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

多電極中の被タッチ電極ならびにタッチジェスチャ入力を検出可能な単一結線タッチセンサ

鶴田 真也

修士（工学）

(コンピュータサイエンス専攻)

指導教員　志築 文太郎

2017年3月

概要

本論文においては，多電極入力面に対するタッチ入力操作を，静電容量方式を用いたセンシングにより，単一結線のみを用いて検出する手法を新規に開発した．本手法を開発するうえで，ラピッドプロトタイピングにおけるタッチ入力手法において，結線数を減らす，入力可能電極数を増やす，タッチセンサの形状やレイアウトの自由度を高めるという要求を設定した．また本手法について，いくつかのコントローラのラピッドプロトタイピングにおける実用性について実験・考察を行い，発展について議論を行った．

まず，単一結線を用いて多電極入力面に対するタッチ入力操作を検出するという要求をみたすハードウェアを試作し，予備調査を行った．さらに，両面印刷用紙と銀ナノインクを用い，新たにラピッドプロトタイピングの現場において高速に作成可能な，両面印刷キャパシタを開発した．両面印刷キャパシタは，各電極が異なる静電容量をもった多電極入力面を，デザイナが高い自由度の形状にて作成することを支援する．予備調査を通して，印刷キャパシタの印刷面積と，これを人間がタッチした場合の充電時間，つまり静電容量の関係式を導出した．今回の単一結線タッチセンサの実装においては，10 段階程度が実用的な電極数であることがわかり，この最大面積を 1000 mm^2 とするデザインガイドラインを設定した．

また，単一結線された 11 段階のキーを正しく識別できるか，4 段階の単一結線された電極を用いて，4 種類のジェスチャを正しく識別できるか，多電極上におけるホバージェスチャを正しく検出できるかについて，実験を行い，高い精度を得た．以上より，複数種類の入力を識別できるタッチセンサを，結線数と，実装面積を省略しながらにして実現可能であることが示された．

最後に，ラピッドプロトタイピングにおいて本手法を用いた入力面の事例を複数紹介し，本手法の有用性を示した．

以上から，本手法は，ラピッドプロトタイピングにおけるタッチ入力手法において，結線数を減らす，入力可能電極数を増やす，タッチセンサの形状やレイアウトの自由度を高めるという要求を満たした．その結果，ラピッドプロトタイピングという文脈において，本手法の有用性が実証された．

目 次

第 **1** 章　序論 **1**
1.1　背景 1
1.2　目的とアプローチ 2
1.3　本研究の貢献 2
1.4　本論文の構成 3

第 **2** 章　関連研究 **7**
2.1　ラピッドプロトタイピング手法に関する研究 7
2.2　ラピッドプロトタイピングにおける入力手法に関する研究 7
2.3　単一結線によるタッチセンシングに関する研究 9
2.4　導電性インクを用いたキャパシタに関する研究 10
2.5　本研究の位置付け 10

第 **3** 章　アイデアと試作 **11**
3.1　導電性フィラメントの 3D プリントによる静電容量変化 11
3.2　レジスタによる静電容量変化 15
3.2.1　ブレッドボードにおけるプロトタイプ 15
3.2.2　ユニバーサル基板におけるプロトタイプ 17
3.3　キャパシタによる静電容量変化 17
3.3.1　ブレッドボードにおけるプロトタイプ 17
3.3.2　キャパシタの並列接続によるプロトタイプ 19
3.3.3　ピンヘッダによるタッチ電極のプロトタイプ 20
3.3.4　銅箔テープによるタッチ電極のプロトタイプ 20
3.4　チップキャパシタと銅箔テープによる安定化 22
3.5　印刷レジスタによるタッチ電極 22
3.6　印刷キャパシタによるタッチ電極 24
3.7　本章のまとめ 30

第 **4** 章　**RootCap** **31**
4.1　両面印刷キャパシタ 31
4.1.1　使用する機材，素材 33
4.1.2　予備調査: キャパシタンスの測定 33

4.1.3 デザインガイドライン 34
4.2 タッチセンシング回路 38
4.2.1 充電時間計測による静電容量計測のしくみ 40
4.2.2 ノイズ対策と詳細な静電容量変化を観察するための工夫 41
ノイズ対策 41
タッチを行うユーザがアースをとるか否かが静電容量に及ぼす影響 . 42
詳細に静電容量の大小を観察するための工夫 43
本回路における静電容量の計測可能範囲の調査 48
ユーザの姿勢がタッチセンシングに与える影響の調査 51
電極を直接タッチしない場合の調査 51
4.3 実証用アプリケーション 52
4.3.1 印刷テンキー 52
4.3.2 検出ソフトウェア 54
4.4 本章のまとめ 54

第 5 章 評価 56
5.1 実験 1: 多電極検出 56
5.1.1 実験目的・概要 56
5.1.2 セットアップ 56
5.1.3 タスク 57
5.1.4 実験結果 58
5.1.5 考察 58
5.2 実験 2: ジェスチャ検出 60
5.2.1 実験目的・概要 60
5.2.2 セットアップ 60
5.2.3 タスク 62
5.2.4 実験結果 62
5.2.5 考察 63
5.3 実験 3: ホバー検出 63
5.3.1 実験目的・概要 63
5.3.2 セットアップ 63
5.3.3 タスク 64
5.3.4 実験結果 64
5.3.5 考察 64
5.4 本章のまとめ 65

第 6 章 ラピッドプロトタイピングにおけるアプリケーション例 66
6.1 エルゴノミックキーパッド 66
6.2 インタラクティブなオーナメント 66

6.3 自動車や家電のコントロールパネル 66
6.4 建築モデルにおけるタッチ操作面 69
6.5 スライダ 71
6.6 表裏導通 71

第 7 章 議論と今後の発展 73

第 8 章 結論 75

謝辞 76

参考文献 77

著者業績リスト 86

付 録 A 89
A.1 実験依頼書 90
A.2 実験同意書 91
A.3 実験アンケート 92

付 録 B 93
B.1 予備実験用両面印刷キャパシタ (表) 94
B.2 予備実験用両面印刷キャパシタ (裏) 95
B.3 両面印刷キャパシタによるテンキー (表) 96
B.4 両面印刷キャパシタによるテンキー (裏) 97
B.5 両面印刷キャパシタによるジェスチャキー (表) 98
B.6 両面印刷キャパシタによるジェスチャキー (裏) 99
B.7 両面印刷キャパシタによるコントロールパッド (表) 100
B.8 両面印刷キャパシタによるコントロールパッド (裏) 101
B.9 ステアリング表面におけるコントロールパッド (表，裏は省略) 102

図目次

1.1 タッチセンシング IC を搭載した多電極タッチセンサ. 4
1.2 単一結線により単一電極へのタッチ，非タッチを判別可能な静電容量タッチセンサ. 4
1.3 多電極タッチセンサの複雑な配線の例. 5
1.4 本手法 (RootCap) の概要. 6
1.5 異なる静電容量をもつタッチ電極 (左) と，これををタッチした際に発生，観察される静電容量 (右) のイメージ. 6

3.1 電極ごとに静電容量を変更する方法の案．左: 直列接続したレジスタ (抵抗). 右: 直列接続したキャパシタ (コンデンサ). 12
3.2 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ. 13
3.3 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形 (1). 13
3.4 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形 (2). 14
3.5 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形 (3). 14
3.6 ブレッドボード上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ. 15
3.7 ブレッドボード上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形. . . 16
3.8 ユニバーサル基板上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (表). 17
3.9 ユニバーサル基板上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (裏). 18
3.10 キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ. 18
3.11 キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形. 19
3.12 キャパシタの並列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ. 20

3.13 キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したピンヘッダタッチ電極のプロトタイプ (表). 21
3.14 キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したピンヘッダタッチ電極のプロトタイプ (裏). 21
3.15 銅箔テープによるタッチ電極のプロトタイプ. 22
3.16 チップキャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (上). 23
3.17 チップキャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (正面). 23
3.18 チップキャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (裏面配線). 24
3.19 作成した印刷レジスタのパターン (拡大図). 数値は線幅をあらわす. 25
3.20 印刷電極の対によるキャパシタのプロトタイプ. 26
3.21 各印刷電極の対によるキャパシタのプロトタイプの静電容量. 3.20 に対応する. 26
3.22 2 枚の写真用紙の貼り合わせによる印刷キャパシタのプロトタイプ. 27
3.23 1 枚の写真用紙における両面印刷キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ. 28
3.24 両面印刷キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形. 29

4.1 RootCap のハードウェア構成. 32
4.2 両面印刷キャパシタの構造. 32
4.3 自由な形状の両面印刷キャパシタ. 33
4.4 予備調査に用いた両面印刷キャパシタ. 34
4.5 各両面印刷キャパシタのキャパシタンス. 35
4.6 計測回路により測定した，各キャパシタの静電容量. 35
4.7 C_n と C_h の合成キャパシタンス. 37
4.8 理論上の充電時間. 38
4.9 実際のタッチセンシング回路. 39
4.10 タッチセンシング回路を簡略化した回路図. 39
4.11 センシングに使用するパルス. 41
4.12 ハードウェア，ソフトウェア双方のノイズ対策の効果. 左: ノイズ対策なし. 右: ノイズ対策あり. 42
4.13 ユーザがアースをとらずにタッチを行った際の静電容量波形 (増幅なし). . . 44
4.14 ユーザがアースをとりながらタッチを行った際の静電容量波形 (増幅なし). . 44
4.15 ユーザがアースをとらずにタッチを行った際の静電容量波形 (6 倍増幅). . . 45
4.16 ユーザがアースをとりながらタッチを行った際の静電容量波形 (6 倍増幅). . 45
4.17 ユーザがアースをとらずにタッチを行った際の静電容量波形 (11 倍増幅). . . 46
4.18 ユーザがアースをとりながらタッチを行った際の静電容量波形 (11 倍増幅). 46

4.19 閾値電圧を調整する様子．赤のプローブ左側にある 2 つの青色の可変抵抗を，それぞれ充電時用，放電時用の閾値電圧調整に用いる． 47
4.20 閾値とデューティー比を最適化していない場合のタッチ反応．左半分: 非タッチ時．右半分: タッチ時． 49
4.21 閾値とデューティー比を最適化した場合のタッチ反応．左: 非タッチ時．中央: タッチ時．右: アース時． 49
4.22 静電容量の計測可能範囲を調査するために使用した可変キャパシタ． 50
4.23 可変キャパシタを連続的に動かした場合のセンシング回路の応答 (手ブレを含む)． 50
4.24 可変キャパシタを段階的に動かした場合のセンシング回路の応答． 51
4.25 両足による接地がタッチセンシングに与える影響．左: 両足接地時．右: 両足非接地時． 52
4.26 印刷キャパシタによるテンキー．左: 表．右: 裏．裏の印刷部はセンシング回路の単一結線に接続される． 53
4.27 センサ値を受信し，タッチ電極の検出，可視化を行うソフトウェア． 53

5.1 実験の様子． 57
5.2 テンキーにおける離散的なタッチ電極検出の識別精度． 58
5.3 キーごとの識別精度の標準偏差 (被験者ごとのばらつき)． 59
5.4 5 段階リッカート尺度によるアンケート結果． 59
5.5 ジェスチャを行うためのタッチ電極のデザイン． 61
5.6 検出する 4 種類のジェスチャ．上，下，左，右の 4 種類． 61
5.7 4 つのジェスチャを行った際のセンサ値のプロット．左から右に，上，下，左，右のジェスチャを行った際の波形． 62
5.8 スワイプジェスチャ検出の識別精度． 63
5.9 テンキーにおいて離散的なホバージェスチャを 10 回行った際の静電容量波形の例． 64

6.1 エルゴノミックキーパッドの外観． 67
6.2 エルゴノミックキーパッドの印刷キャパシタならびにタッチ電極と配線のパターン． 68
6.3 エルゴノミックキーパッドの使用例 (ショートカットキーパッド)． 68
6.4 インタラクティブなオーナメントの例． 69
6.5 自動車のステアリング上におけるコントロールパネルの例． 69
6.6 自動車のステアリング上におけるコントロールパネルの印刷キャパシタならびにタッチ電極と配線のパターン． 70
6.7 建築モデルのタッチ操作の例． 70
6.8 ステープラー芯による両面貫通の試作 (表)． 72
6.9 ステープラー芯による両面貫通の試作 (裏)． 72

7.1　3 種類のキャパシタによる 6 種類のスワイプジェスチャのイメージ．．．．．．　74

第1章　序論

本論文は，ラピッドプロトタイピングにおいて，省結線，省コストながら高自由度なタッチセンシング面の実現可能性を実証する．本章ではまず，背景としてラピッドプロトタイピング手法とその課題を述べる．次に，本論文の目的とアプローチ，貢献を述べ，最後に本論文の構成について述べる．

1.1　背景

今日，高速な試作サイクルを意味するラピッドプロトタイピングの概念が広く知られるようになってきている．特にマウスなどの入力インタフェースをもつプロダクトを制作する際は，その形状やインタフェースを何度かプロトタイピングしつつ，これが完成のイメージに近いか，実際の使用感が良いかなどを確認しながら完成に近づける手法が有効である．このような繰り返し作業を素早く行うことを，ラピッドプロトタイピングと言う．ラピッドプロトタイピングの現場において，これまでは，筐体やその部品など，機械的性質をもつ要素に対して以下のような造形技法が適用されてきた．例えば，従来からの光造型法 (Stereolithography) [Kod81] や，現在高速に普及している熱溶解積層法 (FDM: Fused Deposition Modeling) などにより，試作品の作成工程において，金型や旋盤を必要としない小規模で高速な制作が可能となっている．

しかし，最終的なプロダクトとインタラクションを行う人間にとっては，入力インタフェースが必要である．インタフェースの制作においては，ボタン，スイッチ，スライダのような伝統的な機械構造をもったデバイスや，タッチセンシング IC を用いたタッチセンサなどを使用することができる．例えば既製品の多電極タッチセンサ (図 **1.1**) は，機械式のスイッチをいくつか半田結線することに比べてプロトタイプへの実装工程が少なく済む場合もあるため，ラピッドプロトタイピングに適した入力インタフェースであると考えられる．またこのように多電極用のタッチセンサ以外にも，マルチタッチに対応したタッチパネル用の IC なども市販されている．これらを用いる場合，多数のタッチ電極を識別する際にその上限がある，タッチパネルの形状がはじめから設計されており後からプロトタイピングを行うデザイナが変更できないなどの課題がある．さらに，スマートフォンのソフトウェアなどを用いてタッチ UI を作成し，これを IoT デバイスと無線接続するといったラピッドプロトタイピング手法が，現在広く親しまれている．この手法では，例えば複雑な形状をもつプロダクトの立体形状や輪郭に沿った自由な形状のタッチセンサを作成することは困難である．

1.2 目的とアプローチ

そこで今回は，自由度の高い立体形状をもつプロダクトのラピッドプロトタイピングにおけるタッチセンシングと，その結線数の省略に注目した．今回の研究における目標は，ラピッドプロトタイピングを行うデザイナに対し，平面，曲面，さらにはフレキシブルな面における付加的なタッチセンシング手法を提供することである．ラピッドプロトタイピングにおける自由度の高い立体形状のタッチセンサに注目した場合，インタフェースのレイアウトや配線の取り回しなどを考慮し，タッチセンサ自体も素早く自作したいという要求がうまれる．これまで，[KHC+13, OGT+13, GSO+14, OSOHS15, OWS14, KM15, KG15] のように，プロトタイピングにおけるフレキシブルな形状に適用可能なタッチセンシング技術が研究されてきた．これらのような静電容量計測などによる手法を踏まえた上で，ラピッドプロトタイピングにおける実装工程を省略しつつ，入力語彙を拡張するために，入力可能なタッチ電極の個数，面積，形状など，入力のバリエーションを増やしたいと考えた．しかし，通常の平面中のタッチ点が検出可能な静電容量式のタッチセンサは，内部に多数の網目状の結線をもち，それゆえこれらに流す信号を，マルチプレクサによって高速に切り替える必要がある．このような構造とロジックは高速な自作が難しく，また自由な形状を実現することも困難である．ここで 図 **1.2** のように最も単純な構成の単一電極ならば，センサ基板とセンサ電極を単一の導線のみによって結線可能であるため，電極数が少なければ結線数が少なく済む．図 **1.2** は左側が，充電時間方式による静電容量計測回路を示しており，右側が，ユーザがタッチを行うタッチ電極を示している．R は静電容量計測回路の感度を調整するためのレジスタ (抵抗) であり，C はユーザがもつ静電容量である．静電容量計測回路は，タッチ電極と，タッチしたユーザに対する充電を行う矩形波の電圧波形を send ピンから送出する．ユーザがタッチ電極に対してタッチを行っていない際は，矩形波がほぼ送出時そのままの形状を保ったまま，recieve ピンにて観察される．ユーザがタッチ電極に対してタッチを行うと，ユーザがもつ静電容量に対して矩形波が充電されるため，充電にかかった時間だけ，recieve にて観察される矩形波の立ち上がりが遅れ，なだらかな波形に変化する．このように，ユーザのタッチをきっかけとして変化する電圧波形を観察することにより，タッチ電極へのタッチ，非タッチを検出することができることが知られている．しかし，複数のタッチ電極をもつタッチセンサにおいては，その電極の数だけ結線も必要となり，配線が煩雑になる，実装面積をとるなどの課題が存在する (図 **1.3**)．そこで，ラピッドプロトタイピングにおける自作可能なタッチセンサについて，以下の要求を想定した．

- タッチ電極の数を多く保ったまま，タッチ電極とセンシング回路間の結線数を減らす．
- タッチ電極の形状とレイアウトの自由度を高める．

1.3 本研究の貢献

これをふまえ，単一結線という特性を保ちつつも，入力可能なタッチ電極数を増やし，多電極中のそれぞれの電極へのタッチ操作を識別可能とする手法である，RootCap を開発した

(図 **1.4**)．これを実現するための鍵は，静電容量方式の接近センサなどにおいて観察されるような，静電容量の大小の変化に注目することである．具体的には，単一結線から分岐する特殊な多電極を作成し，それぞれの電極をタッチした際に，異なる静電容量が観察できるよう簡易な工夫を加え，電極にタッチした際の静電容量の大小を観察して電極を識別する (図 **1.5**)．また，本実装においては，ユーザが明確なグラウンドを取らない不安定な日常のタッチ環境を想定している．今回の貢献は以下である．

1. 単一結線のみにより多電極が識別可能なタッチセンサ回路を開発した．
2. デザイナが電極部分を簡単に作成するために，家庭用プリンタを用いた銀ナノインクの両面印刷によるコンデンサを新規に開発した．
3. 以上を用い，多電極中のタッチ電極の識別，多電極を用いたジェスチャ識別，多電極上におけるホバージェスチャの精度評価を行い，高い精度を得た．
4. またリッカート尺度による質的評価を行い，高いユーザ評価を得た．

以上をもって，ラピッドプロトタイピングにおいて本手法を用いることにより，タッチ電極の数を多く保ったままタッチ電極とセンシング回路間の結線数を減らし，タッチ電極の形状とレイアウトの自由度を高めることが可能であると実証した．

1.4 本論文の構成

本章以降の本論文の構成は次のとおりである．第 2 章では，関連研究と課題，本研究との差異を紹介することにより，本研究の位置づけを述べる．第 3 章では，本研究の目的を実現するためのアイデアと，プロトタイプを紹介する．第 4 章では，プロトタイプをもとに作成したツールキットである RootCap の紹介とその実装，実証用アプリケーションを述べる．第 5 章では，RootCap の実用可能性を検証する被験者実験について述べる．第 6 章では，そのツールキットを用いて作成したいくつかのプロトタイプを紹介することにより，提案手法の適用例を述べる．第 7 章では，本研究における議論と今後の発展について述べる．第 8 章にて結論を述べる．

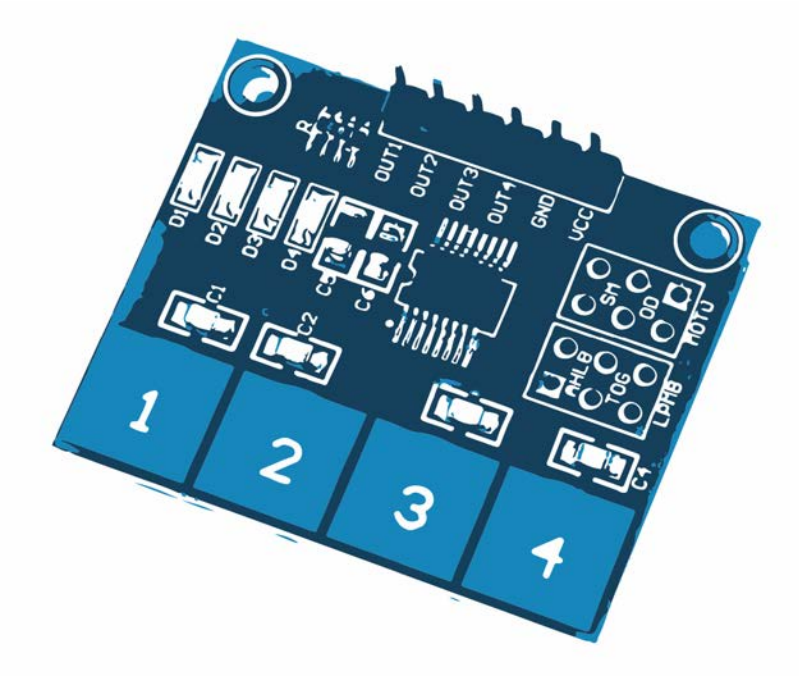


図 1.1: タッチセンシング IC を搭載した多電極タッチセンサ.

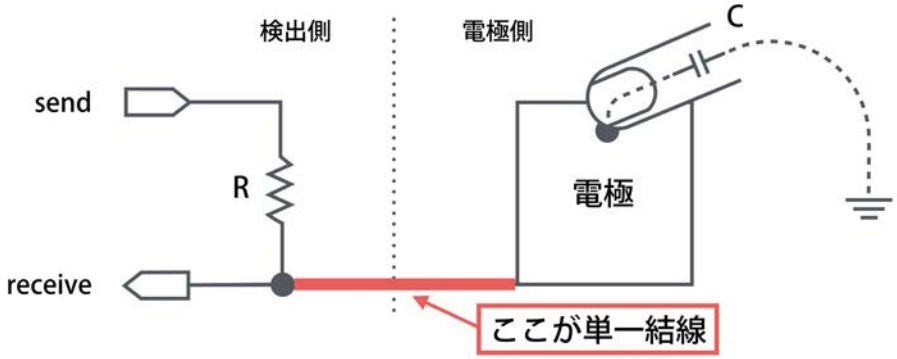


図 1.2: 単一結線により単一電極へのタッチ，非タッチを判別可能な静電容量タッチセンサ.

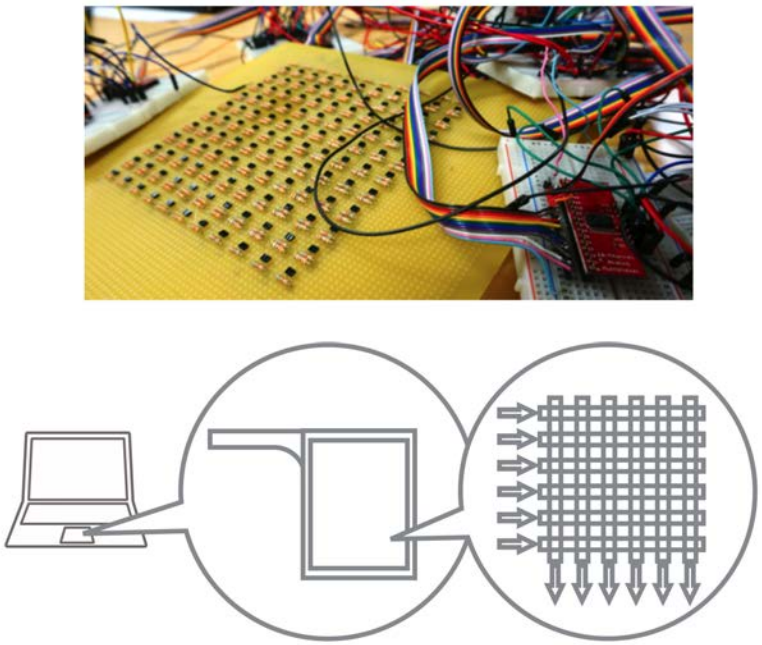


図 1.3: 多電極タッチセンサの複雑な配線の例.

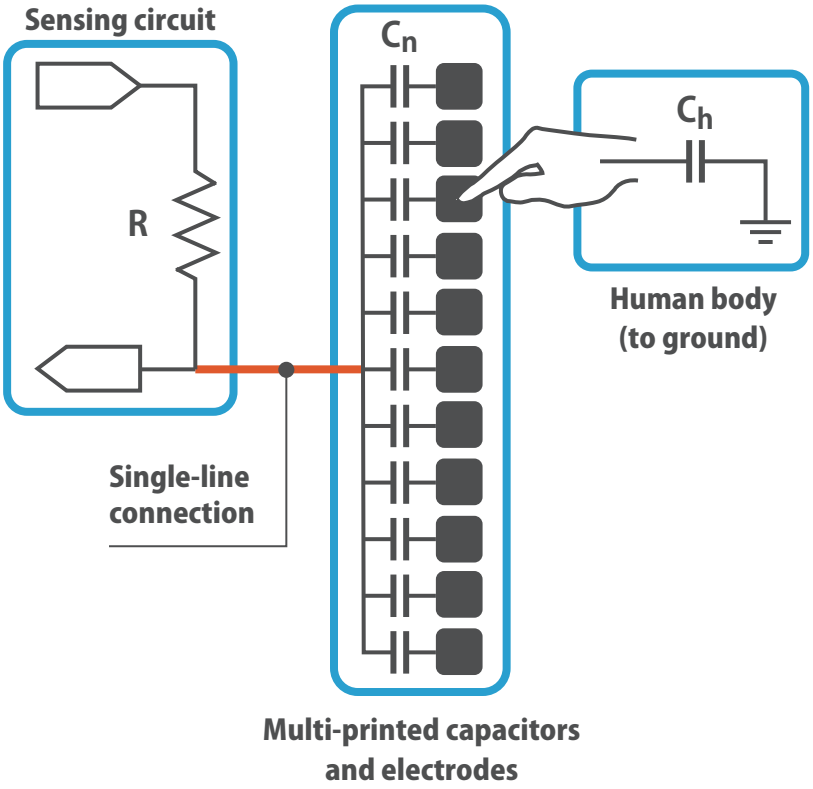


図 1.4: 本手法 (RootCap) の概要.

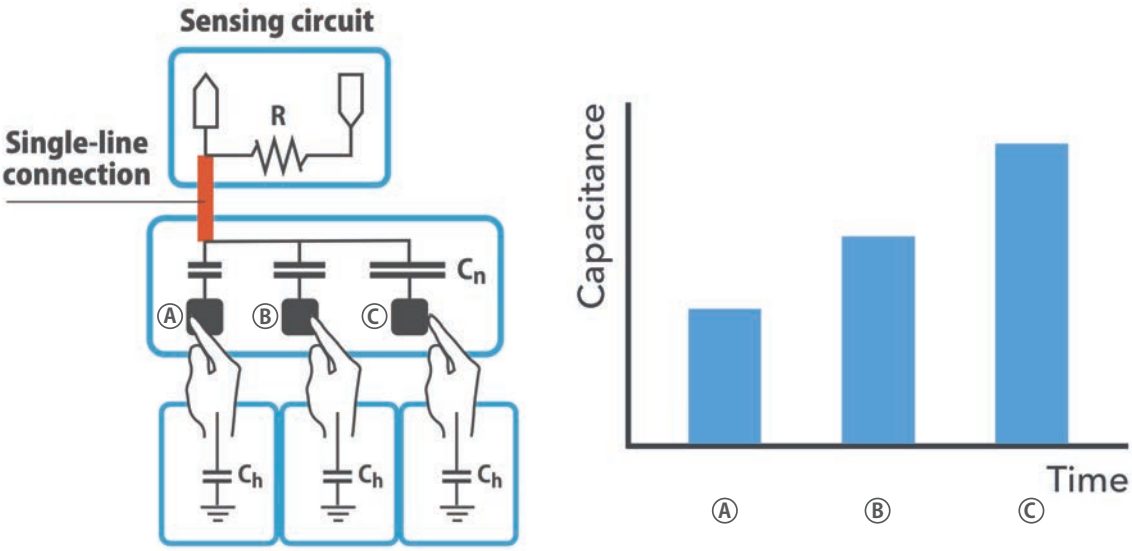


図 1.5: 異なる静電容量をもつタッチ電極 (左) と，これををタッチした際に発生，観察される静電容量 (右) のイメージ.

第2章　関連研究

本章では，本研究に関連する研究について述べる．本研究は，ラピッドプロトタイピングにおいて省結線かつ省コストながら，高自由度な付加的タッチセンシング面を実現する手法を提案するものである．よって，まずラピッドプロトタイピング手法に関する研究を述べ，つづいて，ラピッドプロトタイピングにおける入力手法に関する研究，単一結線によるタッチセンシングに関する研究，導電性インクを用いたキャパシタに関する研究を紹介する．また最後に，本研究の位置付けについて述べる．

2.1　ラピッドプロトタイピング手法に関する研究

ラピッドプロトタイピングとは，製品開発などにおいて，試作品の制作 (プロトタイピング) を，高速に最小限の工程で行うことである．そのため，これら試作品の作成工程において，ソフトウェアの場合は最小限の UI (ユーザインターフェース) のレイアウトを設計したり，ハードウェアにおいては金型や旋盤を必要としない小規模かつ高速な制作のためのアプローチがとられている．例えばソフトウェア開発においては，UI の実際の使用感を確認するために，紙に UI を描いたパーツを組み合わせて 画面レイアウトなどを作成するペーパープロトタイピングや，これをソフトウェア上で行う手法がとられる．ハードウェア開発においては，例えば，光造型法 (Stereolithography) [Kod81] は光の照射によって硬化する樹脂を用い，目的の構造を得る手法が用いられる．また，熱溶解積層法 (FDM) という，熱によって融解させた樹脂を，細い糸状にして積層することで，目的の構造を得る方法も用いられる．後者は 3D プリンタとして広く普及している．特にハードウェア開発における上記のような造形技法は，プロダクトの筐体やその部品など，機械的性質をもつ要素に対して適用されてきた．我々が想定するラピッドプロトタイピング環境においても，筐体などの作成にはこのような手法を含むこととする．

2.2　ラピッドプロトタイピングにおける入力手法に関する研究

以上ではラピッドプロトタイピングにおける筐体の作成手法について述べた．ラピッドプロトタイピングを行うデザイナにとって，そのユーザビリティを繰り返しテストすることは重要である．そのため，数多くのラピッドプロトタイピングにおける入力手法に関する研究が行われており，特にタッチセンシング手法については集中的に取り組まれている．

Arduino [LS] や mbed [AN] は，マイクロコントローラにあらかじめ備え付けの多数の IO を実装した，入出力を必要とするフィジカルなプロトタイピング向けのプラットフォームである．このようなフィジカルコンピューティング環境や，ソフトウェアにおける UI プロトタイピングの手法を用いて開発された，ユーザの入力やユーザへの出力機能をもつプロトタイピング向けの手法として，[CS12, GF01, HKB+06, VSH+12, Bde09, SON, RMMH+09, HAMK07, FT12, HM06, SLO+12, SKW+11, LSFI13, HH08, 宮田 14, KSK01, CFK+04, SXG10, SBSo12, HV12, CH09, GHdJ15, WLB+15, SZH12, SVGS07] などが開発されている．例えば，Makey Makey [CS12] は，様々な日常の物体をタッチ入力インタフェースにする手法である．導線を用い，Makey Makey のハードウェアが備えているいくつかの接続端子と，既存の導電性物体を接続すると，それだけで，その物体をタッチ入力インタフェースとして使用することが可能になる．入力インタフェースのデザイナは，ハードウェアの詳細を知ることなく，ラピッドプロトタイピングにおける入力インタフェースの開発に専念することができる．このようなツールキットやプラットフォームを用いることにより，ラピッドプロトタイピングを行う際，ハードウェアのロジックよりも，インタフェースの実装に集中することができる．

また，特に実世界の物体に対する操作とソフトウェア上の GUI とを対応づけるという課題は，Tangible User Interface (TUI) の分野において多く研究されている [Ish08, LCC+13, CMRB12, WWJ+09, WHZ+06, 大江 13, CAMB13, HM06, BVG08, GB02, HXSH14, LJB15, RA00, AR06, KLLL04, GPHW+14, GPBKK13]．例えば，Tangible Tiles [WHZ+06] は，机上にて AR マーカの添付されたタイルを並べ，プロジェクタ及びカメラを用いて表示情報を操作する研究である．AR マーカをカメラにより撮影することにより，タイルの座標，方向を認識し，プロジェクタによりこれに合わせるかたちで映像を投影する．ユーザは机上においてタイルを様々に動かすことにより，情報の操作を行う．同様に CapStones and ZebraWidgets [CMRB12] は，静電容量方式のタッチパネル上にて積み操作が可能なブロック，ダイヤル，スライダを提案した研究である．

Touché [SPH12] は導電性の物体にタッチ入力機能を付与する技術である．まず対象物体に対してセンサからの導線を添付することにより，電流を与え，このインピーダンスを観察する．ユーザによるタッチによりこのインピーダンスがどのように変化するかを手がかりに，機械学習を用いてタッチを識別する．動的ジェスチャはセンシングの対象ではないが，我々の手法はこれを可能とする点で異なる．また，Touch & Activate [OST13], Acoustruments [LBHH15] は，音響を用いる上記と似たタッチセンシング技術である．音響を用いることにより，導電物質以外の物体にもタッチ機能を付与することができる．[SPH12] と同様に，動的タッチジェスチャはセンシングの対象ではないが，我々の手法はこれを可能とする点で以上の研究とは異なる．

また，タッチ電極として，手軽に作成可能な銀ナノインク印刷を用いる手法も研究されている．銀ナノインクの紙面印刷によりタッチ部位を作成することは，例えばガラスエポキシ基板などを用いたタッチ電極と比較し，立体形状に対してフレキシブルであること，タッチ部位の形状の自由度が高いという特徴がある．また，スマートホンなどに搭載されている既製のタッチセンサを，入力インタフェースのプロトタイピング目的で用いることと比較して

も，自由度の高い形状の入力面を作成できるという利点がある．

Instant Inkjet Circuits [KHC+13] は，銀ナノインクを家庭用のプリンタによって印刷することにより，電極や電子回路，タッチセンサなどを作成する技術である．このような印刷電極を用いたラピッドプロトタイピングにおける入力手法がいくつか研究されている．Karataş ら [KG15] は，銀ナノインクによって，抵抗と，タッチによって短絡されるスイッチを印刷したコントローラを作成した．この印刷回路は，全体で複数段階の分圧回路になっており，分圧回路の GND に落ちる側が印刷スイッチによって絶縁されている．ユーザは，センシング回路に接続されたこのコントローラのいずれかの印刷スイッチに触れて，これを短絡させる．これにより，実際に分圧された電圧がセンシング回路において観察され，ユーザがどの印刷スイッチをタッチしたかを識別することができる．この手法では複数の電極とセンサ回路をつなぐために，結線が 2 本必要である．また普段は絶縁されており，ユーザのタッチによって短絡されるような形状のスイッチを構成する必要がある．我々の手法では，結線は 1 本であり，タッチする部位の形状は自由である点において，以上とは異なる．

また，タッチセンサとしてやこれを用いたインタラクション手法として，静電容量方式 [Rek02, DL01, ZSP+95, GPBB+13, GPHW+14] が挙げられる．静電容量方式の特徴として，センサ回路とタッチ電極とをつなぐ結線が，最低では 1 本でよいという点が挙げられる．これをふまえて，銀ナノインクやプリント基板，導電性フィラメントをタッチ電極とした，静電容量方式のタッチセンサがいくつか研究されている [KHC+13, OGT+13, GSO+14, OSOHS15, OWS14, KM15, SZH12, QB10, KPFS13, SKB+15, MJB+13, HV11]．例えば Instant Inkjet Circuits [KHC+13] は，銀ナノ印刷した櫛形キャパシタを使った静電容量タッチセンシングを，2 本の結線により行っている．また，Olberding ら [OGT+13, OWS14, OSOHS15] は，銀ナノインクや発光するインクを用いたプロトタイピングにおいて，この印刷面をタッチセンサにする試みを行っている．Extension Sticker [KM15] では，銀ナノによる複数のラインストリップを隣同士に並べて印刷し，これを静電容量式のディスプレイに貼り付けることにより，画面外への操作の拡張を行っている．以上のような先行事例をふまえたうえで，我々は，単一結線のみで多電極や動的ジェスチャを識別することに注力した．

2.3 単一結線によるタッチセンシングに関する研究

単一結線によるタッチやジェスチャ検出についても，多くの研究が行われている．Wimmer ら [WB11] は，電気が流れる導線へのタッチによって起こる電気の反射を観察する Time Domain Reflectometry (TDR) を用い，導線中のタッチ点を検出した．必要な結線は 1 本または 2 本であり，複数のタッチ点も検出できる．[KHC+13] は，ヒルベルト曲線 (Hilbert pattern) をタッチ電極とし，Wimmer らの手法 [WB11] を銀ナノインクで印刷した電極において再現している．しかし，これらに用いられるリフレクトメータやネットワークアナライザは高価で場所を取り，センシング処理も複雑である．今回の手法は，静電容量タッチセンサにおいて，静電容量の大小を用いたり，タッチ電極の識別を行っており，高価で重厚な計測機器を使用せず，また接触以外の動的ジェスチャが可能である点で異なる．

Manabe ら [真鍋 15, MI14] は，露出部が 2 つある単一の電極とセンサ回路のみを用いて，電極に対する左右スワイプと，スワイプした指の本数を識別する手法を提案した．タッチのセンシングには静電容量方式を用いており，結線数は 1 本である．今回の研究においては，この手法で用いられている静電容量センシング回路を参考にした．また，入力可能なジェスチャの種類を拡張し，ジェスチャのみならず，複数の電極からタッチしている電極を識別可能としている点が異なる．Takada [TST16] らは，Manabe らの手法 [真鍋 15, MI14] を拡張し，電極の形状に工夫を加えた．その結果，結線数は 1 本のまま，動的なスワイプジェスチャ4 種類，タップジェスチャ1 種類を識別することを可能とした．今回の研究は，タッチしている電極の識別も研究対象としている点で異なる．

2.4 導電性インクを用いたキャパシタに関する研究

銀ナノインクの印刷技術を用いてキャパシタ (コンデンサ) を作成するアイデアや，銀ナノインクの両面印刷に関するアイデアを示した研究には以下がある．[KHC+13] は，静電容量タッチセンサをつくるため，印刷用紙の片面に櫛形のキャパシタを作成した．我々は，銀ナノインクによるキャパシタを両面印刷によって作成することにより，櫛形キャパシタと比較し，櫛形以外の形状でも印刷キャパシタが作成可能であるというデザインの自由度の向上や，インクジェットによる印刷ズレを発生させないことによる印刷安定性の改善を実現した．Ta ら [TFN+15] や Olberding ら [OWS14] は，銀ナノインクを両面印刷することを試している．我々は，銀ナノインクの両面印刷を，キャパシタを作成するという新しい目的で使用した．

2.5 本研究の位置付け

今回は，自由な形状をもつプロダクトのラピッドプロトタイピングにおけるタッチセンシングと結線数の省略に注目した．今回の研究における目標は，ラピッドプロトタイピングを行うデザイナに対し，平面，曲面，さらにはフレキシブルな面における付加的なタッチセンシング手法を提供することである．ラピッドプロトタイピングにおける自由な形状のタッチセンサに注目した場合，インタフェースのレイアウトや配線の取り回しなどを考慮し，タッチセンサ自体も素早く自作したいという要求がうまれる．以上に挙げたような研究ををふまえた上で，我々は，入力可能な箇所の個数，面積，形状など，入力のバリエーションを増やしたいと考えた．そのため，構造の簡易な静電容量方式のタッチセンサに注目した．複数のタッチ電極をもつタッチセンサにおいては，その電極の数だけ結線も必要となり，配線が煩雑になる，実装面積をとるなどの課題が存在した．単一結線という特性を保ちつつも，入力可能な電極数を増やし，多電極中のそれぞれの電極へのタッチ操作を識別可能とする手法を開発した．

第3章　アイデアと試作

本研究は，多電極を単一結線にまとめ，各電極をタッチした際に単一結線から観察される静電容量の変化のみを用いて，各電極へのタッチの識別や，タッチを組み合わせたジェスチャの検出，多電極に対するホバージェスチャの検出を実現する．このためには，ユーザがタッチを行った際に異なる静電容量が観察されるような電極の設計と作成が重要である．はじめのアイデアとして，図 **1.5**，図 **3.1** のように，レジスタ (抵抗)，キャパシタ (コンデンサ) を用いて，単一結線にて接続された多電極において，それぞれの電極にタッチした際に観察される静電容量を変更する方法が考えられる．

本研究の実現性を検証するため，まず，電極間の抵抗値を変更する事により電極がタッチされた際の静電容量を変更する手法を検討した．この手法においては，導電性フィラメントを用い 3D プリントした多電極，ならびに，受動素子を用いた多電極のプロトタイプを作成した．次に，電極間の静電容量を変更する事により電極がタッチされた際の静電容量を変更する手法を検討した．この手法においては，受動素子を用いた多電極のプロトタイプを作成した．その後，さらに手軽に電極を作成するため，銀ナノインクの印刷技術を用いたレジスタ，キャパシタ，タッチ電極の設計方法について検討を行った．

3.1　導電性フィラメントの 3D プリントによる静電容量変化

ラピッドプロトタイピングにおいて，プロトタイプの筐体の作成と同時に入力インタフェースを組み込んで作成することができれば，実装工程を省略することができると考えられる．そこで，プロトタイプの筐体作成に用いられることが多い 3D プリンタを用い，各電極が異なる静電容量を示す多電極が作成できるか試作を行った．3D プリントを活用することにより，筐体の作成と，この表面に位置する入力インタフェースの作成を同時に行うことが可能になると考えられる．3D プリントを行う際，非導電性フィラメントと導電性フィラメントの 2 種類のフィラメントを同時に印刷する 2 色成型技術を用い，導電性フィラメントによりプリントされる各電極の直径を非露出部分にて変更することにより，露出部分から測定電極までの抵抗値を変更することができると考えた．この考えに基づき，試作電極 (図 **3.2**) を作成した．左上から時計回りに試作 1, 試作 2, 試作 3, 試作 4 とする．試作 1, 2 に関しては，プリント過程 での不具合に起因する内部での絶縁により，正しく導通しない部分が多かったため今回は除外した．そこで，試作 3, 4 それぞれに対してタッチと静電容量計測を行い，静電容量計測の様子を 図 **3.3** から 図 **3.5** に示す．図中の上から 3 種類のプロットについて，横軸は時間軸，縦軸は静電容量を示し，プロット位置が高いほど静電容量が大きいことを示す．上から順に

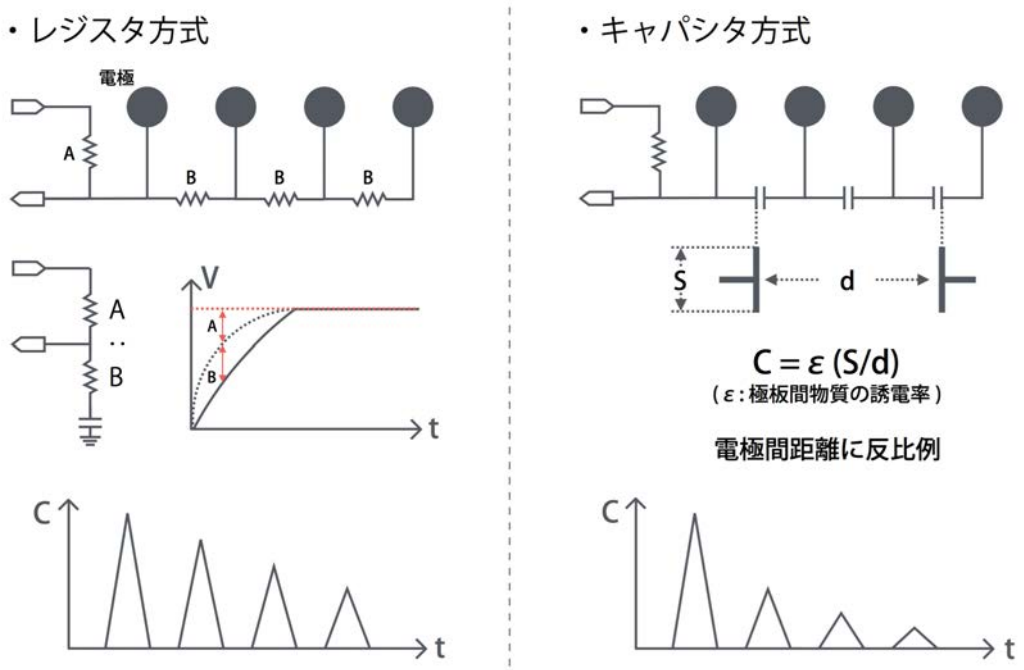


図 3.1: 電極ごとに静電容量を変更する方法の案．左: 直列接続したレジスタ (抵抗)．右: 直列接続したキャパシタ (コンデンサ).

静電容量の点描，フィル，線描である．図中の最下段のプロットは，静電容量の変化量 (微分) をあらわす.

図 **3.3** における波形は，試作 3 の各電極を自由な順番で触っていった場合である．タッチを行った際に，紫色の波形が立ち上がることがプロットされている．波形の高さがあまり変化し ておらず，所々に間欠もみられる．これは，電極間の抵抗値の差を上手く印刷出力として表現できなかったり，内部にて本来導通しているべき部分が絶縁されているなどの不具合によるものである.

図 **3.4** における波形は，試作 4 の各電極を左上から順番に触っていった場合である．それぞれほんの少しであるが静電容量の差が認められる.

また 図 **3.5** における波形は，先とは別の環境において試作 4 の電極を同様にタッチした場合である．図 **3.4** と比較し静電容量の値が大きくなり，またその差もより明確に見て取ることができるようになっている．以上から，導電性フィラメントと非導電性フィラメントの 2 色成型を用いてタッチ電極を作成した場合，プリント時の内部による導通が安定しない，導通具合の差が大きいものと小さいものの偏りが激しい，といった理由により，静電容量が安定しづらいことが明らかになった.

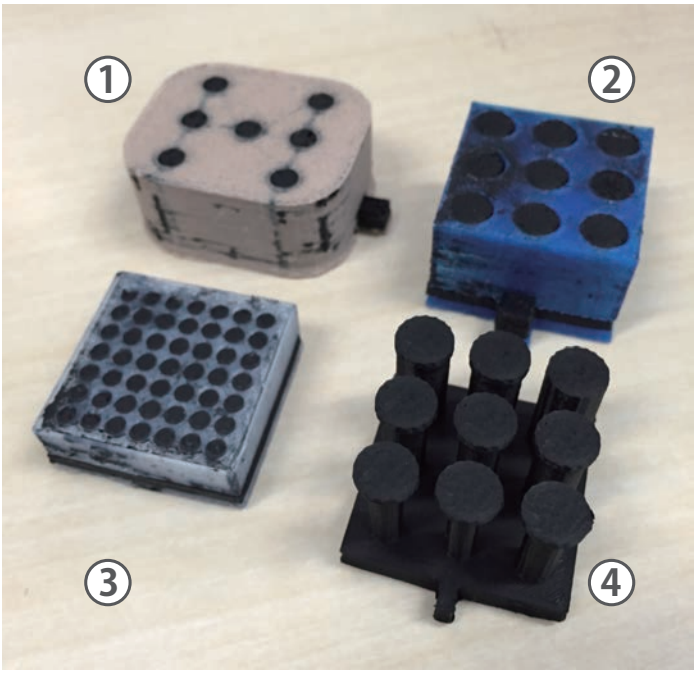


図 3.2: 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ.

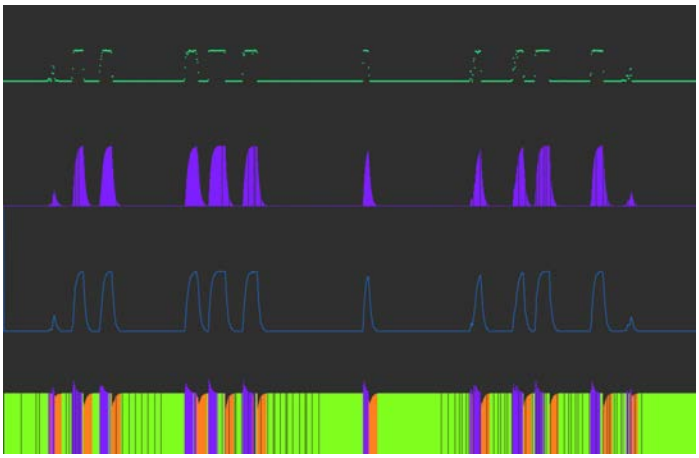


図 3.3: 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形 (1).

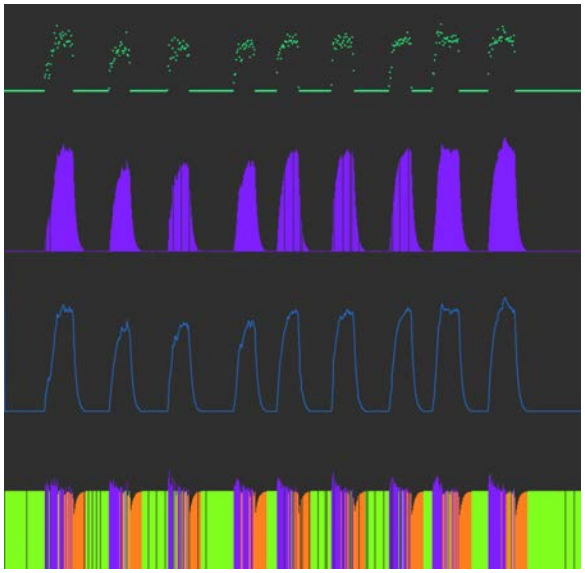


図 3.4: 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形 (2).

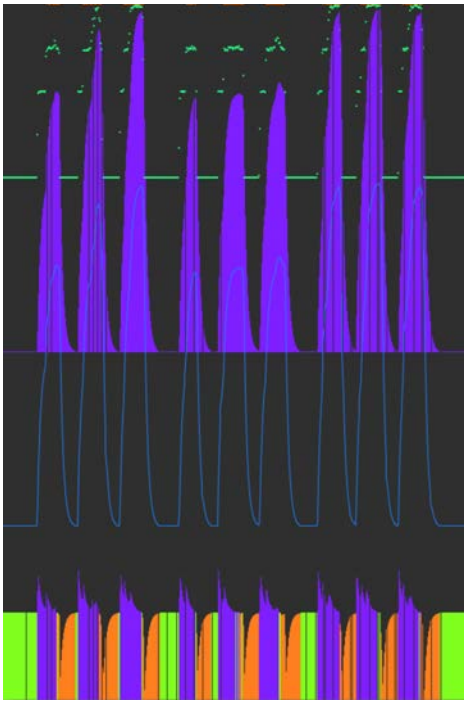


図 3.5: 導電性フィラメントの 3D プリントにより異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形 (3).

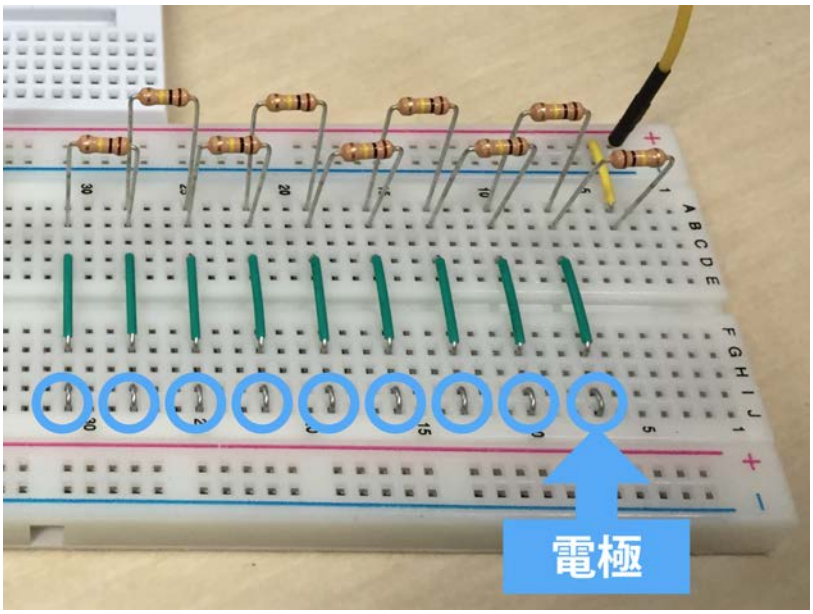


図 3.6: ブレッドボード上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ.

3.2 レジスタによる静電容量変化

3.1 節における実験により，3D プリントではその精度の問題もあり，狙った抵抗値の電極を印刷することが困難であることがわかった．そのため，波形の高さからジェスチャ識別を行うための基本的な実験が困難になっていた．これに対応するため，多電極間にレジスタを挿入することにより，電極間に静電容量の差異を作り出す手法の試作を行った．

3.2.1 ブレッドボードにおけるプロトタイプ

これに対応するため，一旦 3D プリントからは離れ，より構造的に単純かつ精度の向上を期待できる作成方法として，ブレッドボード，炭素皮膜抵抗，ジャンパワイヤを用いた実装を行った．今回試作したものは 9 電極となっており，その外観と構成は 図 **3.6** の通りである．静電容量測定のための単一結線 (図 **3.6** 右上黄色のジャンパワイヤ) に対し，100KΩ 抵抗が直列で 9 個接続されており，それぞれのレジスタの接続点からタッチ電極用のジャンパワイヤが分岐している．これにより，静電容量測定のための単一結線から見た各タッチ電極までのレジスタンスが，100KΩ, 200KΩ, 300KΩ, ..., 900KΩ まで変化するという仕組みである．

これらの電極を，静電容量測定のための単一結線から近い順にタッチした結果が 図 **3.7** である．電極間にレジスタを挿入することにより，電極間に静電容量の差異を作り出せることが観察された．

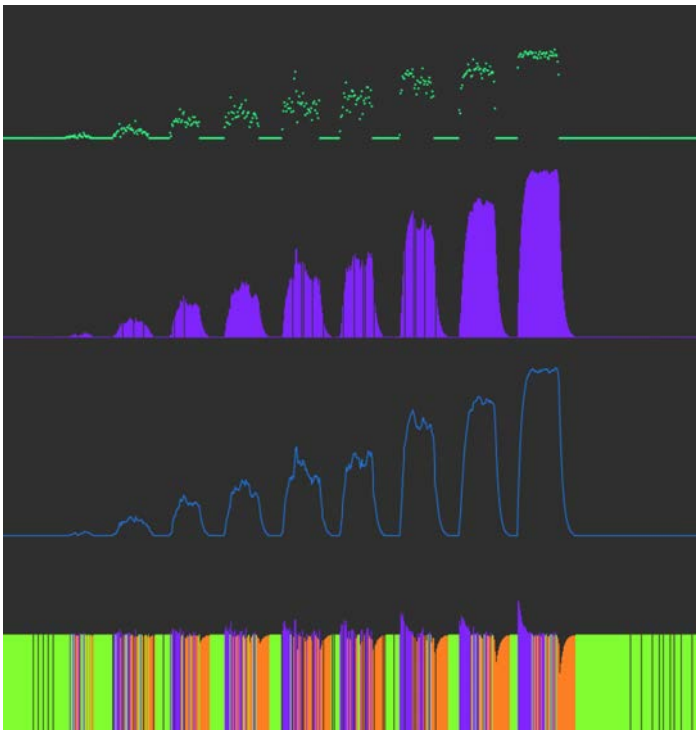


図 3.7: ブレッドボード上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形.

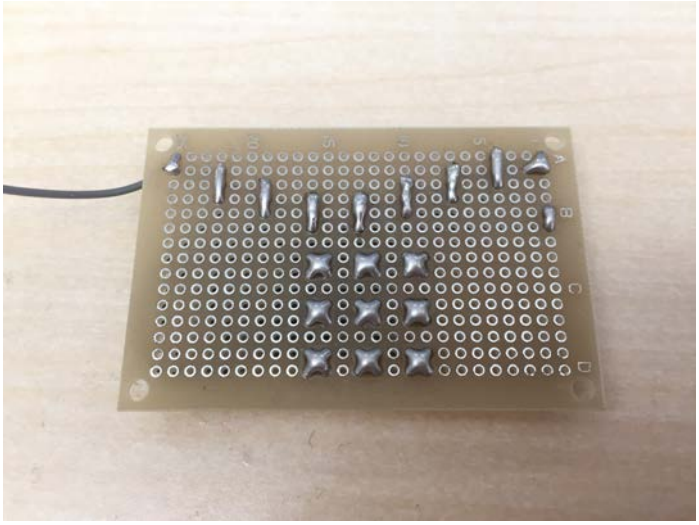


図 3.8: ユニバーサル基板上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (表).

3.2.2　ユニバーサル基板におけるプロトタイプ

受動素子の固定化とタッチ電極の大型化によりる静電容量の更なる安定性の向上を見込み，ユニバーサル基板，炭素皮膜抵抗とはんだ，リード線を用いた実装を行った．今回試作したものは 9 電極となっており，その外観と構成は 図 **3.8**, 図 **3.9** の通りである．図 **3.8** の基板中央部にみられる，正方形に整列した 9 つの電極が，タッチ電極である．静電容量測定のための単一電極に対し，10KΩ 抵抗が直列で 9 個接続されており，それぞれの抵抗の接続点からタッチ電極用のリード線が分岐している．これにより，測定電極から見たタッチ電極までの抵抗値が，10KΩ, 20KΩ, 30KΩ, ..., 90KΩ まで変化するという仕組みである．

これらの電極をタッチした結果，図 **3.7** とほぼ同様の波形が観察された．しかし，山形の波形頂上にみられる高周波のノイズが減衰することはなく，次にキャパシタを用いた手法を検討した．

3.3　キャパシタによる静電容量変化

多電極間にキャパシタを挿入することにより，電極間に静電容量の差異を作り出す手法の試作を行った．

3.3.1　ブレッドボードにおけるプロトタイプ

ブレッドボード，積層セラミックキャパシタ，ジャンパワイヤを用いた実装を行った．今回試作したものは 9 電極となっており，その外観と構成は 図 **3.10** の通りである．静電容量測定

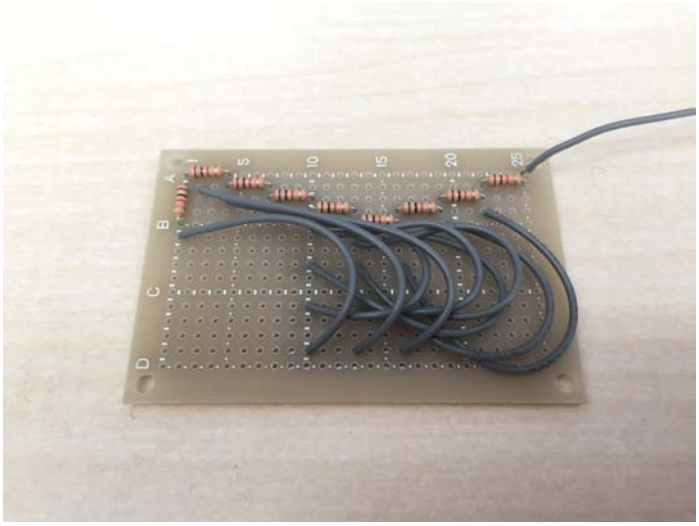


図 3.9: ユニバーサル基板上におけるレジスタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (裏).

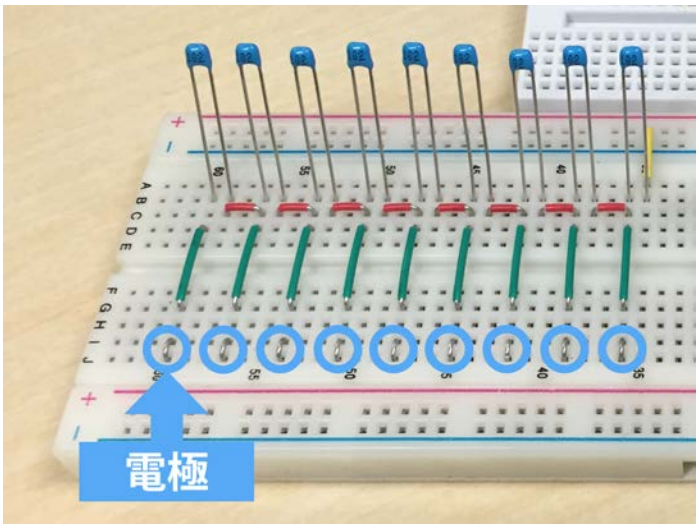


図 3.10: キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ.

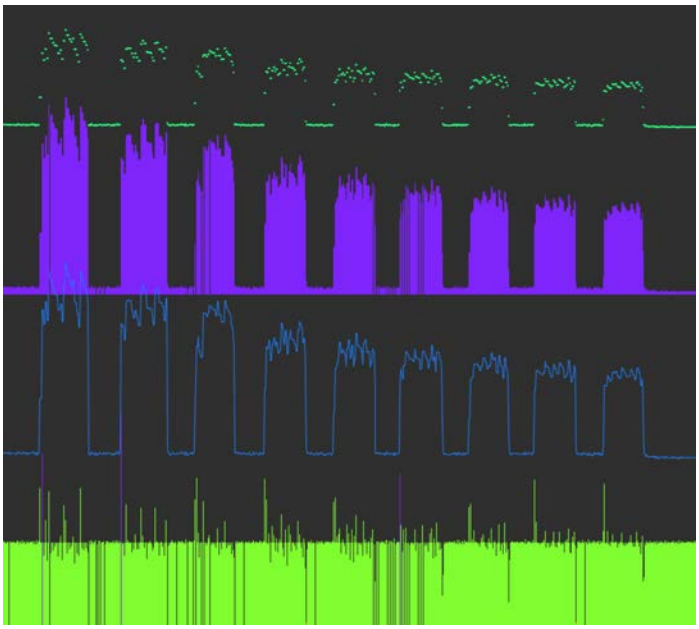


図 3.11: キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形.

のための単一電極に対し，10nF キャパシタが直列で 9 個接続されており，それぞれのキャパシタの接続点からタッチ電極用のジャンパワイヤが分岐している．これにより，測定電極から見たタッチ電極までのキャパシタンスが，減少方向に変化するという仕組みである．

これらの電極を，静電容量測定のための単一電極から近い順にタッチした結果が 図 **3.11** である．電極間にキャパシタを挿入することにより，電極間に静電容量の差異を作り出せることが観察された．

3.3.2 キャパシタの並列接続によるプロトタイプ

以上までの試作をふまえると，レジスタやキャパシタを直列に増やし静電容量を減らす方向に変化させると，電極数の上限が限られることが予測される．なぜなら，観測される静電容量が減ってゆくと，いずれは静電容量がゼロになり，それ以上静電容量の種類を増やすことができなくなってしまうからである．そこで，個々の電極におけるキャパシタを並列に増やしつつ，これらを単一結線に対して接続することにより，電極数に従って静電容量を増加させる方向に変化させることを検討した (図 **3.12**)．電極数は 8 個とした．

静電容量の小さい方から順番に電極をタッチしていくと，個々の電極の静電容量は増加していくものの，中程の電極以上は静電容量が頭打ちになってしまった．よってこの手法は一旦保留とした．

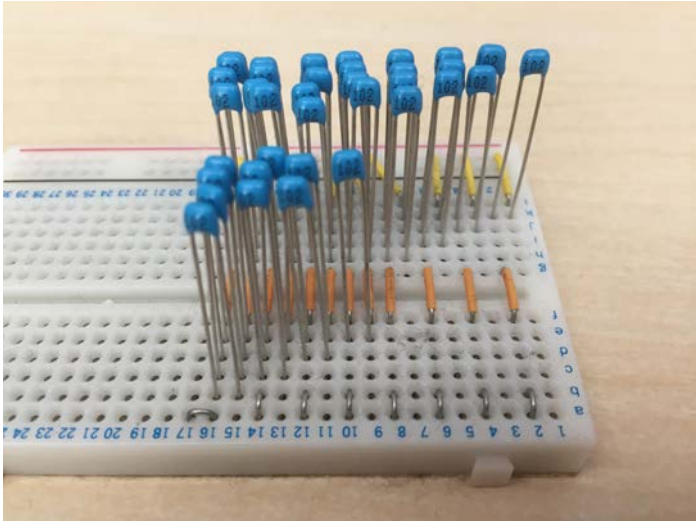


図 3.12: キャパシタの並列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ.

3.3.3 ピンヘッダによるタッチ電極のプロトタイプ

また，タッチ電極の面積を減少させれば，省面積，高密度なセンシング平面を構成できると考え，タッチ電極としてピンヘッダを用いた試作を行った (図 **3.13**, 図 **3.14**)．これまでと同様に，タッチ電極の個数に対応する個数の積層セラミックキャパシタが直列に接続されており，それらの各接続点から分岐した配線が，各タッチ電極たるピンヘッダに対し接続されるような構造を用いた (図 **3.14**).

ピンヘッダをタッチして静電容量を観察したところ，ほとんど静電容量の変化が観測されなくなってしまった．複数のピンヘッダをまたぐように指でタッチした場合，複数のキャパシタの合成容量として多少増加した静電容量が観測される．しかし，同じ部位をタッチした際の静電容量の再現性が不安定であることが観察されたため，タッチ電極にピンヘッダを用いた手法は不採用とした.

3.3.4 銅箔テープによるタッチ電極のプロトタイプ

前 3.3.3 節での結果をもとに，タッチ電極の面積を広げることが安定性の向上につながると考え，これを確かめた．幅 10mm の銅箔テープをアクリル板に貼り付けることにより，図 **3.15** のようなタッチ電極を作成した．図 **3.15** 右上から時計回りに，スライダ，十字キー，選択キーやスライダとして使用できるゼブラパターンである．いずれの電極においても，タッチを行った際，波形のブレが少ない安定した静電容量を観察することができた．ただし，スライダ電極に関しては，細い側の先端付近においては，ほとんど静電容量が観察できなかった.

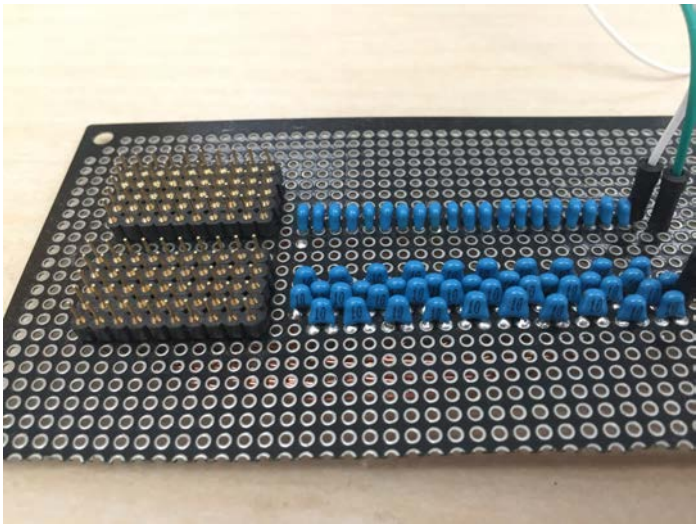


図 3.13: キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したピンヘッダタッチ電極のプロトタイプ (表).

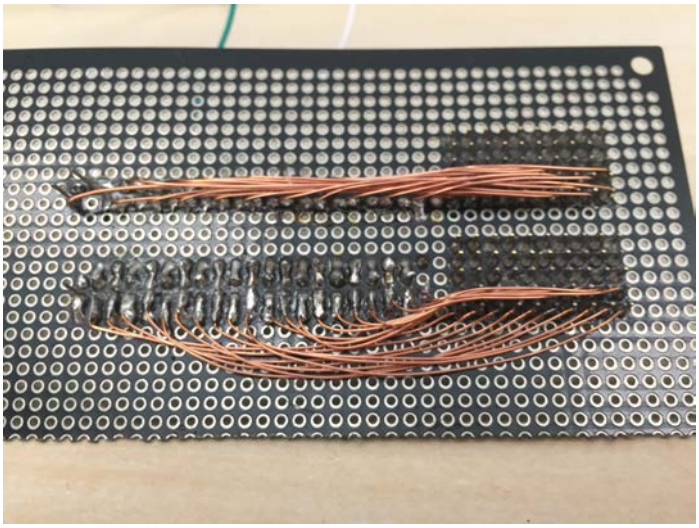


図 3.14: キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したピンヘッダタッチ電極のプロトタイプ (裏).

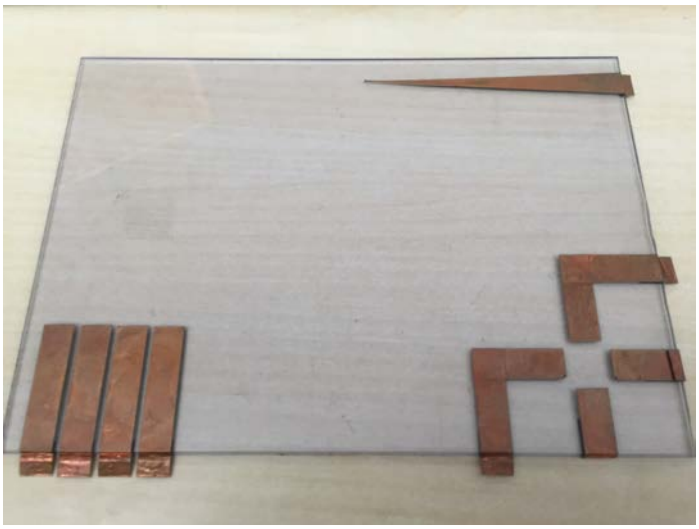


図 3.15: 銅箔テープによるタッチ電極のプロトタイプ.

3.4 チップキャパシタと銅箔テープによる安定化

以上までの知見をもとに，タッチ電極のサイズ拡大とチップキャパシタによる安定性の向上を見込んだタッチ電極を試作した．十字キーとしても，テンキーとしても使用可能であり，安定した静電容量が得られるタッチ電極として，図 **3.16**, 図 **3.17**, 図 **3.18** を作成した．露出電極部分は銅箔テープであり，ユニバーサル基板上にこれらを配置した．各々の電極間にはキャパシタが直列接続されており，ユニバーサル基板裏側にてこれら全てが直列に結線されている．したがって，最終的に，この基板から静電容量計測回路へと延びる結線は 1 本となっている．いずれの電極においても，タッチを行った際，安定した応答が得られることを確認した．

3.5 印刷レジスタによるタッチ電極

これまで，受動素子としてパッケージされたレジスタやキャパシタを接続して作成したタッチ電極を用いていた．しかし本来この研究は，ラピッドプロトタイピングなどの場面において，多電極のタッチセンサを単一結線で実現することを主な目的の 1 つとしている．その利点は，マルチプレクサと多くの配線を用いないことによる価格と実装スペースと実装時間の負担軽減である．

そこで，この実現可能性をさらに高めるため，ユーザが即座に作成可能な，銀ナノ粒子を印刷したレジスタ電極を作成した．印刷により作成可能なレジスタのパタンとしては，[KG15] を参考とした．この印刷パタンを 図 **3.19** に示す．蛇腹のパタンを印刷することにより，蛇腹の長さが長いほど，また蛇腹の線幅が細いほど，抵抗の大きいレジスタを作成することが可能である．この印刷レジスタの任意の場所をタッチした際に，観察される静電容量にどのような変化が起こるかを確認した．予想としては，印刷レジスタのなかで送受信ピンに近い場

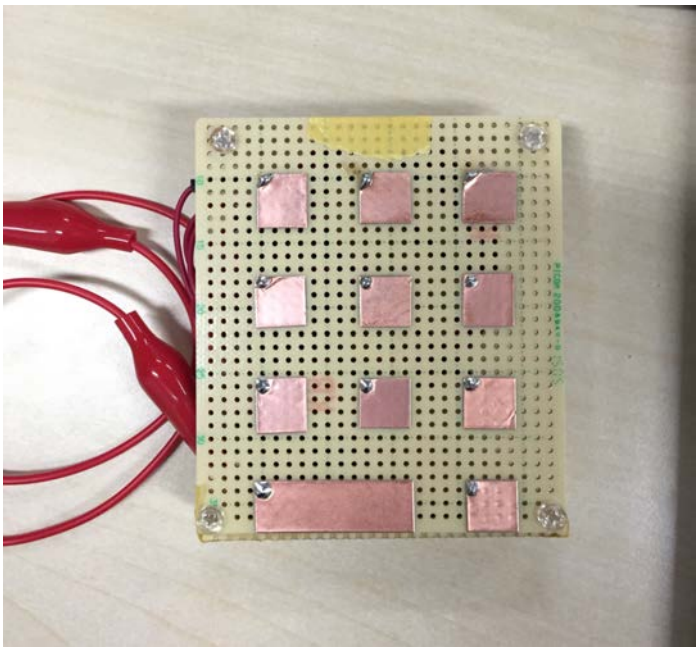


図 3.16: チップキャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (上).

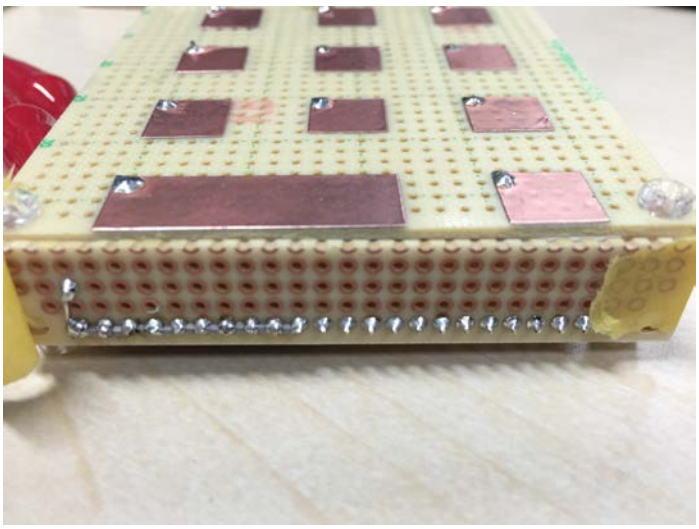


図 3.17: チップキャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (正面).

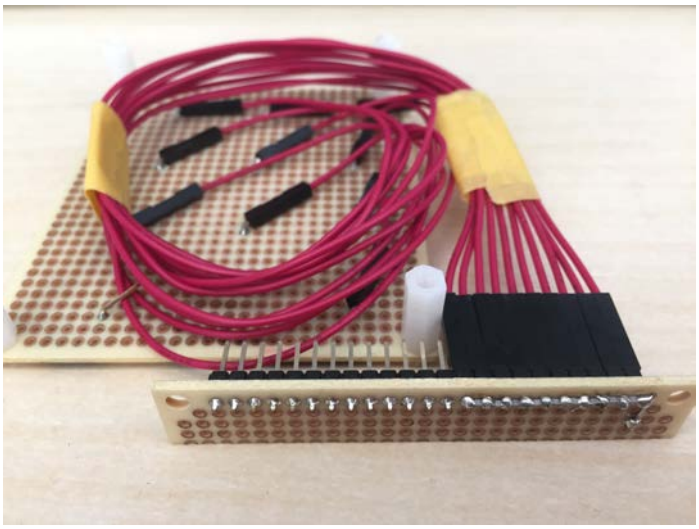


図 3.18: チップキャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ (裏面配線).

所をタッチした場合は静電容量が大きく計測され，送受信ピンから遠い場所をタッチした場合は静電容量が小さく測定されることが考えられる．

結果として，位置による静電容量は安定しないことが明らかになった．また，静電容量を連続的に変化させるために十分な抵抗値を得るためには，蛇腹の長さが，A4 用紙を縦に置いた場合の横幅以上は必要であることが分かった．加えて，印刷レジスタは抵抗を得るために蛇腹の線幅を細くする必要があり，タッチによって銀ナノ粒子がはく離し，断線しやすいなどといった問題が観察された．よって，印刷レジスタに対するタッチ位置による，観測される静電容量の変更は不採用とした．

3.6 印刷キャパシタによるタッチ電極

基本に立ち戻り，各電極を，異なる容量の個別のキャパシタとして作成することを検討した．前 3.5 節と同様，ユーザが即座に作成可能な電極として，印刷電極を検討したが，各印刷電極の静電容量を変更するためのキャパシタをも，印刷により作成することができないかと考えた．

銀ナノインクの印刷によるキャパシタの例である Instant Inkjet Circuits [KHC+13] において，Kawahara らは，銀ナノインクの櫛形パタンによるキャパシタ作成を試作しているが，櫛形キャパシタの印刷面積と静電容量の関係性については，議論がなされていない．本研究においては，キャパシタの印刷電極の面積と静電容量の関係性を確認する必要がある．そこでまず，櫛形キャパシタよりも構造が単純な，図 **3.20** に示すようなパタンの印刷キャパシタを作成した．この印刷キャパシタは，写真印刷用紙に対し，銀ナノインクを 図 **3.20** のパタンで印刷することにより作成することができる．印刷部分である電極が導体，非印刷部分である

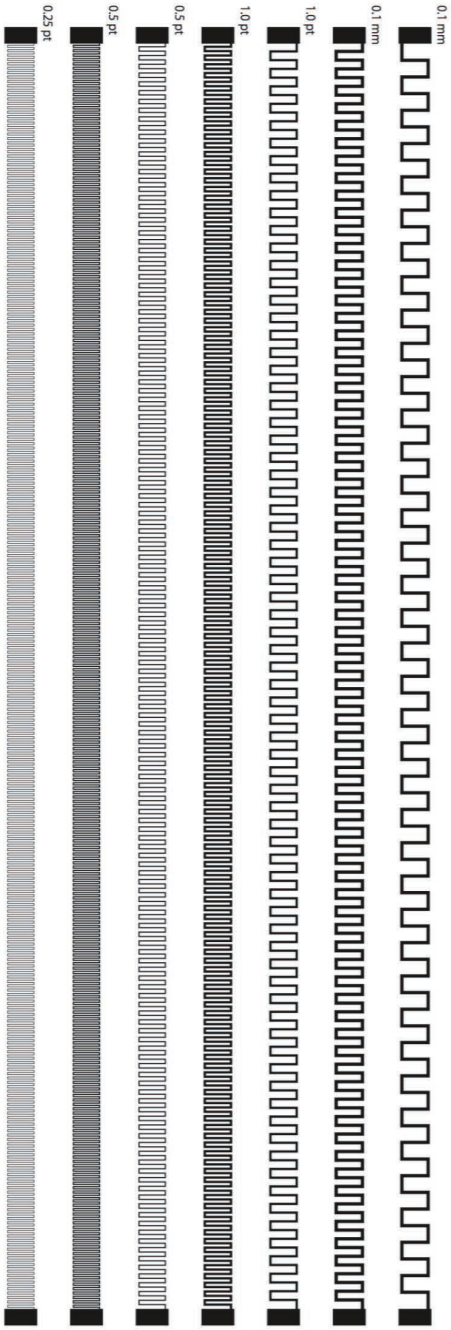


図 3.19: 作成した印刷レジスタのパターン (拡大図). 数値は線幅をあらわす.

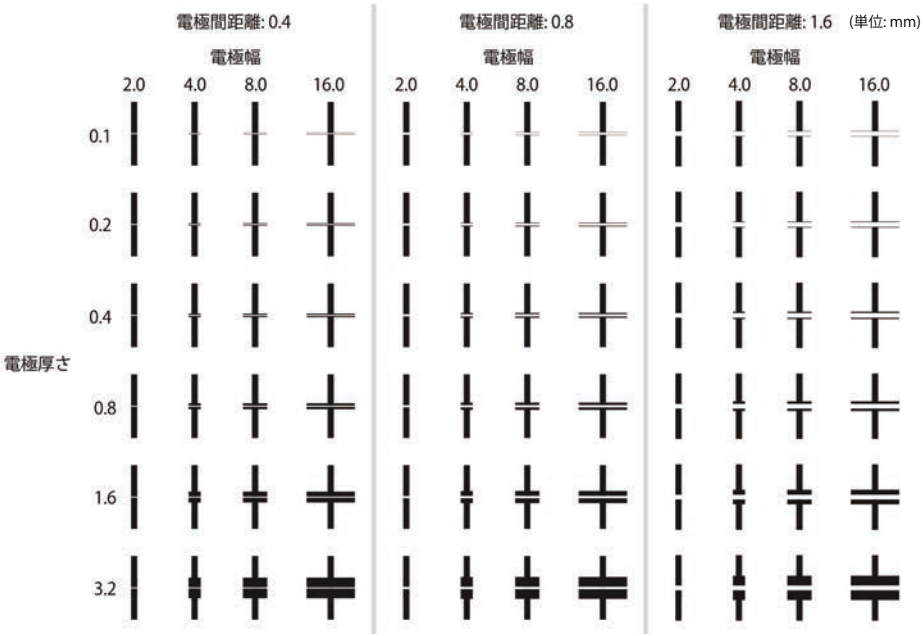


図 3.20: 印刷電極の対によるキャパシタのプロトタイプ.

単位: pF

3.5	3.9	5.2	6.5	3.7	4.0	5.5	5.4	3.3	3.3	4.2	8.0
3.8	4.3	5.4	9.2	3.4	4.7	5.0	7.4	3.2	3.4	4.5	6.8
4.1	6.2	7.3	10.9	3.3	3.6	4.9	7.7	2.7	3.3	4.4	6.9
3.5	4.4	6.6	11.1	3.3	4.0	4.7	8.9	2.9	3.3	4.7	8.7
3.6	3.8	6.5	11.3	3.4	4.4	5.2	9.7	3.2	3.5	4.6	8.7
4.6	5.5	7.6	15.0	3.9	4.2	5.8	10.3	3.4	3.7	5.2	8.9

図 3.21: 各印刷電極の対によるキャパシタのプロトタイプの静電容量．3.20 に対応する．

図 3.22: 2 枚の写真用紙の貼り合わせによる印刷キャパシタのプロトタイプ.

電極間の絶縁部分が誘電体となることにより，キャパシタを形成する．3 種類の電極間距離，4 種類の電極幅，6 種類の電極厚さによる印刷キャパシタを作成し，これらの静電容量を LCR メータにより測定した．その結果を 図 **3.21** に示す．このマトリクスは，図 **3.20** に対応する．ここから，電極間距離が小さい場合，電極幅と厚さの増加により静電容量も増加し，電極間距離が大きい場合は，電極幅と厚さと静電容量の関係が不安定なることが観察された．よって，印刷電極の対にキャパシタとしての特性をもたせるためには，電極間距離は小さくとる必要があることが重要である．

次に，同じ形状と面積の電極を片面印刷用紙 2 枚上に銀ナノインクを用いて印刷し，これらを背中合わせに貼り合わせるという方法により，紙キャパシタを作成した (図 **3.22**)．銀ナノインクにより印刷された電極間に，誘電体として 2 枚の印刷用紙が位置するサンドイッチ構造となっている．電極の寸法は，直径: 10mm，電極間距離: 0.38mm とした．この紙キャパシタの静電容量を計測したところ，容量は 10pF 前後 であり，このような手法によりキャパシタを作成可能である事が確認された．

ここまでの状態では，2 枚の紙を貼り合わせることにより構成される誘電体部分の厚みが大きく，静電容量が微少である．よって，各キャパシタの片側の電極は共通の 1 枚の電極となるような設計を検討し，作成した．これを 図 **3.23** に示す．あたらしく，銀ナノインクの両面印刷手法を導入している．各電極は，両面印刷用紙の同じ位置に，同じ面積と形状として印刷する．銀ナノインクにより印刷された電極間に，誘電体として 1 枚の印刷用紙が位置するサンドイッチ構造となっている．電極の寸法は，直径: 2 - 20mm，電極間距離: 0.25mm とした．各電極は，小さい方から大きい方の電極にかけて，線形に直径を増加させている．これらの静電容量を LCR メータを用いて測定したところ，小さい方の電極から順に大きい方の電

図 3.23: 1 枚の写真用紙における両面印刷キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極のプロトタイプ.

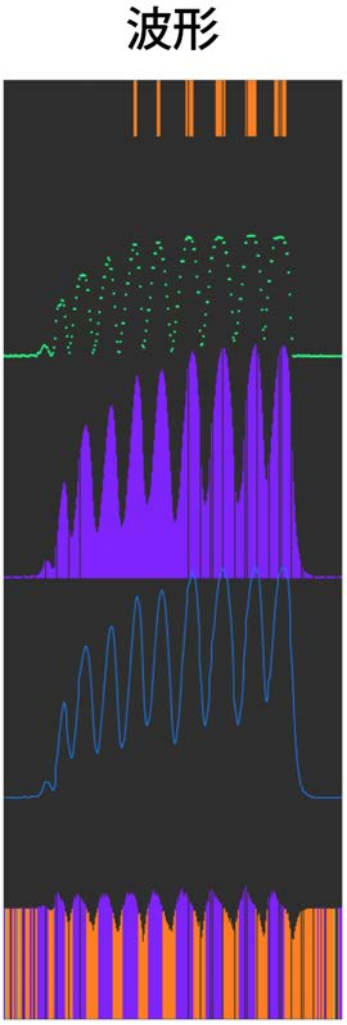


図 3.24: 両面印刷キャパシタの直列接続とその分岐により異なる静電容量を示すよう設計したタッチ電極を順番にタッチした際の静電容量波形.

極にかけて，6 - 185pF というように，線形に静電容量が増加することが観察された．またこれらの電極に対して同じ順番にてタッチを行ったところ，図 **3.24** にように，徐々にタッチした際の静電容量が増加することが確認された．

また，先に印刷用紙 2 枚を用いて作成した直径 10mm のキャパシタの静電容量が 10pF 程度であったことと比較し，印刷用紙 1 枚への両面印刷を用いて作成した直径 10mm のキャパシタの静電容量は，43pF であった．このことから，1 枚の紙における両面印刷の手法を用い誘電体の厚みを減少させることにより，静電容量を増加させることが可能であることが確認さ．

3.7　本章のまとめ

本研究は，多電極を単一結線にまとめ，各電極をタッチした際に単一結線から観察される静電容量の変化のみを用いて，各電極へのタッチを識別したり，タッチを組み合わせたジェスチャを検出することを実現する．このために，図 **1.5**, 図 **3.1** のように，レジスタ (抵抗)，キャパシタ (コンデンサ) を用いて，単一結線にて接続された多電極のそれぞれの静電容量を変更し，おのおの異なる静電容量を得られるような電極の設計と試作を行った．

本研究の実現性を検証するため，まず，導電性フィラメントを用い 3D プリントした多電極，ならびに，受動素子を用いた多電極のプロトタイプを作成した．その後，さらに手軽に作成可能な印刷技術を用いたタッチ電極の設計方法について探求を行った．その結果，電極の形状設計による静電容量の操作の容易性，静電容量の安定性，作成の容易性から鑑みて，銀ナノインクの両面印刷を用いたキャパシタによる多電極が，最も本研究の目的に沿っていると判断した．

第4章　RootCap

これまでの試作により得られた結果をもとに，図 **1.4** に示すような，単一結線という単純性を保ちながら，入力可能な電極数を増やし，多電極中のそれぞれの電極へのタッチ操作を識別可能とするタッチセンサである RootCap を作成した．図 **4.1** にその詳細なハードウェア構成図を示す．これは，単一結線から分岐する特殊な多電極を作成し，それぞれの電極をタッチした際に，異なる静電容量が観察できるよう簡易な工夫を加え，電極にタッチした際の静電容量の大小を観察して電極を識別することにより実現する．その結果，ユーザが電極をタッチすると，これらが単一結線において異なる静電容量として観察される．多電極から単一結線されたセンシング回路 (図 **1.4** 左) を用いて，静電容量の変化を観察することにより，多電極中のタッチ電極を識別することが可能となる．

ラピッドプロトタイピングにおいて，デザイナがこのような多電極タッチインタフェースを作成する際は，それぞれ異なる静電容量を持つ電極を，簡単に設計できることが重要である．これを実現するため，今回，図 **4.2** ような銀ナノインクの両面印刷によるキャパシタとタッチ電極を設計，作成した．これを両面印刷キャパシタと称する．さらに，銀ナノ印刷を用いることにより，デザイナは，タッチ電極とこれを両面印刷キャパシタに接続する配線をも素早く作成することができる．

本章では，両面印刷キャパシタとその予備調査ならびにデザインガイドライン，静電容量を計測するタッチ検出回路の仕組みと改良，実証用アプリケーションの例を解説する．

4.1　両面印刷キャパシタ

両面印刷キャパシタの構造を 図 **4.2** に示す．両面印刷キャパシタにおいて，電極は両面印刷用紙の表裏面に印刷された銀ナノ粒子，誘電体は両面印刷用紙である．家庭用プリンタに銀ナノインクを充填し，両面印刷用紙における表裏同一の位置に，任意の塗りつぶし図形として銀ナノインクを印刷する．これにより，印刷面積によりキャパシタンスをデザインでき，また高速に作成可能なキャパシタを実現する．

これまで，銀ナノインクの印刷によるキャパシタ作成のアイデアとしては，紙上の同一面に印刷された銀ナノインクにより形成される櫛形キャパシタが存在した [KHC+13]．同一面の櫛形キャパシタは，櫛形である必要があるが，両面印刷ならばこれは問われず，図 **4.3** のように自由な平面，立体形状のキャパシタをデザイン可能である．

銀ナノインクによる印刷技術は，ラピッドプロトタイピングにおける配線，抵抗，自由な形状のタッチ電極を含む回路の作成にも用いられ始めており [KHC+13, KG15, OGT+13, GSO+14,

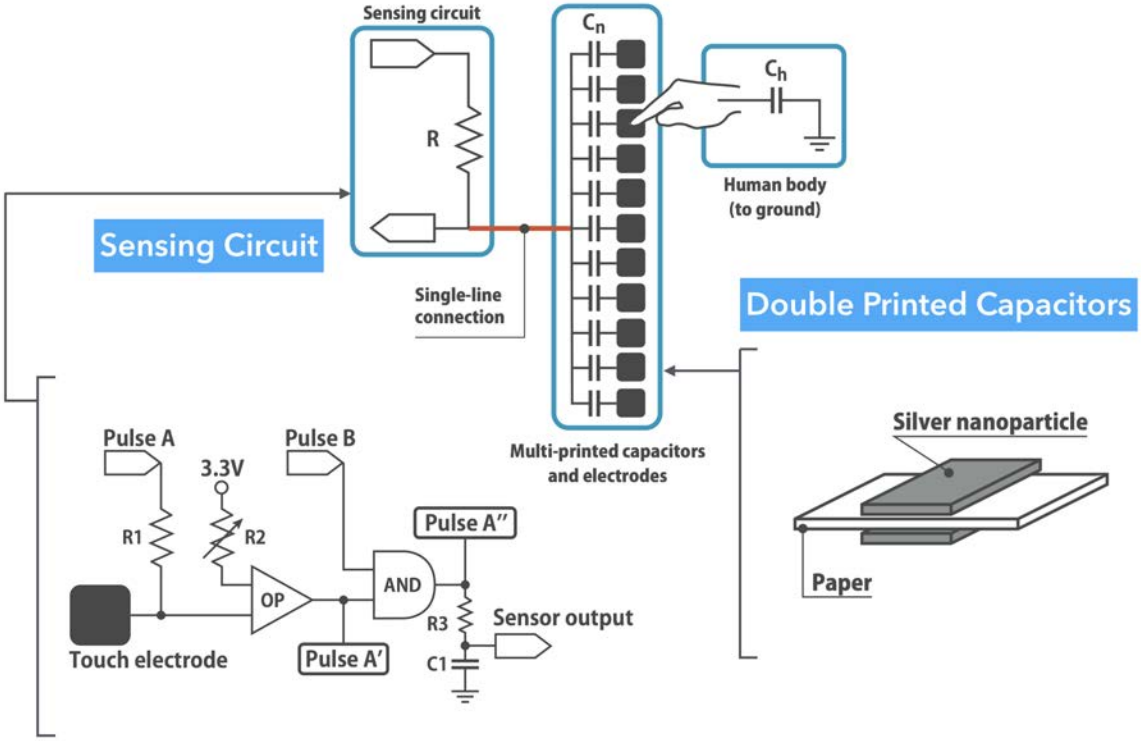


図 4.1: RootCap のハードウェア構成.

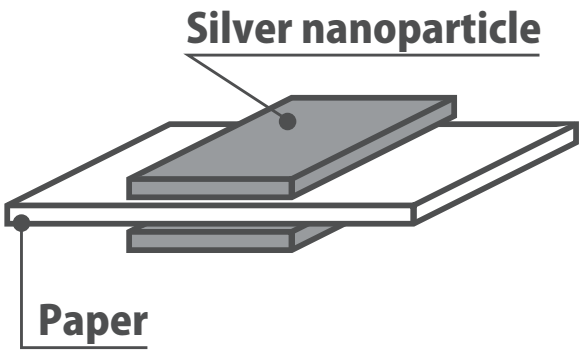


図 4.2: 両面印刷キャパシタの構造.

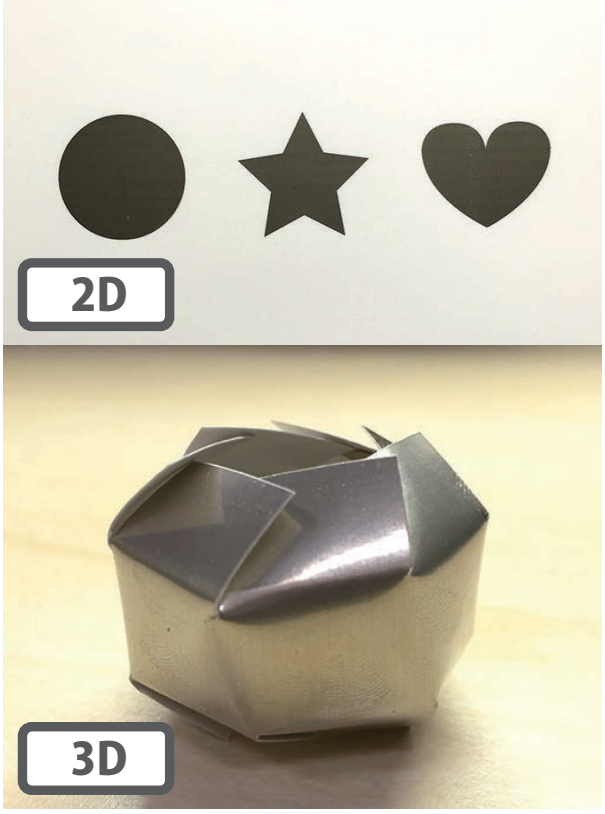


図 4.3: 自由な形状の両面印刷キャパシタ.

OSOHS15, OWS14, KM15]，実装工程が少なく，自由な平面形状の電極を作成することができることが特徴である．よって，我々の両面印刷キャパシタはこれらの手法と組み合わせて使用することができ，デザイナは更に複雑な回路を素早く作成することができる．

4.1.1 使用する機材，素材

両面印刷キャパシタの実装のため，プリンタとして Brother DCP-J525N，銀ナノインクとして Mitsubishi Paper Mills Limited NBSIJ-MU01，両面印刷用紙として KOKUYO KJ-G23A4-30 を用いた．

4.1.2 予備調査: キャパシタンスの測定

両面印刷キャパシタにおける，印刷面積と静電容量の関係を観察する予備調査を行った．試作では，矩形の形状を用い，図 **4.4** のような 10 段階の異なる印刷面積 (上から順に 1-10 の ID を与えた) をもつ両面印刷キャパシタを作成した．印刷面積は，最小 100 mm^2 からはじめ，200 mm^2, 300 mm^2, $\cdots$, と続き，最大 1000 mm^2 である．

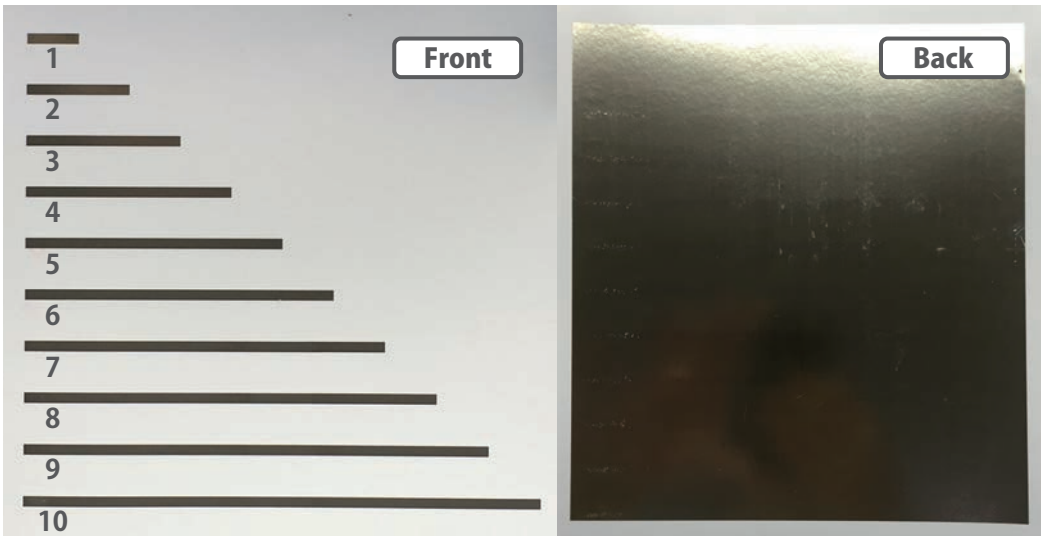


図 4.4: 予備調査に用いた両面印刷キャパシタ.

これらそれぞれの静電容量を，LCR メータ (DER EE LCR METER DE-5000) を用いて測定した．面積と容量の関係を 図 **4.5** に示す．横軸は各キャパシタの ID (面積に相当) であり，縦軸は測定された静電容量である．ここから，印刷面積と静電容量には線形の関係があることが確認された．このことは，並列接続されたキャパシタのキャパシタンスは，その電極の面積に比例するという理論に合致する．よって，提案した銀ナノインクの両面印刷を用いることで，高速に自作可能であり，安定的にキャパシタの理論に整合し，印刷面積によりキャパシタンスを変更可能であり，自由度の高い印刷形状を実現できる，ラピッドプロトタイピング手法に適したキャパシタを作成可能であることが明らかになった．

4.1.3 デザインガイドライン

今回使用した環境において，印刷キャパシタの印刷面積と，タッチした際の充電時間の関係をモデル化すれば，印刷キャパシタを作成する際のガイドラインとして利用できると考えられる．また，今回の手法は，タッチ電極を，単一結線において観察される静電容量の大小によって決定する．静電容量は，キャパシタの充放電時間によって計測することとした．そのため，各電極をタッチしたときに観察される静電容量の差は，ノイズが与える影響よりも大きくなるように，キャパシタを設計する必要がある．これは，デザイナが両面印刷キャパシタの面積を決定する際に重要となる．

そこでまず，線形に増加する静電容量の印刷キャパシタ 図 **4.4** を実際に 1 つずつタッチしたとき，センシング回路 図 **1.4** が示す充電時間がどのようになるかを観察した．これを 図 **4.6** に示す．横軸は各キャパシタの ID であり，縦軸は正規化された充電時間である．ここから，印刷キャパシタの容量が線形に増加しても，タッチ時の充電時間は非線形になることが明らかになった．

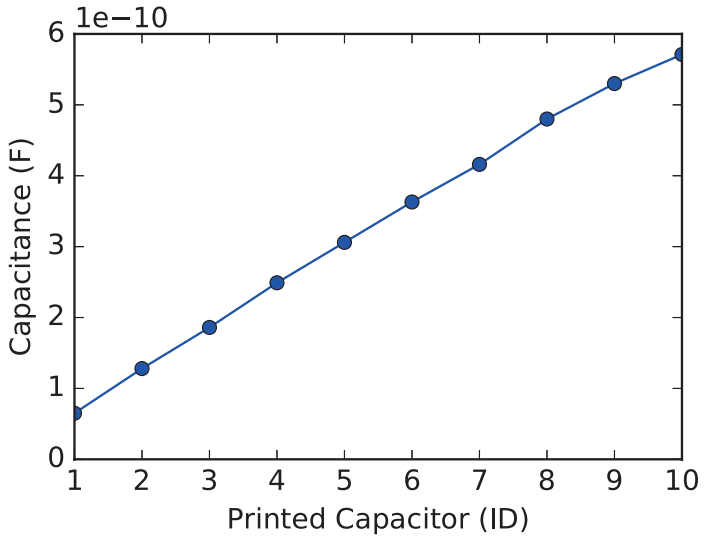


図 4.5: 各両面印刷キャパシタのキャパシタンス.

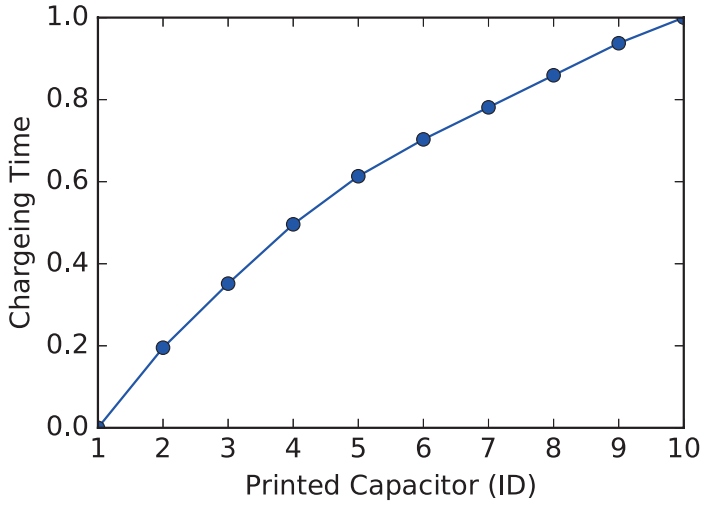


図 4.6: 計測回路により測定した，各キャパシタの静電容量.

ここで，キャパシタンス C のキャパシタの充電時間 t の式 (式 **4.1**) を考える．

$$t = -RC\ln(1 - \frac{V_t}{V_0}) \tag{4.1}$$

t が充電時間，R は 図 **1.4** のレジスタンス，C はキャパシタンス，V_t は充電完了とする閾値電圧，V_0 はキャパシタに与える電圧である．対数の項については，タッチする印刷キャパシタが異なっても V_t と V_0 は一定であるため，式 **4.1** は，$A = \ln(1 - Vt/V0)$ とすると

$$t = -ARC \tag{4.2}$$

のように簡単にできる．式 **4.2** を変形すると，計測回路により観察されるキャパシタンスは

$$C = -\frac{t}{AR} \tag{4.3}$$

と表せる．

センシング回路により観察されるキャパシタンスは，両面印刷キャパシタのキャパシタンス C_n と，ユーザのキャパシタンス C_h の合成容量としてあらわされる．ユーザによるタッチが発生した際，C_n と C_h は 図 **1.4** にように直列に接続されるため，C は，

$$C = \frac{C_n C_h}{C_h + C_n} \tag{4.4}$$

となる．

ユーザのキャパシタンス C_h と，単一結線 (図 **1.4** 中央) によりセンシング回路に接続されたタッチ電極のキャパシタンス C_n との関係を調べるため，C_h について，本センシング回路 (図 **1.4** 左) を用いて計測を行った．著者が，他の電極やキャパシタを介さず，直接信号線にタッチした場合の t は 3μs であった．また，式 **4.1** より，$R = 10\,\mathrm{k\Omega}$, $V_t = 2.5\,\mathrm{V}$, and $V_0 = 3.3\,\mathrm{V}$ ($R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ と $V_t = 2.5\,\mathrm{V}$ は実験的に求めた) から，人間のもつ静電容量は C_h は $221\,\mathrm{pF}$ であった．これは人間の静電容量を計測している [FI01] や [Ott09] と整合する．ここから，各印刷キャパシタのキャパシタンス C_n (LCR メーターにより測定) と，人間のキャパシタンス C_h (i.e., $221\,\mathrm{pF}$) の合成キャパシタンスを 式 **4.4** により計算した際のプロットを，図 **4.7** に示す．横軸は各印刷キャパシタの ID をあらわし，縦軸は各印刷キャパシタと人間の合成キャパシタンスをあらわす．R と各印刷キャパシタの C について，その実測値をモデル (式 **4.2**) に当てはめたときの充電時間のプロットを 図 **4.8** に示す．

また，式 **4.2** に， $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$ と，先ほど計算した合成キャパシタンス C (図 **4.7**) をあてはめ，理論上の充電時間を計算した．これを 図 **4.8** に示す．横軸は各印刷キャパシタの ID をあらわし，縦軸は正規化された理論上の充電時間である．縦軸は 図 **4.6** と比較するために正規化した．

ここで，今回仮定した充電時間のモデル (式 **4.1**) により計算した理論上の充電時間である 図 **4.8** と，実際に本手法のセンサ回路で測った充電時間である 図 **4.6** を比較すると，これらがよく一致していることがわかる．予備調査においては線形であった面積と静電容量の関係が，人間がタッチした際に非線形になったことは，式 **4.1** に存在する合成キャパシタンスが非

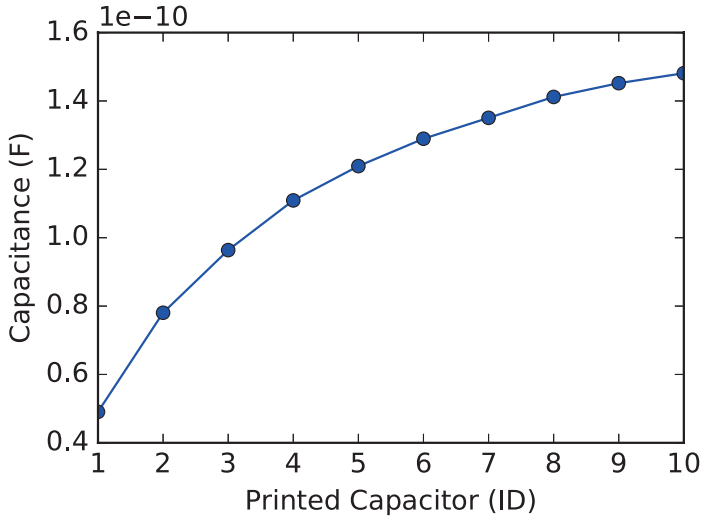


図 4.7: C_n と C_h の合成キャパシタンス．

線形項として作用していることから説明できる．よって，式 **4.1** は，図 **1.4** のセンシング回路により計測される充電時間からキャパシタンスを推定するモデルとして使用することができると考えられる．

更に，実測した各印刷キャパシタのキャパシタンス C_n と，各印刷キャパシタの面積の関係を調査する．a を両面印刷用紙と銀ナノインク依存する定数，また S を両面印刷キャパシタの印刷面積とおき，$C_n = aS$ とする．これを 式 **4.1** に代入すると，

$$t = -AR\frac{aSC_h}{C_h + aS} \tag{4.5}$$

となる．これが印刷面積と充電時間の関係式となる．式 **4.5** は，両面印刷キャパシタの印刷面積が増加すると，充電時間の増加量が減少する傾向があることを示している．

このことは，図 **4.6**，図 **4.8** からも観察される．両面印刷キャパシタ 10 (1000 mm^2) の前後において，充電時間の増加量が減少していることがわかる．従って，$R = 10\,\mathrm{k}\Omega$ を用いる今回の実装においては，印刷キャパシタは 1000 mm^2 を超えない範囲で作成し，最大の面積をもつキャパシタと，その他のキャパシタの面積の差をできるだけ大きくするように，印刷キャパシタの面積を設計することを推奨する．

加えて，面積の上限は R にも左右される．よって，もしも今回の実装よりも大きな面積の印刷キャパシタを作成したい場合は，より小さな抵抗を用い，小さな面積のキャパシタを作成したい場合は，大きな抵抗を用いることを推奨する．尚，キャパシタ部に接続するタッチ電極の面積には制約がなく，タッチ電極をデザインする上での制約は発生しない．なぜなら，タッチ電極はキャパシタ部に接続されてはいるが，キャパシタを構成する導電部には含まれないため，面積や形状の制約が存在しないためである．

ここで，図 **4.10**，図 **1.4** に含まれる R についても考える．まず R は 図 **4.10** 中の固定抵抗 $R1$ と印刷キャパシタ，タッチ電極，人間による抵抗が要素として考えられる．ここで $R1$ 以

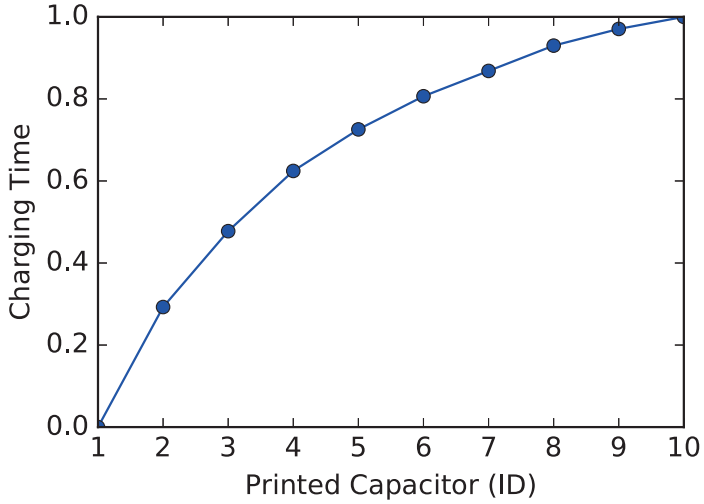


図 4.8: 理論上の充電時間.

外の抵抗が t に及ぼす影響を考える．等価回路においてはこれらの抵抗が直列に接続されていると仮定する．そうであれば，センシング回路の受信ピンにおいて観察される HI 電圧は，この一連の抵抗によって分圧され，t が変化するはずである．しかし実際に受信ピンにおいて観察される HI 電圧は，タッチ前，タッチ後において変化せず，分圧は観察されなかった．また，タッチ電極を直接 GND に落とした場合も，分圧は観察されなかった．以上のことから．t に関係する R の要素としては，固定抵抗 $R1$ のみを考慮すればよいことがわかる．

4.2 タッチセンシング回路

キャパシタンス (静電容量) 方式のタッチセンシング回路 (図 **4.9**) を作成した．これは [真鍋 15] の充電時間方式をベースに改良を加えたものである．簡略化した回路図を 図 **4.10** に示す．

図 **4.9** においては，図 **4.10** のうちタッチ電極とセンサ OUT を除く部分が 2 個組み合わさった構造になっている．これはノイズ除去のためである．タッチにより発生するキャパシタンスや，キャパシタンスの変化を検出する方法には，キャパシタの充電時間を計測する方法，キャパシタの共振周波数を観測する方法などがある．今回は，回路構成が簡潔で計測容量の上限が高い充電時間方式を採用した．

充電時間方式のロジックは概ねマイコンにおいてソフトウェアとしてプログラムすることが可能である．しかし，今回はロジックの大部分をハードウェアを用いて実装することにより，高速に静電容量の大小を観察可能とする．

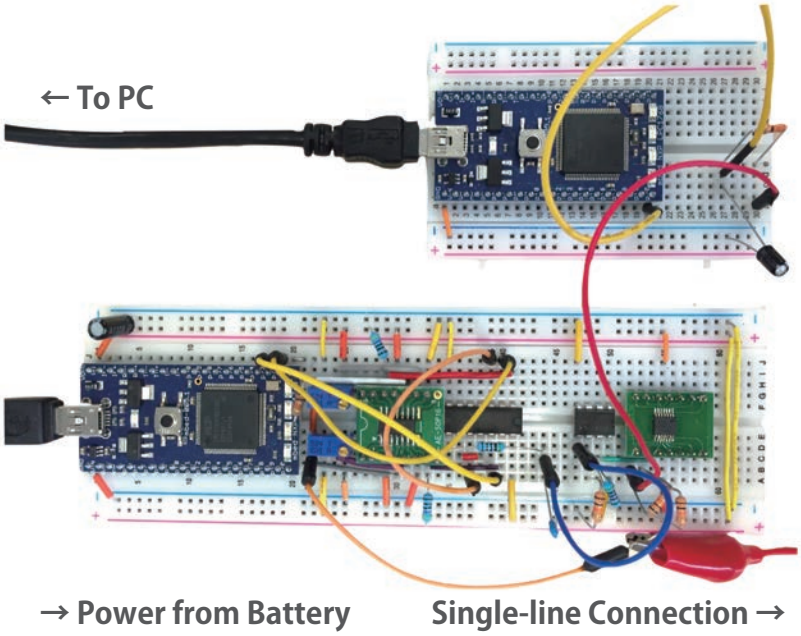


図 4.9: 実際のタッチセンシング回路.

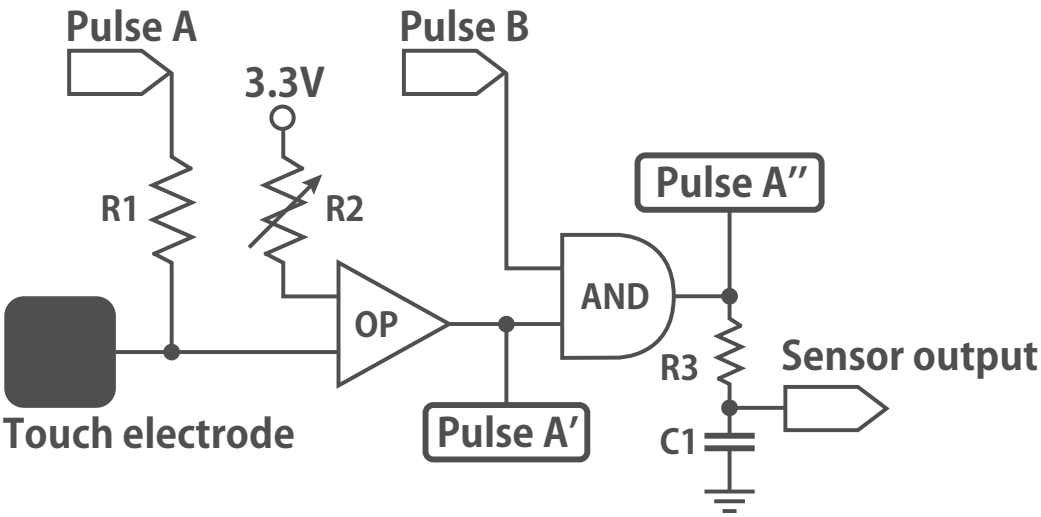


図 4.10: タッチセンシング回路を簡略化した回路図.

4.2.1 充電時間計測による静電容量計測のしくみ

充電時間の計測は，[真鍋 15] と同様に複数の矩形波を用いることで行う．センシングに使用する全ての矩形波を 図 **4.11** に示す．

充電時間を計測するには，まず実際にタッチする電極に充電を行うための矩形波信号 (パルス A) が必要である．パルス A は，タッチ電極がタッチされた際に歪む性質がある．このタッチによって発生する信号のゆがみ具合を，充電時間として計測する．このために別の矩形波であるタイミング信号 (パルス B) を用いる．これらパルスの立ち上がり，立ち下がりのタイミングなどから充電時間を計測する．また，充電時間の計測と同じメカニズムで放電時間も計測し，これをノイズ対策に使用する．

実際に充電を行うためタッチ電極に与えるパルスをパルス A とし，このデューティー比を 1/2，周期を 100 μs とする．時間計測用のパルスをパルス B とし，立ち上がりをパルス A と揃える．このデューティー比は任意であるが，パルス B の HI 時間がパルス A の HI 時間を超えないようにする．また，閾値電圧 ($R2$ における電圧 V_t) を決定する．パルス A の HI 時間，LOW 時間はそれぞれ 500ms である．

これらを使用して充電時間を求める方法は以下である．まず，あらかじめパルス A に対して閾値電圧 V_t を決めておき．パルス A がその閾値電圧を超えた時刻を，充電の終了時刻とする．パルス A は，人間がタッチ電極をタッチした際，人間にもパルス A が充電されることから発生する RC 回路の影響により，その矩形波にローパスフィルタが掛かる形となる．そして，図 **4.11** 右のように，立ち上がりの角度がなだらかになる．タッチを行ってパルス A の立ち上がりがなだらかになったとき，タッチを行っていない場合と比較して，閾値電圧 V_t に到達する時刻が遅くなる．このことは，コンパレータ (図 **4.10** OP) によってパルス A と閾値電圧 V_t を比較し，A が閾値電圧を通過してから後を HI とする新たな信号であるパルス A' を生成することで表現する．具体的には，左肩をパルス A の閾値電圧通過時刻，右肩をパルス A の立ち下がり時刻とする新たなパルスが形成される．これをパルス A' とする．パルス A' は，非タッチ時に左肩が左寄りになり，タッチ時に左肩がそれよりも右にずれる．

ここで，パルス A' とパルス B を AND ゲート (図 **4.10** AND) に通すことにより，非タッチ時には広く，タッチ時に狭くなるパルス A" を得る．パルス A" は静電容量が大きくなる程に HI 時間が短くなることに注意が必要である．パルス A" に対して十分なローパスフィルタ (図 **4.10** R3, C1) を掛け，パルスの時間幅を平均的な直流電圧の上下変動に変換する．つまり，パルスの時間幅が増えるほど，高い直流電圧を得る．これを ADC にかけることにより，充電時間を一定範囲の離散的な 1 次元の数値として得ることができる．これを充電時間をもとにした，静電容量とする．

波形生成のコントロールと，計測した充電時間を PC に転送するために，ARM プロセッサを搭載した，MXP 社製のマイクロコントローラである mbed LPC1768 を使用した．転送のボーレートは 230400 である．

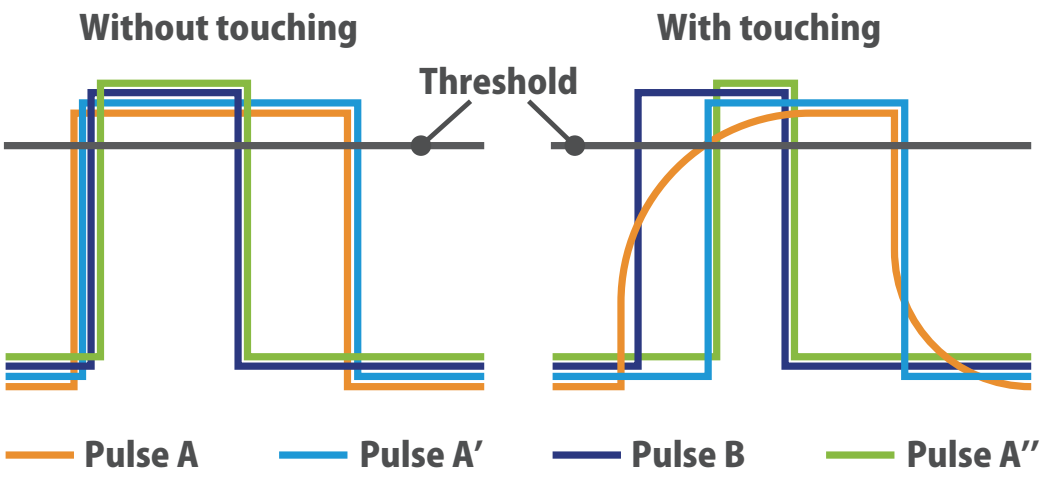


図 4.11: センシングに使用するパルス．

4.2.2　ノイズ対策と詳細な静電容量変化を観察するための工夫

本実装においては，ユーザが明確なグラウンドを取らない不安定な日常のタッチ環境を想定している．そのため，回路や人体によるノイズの影響は無視できない．本節では，ノイズ対策，詳細に静電容量の大小を観察するための工夫，本回路における静電容量の計測可能範囲の調査，ユーザの姿勢がタッチセンシングに与える影響の調査について述べる．

ノイズ対策

まずノイズ対策として，商用電源のノイズ低減のため，[真鍋 15] と同様，疑似差動 [CU08] を取り入れた．この手法は，充電時間計測に用いるノイズの載った信号と，逆相のノイズが載った信号の和をとることによってノイズを打ち消す方法である．逆相のノイズが載った信号としては，充電の際と同じ仕組みにより計測した，放電時間の信号を用いた．図 **4.9** においては，逆相同士となるように，図 **4.10** の回路を充電時間計測用と放電時計測用として 2 つ組み合わせている．これらの信号を合成することにより，疑似差動を実現している．

また，追加のノイズ対策を施した．ハードウェア，ソフトウェアの双方にローパスフィルタを追加し，疑似差動にて吸収しきれないノイズを低減した．ノイズに周期性が観察されたため，この周波数をテスタで測定したところ，50kHz であったそこで，これよりも低い周波数を通過帯域とするローパスフィルタを R (330 Ω)，C (10 μF) の受動素子で設計した．センサ値を PC 送信用 mbed に渡すための信号線の途中にこのフィルタを設置し，ノイズを除去した．また，PC 側のアプリケーションプログラムにおいても，転送されてきたセンサ値に対して，RC ローパスフィルタ (遅延回路) を模したデジタルフィルタを掛けることで，適度な立ち上がり，立ち下がりの急峻さを保ったまま，センサ値をさらに安定させた．ソフトウェアにおけるローパスフィルタの直前データへの重み係数は 0.99 である．

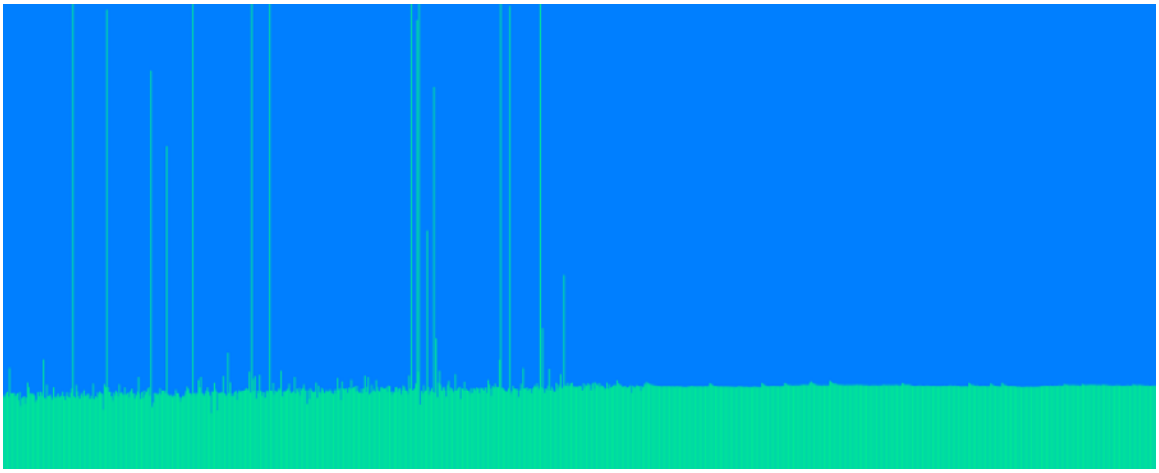


図 4.12: ハードウェア，ソフトウェア双方のノイズ対策の効果．左: ノイズ対策なし．右: ノイズ対策あり．

また，今回は [真鍋 15] の手法において電極付近に設置されたボルテージフォロアを不使用とした．これは，電圧降下が大きく，静電容量の詳細な大小変化を観察する目的に対して逆効果となってしまうためである．かわりに，信号線，電源線に対してフェライトクランプを付けることで，ノイズの低減を図った．また，電源は蓄電池駆動とした．商用電源や PC からのバスパワーによる駆動も可能であるが，より詳細でクリアな信号を得たい場合は，蓄電池駆動とすることで更なるノイズ低減が可能である．

加えて，実装の途中段階まではピークホールド回路もノイズ対策に用いていた．しかし，以上までの対策によって十分な効果が得られたため，最終的には使用しないこととした．図 **4.12** 左半分がノイズ対策を適用する前の充電時間のプロット，右半分が適用後である．横軸が時刻をあらわし，縦軸が静電容量をあらわす．ウィンドウの上端が，とり得る数値 (電圧) の最大値，下端が最低値 (0) である．回路の性質上，値が低いほど，つまりグラフのプロットが低いほど，計測された静電容量値が高いことを示す．

タッチを行うユーザがアースをとるか否かが静電容量に及ぼす影響

タッチを行うユーザの姿勢などの影響によりアースをとることが，観察される静電容量にどのような影響を及ぼすか調査を行った．今回，アースを行う対象として，実装に用いた PC の金属製筐体を用いた．ユーザは左手により PC 筐体にしっかりと触れ，右手によりタッチ電極をタッチする．アースをとった場合と，とらなかった場合における，非タッチ，タッチ時の静電容量波形を，図 **4.13** から 図 **4.18** に示す．静電容量の数値は，mbed にて収集された静電容量をあらわす電圧が数値化されたものをそのまま用いており，加工やノイズ対策は一切加えていない．横軸が時刻をあらわし，縦軸が静電容量をあらわす．ウィンドウの上端が，とり得る数値 (電圧) の最大値，下端が最低値 (0) である．回路の性質上，値が低いほど，つまり

グラフのプロットが低いほど，計測された静電容量値が高いことを示す．図 **4.13** は，アースをとらずにタッチ電極に触れた場合の静電容量波形である．波形の左半分が非タッチ時，右半分がタッチ時である．図 **4.14** は，片方の手によって PC にアースをとりながらタッチ電極に触れた場合の静電容量波形である．波形が明確に減少している部分が，タッチを行った際の波形である．図 **4.13** の場合は，観察される静電容量の変化は微少である．これに対し，図 **4.14** の場合は，タッチした際の波形の変化がはっきりと現れていることが確認できる．

また，ユーザがタッチ時において明確にアースをとる必要がある場合，操作の自由度が制限されることが予想される．そこで，回路最終段にあるアンプの増幅率を変更することにより，非アース時のタッチ・非タッチ差異が明確になるかを調査した．この調査の目的は，ユーザが明示的にアースをとらずともタッチが十分に検出可能かを検証することである．図 **4.15** は，非アース時における増幅率 6 倍の非タッチ・タッチの静電容量，図 **4.16** は，アース時における増幅率 6 倍の非タッチ・タッチの静電容量である．図 **4.17** は，非アース時における増幅率 11 倍の非タッチ・タッチの静電容量，図 **4.18** は，アース時における増幅率 11 倍の非タッチ・タッチの静電容量である．以上から，増幅率を上げたとしても，非アース時のタッチ・非タッチにおける静電容量の差異はほぼ変わらない事が観察された．

詳細に静電容量の大小を観察するための工夫

以上をふまえ，ユーザがアースをとらずとも詳細に静電容量の大小を観察するための工夫をいくつか追加した．まず，図 **4.10** における R2 を追加することで，パルス A の充電完了時刻を決定する閾値電圧 V_t を可変とし，実際の静電容量がセンサ値として表現される際の感度を調整可能とした．例えば小さな静電容量の変化であってもセンサ値として大きな変動を得るためには，閾値電圧 V_t を充電時は大きく，放電時は小さくとることでこれが可能となる．充電時の閾値電圧を大きくすることで，充電に掛かる時間が長く計測され，また放電時の閾値電圧を小さくすることで，放電にかかる時間が長く計測される．つまり，たとえ実際の静電容量の変化が微小であったとしても，充放電完了を決定する閾値電圧 V_t を調整することにより，見かけの充電時間を増幅することができるということである．図 **4.19** のように閾値電圧調整用の可変抵抗にテスタを当て，閾値電圧を実験的に調整しつつ求めた．充電時間計測用の閾値電圧は 2.5 V，放電時間計測用の閾値電圧は 0.5 V とした．これにより，ユーザの周辺環境や接地状況による基本的な静電容量の変化に対応する．

次に，パルス B のデューティー比を最適化する．先ほどの閾値電圧 V_t が，充電時間，放電時間をあらわすパルス A” の立ち上がり時刻を決定することと同様に，パルス B は，パルス A” の立ち下がり時刻を決定する．パルス B のデューティー比が小さい，つまりパルス B の HI 時間が長い場合，パルス A” の HI 時間も長くなる．逆にパルス B のデューティー比が大きい，つまりパルス B の HI 時間が短い場合，パルス A” の HI 時間も短くなる．よって，パルス B のデューティー比を適度に大きくすることで，パルス A” の HI 時間がより短くなり，タッチ，非タッチ時のパルス A” の HI 時間幅の変化量がより大きくなる．これにより，たとえ実際の静電容量の変化が微小であったとしても，パルス B のデューティー比を調整することにより，見かけの充電時間を増幅することができるということである．また，パルス B を調整

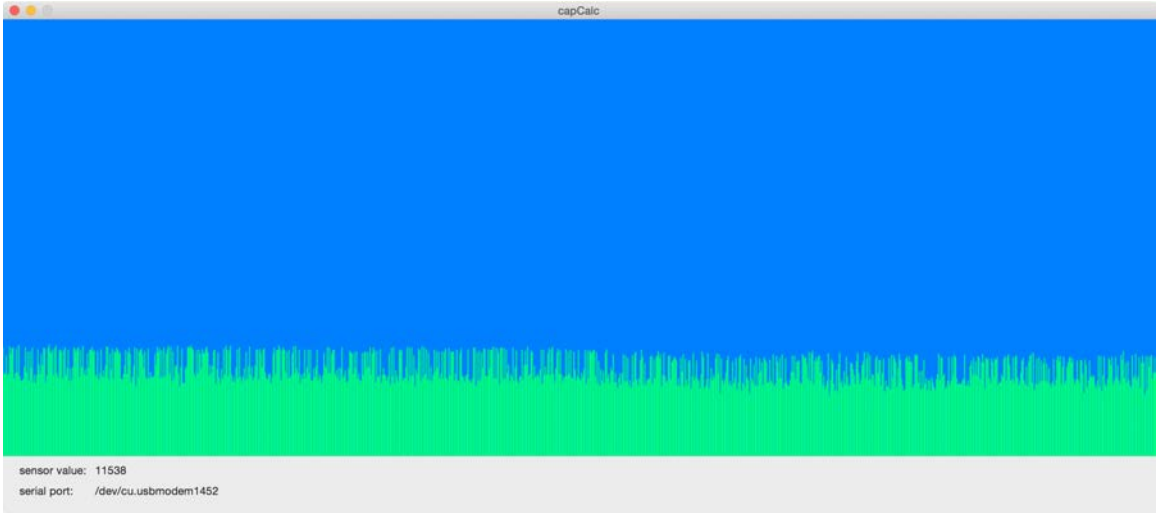


図 4.13: ユーザがアースをとらずにタッチを行った際の静電容量波形 (増幅なし).

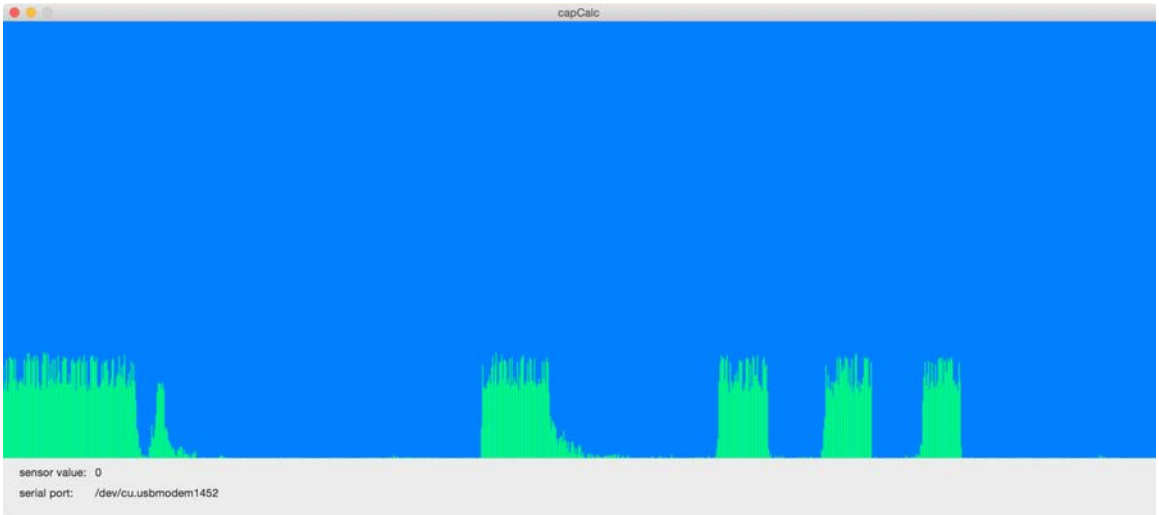


図 4.14: ユーザがアースをとりながらタッチを行った際の静電容量波形 (増幅なし).

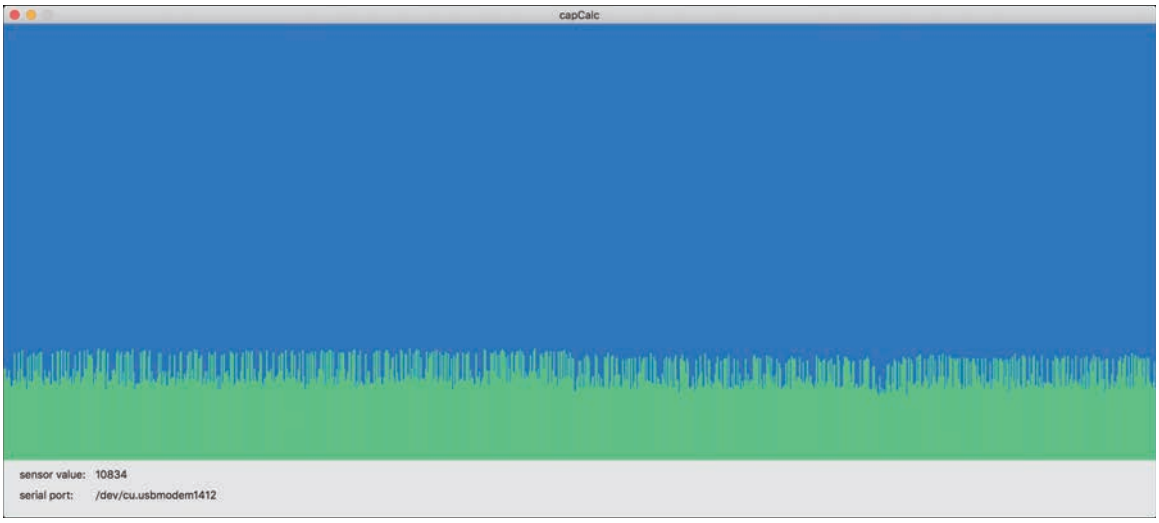


図 4.15: ユーザがアースをとらずにタッチを行った際の静電容量波形 (6 倍増幅).

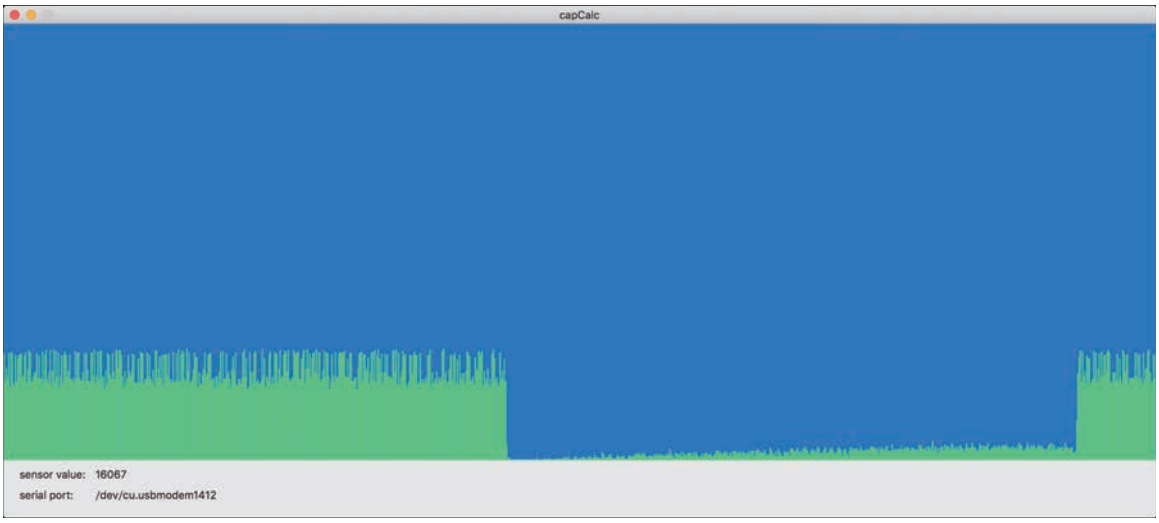


図 4.16: ユーザがアースをとりながらタッチを行った際の静電容量波形 (6 倍増幅).

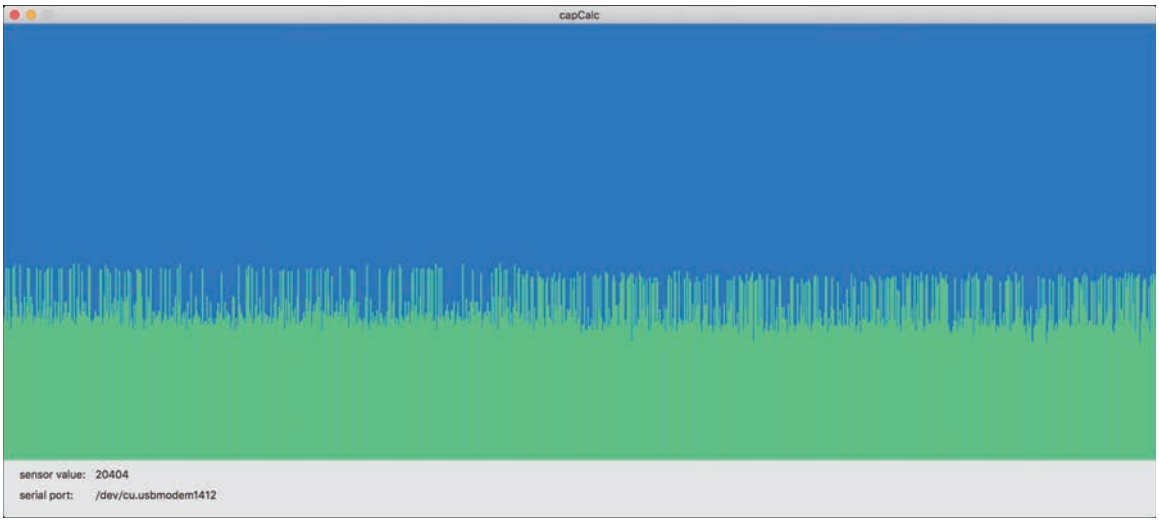


図 4.17: ユーザがアースをとらずにタッチを行った際の静電容量波形 (11 倍増幅).

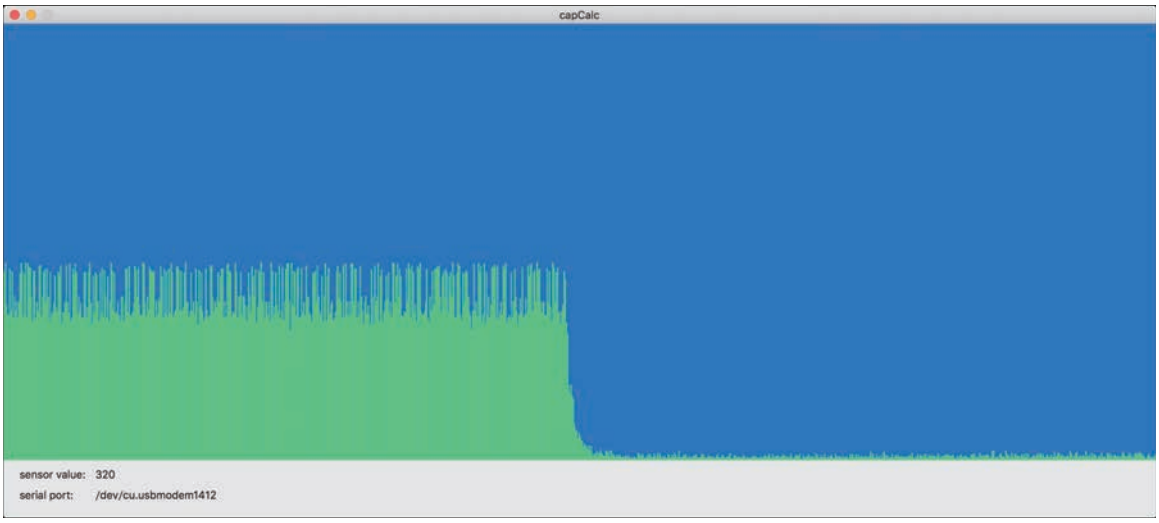


図 4.18: ユーザがアースをとりながらタッチを行った際の静電容量波形 (11 倍増幅).

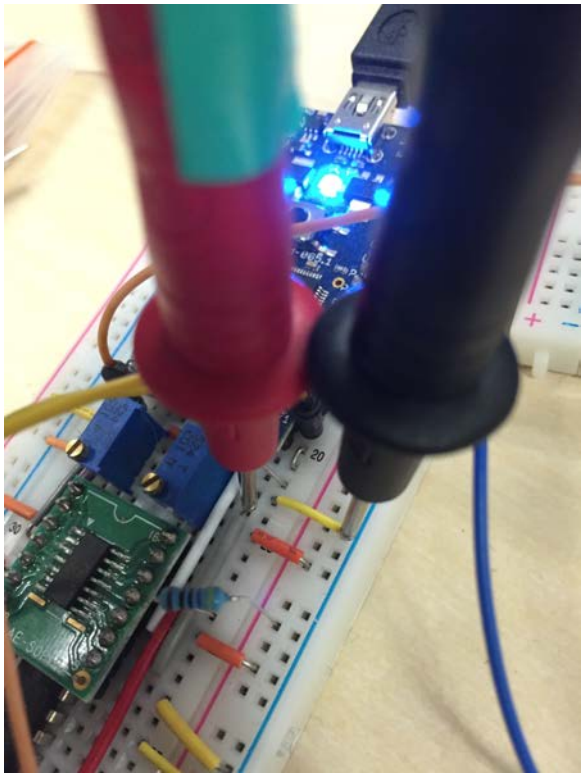


図 4.19: 閾値電圧を調整する様子．赤のプローブ左側にある 2 つの青色の可変抵抗を，それぞれ充電時用，放電時用の閾値電圧調整に用いる．

することで，オフセット (バイアス) 電圧，つまりセンサ値に常時載る直流成分の大きさを調整することができる．前提としてセンサ値は，非タッチで大きく，タッチした際には小さくなる．非タッチ時のセンサ値がサチュレーションしている場合，パルス B の HI 時間を調整することで, オフセット (バイアス) を下 げることができる．これをチューニングすることで, 無調整の際に値がクリップしており見かけのセンサ値の変化が微小になっていた症状も解決した．パルス B の HI 時間は 1 μs，LOW 時間は 49 μs である．

閾値電圧 V_t とパルス B のデューティー比を最適化しなかった場合と，した場合の充電時間のプロットをそれぞれ 図 **4.20** と 図 **4.21** に示す．閾値電圧 V_t とパルス B のデューティー比を最適化した場合は，最適化を行わなかった場合と比較し，タッチによる充電時間の変化がより明確になっていることが分かる．パルス B のデューティー比の調整は，マイクロコントローラ上のソフトウェアにて行った．

そのほかの注意点として，センシング回路に PC へのデータ転送機能を付加した際，静電容量の計測が正しく行われていない現象が観察された．このとき，ロジックアナライザでパルス波のタイミングを観察したところ，パルス A，パルス B が正しい先に設定したデューティー比のタイミングで送信されていないことが分かっていた．この調査を行った際，原因は，データの PC への送信と，パルスの送信のタイミングがコンフリクトしていることであると考えた．そこで，受信用と送信用として別々の mbed を利用したところ，パルスのタイミングが正しくなり，正しい測定が行えるよう になった．余談として，ハードウェアをコンパクトに実装する際は，パルスのタイミング出しがシビアになるため，現在のようなマイコンによるパルス生成は行わなず，外部 IC によるパルス生成を行うとよいと考えられる．

本回路における静電容量の計測可能範囲の調査

今回実装したセンシング回路が，どのような範囲の静電容量を計測することが可能かを調査した．様々な可変キャパシタをセンシング回路のタッチ電極とグラウンドに接続し，可変キャパシタのダイヤルを回転させながら，計測可能範囲を調査した (図 **4.22**)．様々な容量の範囲の可変キャパシタを接続した結果，100 p – 500 pF 程度が最適な範囲であることが分かった．このときの結果を 図 **4.23**，図 **4.24** に示す．時間に従って可変キャパシタの容量を変更している．図 **4.23** は可変キャパシタを連続的に動かした場合のセンシング回路の応答，図 **4.24** は可変キャパシタを段階的に動かした場合のセンシング回路の応答である．横軸が時刻をあらわし，縦軸が静電容量をあらわす．図中のプロット下部において水平になっている部分が，500 pF をあらわし，図中のプロット上部の山頂部分が，100 pF をあらわす．ここから，100 p – 500 pF にかけて，精密に静電容量を測定できていることができていることが観察できる．もしも今回の実装よりも大きな容量のキャパシタンスを測定したい場合は，図 **4.10** の R1 について，より小さな抵抗を用い，小さなキャパシタンスを測定したい場合は，大きな抵抗を用いることでこれが可能となる．

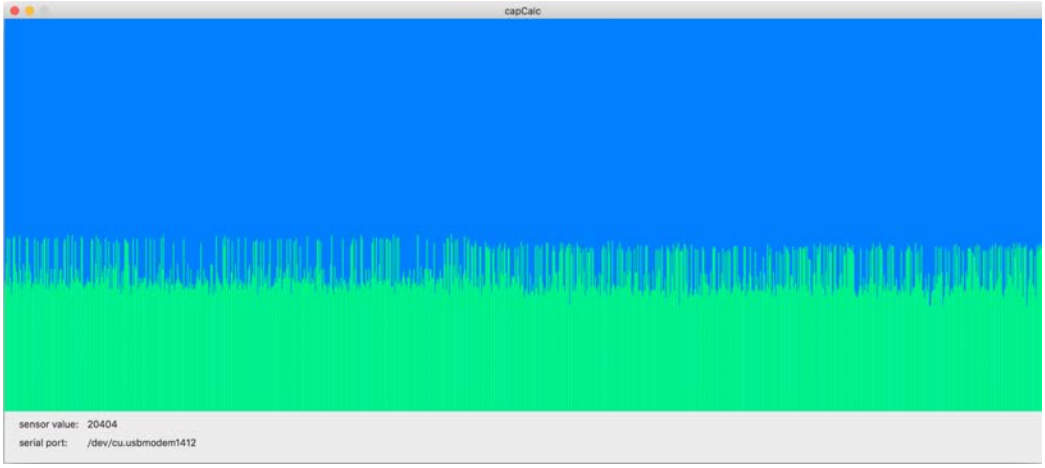


図 4.20: 閾値とデューティー比を最適化していない場合のタッチ反応．左半分: 非タッチ時．右半分: タッチ時．

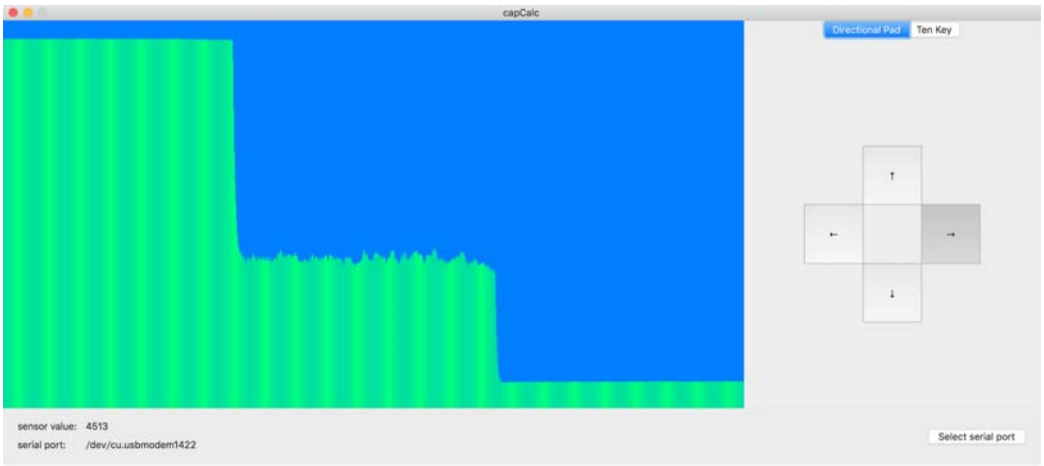


図 4.21: 閾値とデューティー比を最適化した場合のタッチ反応．左: 非タッチ時．中央: タッチ時．右: アース時．

図 4.22: 静電容量の計測可能範囲を調査するために使用した可変キャパシタ.

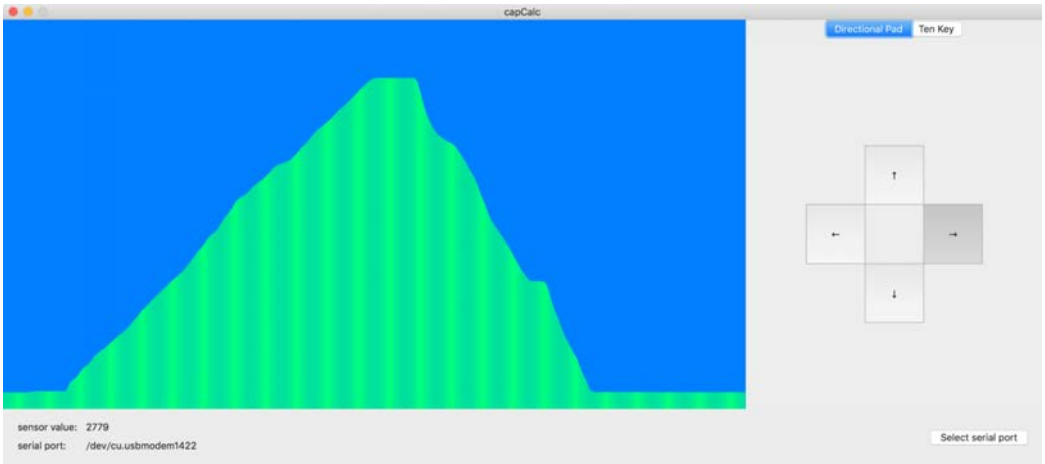


図 4.23: 可変キャパシタを連続的に動かした場合のセンシング回路の応答 (手ブレを含む).

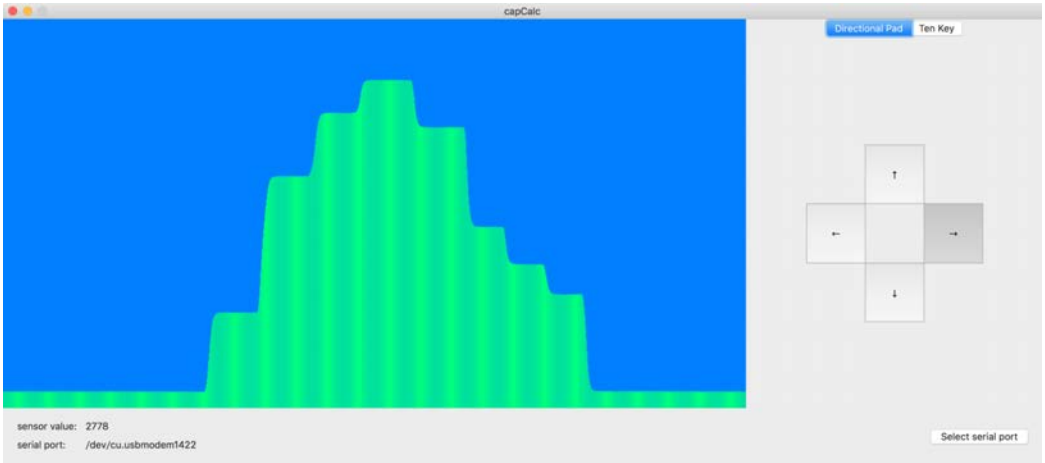


図 4.24: 可変キャパシタを段階的に動かした場合のセンシング回路の応答.

ユーザの姿勢がタッチセンシングに与える影響の調査

ユーザの姿勢がセンサ値に与える影響について簡単な実験を行った．着座，起立姿勢において，それぞれ足の接地状況を変化させた際のセンサ値の大きさと，2 種類のキャパシタをタッチした際のセンサ値の差を観察した．足の接地時は，靴下またはスリッパまたはその両方を着用するものとした．その結果，着座，起立姿勢は静電容量に関係が見られなかった．また，靴下やスリッパの影響はみられなかった．しかし足の接地状態によってセンサ値とその差に影響が見られた．着座姿勢の際に両足を接地している場合と，接地していない場合のそれぞれにおいて，2 種類の異なる容量の印刷キャパシタ電極をタッチした際のセンサ値のプロットを 図 **4.25** に示す．接地あり (図 **4.25** 左半分) の場合は，接地なし (図 **4.25** 右半分) の場合に比べ，センサ値が大きく反応し，かつ 2 種のキャパシタのセンサ値の差も大きかった．よって，足を浮かせた状態の場合は，通常のように足を接地した場合と比較して，センサ値の変化がある程度小さくなると言える．歩行時のような接地の不安定は状況においては，センサ値の変動の程度が変動することが考えられるが，日常的な使用においては足を浮かせた姿勢をとることは少ないと考えられるため，これは問題とはしない．

電極を直接タッチしない場合の調査

直接電極をタッチしないタッチ方法について調査した．まず既知の手法として，電極の上に紙を敷いてノイズ低減を図った．この手法にノイズ低減の効果はあったが，センサ値が大幅に減少してしまい，識別が不可能となったため，不採用とした．次に，紙上の電極に近い部分に対するタッチを行った際の波形を観察した．印刷キャパシタの付近の紙上に指を置いたまま，印刷キャパシタからタッチ点の距離を変化させると，それに従ってわずかに容量のプロットが増減した．またこのとき，ノイズはなく安定していた．一種のタッチ位置検出にはなっているが，変化が観察しづらいため，この手法は今後の発展課題とする．また，電極

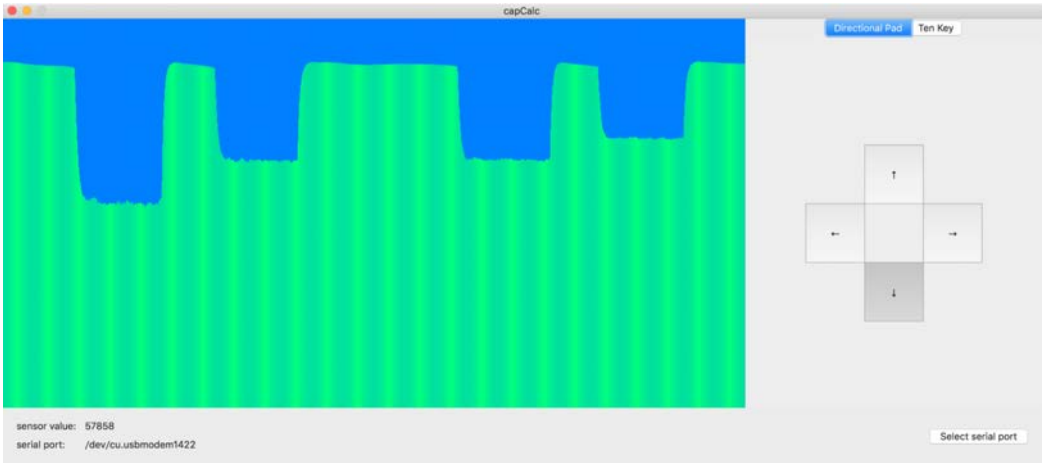


図 4.25: 両足による接地がタッチセンシングに与える影響．左: 両足接地時．右: 両足非接地時．

上方の空間に手をかざした際，静電容量がわずかに変化し，ホバー検出が行える可能性が観察された．

4.3 実証用アプリケーション

複数の電極を単一結線にて識別する精度を評価するため，実証用のアプリケーションを作成した．アプリケーションの形態はテンキー (Numeric Keypad) とした．これは 10 の印刷キャパシタをもつ 11 のタッチ電極 (図 **4.26**) と，タッチセンサ回路 (図 **4.9**)，PC の識別ソフトウェア (図 **4.27**) によって構成される．

4.3.1 印刷テンキー

作成したテンキーを 図 **4.26** に示す．これは大きく 2 つの部位に分かれる．図上部が印刷キャパシタ部，図下部がタッチ電極部である．

キャパシタ部は，印刷用紙の表裏両面における銀ナノ印刷部分によって構成される．キャパシタ部の表面は，面積の異なる印刷部分が 10 個配置されている．キャパシタの種類 (個数) は，4.1.3 節のデザインガイドラインに従い決定した．これらの形状は，キャパシタ部の総面積を省略しつつ，各印刷部の面積を増やす目的によって，コの字型となっている．キャパシタ部の裏面は，表面の印刷部の総面積を覆う単一の矩形が印刷されている．以上の表裏の印刷部により，10 種類の印刷キャパシタが構成される．この裏面部分に対し，センサ基板に接続するための単一結線が接続される．

タッチ電極部は，キャパシタ部の表面それぞれの印刷部からタッチしやすいテンキーの形に引き延ばされた形状とする．ユーザはこのタッチ電極部をテンキーとしてタッチすることで，ソフトウェアに対し入力を行う．エンターキーが縞模様なのは，これが各印刷キャパシ

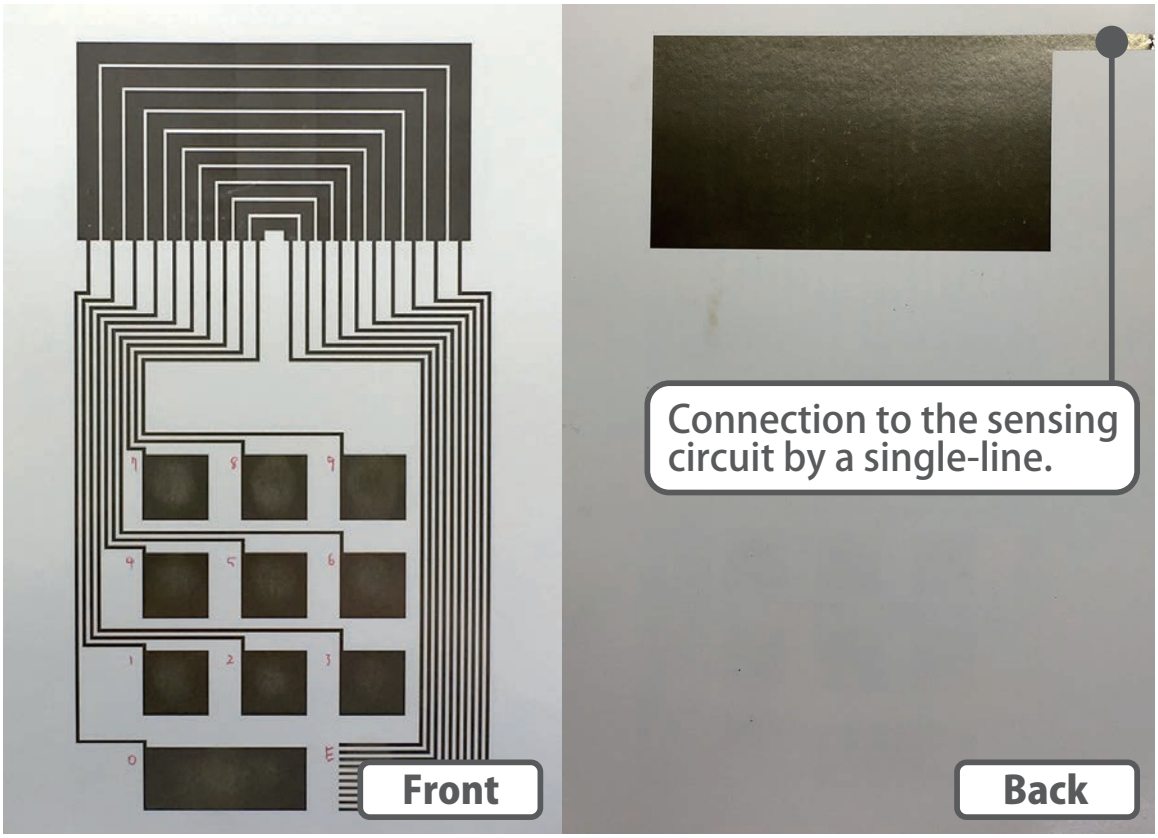


図 4.26: 印刷キャパシタによるテンキー．左: 表．右: 裏．裏の印刷部はセンシング回路の単一結線に接続される．

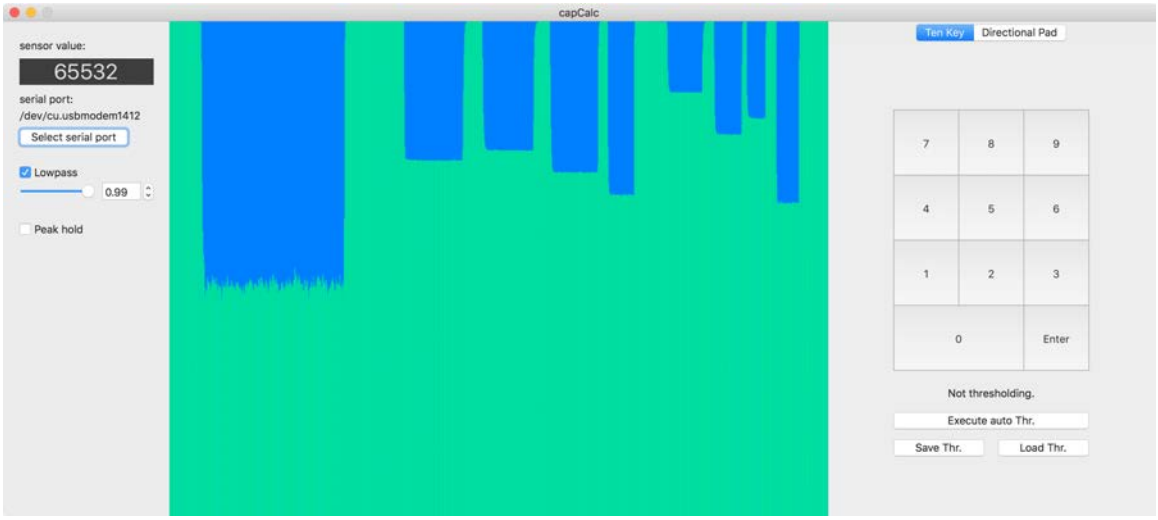


図 4.27: センサ値を受信し，タッチ電極の検出，可視化を行うソフトウェア．

タを全てタッチするようなキーとなっているためである．よって，他のどのキーをタッチした場合よりも最も大きな静電容量が観察される．また，この部分を塗りつぶすと全ての印刷キャパシタが短絡されてしまうため，非タッチ時はこのように絶縁された形状になっている．よってキーが必ずしもこの形状である必要はない．以上のような手法により，デザイナーは，印刷キャパシタの数を抑えながらキーの種類を増やすことが可能となる．このように，印刷キャパシタを用いたタッチセンシング回路は，印刷のデザイン如何によりその利便性を向上させることが可能である．

4.3.2 検出ソフトウェア

テンキーに対するタッチを PC において検出し，可視化するソフトウェア (図 **4.27**) を作成した．ソフトウェアは大きく 3 つの表示領域に分かれる．左側は，センサ値を表示したり，シリアルポートの選択，ソフトウェアにおけるローパスフィルタの調整などを行う．中央は，センサ値をプロットする領域である．横軸が時間軸をあらわし，縦軸がセンサ値をあらわす．緑のプロットがセンサ値である．センサ値が小さいほど，タッチ時のの静電容量が大きい．右側は仮想テンキーの表示部分である．

センサ回路は USB によって PC に接続され，シリアル通信によってセンサ値が PC に送信される．ソフトウェアは USB 接続した回路からシリアル通信にて送られるセンサ値を使用し，閾値ベースでキーの検出を行う．ユーザはテンキーの使用前に，電極を順番にタッチする．よって，キャリブレーションが必要となる．ユーザはテンキーの使用前に，電極を順番にタッチする．このときソフトウェアは，各印刷テンキーをタッチした際のセンサ値を，自動的に各仮想テンキーに対応させる．電極を一通りタッチし終われば対応付けは完了である．これ以降，ユーザは任意の電極，つまりキーに触れることで，ソフトウェア側において対応するキーがハイライト表示される．

ソフトウェアは Mac OS X において，Cocoa/AppKit，OpenGL 等を用いた高速なネイティブアプリケーションとして作成した．

4.4 本章のまとめ

本章では，まず，図 **1.4** に示すような，単一結線という単純性を保ちながら，入力可能な電極数を増やし，多電極中のそれぞれの電極へのタッチ操作を識別可能とするタッチセンサである RootCap を構成するハードウェアであるセンシング回路と，両面印刷キャパシタの実装を詳細に紹介した．次に，両面印刷キャパシタの特性を探るための予備調査，ならびにデザインガイドラインを示した．$R = 10\,\mathrm{k}\Omega$ を用いる今回の実装においては，印刷キャパシタは $1000\,\mathrm{mm}^2$ を超えない範囲で作成し，最大の面積をもつキャパシタと，その他のキャパシタの面積の差をできるだけ大きくするように，印刷キャパシタの面積を設計することが適当であることを示した．また，静電容量を計測するタッチ検出回路の実装における工夫と改良を示した．ユーザが明示的にアースをとらないような日常的な使用環境においては，静電容量計

測に用いるパルスのデューティー比と，充放電完了時の電圧を決定する閾値電圧の最適化が鍵であることを明らかにした．最後に，以上の実装を利用する，実証用アプリケーションの例を解説した．

第5章　評価

タッチジェスチャは，離散的なもの (シングルタップやダブルタップなど) と，連続的なもの (スワイプやドラッグなど) に大きく分けることができる．よって，今回はこの 2 種類について実験を行った．まず，離散的なタッチジェスチャの 1 つとして，個別のキーに対するタッチを挙げ，この場合の精度評価を行った．また，連続的なタッチジェスチャの 1 つとして，上下左右 (十字方向) のスワイプを挙げ，この場合の精度評価を行った．加えて，ホバージェスチャが検出可能であるか，ホバージェスチャがタッチジェスチャと組み合わせて検出可能かを検証した．

5.1　実験 1: 多電極検出

単一結線によりセンシング回路に接続されるタッチ電極への，離散的なタッチジェスチャについて識別精度を評価する実験を行った．

5.1.1　実験目的・概要

これまで，単一結線によりセンシング回路に接続される複数のタッチ電極を，デザインガイドラインをもとに設計した．このタッチ電極を使用し，各電極の識別精度を評価する実験を行った．また，デザインガイドラインに従って作成した両面印刷キャパシタの種類 10 個が妥当な種類数であるかも検証した．実験は被験者実験とし，複数の被験者によるタスク試行の結果から，多電極に対する離散的なタッチジェスチャ操作の識別精度を評価した．

5.1.2　セットアップ

実験に使用したタッチ電極のデザインは，図 **4.26** の通りである．これは 0 から 9 までの数字と Enter の 11 個のキーをもつテンキーである．Enter が最も静電容量が大きく，0 がその次に大きく，9 が最も小さい設計となっている．このデザインを印刷した A4 型の両面印刷用紙を，実験用のタッチ電極シートとした．被験者はこれらの電極を個別にタッチする．それにともない，ソフトウェアにおいて，入力されたキーを示すボタンがハイライト表示される．センサ値の収集，表示，フィルタ操作，タッチされたキーの判定を行う実験ソフトウェアの実行用の PC として，Mac Book Pro Retina 15-inch Late 2013 (2.6 GHz Intel Core i7, 16 GB 1600 MHz DDR3, NVIDIA GeForce GT 750M 2048 MB) を使用した．PC におけるソフトウェ

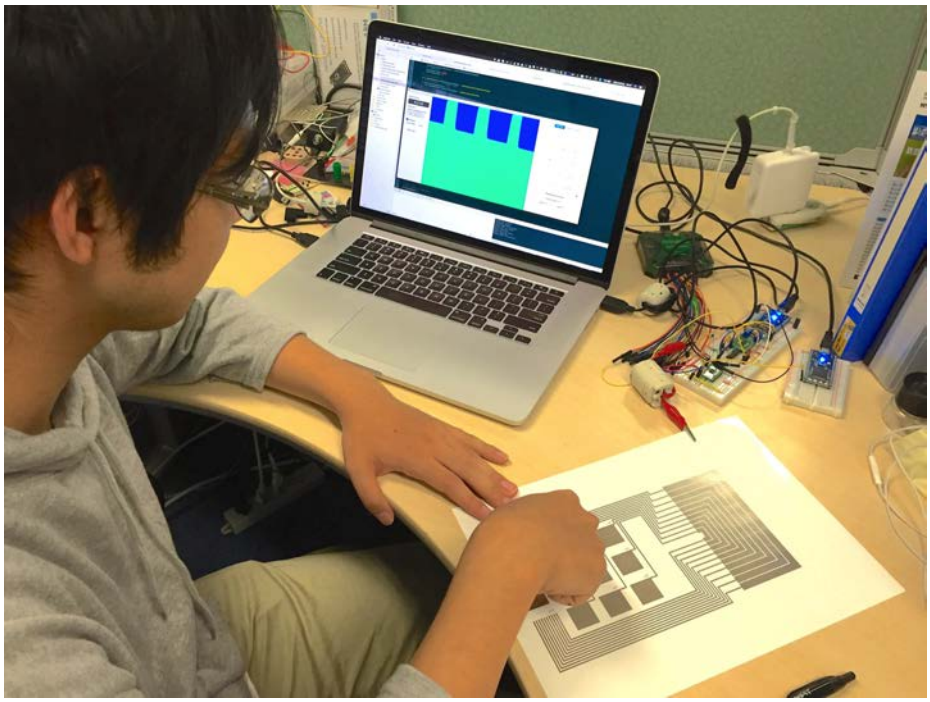


図 5.1: 実験の様子.

アは，Mac OS X において，Cocoa/AppKit，OpenGL を用い作成した．センシング回路にて各種波形の生成，充電時間の計測，充電時間をセンサ値として PC に送信するために使用したマイクロコントローラとして，ARM プロセッサを搭載した，MXP 社製のマイクロコントローラである mbed LPC1768 を使用した．マイクロコントローラにおけるソフトウェアは，mbed Online Compiler において C++ を用い作成した．タッチ電極シートを構成する両面印刷キャパシタとタッチ電極を印刷するため，プリンタとして Brother DCP-J525N，銀ナノインクとして Mitsubishi Paper Mills Limited NBSIJ-MU01，両面印刷用紙として KOKUYO KJ-G23A4-30 を用いた．被験者は 21 から 24 歳の 8 名である．被験者は着座姿勢にて実験を行った．椅子に深く腰掛け，左手によりタッチ電極を印刷した紙面の非電極部分を軽く保持し，右手人差し指にて各電極へのタッチを行った．

5.1.3 タスク

被験者ははじめに，キャリブレーションのため，テンキーのキーを 1 つずつ決められた順番でタッチする．これにより，各キーをタッチしたときのセンサ値と，そのときのキーの対応付けが，PC 上のソフトウェアにて行われる．被験者はその後，精度評価を行うために指示された順番に電極をタッチする．8 人の被験者によって各キーが 24 回タッチされ，全てのキーは 264 回タッチされた．実際にタッチしたキーと，ソフトウェアにおいて応答するキーが正しく対応しているかを記録し，多電極に対する離散的なタッチジェスチャ操作の識別精度を評

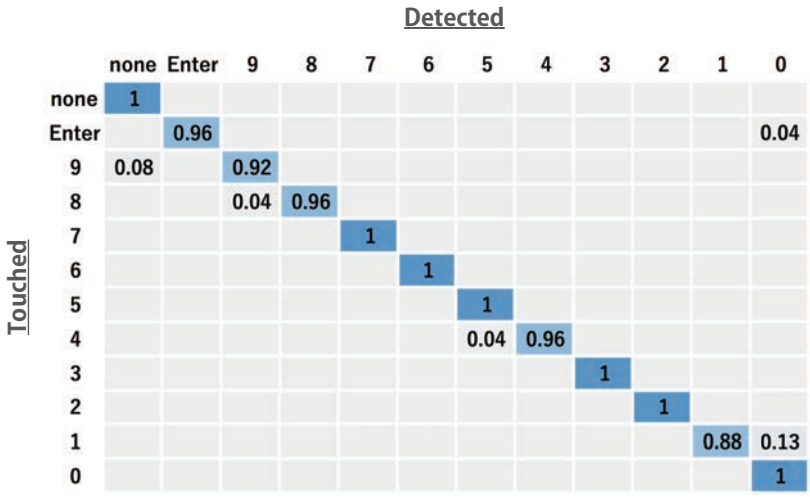


図 5.2: テンキーにおける離散的なタッチ電極検出の識別精度.

価した．また，本システムの使用感について質的評価を行った．評価方法として，5 段階リッカート尺度を用いたアンケート調査を用いた．

5.1.4 実験結果

まず，この実験における各キーの識別結果を，識別精度をあらわす混合行列として 図 **5.2** に示す．縦軸が，被験者が実際にタッチしたキー，横軸がソフトウェアにおいて判定されたキーである．全てのキーの識別精度の平均は，97.2%であった．ここで，最も識別精度が低いのは，キー 1 である．

次に，タッチされたキーごとの識別精度の標準偏差 (被験者ごとのばらつき) を 図 **5.3** に示す．この見方からも，最も識別精度の安定性が低いのは，キー 1 であることがわかる．

本システムの使用感について質的評価として行った 5 段階リッカート尺度を用いたアンケート調査を行った中から，使用感に特に関わる項目を以下に示し，これらの項目に対する回答結果を 図 **5.4** に示す．

- Q2. 本システムは使いやすかったですか？
- Q4. 本システムはラピッドプロトタイピングにおいて有用であると思いますか？
- Q5. 本システムをラピッドプロトタイピングにて使用してみたいと思いますか？

5.1.5 考察

キー 1 は全キーのなかで容量が 3 番目に大きいキーで，530 pF である．デザインガイドラインを参考にすると，この容量付近では静電容量の大小が観察しづらくなることがわかる．式

SD of accuracy per key (Total)												
	none	Enter	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
none	0	0	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Enter	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11
9	0.14	0	0.14	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0.11	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0.11	0.11	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.23
0	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0

図 5.3: キーごとの識別精度の標準偏差 (被験者ごとのばらつき).

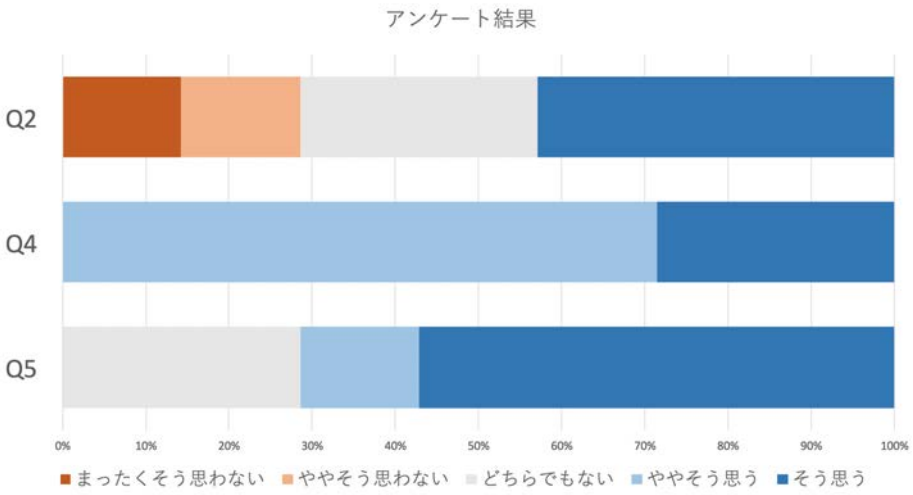


図 5.4: 5 段階リッカート尺度によるアンケート結果.

4.4 より，Key 1 をタッチした際の合成容量は，式 **4.4** の C_n に 530 pF を，C_h に 222 pF を代入して解くと，156 pF となる．ここで，合成容量を示した 図 **4.7** を見ると，140 pF 周辺から静電容量増加量の収束が強くなっていることがわかる．よって Key 1 の周辺から，合成容量の変化を観察することが困難になり，識別精度が低下すると言える．よって今回の実装においては，デザインガイドラインに従うと，10 個程度が単一結線のみで識別するのに妥当な段階数であると考えられる．また，5 段階リッカート尺度による使用感評価から，今回作成したハードウェアと識別段階数によるラピッドプロトタイピングにおけるタッチ入力手法は，ユーザによる使用に耐えるものであることが示唆された．

5.2 実験 2: ジェスチャ検出

単一結線によりセンシング回路に接続されるタッチ電極への，動的かつ連続的なスワイプジェスチャについて識別精度を評価する実験を行った．

5.2.1 実験目的・概要

動的なかつ連続的な 4 種類のジェスチャを識別する実験を行った．これまで，単一結線によりセンシング回路に接続される複数のタッチ電極を，デザインガイドラインをもとに設計した．このタッチ電極をジェスチャに適したデザインに変更して使用し，タッチ電極へのスワイプジェスチャについての識別精度を評価する実験を行った．実験は被験者実験とし，被験者によるタスク試行の結果から，多電極に対する連続的なタッチジェスチャ操作の識別精度を評価した．

5.2.2 セットアップ

電極のデザインは 図 **5.5** であり，4 種類の印刷キャパシタとこれにつながる電極を持つ．このデザインを印刷した A4 型の両面印刷用紙を，実験用のタッチ電極シートとした．被験者はこの電極を 図 **5.6** のようにタッチすることで，4 種類のスワイプジェスチャを入力する．各スワイプジェスチャにおいて 2 個の電極がタッチされる．各スワイプジェスチャを行ったときの静電容量波形は 図 **5.7** のようになる．この波形において，1 つのジェスチャによって 2 連続する波形のノッチ部分の値の差を求め，これをジェスチャ固有の値とし，ジェスチャを識別する．この値は実験を通して固定とした．ソフトウェアにおいては入力されたジェスチャを示すボタンがハイライト表示される．実験 1 (5.1 節) と同様，センサ値の収集，表示，フィルタ操作，タッチされたキーの判定を行う実験ソフトウェアの実行用の PC として，Mac Book Pro Retina 15-inch Late 2013 (2.6 GHz Intel Core i7, 16 GB 1600 MHz DDR3, NVIDIA GeForce GT 750M 2048 MB) を使用した．PC におけるソフトウェアは，Mac OS X において，Cocoa/AppKit, OpenGL 等を用い作成した．センシング回路にて各種波形の生成，充電時間の計測，充電時間をセンサ値として PC に送信するために使用したマイクロコントローラとして，ARM プロセッ

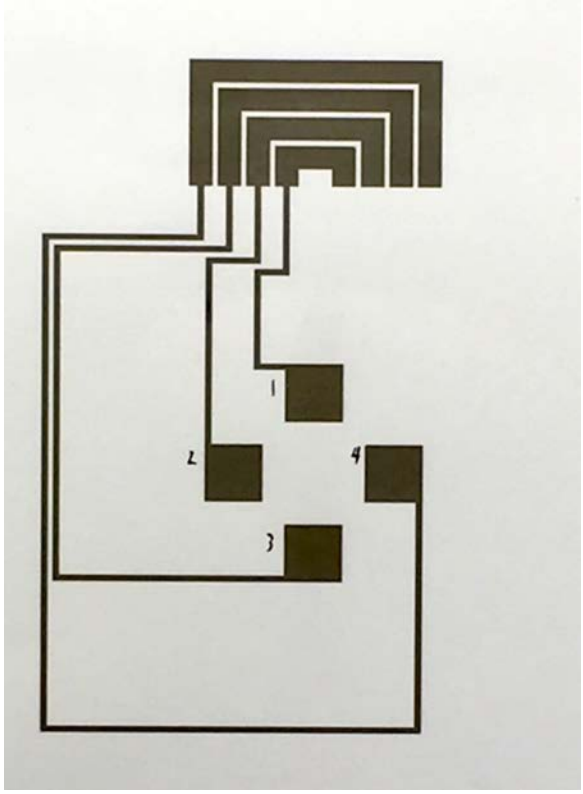


図 5.5: ジェスチャを行うためのタッチ電極のデザイン.

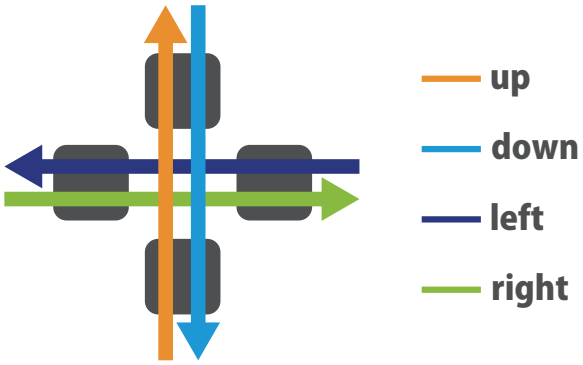


図 5.6: 検出する 4 種類のジェスチャ．上，下，左，右の 4 種類.

図 5.7: 4 つのジェスチャを行った際のセンサ値のプロット．左から右に，上，下，左，右のジェスチャを行った際の波形．

サを搭載した，MXP 社製のマイクロコントローラである mbed LPC1768 を使用した．マイクロコントローラにおけるソフトウェアは，mbed Online Compiler において C++ を用い作成した．タッチ電極シートを構成する両面印刷キャパシタとタッチ電極を印刷するため，プリンタとして Brother DCP-J525N，銀ナノインクとして Mitsubishi Paper Mills Limited NBSIJ-MU01，両面印刷用紙として KOKUYO KJ-J23A4-30 を用いた．被験者は 24 歳 1 名である．被験者は着座姿勢にて実験を行った．椅子に深く腰掛け，左手によりタッチ電極を印刷した紙面の非電極部分を軽く保持し，右手人差し指にて各スワイプジェスチャを行った．

5.2.3 タスク

被験者は 4 ジェスチャを順不同でそれぞれ 10 回ずつ入力し，これを 1 トライアルとした．このトライアルを 10 回行い，各ジェスチャは 100 回入力された．実際に入力したジェスチャと，ソフトウェアにおいて応答するジェスチャが正しく対応しているかを記録し，多電極に対する連続的なタッチジェスチャ操作の識別精度を評価した．

5.2.4 実験結果

この実験の結果を，混合行列として 図 **5.8** に示す．横軸が，被験者が実際に入力したジェスチャ，縦軸がソフトウェアにおいて判定されたジェスチャである．全てのジェスチャの識別精度の平均は，96.8%であった．

Gestured \ Detected	up	down	left	right
up	0.89	0.01	0.09	0.01
down		1		
left	0.02		0.98	
right				1

図 5.8: スワイプジェスチャ検出の識別精度.

5.2.5 考察

結果から，up と，left またはその他のジェスチャが混同されやすい傾向にあった．これは，up と left の信号が似ていること，up は指がスムーズにスライドしづらく，入力の値が安定しない場合があることが要因であると考えられる．

5.3 実験 3: ホバー検出

単一結線によりセンシング回路に接続されるタッチ電極への,「ホバーあり」「ホバーなし」という離散的なホバージェスチャについて識別精度を評価する実験を行った．

5.3.1 実験目的・概要

テンキー型タッチ電極を使用し，電極上におけるホバージェスチャの識別精度を評価する実験を行った．実験は被験者実験とし，被験者によるタスク試行の結果から，電極に対する離散的なホバージェスチャ操作である「ホバーあり」「ホバーなし」の識別精度を評価した．また本実験においては，テンキーに対するタッチジェスチャの検出と共通のプログラムを用いることにより，タッチ検出とホバー検出の共存が可能であるかを同時に調査した．

5.3.2 セットアップ

実験に使用したタッチ電極のデザインは，実験 1 と共通の 図 **4.26** である．このデザインを印刷した A4 型の両面印刷用紙を，実験用のタッチ電極シートとした．被験者はこれらの電極を全て覆うように，かつ直接触らないよう，直上に手をかざす．それにともない，ソフトウェアにおいて，ホバージェスチャを行っているか否かが出力される.「ホバーあり」「ホバーなし」を識別する際の閾値は経験的に求めた．被験者は 24 歳 1 名である．被験者は着座姿勢にて実験を行った．椅子に深く腰掛け，左手によりタッチ電極を印刷した紙面の非電極部分を軽く保持し，右手掌によりホバージェスチャを行った．

図 5.9: テンキーにおいて離散的なホバージェスチャを 10 回行った際の静電容量波形の例.

5.3.3 タスク

被験者は，精度評価を行うために指示された回数，電極に対するホバージェスチャを行う．被験者によって 1 セット 20 試行のホバージェスチャを 10 セット行い，合計 200 回の試行を行った．実際にホバージェスチャを行ったか否かと，ソフトウェアにおいて応答するホバージェスチャ検出を照らし合わせ，多電極に対する離散的なホバージェスチャ操作の識別精度を評価した．ホバージェスチャを 10 回連続で行った際の静電容量波形の例を 図 **5.9** に示す．

5.3.4 実験結果

離散的なホバージェスチャの識別精度の平均は，95.5%であった．ソフトウェアが誤答を行った際の誤答は，全て「ホバーなし」であった．

5.3.5 考察

図 **5.9** のように，ホバージェスチャを行った際の静電容量波形の応答は，タッチジェスチャやスワイプジェスチャを行った場合と比較し，十分にセンサ値の変化が小さいことが観察された．また，ホバージェスチャとタッチ，スワイプジェスチャを同時に検出するソフトウェアにおいて，ホバージェスチャを行った際の誤答は，全て「ホバーなし」であり，タッチジェス

チャやスワイプジェスチャと混同することはなかった．つまりこれは，ホバーと，タッチジェスチャやスワイプジェスチャを識別することができることを意味する．これを利用し，タッチ検出と共存したホバー検出を行うことが可能となった．同様に，スワイプジェスチャ検出とホバー検出が共存できる可能性も考えられるため，今後さらに調査を進めるものとする．

5.4 本章のまとめ

はじめに，単一結線によりセンシング回路に接続される 11 種類のタッチ電極への，離散的なタッチジェスチャについて識別精度を評価する実験を行った．全てのキーの識別精度の平均は，97.2%であった．また 10 段階目付近のキーから識別の精度が低下し，標準偏差が拡大した．よって今回の実装においては，デザインガイドラインに従い，10 個程度が単一結線のみで識別するのに妥当な段階数であると考えられた．また，本システムの使用感についての質的評価として，5 段階リッカート尺度を用いたアンケート調査を用いた．この結果，今回作成したハードウェアと識別段階数によるラピッドプロトタイピングにおけるタッチ入力手法は，ユーザによる使用に耐えるものであることが示唆された．

次に，単一結線によりセンシング回路に接続されるタッチ電極への，動的かつ連続的なスワイプジェスチャについて識別精度を評価する実験を行った．全てのジェスチャの識別精度の平均は，96.8%であった．各ジェスチャの実験結果から，各ジェスチャを行った際に発生する波形ができるだけ異なるようにタッチ電極の静電容量を設計することと，どの方向にもスワイプが行いやすいタッチ電極の配置を行う事が識別率向上に有効である可能性が示唆された．

最後に，単一結線によりセンシング回路に接続されるタッチ電極への，離散的なホバージェスチャについて識別精度を評価する実験を行った．離散的なホバージェスチャの識別精度の平均は，95.5%であった．図 **5.9** のように，ホバージェスチャを行った際の静電容量波形の応答は，タッチジェスチャやスワイプジェスチャを行った場合と比較し，十分にセンサ値の変化が小さいことが観察された．これを利用し，タッチ検出と共存したホバー検出を行うことが可能となったといえる．同様に，スワイプジェスチャ検出とホバー検出が共存できる可能性も考えられるため，今後さらに調査を進めるものとする．

第6章　ラピッドプロトタイピングにおけるアプリケーション例

ラピッドプロトタイピングにおいて，本論文の手法を実際に適用した例を示す．

6.1　エルゴノミックキーパッド

実験に使用したテンキーのようなデザインを用いることにより，デザイナは，平面，曲面，またはフレキシブルな表面をもつキーパッドを作成することができる．その例として作成したエルゴノミックキーパッドを 図**6.1** に示す．今回，各キーが異なる静電容量を示す 図**6.2** ようなパタンを作成することにより，PC のソフトウェアと連携し，ショートカットキーパッドなどを作成した (図**6.3**)．この図のように，ペーパークラフトの手法を用いることにより，デザイナは印刷キャパシタなどの印刷パタンをプロトタイプの内部に入れ込んだようなデザインを行うことも可能となる．以上のように，多電極のキーパッドのプロトタイプなどを，単一結線のみにより実現することが可能である．これによりデザイナは，形状とレイアウトの自由度の高いタッチ電極と，プロトタイプの筐体を作成することができる．また，6.6 節に示すような，ステープラー芯などによる両面印刷用紙の表裏貫通などを用いれば，外面のデザインを洗練させることもできる．

6.2　インタラクティブなオーナメント

本手法を用いて，日常生活で用いるような装飾をインタラクティブなオーナメントとしてプロトタイピングすることも可能となる (図**6.4**)．オーナメントに取り付けたタッチ電極に触れることで，電飾の操作を行う．

6.3　自動車や家電のコントロールパネル

家電や自動車の大型な操作パネルやその UI 開発においては，そのデザインを何度もイテレーションすることが必要である．更に現在は，自由な曲面やフチの形状をもったパネルが市場に出てきており，将来は種々の技術の向上により一般的になることが予測される．このような操作パネル上のタッチインタフェースについてのラピッドプロトタイピングにおいて，

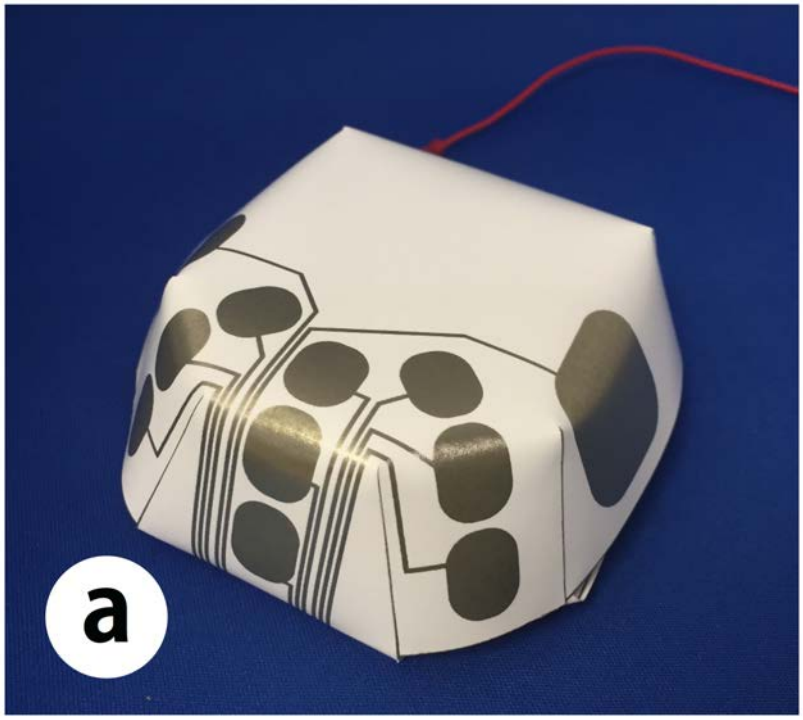


図 6.1: エルゴノミックキーパッドの外観.

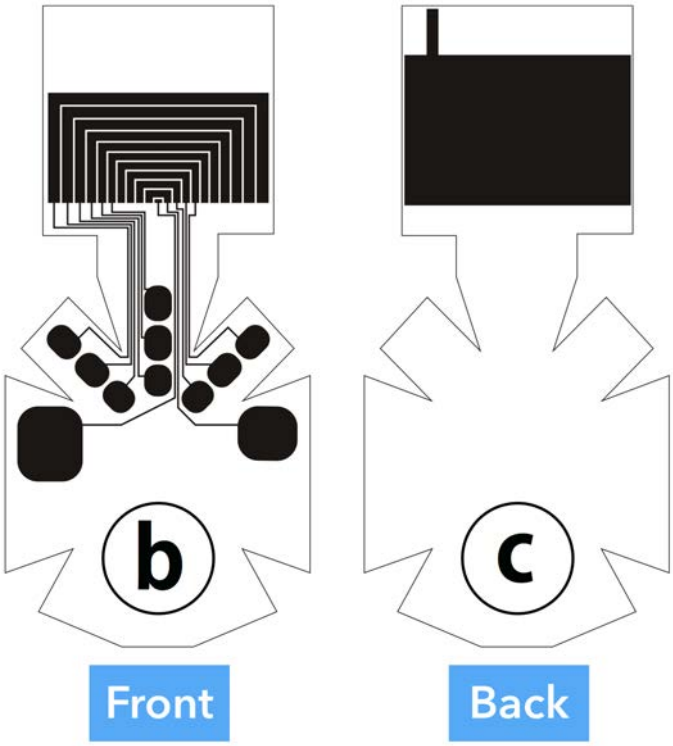


図 6.2: エルゴノミックキーパッドの印刷キャパシタならびにタッチ電極と配線のパターン.

図 6.3: エルゴノミックキーパッドの使用例 (ショートカットキーパッド).

図 6.4: インタラクティブなオーナメントの例.

図 6.5: 自動車のステアリング上におけるコントロールパネルの例.

自由な配置と自由な形状のタッチ面を単一結線のみにより実現可能な本手法は，開発効率に大きく寄与すると考えられる.

今回の手法により，自動車のステアリング曲面に沿ったコントロールボタンを作成した (図 **6.5**, 図 **6.6**). クラクション部分と，ステアリング左内側に，これらの曲面に沿うように電極を貼り付けた. 本手法のハードウェアと電装系を接続することにより，自動車の各種電子操作が可能となる.

6.4 建築モデルにおけるタッチ操作面

また建築におけるラピッドプロトタイピングのような分野においても，本手法は価値を提供する. 例えば，スチレンボードや紙で作成する複雑な建築模型において，そのパーツに予め印刷電極を貼り付け本手法を適用しておくことにより，組み立てと同一の工程として，電飾などに対するタッチ操作機能を組み込むことが可能となる (図 **6.7**). 例えば 図 **6.7** においては，図右中央や下中央にタッチ電極が貼り付けられ，両面印刷キャパシタや配線パタンは模型

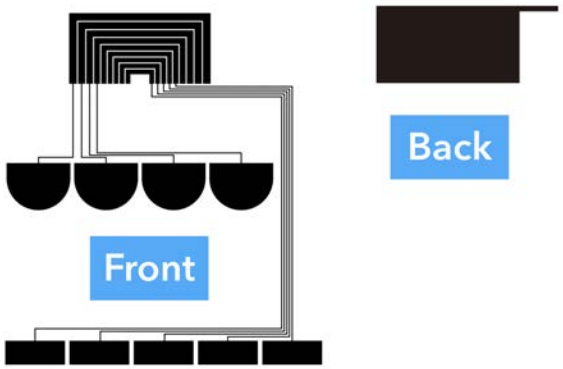


図 6.6: 自動車のステアリング上におけるコントロールパネルの印刷キャパシタならびにタッチ電極と配線のパターン.

図 6.7: 建築モデルのタッチ操作の例.

の底面に隠されており，タッチ電極をタッチすることにより模型の電飾を操作することができる．さらにこのような模型においては，電飾の配線の結線や取り回し，操作パネルの設計が大きなコストを占めるが，本手法を用いることでこのコストを削減することが可能である．

6.5 スライダ

本例は予備実験段階であるが，本論文の手法を用い，異なる静電容量を示す電極を線状にしてストライプ配置することにより，スライダを作成可能であると考えられる．このようなパタンを作成し，ストライプ上をタッチした指をスライドすることにより，指が複数のストライプをまたぐ．結果的に，時系列におけるセンサ値として複数の山形の波形が観察された．これにより，スワイプを行っている方向や，スワイプ中の位置を取得することが可能となることが考えられる．さらに簡単には，3 章のアイデアと試作において示したように，電極の形状をくさび形にするという工夫を加えることにより，単一電極のみによるスライダも実現可能である．また，くさび形の電極を複数直列方向に並べることによりさらにスライダの長さを拡張したり，円形に配置することによりダイヤルを構成することも可能である．

6.6 表裏導通

両面印刷用紙を貫通する工夫をすることにより，表裏両面の導電部を導通させることが可能となる．この手法を用いることにより，プロトタイプを設計する際，複雑な印刷パタンを裏面に隠したデザインが可能となり，審美面や入力面積の拡大に貢献することができると考えられる．今回，ステープラ芯による両面導通の試作を行った (図 **6.8**，図 **6.9**)．ステープラ芯により導通が実現することが確かめられた．しかし，ステープラ芯は圧着による導通であるため，タッチ操作による接触面のぶれが生じ，タッチ検出の安定性が低下することが明らかになった．銀ナノインク印刷の両面印刷貫通を模索した先行研究 [TFN+15] の手法を本手法と組み合わせることにより，タッチ検出の安定性を保持したまま，単一結線による入力面において，審美面や入力面積の拡大に貢献することができると考えられる．

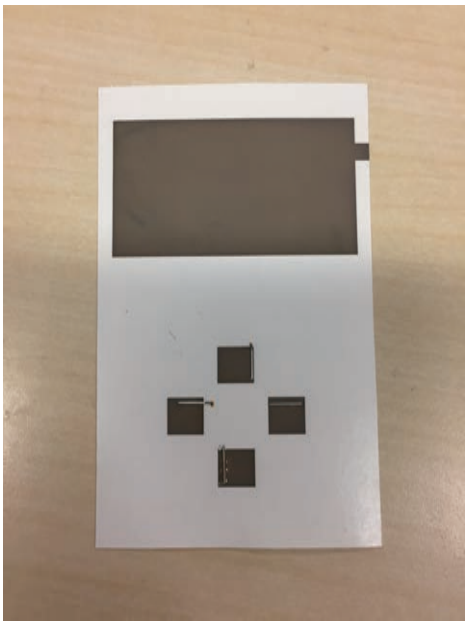


図 6.8: ステープラー芯による両面貫通の試作 (表).

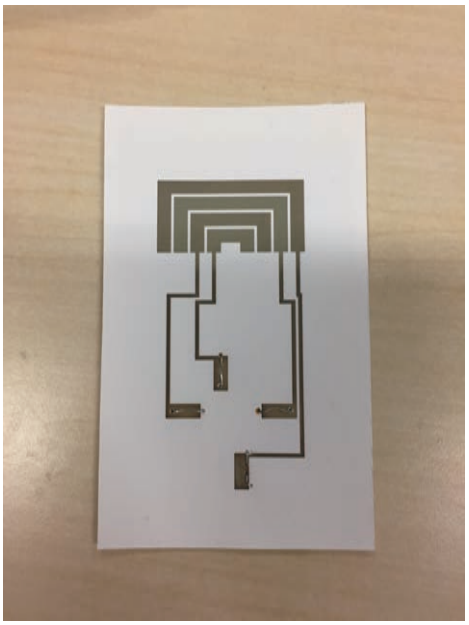


図 6.9: ステープラー芯による両面貫通の試作 (裏).

第7章　議論と今後の発展

今回の実装においては，識別可能な段階数に制限があることが示唆された．そこで，印刷面積の上限について，デザインガイドラインを示した．今後はこの上限までの範囲においてさらに細かい段階数で識別可能かを調査し，場合によっては段階数を向上する更なる工夫を行うことが考えられる．また，今回用いたものとは別の印刷用紙や銀ナノインクを用いた場合におけるデザインガイドラインを調査することも検討する．

また今回十分に識別可能であると示した段階数は 11 段階であった．ジェスチャ検出においても，例えば 図 **7.1** のように，最低 3 種類の静電容量をもつ電極を使用すれば 6 方向のジェスチャが検出可能であるため，実装面積は更に省略できる可能性がある．

ほかにも，[TST16] のような電極間隔の制約については，本手法を拡張することで解決可能であると考えられる．今回紹介しきれなかった例として，ダブルタップやトリプルタップが各電極において検出可能であることが，予備実験により明らかになっている．また，センシング回路はシンプルであるため，小型にパッケージングすることを予定している．

以上を単一結線によって識別可能としたことから，他にも応用の可能性が考えられる．例えば，結線数を減らしマルチプレクサ処理を減らすことは，高速なタッチ応答速度のタッチパネルを実現する糸口になる可能性がある．また今回実装を行わなかったタッチジェスチャとして，同時マルチタッチを可能とするための新たな設計の余地がある．

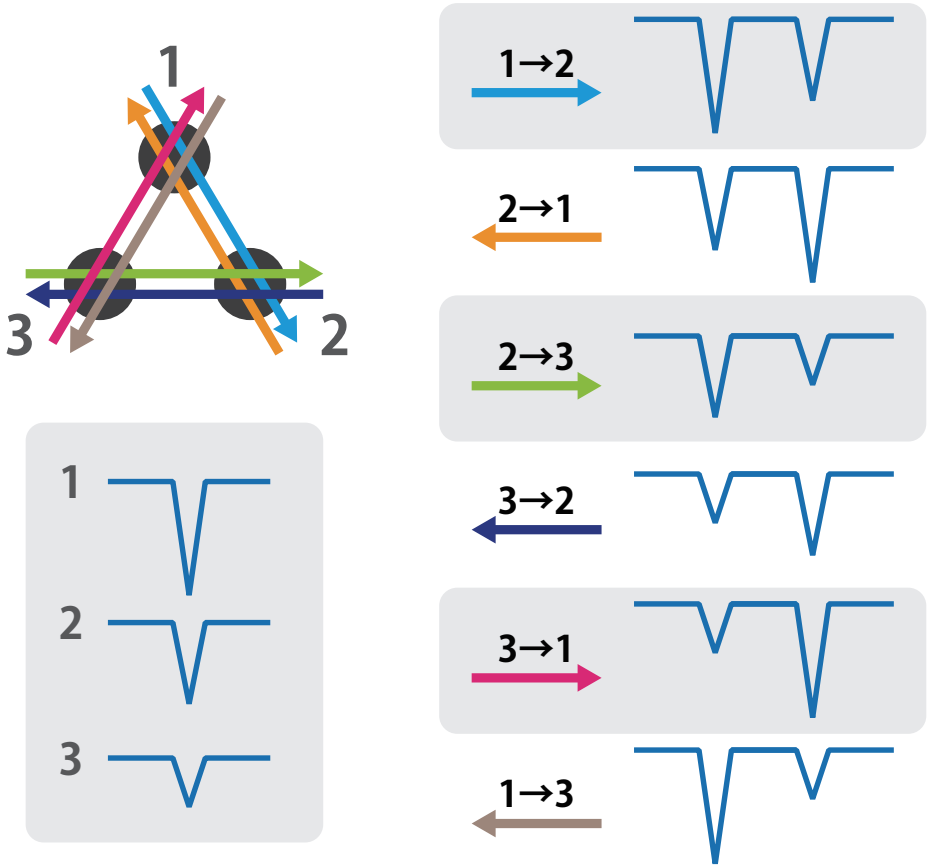


図 7.1: 3 種類のキャパシタによる 6 種類のスワイプジェスチャのイメージ.

第8章　結論

本論文では，図 **1.4** に示すような，多電極入力面に対するタッチ入力操作を，静電容量方式を用いたセンシングにより，単一結線のみを用いて検出する手法について新規に開発し，そのラピッドプロトタイピングにおける有用性について実験を行い，議論を行った．

まず，このような要件をみたす電極やハードウェアの実装を試作し，予備調査を行った．さらに，両面印刷用紙と銀ナノインクを用い，新たにラピッドプロトタイピングの現場において高速に作成可能な，両面印刷キャパシタを開発した．両面印刷キャパシタは，デザイナが，各電極が異なる静電容量をもった多電極入力面を，高い自由度の形状にて作成することをサポートする．予備調査を通して，印刷キャパシタの印刷面積と，これを人間がタッチした場合の充電時間，つまり静電容量の関係式を導出した．今回の単一結線タッチセンサの実装においては，10 段階程度が実用的な電極数であることがわかり，この最大面積を $1000\,\mathrm{mm}^2$ とするデザインガイドラインを設定した．

また，単一結線された 11 段階のキーを正しく識別できるか実験を行った．その結果，テンキーにおける離散的なタッチジェスチャの総識別精度は 97.2% であった．また，4 段階の単一結線された電極を用いて，4 種類のジェスチャを正しく識別できるか実験を行った．その結果，4 種類の動的かつ連続的なスワイプジェスチャの総識別精度は 96.8% であった．また，多電極上におけるホバージェスチャを正しく検出できるか実験を行った．その結果，ホバージェスチャあり，なしの検出精度は 95.5% であった．以上より，複数種類の入力を識別できるタッチセンサを，結線数と，実装面積を省略しながらにして実現可能であることが示された．

最後に，ラピッドプロトタイピングにおいて本手法を用いた入力面の事例を複数紹介し，本手法の有用性を示した．

以上から，本手法は，ラピッドプロトタイピングにおけるタッチ入力手法において，結線数を減らす，入力可能電極数を増やす，タッチセンサの形状やレイアウトの自由度を高めるという当初の要求を満たした．その結果，ラピッドプロトタイピングという文脈において，本手法の有用性が実証されたことを，ここに結論づける．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，指導教員である筑波大学大学院システム情報工学研究科の志築文太郎先生には，日頃より研究の相談や論文執筆，研究発表などにわたり，大変多くのご指導を賜りました．また，田中二郎先生，高橋伸先生，Simona Vasilache 先生，嵯峨智先生には，研究室内の全体発表などにおいて，多角的な視点からのご指導を賜りました．この結果，個人研究においてもグループ研究においても，筆頭著者として国際学会での登壇発表を行うことに叶いました．心より御礼申し上げます．

インタラクティブプログラミング研究室の皆様とは，日頃の構想や実装，実験など研究生活全般に渡り，互いに協力し，熱く意見を交わし，切磋琢磨しあえる，大変有意義な 2 年間をともにすることができました．たとえチームが異なっても，研究以外の生活であっても，同期のみなさまにはいつも支えて頂きました．また，研究の評価の際は，被験者としても実験に協力して下さり，有難うございました．大変お世話になりました．皆様に感謝申し上げます．休みない研究生活を根気強く支えてくださった家族にも感謝いたします．

最後に，大学院生活のすべてにおいて，支えてくださった家族，全ての先生，友人に感謝を申し上げ，謝辞といたします．

参考文献

[AN] ARM and NXP. mbed. `https://www.mbed.com` (accessed 2016-12-18).

[AR06] Yuji Ayatsuka and Jun Rekimoto. Active Cybercode: A directly controllable 2D code. In *CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '06, pp. 490–495, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[Bde09] Ayah Bdeir. Electronics as material: LittleBits. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '09, pp. 397–400, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[BVG08] Florian Block, Nicolas Villar, and Hans Gellersen. A malleable physical interface for copying, pasting, and organizing digital clips. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '08, pp. 117–120, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[CAMB13] Christian Corsten, Ignacio Avellino, Max Möllers, and Jan Borchers. Instant user interfaces: Repurposing everyday objects as input devices. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, pp. 71–80, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[CFK+04] Adrien Coyette, Stéphane Faulkner, Manuel Kolp, Quentin Limbourg, and Jean Vanderdonckt. SketchiXML: Towards a multi-agent design tool for sketching user interfaces based on USIXML. In *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Task Models and Diagrams*, TAMODIA '04, pp. 75–82, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[CH09] Enrico Costanza and Jeffrey Huang. Designable visual markers. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 1879–1888, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[CMRB12] Liwei Chan, Stefanie Müller, Anne Roudaut, and Patrick Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: Sensing stacks of building blocks, dials and sliders on capacitive touch screens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2189–2192, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[CS12] Beginner's Mind Collective and David Shaw. Makey Makey: Improvising tangible and nature-based user interfaces. In *Proceedings of the 6th International Conference*

on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '12, pp. 367–370, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[CU08] Vincent Chan and Steve Underwood. MSP430 capacitive single-touch sensor design guide, 2008. `http://www.ti.com/lit/an/slaa379/slaa379.pdf` (accessed 2016-12-18).

[DL01] Paul Dietz and Darren Leigh. DiamondTouch: A multi-user touch technology. In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '01, pp. 219–226. ACM, 2001.

[FI01] Osamu Fujiwara and Takanori Ikawa. Numerical calculation of human-body capacitance by surface charge method. *The IEICE Transactions on Communications*, Vol. 84, No. 10, pp. 1841–1847, 2001. (in Japanese).

[FT12] Adam Fourney and Michael Terry. PICL: Portable in-circuit learner. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 569–578, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[GB02] Saul Greenberg and Michael Boyle. Customizable physical interfaces for interacting with conventional applications. In *Proceedings of the 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '02, pp. 31–40, New York, NY, USA, 2002. ACM.

[GF01] Saul Greenberg and Chester Fitchett. Phidgets: Easy development of physical interfaces through physical widgets. In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '01, pp. 209–218, New York, NY, USA, 2001. ACM.

[GHdJ15] Kristian Gohlke, Michael Hlatky, and Bram de Jong. Physical construction toys for rapid sketching of tangible user interfaces. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pp. 643–648, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[GPBB+13] Tobias Grosse-Puppendahl, Yannick Berghoefer, Andreas Braun, Raphael Wimmer, and Arjan Kuijper. OpenCapSense: A rapid prototyping toolkit for pervasive interaction using capacitive sensing. In *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 152–159, 2013.

[GPBKK13] Tobias Grosse-Puppendahl, Andreas Braun, Felix Kamieth, and Arjan Kuijper. Swiss-cheese extended: An object recognition method for ubiquitous interfaces based on capacitive proximity sensing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference*

on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, pp. 1401–1410, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[GPHW+14] Tobias Grosse-Puppendahl, Sebastian Herber, Raphael Wimmer, Frank Englert, Sebastian Beck, Julian von Wilmsdorff, Reiner Wichert, and Arjan Kuijper. Capacitive near-field communication for ubiquitous interaction and perception. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '14, pp. 231–242, New York, NY, USA, 2014. 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. ACM, 2014.

[HAMK07] Björn Hartmann, Leith Abdulla, Manas Mittal, and Scott R. Klemmer. Authoring sensor-based interactions by demonstration with direct manipulation and pattern recognition. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, pp. 145–154, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[HH08] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Scratch Input: Creating large, inexpensive, unpowered 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.

[HKB+06] Björn Hartmann, Scott R. Klemmer, Michael Bernstein, Leith Abdulla, Brandon Burr, Avi Robinson-Mosher, and Jennifer Gee. Reflective physical prototyping through integrated design, test, and analysis. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, pp. 299–308, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[HM06] Scott E. Hudson and Jennifer Mankoff. Rapid construction of functioning physical interfaces from cardboard, thumbtacks, tin foil and masking tape. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, pp. 289–298, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[HV11] David Holman and Roel Vertegaal. TactileTape: Low-cost touch sensing on curved surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology*, UIST '11 Adjunct, pp. 17–18, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[HV12] Clemens Holzmann and Manuela Vogler. Building interactive prototypes of mobile user interfaces with a digital pen. In *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference*

on Computer Human Interaction, APCHI '12, pp. 159–168, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[HXSH14] Chris Harrison, Robert Xiao, Julia Schwarz, and Scott E. Hudson. TouchTools: Leveraging familiarity and skill with physical tools to augment touch interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2913–2916, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[Ish08] Hiroshi Ishii. Tangible Bits: Beyond pixels. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '08, pp. xv–xxv, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[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. ACM, 2015.

[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. ACM, 2013.

[KLLL04] Scott R. Klemmer, Jack Li, James Lin, and James A. Landay. Papier-Mache: Toolkit support for tangible input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, pp. 399–406, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[KM15] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. ExtensionSticker: A proposal for a striped pattern sticker to extend touch interfaces and its assessment. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1851–1854. ACM, 2015.

[Kod81] Hideo Kodama. Automatic method for fabricating a three‐dimensional plastic model with photo‐hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 52, No. 11, pp. 1770–1773, 1981.

[KPFS13] Mustafa Emre Karagozler, Ivan Poupyrev, Gary K. Fedder, and Yuri Suzuki. Paper generators: Harvesting energy from touching, rubbing and sliding. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 23–30, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[KSK01] Hideki Koike, Yoichi Sato, and Yoshinori Kobayashi. Integrating paper and digital information on enhanceddesk: A method for realtime finger tracking on an augmented desk system. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 8, No. 4, pp. 307–322, December 2001.

[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. ACM, 2015.

[LCC+13] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Liwei Chan, Chuan-Xhyuan Peng, Mike Y. Chen, Rung-Huei Liang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBits: Magnetic tangible bits for portable and occlusion-free near-surface interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 1391–1400, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[LJB15] Pedro Lopes, Patrik Jonell, and Patrick Baudisch. Affordance++: Allowing objects to communicate dynamic use. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2515–2524, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[LS] Arduino LLC and Arduino SRL. Arduino. `https://www.arduino.cc/` (accessed 2016-12-18).

[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.

[MI14] Hiroyuki Manabe and Hiroshi Inamura. Single capacitive touch sensor that detects multi-touch gestures. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, pp. 137–138. ACM, 2014.

[MJB+13] David A. Mellis, Sam Jacoby, Leah Buechley, Hannah Perner-Wilson, and Jie Qi. Microcontrollers as material: Crafting circuits with paper, conductive ink, electronic components, and an "untoolkit". In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '13, pp. 83–90, New York, NY, USA, 2013. 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. ACM, 2013.

[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 and Technology*, UIST '15, pp. 223–232. ACM, 2015.

[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. ACM, 2013.

[Ott09] Henry W. Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley, 2009.

[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. ACM, 2014.

[QB10] Jie Qi and Leah Buechley. Electronic popables: Exploring paper-based computing through an interactive pop-up book. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pp. 121–128, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[RA00] Jun Rekimoto and Yuji Ayatsuka. CyberCode: Designing augmented reality environments with visual tags. In *Proceedings of DARE 2000 on Designing Augmented Reality Environments*, DARE '00, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2000. ACM.

[Rek02] Jun Rekimoto. SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 113–120. ACM, 2002.

[RMMH+09] Mitchel Resnick, John Maloney, Andrés Monroy-Hernández, Natalie Rusk, Evelyn Eastmond, Karen Brennan, Amon Millner, Eric Rosenbaum, Jay Silver, Brian Silverman, and Yasmin Kafai. Scratch: Programming for all. *Communications of the ACM*, Vol. 52, No. 11, pp. 60–67, November 2009.

[SBSo12] Vinícius C. V. B. Segura, Simone D. J. Barbosa, and Fabiana Pedreira Simões. Uiskei: A sketch-based prototyping tool for defining and evaluating user interface behavior. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '12, pp. 18–25, New York, NY, USA, 2012. 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 photoreflectivity 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.

[SLO+12] Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Pinoky: A ring that animates your plush toys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 725–734, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[SON] SONY. Mesh. `http://agesage.co.jp/` (accessed 2016-12-18).

[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. ACM, 2012.

[SVGS07] Wolfgang Spiessl, Nicolas Villar, Hans Gellersen, and Albrecht Schmidt. VoodooFlash: Authoring across physical and digital form. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, pp. 97–100, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[SXG10] Greg Saul, Cheng Xu, and Mark D. Gross. Interactive Paper Devices: End-user design & fabrication. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pp. 205–212, New York, NY, USA, 2010. 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.

[TFN+15] Tung Ta, Masaaki Fukumoto, Koya Narumi, Shigeki Shino, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asami. Interconnection and double layer for flexible electronic circuit with instant inkjet circuits. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '15, pp. 181–190. ACM, 2015.

[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. ACM, 2016.

[VSH+12] Nicolas Villar, James Scott, Steve Hodges, Kerry Hammil, and Colin Miller. .net gadgeteer: A platform for custom devices. In *Proceedings of Pervasive 2012*. Lecture Notes in Computer Science, June 2012.

[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. ACM, 2011.

[WHZ+06] Manuela Waldner, Jörg Hauber, Jürgen Zauner, Michael Haller, and Mark Billinghurst. Tangible Tiles: Design and evaluation of a tangible user interface in a collaborative tabletop setup. In *Proceedings of the 18th Australia Conference on Computer-Human Interaction: Design: Activities, Artefacts and Environments*, OZCHI '06, pp. 151–158, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[WLB+15] Martin Weigel, Tong Lu, Gilles Bailly, Antti Oulasvirta, Carmel Majidi, and Jürgen Steimle. iSkin: Flexible, stretchable and visually customizable on-body touch sensors for mobile computing. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2991–3000, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[WWJ+09] Malte Weiss, Julie Wagner, Yvonne Jansen, Roger Jennings, Ramsin Khoshabeh, James D. Hollan, and Jan Borchers. Slap widgets: Bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 481–490, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[ZSP+95] Thomas G. Zimmerman, Joshua R. Smith, Joseph A. Paradiso, David Allport, and Neil Gershenfeld. Applying electric field sensing to human-computer interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, pp. 280–287. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

[宮田 14] 宮田章裕, 有賀玲子, 佐藤隆, 井原雅行, 山田智広. 貼り付けるだけで家具をインテリジェント化するデバイスのサービスデザイン検討 (五感メディア, 食メディア, ソーシャルメディア, マルチメディア, 仮想環境基礎, 映像符号化, クラウド, モバイル, ネットワーク, 及びこれらの品質と信頼性, 一般). 電子情報通信学会技術

研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 113, No. 470, pp. 139–144, Feb 2014.

[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.

[大江 13] 大江龍人, 志築文太郎, 田中二郎. Draw-to-map: 物理コントローラと GUI の対応付け手法. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI）, Vol. 2013, No. 3, pp. 1–8, Mar 2013.

著者業績リスト

本論文に関連する業績

査読付国際会議論文・登壇口頭発表

Masaya Tsuruta, Shuta Nakamae, 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.

本論文以外の業績

査読付国際会議論文・登壇口頭発表

Masaya Tsuruta, Shuhei Aoyama, Arika Yoshida, Buntarou Shizuki, Jiro Tanaka. Hover Detection using Active Acoustic Sensing. In Proceedings of 18th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2016), HCI(2), pp.104-114, July 2016.

査読付国際会議ポスター発表論文

Koshi Ikegawa, Masaya Tsuruta, Tetsuya Abe, Arika Yoshida, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi. Lightweight Capacitance-based Block System for 3D Space Interaction. In Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '16). pp.307-312.

査読無し国内会議ポスター発表論文

高田 崚介，奥村 彩水，木邑 和馬，神武 里奈，夛田 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．情報処理学会, インタラクション 2016, Mar 4, pp.850-854, B21.

高田 崚介，山路 大樹，夛田 一貴，早川 悠，鶴田 真也，志築 文太郎，田中 二郎．PINCH: ハンガー型屋外干し支援システム．情報処理学会, インタラクション 2016, Mar 4, pp.855-858, B22.

査読付国内論文誌論文

吉田 有花，鶴田 真也，池川 航史，阿部 哲也，志築 文太郎，田中 二郎．静電容量に基づくブロックシステム．コンピュータソフトウェア, Vol. 34．(採録決定済)

研究助成等 (学外)

独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA) 2012 年度 未踏事業 採択．縦空間・レイヤー融合構造直感的楽曲ファイルブラウザ．チーフクリエータ: 鶴田 真也．担当 PM: 越塚 登．

独立行政法人 日本学術振興会 2017 年度 特別研究員 DC1 採択．能動的音響計測を用いた物体表面・周囲におけるインタラクション手法の開発．登録名: 鶴田 真也．

奨学金

伊藤謝恩育英財団 (セブンアンドアイホールディングス)．給付型 奨学生．2011 年度 - 2014 年度．

日本学生支援機構．貸与型 第 1 種 第 2 種 奨学生．2015 年度 - 2016 年度．

受賞 (学外)

Gugen2015．PINCH: 高田 崚介，山路 大樹，夛田 一貴，早川 悠，鶴田 真也．Vstone 賞．

Mashup Awards 11 (2015)．Sukima NEWS: 早川 悠，鶴田 真也，夛田 一貴，山路 大樹，高田 崚介．学生部門賞．

Mashup Awards 11 (2015)．Pop Pepper: 夛田 一貴，山路 大樹，高田 崚介，早川 悠，鶴田 真也．アシアル賞，楽天 API 賞．

Mashup Awards 11 (2015)．PINCH: 高田 崚介，山路 大樹，夛田 一貴，早川 悠，鶴田 真也．優秀賞, SONY MESH 賞．

スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 全国大会 2010 年度．鶴田 真也，岩永 将輝，廣澤 亮太．日本学生科学賞．

受賞 (学内)

Chidori: 鶴田真也，高田崚介，川畑裕也．筑波大学 CS 専攻 組込プログラム開発 2015 年度．講義内相互投票 1 位，Freescale 賞．

そのほか研究・学業に関わる活動

チューター

NVIDIA GTC Japan 2016 DLI (Deep Learning Institute) ハンズオンセミナー.
(ディープラーニング講習における実習サポート，理論面等の質疑サポート)

テクニカルスタッフ

産業技術総合研究所 (AIST) 人間情報研究部門システム脳科学研究グループ.
(脳神経科学分野におけるディープラーニングの技術職員)

ティーチングアシスタント

プログラミング実習 IA 2015 年度 情報メディア創成学類.
プログラミング実習 IB 2015 年度 情報メディア創成学類.
プログラミング実習 II 2015 年度 情報メディア創成学類.

付 録 A

5 章における評価実験の際に用いた，実験依頼書，実験同意書，実験アンケートの用紙を示す.

A.1 実験依頼書

実験依頼書 01

実験日: 平成　　年　　月　　日
実験者/文責: 鶴田 真也

実験内容

1. 複数被験者について，印刷により作成した11個の電極を含む印刷操作子（以下「操作子」と称する）に対し，被験者が操作子の物理キーを順番にタッチすることで，PCにおける仮想キーとの対応を自動的に登録可能か観察する
2. また登録完了後，被験者が操作子において任意の物理キーをタッチした際，PCにおいて対応する仮想キーが正しく応答するかを観察する

使用機材

1. PC
2. テンキーのタッチ検出・閾値登録・表示を行うソフトウェア
3. センサ回路（静電容量計測回路・シリアル送信回路を含む）
4. 印刷操作子（今回は0~9とEnterの11個の物理キーを含むテンキーの形態をとる）

実験手順（所要時間: 10分）

1. [準備] 実験者はセンサ回路をPCに，操作子をセンサ回路に接続し，PCのソフトウェアとセンサ回路を起動する
2. [準備] 被験者は椅子に深く座り，両足を接地し実験に使用しない片手を膝上に置く姿勢をとる
3. [閾値登録] 被験者はソフトウェアの「Execute auto Thr.」ボタンを押下し，表示されるインストラクションに従い，操作子の物理キーを以下の順番にタッチする
   - Enter → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 2 → 1 → 0
4. [タッチ実行] 被験者は操作子の物理キーを以下の順番にタッチする．実験者はタッチされた物理キーとソフトウェアにおいて応答している仮想キーが正しく対応しているかを記録する
   - Enter → 9 → 8 → 7 → 6 → 5 → 4 → 3 → 2 → 1 → 0
5. [タッチ実行] 被験者は操作子の物理キーを以下の順番にタッチする．実験者はタッチされた物理キーとソフトウェアにおいて応答している仮想キーが正しく対応しているかを記録する
   - 0 → 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → Enter
6. [タッチ実行] 被験者は操作子の物理キーをランダムに10個タッチする．実験者はタッチされた物理キーとソフトウェアにおいて応答している仮想キーが正しく対応しているかを記録する
7. 手順4-6を繰り返す
8. 被験者は操作感について自由な感想を口述し，実験者はこれを記録する

備考・注意事項

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．実験を通していかなる形式で得られた個人を特定可能な情報について，実験終了とともに速やかに破棄します．また，個人を特定不可能な情報についても，実験結果の評価以外の用途での使用は行いません．

A.2 実験同意書

実験同意書 01

実験日: 平成　　年　　月　　日
実験者/文責: 鶴田 真也

この度は実験にご協力いただき、ありがとうございます.

実験内容

1. 複数被験者について，印刷により作成した11個の電極を含む印刷操作子（以下「操作子」と称する）に対し，被験者が操作子の物理キーを順番にタッチすることで，PCにおける仮想キーとの対応を自動的に登録可能か観察する
2. また登録完了後，被験者が操作子において任意の物理キーをタッチした際，PCにおいて対応する仮想キーが正しく応答するかを観察する

確認事項

- 本実験の目的は，「実験内容」の通りです
- 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
- 実験中に、写真および動画の撮影を行う場合がありますが、これは実験の様子を撮影するために行い、その写真および動画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
- 実験を通していかなる形式で得られた個人を特定可能な情報について，実験終了とともに速やかに破棄します
- 個人を特定不可能な情報についても，実験結果の評価以外の用途での使用は行いません.

同意確認

以上の全ての内容について同意のもと実験に参加することを表明します.　　平成　　年　　月　　日

所属＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿　氏名＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿
説明者: 所属＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿　氏名＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

A.3　実験アンケート

実験に関するアンケート 01

実験日: 平成　　年　　月　　日
実験者/文責：鶴田 真也

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.　本システムは使いやすかったですか？

（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

理由

3.　「ラピッドプロトタイピング」という言葉を聞いたことがありますか？

はい・いいえ

4.　本システムはラピッドプロトタイピングにおいて有用であると思いますか？

（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

理由

5.　本システムをラピッドプロトタイピングにて使用してみたいと思いますか？

（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

理由

6.　本システムについて，改善すべき点，感想をご記入ください．

改善すべき点 その他・感想

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．

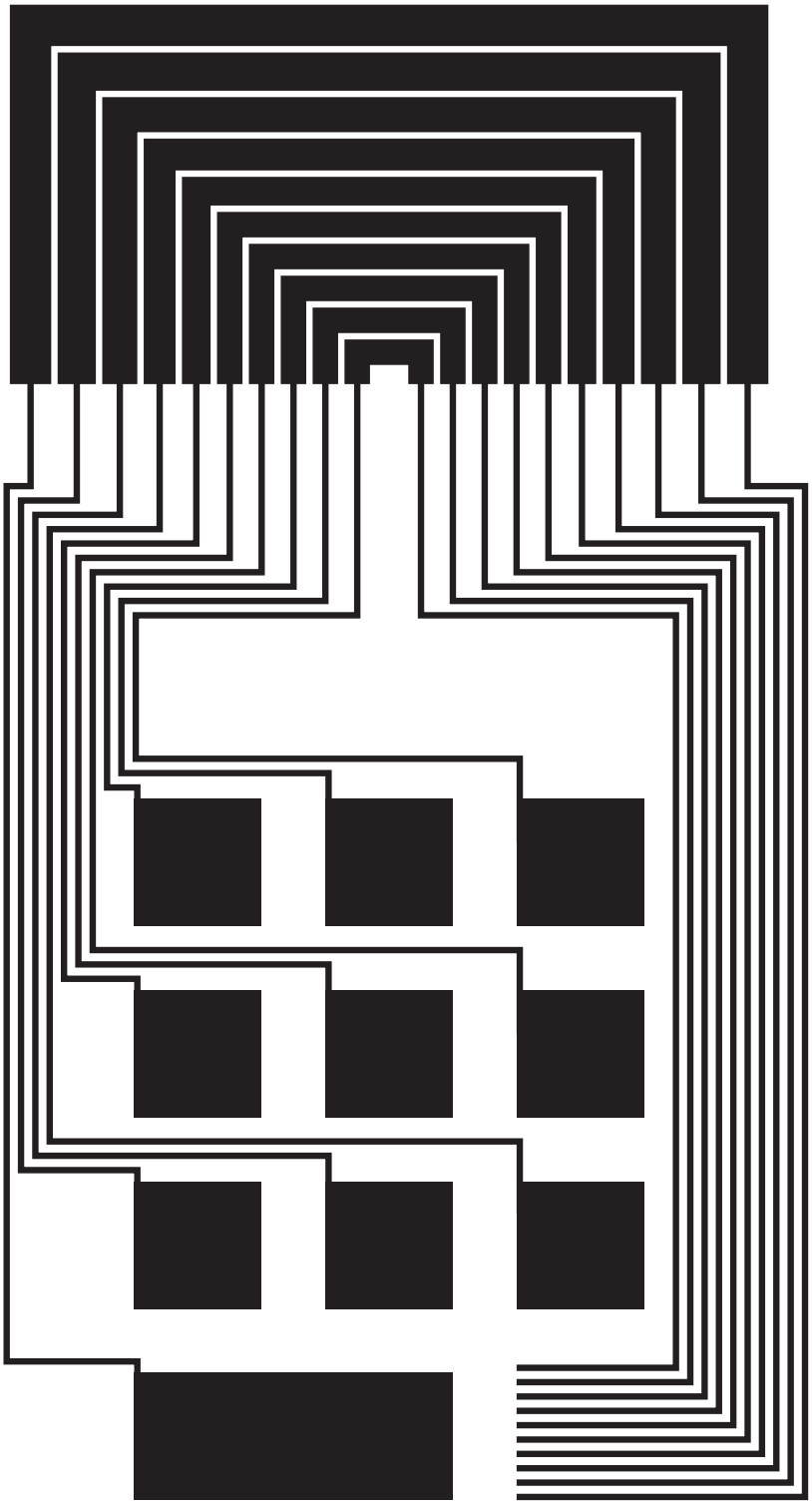
付 録B

本論文における実装にて使用した両面印刷キャパシタとタッチ電極のデザインを原寸にて示す.

B.1　予備実験用両面印刷キャパシタ (表)

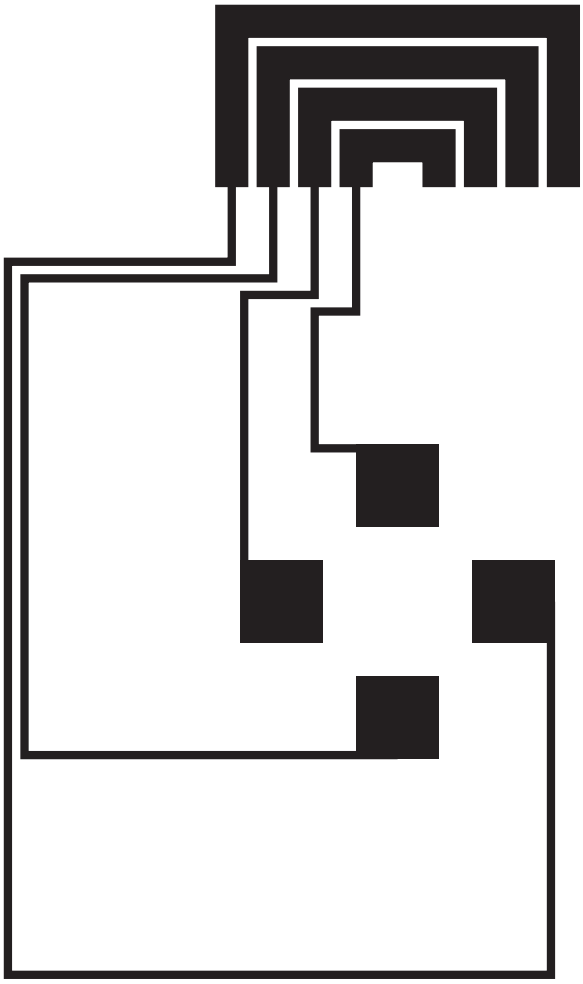
B.2　予備実験用両面印刷キャパシタ (裏)

B.3　両面印刷キャパシタによるテンキー (表)



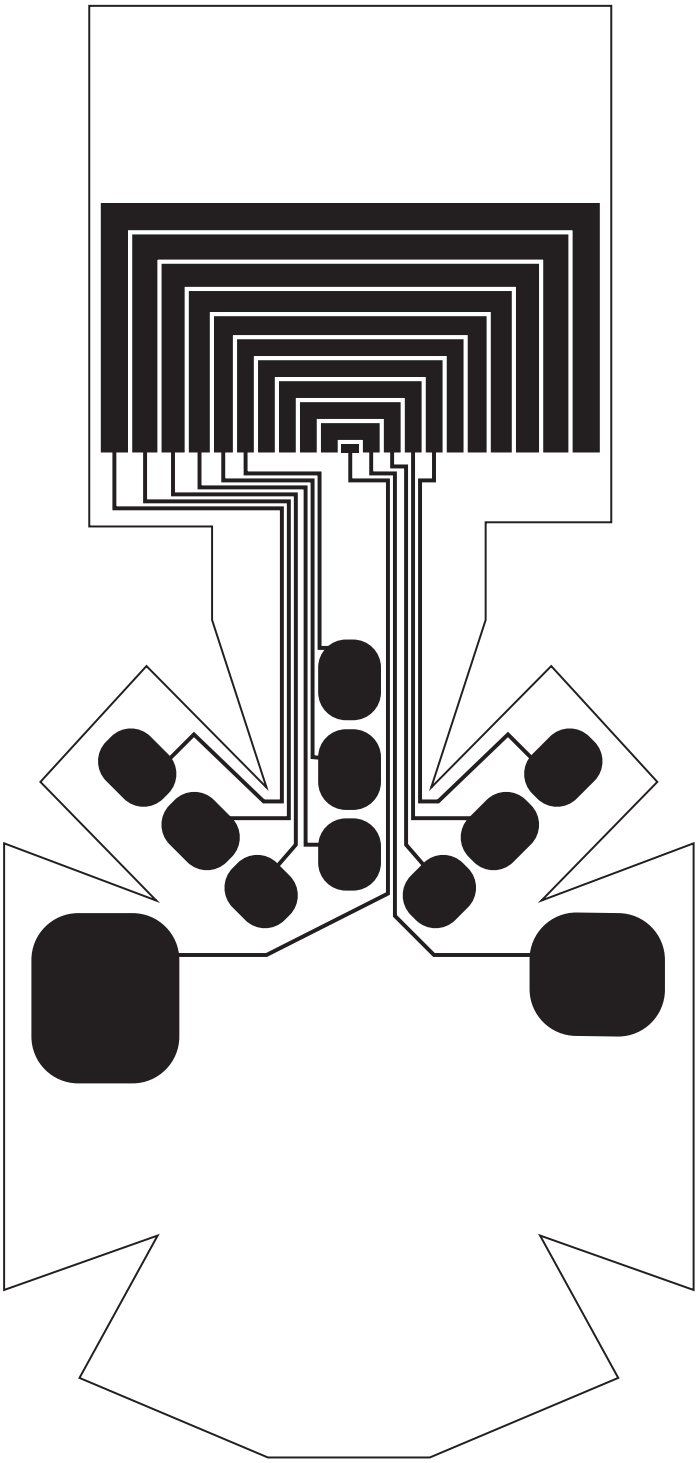
B.4　両面印刷キャパシタによるテンキー (裏)

B.5　両面印刷キャパシタによるジェスチャキー (表)

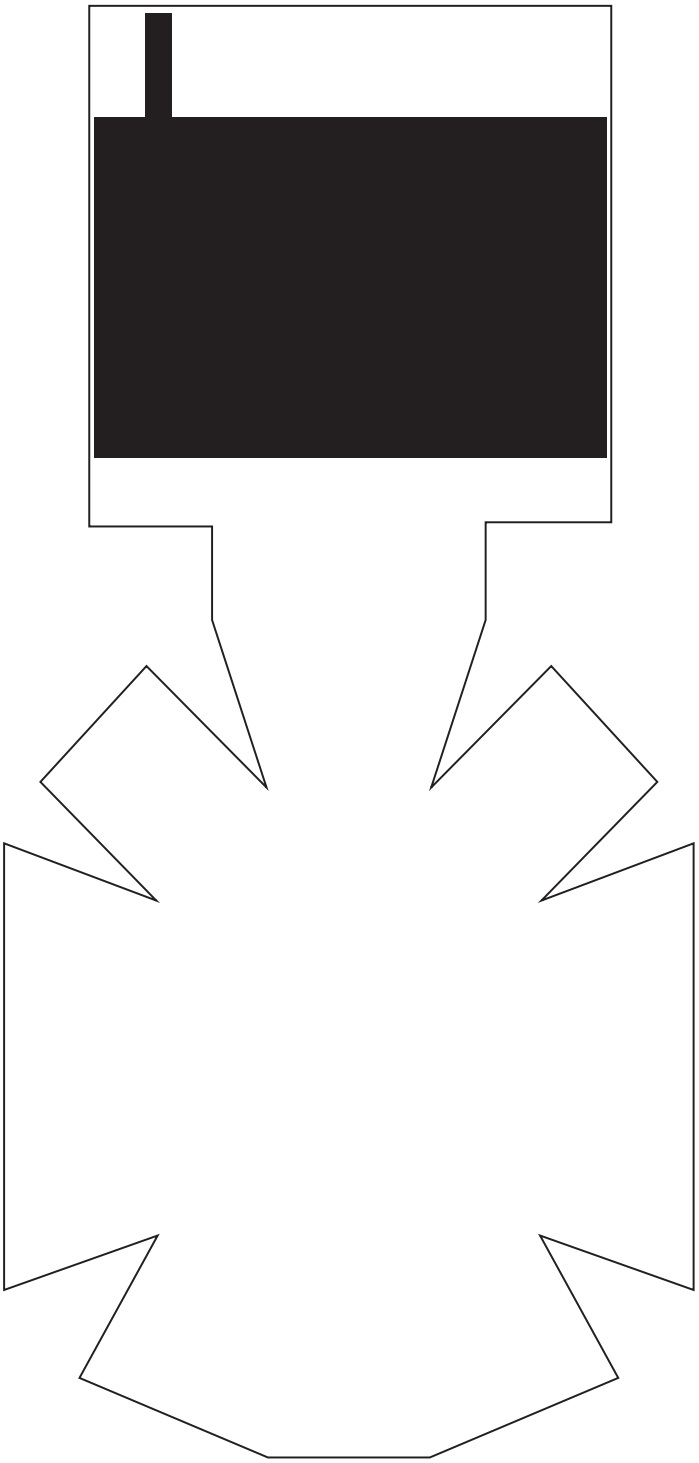
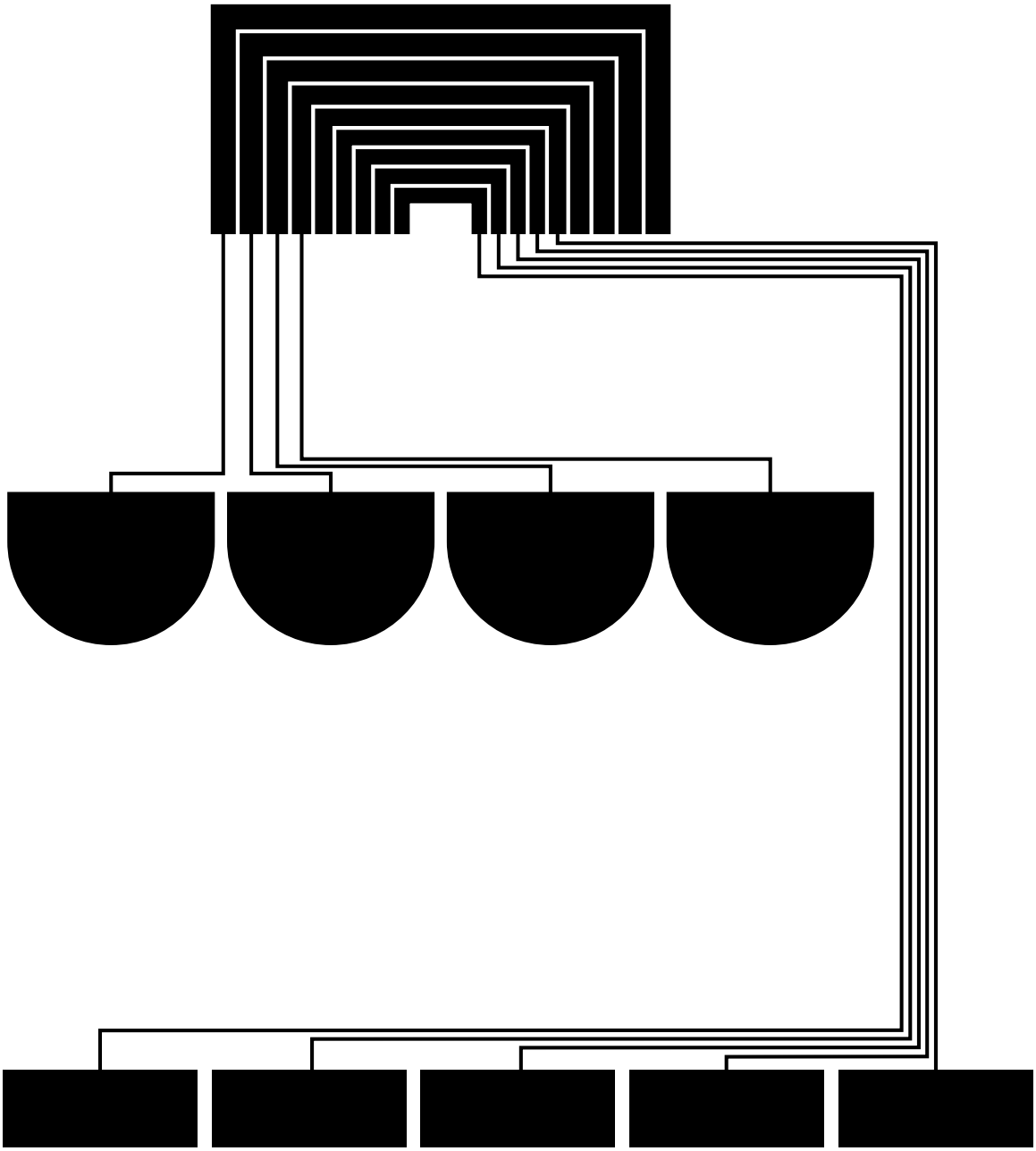


B.6　両面印刷キャパシタによるジェスチャキー (裏)

B.7　両面印刷キャパシタによるコントロールパッド (表)



B.8　両面印刷キャパシタによるコントロールパッド (裏)



B.9　ステアリング表面におけるコントロールパッド (表．裏は省略)