

1つのタッチセンサを用いたマルチタッチジェスチャの認識

真鍋 宏幸^{1,a)}

概要: 静電容量方式のタッチセンサを1つだけ用いたマルチタッチジェスチャ検出手法を提案する。細いセンシング電極を用いることで、タッチと複数の指によるスワイプを検出することができる。実験の結果、4種類のジェスチャを98%の精度で認識することができた。提案手法は、低消費電力化や小型化が可能であるため、特に小型デバイスに有効であると考えられる。

Multi-touch Gesture Recognition by Single Touch Sensor

HIROYUKI MANABE^{1,a)}

Abstract: Multi-touch gesture recognition by single capacitive touch sensor is proposed. Its narrow sensing electrode allows to recognize touch and multiple-finger swipe. An experiment shows that 4 gestures are recognized with 98% accuracy. The proposed technique that can be miniaturized and implemented by a quite low powered circuit is suitable for tiny devices.

1. はじめに

無線通信や電子回路の低消費電力化、バッテリー容量の増大と環境発電技術の進展、さらに加工技術の向上などにより、メガネ型デバイス^{*1}や、腕時計型デバイス^{*2}、小型音楽プレーヤ^{*3}など高機能な小型デバイスが実用化されている。デバイスの小型化には、持ち運びが容易になり、常時装用も可能となるというメリットがあるが、一方でデバイスへの入力が難しくなるという課題が生じる。例えば、指よりも小さな超小型スイッチを入力に用いた場合、適切なフィードバックを与えることが難しく、特に複数のスイッチの中から所望のスイッチのみを押下することは難しい。今後、ユーザとの入出力機構がデバイスの小型化のボトルネックになっていくだろう。実用的な小型デバイスを実現するためには、小型化しても素早く入力ができ、さらに誤入力が少なく、低消費電力な入力手法が必要である。

本論文では、1つのタッチセンサを用いてマルチタッチ

ジェスチャを認識する手法を提案する。提案手法は、特にデバイスの細長い領域、例えばメガネのツルやデバイスの側面、などでの入力に適している。

2. 関連研究

タッチセンサには、静電容量方式、感圧方式、光学方式など様々な方式があるが、静電容量方式のタッチセンサは、一般に低消費電力であり、PCやスマートフォン、高機能小型デバイスなど多くのデバイスの主要な入力手法として利用されている。タッチセンサの利点の1つは、複数の微小センサをアレイ状に設置することで（通常タッチパッドと呼ばれる）、タッチ位置やマルチタッチやスワイプなどのジェスチャを検出できることである[4], [10]。タッチパッドやマウスで利用される光学センサを用いた手法[6]でも、タッチセンサが多数配置された構造となっている。タッチセンサを利用した研究は数多く行われてきており、小型ディスプレイへの背面からの操作[1]、ひも状デバイスの操作[12]、複数のタッチセンサを用いた把持状態検出[3], [15]などのほか、時間領域反射測定法を用いたタッチ検出手法[14]などが提案されている。通常、タッチセンサは指が触れているかどうかを判定するだけであるため、センサを1つだけ用いた場合には、入力の自由度が低くなってし

¹ NTT ドコモ 先進技術研究所
Research Labs, NTT DOCOMO

^{a)} manabehiroyuki@acm.org

^{*1} Google Glass

^{*2} GALAXY Gear

^{*3} iPod nano (6th generation)

まう。センサの数を増やすことで入力自由度を上げることができるが、回路規模が大きくなったり、複雑な処理が必要となり消費電力が増大するという課題がある。1つのタッチセンサのみを使った場合でも、モールス信号やリズムミカルなタップ [5] を使うなどすれば複雑な入力も可能であるが、入力に時間がかかる。また、センサの出力を2値で判別するのではなく、連続値として扱うことで、自由度を上げる方法もある。これは、センサを近接センサや圧力センサとしても動作させることに対応する。1つのフォトリフレクタを用いた例として、[7], [13] などがある。タッチパッドでの近接情報の検出 [10]、デバイス側面に配置したフォトリフレクタによるマルチタッチ操作の検出 [2] などでは、複数センサの出力を連続値として扱っている。Satoらが提案した Touché は、タッチの状態によってインピーダンスや静電容量等の周波数特性が異なることを利用し、1つの電極を用いるだけでタッチや把持状態を識別することができる [11]。同様の識別は、振動を用いても可能であることが報告されている [9]。必要とするセンサ数を減らすことは、製造コストを低下だけでなく、複数電極を併用したときの精度向上などにも貢献する。すでに、1つのフォトリフレクタを用いて、マルチタッチジェスチャを認識できることが報告されている [8]。この手法は、メガネ型デバイスのツルの部分を用いた入力などに適しているが、フォトリフレクタを用いているため、消費電力が大きいという課題があった。

3. 提案手法

静電容量方式のタッチセンサで用いられる電極の形状を工夫することで、1つのセンサでタッチと複数の指によるスワイプを検出する手法を試みる。複数の指を接触させてスワイプを行った場合でも、指と指の間に生じる間隙を検出することで、指の本数を検出することができ、指がセンサに接触している時間からタッチとスワイプを識別できることが、フォトリフレクタを用いた研究により示されている [8]。静電容量方式のタッチセンサで同様なことができれば、消費電力を低減させることができる。

3.1 検出回路とセンシング基板

タッチセンシングにはいくつかの方式があるが、今回は充電時間から静電容量の変化を検出する方式を用いた。実験で使用した検出回路を図1に示す。この回路は、電極間に形成される静電容量を連続的なアナログ信号として出力する。図2に、今回用いたセンシング基板を示す。センシング電極は通常、感度やノイズ耐性の観点から大きい方が望ましいとされるが、本手法では指と指の間隙を検出する目的から細くしなければならない。今回は、1.5mm幅のセンシング電極で実験を行った。センシング電極には絶縁テープを貼付し、その上に滑らかなスワイプを実現するための

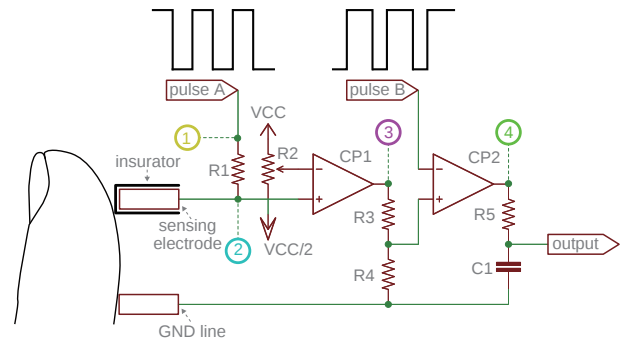


図1 検出回路。マイコンで生成する2種類の矩形波と、2つのコンパレータを用いることで、静電容量に応じた電圧が出力される。

フィルムを貼ってある。GNDラインは剥き出しのままであり、指が直接触れるようになっている。なお、センシング電極のみの基板を用いても動作するが、安定した出力を得るために、今回はGNDラインを設けている。

図3に、電極に指が触れていない時（上図）と触れていない時（下図）に観測される波形を示す。上から順に図1の1, 2, 3, 4の位置での電位変化を表す。図1のpulse A (1の電位) は、マイコンで生成した10kHzの矩形波である。寄生容量や接触により形成される静電容量のために、2の電位はpulse Aにローパスフィルタがかかった波形となる。指が触れている時の方が、静電容量が大きくなるため、R2で設定される閾値の電位に到達するまでの時間が長くなる。このことは、図3の3の電位で、接触している方が立ち上がりが遅くなっており、コンパレータOP1のHI出力の持続時間が短くなっていることからわかる。その差はHIの持続時間に比べて小さいが、早い段階で出力をLOにすることでHI持続時間を短縮し、触れている時と触れていない時のHI持続時間の比を拡大することができる。具体的には、pulse Aの立ち下がりよりも早いタイミングで状態が変化するpulse Bとの比較をOP2で行うことで、立ち上がりのタイミングは3と同じで、立ち下がりのタイミングは3よりも早い4の電位を得ることができる。図の例では、4のHI持続時間は、指が触れていない時に13.7μsであるのに対し、触れている時には10.8μsである。また、HI持続時間の比が3の電位よりも4の方が拡大していることがわかる。この信号にローパスフィルタをかけ、出力信号とする。

3.2 マルチタッチジェスチャを行った時の出力波形

製作した検出回路とセンシング基板を用いて、タッチ、1本、2本、3本指によるスワイプの4種類のマルチタッチジェスチャを行い、回路の出力を20kHzでサンプリングした結果を図4に重ねて示す。タッチが行われた場合、長時間の信号の低下が観測されるのに対し、スワイプを行った場合には、指の本数に応じた谷が短時間の中に観測され

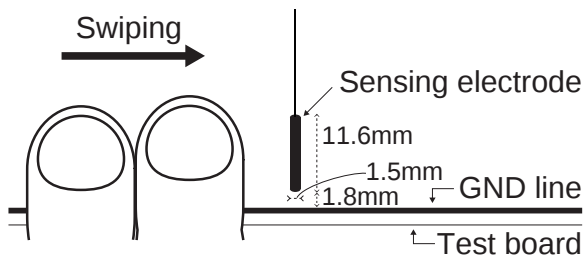


図2 センシング基板。細いセンシング電極と GND ラインで構成される。センシング電極には絶縁テープと保護フィルムが貼られているのに対し、GND ラインには指が直接触れる。

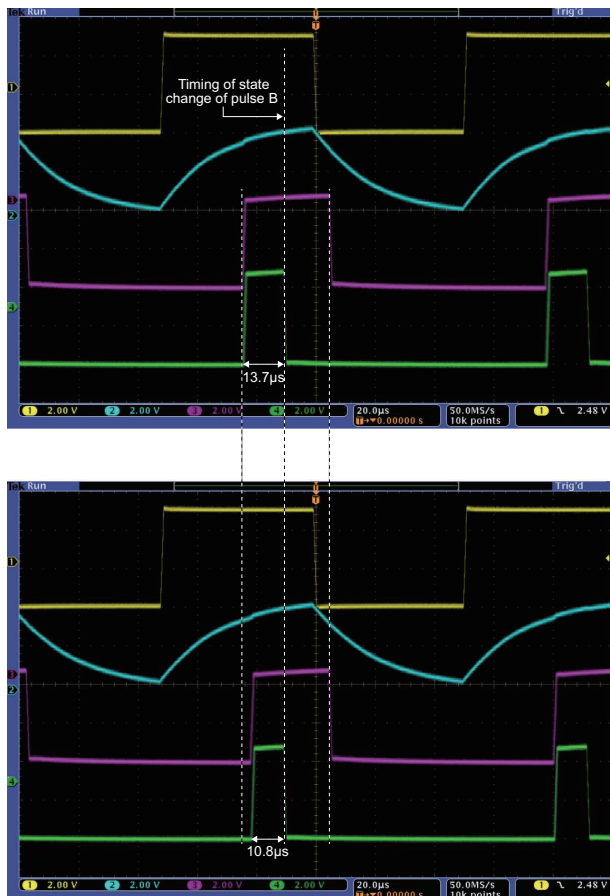


図3 電極に指が触れていない時（上図）と触れている時（下図）の波形例。上から順に図1の1～4の電位に対応する。指が触れると静電容量が増加し、緑色の波形の HI 持続時間は減少する。

た。この結果は、フォトリフレクタを用いた従来研究 [8] と同様であり、静電容量方式のタッチセンサを用いても、マルチタッチジェスチャの認識が可能であることを示している。なお、出力信号には、ローパスフィルタで取り除けなかった 10kHz のノイズと、商用電源由来の 50Hz のノイズが見られる。タッチの波形を見ればわかるように、指が GND ラインに接触している時（タッチしている時。図中で信号が下がっている時）には 50Hz のノイズは比較的小さいが、GND ラインから離れている時（タッチしていない時。図中で信号レベルが高い時）には大きくなる傾向が見られた。

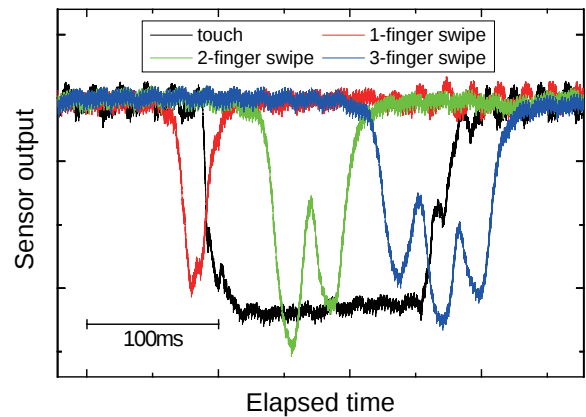


図4 マルチタッチジェスチャを行った時の出力波形の例。タッチでは出力が長い間低下するのに対し、スワイプ時には指の本数に応じた谷が短時間の中で観測される。

3.3 マルチタッチジェスチャの認識

検出回路の出力を 20kHz サンプリングで PC に取り込み、行われたジェスチャを認識するソフトウェアを製作した。ジェスチャの認識は、次のように行われる。あらかじめ、指が触れている時と触れていない時の出力レベルを計測し、閾値を設定する（キャリブレーション）。次に、出力が閾値を下回っているかどうかを監視し、下回っている時にジェスチャが行われたと判別する。ジェスチャが行われている時間が長い場合をタッチとし、短い場合には、さらに谷の数をカウントし、谷の数と同数の指によるスワイプであると認識する。

時間の長短によって、タッチとスワイプを識別しているため、素早いタッチを 1 本指スワイプに、ゆっくりとしたスワイプをタッチに誤認識する場合がある。従来研究 [8] では、出力波形におけるタッチとスワイプの違いとして、ジェスチャの持続時間だけでなく、立ち上がり、立ち下がり、の傾きが指摘されている。静電容量方式のセンサを用いた場合でも、図4のようにタッチ時には急峻な立ち下がりが見られる。立ち下がり、の傾きを併用することで、認識性能の向上が期待できるが、今回は簡略化のために傾きは用いなかった。

4. 評価

本手法の有効性を確認するため、5名の被験者（女性1、男性4）による評価実験を行った。

4.1 実験手順

被験者は実験開始前に 1 分程度、製作したマルチタッチジェスチャ認識システムで自由にタッチ、スワイプ操作を行った。その際、素早いタッチや遅いスワイプは行わないこと、スワイプの方向は図2に示す方向のみとすること、GND ラインに指が触れながらスワイプを行うことを指示として与えた。

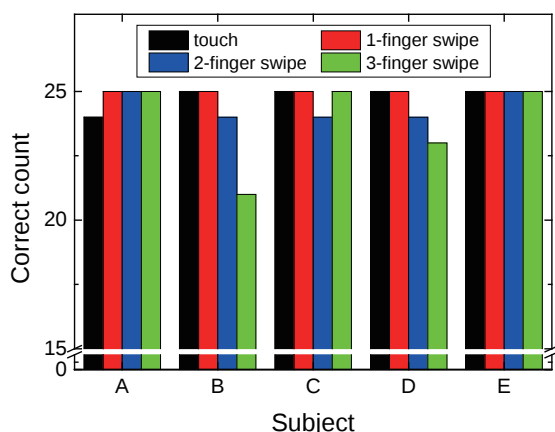


図 5 認識正解数. それぞれのジェスチャを 25 回行い, 正しく認識された数を表す. 誤認識の多くは 2, 3 本指でのスワイプで発生した. 正解率の平均は 98%であった.

次に, 被験者はタッチ, 1, 2, 3 本指スワイプの 4 種類のジェスチャの中から指示されたジェスチャを行い, 指示者はシステムが認識したジェスチャを記録した. それぞれのジェスチャを 25 回 (合計 100 回) 行い, 指示する順番はランダムにシャッフルしている. 実験中, 被験者は認識結果を見ることはできないため, 正しく入力できたかどうかはわからない.

4.2 実験結果

図 5 に, 被験者およびジェスチャごとの正解率を示す. 被験者 A は女性, B~E は男性である. 指の細い女性を含む全ての被験者で高い正解率が得られている (正解率の平均は 98%). タッチを 1 本指スワイプと認識した被験者 A の誤認識を除けば, 誤認識は 2 本, 3 本指スワイプをそれぞれ 1 本, 2 本指スワイプと認識したケースであった. これは, 2 本の指に相当する出力波形上の 2 つの谷の間に, 十分な山が形成されなかったために起こっていた.

5. 考察

実験から, 静電容量方式のタッチセンサを用いた場合でも, タッチと複数の指によるスワイプを認識できることがわかった. ここでは, 今回の取り組みで明らかとなった課題や, 今後の性能向上および機能拡張について議論する.

まず第一の課題として, 商用電源による 50Hz のノイズの混入が挙げられる. センシング電極とは異なる GND ラインを設置することで, その混入を抑制することができるが, 剥き出しの GND ラインを維持しなければならない, ユーザは GND ラインに触れながら操作する必要が生じる. 回路構成や検出方法の工夫などを通じて, ノイズ低減に取り組んでいく必要がある. また一般に, タッチセンサの電極が大きいほど, ノイズや感度の点で有利であるとされる. しかし, 提案手法では小さな電極を使わなければならない

ため, 電極の大きさや形状についても検討していく必要があるだろう.

第二の課題として, マルチタッチジェスチャの認識がうまくいかないユーザの存在が挙げられる. 著者 (評価実験の被験者には含まれない) がスワイプを行うと, 指の本数に関わらず, 1 本指スワイプの時のような谷が 1 つの波形が得られ, 1 本指スワイプと認識されることがしばしばあった. 指先とセンシング電極をティッシュで拭くと, 正しく指の本数を検出できるようになることがあったことから, 指先の汗がセンシング基板に付着することが原因の 1 つと考えられる. 今後原因を探索し, より多くのユーザが利用できるように改良していくことが必要である.

従来研究 [8] では, 空間方向の感度に違いを持たせることで, スワイプの方向検出が可能であることを報告している. 製作したセンシング電極は対称型であるため, スワイプ方向に沿った感度に違いはなく, 方向検出はできない. 電極形状や表面に貼付するフィルムなどにより, 空間方向の感度を変化させ, 方向検出が行えるかどうか検討していきたい.

フォトリフレクタと比較して, 静電容量方式のタッチセンサは原理的に低消費電力で動作させることが可能である. しかし, 今回用いたコンパレータ (実際には OP オペアンプ) は消費電力が特に低いものではなく, 矩形波を生成するために用いたマイコンも, 矩形波を生成する目的から考えれば不必要に多くの電力を消費してしまっている. そのため, 製作した回路の消費電力は, フォトリフレクタを用いた場合とあまり変わらなかった. 今後, 消費電力を削減した回路設計を行うことが重要である.

実験では 1 つのセンサのみを用いたが, 複数のセンサに提案手法を適用することも有用である. 例えば, メガネ型デバイスのツルなど細長い面での入力を考える. 1 つのセンサのみを設置した場合, そのセンサ上で行われたジェスチャしか検出することができない. 一方, 複数のセンサを設置すれば, 様々な位置で行われたジェスチャを検出することができる. 通常は, 指よりも小さなタッチセンサを密に配置する必要があるのに対し, 本手法を適用した複数センサを用いれば, 少数のセンサを疎に配置するだけでよい. また複数のセンサがあれば, スワイプの方向も容易に検出可能となる. どの程度まで疎に配置できるのかを明らかにすることで, 実用上の有用性は増すと考えられる.

6. まとめ

静電容量方式のタッチセンサを 1 つだけ用いたマルチタッチジェスチャ検出手法を提案した. 提案手法は, 低消費電力化や小型化が可能であり, 小型デバイスの入力手法として有効である. 評価実験により, タッチと複数の指によるスワイプを高い認識精度で検出することができることを確認した. 今後, 認識精度の向上や, スワイプの方向検

出などにも取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] Baudisch, P. and Chu, G.: Back-of-device interaction allows creating very small touch devices, *Proc. CHI '09*, pp. 1923–1932 (2009).
- [2] Butler, A., Izadi, S. and Hodges, S.: SideSight: multi-“touch” interaction around small devices, *Proc. UIST '08*, pp. 201–204 (2008).
- [3] Cheng, L.-P., Lee, M. H., Wu, C.-Y., Hsiao, F.-I., Liu, Y.-T., Liang, H.-S., Chiu, Y.-C., Lee, M.-S. and Chen, M. Y.: iRotateGrasp: automatic screen rotation based on grasp of mobile devices, *Proc. CHI '13*, pp. 3051–3054 (2013).
- [4] Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: a multi-user touch technology, *Proc. UIST '01*, pp. 219–226 (2001).
- [5] Fukumoto, M. and Tonomura, Y.: Whisper: a wrist-watch style wearable handset, *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, pp. 112–119 (1999).
- [6] Harrison, C. and Hudson, S. E.: Minput: enabling interaction on small mobile devices with high-precision, low-cost, multipoint optical tracking, *Proc. CHI '10*, pp. 1661–1664 (2010).
- [7] Hinckley, K., Pierce, J., Sinclair, M. and Horvitz, E.: Sensing techniques for mobile interaction, *Proc. UIST '00*, pp. 91–100 (2000).
- [8] Manabe, H.: Multi-touch gesture recognition by single photoreflector, *Adjunct proc. UIST '13*, pp. 15–16 (2013).
- [9] 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).
- [10] Rekimoto, J.: SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, *Proc. CHI '02*, pp. 113–120 (2002).
- [11] 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).
- [12] Schwarz, J., Harrison, C., Hudson, S. and Mankoff, J.: Cord input: an intuitive, high-accuracy, multi-degree-of-freedom input method for mobile devices, *Proc. CHI '10*, pp. 1657–1660 (2010).
- [13] Spelmezan, D., Appert, C., Chapuis, O. and Pietriga, E.: Controlling widgets with one power-up button, *Proc. UIST '13*, pp. 71–74 (2013).
- [14] Wimmer, R. and Baudisch, P.: Modular and deformable touch-sensitive surfaces based on time domain reflectometry, *Proc. UIST '11*, pp. 517–526 (2011).
- [15] Wimmer, R. and Boring, S.: HandSense: discriminating different ways of grasping and holding a tangible user interface, *Proc. TEI '09*, pp. 359–362 (2009).