

# 直列に接続した電極を用いたタッチ検出手法

真鍋 宏幸<sup>1,a)</sup> 山田 渉<sup>1</sup>

受付日 2018年4月20日, 採録日 2018年7月10日

**概要:** コンデンサを介して直列に接続した電極を用いたタッチ検出手法を提案する. 両端の2つの電極を検出回路と結線するだけで, 複数の電極がそれぞれタッチセンサとして機能する. 簡便な実装でタッチセンサの数や大きさ, 配置を柔軟に変更することができ, タッチインタラクションをプロトタイピングする際に有効である. 本稿では, 提案手法の原理, シミュレーションと実際の計測結果, ユーザを用いた評価実験, および応用例について報告する.

**キーワード:** タッチセンサ, 静電容量, 直列, マルチタッチ, ワイヤ, 紙, プロトタイピング

## A Touch Sensing Technique Using Series-connected Electrodes

HIROYUKI MANABE<sup>1,a)</sup> WATARU YAMADA<sup>1</sup>

Received: April 20, 2018, Accepted: July 10, 2018

**Abstract:** A touch sensing technique that uses series-connected sensing electrodes via capacitors is proposed. The electrodes connecting to the circuit by just two wires work as touch sensors. They can be easily created and offer the adaptability and flexibility of touch sensing, including the number, shape, and placement of the electrodes. It could be useful in prototyping touch based systems. In this paper, we report the principle of the technique, the results of the simulations and actual measurements, the evaluation by users, and application examples.

**Keywords:** touch sensor, capacitive, series-connected, multi-touch, wire, paper, prototyping

### 1. はじめに

タッチ入力が多く利用されている. タッチを検出することにより, タッチ位置やマルチタッチやジェスチャによる多彩な入力操作が行えるようになる. タッチセンサは小型化が可能であり, 耐久性がある, 透明な素材を用いて作成可能, 安価に実装できるなどの点で優れている. そのためタッチインタラクションは, スマートフォンやタッチディスプレイなどの製品だけでなく, プロトタイピングやパーソナルファブリケーションなどで作成される一品物の造形物への主要な入力手法として利用されている [12], [21], [22], [26]. 身の回りの様々なオブジェクトにコンピュータが搭載されていく将来では, タッチインタラ

クションの応用範囲がさらに広がっていきと考えられる.

タッチ検出を行う様々な手法がすでに提案されている. 指が触れているか否かを認識するだけの単純なタッチセンサ, 複数のタッチセンサを組み合わせたタッチセンサレイ, 圧力やホバーまで検出できるタッチセンサのほか, 光学的もしくは電気的な手法に基づいたタッチセンサなどがある. 様々なタッチセンサの中から, アプリケーションやデバイス, そして開発フェーズに適合したセンサを選定することが重要である. タッチインタラクションを組み合わせたプロトタイピングの段階で使用するタッチセンサには, 広い適用範囲と高い柔軟性が求められる. 所望のアプリケーションやインタラクションを実現するために, どこに, どれだけの, どのようなタッチセンサを配置すればいいのかについて, 試行錯誤を繰り返す必要があるためである. そのためにたとえば, 曲面や狭い領域などにもタッチセンサを配置することができ, タッチセンサの数や形状, 配置を手軽に変更できることが大切である. 本稿で提案す

<sup>1</sup> NTT ドコモ先進技術研究所  
Research Laboratories, NTT DOCOMO, Yokosuka, Kanagawa 239-8536, Japan

<sup>a)</sup> manabehiroyuki@acm.org

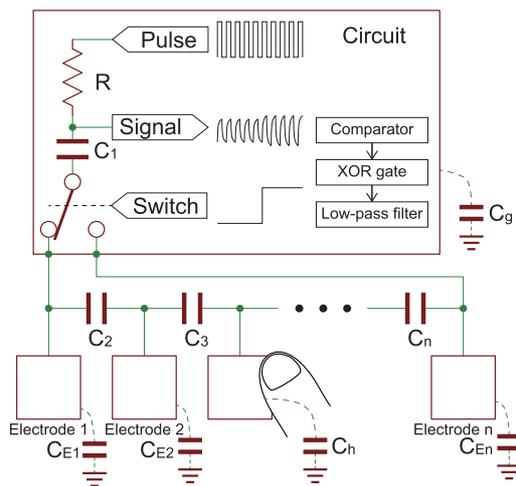


図 1 提案手法の概要. 複数の電極はコンデンサを介して直列に接続されており, 左右両端の電極と検出回路は 2 本のワイヤで接続されている. 検出回路内にあるスイッチを用いて極性を反転させ, 計測される 2 種類の静電容量から, 指がどの電極に触れたのかを判定する. 点線で接続されている  $C_{Ei}$ ,  $C_h$ ,  $C_g$  は, ユーザや環境から誘導される静電容量である

Fig. 1 Illustration of the proposed technique.

るタッチ検出手法 (図 1) では, コンデンサを介して直列に接続した複数の電極がそれぞれタッチセンサとして機能する. 検出回路と電極は 2 本のワイヤで接続されており, 多数のワイヤを必要としない. これまで実装が難しかった細長い領域にタッチセンサを組み込むことや, 導体と絶縁体を用いて電極間に接続する静電容量を手作りすることもできる. 広い適用範囲と高い柔軟性を備えており, 安価で簡便に実装することもできる提案手法は, プロトタイピングの段階で有効であると考えられる.

本稿では, 提案手法の原理, シミュレーションと実際の計測結果, ユーザを用いた評価実験, および応用例について報告する. なお, 本研究の一部は国際会議にて発表済み [14] であり, 本稿ではその内容に加え, 実用性を向上させる改良や詳細な議論について報告する.

## 2. 関連研究

### 2.1 タッチ検出手法

タッチを検出する手法として, 光学的な手法 [6], 音響的な手法 [17] などのほか, 抵抗変化を利用する手法 [7], [19] や, 静電容量変化を利用する手法 [4], [18] などの電気的な手法がある. なかでも静電容量方式のタッチセンサは多くの機器に組み込まれており, すでに広く利用されている. タッチセンサは単純なスイッチとして機能させることができる. 可動部がないことや小型化可能であることが, 機械的なスイッチに対するタッチセンサの利点である. 通常のタッチセンサでは指が触れているか否かを判別するだけであるが, 1 つのセンサを用いてより多くの情報を取得し, 入力語彙を増やすことができる. たとえば, 非対称性

を導入したセンサを用いたマルチタッチジェスチャの認識 [29], パターンを形成した電極を用いたジェスチャの認識 [23] のように, ユーザの動的な入力動作を認識することや, Touché [20] のように静的な把持形状を認識することができる. また, ワイヤをタッチすることにより伝搬特性が変化することをを用いたタッチ位置検出手法 [9], [27] も提案されている. タッチセンサを複数用いることで入力語彙を増やすこともできる. 2次元平面上にタッチセンサを密に配置した実装 [4], [18] はその典型であり, それらではポインティング入力が可能となる. 多数のタッチセンサを用いた場合, 結線のために莫大な数のワイヤが必要となるが, マトリクス配線によって必要なワイヤの数を減らすことができる. 表面型静電容量式タッチセンサ [13] は, 表面の端面に配置した少数の電極を用いてタッチ位置を検出する. 一般的な表面型静電容量式タッチセンサはシングルタッチを対象としているが, マルチタッチを検出することもできる [28]. これらのタッチセンサは平坦な表面に適しており, ディスプレイとの組合せは特に有効である. そしてスマートフォンやノート PC など数多くの工業製品にタッチディスプレイが搭載され, タッチを起点とする新たなインタラクションを生み出してきた. その結果, タッチ入力は現在主流の入力手法といえるまでに身近なものとなった.

一方, 近年では 3D プリンタやレーザカッターを利用したパーソナルファブ리케이션 [5] やラピッドプロトタイピング [2] が広まってきており, ユーザがモノ作りを行える環境が整い始めている. そのことにより, エンドユーザ自らが自身のスキルや状況に適合するコンピューティング環境を構築できる. つまり, これまで提案されてきたユビキタスコンピューティング [25], ウェアラブルコンピューティング [15] などを実践することができるようになってきている. すでに一般的に利用されており, 可動部がなく小型で低消費電力な実装が可能なタッチ入力は, このような環境の中で生み出される造形物における入力手段としても有望である. そのために既存の 2次元平面タッチセンサモジュールを適用することが考えられるが, 造形物のデザインが制限されてしまう. 専門業者に依頼して専用のタッチセンサを設計すれば, 自由な形状にタッチ検出機能を組み込むことができるようになるが, 高額な費用がかかってしまう. このような制約は, 個々に異なる大きさや形状の造形物を安価かつ簡易に製作できることの利点が損なわれるため望ましくない. また, 造形物のどこにどのようなタッチセンサを設置するのかを簡単に試行錯誤できることもきわめて重要である. この課題に対し, 様々な形状に適用可能で簡便に実装できるタッチ検出手法やタッチセンサ拡張手法が提案されてきた. たとえば, MakeyMakey [22] を用いれば様々なオブジェクトをタッチセンサとして活用することができる. Extension Sticker [11] は, 導電パターンを形成したシートを用いて, タッチディスプレイ外部

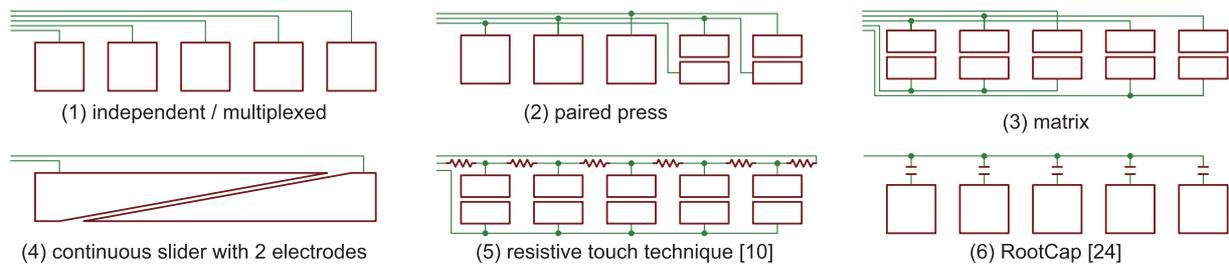


図 2 複数のタッチ電極の接続手法. (1) 個別配線. (2) Paired press. (3) マトリクス配線.  
(4) スライダー. (5) 極性反転手法 [10]. (6) RootCap [24]

Fig. 2 Several touch sensing configurations that support multiple electrodes.

でのタッチ検出を可能とする. 指とタッチパッドの間にオブジェクトを挿入することでインタラクションを拡張する手法 [30] も提案されている. テープ形状のタッチセンサ [8] を用いれば, 曲面でのタッチ検出を行うことができる. SensorTape [3] は, タッチセンサやマイクロコントローラを備えた小型モジュールが複数連結されており, 自由な長さのタッチセンサアレイを構築することができる. 自由な形状に裁断することができるタッチセンサ [16] も提案されている. すでに述べた 1 つのタッチセンサで入力語彙を増やす手法も, 課題解決に有効である.

タッチセンサには, タッチ位置を連続的に検出するものと, 非連続的に検出するものがある. 前者の例はタッチパッド (たとえば, 文献 [4], [28]) やワイヤ型タッチセンサ [9], [27] であり, 後者の例は個別のタッチセンサを複数配置したものである. 提案手法は後者に該当し, どちらを選択すべきかは, アプリケーションやデバイスに依存する. たとえば, 2次元平面や連続的な値を入力する一次元のスライダーでは前者の方が望ましいことが多い. 一方, 少数の独立したスイッチを設置したい場合には後者の方が望ましい. 個々のタッチセンサの形状や設置位置を自由に設定することができるためである. たとえば, 人形やフィギアにタッチセンサを設置する場合, 頭部, 腕, 足などへのタッチをセンサのレベルで識別することができる.

## 2.2 複数タッチセンサの結線方法

タッチパッドなどのように連続的なタッチ位置を検出する手法に対し, 複数の独立したタッチセンサを用いる手法は単純である. 最も簡単に行う場合には, タッチ検出回路とタッチセンサとして用いる電極を個別にワイヤで結線すればよい (図 2 の (1)). マルチプレクサを用いれば, タッチ検出回路で同時に検出できるチャンネル数を越えた数の電極を接続することもできる. 複数の電極で 1 つのタッチセンサを構成する手法 (paired press [1], 図 2 の (2)) や, マトリクス配線 (図 2 の (3)) を用いれば結線のために必要なワイヤの数を減らすことができる. スライダー [1] (図 2 の (4)) は, 2 つの電極を用いて連続的なタッチ位置を検出することができる. 電極の表面は絶縁物で覆われており,

タッチした指と電極の間に静電容量が生じる. 形成される静電容量の大きさは, タッチ領域に存在する電極の面積に依存し, それぞれの電極で計測される静電容量の比からタッチ位置を求めることができる. 文献 [10] で提案されている手法 (図 2 の (5)) は, 抵抗の変化からタッチ検出を行う. 1 つのタッチセンサは 2 つの電極から構成されている. 一方の電極 (図中で上段の電極) は抵抗を介して直列に接続されており, 他方 (図中で下段) はすべて同一電位となっている. 指で 2 つの電極を覆うようにタッチした場合, 上下の電極が未知の (指の) 抵抗を介して接続されることになる. 3 本のワイヤを介して接続されたタッチ検出回路は, 極性を反転させながら 2 種類の抵抗値を計測することで, 指の抵抗が未知であっても, どの電極ペアに指が触れたのかを求めることができる. RootCap [24] (図 2 の (6)) では, コンデンサを介して複数の電極が並列に接続されている. タッチ検出回路との接続に必要なワイヤは 1 本のみである. 電極ごとに異なる容量のコンデンサを用いるため, 観測される静電容量の大きさはタッチした電極に応じて変化する.

## 3. 提案手法

図 1 に示すように, 複数の電極をコンデンサを介して直列に接続するタッチ検出手法を提案する. 図 2 の (4) の 2 種類の静電容量計測値からタッチ位置を検出する点と, 図 2 の (5) の複数の電極を直列に接続する点を組み合わせたものとなっている. 電極とタッチ検出回路は電極数によらず 2 本のワイヤで結線される. そのため図 2 の (1) から (3) のような従来手法よりも必要なワイヤの本数が少なくて済み, 実装が容易である. 図 2 の (2) から (5) では, それぞれのタッチ電極が 2 つの電極から構成されているのに対し, 本手法では 1 つの電極のみである. 前者では 2 つの電極を覆うように指をタッチさせる必要があるが, 本手法では電極内でのタッチ位置に制限がない. このことは, 自由な電極形状が可能であることを意味しており, 造形物のどこにどのようなタッチセンサを配置すべきか試行錯誤する際に有益である. 図 2 の (6) は電極とタッチ検出回路を 1 本のワイヤで接続することが可能であるが, すべて異なる

る容量のコンデンサもしくは静電容量を用意する必要があり、多数存在する未知の静電容量（たとえば、人体の静電容量や回路とグラウンド間の静電容量）が認識結果に大きな影響を与える。それに対し提案手法では、接続のためにワイヤが2本必要となるが、同一容量のコンデンサを用いることができ、2種類の静電容量を計測することで未知の静電容量の影響を抑制することができる。

### 3.1 原理

図1を用いて提案手法の原理を述べる。図では  $n$  個の電極がコンデンサ  $C_2$  から  $C_n$  を介して直列に接続されている。両端の電極（Electrode 1 および  $n$ ）とタッチ検出回路は2本のワイヤを介して接続される。電極および回路を環境に配置した場合、それぞれとグラウンド間にも静電容量  $C_{En}$  および  $C_g$  が形成される。また、指が電極をタッチした場合には人体を通して静電容量  $C_h$  が接続される。図に示したタッチ検出回路では、コンデンサの充電時間をもとに静電容量を計測する一般的なタッチ検出回路と同等である。ただし、図の回路はスイッチを備えている点で通常のタッチ検出回路とは異なっている。従来手法[10]と同様、スイッチによって極性を切り替えることで2種類の静電容量を計測することができる。なお、静電容量を計測できれば他の方式の回路でも構わない。

一般に  $C_h$  は 200 pF 程度とされており、提案手法の  $C_i$  は  $C_h$  と同程度となるよう設定する。 $C_{Ei}$  が  $C_h$  と比べて十分に小さい場合、電極をタッチすると検出回路には大きな静電容量が接続されることになる。観測される静電容量の大きさはタッチした電極とスイッチの極性によって変化する。たとえば、電極1と接続される極性で電極3をタッチしたときに観測される静電容量の主要成分は、直列に接続された  $C_2, C_3, C_h, C_g$  であり、逆の極性のときには、 $C_n, \dots, C_4, C_h, C_g$  となる。ここで  $C_h$  および  $C_g$  は未知の容量である。さらに観測される容量には  $C_{Ei}$  に関連する成分も加わってくる。未知数が1つしかない従来手法[10]では正確にタッチ位置を算出することができるが、複数の未知の要素が影響する本手法ではそれができない。そこで提案手法では、事前にキャリブレーションを行い、そこで得られた計測値と実際の計測値を比較することでタッチ位置を判定する。

なお、図1では、電極に指がタッチしたときに回路と電極が人体およびグラウンドを介してカップリングされる様子を示しているが、そのカップリングは必ずしもグラウンドを介したものでなくてもよい。たとえば、人体と回路がワイヤなどで直接接続している場合には、 $C_g$  を無限大と考えればよい。また、人体と回路が接近し、グラウンドを介したカップリングよりも直接的なカップリングが支配的になった場合には、図1のグラウンドを回路の筐体などと解釈すればよい。

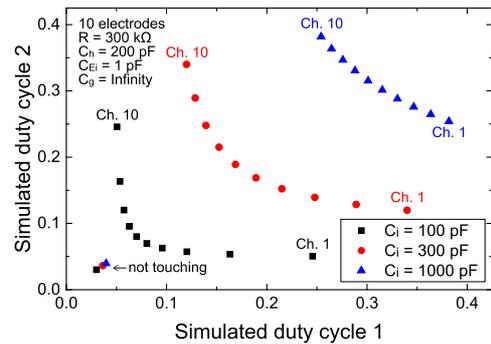


図3 10個の電極を用いたときのシミュレーション結果。 $C_i$ を100, 300, 1,000 pFと変化させている。2種類のデューティ比がタッチした電極に応じて異なっていることが分かる

Fig. 3 Simulation result with ten electrodes.

### 3.2 シミュレーション

図1に示した回路で、コンデンサ  $C_i, C_{Ei}, C_h, C_g$  は、1つのコンデンサに合成することができる。たとえば、 $C_i = C_h = C_g = 300$  pF,  $C_{Ei} = 5$  pF,  $n = 10$ である場合を考える。指がいずれの電極に触れていないときには、回路からは28 pFのコンデンサが接続されているように見える。これはスイッチにより回路が電極1と接続されている場合であっても、電極10と接続されている場合であっても同じである。指が電極2に触れた場合、回路が電極1と接続されているときには78 pFのコンデンサが、電極10と接続されているときには43 pFのコンデンサが接続されているように見えることになる。このような計算は簡単に行うことができるが、我々は回路シミュレータ\*1を用いて提案手法のシミュレーションを行った。図1に示すように本研究で用いた回路では、印加するパルスの極性が変化してから  $C_1$  の電位が閾値を超えるまでに要する充電時間と、そこから次にパルスの極性が変化するまでの時間の比率（デューティ比）から静電容量を計測する。大きな静電容量が接続されれば、デューティ比も大きくなる。回路シミュレータを用いたのは、実際の回路の挙動にシミュレーション結果を近づけるとともに、図1に示した以外の要素の追加を容易に行うためである。

#### 3.2.1 10個の電極を用いた場合

図3に、10個の電極を用いたときのシミュレーション結果を示す。 $R = 300$  k $\Omega$ ,  $C_h = 200$  pF,  $C_{Ei} = 1$  pFであり、ユーザと回路のグラウンドは直接接続 ( $C_g = \infty$ )、パルス信号には10 kHzの矩形波を用いたときの結果である。横軸は回路が電極1と接続されているときのデューティ比、縦軸は電極10と接続されているときのデューティ比を表している。図では、3種類の  $C_i$  を用いたときの結果を示している。いずれの場合であっても、指が触れるとデューティ比は高くなり、2種類のデューティ比の割合は触れる

\*1 LTspice. <http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

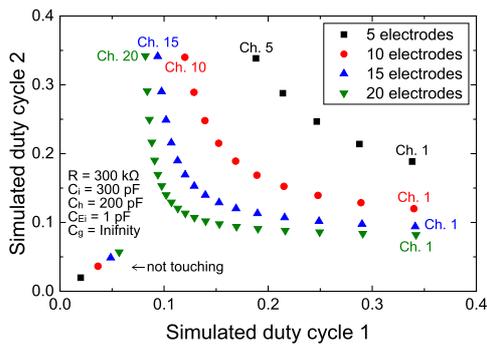


図 4 電極数を変化させたときのシミュレーション結果. タッチした電極に応じてデューティ比が異なること, 電極数に応じてデューティ比ペアの軌跡が異なることが分かる

Fig. 4 Simulation result with different numbers of electrodes.

電極に応じて異なっている. この結果から逆に, 極性を変化させて 2 種類のデューティ比を計測することで, 指が触れているのか/触れていないのか, 触れている場合にはどの電極に触れているのかの認識, つまり提案手法が有効に機能することが示唆される. さらに, 次のようなことも分かる.  $C_i$  が大きくなるに従ってデューティ比は大きくなっており, 指が触れているか触れていないかの判別が容易になる. 一方で,  $C_i$  が大きくなるに従い, 触れている電極に応じた 2 種類のデューティ比の比率の範囲は狭くなっており, どの電極に触れているのかの判定は難しくなる.  $C_i$  の値を厳密に設定する必要はないが, 適切な範囲内 (この条件では数百 pF 程度) であることが望ましいことが分かる.

### 3.2.2 電極数を変化させた場合

図 4 に, 電極数を変化させたときのシミュレーション結果を示す. シミュレーション条件は図に記載したとおりであり, 電極数のみを変化させている. 電極数が増えると 2 種類のデューティ比のプロットは, 非タッチ時のそれに接近する. これは, 図 3 において  $C_i$  が小さくなった場合と類似した傾向である. また, 電極数が増えると隣接する電極との差が小さくなっていくために, タッチした電極の識別が難しくなることも確認できる. このシミュレーション結果と図 3 の結果を合わせて考えれば, 電極数を増やす場合には  $C_i$  を増大させることが望ましい.

### 3.2.3 複数の電極に触れた場合

これまでのシミュレーション結果では, 指は 1 個の電極にタッチすることだけを想定していたが, 提案手法は複数の電極を同時にタッチするマルチタッチの一部にも対応する. 図 5 に, 5 個の電極を用いたときのシミュレーション結果を示す. 図の黒は指が 1 個の電極のみに触れた場合 (シングルタッチ), 赤は同時に 2 個の電極に触れた場合 (2 本指タッチ), 青は同時に 3 個の電極に触れた場合を表している (3 本指タッチ. 3 個の結果は一部のみ表示). 黒と赤はすべて異なる点にプロットされているが, 青はすべて赤と重なってプロットされている. 複数の電極に同時に触

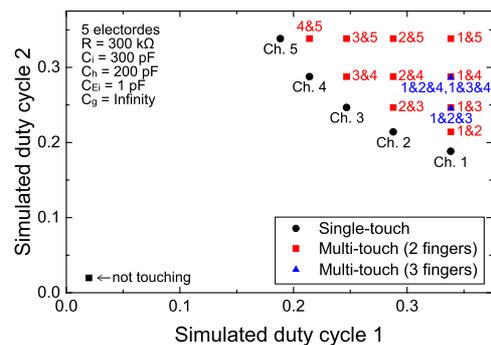


図 5 5 個の電極を用いたときのシングルおよびマルチタッチのシミュレーション結果. シングルタッチおよび 2 本指タッチでのデューティ比はそれぞれ異なるが, 3 本指タッチは 2 本指タッチと重なる. 提案手法が 2 本指タッチまでのマルチタッチに対応していることが分かる

Fig. 5 Simulation result for single- and multi-touch using five electrodes.

れたときに得られる 2 種類のデューティ比は, それぞれの電極 1 個のみを触れたときに得られるデューティ比の中の最大値とほぼ等しい. たとえば, 電極 1 のみをタッチした場合のデューティ比は 0.34 と 0.19 であり, 電極 2 のみの場合は 0.29 と 0.21 となっているのに対し, 電極 1 と 2 を同時にタッチした場合には 0.34 と 0.21 となっている. 一方, 電極 1, 2, 3 を同時にタッチした場合のデューティ比は, デューティ比 1 が電極 1 のみをタッチしたときの値, デューティ比 2 は電極 3 のみをタッチしたときの値と同じであり, それは電極 1 と 3 の 2 個の電極をタッチしたときに得られる 2 つの値と同じである. このシミュレーション結果から, 提案手法はシングルタッチだけでなく, 2 本指マルチタッチの検出も可能であるが, 2 本指マルチタッチと 3 本指マルチタッチを区別することはできないことが分かる. また, 隣接する 2 つの電極にタッチした場合 (たとえば, 電極 1 と 2, 電極 4 と 5 など), 計測値ペアの比率は両者のシングルタッチで得られる比率の間の値になることも重要である. 計測値ペアの比率で認識を行えば, シングルタッチしか想定していない場面でも (意図せず) 隣接する 2 つの電極に触れた場合であっても, 認識結果は触れているいずれかの電極になるためである. このことはスライダーを実装するうえで有効である.

### 3.2.4 グランドとのカップリングの影響

次に, 回路とグラウンドのカップリング (図 1 の  $C_g$ ) が変化したときのシミュレーション結果を図 6 に示す.  $C_g$  が小さい場合, タッチ時と非タッチ時の差および異なる電極をタッチしたときの差が小さくなり, 提案手法が有効に機能することは期待できなくなる.  $C_g$  が大きくなるに従い, それらの差は大きくなり, タッチと非タッチの弁別や, タッチした電極の認識が行えるようになるが,  $C_g$  が一定以上 (図でいえば 1,000 pF 以上) であれば  $C_g$  によらずプロットはほぼ同一となる. このことから, 回路とグラウンド

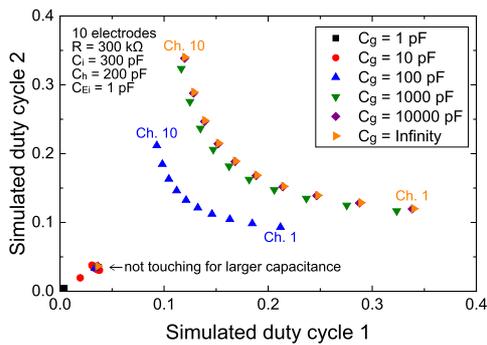


図 6 異なる  $C_g$  に対するシミュレーション結果 (電極数は 10 個).  $C_g$  の容量が小さい場合には、タッチした電極によるデューティ比の変化が小さい.  $C_g$  の容量が一定以上であれば、 $C_g$  によらず観測値はほぼ一定となる

Fig. 6 Simulation result with different  $C_g$ .

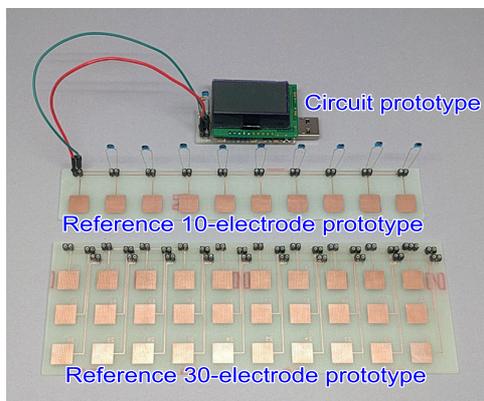


図 7 作成した回路と 2 種類のリファレンス電極プロトタイプ (10 電極と 30 電極). 回路と 10 電極のリファレンス電極は 2 本のワイヤで接続されており、この状態でタッチ検出を行うことができる. リファレンス電極に実装されているピンソケットを利用することで、電極間に接続するコンデンサを容易に変更することができる

Fig. 7 Developed circuit prototype and two reference electrode prototypes.

の間にある程度のカップリングは必要であるが、DC カップリングのような強力なカップリングまでは要求されないことが分かる.

### 3.3 実装

作成した回路プロトタイプと 2 種類のリファレンス電極プロトタイプを図 7 に示す. 回路プロトタイプは、2 つの PIC マイコン (16F1705 と 18F14K50), SPDT アナログスイッチ (MAX4564), および小型液晶ディスプレイ (LCD) などを用いてプリント基板上に実装した. パルス信号となる 10 kHz 矩形波の生成, アナログスイッチの制御, USB 通信などを 18F14K50 が行い, オペアンプ, コンパレータ, XOR ゲートなどは 16F1705 に内蔵されているものを使用した. XOR ゲートの出力をローパスフィルタに通し, オペアンプで増幅した後に、10 ビット AD 変換を行ってマイ

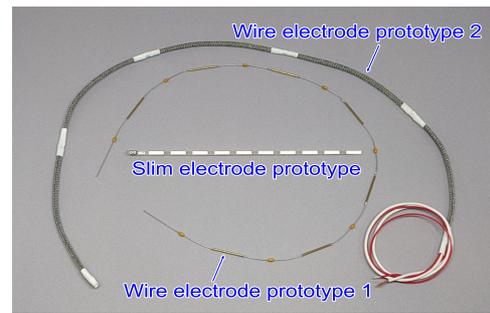


図 8 3 種類のワイヤ型および細長型の電極プロトタイプ. ワイヤ型電極プロトタイプ 1 では、アキシアルリードのコンデンサを金属パイプで接続されており、コンデンサのリード部分と金属パイプ部分が電極として機能する. ワイヤ型電極プロトタイプ 2 では、1 芯のリード線とシールドメッシュチューブ、コンデンサから構成されている. 5 つに分割されたシールドメッシュチューブがそれぞれ電極になる. 細長型プロトタイプでは、両面プリント基板の表面に 10 個の電極を、裏面にコンデンサを配置している

Fig. 8 Wire and slim type electrode prototypes.

コンに取り込む. AD 変換は複数回行い、その平均を取ることでノイズ耐性を向上させている. アナログスイッチによって極性を反転させることで得られる 2 種類の計測値から、指がどの電極にタッチしたのかを判定し、結果を LCD に表示する. 回路プロトタイプは USB 端子から給電することができ、PC やスマートフォンと接続した場合には計測値や判定結果を通知することができる. 回路内にある  $C_1$  および  $R$  はピンソケットを使って簡単に差し替えることができる. プリント基板で作成したリファレンス電極プロトタイプ (以下、リファレンス電極) には、10 × 10 mm の電極がそれぞれ 10, 30 個配置されている. それぞれの電極間にはピンソケットを実装しており、 $C_i$  に対応するコンデンサを容易に差し替えることができるようになっている. 図中では、10 電極リファレンス電極には 9 個のコンデンサが差し込まれており、10 個の電極すべてがアクティブになっている. また、回路と 2 本のワイヤで接続されているため、回路に電源を供給すれば 10 電極リファレンス電極は動作する. ワイヤの接続点を変更すれば、アクティブな電極数を簡単に変更することもできる.

#### 3.3.1 ワイヤ型電極プロトタイプ

他にも複数の電極プロトタイプの作成を行った. たとえば、図 8 に示す 3 種類の電極プロトタイプは、ワイヤ型もしくは細長型の電極である. これらの電極を用いることで、様々なオブジェクト表面にタッチセンサを配置できるようになる. ワイヤ型プロトタイプ 1 では、アキシアルリードのコンデンサを金属パイプで連結させている. コンデンサのリード部と金属パイプ部が一体となって 1 つの電極として機能する. ただし、回路と接続される両端のコンデンサのリード部は、それだけで電極となっている. この電極プロトタイプは、簡便に作成することができ、電極の

長さを簡単に変更することができる。ワイヤ型プロトタイプ 2 は、1 芯のリード線とシールドメッシュチューブ、アキシャルリードのコンデンサなどから作られている。図で 5 つに分割されているシールドメッシュチューブはコンデンサを介して接続されており、チューブそれぞれが 1 つの電極として機能する。この電極プロトタイプの特徴は回路との 2 カ所の接点が一方の端にまとまっている点にある。細長型電極プロトタイプでは、3 mm 幅の両面プリント基板上に 10 個の電極が実装されている。電極間のコンデンサはプリント基板裏面に配置されている。このような細長い領域に複数のタッチセンサを実装するためには、一般に微細加工技術が要求されるため、簡単に作成することはできないが、提案手法を用いれば比較的容易に実現できる。また、それぞれの電極が接近して配置されていることも、この電極プロトタイプの特徴である。このような配置の電極プロトタイプに指が触れた場合、指は少なくとも 1 個以上の電極に触れることとなり、電極プロトタイプに触れたにもかかわらず電極には触れていないという状況が発生しない。図 5 のシミュレーション結果から、隣接する 2 つの電極に触れた場合であっても、計測値ペアの比率が大きく変化することはない。そのため、このような電極配置は false negative を防止することができる。これらの 3 種類の電極プロトタイプでは、接続するワイヤの数が少ない、という提案手法の利点を積極的に活用している。

### 3.3.2 フレキシブル型電極プロトタイプ

図 9 に 3 種類のフレキシブル型電極を示す。フレキシブルな素材で電極を形成することで、平坦でない表面にもタッチセンサを配置することができる。フレキシブル電極 1 は、図 8 の細長型電極のプリント基板をフレキシブルプリント基板に変更した電極であり、裏面にはコンデンサが実

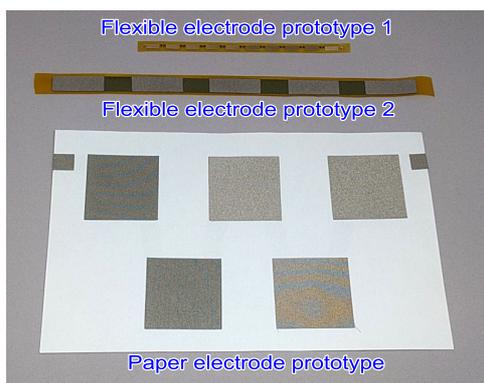


図 9 3 種類のフレキシブル型電極。フレキシブル型電極 1 は、フレキシブルプリント基板を用いて作成しており、コンデンサは裏面に実装されている。フレキシブル型電極 2 は、絶縁シートの両面に導電性テープを貼付したものであり、電極間の静電容量は導電テープによって作り出されている。電子部品としてのコンデンサは用いていない。紙型電極では、紙の両面に導電性テープを貼付してあり、コンデンサは使用していない

Fig. 9 Flexible electrode prototypes.

装されている。これまでの電極プロトタイプでは、電極間に接続する静電容量としてコンデンサを用いていたが、静電容量は導体と絶縁体を用いて簡単に作成することができる。フレキシブル電極 2 はコンデンサを使わず、導電テープと絶縁シートで静電容量を形成した例である。10 mm 幅の導電テープを、絶縁シート表面に 5 個、裏面に 4 個貼付してある。表面と裏面の導電テープは、絶縁シートの厚み  $5 \mu\text{m}$  を介して  $10 \times 15 \text{ mm}$  の領域で重なっており、この重なりがコンデンサとして機能する。これにより、電極間には 2 つの静電容量が直列に導入され、それは電極間に 1 つの約  $55 \text{ pF}$  の静電容量が接続されることと等価となる。フレキシブル電極 2 では薄型の絶縁シートを利用したが、紙を絶縁体として用いた例が紙型電極である。電極として機能する  $40 \times 40 \text{ mm}$  の導電テープを紙の表面に貼付し、裏面にはそれぞれの電極と  $20 \times 40 \text{ mm}$  の大きさで重なるよう導電テープを貼付してある。これにより電極間に導入される静電容量は約  $100 \text{ pF}$  である。これらコンデンサを使わない電極は、身近にある素材だけで簡単に作成することができる。それだけでなく、電極が設置されている表面側に接続のためのワイヤがないことも特徴であり、電極デザイン自由度が向上する。

### 3.4 観測信号

図 10 に、10 電極のリファレンス電極と回路プロトタイプを使用した際に観測される信号の例を示す。図 10 の上から、10 kHz のパルス信号、アナログスイッチの制御信号、観測信号 (図 1 の  $C_1$  の電位)、XOR ゲートの出力を示す。回路への電源供給は安定化電源によって行われ、信号の観測にはオシロスコープを用いた。いずれの装置も商用電源で駆動されているため、回路と人体の間の AC カップリングが確立する。図の観測信号と XOR ゲート出力には、電極に触れていない (黒)、電極 1 にタッチしている (赤)、電極 5 にタッチしている (青) ときの信号を重ねて表示している。電極に触れていない場合、 $C_1$  は素早く充電され、 $C_1$  の充電時間に対応する XOR ゲート出力のデューティ比は小さい。これは、スイッチにより制御される極性によらない。電極プロトタイプの一端にある電極 1 にタッチした場合の充電時間は極性によって異なる。回路と電極 1 が直接接続していない極性時 (図中で時刻が負の値となっている領域。回路は電極 10 と直接接続されている) の充電時間は短い。逆に回路が電極 1 と直接接続している極性時 (図中で時刻が正の値となっている領域) では充電時間が長くなっており、XOR ゲート出力のデューティ比は大きくなっている。電極プロトタイプの中央に配置されている電極 5 にタッチした場合には、電極に触れていないときと比べて充電時間が長くなっており、その程度は極性に依存しない。図中の時刻が負となっている領域の充電時間は、非接触 < 電極 1 タッチ < 電極 5 タッチであり、時刻が正の

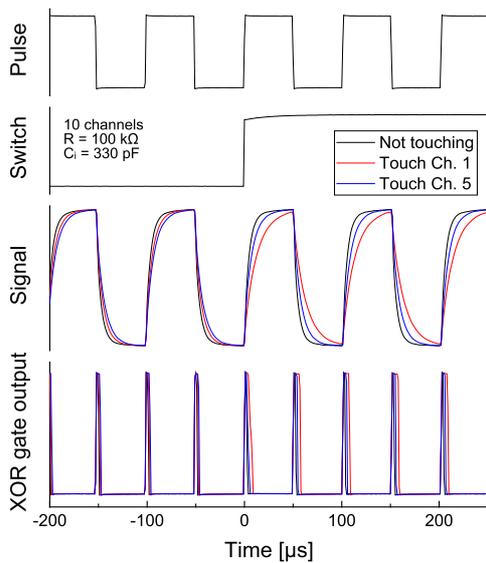


図 10 作成したプロトタイプを用いたときに観測される信号の例 (10 電極のリファレンス電極を使用)。上から、10 kHz のパルス信号、アナログスイッチの制御信号、図 1 の  $C_1$  の電位、XOR ゲートの出力を表す。電極に触れていないときには、コンデンサの充電時間は短く、充電時間に対応する XOR ゲート出力のデューティ比も小さくなっている。電極プロトタイプ的一端にある電極 1 にタッチしたときのコンデンサ充電時間は極性によって異なる。時刻が負の領域では充電時間は短く、時刻が正の領域では長くなっている。電極プロトタイプの中央にある電極 5 にタッチ時の充電時間は、電極に触れていないときよりも長くなっており、それは極性によらない

Fig. 10 Examples of signals captured from the reference 10-electrode prototype.

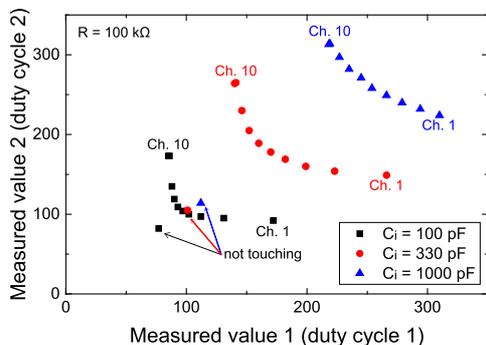


図 11 3 種類のコンデンサを用いたときの計測結果。いずれの場合でも、2 種類の計測値のペアはタッチした電極に応じて異なっており、図 3 に示したシミュレーション結果と同様の傾向が得られる

Fig. 11 Measured values with different capacitance.

領域では、非接触 < 電極 5 タッチ < 電極 1 タッチとなる。この図から、タッチする電極に応じて異なるデューティ比が観測されることを確認することができる。

XOR ゲート出力はローパスフィルタに通した後、AD 変換を行いマイコンに取り込まれる。図 11 に、10 電極リファレンス電極を用いたときにマイコンが計測した値を示す。計測条件は、3 種類のコンデンサを用いてシミュレ

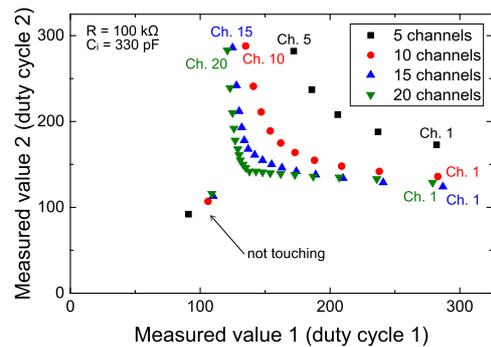


図 12 電極の数を変化させたときの計測結果。いずれの場合でも、計測値ペアはタッチした電極に応じて異なっており、図 4 に示したシミュレーション結果と同様の傾向が得られる

Fig. 12 Measured values with different numbers of electrodes.

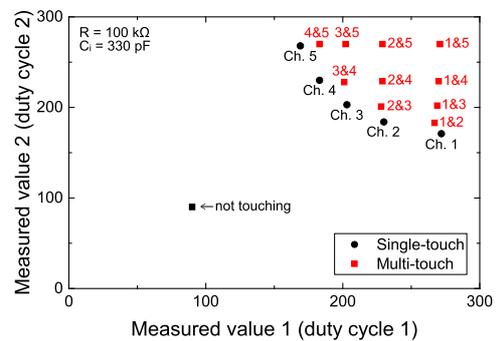


図 13 シングルタッチおよび 2 本指によるマルチタッチ時における計測結果。図 5 に示したシミュレーション結果と同様、すべてのタッチ時に異なる計測値ペアが得られている

Fig. 13 Measured values of single- and multi-touch with five electrode configuration.

ションを行った図 3 に対応している。実際の計測時においても、電極にタッチすると計測値は高くなっており、タッチする電極によって 2 種類の計測値ペアは異なっている。非タッチ時の計測値が高くなっていることや、計測値ペアの分布の広がりが狭くなっているなどの違いは見られるが、コンデンサの容量の違いによる傾向や計測値ペアの軌跡などはシミュレーション結果と同様の結果が得られた。

図 4 に対応し、電極数を変化させたときの計測値を図 12 に示す。電極数が変化した場合であっても、タッチする電極に応じて異なる値が計測されており、シミュレーション結果と同様である。ただし、実際の計測値では計測値の範囲が狭くなっており、必然的に隣接する電極との差も小さくなっている。これは、実際の計測時にはシミュレーション結果から期待される程度の認識精度を得ることが難しいことを示唆している。

図 13 は、マルチタッチ性能を表す計測結果である。実験条件は図 5 のシミュレーションに対応しており、同様な結果が得られている。隣接する 2 つの電極をタッチした際に、2 種類の計測値の比率が両者のシングルタッチ時に得られる比率の間の値になることも確認できる。図には示

していないが、3電極を同時にタッチしたときにもシミュレーションと同じ結果が得られた。

### 3.5 評価

シミュレーションや、作成したプロトタイプを用いた計測を通じ、タッチした電極に応じて異なる計測値のペアが得られることを確認することができた。提案手法をインタラクションに応用するためには、計測値ペアからタッチした電極が正しく認識されなければならない。それを確認するために、6種類の電極プロトタイプと10人のユーザを用いて7種類の評価実験を行った。

実験(1)では、電極間に330 pFのコンデンサを接続した10電極のリファレンス電極を使用し、10個すべての電極を使って実験を行った。実験(0)も同様の実験条件であるが、実験を行うユーザ自らがキャリブレーションを行う点が異なる。

実験(2)と(3)では、30電極のリファレンス電極を使用した。実験(2)では470 pFのコンデンサを接続した15個の電極を用い、実験(3)では680 pFのコンデンサを接続した20電極を用いた。

実験(4)では、10電極のリファレンス電極のうち330 pFのコンデンサを接続した4個の電極のみを使用し、シングルタッチおよび2本指でのマルチタッチの実験を行った(全部で $4C_1 + 4C_2 = 10$ 通りのタッチ)。

実験(5)では、図9に示した紙型電極(5電極)を用いた。

実験(6)では、図9に示したフレキシブル電極1(5電極。電極間には100 pFのコンデンサ)を図17の右図のようにスマートフォン側面に配置した。実験(6)では、回路の電源はスマートフォンから供給され、電極プロトタイプはユーザが手で把持しているスマートフォン上にあるのに対し、他の実験では回路の電源はACアダプタを接続したノートPCから供給され、電極プロトタイプは机の上に置いた状態で実験を行った。

タッチを認識する前にキャリブレーションを行う必要がある。ここで行うキャリブレーションは、認識対象のすべてのタッチおよび非タッチ時に対して参照となる計測値ペアを取得することである。本評価実験のキャリブレーションは、実験に参加していない特定のユーザによって行った。ただし、一部のユーザ(ユーザ4~10)に対してのみ行った実験(0)では、実験を行う自らがキャリブレーションを行った。回路は、非タッチ時の参照値と計測値の差が閾値を超えた場合にタッチが発生したと判断する。タッチが発生した場合には、それぞれの参照値と計測値の距離を計算し、最も短い距離のタッチを認識結果としてLCDもしくはスマートフォンに出力する。タッチすべき電極はランダムに指示され、実験に参加するユーザにはその指示に従ってタッチを行う。すべての電極に対して3回ずつタッチを行った。その結果、たとえば実験(1)の総タッチ数は10電

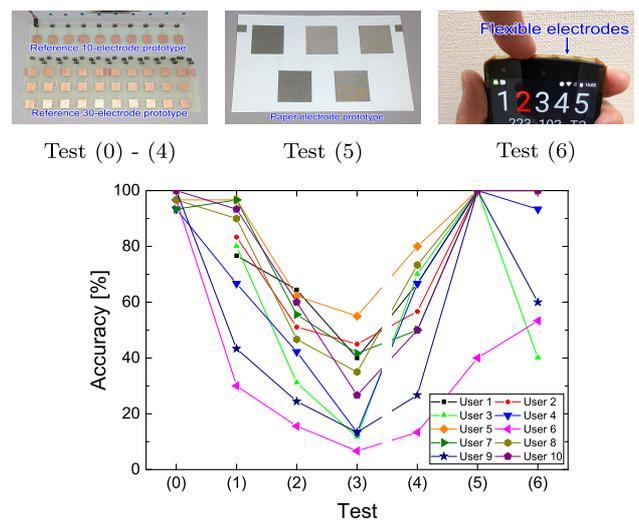


図 14 10人のユーザによるタッチ認識率。4種類の電極プロトタイプを用いて、7種類の実験を行った。実験に用いた電極プロトタイプを上段に示す。実験(0)：10電極のリファレンス電極を用い、キャリブレーションは実験を行うユーザが個別に行った。他の実験のキャリブレーションは、実験に参加していない特定ユーザによって行った。実験(1)–(3)：リファレンス電極を用いて、10、15、20電極を接続した。実験(4)：4電極を用いたシングルおよび2本指マルチタッチ。実験(5)：紙型電極プロトタイプ(5電極)。実験(6)：スマートフォン側面に実装したフレキシブル電極(5電極)

Fig. 14 Recognition accuracy of ten users in seven tests and prototypes used.

極 × 3回 × 10人で300となる。

#### 3.5.1 認識結果

認識結果を図14に示す。正解率はユーザによって異なっており、ある電極プロトタイプで認識率が高いユーザは、他の電極でも認識率が高い傾向が見られる。たとえば、ユーザ5はいずれの電極プロトタイプでも高い認識率となっているのに対し、ユーザ6はいずれの認識率も低くなっている。実験(1)から(3)の結果を比較してみると、認識対象の電極数が増えるに従って認識率が低下しており、さらに電極数が少ない場合でも実用的な認識率が得られるとはいえない。誤認識の多くは、隣接する電極と認識してしまう場合、もしくは認識結果が正しい電極と隣接する電極とで表示結果が振れてしまう場合であった。これら誤認識の主な原因は、キャリブレーション時と実際の計測時の間に生じる差であると考えられる。具体的には、キャリブレーションを行ったユーザと実際の計測時のユーザが異なっているため、ユーザに起因する $C_h$ に差が生まれる。キャリブレーションを行ったユーザと $C_h$ の観点で近いユーザは認識率が高く、そうでないユーザは認識率が低くなる。同一人物がキャリブレーションと実際の実験を行った実験(0)では、すべてのユーザで高い認識率が得られている。実験(1)では平均して76%の認識率が、実験(0)では97%となっている。マルチタッチ性能を評価した実験

(4) の認識率は、認識対象となるタッチ状態数が同数である実験 (1) よりも低くなっており、シングルタッチの認識よりもマルチタッチの認識の方が困難であることを反映している。ただし平均すれば実験 (4) の認識率は 15 電極を用いた実験 (2) よりも高い。実験 (5) ではユーザ 6 を除いたすべてのユーザが全数正解となった。これは、認識対象となるタッチの数が少ない場合には、異なるユーザがキャリブレーションを行ったとしても、適切に認識可能であることを示している。また、提案手法において電極間に接続する静電容量にコンデンサを用いる必要はなく、導電テープと紙のように簡単に入手できる素材で代用できることが確認された。実験 (6) から、本手法をスマートフォンのようなハンドヘルドデバイスに適用した場合には、商用電源による電力供給を通じて導入されるユーザと環境、回路間のカップリングが不要になることが分かる。一部のユーザに見られる認識率の低下は、把持方法によっても変化するユーザとスマートフォンのカップリングの強さが、キャリブレーション時と異なるためであると考えられる。

評価実験ではワイヤ型電極プロトタイプ 1, 2 やフレキシブル電極 2 を用いなかったが、それらを回路と接続しても実際に動作することを確認した。これらの評価実験の結果から、提案手法は異なる電極へのタッチを認識することができること、認識率を向上させるためにはユーザ自らによるキャリブレーションが有効であること、異なる実装方法においても提案手法は有効に機能することを確認することができた。

#### 4. 議論

提案手法は簡易な接続で複数のタッチを識別することができ、主にプロトタイピング時に有効であると考えられる。本章では、提案手法の課題と改良方法、および提案手法が適合するアプリケーションについて議論を行う。

##### 4.1 課題

提案手法および現状の実装にはいくつかの課題がある。たとえば、ユーザと環境（もしくは回路）がカップリングされている必要があることや、事前のキャリブレーションが必要であること、認識可能なタッチの数がそれほど多くはないことなどがあげられる。ユーザや環境などによって変化するパラメータが複数存在していることが、課題の解決を困難にしている。特に、 $C_h$  と  $C_g$  が小さい場合や不安定な場合には認識性能が低下する。 $C_h$  は、ユーザ間で異なるだけでなく、姿勢や環境によっても変化する。 $C_g$  は、どのように電力供給が行われるかによっても大きく異なる。たとえば、PC や AC アダプタから電力が供給された場合、 $C_g$  は増加し、バッテリーから供給された場合には  $C_g$  は小さくなる。 $C_g$  が小さい場合であっても、実験 (6) のように回路とユーザの間に直接的なカップリングが形成されれば

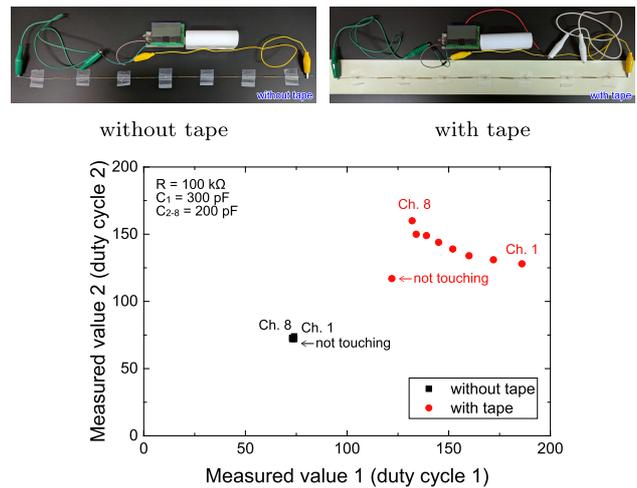


図 15 ワイヤ型プロトタイプを用いたときの導電テープの有無による違い。回路がバッテリー駆動されている場合などでは、回路と人体のカップリングが弱く、タッチ検出が困難となる。しかしそのような環境であっても、電極の下に導電テープを配置することで提案手法を動作させることができる

Fig. 15 Difference between with/without conductive tape.

提案手法は機能するが、環境中に配置されたバッテリー駆動のデバイスに適用することは難しい。この課題に対するアプローチがいくつか考えられる。その 1 つは、本手法で想定している自己容量を相互容量に変更することである。電極の構成が複雑になり実装が難しくなるが、一般的に用いられている相互容量方式のタッチパネルとの親和性は高くなる。

##### 4.1.1 カップリングの強化

簡易な実装が可能という提案手法の特徴を維持した方法の例を図 15 に示す。図 8 のワイヤ型プロトタイプ 1 (8 電極版) をバッテリー駆動の回路で駆動させたときの計測値を示している。上段には、接続の様子を示す写真を示す。回路とユーザ間に十分なカップリングが形成されない場合 (図の without tape) では、タッチの状態によらず計測値はほぼ一定の値となる。この場合、どの電極にタッチしたのかを認識できないだけでなく、そもそもタッチしたのかしていないのかを判定することもできない。ここで、電極プロトタイプの下に幅 50 mm の導電テープを配置する (図の with tape)。導電テープの剥離シートは剥がさず、電極プロトタイプは剥離シートの上に配置されている。そして導電テープを回路のグラウンドと接続しておく。この状態で計測を行うと、異なるタッチに対してそれぞれ異なる計測値を得ることができるようになり、提案手法は機能する。これは、タッチ時に指と導電テープが剥離シートを介して接触し、両者の間にカップリングが形成されるためである。スマートフォンに実装した電極を用いた実験 (6) では、回路とユーザの間にはつねにカップリングが維持されるのに対し、図 15 の例ではタッチ時のみカップリングが形成される点で異なる。

### 4.1.2 キャリブレーション

事前のキャリブレーションが必要なことや、認識精度向上のためにはユーザ自らがキャリブレーションを行う必要があることは、手軽な活用を妨げ、プロトタイピング時の制約となる。電極数や接続する静電容量を変えるなど計測条件を大きく変更する場合のキャリブレーションは必須であるが、設置環境をわずかに変更したり、異なるユーザがタッチする場合に行うキャリブレーションの手間は小さいことが望ましい。たとえば、キャリブレーション時に認識対象となるすべてのタッチを計測するのではなく、一部のタッチ計測値から全体のキャリブレーションを行うことや、明示的なキャリブレーションを行わず、計測値を元に常時キャリブレーションを行うなどの方法が考えられる。また、キャリブレーション時の計測値と実際の計測値の間の差が一定範囲を超える場合に、キャリブレーションの実施を促す方法も有効であろう。認識可能なタッチの数が多く、電極数を柔軟に設定できることもプロトタイピングにおいて重要である。たとえば、20個の電極を正しく認識したり、2本指マルチタッチだけでなく3本指マルチタッチにも対応したりすることができれば、応用範囲を広げることができる。そのために、3つ以上の極性を用いることや、paired pressを併用することなどが考えられる。

### 4.1.3 抵抗による代替

電極間の接続に、電子部品としてのコンデンサを用いることだけでなく、導体と絶縁体で作出した静電容量を用いても、提案手法は機能した。電極間の接続を抵抗で代用できれば、小さな面積に導電性インクを片面印刷するだけで実装を行うことができるようになり、実装がさらに容易になる。Ohmic-Touch [30]などで指摘されているように、タッチセンサではインピーダンスが変化すればよく、静電容量ではなく抵抗を用いてインピーダンスを変えることもできる。提案手法においても電極間を抵抗で接続することができる。図 16 に、10 電極リファレンス電極を用いて、

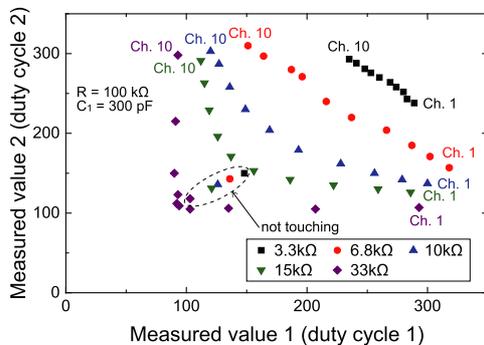


図 16 電極間のコンデンサを抵抗に差し替えたときの計測結果。適切な抵抗値を選べば（図ではたとえば 10 kΩ）、コンデンサを用いたときと同様の結果が得られる

Fig. 16 Measured values when capacitors are replaced to registers.

電極間を抵抗で接続したときの計測結果を示す。C<sub>2</sub> から C<sub>10</sub> までを抵抗に置き換えており、C<sub>1</sub> はコンデンサのままである。抵抗が小さい場合には、計測値ペアは図の右上方向にシフトしている。これは、静電容量の大きなコンデンサを用いた場合と同じであり、どちらも小さなインピーダンスで電極間が接続されている点で共通する。図の例では、10 kΩ の抵抗を用いた場合に、静電容量を用いた場合と同様、タッチにより計測値が増大し、タッチ時の計測値ペアが反比例形状の軌跡を描く。それよりも小さな抵抗を用いた場合には、計測値ペアの軌跡は直線的になっている。10 kΩ よりも大きな抵抗を用いた場合には、タッチしたときに一方の計測値が低下するケースが散見される。たとえば、15 kΩ 使用時における非タッチ時の計測値 1 は 121 であるのに対し、電極 10 タッチ時には 112 となっている。シミュレーション結果（図示していない）でも同様の傾向が確認された。このことは、抵抗を用いて提案手法を実装することはできるが、抵抗値の選定を慎重に行う必要があることを示している。

## 4.2 アプリケーション

提案手法では、静電容量を介して直列に接続した電極を 2 本のワイヤで回路と接続するだけで、複数のタッチ状態を検出することができる。容易に実装することができ、電極の数や形状、配置位置を柔軟に変更できることが特徴である。これらの特徴を活用したアプリケーション例を複数考えることができる。

### 4.2.1 検討ツール

たとえば、タッチセンサ検討ツールとしての利用が考えられる（図 17 の左図 (1)）。既存のオブジェクトやユーザが作成したオブジェクトにタッチセンサを追加する際、どのような形状のタッチセンサをどこにどれだけ配置するかについて検討する必要がある。このとき、オブジェクトに実際にタッチセンサを実装して検討することが望ましい。複数の独立したタッチセンサやマルチプレクサを用いることもできるが、接続のために多数のワイヤが必要となったり、接続可能な電極数に制限が生じたり、変更のつど回路やプログラムを更新しなければならないなど、検討の妨げとなりうる。提案手法を用いた場合、電極数に制限があることや、認識精度が高くないなどの課題はあるものの、変更のための手間は減っており、繰り返し行われる検討に特に有効である。ワイヤ数が増えても問題ない場合には、ブレッドボードを併用することで接続の切替えをさらに簡便に行うこともできる。この検討段階では、使用するユーザによるキャリブレーションや AC アダプタによる電源供給も無理なく実施可能であると考えられる。タッチセンサ配置を決定した後に、実際の使用環境に適合するセンサに組み替えればよい。

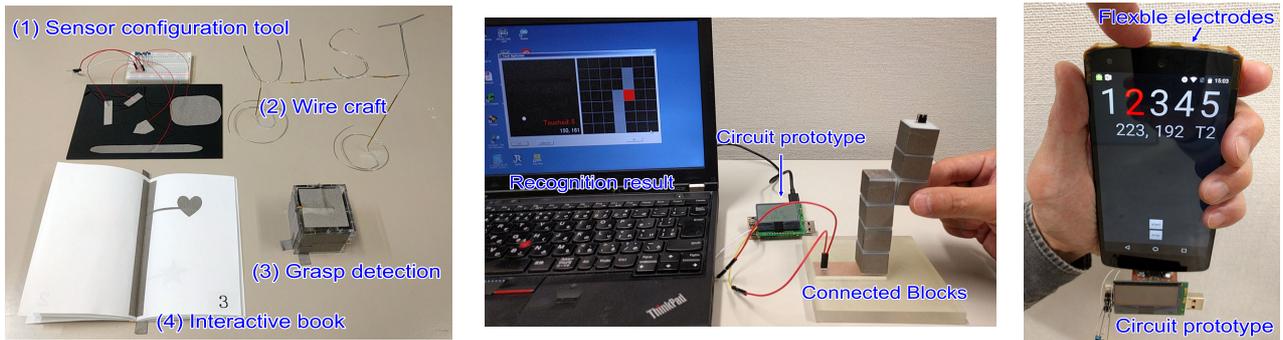


図 17 アプリケーションの例. (1) タッチセンサ検出ツール, (2) タッチを検出可能なワイヤクラフト, (3) 把持状態の検出, (4) インタラクティブな本 (左図). ブロック遊び (中図). スマートフォン側面への実装 (右図)

Fig. 17 Application examples.

#### 4.2.2 ワイヤ型タッチセンサ

図 17 の左図 (2) に示すワイヤクラフトも, 提案手法が有効に機能するアプリケーション例である. このワイヤクラフトでは, むき出しの金属ワイヤで作成した文字と文字の間にコンデンサが接続されており, 1 文字 1 文字がタッチセンサとして機能する. これまでこのような細長いオブジェクトに複数のタッチセンサを実装しようとした場合, 高度な実装技術や接続のために多数のワイヤが必要であったが, 提案手法を用いることで簡便な実装が行うことができる. また, ワイヤ上のタッチ位置を連続的に検出する手法 [9], [27] に対し, 個別の電極へのタッチを検出する提案手法では, ユーザがどの文字にタッチしたのかを簡単に知ることができる. 図 8 のワイヤ型電極プロトタイプ 2 を天井から吊し, タッチ位置に応じてライトの調光を行ったり, ワイヤ型センサをバンドやネックストラップなどに実装してそれらに入力機能を付加することも考えられる.

#### 4.2.3 インタラクティブな本

提案手法を用いればインタラクティブな本 (図 17 の左図 (3)) を簡便に実装することもできる. この本では, 各ページに電極が配置されており, ユーザがどのページの電極にタッチしたのかを検出することができる. ページを綴じる部分 (本を開いたときに左右のページの境界部分) に導電テープを使用することで, コンデンサを使わない実装としている. 各ページに配置した電極は, ページを綴じる導電テープと接続されている. この実装例では, 同一ページにある複数の電極の切り分けを想定していないが, 図 9 の紙型電極を用いれば, それも可能である. また, 図 16 に示したように, 静電容量を抵抗で代用することもできるため, 電極および結線を 1 枚の紙の上に片面印刷で実装することもできる.

#### 4.2.4 把持状態の検出

提案手法のマルチタッチ検出機能を利用して, ユーザの把持状態の検出を行うこともできる (図 17 の左図 (4)). この例では立方体オブジェクトの底面を除く 5 面に電極を

配置している. 1 面への単純なタッチだけでなく, 指がどの 2 面に接触してオブジェクトを把持しているのかを検出することができる.

#### 4.2.5 インタラクティブなブロック

図 17 の中図にはブロック遊びの実装例を示す. コンデンサが内蔵されたブロックの表面には導電テープが貼付されている. ブロックには雌雄のコネクタがそれぞれ含まれており, 他のブロックと接続することができる. ブロックを自由に接続して任意の形状に組み立てた後に, 終端ブロックへのジャンパ接続, キャリブレーションを行うことで, それぞれのブロックへのタッチを検出できるようになる. このような実装を行えば, ブロックへのタッチに基づくインタラクティブな遊びを実現できる.

#### 4.2.6 細長い領域への適用

図 17 の右図は, スマートフォン側面にタッチセンサを追加した例である. この構成は実験 (6) で用いており, 回路の駆動電力はスマートフォンから供給されている. スマートフォン側面やメガネ型デバイスのツル部分など, ハンドヘルドデバイスやウェアラブルデバイスでは細長い領域が多くある. そのような領域にタッチセンサを実装した場合に, どのようなインタラクションを実現できるのかを簡易に確認することができる. 必ずしも図に示すようなフレキシブル型のセンサである必要はなく, ワイヤ型のセンサを用いてもよいし, 平面に実装する場合には図 8 の細長型電極を用いてもよい. 回路とユーザのカップリングが十分に確保することが難しい, 環境中に配置されたバッテリー駆動のユビキタスデバイスでは, 図 15 に示した導電テープを併用した方法で対応することができる.

これらのアプリケーション例で示したように, 提案手法はプロトタイピングにおけるタッチセンサの検討段階で特に有効であると考えられる.

## 5. おわりに

静電容量を介して電極を直列に接続し, 電極アレイと検

出回路を2本のワイヤで接続する手法を提案した。極性を切り替えて得られる2種類の計測値から、指が電極にタッチしたのか、指がタッチした場合にはどの電極にタッチしたのかを認識する。シミュレーションおよび作成したプロトタイプにより、タッチの状態に応じて異なる計測値ペアが得られることを確認した。10人のユーザを用いた評価実験を通じて、提案手法がタッチ状態を認識できること、2本指のマルチタッチにも対応していること、導体と絶縁体によって構成した静電容量を用いることができること、ユーザによるキャリブレーションが認識精度を向上させることなどを確認することができた。複数のアプリケーション例を実装し、提案手法の応用範囲について検討を行った。電極の数や大きさ、配置に柔軟に対応でき、実装も簡便に行える提案手法は、タッチセンサを組み合わせたプロトタイプピングを行う際に有効であると考えられた。

### 参考文献

- [1] Bohn, B.: Microchip CTMU for Capacitive Touch Applications, Technical Report, Microchip Technology Inc., Application Notes, AN1250 (2009).
- [2] Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S.: *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, World Scientific Publishing Company (2010).
- [3] Dementyev, A., Kao, H.-L.C. and Paradiso, J.A.: SensorTape: Modular and Programmable 3D-Aware Dense Sensor Network on a Tape, *Proc. UIST '15*, pp.649–658 (2015).
- [4] Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A multi-user touch technology, *Proc. UIST '01*, pp.219–226 (2001).
- [5] Gershenfeld, N.: *Fab: The coming revolution on your desktop—from personal computers to personal fabrication*, Basic Books (2008).
- [6] Han, J.Y.: Low-cost Multi-touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection, *Proc. UIST '05*, pp.115–118 (2005).
- [7] Holman, D., Fellion, N. and Vertegaal, R.: Sensing Touch Using Resistive Graphs, *Proc. DIS '14*, pp.195–198 (2014).
- [8] Holman, D. and Vertegaal, R.: TactileTape: Low-cost touch sensing on curved surfaces, *Adjunct Proc. UIST '11*, pp.17–18 (2011).
- [9] Hughes, D., Profita, H. and Correll, N.: SwitchBack: An On-body RF-based Gesture Input Device, *Proc. ISWC '14*, pp.63–66 (2014).
- [10] Karataş, C. and Gruteser, M.: Printing Multi-key Touch Interfaces, *Proc. UbiComp '15*, pp.169–179 (2015).
- [11] Kato, K. and Miyashita, H.: Extension Sticker: A Method for Transferring External Touch Input Using a Striped Pattern Sticker, *Adjunct Proc. UIST '14*, pp.59–60 (2014).
- [12] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B.S., Zhang, C. and Abowd, G.D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, *Proc. UbiComp '13*, pp.363–372 (2013).
- [13] Krein, P.T. and Meadows, R.D.: The electroquasistatics of the capacitive touch panel, *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.26, No.3, pp.529–534 (1990).
- [14] Manabe, H. and Yamada, W.: A Capacitive Touch Sensing Technique with Series-connected Sensing Electrodes, *Proc. UIST '17*, pp.645–654 (2017).
- [15] Mann, S.: Wearable computing: A first step toward personal imaging, *Computer*, Vol.30, No.2, pp.25–32 (1997).
- [16] Olberding, S., Gong, N.-W., Tiab, J., Paradiso, J.A. and Steimle, J.: A Cuttable Multi-touch Sensor, *Proc. UIST '13*, pp.245–254 (2013).
- [17] Ono, M., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Touch & Activate: adding interactivity to existing objects using active acoustic sensing, *Proc. UIST '13*, pp.31–40 (2013).
- [18] Rekimoto, J.: SmartSkin: An infrastructure for free-hand manipulation on interactive surfaces, *Proc. CHI '02*, pp.113–120 (2002).
- [19] Rosenberg, I. and Perlin, K.: The UnMousePad: An interpolating multi-touch force-sensing input pad, *ACM Trans. Graph.*, Vol.28, No.3, pp.65:1–65:9 (2009).
- [20] Sato, M., Poupyrev, I. and Harrison, C.: Touché: Enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects, *Proc. CHI '12*, pp.483–492 (2012).
- [21] Savage, V., Zhang, X. and Hartmann, B.: Midas: Fabricating Custom Capacitive Touch Sensors to Prototype Interactive Objects, *Proc. UIST '12*, pp.579–588 (2012).
- [22] Silver, J. and Shaw, D.: Makey Makey: Improving Tangible and Nature-based User Interfaces, *Proc. TEI '12*, pp.367–370 (2012).
- [23] Takada, R., Shizuki, B. and Tanaka, J.: MonoTouch: Single Capacitive Touch Sensor That Differentiates Touch Gestures, *CHI EA '16*, pp.2736–2743 (2016).
- [24] Tsuruta, M., Nakamae, S. and Shizuki, B.: RootCap: Touch Detection on Multi-electrodes Using Single-line Connected Capacitive Sensing, *Proc. ISS '16*, pp.23–32 (2016).
- [25] Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, *Scientific American*, Vol.265, No.3, pp.94–105 (1991).
- [26] Willis, K., Brockmeyer, E., Hudson, S. and Poupyrev, I.: Printed Optics: 3D Printing of Embedded Optical Elements for Interactive Devices, *Proc. UIST '12*, pp.589–598 (2012).
- [27] Wimmer, R. and Baudisch, P.: Modular and deformable touch-sensitive surfaces based on time domain reflectometry, *Proc. UIST '11*, pp.517–526 (2011).
- [28] Zhang, Y., Laput, G. and Harrison, C.: Electrick: Low-Cost Touch Sensing Using Electric Field Tomography, *Proc. CHI '17*, pp.1–14 (2017).
- [29] 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 (2015).
- [30] 池松 香, 椎尾一郎: Ohmic-Touch: 静電容量方式タッチサーフェス上におけるオブジェクトを介したインタラクション手法, 第25回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2017) 予稿集, pp.71–76 (2017).



真鍋 宏幸 (正会員)

1976年生。1999年東京工業大学工学部卒業。2001年同大大学院修士課程修了。同年(株)NTTドコモ入社。以来、ウェアラブル/ユビキタスコンピューティング、入出力デバイス、生体信号を用いた入力インタフェースの

研究に従事。博士(工学)。ACM会員。



山田 渉 (正会員)

2010年東京理科大学工学部経営工学科卒業。2012年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士前期課程修了。同年株式会社NTTドコモ入社。2017年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士後期課程入学。ユーザインタフェース研究および機械学習に関する研究開発に従事。