

# MonoTouch : 複数ジェスチャ判別が可能な単一電極タッチセンサ

匿名 太郎\*† 匿名 花子‡ 匿名 次郎§ 匿名 三郎¶ 匿名 四郎|| 匿名 五郎\*†‡§¶

**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. なお, 電極を小型化する場合, 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. 今回, この問題を解決するために, 電極表面に盛り上げ部分を追加した. 電極サイズ, 形状を変えた 4 つの電極条件において被験者実験を行ったところ, 電極を小型化した際に盛り上げ部分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. 本稿においては, MonoTouch の設計, ジェスチャの判別, 判別精度, 考察, およびセンサ形状の適用例を示す.

## 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とタッチパッドは, 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. 一方, 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, 向きによって非対称な感度を持つように面積の異なる 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 1). 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, タップおよび上下左右スワイプといったジェスチャの判別可能な単一電極タッチセンサ「MonoTouch」を製作した. MonoTouch は電極

サイズを小型化すると, 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生じる. これら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がり形状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, 条件を変えた電極ごとの判別精度とその考察, および MonoTouch の適用例を示す.

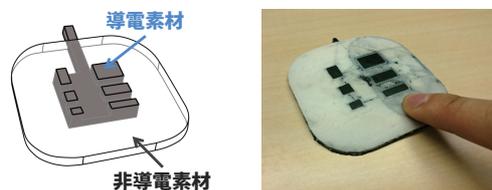


図 1: 製作した MonoTouch

## 2 関連研究

タッチセンサには, 感圧方式 [9, 16], 光学方式 [10, 4], 静電容量方式 [11, 13], 音響方式 [3, 12], ならびに時間領域反射測定方式 [15] 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 [8, 6, 11, 14]. 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し, 消費電力が増加するなどの問題が生じる. これら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できる.

指が個々のタッチセンサにどのように触れているか検出する手法として以下のような方法が挙げられ

Copyright is held by the author(s).

\* 某大学

† 某会社

‡ 某大学 2

§ 某大学 3

¶ 某大学 4

|| 某大学 5

ている。Satoら提案した Touché[13] は、把持状態の識別を単一電極のみを用いた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 [12]。これらは、計測信号を周波数領域にて観測しており、静的な状態の判別を対象としている。提案手法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 [5] も提案されている。この手法は2つのフォトリフレクタを用いて4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 [7]。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った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。本節にて電極パターンの設計方針、および電極の製作を述べる。

#### 3.1 電極パターンの設計方針

タップ、スワイプおよびスワイプの向きを判別するために、我々は以下の2つの要件を満たす電極パターンを考案した。

要件1 タップ、上下スワイプ、左右スワイプにおいて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間、もしくは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回のタップにおいてユーザが導電部に触れる回数は1回である。また、スワイプを行う際は電極パターン周囲の非導電部に触れ、導電部と非導電部に交互に触れるようにセンサに触れたまま任意の方向に指を移動させる。この時、1回のスワイプにおける導電部に触れる回数を左右スワイプの場合は2回、上下スワイプの場合は3回となるように電極パターンを設計することにより、タップ、上下スワイプ、および左右スワイプの判別が可能となる。

[要件2] 要件1において、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応答回数は同じである。この左と右、および上と下の判別を行うために、スワイプを行う際、指が触れる導電部の長さが、スワイプの向きによって非対称になるように設計を行う。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 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。また、後の節にて述べる被験者実験を行うにあたって、4つの電極を作製した。設計した電極パターンを図2に、盛り上げ形状の取り付け位置を図3に、実際に3Dプリントした電極の写真を図4に示す。図4の4つの電極はサイズ条件 (small : 25mm 四方, large : 30mm 四方)、形状条件 (盛り上げの有無) が異なっている。電極条件の一覧を表2に示す。図4a-bは、それぞれ表2の電極条件 A-B に対応している。2つのサイズ条件の図2におけるサイズを表1に示す。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。また上下スワイプを行う際に、図5のように非導電部の間隔が狭くなると電極間に指がまたがるために判別精度が低くなるという予測から、盛り上げの有無を形状条件として設定した。電極の盛り上げ部分は、上下スワイプの際に指が触れる導電部に挟まれた非導電部を0.5mmの高さになるように盛り上げた。図4の電極は全て図1のように、内部の導電部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、印刷機として熱溶融積層方式の3Dプリンタ (FLASHFORGE 社製, Dreamer) を用い、素材として導電性 PLA フィラメントおよび非導電性 PLA フィラメントを用いた。

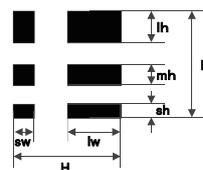


図2: 電極パターンのサイズ



図3: 盛り上げ形状の取り付け位置

表1: 2条件における電極パターンのサイズ (単位:mm)

条件	H	lh	mh	sh	sw	lw
small	25.00	9.00	5.64	4.36	6.00	10.00
large	30.00	9.00	6.00	4.00	6.00	15.00

表 2: 電極条件

	サイズ条件	形状条件
条件 A	large	盛り上げ無
条件 B	large	盛り上げ有
条件 C	small	盛り上げ無
条件 D	small	盛り上げ有

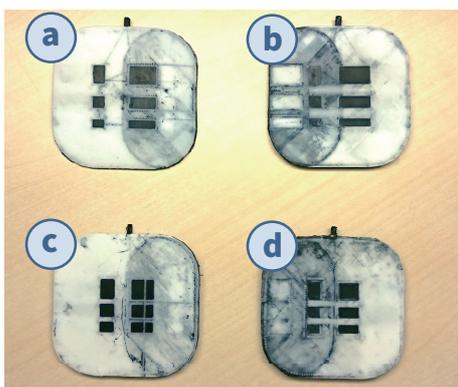


図 4: 作製した電極の一覧

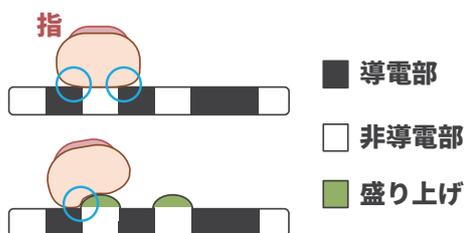


図 5: 指がまたがる問題の盛り上げによる解決

## 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 6 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。

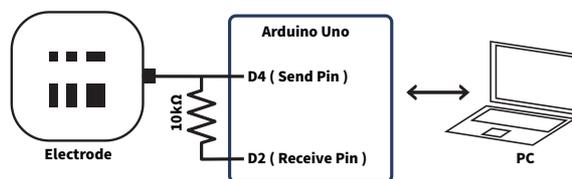


図 6: 判別システムの構成

### 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 7 に示す。図 7 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 7 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用いてジェスチャの判別した。

## 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形状を付与することが有効か調べるため、3.2 節にて述べた 2 つのサイズ条件、2 つの形状条件のものを用いた。

## 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 3 に各被験者の指のサイズを示す。

表 3: 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 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。

我々は実験の準備として実験内容の説明をした後、被験者の右手の人差し指のサイズ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表示内容を説明した。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 つ提示しては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。さらに、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 つのジェスチャが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 (タップおよび上下左右スワイプ) 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 1 セッションずつ行った。したがって, 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。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, 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押さえるため, 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 は電極条件 A → B → C → D の順番に, P5-8 は電極条件 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, 被験者に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

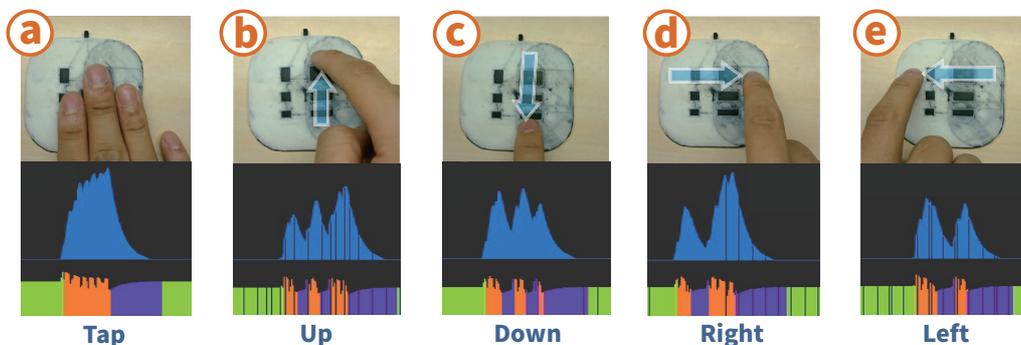


図 7: それぞれのジェスチャを行った際に得られる波形 (上段: ジェスチャの写真, 中段: センサ応答の波形, 下段: 1 フレーム前の静電容量との差分値の波形)

表 4: 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 (条件A)						
実際のジェスチャ	TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT			
	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 (条件B)						
実際のジェスチャ	TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT			
	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 (条件C)						
実際のジェスチャ	TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT			
	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 (条件D)						
実際のジェスチャ	TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT			
	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%	

## 6 実験結果

各電極条件ごとの判別精度を表 4 に示す。また、被験者ごとの各電極条件における正答率および入力速度を表 5 に、表 6 に示す。結果、条件 B の判別精度が最も高く、電極面積を小さくすると判別精度が落ちるという結果を得た。

表 5: 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 6: 被験者ごとの各電極条件における入力速度 (単位: 秒)

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

## 7 考察

表 4 に示す電極条件ごとの混同行列の内訳を見ると、表 4b から条件 B 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 7c

と d の通り、下スワイプと左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、ジェスチャ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 6 の P3, P7 の 1 入力当たりの時間が他の被験者に比べ短くなっていることからわかる。実際に 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 4a と表 4c 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: 5.5mm, large 条件: 7.5mm) が短くなり、指が図 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と考える。

表 4c と表 4d より、盛り上げ形状を電極表面に付与することにより、指のスワイプ方向に盛り上げがある、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、盛り上げ形状を追加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 3 と表 5 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追加することは、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効果がある

ことが分かる。

また、アンケートから盛り上げることにより触覚フィードバックが得られるため、ブラインド操作が可能ではないかという意見を得た。

## 8 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のヘッドホンを用いるユーザは、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例は、電極を3Dプリントできるという特徴を活かし、端末形状に沿ったセンサ搭載のケースを製作できるという案である。端末背面にブラウザの戻る、進むなどを割り当てることにより、Back-of-Device操作[2]に利用できる。



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

## 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の設計を行った。(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。(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ジェスチャの判別が可能であり、かつ電極を小型化する際に盛り上げ形状を追加することにより判別精度が低下する問題が解決されることが示唆された。今後さらに電極形状の検討を行い、判別精度の向上、センサの小型化、および MonoTouch の適用例の設計、製作に取り組む。

## 参考文献

- [1] P. Badger. Capacitive Sensing Library 2015/8/31 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] H. Chris, T. Desney, and M. Dan. Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface. CHI '10, pp. 453–462, 2010.
- [4] H. Chris, B. Hrvoje, and W. Andrew. Omni-Touch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. UIST '11, pp. 441–450, 2011.
- [5] S. Daniel, A. Caroline, C. Olivier, and P. Emmanuel. Controlling Widgets with One Power-up Button. UIST '13, pp. 71–74, 2013.
- [6] J. Gu, S. Heo, J. Han, et al. LongPad: A Touch-Pad using the Entire Area below the Keyboard of a Laptop Computer. CHI '13, pp. 1421–1430, 2013.
- [7] C. Harrison, R. Xiao, et al. Acoustic Barcodes: Passive, Durable and Inexpensive Notched Identification Tags. UIST '12, pp. 563–568, 2012.
- [8] 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.
- [9] R. Ilya and P. Ken. The UnMousePad: An Interpolating Multi-touch Force-sensing Input Pad. SIGGRAPH '09, pp. 65:1–65:9, 2009.
- [10] H. Jefferson. Low-cost Multi-touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection. UIST '05, pp. 115–118, 2005.
- [11] R. Jun. SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces. CHI '02, pp. 113–120, 2002.
- [12] O. Makoto, S. Buntaro, and T. Jiro. Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects using Active Acoustic Sensing. UIST '13, pp. 31–40, 2013.
- [13] S. Munehiko, P. Ivan, and H. Chris. Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects. CHI '12, pp. 483–492, 2012.
- [14] D. Paul and L. Darren. DiamondTouch: A Multi-user Touch Technology. UIST '01, pp. 219–226, 2001.
- [15] W. Raphael and B. Patrick. Modular and Deformable Touch-sensitive Surfaces Based on Time Domain Reflectometry. UIST '11, pp. 517–526, 2011.
- [16] J. Rekimoto and C. Schwesig. PreSenseII: Bi-directional Touch and Pressure Sensing Interactions with Tactile Feedback. CHI EA '06, pp. 1253–1258, 2006.
- [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.