

PUCs：静電容量方式マルチタッチパネルにおけるユーザの接触を必要としないウィジェット検出手法

中島 康祐^{1,†1,a)} 伊藤 雄一¹ ジモン フェルカー² クリスチャン トーレセン³
シエル オーバーゴード³ ヤン ボルヒャース²

受付日 2014年5月7日, 採録日 2014年10月8日

概要：本論文では、ユーザが触れていない間でも静電容量式マルチタッチパネルによって継続的に位置検出が可能な物理的ウィジェットの構成方法を提案する。市販されている静電容量方式のマルチタッチパネルを使ったデバイスはパッシブな物体の接触はタッチとして検出しないように実装されている。我々は静電容量方式のタッチ検出技術をふまえ、パッシブかつ、ユーザの接触なしで検出可能なウィジェットの構成方法を提案する。提案した方法を用いて実装したウィジェットを17種類の市販されているマルチタッチデバイスの上で評価し、提案手法が様々なデバイスに適用可能であることを確認した。

キーワード：タンジブルユーザインタフェース、透明ウィジェット、パッシブウィジェット、テーブルトップインタラクション、静電容量方式マルチタッチパネル

PUCs: Detecting Transparent, Passive Untouched Capacitive Widgets on Unmodified Multi-touch Displays

KOSUKE NAKAJIMA^{1,†1,a)} YUICHI ITOH¹ SIMON VOELKER² CHRISTIAN BJØRGE THORESEN³
KJELL IVAR ØVERGÅRD³ JAN BORCHERS²

Received: May 7, 2014, Accepted: October 8, 2014

Abstract: Capacitive multi-touch displays are not designed to detect passive objects placed on them—in fact, these systems usually contain filters to actively reject such touch data. We present a technical analysis of this problem and introduce Passive Untouched Capacitive Widgets (PUCs). Unlike previous approaches, PUCs do not require power, they can be made entirely transparent, they are detected reliably even when no user is touching them, and they do not require internal electrical or software modifications of the touch display or its driver. We show the results from testing PUCs on 17 different off-the-shelf capacitive touch display models, and provide initial technical design recommendations.

Keywords: tangible user interfaces, transparent widgets, passive widgets, tabletop interaction, capacitive multi-touch

1. はじめに

マルチタッチディスプレイでは表示されたコンテンツに直接指示操作ができる。また、ボタンやスライダなどの操作対象を任意の位置に表示できるため、操作のためのインタフェースをインタラクションの状況に連動して柔軟に変えられ、ユーザにとって適切なマッピングを維持でき、直感的な操作を提供しやすくなった。一方で、物理的なキーやスライダに比べると触覚的な手がかりに乏しく、操作す

¹ 大阪大学
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan
² アーヘン工科大学
RWTH Aachen University, Ahornstraße, Aachen 52074, Germany
³ ブスケルード・ヴェストフォル大学
Buskerud and Vestfold University College, 3184 Bore, Horten, Vestfold, Norway
^{†1} 現在、三菱電機株式会社
Presently with Mitsubishi Electric Corporation
^{a)} kousuke.nakajima@gmail.com



図 1 iPad 上の PUCs widget. ブリッジマークでの実装 (左) とリングマークでの実装 (中央). 右は iPad の適応的なフィルタを無効化するためのタッチ点

Fig. 1 PUCs widgets on an iPad: a transparent Bridget PUC (left) and a Ring PUC (center). The clip to permanently ground a touch point and override the iPad's adaptive filter can be seen on the right.

るためには操作箇所を注視する必要があった。また、ユーザはボタンの押下などの入力を受理されたことを確認するために視覚的なフィードバックを待たなければならない。

こうしたマルチタッチディスプレイに対して物理的なウィジェットをタッチディスプレイ上に置き、ウィジェットを介してタッチディスプレイに入力する手法が提案されてきた [5], [6], [8]。これらは、タッチディスプレイの利点と、実物体の持つ触覚的な手がかりとを兼ね備えた入力手法を実現している。市場で入手できるマルチタッチデバイスの多くが静電容量式を採用していることもあり、静電容量式マルチタッチディスプレイの上で利用可能なウィジェットについて様々な提案がなされてきた [3], [4], [10]。

しかし、こうした静電容量式タッチパネルがウィジェットを検出するためには、ユーザの身体がウィジェットに触れて、十分な静電容量を与える必要がある。そのため、システムがウィジェットを常時検出して位置をトラッキングするためには、ユーザはウィジェットの導電性を持つ部分に触れ続ける必要があった。また、このようなウィジェット検出では、システムはユーザがウィジェットから単に手を離れた場合と、ウィジェットがタッチパネル上から取り除かれた場合とを厳密に区別することが難しい。どちらの場合でもタッチ検出が消失するだけであるため、ユーザの操作を適切に識別できない恐れがある。また、ユーザが触れていないウィジェットがパネル上で移動した場合（ウィジェットをパネル上で滑らせて、慣性で移動した場合や、絶縁体でウィジェットに触れて移動させた場合など）には、ユーザが触れていない間の移動を検出することができず、システムが認識するウィジェット位置が実際のウィジェットの位置からずれてしまうという問題もある。

そこで本論文では、市販の静電容量式マルチタッチデバイスの上で、ユーザが触れていない間もタッチ入力を擬似的に発生させられるマークの構成方法を提案する。これにより、市販の静電容量式タッチパネルの上で、継続的にトラッキングが可能なウィジェットが実現できる。本論文で

は、提案するマーク構成手法を用いて実装したウィジェットを PUCs (Passive Untouched Capacitive widgets) と呼ぶ。図 1 に実装した PUCs を示す。このウィジェットはごく単純な構造でありながら、ユーザの接触がなくてもシステムによって位置を検出することが可能となっている。本論文では指で触れなくてもタッチ入力を発生させるためのマーク構成手法について述べたうえで、様々なタッチパネル上で実装した PUCs が検出されることを評価する。

2. 関連研究

2.1 タッチパネル上で用いるウィジェット

静電容量方式のタッチパネルの上で物理的なウィジェットを用いるというコンセプトは SmartSkin において提案されている [6]。その後も静電容量方式のマルチタッチタッチパネルを採用したスマートフォンやタブレット端末の上で用いる様々なウィジェットが提案されている [4], [5], [10]。Jansen らはウィジェットを貼り付けたタブレットを大画面ディスプレイのリモコンとして用いることを提案している [4]。ウィジェットなしのタブレットでの操作と比較した実験では、スライダの操作精度が向上することや、スライダのつまみを獲得しやすいことを明らかにしている。また、Yu らはスマートフォンにボタンを付与する方法を提案し、エンタテインメントなどへの応用を示している [10]。こうしたウィジェットに関連した技術は商用製品にも応用され^{*1}、広がりを見せている。ボタンやスライダなどをウィジェットとして配置すれば、操作箇所に触覚的な手がかりを付与できるため、視覚的な注意を払わなくても操作しやすくなる。また、タッチパネル上の操作に触覚フィードバックを導入できることもこうした技術の特徴である。本論文ではこうしたウィジェットを用いたインタラクションの応用範囲や設計方法を広げる新たな検出手法を提案する。

2.2 ウィジェットの認識手法

タッチパネル上に配置して用いるウィジェットは、タッチ検出方式に合わせて様々な設計されてきた。特にここではカメラベースの認識手法と、静電容量方式のタッチパネルのための手法に関して述べる。

マルチタッチパネルのうち、スクリーンの背面に設置した赤外線カメラを用いてタッチ検出をするものでは、赤外線を反射するマークを用いて比較的容易にウィジェットを認識できる [2], [8]。これらの手法はウィジェットの底面にあるマークを画像認識して位置や方向を検出している。しかし、画像認識に基づくタッチディスプレイでは次のような制約がある。第 1 に、ウィジェットにユーザが触れただけではマークに変化が生じないため、ユーザがウィジェッ

*1 Fling game controller, tenonedesign.com

トに触れたことを検出できない。第2に、筐体内にカメラが画面全体をとらえるための空間が必要で、タッチパネルの筐体が大型化しがちである。第3に、赤外線を検出する方式では屋外や周囲に強い赤外光源がある場合にウィジェット認識を含めたタッチ認識が困難になる。

これに対して、静電容量方式のタッチパネルを用いた場合、ディスプレイは小型化でき、屋外でも利用可能となる。しかし、静電容量方式のタッチパネルで利用できるウィジェットでは、基本的にユーザが触れている間のみシステムがウィジェットの位置をトラッキングするため、システムが認識した位置と実際のウィジェットの位置がずれてしまう場合がある。また、ウィジェットをタッチパネルから取り除いたことと、単にウィジェットから手を離れたことをシステムが区別することが難しい。これら2つの状況を区別するために、ウィジェットが発生させているタッチ点がいっせいに消失するか、あるいは順番に消失するかをシステムで検出するという方法が考えられる [3]。しかし、この方法でウィジェットを取り除いたことと、手を離れたことを精度良く識別できたとしても、触れられていないウィジェットの移動を検出できないという問題が残る。アクティブな素子を含んだウィジェットでは常時検出が可能となったが [9]、充電の手間や、複雑な構成、実装コストの上昇などの問題がともなう。

我々は静電容量方式のタッチパネルにおいてユーザが触れなくても検出可能なウィジェットを、アクティブな素子を持たない構成で実現し、静電容量方式のタッチパネル向けのウィジェットに新たなインタラクション手法をもたらす。

3. 静電容量によるタッチ検出手法

まず、静電容量方式のマルチタッチディスプレイのタッチ検出方法について述べ、そのうえでタッチ検出をユーザの接触なしに発生させる方法について検討する。

静電容量方式のマルチタッチディスプレイは、接地された導電体（人間の手指など）がスクリーンに近接した場合にタッチを検出する。検出にはディスプレイパネルの表面に配置された透明電極が用いられる。静電容量方式には主に自己容量方式と相互容量方式の2種類があるが [1]、マルチタッチデバイスの実装には相互容量方式がさかんに用いられている。本論文でも相互容量方式のマルチタッチパネルを対象にウィジェットの構成を検討する。

相互容量方式のマルチタッチパネルは、短冊状の透明電極を縦横に並べ、格子状に並べた構造を内部に持っている [6]。縦と横に並ぶ電極群のうち、片方向を送信側 (Tx) とし、もう片方の電極群を受信側 (Rx) として扱う。タッチ検出においては、ある1つのTx電極に信号が印加され、そのTxとあるRxとの交差点に存在する静電結合がそれと交差するRxに信号を伝搬する [6]。こうしてRxに伝搬

された信号を測定することでシステムはTxとRx間の静電容量を計測している。人間の手指のような接地した導電体がRx-Txの交差点に接近した場合、Rx-Tx間の電界は減少する [11]。この電界の変化を計測することで、タッチを検出する仕組みとなっている。

現在市販されているマルチタッチデバイスの多くは幅5mm前後の電極で実装されているため、人間の手指が接近した場合は1つ以上の電極の交点において電界の変化が生じる。したがって、タッチパネルでは複数の交点で検出された静電容量の変化を基に、手指のタッチ位置を算出して出力している。特に手指でのタッチに最適化されたマルチタッチパネルの場合には、静電容量の変化が楕円形の領域に生じているかどうかなどの条件を設けて、意図しないタッチイベントや手指以外の物体の接触などを無視するような仕組みが設けられている場合もある。

したがって、こうした相互容量方式のマルチタッチパネルにタッチを検出させる条件は以下のとおりである。

1. Tx-Rxの交点に閾値以上の静電容量の変化を発生させる。
2. タッチ検出されるサイズや形状のマーカ（タッチパネルに触れる部分）を使用する。

以下、4章でこの2つの条件をどのように実現するかについて詳細を述べる。

4. 静電容量変化のためのマーカの接地手法

相互容量方式タッチパネルの特性をふまえ、ウィジェットがウィジェットのみでタッチ検出を発生させるには先の2つの条件を満たす必要がある。まず、本章では条件1の静電容量の変化を生じさせるために、ウィジェットのマーカを接地させる方法を検討する。条件2のタッチ検出されるマーカのサイズや形状などの設計指針については5章で検討する。

マーカを接地する方法として、多くのウィジェットはユーザの身体と電気的に導通させることを利用してきた [6]。この方法ではシステムがウィジェットを継続的に検出するためにユーザがマーカにつながる導電性の部分に触れておく必要があった。このようなウィジェットは単にユーザの手指を延長するようにしてタッチを発生させているので、ユーザが手を離せばタッチも消失する。その他の方法として、マーカやウィジェットを有線で接地するという方法も考えられるが、こうした実装はユーザがウィジェットを自由に動かしたり取り除いたりすることを妨げてしまう。

そこで我々は、マーカの直下に存在する電極の格子点の静電容量を変化させるために、タッチパネルの別の領域を接地点として用いる手法を提案する。導電体でできた2つ以上のマーカを電気的に接続しておくことで、ある格子点の計測が行われているときには、それ以外のマーカの領域が接地点として機能し、十分な静電容量の変化を発生させ

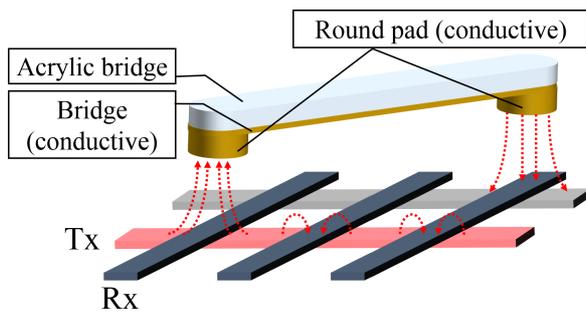


図2 ブリッジマーカ。赤線は静電結合を示す

Fig. 2 Basic concept of a Bridge Marker. Red connections indicate capacitive coupling.

ることができる。これによって、アクティブな素子やユーザの接触を用いることなく、タッチパネルにタッチを発生させられるマーカを構成することが可能となる。

この検出原理を用いた最も単純なマーカパターンとして、ブリッジマーカがある。図2にブリッジマーカの概要を示す。ブリッジマーカは導電体でできた2つのマーカをつないだ単純な構造となっている。片方のマーカの直下に存在するTx電極に信号が印加されたとき、もう一方のマーカの直下にある別の電極は接地レベルにあり、マーカとこの電極が静電結合していることで計測地点の静電容量を変化させることができる。こうして各マーカの直下の静電容量が計測される際には、残りのマーカがタッチパネルの別の部分と静電結合することでタッチが検出されるために十分な静電容量の変化を相互に引き起こすことができる。

ただし、タッチパネル内の電極に沿ってブリッジマーカが置かれた場合には、マーカがタッチとして検出されなくなる。実際にはディスプレイの長辺や短辺に平行な向きにブリッジマーカが配置された場合に検出されなくなることが観察された。多くのタッチパネルでは電極は縦横に格子状に配列されているためであると考えられる。

この現象を確認するために、格子状に並ぶ電極の間の静電容量と、電極とブリッジマーカとの間の静電容量を有限要素法を用いた電磁界シミュレータであるFEMM*2によって2次元的なモデルでシミュレートし算出した。その結果を図3に示す。特にマーカの向きと電極間の静電容量の変化の関係に着目し、基準となる静電容量からの減少量を示した。この図より、電極間の静電容量はブリッジマーカを斜めに配置した場合に大きく減少しており、指で触れた状態を模擬できていることが分かる。また、ブリッジの方向が電極と平行な向きに近づくと減少量が負になっている。これは、ブリッジを介して電極間の結合が強まってしまうことを示唆している。この結合の強まりは、縦横いずれかの方向に配置されたブリッジマーカがタッチパネルに検出されなかった現象とよく対応している。ブリッジマーカは単純な構成で指の接触を模擬できるが、電極と平行に配置

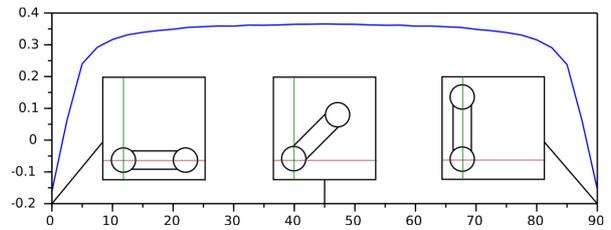


図3 ブリッジマーカの配置方向の変化に対する、電極間の静電容量の低下量に関するシミュレーション結果

Fig. 3 Simulated decrease in intersection capacitance below a pad for different orientations of a Bridge marker. Scale: 0 is base capacitance, 1 is capacitance for grounded conductor in contact with display.

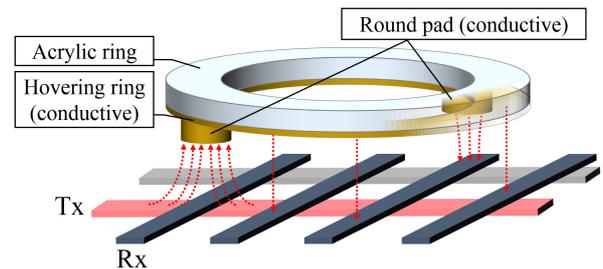


図4 リングマーカの基本図。赤線は静電結合を示す。実際には3つ以上のマーカで構成する

Fig. 4 Basic concept of a Ring Marker. Red connections indicate capacitive coupling.

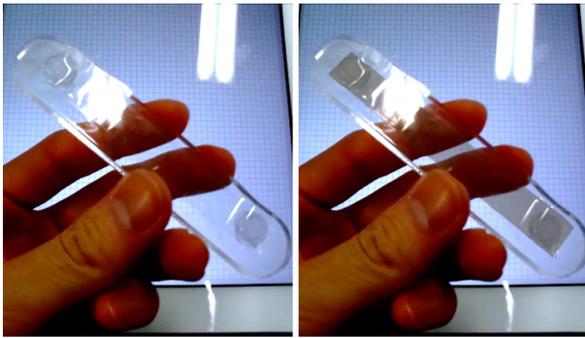
した場合に検出されないという制約も持っていることがシミュレーションからも確認できた。

そこで、こうした制約を受けないマーカパターンとして、リングマーカを提案する。図4にその概要を示す。このマーカパターンでは、3つ以上のマーカがリング状の導電体によって電気的に接続されている。また、リング部分の導電体はタッチパネルの面からごくわずかに浮かせてあり、完全にパネルと接触しているのはマーカ部分のみとなっている。この構成では、あるマーカの直下の静電容量が計測される際には、他のマーカが接地点として振る舞うほか、リング部分もわずかにパネル内部の電極と静電結合する。これにより、ウィジェットの向きにかかわらず、どのマーカもその直下にあるRxやTxとは異なる電極と結合できるようになり、安定してタッチを発生させることができる。また、リング状の部分はわずかにタッチパネルから浮かせることでタッチ検出されないように配慮してある。

なお、リングマーカ以外にも、提案した原理を用いれば様々なマーカパターンでウィジェットを実装することが可能であると考えられる。たとえば、タッチパネルから浮かせたリング部分で十分な静電結合を確保できる場合には、単一のマーカにこれを接続して、1つのタッチだけを発生するようなウィジェットも設計可能であると考えられる。

また、提案するマーカは、アクティブな素子を用いずに実装できる。そのため、安価で手軽にマルチタッチパネル

*2 www.femm.info

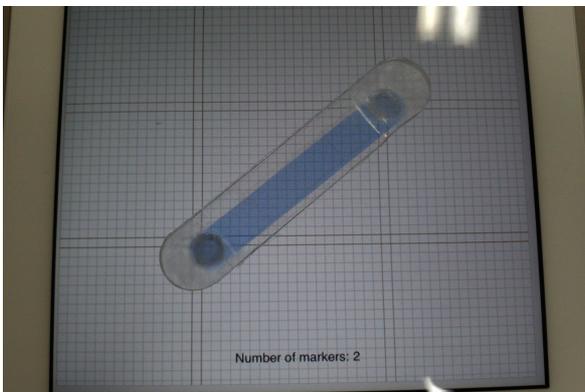


(a) 透明な導電体で実装したウィジェット。

左はウィジェットの写真。

右は ITO フィルムの部分を判別しやすくした画像。

(a) Implementation with transparent conductive film.



(b) 透明なウィジェットがタッチを発生させる様子

(b) Touch detection caused by a transparent widget.

図 5 透明な導電体で実装したウィジェット

Fig. 5 Implementation of PUCs widget with transparent conductive film.

で認識できるウィジェットを実装できる。また、マーカやマーカ間の接続に用いる導電体を、ITO (酸化インジウムスズ) などの透明な導電体で実装すれば、ウィジェット全体を透明にすることも可能である。図 5 に透明な導電体で実装した PUCs を示す。このような透明ウィジェットでは、タッチパネルの表示を変えることでウィジェット内に視覚的な情報を提示することが可能である。ITO フィルム自体は薄い透明なプラスチック板として入手が可能で、レーザカッターで切断することも可能である。本提案手法によってマルチタッチパネルで認識できるウィジェットを手軽に製作できるようになると期待できる。なお、ITO に関しては曲げ耐性は高くなく、極端に曲げた場合には屈曲した部分が導電性を失う場合がある。

本論文で提案したマーカは、指で触れたときにだけタッチ入力が発生させるマーカと併用することもできる。指で触れたときだけタッチを生じるマーカとは、ウィジェット表面のある部分 (ユーザの接触を検知したい部分) に貼り付けた導体と、ウィジェット底面 (タッチ入力を生じる部

分) の導体とを電氣的に接続して構成される。

1つのウィジェットに、ブリッジマーカ、またはリングマーカと、指で触れたときにだけタッチ入力が発生させるマーカを混在させれば、マウス操作におけるマウスホバーに相当する状態をシステムが感知できるようになる。具体的に、物理的なスライダを備えたウィジェットを例にとれば、ウィジェットがタッチパネルに設置されたが、まだユーザがスライダのつまみに触れていない状態と、ユーザがスライダのつまみをつかんだ状態とを区別することが可能となる。これら2つの状態の間で、底面に生じるタッチ点の数や位置的なパターンが異なるようにウィジェットを設計できるからである。

5. タッチ検出のための PUCs 設計指針とその評価

5.1 検出可能性

ここでは、4章で提案した検出原理で実装したウィジェットが、様々な静電容量方式のマルチタッチパネルで検出されるかを評価する。市販されているマルチタッチデバイスでは、いずれも静電容量方式でタッチを検出しているものを評価に用いるが、それぞれでタッチ検出のアルゴリズムや、意図しないタッチを無視するためのフィルタリングに関する実装は異なっていると考えられる。PUCs が一般的に広く利用できることをこの評価によって検証する。

本評価では、17種類の市販されているマルチタッチデバイスにおいて、実装した PUCs でタッチが発生させることができるか検証した。使用した端末は、第1世代から第4世代までの Apple iPad と、iPhone 3, 3S, 4, 4S, 5, Google Nexus 4, Nexus 7, Perceptive Pixel 27[”], Microsoft Surface Tablet に加えて、Apple, Asus, Samsung, Sony のノートパソコンに備わるトラックパッドである。ウィジェットにはブリッジマーカとリングマーカで実装した PUCs の2つを用いた。ブリッジマーカではマーカの直径を 10mm, ブリッジの長さを 50mm とした。リングマーカには3つのマーカを用い、それぞれ直径を 10mm, リングの直径を 40mm とした。なお、10mm というサイズは5歳児の第2指爪基部幅に相当し [12], タッチパネルで十分に認識可能なサイズである。

それぞれのデバイスにウィジェットを接触させたところ、すべてのデバイスがいずれのマーカのウィジェットでもタッチを検出することが確認された。ウィジェットには誰も触れずに、デバイスはウィジェットを検出し続けた。なお、ブリッジマーカの場合は、すでに述べたように、ディスプレイの枠とブリッジとが平行なときは検出されなかった。これによって、提案した検出手法が幅広いマルチタッチデバイスに対応できることが確認できた。

5.2 タッチパネルの電極幅

先の評価によって実装したPUCsが様々なデバイス上で認識可能であることを確認したが、マルチタッチデバイスの基本的な特性が同様であるかを評価し、提案手法の有効範囲について検討する。ここでは、様々なマルチタッチデバイスで使用されている透明電極の電極幅を計測する。実験では、第1世代および第3世代iPadと、iPhone 4, 4S, Perceptive Pixel 27^{*}を計測対象とした^{*3}。電極幅を計測するため、オシロスコープに5mm幅の長いプローブ電極を接続し、これをタッチパネルの長辺もしくは短辺と平行な方向に貼り付ける。Txと平行にプローブ電極が設置された場合は、1つのTxをスキャンする時間が、Txと垂直にプローブ電極が設置された場合には全Txをスキャンするのにかかる時間がオシロスコープ上で測定でき、これらの時間からTx電極の数を推定できる。最後にタッチパネル幅をTx電極の数で除算することでTx電極1つの幅を算出する。計測方法の詳細は付録Aで述べる。

この方法で計測した結果、計測したデバイスはすべて約5mm幅の電極を内部に持っていた。このことから、マルチタッチデバイスでは5mm幅の電極が広く使われていることがうかがえる。電極の幅は認識できるマーカのサイズをはじめとしてマーカの設計に影響すると考えられるが、今回の測定からデバイス間で大きな違いは見られず、提案したマーカが類似の設計で様々なデバイスに適用できる可能性があることが分かった。

5.3 マーカサイズとマーカ間距離が検出に与える影響

マーカのサイズやマーカ間の距離はタッチパネルの特性に合わせて最適化が必要と考えられる。小さすぎるマーカは検出しにくく、また、マーカ間距離が近すぎる場合には複数のマーカが1つのタッチとして認識されてしまう可能性もある。そこで、様々なマーカサイズやマーカ間距離を変更してマルチタッチデバイスで検出可能性を評価し、現在市販されているデバイスの上で安定的に検出可能なマーカパターンについて検討する。

検出可能性の評価では、2つのマーカを持つブリッジマーカと、3つのマーカを持つリングマーカとを、マーカサイズやブリッジの長さ、リングの直径を様々な変えて用いる。使用したマーカはそれぞれ銅箔テープによって電気的に接続されており、リング部分やブリッジ部分はタッチパネル面から1mm浮くように実装した。なお、この1mmという浮かせる距離は経験的に決定している。この浮かせる距離は、タッチパネル側の実装や、マーカの大きさ、浮かせる導体部分の幅などの影響を受けて適切な値は変化する可

能性がある。マーカサイズは直径4, 6, 8, 10mmの4種、ブリッジ長は10mmから30mm、リング半径は20mmから50mmまで変化させて評価する。リングマーカにおけるマーカ間の距離はどのリング半径においても10mm以上離れているように実装している。評価では、実装したウィジェットをタッチパネル上に置き、すべてのマーカが5秒以上検出されていた場合に検出できたものと見なす。これを10回繰り返し、各ウィジェットの検出率を求める。なお、ブリッジマーカは、タッチパネルの枠線と平行な向きから45°傾けた方向に向けてパネル上に置いて用いる。使用するマルチタッチデバイスは5.2節で用いたものと同じとした。

ブリッジマーカの場合には、マーカサイズが8-10mmかつ、ブリッジ長が20mm以上の場合に90-100%の検出率となった。それよりも小さいマーカでは検出率は0%となった。また、マーカサイズが8mm以上の場合でも、ブリッジ長が10mmまで短くなると、検出率は90%まで低下する傾向が確認できた。リングマーカでは、リング半径50mmかつマーカサイズが6-10mmの条件で90-100%の検出率となった。また、マーカサイズを6mmよりも小さくした場合は検出率が0%となった。

この評価実験を通じて、マーカが狭小な場合や、2つのマーカが接近している場合には、検出が不安定になる様子が確認できた。また、ブリッジマーカでもリングマーカでも、適切な設計を行えば高い検出率を得られることが分かった。これらにより、提案したマーカ構成方法に関する一定の設計指針を明らかにできた。

本節での評価のように、最小のマーカサイズや最小のマーカ間距離を明らかにしておくことは、複数のマーカパターンを用意して、それぞれのパターンを識別するシステムを構築する場合に、特に有用となる。最小のマーカサイズや、最小のマーカ間距離は、とりうるマーカパターンのバリエーションに強く影響するからである。同じサイズのリングマーカの場合、最小マーカサイズが大きく、最小マーカ間距離が広くなるほど、とりうるマーカパターンのバリエーションは少なくなる。

今回提案したマーカ構成方法では、指で触れたときにだけタッチ入力を生じるマーカに比べて、必要なマーカサイズは大きい。そのため、同じサイズのウィジェットに同じ数のマーカを配置する場合、とりうるマーカパターンは少なくなりがちである。応用で利用する際には、あらかじめ使用するタッチパネル上で最小マーカサイズや最小マーカ間距離を計測しておき、ウィジェットの設計に反映させることが望ましい。

ノートパソコンに搭載されたトラックパッドはマルチタッチデバイスとは異なる挙動をする場合があり、5.2節と本節の実験では扱わなかったが、予備的な調査の結果、2mmのマーカサイズでも検出できる場合があることが観

^{*3} 5.1節とは異なる実験環境で評価したため、5.1節で用いたマルチタッチデバイスすべてを計測対象に含められていない。ただし、執筆時点で市販されている範囲において、指でのタッチに最適化されたマルチタッチデバイスであれば、今回の計測結果から大きく逸脱した電極幅を持つ可能性は低いだろうと考えている。

察された。

いずれの実験でも円形のマーカを用いたが、正方形のマーカなどではタッチ検出が不安定になる傾向があった。この原因は、多くの静電容量方式マルチタッチパネルが指でのタッチを想定しており、円形や楕円形の範囲に静電結合が生じることを想定して最適化されているためではないかと思われる。カメラベースのタッチパネルの上で利用するウィジェットに比べて、静電容量方式のタッチパネルで利用するウィジェットではマーカ形状に自由度が少ないといえ、設計の際には考慮する必要がある。

5.4 長時間にわたるウィジェット検出

多くの静電容量方式のタッチパネルでは、意図しないタッチや時間的に変化する電気的なノイズなどをタッチ入力として検出しないために、適応的なフィルタリングを内部で行っているものとみられる。たとえば、長時間タッチし続けている間にタッチ検出に関わる閾値が更新されていくような処理が想定でき、その結果として、いずれ触れていてもタッチ入力と判定されなくなるような現象が生じうる。こうしたタッチ入力判定の適応的なフィルタリングはウィジェットの認識にも影響することが考えられる。そこでこれらの影響を評価するために、5.1節で用いたブリッジマーカを第1世代 iPad と Perceptive Pixel 27" の上にそれぞれ放置して観察した。

その結果、iPad においては、ブリッジマーカを置いてから 20 秒後、すべてのマーカが同時にタッチとして検出されなくなった。同時に消失したことは、iPad がタッチパネル全面に対して大域的な単一の閾値を適用していること、また、タッチを判定する閾値が動的に変化していることを示唆している。タッチ点が同時に消失した場合、ウィジェットがタッチパネル上から取り除かれたのか、そのまま設置されているのかをシステムが区別しにくい。システムがウィジェットの動きを正確に認識したり、ウィジェットを長時間にわたって検出し続けたりするためには、タッチ検出の閾値が固定されていることが望ましい。

iPad 背面と接続してグラウンドをとったクリップで、iPad 上のある 1 点にタッチを発生させた状態で、ウィジェットをパネル上の別の位置に設置したところ、長時間にわたってウィジェットを検出し続けることができた (図 1 右)。このクリップを設置した iPad 上では 48 時間連続してウィジェットを検出できている。ただし、別の 1 点にタッチを発生させることで長時間の検出が可能になるこの現象は、第1世代の iPad で確認されたものであり、他のマルチタッチデバイスでつねに適用できるとは限らない。なお、第4世代 iPad に iOS 7 を適用した環境では、長時間検出ができない問題が発生しない場合があった。マルチタッチパネルの特性を評価しながらマーカを設計する必要があるといえる。

Perceptive Pixel 27" の場合には、マーカを設置してから 1 分後から 10 分後の間にタッチが検出されなくなっていく様子が観察された。各マーカは異なるタイミングで検出されなくなっていき、その間隔は少なくとも 10 秒以上は空いていた。このことは、Perceptive Pixel 27" が局所的に閾値を管理しており、一定の領域ごとにタッチ検出の閾値を動的に変更している可能性を示唆している。この場合には、徐々にタッチ点が消失していく場合にはウィジェットはその場にあるものとして扱い、同時にタッチ点が消失した場合にはタッチパネル上からウィジェットが取り除かれたものとして扱うことで、動作を認識できると考えられる。また、ウィジェットのうちマーカにつながる導電性の部分に触れて操作すればシステムは再びマーカをタッチとして検出し始める。

5.5 同時に利用可能なマーカ数の制約

市販されているマルチタッチデバイスにおいて、同時に検出できるタッチ点の数には上限がある。たとえば、iPad では 11 点、Perceptive Pixel 27" では 100 点が上限となっている。ウィジェットの種類や位置、向きをマーカのパターンから認識するためには、1 つのウィジェットに少なくとも 3 つのマーカを設置しておく必要があるため、タッチ点数の上限は同時に利用できるウィジェットの数を規定してしまう。アクティブなマーカ [9] によってマーカの認識を時分割多重化すれば同時に認識できるウィジェットの数を増やせるが、パッシブな構成で数を増やすことは容易でない。

6. おわりに

本論文では静電容量方式のマルチタッチパネルにおける、ユーザの接触を必要としないウィジェット検出手法を提案した。タッチを擬似的に発生させるための接地点としてタッチパネルの別の領域を用いることで、ユーザが接触しなくてもシステムはマーカの位置にタッチを検出することが可能となった。本手法を用いて実装した PUCs は、電源が不要で実装が容易であるほか、透明な導電性物質を用いることで透明なウィジェットとして実装することも可能である。この手法によってより簡素な構成でマルチタッチパネル上でのウィジェットを実現可能となったといえ、本提案はこうしたウィジェットを用いたインタラクションの応用範囲や設計方法を広げることに貢献するものである。

謝辞 本研究は the German B-IT Foundation および the Norwegian Research Council より MACS project (project number 217788) として助成を受けたものである。また、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Barrett, G. and Omote, R.: Projected-Capacitive Touch Technology, *Information Display*, Vol.26, No.3, pp.16–21 (2010).

[2] Patrick, B., Torsten, B. and Frederik, R.: Lumino: tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles, *Proc. CHI '10*, pp.1165–1174 (2010).

[3] Chan, L., Müller, S., Roudaut, A. and Baudisch, P.: CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens, *Proc. CHI '12*, pp.2189–2192 (2012).

[4] Jansen, Y., Dragicevic, P. and Fekete, J.-D.: Tangible Remote Controllers for Wall-Size Displays, *Proc. CHI '12*, pp.2865–2874 (2012).

[5] Kratz, S., Westermann, T., Rohs, M. and Essl, G.: Cap-Widgets: Tangible Widgets versus Multi-touch Controls on Mobile Devices, *Proc. CHI Extended Abstract '11*, pp.1351–1356 (2011).

[6] Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Free-hand Manipulation on Interactive Surfaces, *Proc. CHI '02*, pp.113–120 (2002).

[7] Silicon Labs.: How to Minimize Touchscreen Electromagnetic Interference, Technical Report (2011).

[8] Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J. and Borchers, J.: SLAP widgets: Bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops, *Proc. CHI '09*, pp.481–490 (2009).

[9] Yu, N.-H., Chan, L.-W., Lau, S.Y., Tsai, S.-S., Hsiao, I.-C., Tsai, D.-J., Hsiao, F.-I., Cheng, L.-P., Chen, M., Huang, P. and Hung, Y.-P.: TUIC: Enabling Tangible Interaction on Capacitive Multi-touch Display, *Proc. CHI '11*, pp.2995–3004 (2011).

[10] Yu, N.-H., Tsai, S.-S., Hsiao, I.-C., Tsai, D.-J., Lee, M.-H., Chen, M.Y. and Hung, Y.-P.: Clip-on Gadgets: Expanding Multi-touch Interaction Area with Unpowered Tactile Controls, *Proc. UIST '11*, pp.367–372 (2011).

[11] Zimmerman, T.G., Smith, J.R., Paradiso, J.A., Allport, D. and Gershenfeld, N.: Applying electric field sensing to human-computer interfaces, *Proc. CHI '95*, pp.280–287 (1995).

[12] 平成 19 年度機械製品の安全性向上のための子どもの身体特性データベースの構築及び身体特性データベースを用いた人体損傷可視化手法の開発に関する調査研究報告書, 社団法人日本機械工業連合会, 社団法人人間生活工学研究センター (2008).

付 録

A.1 電極幅の計測方法

ここでは、静電容量方式のマルチタッチパネルに内蔵されている電極の幅を非破壊に推定するための計測手順について詳述する。本論文では、ここで述べる方法を 5.2 節での計測に用いている。

プローブ電極として、5 mm 幅の十分に長い金属箔を用い、これをオシロスコープのプローブと接続する。プローブ電極はタッチパネルの長辺もしくは短辺と平行な方向に向けて、パネルの表面に置く。オシロスコープのグラウンドは、タッチパネル面と同じ程度の広さを持った金属箔につ



図 A.1 Tx に流れる信号を測定するための電極配置

Fig. A.1 Electrode layout for measurement of signal on Tx.

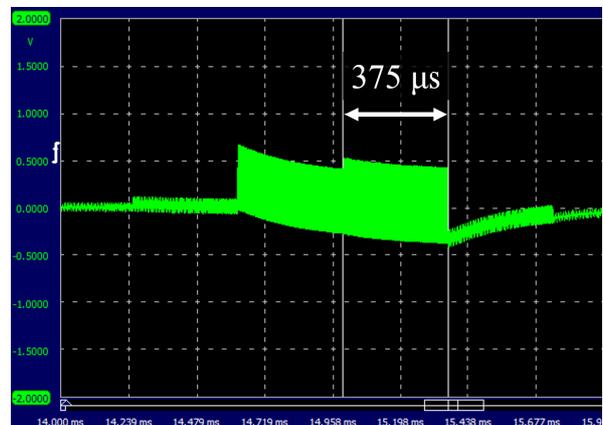


図 A.2 Tx とプローブ電極が平行なときの計測結果

Fig. A.2 Measured signal when the probe electrode parallels with Tx electrode.

なく、この金属片をタッチパネルの下に敷き、パネルの背面と触れさせておく。

図 A.1 に計測電極とグラウンドをタッチパネルに設置した様子を示す。この図では第 3 世代 iPad を用いている。なお、これ以降も第 3 世代 iPad での計測結果を紹介しながら説明を進めるが、5.2 節の実験で用いたデバイスでは同じ方法で電極幅を計測できた。

図 A.1 に示したような、計測電極をタッチパネルの短辺と平行に設置した状態でのオシロスコープの計測結果を図 A.2 に示す。示した波形の左右にみられるわずかな振幅は、タッチパネル全面をスキャンするサイクルに関係したものとみられる。図 A.2 に示した波形の中央にある大きな振幅は、Tx に信号が流れたことに起因しているとみられる。つまり、計測電極と Tx が平行な位置関係にあり、この大きな振幅が現れている時間が、ある Tx のスキャン 1 回にかかる時間に対応すると考える。また、この場合、Tx はタッチパネルの短辺と平行な方向に伸びていると考えられる。

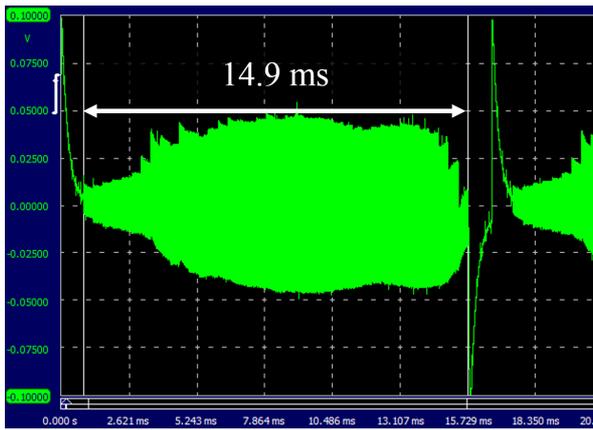


図 A.3 Tx とプローブ電極が垂直に交わるときの計測結果
Fig. A.3 Measured signal when the probe electrode perpendicularly intersects to Tx.

次に、計測電極をタッチパネルの長辺と平行に設置した状態での計測結果を図 A.3 に示す。このときには、弱い信号が 14.9ms にわたって現れ、それが時間的に繰り返されている。この時間的な信号幅は、すべての Tx をスキャンすることにかかる時間に対応していると考えられる。

これらの計測から得た、全スキャン時間を、Tx のスキャン 1 回にかかる時間で割ることで、Tx の数が推定できる。第 3 世代 iPad で計測した例では、 $14.9\text{ms}/375\mu\text{s} = 39.7$ となり、約 40 本の Tx 電極がパネル内部にあることがうかがえた。

この計測の場合では、Tx はタッチパネルの短辺と平行に伸びていた。このことから、タッチパネルの長辺の長さを Tx の数で除算することで、Tx の幅を推定する。この場合は $197\text{mm}/40 = 4.93\text{mm}$ となり、5mm 幅に相当する Tx 電極が用いられているものと推定した。



中島 康祐

2011 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2014 年同大学院博士後期課程修了。同年より三菱電機株式会社。博士（情報科学）。



伊藤 雄一（正会員）

2000 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。2002 年同大学院情報科学研究科助手。2008 年より大阪大学ウェブデザインユニット（現クリエイティブユニット）准教授。博士（情報科学）。



ジモン フェルカー

アーヘン工科大学メディアコンピューティンググループにてリサーチアシスタント。マルチタッチシステムやタンジブルユーザインタフェースの研究に従事。



クリスチャン トーレセン

ブスケルーアンドヴェストフォル大学マイクロアンドナノシステム博士課程。



シェル オーバーゴード

ブスケルーアンドヴェストフォル大学海洋ヒューマンファクタ教授。同海洋テクノロジーアンドイノベーション学部研究ヘッド。グローバルマリタイムナレッジハブにて認知システム工学・ヒューマンファクタのチェアも務める。



ヤン ボルヒャース

アーヘン工科大学コンピュータサイエンス学部教授。同メディアコンピューティンググループを率いる。