

MonoTouch : 複数ジェスチャ判別が可能な単一電極タッチセンサ

高田 峻介* 志築 文太郎† 田中 二郎†

概要. タップおよび上下左右スワイプを検出可能な単一電極のタッチセンサ MonoTouch を示す. MonoTouch の電極はタップおよびスワイプの方向を判別するために次の 2 要件を満たすように設計される. (1) タップ, 左右スワイプ, 上下スワイプにおいてセンサの応答回数が異なる. (2) 左と右, 上と下スワイプでセンサの応答時間が非対称である. 我々は, この電極を導電素材と非導電素材を用いて 3D プリントし, また電極の静電容量に基づき, ジェスチャを判別するシステムを構築した. この結果, 電極パターンを小型化した場合, 電極の導電部に指がまたがりジェスチャの判別精度が低下するという問題があることが分かった. そこで本研究ではこの問題を解決するために, 電極表面に盛り上げを追加した. 電極パターンの大小, 盛り上げの有無を変えた 4 つの電極条件において被験者実験を行ったところ, 電極パターンを小型化した際に盛り上げを追加することが判別精度向上に有効であることが示唆された.

1 はじめに

コンピュータの入力装置として広く用いられている, タップ, スワイプなどのタッチジェスチャ (以下, ジェスチャ) を取得する静電容量方式のタッチパネルおよびタッチパッドは, 多くのタッチセンサから構成される. これらは, 個々のタッチセンサの静電容量を計測するために, 多くの結線, およびマルチプレクサを用いた高速なスイッチングを必要とする.

これに対して, 単一電極のタッチセンサのみを用いて複数ジェスチャの判別が可能になれば, 単一結線のみを要するため, インタフェースの設計が簡単になる. これまでにも, 単一電極にて作製された静電容量方式のタッチセンサを用いてタッチ, 左右方向のスワイプ, およびスワイプを行う際の指の本数を検出する手法はすでに真鍋らによって提案されている [17]. 真鍋らはスワイプの左右の向きを判別するために, 非対称な感度を持つ面積の異なる 2 つの導電部を持つプリント基板を用いている.

一方, 本研究はタップおよび 4 方向スワイプを判別するために, スワイプの向きによって非対称なセンサの応答を持ち, かつタップ, 左右スワイプ, および上下スワイプにおいてセンサの応答回数が異なる電極パターンを設計した (図 1a). また, 設計した電極パターンを導電素材および非導電素材を用いて 3D プリントし (図 1b), タップおよび上下左右スワイプという 5 種類のジェスチャを判別可能な単一電極タッチセンサ「MonoTouch」を作製した. プロトタイプとして 30mm 四方の電極パターンを 3D プリントし, ジェスチャの判別実験を行ったと

ころ, ジェスチャの入力中に複数の導電部に指がまたがり, 判別精度が低下するという問題が確認された [18]. これは電極サイズを小型化すると, より顕著に表れることが予想される. この問題を解決するために, 電極表面に指のまたがり防止のために盛り上げを付与する手法を考案した. 本稿においては, MonoTouch の設計, ジェスチャの判別, 盛り上げを評価するための判別精度評価実験とその考察, 議論, および今後の課題を示す.

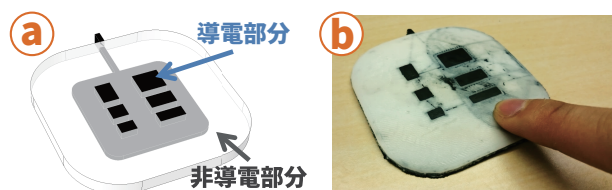


図 1: 製作した MonoTouch

2 関連研究

タッチセンサには, 感圧方式 [13, 12], 光学方式 [5, 6], 静電容量方式 [11, 14], 音響方式 [7, 10], ならびに時間領域反射測定方式 [16] がある. 光学方式および静電容量方式のタッチセンサは, 複数のセンサを平面上に並べることにより, 様々なジェスチャの判別を行うことができる [9, 4, 11, 3]. しかし複数のタッチセンサを用いる場合, その分結線が必要になるため回路規模が増大するという問題が生じる. この問題を解決するため, 指が個々のタッチセンサに触れているか以外に, どのように触れているかを取得できるようになればタッチセンサの数を減らすことが可能となる.

指が個々のタッチセンサにどのように触れているかを検出する手法として以下のような方法が挙げられている. 佐藤らが提案した Touché [14] は, 把持

Copyright is held by the author(s).

* 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

† 筑波大学システム情報系

状態の識別を単一電極のみを用いて可能とする手法である。この手法は、タッチの状態によって電極のインピーダンスおよび静電容量の周波数特性が異なることを利用している。同様の識別は振動を用いても可能である [10]。これらは、計測信号を周波数領域にて観測しているため、静的な状態の判別を対象としており、提案手法とは動的なジェスチャを検出する点において異なる。また、計測信号を時間領域にて観測することにより、動的な状態であるジェスチャを判別する手法 [15] も提案されている。この手法は 2 つのフォトトリフレクタを用いて 6 種類の動的なジェスチャ判別することに成功している。他にも振動を時間領域にて観測する手法などもある [8]。一方、提案手法は時間領域にて観測する点において同じであるが、単一電極のみを用いる点において異なる。

3 タッチセンサ MonoTouch の設計

我々は、ユーザのタップおよび上下左右スワイプという 5 種類のジェスチャを判別できる単一電極タッチセンサ MonoTouch の設計および製作を行った。本節においては電極パターンの設計方針、および電極の設計と製作について述べる。

3.1 電極パターンの設計方針

以下の要件を満たすことにより、単一電極タッチセンサの電極パターンを用いてタップ、スワイプおよびスワイプの向きが判別可能となる。

要件 1 タップ、左右スワイプ、上下スワイプにおいてセンサの応答回数が異なる

要件 2 左スワイプと右スワイプ間、および上スワイプと下スワイプ間のそれぞれにおいて、センサの応答が非対称である

以下にそれぞれの要件を説明する。

[要件 1] ユーザがタップを行う場合、ユーザは指を用いて電極に触れ、その後指を離す。つまり、1 度のタップに対して 1 回の応答が得られる。これに対し、スワイプを行う際にユーザの指が電極およびそれ以外の部分、すなわち導電部と非導電部に交互に触れるよう電極パターンの設計を行うことにより、1 度のスワイプにて複数回の応答を得ることが可能となる。この応答回数を左右と上下間にて異なるよう設計することにより、タップ、左右スワイプおよび上下スワイプの判別が可能となる。

[要件 2] スワイプを行う際、電極の幅を長くすることによりセンサの応答時間が長くなる。[要件 1] より、スワイプを行う際はユーザの指が複数の電極に触れるため、それぞれの電極の長さが異なるように設計することにより、スワイプ方向に応じてセンサの応答時間が非対称になる。たとえば、左スワイプにおいては、長い電極に触れた後に短い電極に触

れ、右スワイプにおいては、短い電極に触れた後に長い電極に触れるように設計すれば、2 つの応答時間を比較することによりスワイプの向きの判別が可能となる。

上記の 2 つの要件を満たすように電極パターンの設計を行った。

3.2 盛り上げの付与

プロトタイプとして 30mm 四方の電極パターンを作成し、ジェスチャの判別実験を行った。結果、上下スワイプにおいて導電部間に指がまたがることにより応答回数が減り、別ジェスチャとして判別される問題が確認された [18]。この問題は電極パターンの小型化に際して、より顕著に表れることが予想される。この問題を解決するために、我々は非導電部をわずかに盛り上げる方法を考案した。非導電部を盛り上げることにより、指が図 2 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。盛り上げを付与する位置は図 3 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。

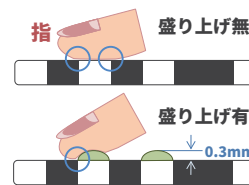


図 2: 盛り上げによる指のまたがりの解消



図 3: 盛り上げの付与位置

3.3 電極の設計と製作

3.1 節にて述べた電極パターンの設計と製作を行った。電極は全て図 1a のように、導電部が内部にて互いに導通しており単一電極となっている。

電極は全体が 70mm 四方となるよう設計し、30mm 四方の電極パターンを中心に配置した。[要件 1] に従い、上下スワイプの際はセンサの応答回数が 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になっており、指の厚みが指幅より狭いため、左右スワイプより上下スワイプの方が、複数の導電部に指がまたがりやすいためである。この時、3.2 節に従い盛り上げを付与した。また、[要件 2] に従い、上下間においては上側の電極に、左右間においては右側の電極に指が長く触れる様に電極パターンを設計した。

電極の製作には、3D プリンタとして熱溶融積層方式の 3D プリンタ (FLASHFORGE 社製, Dreamer) を用いた。また、素材として導電性 PLA フィラメントおよび非導電性 PLA フィラメントを用いた。

4 ジェスチャの判別

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判別するシステムを構築した. 図4に作製した電極を組み込んだ判別システムの構成を示す.



図 4: 判別システムの構成

4.1 静電容量の検出

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[1]を用いた。これは、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て静電容量を計測している。この遅延時間はユーザの指が電極の導電部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指が電極に触れたことを検出することができる。

4.2 ジェスチャの判別方法

電極上にてジェスチャを行った際に、観測された波形を図5に示す。図5中段は、縦軸が4.1節にて述べた遅延時間であり、横軸が静電容量の計測が完了する度に更新されるフレームになっている。図5下段は1フレーム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。この差分値に関して、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を用いてジェスチャの判別を行った。

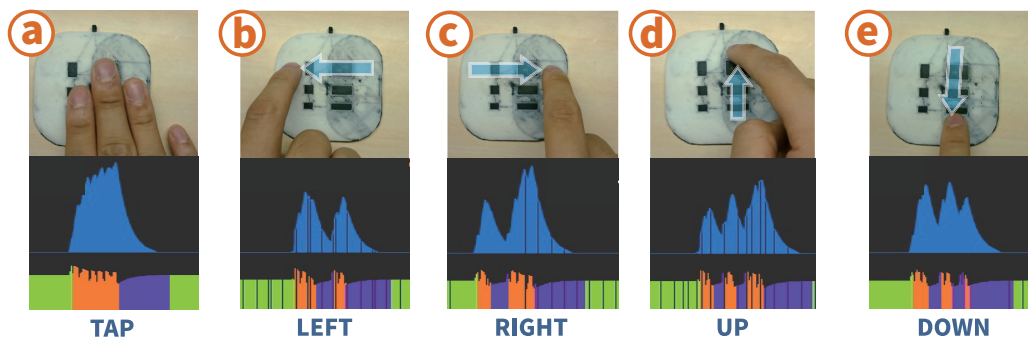


図 5: それぞれのジェスチャを行った際に得られる波形（上段：ジェスチャの写真，中段：センサ応答の波形，下段：1フレーム前の静電容量との差分値の波形）

5 ジェスチャ判別実験

MonoTouchのジェスチャ判別精度を測定するために被験者実験を行った。MonoTouchの電極は、電極サイズを小さくした際に盛り上げを付与することが有効か調べるため、サイズ条件（電極パターンのサイズ）および形状条件（盛り上げの有無）が異なる4種類のMonoTouchを作製し、比較を行った。

5.1 被験者

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1に各被験者の指のサイズを示す。

表 1: 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

5.2 実験条件

電極のサイズ条件および形状条件について述べる。サイズ条件は図6に示すSmallおよびLargeの2種類である。これらのサイズ間において導電部の上下方向の幅は一定であり、非導電部の上下方向の幅を変えている。形状条件はFlat（盛り上げ無）およびBank（盛り上げ有）の2種類である。これらの条件に従って作製した4種類のMonoTouchを図7に示す。

5.3 実験手順

実験の様子を図8に示す。被験者は実験中、常に椅子に座るよう求められた。

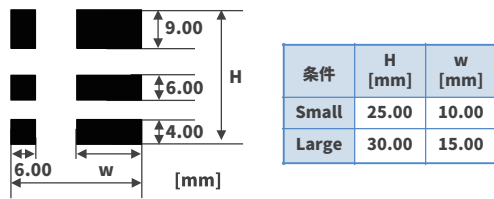


図 6: サイズ条件ごとの電極パターンのサイズ

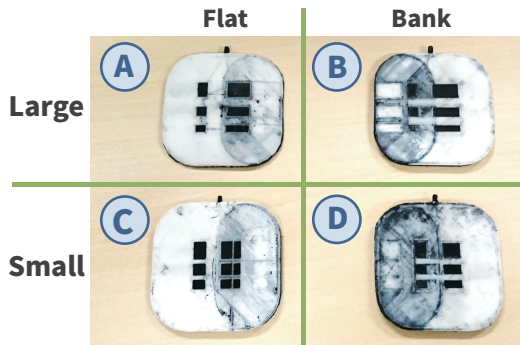


図 7: 作製した電極の一覧

我々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 7mm 程度内側の指の厚み、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。

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、被験者に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立てて入力するように指示した。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、各被験者は計 200 試行 (4 電極条件 × 5 ジェスチャ × 10 試行) 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、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。

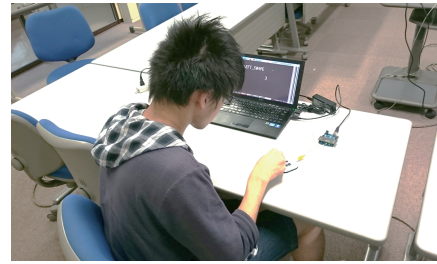


図 8: 実験の様子

5.4 実験結果

各電極条件ごとの判別精度を表 2 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 3 に、入力速度を表 4 に示す。結果、条件 B の判別精度が最も高く、電極パターンを小さくすると判別精度が落ちるという結果を得た。

表 3: 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: 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

6 考察

表 2 に示す電極条件ごとの混同行列の内訳を見ると、表 2B において下スワイプが左スワイプと誤判別されていることがわかる。これは図 5b と e の通り、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判別しており、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った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判別を終えてしまったことは、表 4 の P3, P7 の 1 入力当たりの時間が他の被験者に比

表 2: 各電極条件におけるジェスチャ判別の混同行列

A 判別結果 (電極条件A: Large, Flat)		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%
		正答率				91.73%

B 判別結果 (電極条件B: Large, Bank)		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%
		正答率				92.25%

C 判別結果 (電極条件D: Small, Flat)		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%
		正答率				67.42%

D 判別結果 (電極条件C: Small, Bank)		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%
		正答率				67.93%

べ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、指がひっかかり操作しづらいという意見が得られた。

表 2A と表 2C 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判別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 2 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 2C と表 2D より、盛り上げを電極表面に付与することにより、条件 D の上下スワイプの判別精度が、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判別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、左右スワイプの判別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 1 と表 3 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、判別精度を向上させる可能性があることが示された。

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。

7 適用例

本研究が提案するタッチセンサの適用例を図 9 に示す。図 9a のヘッドホンカバーでは、曲送り (右スワイプ)、曲戻し (左スワイプ)、音量上げ (上スワイプ)、音量下げ (下スワイプ)、再生/一時停止 (タップ) 操作をヘッドホン側面で行うことができる。また、図 9b のスマートフォンケースは、端

末背面にブラウザの戻る、進むなどの操作を割り当てることにより、Back-of-Device 操作 [2] を試験するために作製したプロトタイプである。また、これらの例に 8.1 節にて後述する溝を付与することにより、アイズフリーな操作が可能になる。



図 9: MonoTouch の適用例 (a: ヘッドホンカバー, b: スマートフォンケース)

8 議論および今後の課題

本節においてユーザに触覚フィードバックを与えるための電極形状の発展案、および今後の課題について述べる。現在の MonoTouch は、以下に示す 2 つの問題が存在する。(1) ユーザにとって、スワイプ位置が明示されていない。(2) 電極のさらなる小型化。これらの解決が今後の課題となる。

8.1 スワイプ位置の明示

実験に用いた電極パターンでは、スワイプする場所を明示していないため、慣れないユーザは電極表面のどこをスワイプすれば良いか分からない。そこで、スワイプ方向に沿った溝を電極表面に付与する。これにより、ユーザにスワイプする場所を示すことができる。

また、ユーザがスワイプする場所を触覚フィードバックにて認識できるようになるため、アイズフリーな操作が可能となると考えられる。さらに、ユーザが指でなぞるべき場所を一意に指定できるため、図 10 のような電極形状を有する MonoTouch が実現される。図 10a は、それぞれ電極を指でスワイプした際の応答回数が上下左右斜めの計 8 方向それぞれ異なるように設計された電極である。また、図 10b

は溝にそって指を回すという回転ジェスチャを取得するように設計された電極である。



図 10: 溝を付与した電極形状 (a: 8 方向スワイプ検出用電極, b: 回転ジェスチャ検出用電極)

8.2 電極の小型化

今後, MonoTouch の電極を小型化する予定である. そのためには導電部の幅をより小さくする必要がある. これまでは 4.1 節に述べたとおり, Arduino を用いた回路により静電容量計測を行っていたため, 計測の分解能は Arduino の性能や通信速度に依存しており, これ以上電極を小型化すると指の接触の検出が難しくなる問題があった. そこで今後は, 真鍋らの提案しているタッチセンシング回路 [17] を基に, ハードウェアのみでタッチの有無を取得する回路を構成し, 小型の電極におけるジェスチャの判別に取り組む. また, 小型化に合った電極パターンおよび形状の検討を行い, 判別精度の向上に取り組む.

9 まとめ

本稿にて単一電極を用いた複数ジェスチャの判別手法, およびその実装である単一電極タッチセンサ MonoTouch を示した. 判別可能なジェスチャは, タップおよび上下左右スワイプである. これらのジェスチャの判別を行うために以下の 2 つの要件を満たすように電極パターンを設計した. [要件 1] タップ, 上下スワイプおよび左右スワイプにおいて, それぞれセンサの応答回数が異なる. [要件 2] 右スワイプと左スワイプ, もしくは上スワイプと下スワイプのそれぞれにおいて, センサの応答時間が非対称である.

また電極パターンを 3D プリントして製作し, ユーザが電極パターン上にてジェスチャを行った際の静電容量の変化をもとにジェスチャの判別を行うシステムを構築した. 被験者を用いた実験により, 単一電極にてジェスチャの判別が可能であることがわかった. また, 電極パターンを小型化する際に盛り上げを付与することが, 複数の導電部間に指がまたがる問題を防ぎ, 判別精度向上に有効であることが示唆された.

参考文献

[1] P. Badger. Capacitive Sensing Library. 2015/10/19 確認 <http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor>.

[2] P. Baudisch and G. Chu. Back-of-Device Interaction Allows Creating Very Small Touch Devices. CHI '09, pp. 1923–1932, 2009.

[3] P. Dietz and D. Leigh. DiamondTouch: A Multi-User Touch Technology. UIST '01, pp. 219–226, 2001.

[4] J. Gu, S. Heo, J. Han, S. Kim, and G. Lee. LongPad: A TouchPad Using the Entire Area below the Keyboard of a Laptop Computer. CHI '13, pp. 1421–1430, 2013.

[5] J. Han. Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection. UIST '05, pp. 115–118, 2005.

[6] C. Harrison, H. Benko, and A. Wilson. Omni-Touch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. UIST '11, pp. 441–450, 2011.

[7] C. Harrison, D. Tan, and D. Morris. Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface. CHI '10, pp. 453–462, 2010.

[8] C. Harrison, R. Xiao, and S. Hudson. Acoustic Barcodes: Passive, Durable and Inexpensive Notched Identification Tags. UIST '12, pp. 563–568, 2012.

[9] S. Hodges, S. Izadi, A. Butler, A. Rustemi, and B. Buxton. ThinSight: Versatile Multi-touch Sensing for Thin Form-factor Displays. UIST '07, pp. 259–268, 2007.

[10] M. Ono, B. Shizuki, and J. Tanaka. Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects using Active Acoustic Sensing. UIST '13, pp. 31–40, 2013.

[11] J. Rekimoto. SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces. CHI '02, pp. 113–120, 2002.

[12] J. Rekimoto and C. Schwesig. PreSenseII: Bidirectional Touch and Pressure Sensing Interactions with Tactile Feedback. CHI EA '06, pp. 1253–1258, 2006.

[13] I. Rosenberg and K. Perlin. The UnMousePad - An Interpolating Multi-Touch Force-Sensing Input Pad. SIGGRAPH '09, pp. 65:1–65:9, 2009.

[14] M. Sato, I. Poupyrev, and C. Harrison. Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects. CHI '12, pp. 483–492, 2012.

[15] D. Spelmezan, C. Appert, O. Chapuis, and E. Pietriga. Controlling Widgets with One Power-up Button. UIST '13, pp. 71–74, 2013.

[16] R. Wimmer and P. Baudisch. Modular and Deformable Touch-Sensitive Surfaces Based on Time Domain Reflectometry. UIST '11, pp. 517–526, 2011.

[17] 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, 56(4):1193–1202, Apr 2015.

[18] 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, pp. 49–52, 2015.