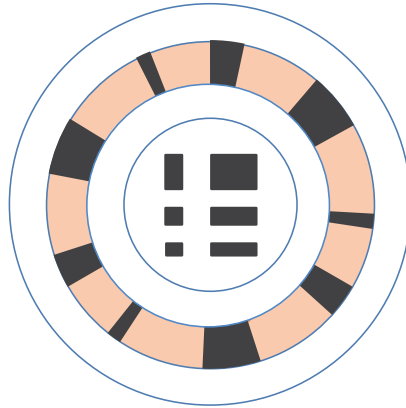


図 5.4: MonoTouch の電極を搭載したヘッドホン用入力インタフェースの拡張例

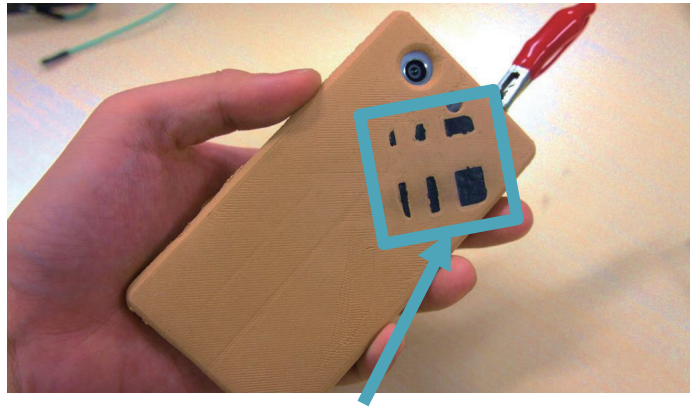
5.2 スマートフォンカバー

携帯端末の背面操作を行う Back-of-device Interaction に関する研究はこれまでに提案されている [KRL12, SO13]. 携帯端末の背面領域にて操作することにより、画面が指で隠れるオクルージョンの問題 [HB11, VCC+09] が起こらない、ならびに暗号入力の際に人に操作が見られるショルダーサーフィンの問題 [RRF04] が起きにくいという利点がある。

この Back-of-device Interaction に MonoTouch を利用するために、スマートフォンカバーに電極を搭載した例を図 5.5 に示す。本スマートフォンカバーは、スマートフォンを片手にて把持した際に、人差し指が当たる部分に電極が配置されており、このときの人差し指の角度に合わせて電極の角度が傾いている。電極にスマートフォンのマイク端子を接続することによりタッチ検出できるため、追加の回路や電源を必要としない。本アプリケーションはウェブブラウザアプリケーションの次のページに進む/前のページに戻るといった操作に割り当てることができる。また本アプリケーションを用いるユーザは端末前面にてウェブブラウザをタッチパネルを用いて操作しながら、指によって画面を隠すことなく、端末背面を用いて 5.1 節のヘッドホンの例のように音楽プレイヤーアプリケーションの操作を行うことができる。

5.3 インタラクティブなフィギュア

図 5.6 に MonoTouch の電極を搭載した恐竜のフィギュアの例、および図 5.7 に梟のフィギュアの例を示す。これらのフィギュアは動物の足および土台の接合部が一本の柱になっている。そのため、2色成型の家庭用 3D プリンタを用いてプリントする際に、印刷精度の問題により、内部に複数本の配線を行うことが難しい。しかし、MonoTouch を利用することにより、単一結線のみを用いてタッチジェスチャ認識が可能となり、フィギュアの背中のなで方によって、異なる鳴き声が再生させるといったアプリケーションに利用できる。



MonoTouchの電極

図 5.5: MonoTouch の電極を搭載したスマートフォンカバー

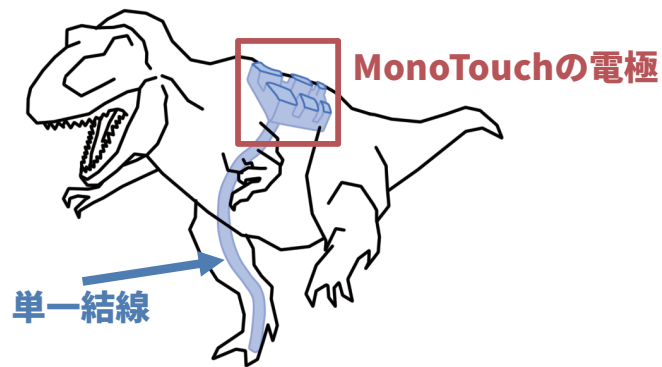


図 5.6: MonoTouch の電極を搭載した恐竜のフィギュア

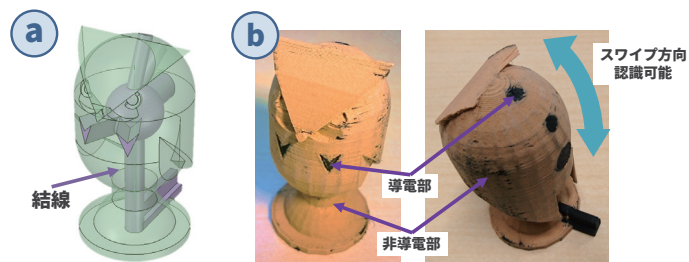


図 5.7: MonoTouch の電極を搭載した桌のフィギュア

5.4 周辺環境のインタフェース化

MonoTouch は導電部を非導電部にて区切る様な電極があれば，静電容量計測を行うことによりタッチジェスチャ認識が可能となる．この電極を構築するためには，例えば図 5.8 のように金属製のドアノブにマスキングテープを貼り付ければよい．その際は金属製のドアノブの裏側にタッチ検出回路を貼り付けることにより，回路をユーザが触れる表に出すことなくインタフェースの構築が可能である．また同様にして，図 5.9 のように台所の金属製シンクに耐水シールをカットしたものを貼り付け，濡れることがないシンクの裏側に静電容量計測回路を貼り付けることにより，皿洗いを行っている最中に，利用できるインタフェースを構築できる．

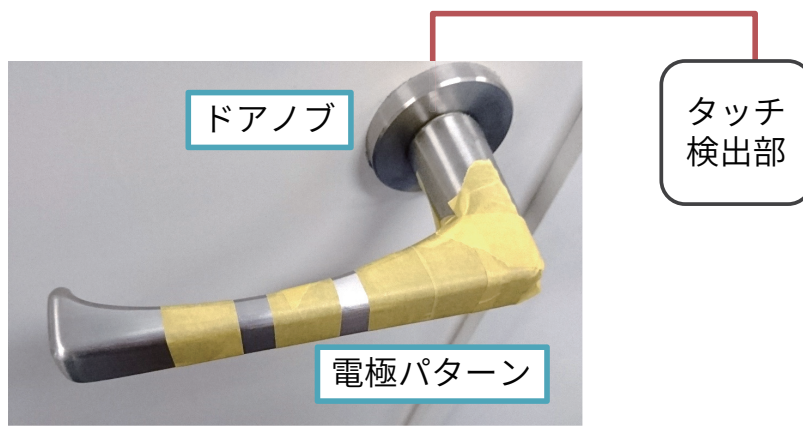


図 5.8: 金属製のドアノブをタッチインタフェース化した例



図 5.9: アルミシンクをタッチインタフェース化した例

第6章 議論

前章まで MonoTouch の原理，設計，製作および評価を述べた．本章にて MonoTouch に対して今後，どのような工夫を行うことができるかアイデアを示し議論する．

6.1 電極の形

これまで，導電部および非導電部を有する平面形状の電極を用いた MonoTouch の構築手法を述べた．またがり問題を解決するために電極形状に盛り上げを付与する手法は既に述べた．この盛り上げ以外にも電極形状を工夫することにより，さらにタッチジェスチャのみではなくタッチ位置の認識を行うなど，MonoTouch を発展することができる．そのためのアイデアを本節にて述べる

6.1.1 縦型の MonoTouch 電極

図 6.1 に縦型の電極の例を示し，図 6.2 にこの電極を読み取るための読み取り部の構造を示す．図 6.2 の電極は側面に導電部を有しており，電極ごとに側面に出ている導電部の個数および幅が異なる．この電極の導電部は内部にて導通しており，電極の端にて導電部が露出している．この電極を図 6.2 に示す読み取り部に差し込み，指を用いて押し込んだ際に，読み取り部側面からでてくる導電ゴムと電極側面の導電部が接触した際に静電容量が発生する．この静電容量の波形は電極ごとに異なるため，どの電極が差し込まれたかを認識できる．

この縦型の MonoTouch を複数並べることにより，単一結線のみを用いてタッチ位置認識が可能なタッチパネルを構築できる．また，どの電極が差し込まれたかという電極の個体識別を行うことにより，例えば差し込まれた電極によって挙動が異なる鍵穴を構築できる．

6.1.2 スライダ

MonoTouch の原理を応用し，物理的な直線形状スライダを構築するための機構を図 6.3 に示す．このスライダの例は 3D プリンタや導電インク印刷を用いて構築可能である．さらに物理的な機構であるため操作する際に，スライダの台の部分にひっかかりをつくることにより触覚フィードバックをユーザに与えることができる．

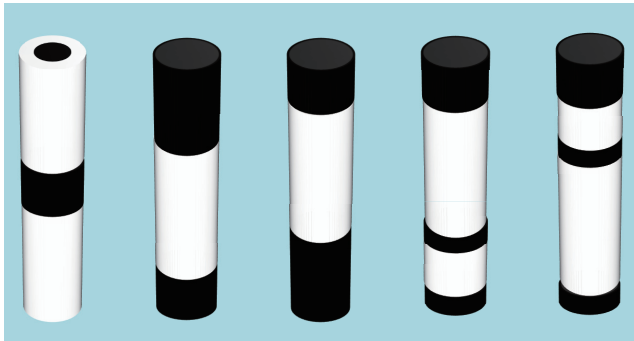


図 6.1: 縦型の MonoTouch 電極

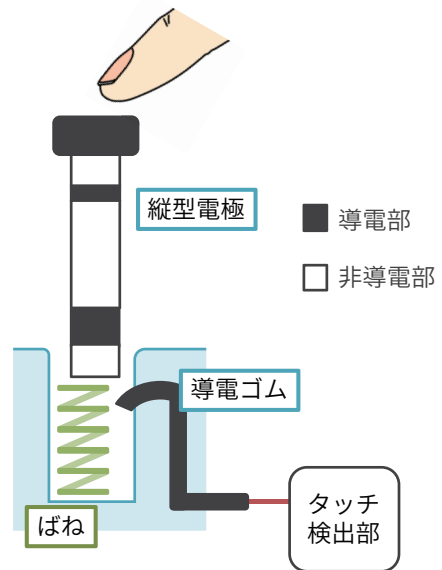


図 6.2: 電極読み取り部の構造

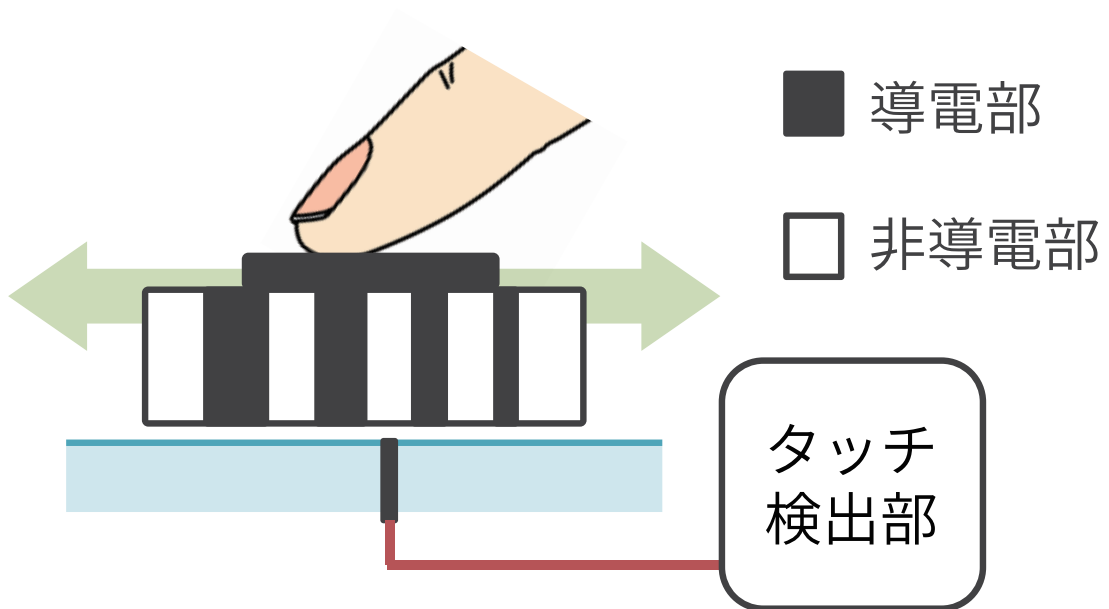


図 6.3: MonoTouch を利用した直線スライダ機構

6.1.3 溝

4.2節の考察にて述べたとおり，実験後のアンケートにて，電極を盛り上げることによって生じる触覚フィードバックを用いて，アイズフリー操作が可能ではないかという意見を得た．図6.4に示すように，電極表面上に溝を設けることにより，溝をガイドにスワイプを行うことができるため，アイズフリー操作が可能になると考えられる．さらに指がスワイプ方向に対して垂直方向にぶれることもなくなることにより認識精度が上がる可能性がある．

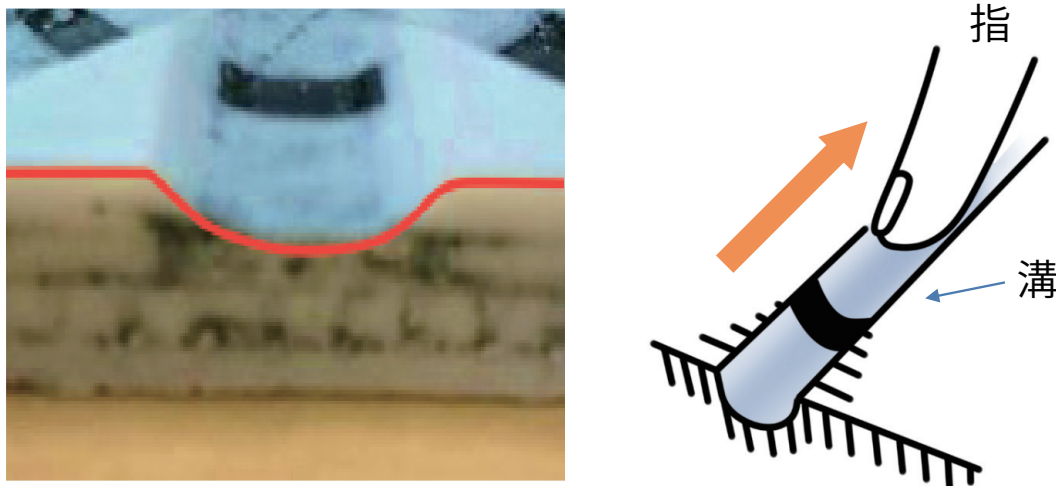


図 6.4: 電極表面の溝

6.2 他のタッチ検出回路用電極

MonoTouch は指が電極にタッチしているかどうかという ON/OFF 情報をもとにタッチジェスチャを認識する手法である．指と電極の間に生じる静電容量，マイク端子に流入するノイズにもとづくタッチ検出手法を示したが，タッチの ON/OFF 情報を検出できれば他のタッチ検出回路を用いてもタッチジェスチャを認識することができる．本節にて，3.1節にて述べたタッチ検出手法以外の手法を用いた MonoTouch 構築手法を述べる．なお本節において電極とは，信号を伝達する部分および遮断する部分を有し，指が触れる物体のことである．

光学方式タッチ検出を用いた MonoTouch

Printed Optics は 3D プリントした透明なオブジェクトを用いて，光を用いたタッチ操作を行っている [WBHP12]．本研究においても同様に透明フィラメントを用いて図 6.5 のような光学方式のタッチ検出手法を用いたシステムを構築することにより，光を用いてタッチジェスチャ認識が可能となる．図 6.5 では，タッチの検出にフォトリフレクタを用いた光の反射を

利用しているが、電極上部に光を照射する、あるいは環境光が照射されている場合、指が透明部分を覆った場合に光ファイバに流れる光の量が減衰する。この光量の減衰を利用すると、タッチ検出にはフォトトランジスタのような受光素子のみを接続することによりタッチ検出が可能となる。

また、光ファイバを用いてフォトリフレクタを有する回路および電極を接続することにより、単一結線の利点を有する。

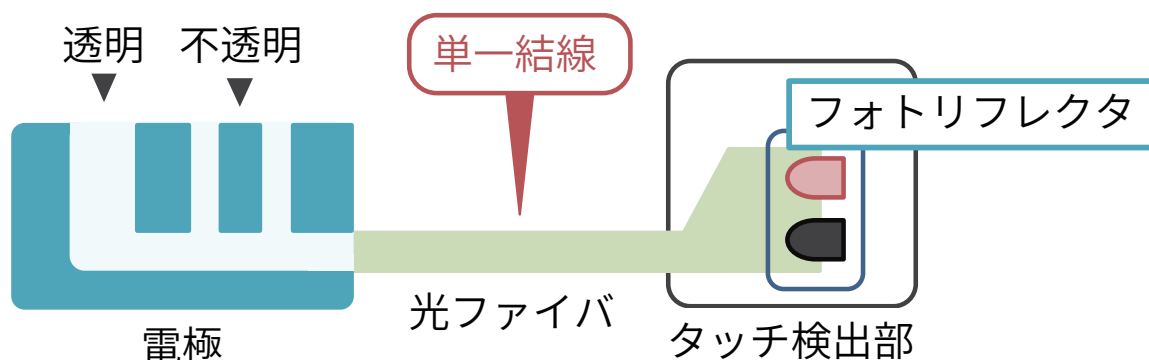


図 6.5: 光学方式タッチ検出手法を用いたタッチジェスチャ認識用システム

気圧方式タッチ検出を用いた MonoTouch

Emoballoon は気圧センサを用いて、風船の内部気圧を計測し、タッチを検出している [中島 13]. 本研究においても図 6.6 に示すような密封された電極を構築することにより、電極表面のゴムが押下された際に、電極内部の気圧が上昇する現象を用いてタッチを検出できる。また、この気圧の上昇および下降の時間的変化を観察することによりタッチジェスチャを認識できる。

さらに、本例はゴムチューブのような管を用いて気圧センサおよび電極を接続することにより、単一結線の利点を有する。

6.3 関連研究との組み合わせ

MonoTouch はタッチの ON/OFF 情報のみを基にタッチジェスチャを認識する手法である。静電容量計測回路を用いる場合、タッチの ON/OFF 以外にユーザが電極に触れた際に生じる静電容量によって、応答波形の山の高さおよび形が異なる。これは静電容量の大きさおよび周波数特性によるものであり、これらの情報を利用する研究 [SPH12, TNS16] と組み合わせると、図 6.7 のようにセンサの応答波形を成分ごとに抽出した成分ごとに解析を行うことにより、タッチジェスチャと併せて、電極への触れ方およびどの導電部に触れたかを認識できる可能性がある。



図 6.6: 気圧方式タッチ検出手法を用いたタッチジェスチャ認識用システム

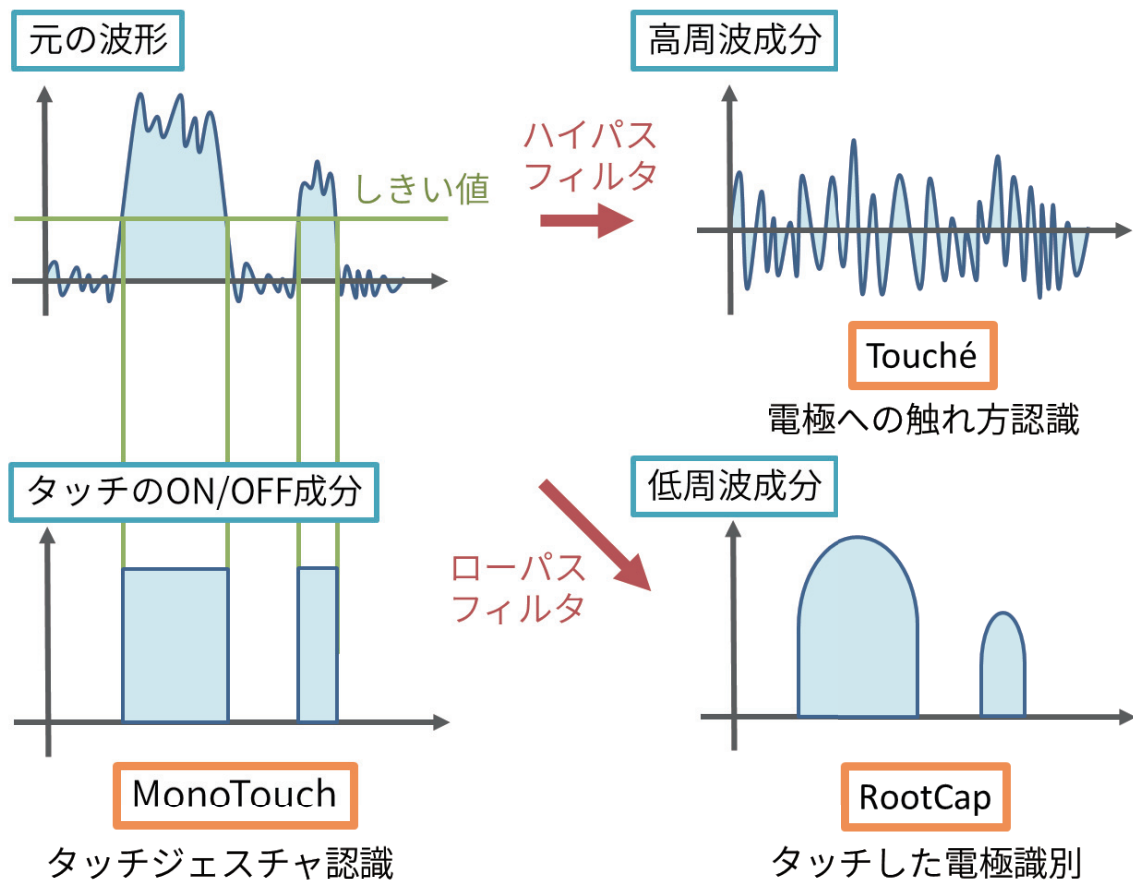


図 6.7: 関連研究 [SPH12, TNS16] と組み合わせた際の信号処理のイメージ

第7章 結論

本論文にて、タッチインタフェース設計者向けに、タッチしているかどうかという ON/OFF 情報の時間的変化を観察することにより、タッチジェスチャを認識する手法である「MonoTouch」を示した。MonoTouch は、導電部を非導電部を用いて区切る様な形状の電極およびタッチセンサを単一結線を用いて接続することにより構築できる。さらにタッチインタフェース設計者が状況に応じて構築手法を変えることができるように、様々な手法にて電極およびタッチセンサを構築する手法を示した。特に、スマートフォンおよびタブレットといった情報端末のマイク端子にタッチした際に、端子に流れ込むノイズを用いてタッチ検出を行う手法を用いた場合、電子部品を追加することなく容易にタッチインタフェースを構築できる。本手法を用いて実際にタッチジェスチャ認識が9割以上の精度にて可能であることを評価実験により明らかにした。さらに指が複数の導電部にまたがることにより認識精度が落ちる、指のまたがり問題を確認したため、この問題を解決するために電極表面の非導電部分をわずかに盛り上げる手法を検討し、評価実験により問題解決に有効である可能性が示唆された。導電部および非導電部の最適な幅を調査するために、24種類の電極を用いた評価実験を行ったところ、非導電部の幅が13mm以上であれば99%以上の精度にてタッチを検出可能であり、導電部の幅は1mm以上あれば十分にタッチを検出可能であることが分かった。

謝辞

2年間の博士前期課程の修学ならびに研究活動にあたって、生活面から研究に至るまで丁寧に面倒を見ていただきました。志築文太郎准教授に心の底より感謝の意を表します。志築先生の熱心なご指導により、研究能力だけでなく、常日頃から相手を思いやることこそが、ヒューマンインタラクション分野には欠かせないのだということを学びました。重ねてお礼申し上げます。

また、研究室全体の運営およびゼミ活動にあたっては、田中二郎名誉教授には大変お世話になりました。IPLAB で多くの素晴らしい仲間と巡り合うことができましたのも、田中先生のご尽力あってのことだと理解しております。

さらに高橋伸准教授、嵯峨智准教授ならびにヴァシラケ シモナ助教には普段の研究やゼミ活動および春合宿において、多くの助言をいただきました。心より感謝いたします。

IPLAB に来た当初は、22年暮らした地元である神戸を去り、初めての一人暮らしの中、右も左も分からず不安でしたが、素晴らしい仲間と巡り合えたおかげで、すぐに筑波に馴染むことができ、気づけばあっという間の2年間でした。やらなければならないことが山積みになっても、今日この日まで乗り切ることができたのはIPLABのメンバーの皆々様のおかげです。本当にありがとうございました。

また、特に同研究室の茅田一貴君、早川悠君、山路大樹君とは共に会社を興し、多くの貴重な体験をすることができました。この経験はただ学生生活を送っていただけでは到底得ることができないものであり、今後の人生において必ず大きな糧になると確信しております。

博士前期課程の2年間において、片手で数えきれないくらいの学会および研究会に参加し、多くの研究者の方々と議論することができ、おかげ様で高い質の研究を行うことができました。特に本論文を執筆するにあたり、NTTドコモ研究所の真鍋宏幸様には、大変貴重な議論及び助言をいただきました。感謝の意を表します。

最後になりましたが、研究を進めるにあたり、本研究の趣旨を理解し快く協力していただいた、被験者の方々に厚く御礼申し上げます。

今後、博士後期課程に進学するにあたり、さらに多くの学びを得ることができることを心より楽しみにしております。

参考文献

- [App] Apple Tree. Dreamer. <http://flashforge.co.jp/dreamer/>(2017年1月11日閲覧).
- [Ard] Arduino. Arduino. <https://www.arduino.cc/>(2017年1月11日閲覧).
- [ARM] ARM. mbed. <https://developer.mbed.org/>(2017年1月11日閲覧).
- [Bad] Paul Badger. Capacitive Sensing Library. <http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor>(2017年1月11日閲覧).
- [BPH13] Eric Brockmeyer, Ivan Poupyrev, and Scott Hudson. PAPILLON: Designing curved display surfaces with printed optics. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 457–462, New York, NY, USA, 2013. 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 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 791–800, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [CS12] Beginner's Mind Collective and David Shaw. Makey Makey: Improvising tangible and nature-based user interfaces. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '12, pp. 367–370, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [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.
- [GSO⁺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 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1407–1410, New York, NY, USA, 2014. ACM.

- [GWP12] Mayank Goel, Jacob Wobbrock, and Shwetak Patel. GripSense: Using built-in sensors to detect hand posture and pressure on commodity mobile phones. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 545–554, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [Han05] Jefferson Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '05, pp. 115–118, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [HB11] Christian Holz and Patrick Baudisch. Understanding touch. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2501–2510, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HH08] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Scratch Input: Creating large, inexpensive, un-powered and mobile finger input surfaces. In *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '08, pp. 205–208, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [HIB⁺07] Steve Hodges, Shahram Izadi, Alex Butler, Alban Rrustemi, and Bill Buxton. Thin-Sight: Versatile multi-touch sensing for thin form-factor displays. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '07, pp. 259–268, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [HL11] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. ForceTap: Extending the input vocabulary of mobile touch screens by adding tap gestures. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, pp. 113–122, 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.
- [HSP⁺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.
- [HSP12] Chris Harrison, Munehiko Sato, and Ivan Poupyrev. Capacitive Fingerprinting: Exploring user differentiation by sensing electrical properties of the human body. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 537–544, New York, NY, USA, 2012. ACM.

- [HTM11] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skininput: Appropriating the skin as an interactive canvas. *Commun. ACM*, Vol. 54, No. 8, pp. 111–118, August 2011.
- [HW12] Sungjae Hwang and Kwang-yun Wohn. Pseudobutton: Enabling pressure-sensitive interaction by repurposing microphone on mobile device. In *CHI '12 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.
- [Iiy] Iiyama. ProLite T1531SAW. <http://www.iiyama.co.jp/products/touchpanel/15/PLT1531SAW/index.html>(2017年1月11日閲覧).
- [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⁺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 *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. 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 & 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 *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, pp. 47–49, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KRL12] Hwan Kim, Yea-kyung Row, and Geehyuk Lee. Back Keyboard: A physical keyboard on backside of mobile phone using qwerty. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human*

Factors in Computing Systems, CHI EA '12, pp. 1583–1588, New York, NY, USA, 2012. ACM.

- [LBHH15] Gierad Laput, Eric Brockmeyer, Scott E. Hudson, and Chris Harrison. Acoustruments: Passive, acoustically-driven, interactive controls for handheld devices. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2161–2170, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [LBP⁺12] Simon J. Leigh, Robert J. Bradley, Christopher P. Purssell, Duncan R. Billson, and David A. Hutchins. A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors. *PLOS ONE*, Vol. 7, No. 11, pp. 1–6, 11 2012.
- [LEG] LEGO. Mindstorms. <https://www.lego.com/en-us/mindstorms/>(2017年1月11日閱覽).
- [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.
- [LSFI13] Suzanne Low, Yuta Sugiura, Kevin Fan, and Masahiko Inami. Cuddly: Enchant your soft objects with a mobile phone. In *SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, SA '13, pp. 5:1–5:2, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [LYX⁺15] Gierad Laput, Chouchang Yang, Robert Xiao, Alanson Sample, and Chris Harrison. EM-Sense: Touch recognition of uninstrumented, electrical and electromechanical objects. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 157–166, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [OGT⁺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 & 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.

- [OST14] Makoto Ono, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. A rapid prototyping toolkit for touch sensitive objects using active acoustic sensing. In *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14 Adjunct, pp. 35–36, New York, NY, USA, 2014. 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.
- [PGMH16] Huaishu Peng, François Guimbretière, James McCann, and Scott Hudson. A 3D printer for interactive electromagnetic devices. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 553–562, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [PH14] Esben Warming Pedersen and Kasper Hornbæk. Expressive Touch: Studying tapping force on tabletops. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 421–430, 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.
- [RP09] Ilya Rosenberg and Ken Perlin. The UnMousePad: An interpolating multi-touch force-sensing input pad. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 65:1–65:9, July 2009.
- [RRF04] Volker Roth, Kai Richter, and Rene Freidinger. A pin-entry method resilient against shoulder surfing. In *Proceedings of the 11th ACM Conference on Computer and Communications Security*, CCS '04, pp. 236–245, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [RS06] Jun Rekimoto and Carsten Schwesig. PreSenseII: Bi-directional touch and pressure sensing interactions with tactile feedback. In *CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '06, pp. 1253–1258, New York, NY, USA, 2006. 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 & Technology*, UIST '15, pp. 253–258, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [SKW⁺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⁺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.
- [SLW⁺11] Yuta Sugiura, Calista Lee, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. PINOKY: A ring that animates your plush toys. In *SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies*, SA '11, pp. 14:1–14:1, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [SO13] Oliver Schoenleben and Antti Oulasvirta. Sandwich Keyboard: Fast ten-finger typing on a mobile device with adaptive touch sensing on the back side. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 175–178, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [SON] SONY. MESH. <http://meshprj.com/jp/>(2017年1月11日閲覧).
- [SPH12] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. Touché: Enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. In *Proceedings of the SIGCHI 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.

- [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 on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '16*, pp. 23–32, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [TS16] Yu-Chih Tung and Kang G. Shin. Expansion of human-phone interface by sensing structure-borne sound propagation. In *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '16*, pp. 277–289, 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.
- [VBD⁺15] Marynel Vázquez, Eric Brockmeyer, Ruta Desai, Chris Harrison, and Scott E. Hudson. 3D printing pneumatic device controls with variable activation force capabilities. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp. 1295–1304, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [VCC⁺09] Daniel Vogel, Matthew Cudmore, Géry Casiez, Ravin Balakrishnan, and Liam Keliher. Hand occlusion with tablet-sized direct pen input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '09*, pp. 557–566, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [WB11] Raphael Wimmer and Patrick Baudisch. Modular and deformable touch-sensitive surfaces based on time domain reflectometry. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp. 517–526, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [WBHP12] Karl Willis, Eric Brockmeyer, Scott Hudson, and Ivan Poupyrev. Printed Optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12*, pp. 589–598, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [WKH⁺16] Gerard Wilkinson, Ahmed Kharrufa, Jonathan Hook, Bradley Pursglove, Gavin Wood, Hendrik Haeuser, Nils Y. Hammerla, Steve Hodges, and Patrick Olivier. Expressy: Using a wrist-worn inertial measurement unit to add expressiveness to touch-based interactions. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp. 2832–2844, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [XYZ] XYZ Printing. XYZ Printing. <https://xyzprinting.com/>(2017年1月11日閲覧).

- [シス] システムクリエイト. **Cut-key**. http://www.systemcreate-inc.co.jp/products/machine/cut_machine/cutkey.html(2017年1月11日閲覧).
- [高橋 16] 高橋治輝, 宮下芳明. 造形高さと樹脂量の設定による熱溶解積層方式 3D プリンタの表現力拡張. 第 24 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 (WISS 2016) 論文集, WISS'16, pp. 193–198, 日本, 2016. 日本ソフトウェア科学会.
- [高田 15a] 高田峻介, 志築文太郎, 田中二郎. **Monotouch**: 複数ジェスチャ認識が可能な単一電極からなるタッチセンサ. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2015 論文集, HIS'15, pp. 49–52, 日本, 2015. ヒューマンインタフェース学会.
- [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. 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 (WISS 2015) 論文集, WISS'15, pp. 91–96, 日本, 2015. 日本ソフトウェア科学会.
- [高田 16a] 高田峻介, 林威, 安藤宗孝, 志築文太郎, 高橋伸. **BaroTouch**: 防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法. 第 24 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 (WISS 2016) 論文集, WISS'16, pp. 9–14, 日本, 2016. 日本ソフトウェア科学会.
- [高田 16b] 高田峻介, 志築文太郎, 田中二郎. 入力装置、入力方法及び検出装置. 特願 2016-092522, May 2016.
- [上野 16] 上野新葉, 宮下芳明. 熱溶解積層方式 3D プリンタにおけるエクストルーダ内での相溶性を利用した硬軟制御手法. 第 24 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 (WISS 2016) 論文集, WISS'16, pp. 309–310, 日本, 2016. 日本ソフトウェア科学会.
- [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, Apr 2015.
- [中島 13] 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. **Emoballoon**: ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インタフェース (<特集>アート&エンタテインメント 3). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 255–265, 2013.

著者論文リスト

参考論文

本論文の主内容は、下記 (1),(2),(3) として公表済みおよび出願済みである。

- 公表済み論文

- (1) Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, Jiro Tanaka, “MonoTouch: Single capacitive touch sensor that differentiates touch gestures”, Proc. of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, San Jose, CA, USA, May, 2016, pp.2736–2743.
- (2) 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”, 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 (WISS 2015) 論文集, 大分, 2015 年 12 月, pp.91–96.

- 出願済み特許

- (3) 高田 峻介, 志築 文太郎, 田中 二郎, “入力装置, 入力方法及び検出装置”, 特願 2016-092522, 2016 年 5 月.

その他の論文

- 公表済み論文

- (1) 高田 峻介, 林 威, 安藤 宗孝, 志築 文太郎, 高橋 伸, “BaroTouch : 防水端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法”, 第 24 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 (WISS 2016) 論文集, 滋賀, 2016 年 12 月, pp.9–14.
- (2) Keigo Shima, Kazusa Onishi, Ryosuke Takada, Takuya Adachi, Buntarou Shizuki and Jiro Tanaka, “Investigating accuracy of tilting operation on wrist-worn devices with touchscreens”, Proc. of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. San Jose, CA, USA, May, 2016, pp.2605–2711.
- (3) Keigo Shima, Ryosuke Takada, Kazusa Onishi, Takuya Adachi, Buntarou Shizuki and Jiro Tanaka, “AirFlip-Undo: quick undo using a double crossing in-air gesture in hover zone”, Adjunct Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. Charlotte, NC, USA, Nov, 2015, pp.97–98.

- 採録決定論文

- (4) Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki and Shin Takahashi, “JoyKey: One handed hardware keyboard with 3x4 matrix slide keys ”, Proc. of 18th International Conference on Human-Computer Interaction, Vancouver, Canada, July, 2016.

- 査読のない発表論文

- (5) 久保 勇貴, 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “コンテキストに基づくスマートウォッチ及びスマートフォンを用いたクロスデバイスインタラクション”, 第 24 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 (WISS 2016) 論文集, 滋賀, 2016 年 12 月, pp.205–206.
- (6) 高田 峻介, 林 威, 安藤 宗孝, 志築 文太郎, 高橋 伸, “防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いたタッチ圧力取得手法”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2016-HCI-169, 山口, 2016 年 8 月, 7 ページ.
- (7) 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “キーボード上における 2 つのキーの連続押下を開始符号とする操作手法”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2016-HCI-168, 岩手, 2016 年 6 月, 6 ページ.
- (8) 高田 峻介, 山路 大樹, 冨田 一貴, 鶴田 真也, 早川 悠, “PINCH: ハンガー型屋外干し支援システム”, インタラクション 2016 論文集, 東京, 2016 年 3 月, pp.855–858.
- (9) 高田 峻介, 奥村 彩水, 木邑 和馬, 神武 里奈, 冨田 一貴, 山路 大樹, 鶴田 真也, “PoiPet: ペットボトルゴミの分別を促進するインタラクティブなゴミ箱”, インタラクション 2016 論文集, 東京, 2016 年 3 月, pp.850–854.

- (10) 大西 主紗, 高田 峻介, 島 佳吾, 阿達 拓也, 志築 文太郎, 田中 二郎, “腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の精度評価”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2016-HCI-165, 大分, 2015年11月, 8ページ.
 - (11) 高田 峻介, 志築 文太郎, 田中 二郎, “MonoTouch: 複数ジェスチャ認識が可能な単一電極からなるタッチセンサ”, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2015 論文集, 北海道, 2015年9月, pp.49-52.
 - (12) 田辺 健, 高田 峻介, 藪内 聖也, 上村 康輔, “ワイヤレス糸電話を用いた遠隔コミュニケーションの提案”, インタラクション 2015 論文集, 東京, 2015年3月, pp.774-777.
 - (13) 高田 峻介, “GROVE: 導電繊維を用いた安価なデータグローブの開発”, インタラクション 2015 論文集, 東京, 2015年3月, pp.944-945.
 - (14) 田辺 健, 高田 峻介, 藪内 聖也, 上村 康輔, “ワイヤレス糸電話を用いた遠隔コミュニケーションの提案”, 産学官金技術フォーラム'14, vol.19, 兵庫, 2014年11月, 2ページ.
 - (15) 田辺 健, 高田 峻介, 藪内 聖也, 上村 康輔, “ワイヤレス糸電話”, 第19回大会論文集, vol.19, 愛知, 2014年9月.
 - (16) 高田 峻介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェースの研究”, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.16, 京都, 2014年3月, pp.33-34.
 - (17) 高田 峻介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェース”, 2014年度JSiSE 学生研究発表会, 大阪, 2014年3月, 2ページ.
 - (18) 高田 峻介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェース”, 産学官技術フォーラム'13, vol.18, 兵庫, 2013年11月, 2ページ.
 - (19) 高田 峻介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェースの研究”, 電気学会 関西支部 高専卒業研究発表会, 大阪, 2013年3月, 2ページ.
- 査読のない採録決定論文
- (20) 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “導電繊維編み込み手袋を用いた指の曲げ計測手法”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2016-HCI-171, 沖縄, 2017年1月, 6ページ.

付録A 実験2において使用した書類

第4章の実験2にて用いた書類を付録として以下に示す.

実験に関する説明

- 開発したタッチセンサ MonoTouch（以下、MonoTouch）を用いて、タッチジェスチャを行っていただきます。
- 行っていただくタッチジェスチャは、タップ、上スワイプ、下スワイプ、左スワイプ、右スワイプ（以下、5ジェスチャ）です。
- 4種類の MonoTouch を用いて実験を行っていただきます。
- まず、MonoTouch について説明します。

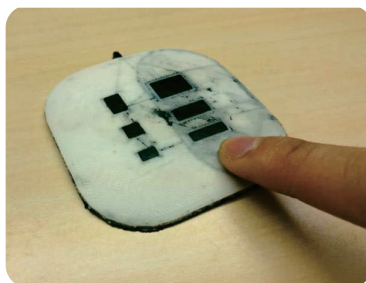


図 1. MonoTouch 用電極の外観

MonoTouch とは、複数ジェスチャ認識が可能な単一電極からなるタッチセンサのことです。表面を指でタップ（指で触れてから離す）したり、スワイプ（指で表面をなぞる）したりすると、ジェスチャごとに図 2 の様なセンサ応答が現れ、ジェスチャの判別を行うことができます。

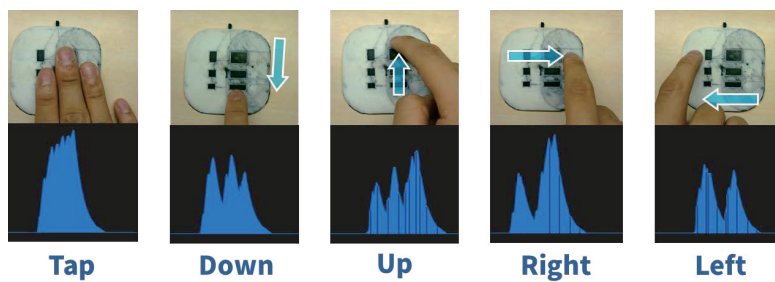


図 2. 各タッチジェスチャとセンサ応答

以下に実験の手順を示します。

実験手順

1. MonoTouch が設置されたテーブルの、正面に設置された椅子に座ってください。
2. はじめに、波形が表示される練習プログラムを見ながら、自由に MonoTouch を用いてタッチジェスチャを入力してもらいます。
3. ジェスチャ入力が十分に成功するようになったら、計測を開始します。
4. 実験者が実験プログラムを起動したら、PC 画面上に表示されたジェスチャを、MonoTouch を用いて入力してください。
5. 5 ジェスチャが順番に図 4 の様に PC 画面上に表示されます。指示された通りにジェスチャ入力を行ってください。
6. 1 つのジェスチャが指示されてから入力を行うまでを 1 タスク、5 ジェスチャの入力を行うまで（5 タスク）を 1 試行とし、10 試行を 1 セッションとします。
7. 4 種類の MonoTouch それぞれにおいて、手順 2-6 までを行っていただきます。
8. セッションごとに 3 分間の休憩をとるものとします。
9. また、実験終了後にアンケートに回答してください。

実験中の注意

- 各試行中は椅子に深く腰掛けた状態で、**右手の人差し指のみ**を用いて操作を行ってください。
- 人差し指は MonoTouch に対して指の先端部分が触れるように立てて、入力するようにしてください。
- 肘より先は体や机で支えないようにしてください。
- 左手は膝の上において、MonoTouch に触れないようにしてください。
- タップを行う際は指の先で触れるのではなく、手のひら全体で MonoTouch を覆う様に触れて下さい。
- スワイプを行う際は MonoTouch 表面の、図 3 に指定された行列の黒い部分に触れる様にしてください。（上下スワイプを行う際は向かって右列、左右スワイプを行う際は向かって真ん中行）
- スワイプを行う際は MonoTouch の一辺から、もう一方の辺まで MonoTouch の表面をなぞる様に触れて下さい。

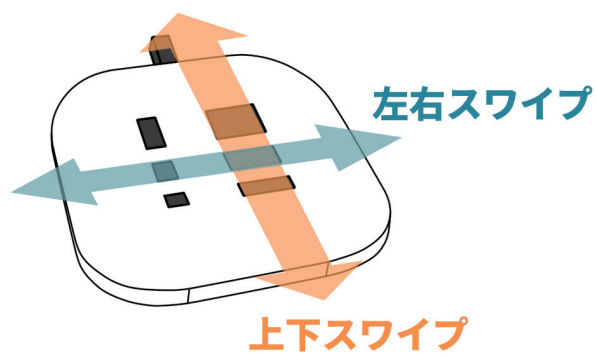


図3. 上下左右スワイプを行う、電極の範囲

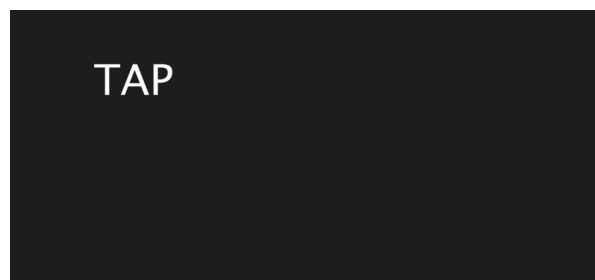


図4. 実験中の画面構成

MonoTouch 性能評価実験のお願い

文責：高田 峻介

この度は実験にご協力いただき、ありがとうございます。

- 本実験の目的は、開発中のタッチセンサ「MonoTouch」の性能を評価することです。
- 実験中に、写真の撮影を行う場合がありますが、これらは実験の様子を記録するために行います。その写真を発表において利用する場合は、本人の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- この実験によって得られたデータは、個人が特定できないように処理いたします。
- 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが、いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます。

平成 年 月 日

被験者 所属	署名
説明者 所属 システム情報工学研究科	署名

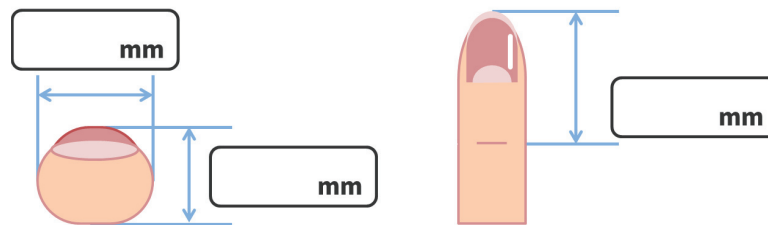
実験前 アンケート

文責：高田 峻介

1. 年齢, 性別, 利き手についてお答えください.

年齢：__歳 性別：男・女 利き手：右・左

2. 人差し指のサイズを測定します.



3. 日常生活において、タッチジェスチャ（タップ、スワイプ）を用いることがありますか.

実験に関するアンケート

文責：高田 峻介

1. MonoTouch は簡単でしたか？

(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

2. 盛り上げのない電極の操作は簡単でしたか？

(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

3. 盛り上げのある電極の操作は簡単でしたか？

(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

4. 設問2と設問3の評価が異なる場合、理由を教えてください。

理由

5. 本システムについて、良かった点、改善すべき点、感想をご記入ください。

良かった点
改善すべき点
感想等

アンケートは以上になります。ご協力ありがとうございました。