

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

真鍋 宏幸^{1,a)} 稲村 浩^{1,b)}

受付日 2014年6月30日, 採録日 2014年9月12日

概要: 1つのタッチセンサを用いて, タッチとスワイプ, さらにスワイプを行う指の本数とその向きを認識する手法を提案する. それらのジェスチャを認識するためには, (1) タッチとスワイプでセンサの応答時間が異なる, (2) スワイプを行うときに指と指の間に間隙が生じる, (3) 非対称な感度を持つタッチセンサではスワイプの向きによってセンサ出力に違いが生じる, の3つの要件が成立すればよい. フォトリフレクタを用いた実験により, これらの要件が成立し, マルチタッチジェスチャを認識できることを示す. また, 静電容量方式のタッチセンサを用いた場合であっても, 同様にジェスチャを認識できることを示す. 提案手法は, 小型デバイスの入力手法として有効である.

キーワード: タッチセンサ, マルチタッチ, ジェスチャ認識

Multi-touch Gesture Recognition by Single Touch Sensor

HIROYUKI MANABE^{1,a)} HIROSHI INAMURA^{1,b)}

Received: June 30, 2014, Accepted: September 12, 2014

Abstract: The proposed technique uses only a single touch sensor to recognize multi-touch gestures including touch and multi-finger swipe with two directions. There are three requirements to recognize the gestures; (1) the time during the sensor is responding differs by touch and swipe, (2) there is a gap between fingers while swiping, and (3) asymmetrical sensitivity of the sensor yields the difference according to the swipe direction. An experiment using a photoreflector confirms the requirements and shows the gestures can be recognized. It is also confirmed that a capacitive touch sensor has a capability to recognize the gestures. The proposed technique is effective especially for small devices.

Keywords: touch sensor, multi-touch, gesture recognition

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, メガネ型デバイスや腕時計型デバイス, 数 cm 角の音楽プレーヤなど高性能な小型デバイスが実用化されている. デバイスが小型化されると, 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得られるが, 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. たとえば, 指よりも小さな超小型スイッチを用いた場合, 適切なフィードバックをユーザに与えることが難しく, 密に配置された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困難である. 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かつ誤りのない入力が可能な入力手法が必要であり, さらにそれらが低コストかつ低消費電力であることが望ましい.

すでに, 様々な小型化可能な入力手法が利用されてきた. たとえば, 腕時計では少数の小型スイッチが用いられている. しかし, 入力の自由度が低く, 入力に時間がかかってしまう. スマートフォンやメガネ型デバイスなどでは, 超

¹ NTT ドコモ先進技術研究所
Research Labs, NTT DOCOMO, Yokosuka, Kanagawa 239-8536, Japan

a) manabehiroyuki@acm.org

b) inamura@nttdocomo.com

小型マイクロフォンを用いた音声認識が用いられている。しかし、消費電力が大きく、周囲の雑音により認識精度が低下するという課題がある。また、カメラや加速度センサなどを用いたジェスチャ入力手法では、デバイスへの入力を意図しない動作との区別が困難であるという課題がある。一方、タッチパッドやタッチパネルなどと呼ばれる、平面状に配置した多数のタッチセンサを用いた入力手法は、ノートPCやディスプレイなど比較的大型のデバイスから、タブレットやスマートフォン、メガネ/腕時計型デバイスなどの小型デバイスに至るまで、幅広く用いられており、近年のウェアラブルデバイスでは、標準的な入力手法となっている。現在主流となっている静電容量方式のタッチセンサには、小型化が容易、低コストかつ低消費電力などの特徴のほか、透明に作ることでディスプレイと重ね合わせることが可能、比較的容易にマルチタッチに対応できるという利点がある。また、パッドに触れる、ディスプレイにタッチするという、入力にともなう明示的な動作を検出することで、入力の意図を簡便に検出することができ、誤入力を減らすことができる。さらに、タッチした位置やタッチしている指の本数などの静的な状態だけでなく、スワイプやピンチイン/アウトなどの動的なジェスチャも検出することができ、それらを組み合わせた自由度の高い入力が可能である。

タッチパッドでは、個々のセンサから情報を取得するために、多数の結線とマルチプレクサを用いた高速なスイッチングが必要となる。もし、タッチセンサの数を削減し、センサの数が1つになれば、コストが低減し、より柔軟な設計が可能になる。これらの特徴は、小型デバイスの入力手法として望ましい。しかし、センサの数を削減すれば入力の自由度が低下する。ここで、メガネ型デバイスのツル、スマートフォンや腕時計型デバイスの側面など、細長い領域での入力を考える。この場合、目視でタッチ位置を確認することや、厳密なタッチ位置によって入力を行うことは難しい。そのため、タッチ位置などの静的な状態による入力の自由度は実質的に制限される。一方、動的なジェスチャによる入力では、その制限は受けない。つまり、上記のような領域に適用することを考えれば、動的なジェスチャのみを検出できる入力手法であっても、実用的な入力手法となりうる。すでにジェスチャとして広く用いられている、タッチやスワイプ、スワイプを行う指の本数やその方向などを検出できれば、新たなジェスチャに習熟することなく、自由度の高い入力が実現できる。そこで本研究では、1つのセンサでマルチタッチジェスチャを認識する手法を提案する。なお、本稿は文献 [16], [17], [28] の成果をまとめたものである。

2. 従来研究

タッチセンサには、静電容量方式 [20], [22], 感圧方式 [21],

光学方式 [8], [9], 音響方式 [13], [19] のほか、時間領域反射測定法を用いた手法 [26] などがあり、さらにそれらを組み合わせた手法 [12] も提案されている。タッチセンサは、センサに指が触れているか否かを判別するものであり、単純なスイッチに相当するが、複数の微小センサをアレイ状に配置しやすい点で、機械式スイッチとは異なる。アレイ状にすることで、タッチ位置やジェスチャを検出でき [6], [20], 入力の自由度を高めることができる。タッチセンサを小型デバイスに適用した例は数多くあり、たとえばディスプレイへの背面からの操作 [1], ひも状 [23] あるいはリング状デバイス [18] での入力、複数のタッチセンサを用いた把持状態検出 [4], [27] などがある。なお、単純なセンサを複数用いることで、複雑な状態を検出することは、タッチセンサに限らず広く行われている。カメラが最も身近な例であり、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 [10] もそうである。

多数のタッチセンサを用いることで入力の自由度を上げることができるが、多数の複雑な結線が必要で、回路規模や消費電力の増大を招く。大型のデバイスであれば、それらの課題は相対的に小さくなるが、小型デバイスに適用する場合には重大な課題となりうる。そこで、センサの数を削減することが重要となる。たとえば、2つのタッチセンサを組み合わせ、両者の静電容量の変化からタッチ位置を推定し、スライダとして実装することができる [5]。また、直列に接続した n 個の抵抗と、2つの電圧源による閉回路を利用し、2点の電流の比から $n-2$ カ所のタッチ検出を行う手法 [24] もある。1つのタッチセンサだけで実装できれば、さらに望ましい。モールス信号やリズムカルなタップ [7] を適用すれば、入力に時間がかかるものの、複雑な入力も可能である。また、センサの出力を2値で判別するのではなく、連続値として取得することで、自由度を上げる方法もある。これは、タッチセンサを近接/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、文献 [14], [25] などがある。ほかにも、タッチパッドでの近接情報の検出 [20], 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。入力の自由度を上げる方法はほかにもある。たとえば、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など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把持状態の識別 [22] や、どのユーザの指が接触しているのかの認識 [11] が行える。同様な認識は振動を用いても可能である [19]。それらは、計測信号を周波数ドメインで観察しており、主な認識対象は静的な状態となる。一方、計測信号を時間ドメインで観察することで、ジェスチャ認識を行う手法 [25] も提案されているが、少数の特殊なジェスチャしか認識していなかった。提案手法は、時間ドメインで観察する点では同じ

であるが、広く用いられているジェスチャである、タッチとスワイプ、スワイプを行う指の本数およびその向きを認識する点で異なる。

3. 提案手法

提案手法は、図 1 や図 5 に示すように、入力領域の中にタッチセンサを1つ設置し、センサ出力の変化からマルチタッチジェスチャを認識する。タッチセンサは、指がセンサに触れたときに出力が大きく変化するが、触れていない場合にはほとんど変化しない。そのため、センサのない領域で行われたジェスチャを検出することはできない。提案手法では、センサに指が触れるタッチジェスチャをタッチとして検出し、センサを通過するように行われるスワイプジェスチャをスワイプとして検出する。1つのタッチセンサで、タッチとスワイプ、スワイプを行う指の本数とその向きを認識するためには、ジェスチャ間に以下の3つの違いがあり、かつそれらを検出可能であればよいと考えられた。

要件 1 タッチとスワイプとでセンサの応答時間が異なる。

要件 2 複数の指でスワイプを行う場合、指と指の間には間隙が生じる。

要件 3 非対称な感度を持つタッチセンサでは、スワイプの向きによってセンサ出力に違いが生じる。

以下で、それぞれの要件について説明する。

[要件 1] タッチセンサ上でタッチを行うときの手続きは、指がタッチセンサ表面に触れる、ユーザが接触を知覚する、指先の運動方向を変える、指が表面から離れる、となる。接触の知覚および運動方向の変更には時間を要するため、タッチセンサに指が触れている時間が長くなることが予想される。一方、スワイプを行うときには、タッチセンサが存在しない入力領域に指が接触する、指が表面をなぞりながら移動する、移動の途中でタッチセンサ上を指が通過する、指がタッチセンサをはさんで反対側に移動する、指が入力領域から離れる、となる。指がタッチセンサに触れている時間は、指の移動速度や指の太さによって変わるが、タッチ時に要した知覚や運動方向の変更にもなう遅延は生じないため、相対的に短くなると予想される。

[要件 2] 指の断面は楕円状であるため、隣り合う2本の

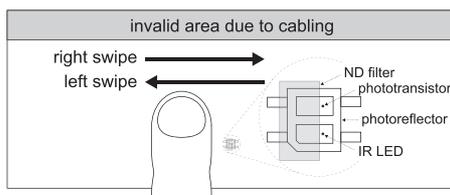


図 1 フォトリフレクタを用いたプロトタイプ。小型で検出距離が短いフォトリフレクタを中央に配置し、その上半分には ND フィルタを設置している

Fig. 1 Prototype using a photoreflector.

指を密着させた場合であっても、指の間に窪みができる。この状態で指を平面に押し当てた場合、窪みが小さくなるように指が変形するが、2本の指と平面の間にはわずかな間隙（以降、“指の間隙”もしくは“間隙”と表記）が生まれる。スワイプを行うと、指はさらに変形することになるが、間隙が消滅しなければ、間隙の数から指の本数を認識することができる（指の本数は間隙の数+1）。間隙は小さいため、それを検出するためにはタッチセンサも十分に小さいことが必要となる。

[要件 3] 理想的なタッチセンサ（大きさが無限小、物体がセンサに直接接触したときのみ反応）を用いた場合には、1つのセンサで移動の向きを検出することはできない。しかし、現実のタッチセンサは有限の大きさを持ち、物体がセンサの一部にのみ接触した場合と、センサ全体に接触した場合とでは、出力が異なる。もし、センサの感度がスワイプ方向に沿って非対称（たとえば、センサの左半分のみと接触した場合と、右半分のみと接触した場合とでセンサの出力が異なる）であれば、スワイプの向きによってセンサ出力の立ち上がり、立ち下がりに違いが観測されることが予想される。

これら3つの要件が成立し、かつ用いるセンサで検出可能であれば、タッチとスワイプ、そしてスワイプを行う指の本数とその向きを、1つのタッチセンサのみで認識することができる。

4. 評価実験

静電容量方式のタッチセンサは、消費電力やコストの観点から、小型デバイスに適しており、提案手法も静電容量方式のタッチセンサを用いて実装することが望ましい。しかし、静電容量方式のタッチセンサでは、ノイズの影響を受けやすいという課題がある。そこでまずは、ノイズの影響を受けにくいフォトリフレクタを用いて、3つの要件を検証する。

4.1 フォトリフレクタを用いた実験

フォトリフレクタは、発光素子 (LED) と受光素子 (フォトトランジスタ) で構成されるセンサである。一般に近接センサとして利用される反射型のうち、検出距離が数 mm と短いものは、タッチセンサとしても利用することができる。今回、GENIXTEK 社の TPR-105 (検出距離数 mm, センサ外形 2.7 × 3.2 mm) を、図 1 のように配置して実験を行った。フォトリフレクタの半分 (図中の左半分) には、光を吸収する ND (Neutral Density) フィルタを置き、感度に非対称性を持たせた。フォトリフレクタを設置したことによる凹凸をなくすために、フォトリフレクタ実装面の上にスペーサを設置し、さらにその表面に透明の樹脂板と、滑らかな指滑りが得られるフィルム (ディスプレイの保護フィルムとして市販されている) を貼付した。このた

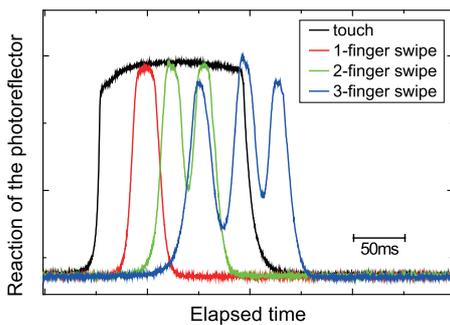


図 2 フォトリフレクタを用いたプロトタイプによるセンサ出力例。タッチとスワイプでは、センサの応答時間が異なっている。スワイプを行った場合には、指の本数に応じたピークが見られる

Fig. 2 Examples of sensor output with the photoreflector-based prototype.

め、ユーザはセンサ上で滑らかにスワイプを行うことができる。

4.1.1 要件の検証

図 1 のプロトタイプを用いて、複数のジェスチャを行ったときの、センサ出力を記録した。図 2 に、タッチ、1, 2, 3 本指での右向きスワイプを行ったときの、フォトリフレクタの出力例を示す。物体からの反射光が強いほど、つまり指が近づくほど、センサの値は高くなる。それぞれのジェスチャを行うと、センサ出力は上昇しており、指がセンサに触れている様子が分かる。

まず、要件 1 について検証する。指がセンサに触れている時間（センサの応答時間）は、タッチで約 150 ms なのに対し、1, 2, 3 本指によるスワイプではそれぞれ約 30, 60, 100 ms となっている。スワイプの場合、センサの応答時間は指の本数に応じて長くなるが、1 本指によるスワイプとタッチを比較した場合、センサの応答時間はスワイプの方が短い。センサの応答時間が極端に短くなるよう意識して行うタッチや、逆にゆっくりとした速度で行うスワイプでは、センサの応答時間の大小関係が反転するが、通常であれば上記の大小関係は維持される。このことから、一般的には要件 1 は成立すると考えてよく、また十分に検出可能である。

次に、要件 2 について検証する。1 本指でのスワイプでは、センサ出力は 1 つのピークのみで構成されているが、2, 3 本指の場合には、センサ出力に一時的な低下が見られる。スワイプを行うときに指の間隙が潰れてしまえば、センサ出力は変化しないはずである。逆に指の間隙が存在し、間隙がセンサ上を通過するときは、対象物までの距離が長くなるので、センサ出力が低下する。ただし、センサ上に何も無いわけではないため、センサ出力の低下は限定的なものとなる。さらに、この一時的な低下の数は、スワイプを行う指の本数から 1 減算した数、つまり指の間隙の数と一致している。この観測結果から、複数の指でスワイプを行った場合であっても、指の間隙は維持され（要件 2

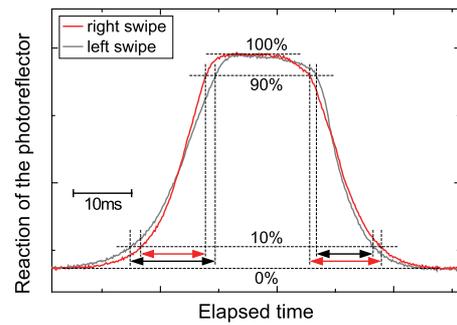


図 3 右および左向きスワイプを行ったときの出力例。スワイプの向きによって立ち上がり立ち下がりに違いが見られ、右向きでは、急峻な立ち上がりゆるやかな立ち下がり、左向きではその逆となる

Fig. 3 Sensor outputs for right and left 1-finger swipe with the photoreflector-based prototype.

が成立)、かつそれは十分に検出可能であることが分かる。

最後に、要件 3 について検証する。図 3 に、1 本指で右および左向きスワイプを行ったときの、センサ出力例を示す。センサ出力の最大値や、センサの反応時間はほぼ同じである。しかし、センサ出力の立ち上がり、立ち下がりに着目すると、右向きスワイプでは急峻な立ち上がりとなだらかな立ち下がりとなっており、左向きスワイプはその逆となっている。これは以下のように考えることができる。右向きスワイプを行った場合、指はまず ND フィルタが配置された領域に入る。このとき、フォトリフレクタの発光素子から照射される光は、ND フィルタで減光されてから指に当たる。指で反射した光は、再び ND フィルタを通過してフォトリフレクタの受光素子に入る。つまり、受光光量が少なくなり、センサの出力の立ち上がりは制限される。さらに指が進み、指が ND フィルタのない領域に差し掛かると、ND フィルタによる減光効果が相対的に弱まり、センサの出力は急激に上昇するようになる。一方、左向きスワイプの場合には、センサ出力の立ち上がり時に ND フィルタの影響はないため、比較的穏やかな立ち上がりとなる。立ち下がりも同様に考えればよい。この時点で、要件 3 が成立するといえるが、ジェスチャを認識するためには、スワイプの向きによる違いが安定的に検出できなければならない。そこで、さらなる解析を行う。図 3 に示すように、指がセンサから十分に離れているときのセンサ出力の値を 0%、スワイプ時のセンサ出力の最大値を 100% として、センサ出力が 10% から 90% (もしくはその逆) に変化するときの、センサ出力の傾き (センサ出力の変化量を、変化に要した時間で除した値) を求める。右および左向きの 1 本指スワイプを交互に 50 回ずつ行ったときの、センサ出力の傾きの分布を図 4 に示す。図の横軸は立ち上がりの傾きであり、縦軸は立ち下がりの傾きである。ND フィルタを設置しない場合の結果も、参考として示す。ND フィルタがない場合、右向きでも左向きでも傾きはほぼ同じとなっ

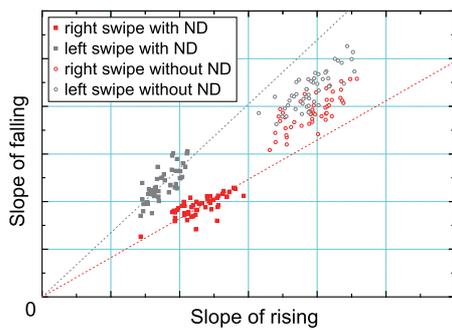


図 4 スワイプ時の立ち上がりおよび立ち下がり傾きの分布. ND フィルタを設置しない場合には、向きによる違いはあまり見られない。一方、ND フィルタを適用した場合には、向きによって傾きが変わる

Fig. 4 The distribution of various 1-finger swipes with the photoreflector-based prototype.

ている。一方、ND フィルタが設置されている場合、右向きと左向きスワイプの分布は、認識可能な程度に分離されている。また、スワイプの速度が変わっても、立ち上りの傾きと立ち下りの傾きの比は、ほぼ一定であることも分かる。この結果から、ND フィルタを設置することで、タッチセンサの感度に対する非対称性を導入することができ、スワイプの向きを検出することができる。

4.1.2 ジェスチャの認識実験

限定的なデータを用いた検証により、3つの要件すべてが成立し、それらが検出可能であることが分かった。本研究で重要なことは、厳密に要件を検証することではなく、マルチタッチジェスチャの認識が可能であることを示すことである。そこで、検証した要件に基づくジェスチャ認識アルゴリズムを実装し、認識実験を行う。処理フローは、以下のとおりである。まず、センサ出力が閾値を超えたらジェスチャ開始と見なし、閾値を下回ったらジェスチャ終了とする。ジェスチャが終了したときに、ジェスチャ中のセンサ出力に一時的な低下が見られるかどうかを判定する。一時的な低下が見られた場合、2本以上の指によるスワイプと判定し、一時的な低下の数からスワイプを行った指の本数を、立ち上がりと立ち下りの傾きの比からスワイプの向きを決定する。一時的な低下が見られなかった場合、タッチもしくは1本指によるスワイプと判定する。両者は、ジェスチャの持続時間によって分類し、1本指によるスワイプの場合には、さらにスワイプの向きを決定する。

4人の被験者に対して認識実験を行った。認識対象は、タッチと、1, 2, 3本指による右および左向きスワイプの7種類のジェスチャである。実験前に、被験者には認識対象となるジェスチャに関する指示を与えた。この指示には、タッチはセンサの直上で行う、スワイプはセンサがない領域から開始し、センサを完全に通過した後に終了する、などを含む。被験者に数分間自由にジェスチャを行わせた後に、認識実験を開始した。認識実験では、ランダムにジェ

スチャを指示し、被験者はその指示に従う。各ジェスチャは10回行ったため、合計280(10回×7種類×4人)のジェスチャ認識結果が得られた。

280のジェスチャのうち、正しく認識できたものは220(誤りは60)であり、正解率は79%であった。誤りの多くは、2, 3本指でのスワイプの向きの誤り(45)であり、それ以外は、ジェスチャの見落とし(未検出、7)、1本指でのスワイプの向きの誤り(6個)、1本指スワイプをタッチと誤認識(1)、3本指スワイプを2本指スワイプと誤認識(1)であった。なおスワイプの向きを認識対象としなければ(ジェスチャをタッチもしくは1, 2, 3本指でのスワイプの4種類に分類した場合)、正解率は97%(271/280)となる。2, 3本指でのスワイプの向き認識で誤りが多いという課題はあるものの、1つのタッチセンサでマルチタッチジェスチャを認識できることが確認できた。

4.2 静電容量方式タッチセンサを用いた実験

フォトリフレクタには消費電力が比較的大きいという課題がある。そこで、低消費電力化が可能な静電容量方式のタッチセンサの利用を試みる。

4.2.1 製作したプロトタイプ

静電容量方式のタッチセンサは、タッチによって生じる静電容量の変化を検出する。静電容量そのものを計測してもよいが、容量変化にともなう信号の位相[15]、信号の振幅[20]、充電時間や周波数[5]の変化を観察することでも、タッチ検出を行うことができる。静電容量方式のタッチセンサでは、タッチの行いやすさのためだけでなく、ノイズ耐性を向上させるために、指先よりも大きなセンシング電極が利用されてきた。提案手法を適用する場合には、指の間隙を検出するために、指先よりも小さな電極を用いる必要がある。そこで、今回製作したプロトタイプでは、頑強なタッチ検出が行える充電時間を用いた方式を採用し、さらにノイズを抑制するために、文献[3]で紹介されているpseudo-differential measurement(以下、疑似差動)を適用する。疑似差動では、静電容量の変化を充電時間だけでなく、放電時間からも観測する。

図5にプロトタイプの概観を示す。プロトタイプでは、タッチセンサの感度に対する非対称性を持たせるために、PCB(Printed Circuit Board)上に大きさの異なるセンシング電極を2つ設けている。2つの電極は裏面で接続しており、1つの電極として動作する。PCBには、絶縁フィルムと、滑らかな指滑りが得られる保護フィルム(フォトリフレクタを用いたときと同様)を貼付している。なお、図中には示していないが、ノイズ低減を目的として、PCBの裏面にはボルテージフォロアとして働くオペアンプが配置されている。図6に検出回路を示す(ただし、実際に用いた回路を簡略化している。また、この回路は図5には含まれていない)。マイコンを用いて3種類の矩形波、Pulse A, B, C

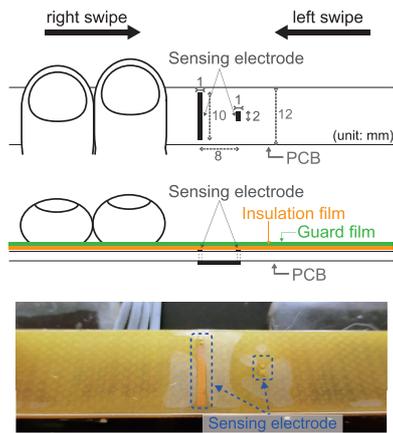


図 5 静電容量方式のタッチセンサを用いたプロトタイプ。裏面で接続される大小2つのセンシング電極を配置することで、センサ感度に非対称性を導入する

Fig. 5 Prototype using a capacitive touch sensor.

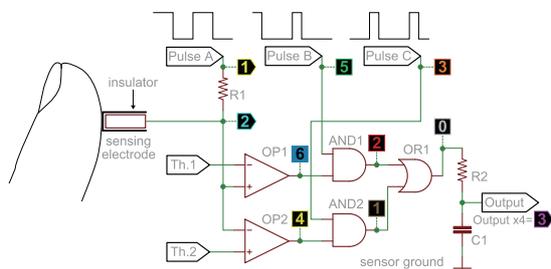


図 6 充/放電時間を利用したタッチ検出回路。3種類パルス（すべて 10 kHz）は、マイコンで生成する。タッチにより静電容量が増大すると、センサ出力は低下する

Fig. 6 Schematic that uses both charge and discharge time.

を生成する。矩形波の周波数は同一（今回は 10 kHz）であるが、位相とデューティ比は異なる。デューティ比が 0.5 である Pulse A はセンシング電極を駆動し、Pulse B, C は出力電圧のオフセットを調整するために用いる。図 7 に、非タッチ時（上図）とタッチ時（下図）における図 6 中の各点の電位例を示す。Pulse A が抵抗 R1 を介してセンシング電極に印加されると、センシング電極とセンサグラウンド間に存在する静電容量により、図 6 の青の“2”の電位は、矩形波にローパスフィルタをかけた波形となる。センシング電極がタッチされると、静電容量が増大するため、ローパスフィルタのカットオフ周波数が下がり、波形はなだらかなものとなる。ここで、基準電圧 Th. 1 に到達した時刻は、コンパレータとして働く OP1 を用いて検出することができる（“6”）。次に、コンパレータの出力と、Pulse B を AND ゲートである AND1 に入力すると、Th. 1 に到達した時刻から Pulse B で決定される時刻までの時間差を検出することができる（赤の“2”）。その時間差は、非タッチ時では 8.5 us であるのに対し、タッチ時には 4.1 us となっている。静電容量が大きくなるほど、その値が小さくなるため、純粋な充電時間とは大小関係が逆となる。放電時間も同様に求めることができ、非タッチ時に 8.9 us、タッチ

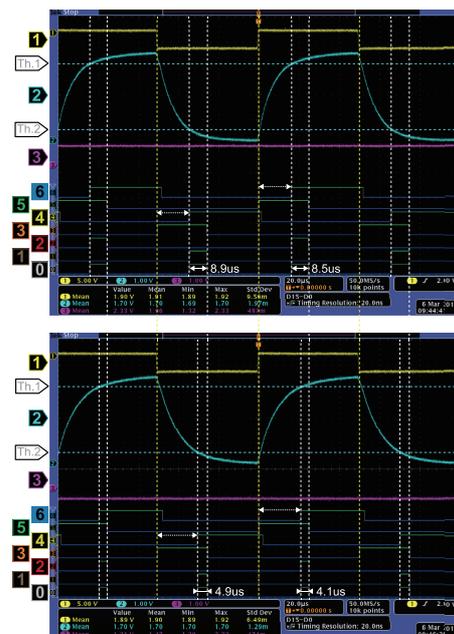


図 7 非タッチ時（上図）とタッチ時（下図）における図 6 中の各点の電位。タッチが行われると、OR ゲートの出力“0”が HIGH となる時間が短くなり、センサ出力は低下する

Fig. 7 Potentials of various points in Fig. 6. The upper pane shows an example of no touch and the lower shows finger-touch.

時には 4.9 us となっている。これら 2 つの出力を OR1 で重ね合わせた後、R2 と C1 で構成されるローパスフィルタを通して信号が出力となる。結果として、非タッチ時は出力が高い状態となり、タッチ時には出力が低下することとなる。非タッチ時の出力レベルは、Pulse B および C のデューティ比によって変えることができるので、出力が飽和するのを防ぎながら、センサ出力を取り込みやすくなるよう増幅することができる。

4.2.2 疑似差動による効果

製作したプロトタイプを用いて、疑似差動による効果を検証する。図 8 に、同時に計測した 3 種類のセンサ出力例を示す。上から、疑似差動を適用した出力（赤線）、充電時間のみを利用した出力（青線、図 6 の赤い“2”にローパスフィルタを適用）、放電時間のみを利用した出力（緑線、図 6 の灰色の“1”にローパスフィルタを適用）である。疑似差動を適用した場合には、ノイズの影響はあまり見られず、タッチによる出力の低下が明瞭に観測される。一方、充電時間のみ、もしくは放電時間のみの場合には、タッチによる出力の低下も観測できるが、商用電源由来の 50 Hz のノイズが混入している。この場合であっても、タッチだけであれば検出可能であると考えられる。しかし、提案手法を適用した場合、指の間隙が通過するときに生じる出力の変動と、50 Hz のノイズとが重畳し、両者を切り分けることが困難となる。この結果から、疑似差動はタッチセンサに混入するノイズを低減させる効果があり、提案手法を

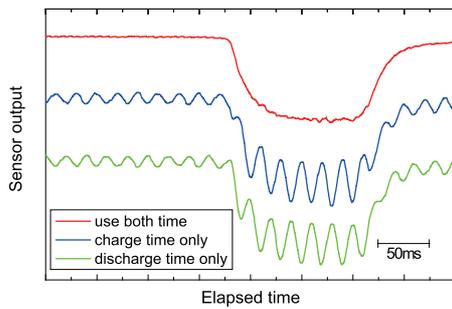


図 8 疑似差動の効果. 上から, 疑似差動 (充/放電時間の両方を利用), 充電時間のみ, 放電時間のみ結果である. 疑似差動により, 商用電源由来の 50 Hz ノイズが抑制されている

Fig. 8 The effect of pseudo-differential measurement.

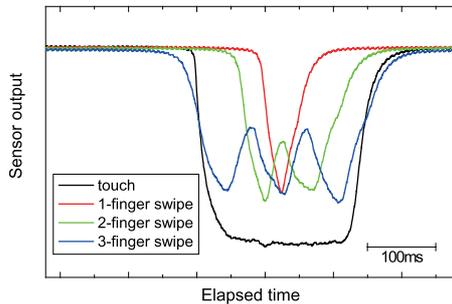


図 9 静電容量方式のタッチセンサを用いたプロトタイプによるセンサ出力例. フォトリフレクタのときと同様な出力が得られる

Fig. 9 Examples of sensor output with the capacitive touch-based prototype.

適用する場合には, 特に有用であることが分かる.

なお本実験は, コンセントに接続した商用電源ケーブルを手で持ち, さらにセンサにも近づけるといふ, 大きなノイズが生じる状況を意図的に作り出した中で行っており, つねにこのような大きさのノイズが重畳するわけではない.

4.2.3 ジェスチャ時のセンサ出力

図 9 に, 4 種類のジェスチャ (タッチ, 1, 2, 3 本指での右向きスワイプ) を行ったときの, センサ出力例を示す. 矩形波によるノイズの影響を低減させるために, 10 kHz サンプルングで取得したセンサ出力に, 時間幅 1 ms のメディアアンフィルタを適用している. フォトリフレクタを用いたときは出力の向きが反転しているが, タッチのセンサ応答時間は 1 本指スワイプよりも長く (要件 1), 指の本数に応じたピークが観測されている (要件 2). ただし, フォトリフレクタの場合, センサ出力の最大値はジェスチャによらずほぼ一定であったのに対し, センサ出力の最小値 (フォトリフレクタにおける最大値に対応) は, タッチとスワイプで差が見られる. また, 図に示した例ではジェスチャ開始前と終了後のセンサ出力レベルは同程度であるが, 一部のユーザでは, ジェスチャを終了しても, 即座に開始前レベルにまで戻らず, 緩やかに出力が上昇することがあった.

次に, 1 本指スワイプ時の向きによる違いを図 10 に示す. センサの感度の非対称性により, センサ出力の立ち下

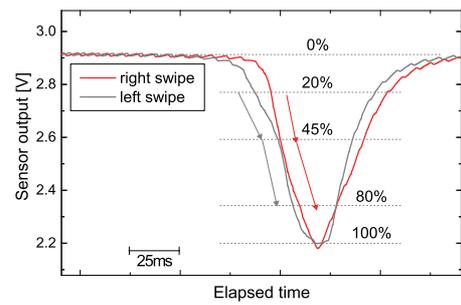


図 10 右および左向きスワイプの出力例. スワイプの向きによって立ち下りの傾きに違いが見られ, 左向きの場合, 立ち下り途中で傾きが変化する

Fig. 10 Sensor outputs for right and left 1-finger swipe with the capacitive touch-based prototype.

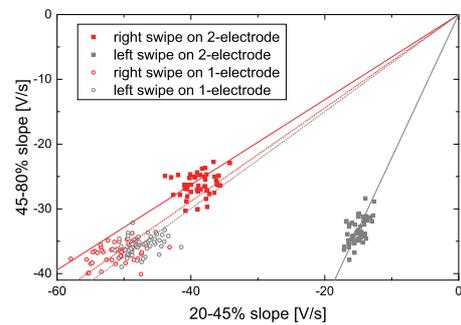


図 11 立ち下り中の 2 つの傾きの分布. センシング電極が 1 つのときには, スワイプの向きによる違いはない. 一方, 2 つのセンシング電極を用いた場合には, 向きによって傾きの違いが見られる

Fig. 11 The distribution of various 1-finger swipes with the capacitive touch-based prototype.

がり, 立ち上がりには, スワイプの向きに応じた違いが生じる (ただし, フォトリフレクタではセンサの左側の感度が低かったのに対し, ここでは右側の感度が低くなっている). 具体的には, 左向きスワイプでは出力の立ち下りの途中に変曲点が見られるのに対し, 右向きスワイプの立ち下りには明瞭な変曲点は見られない. すでに述べたように, 一部のユーザでは出力の立ち上がりが極端に緩やかになってしまう場合がある. そのため, 立ち上がり領域を用いずに, スワイプの向き検出を行うことが望ましい. そこで, 図 10 に示すように, 立ち下り領域に対して, センサ出力が 20% から 45% まで変化するときの傾きと, 45% から 80% まで変化するときの傾きを, スワイプの向き検出のパラメータとする. 図 11 に, 2 つの傾きの分布を示す. また, 小さなセンシング電極を除いたプロトタイプを新たに作成し, それを用いたときの結果もあわせて示す. 新たに作成したプロトタイプを用いた場合, スワイプの向きによる違いはほとんど見られない. 一方, 大小 2 つのセンシング電極を備えたプロトタイプを用いた場合には, 傾きの分布はスワイプの向きによって異なっている. 以上の結果から, 静電容量方式のタッチセンサを用いた場合であっても,

タッチセンサの感度に非対称性を持たせることができ、さらにスワイプの向きを検出できるといえる（要件3）。

4.2.4 認識実験

計測結果に基づき、7種類のジェスチャを認識するプログラムを実装した。アルゴリズムは、フォトリフレクタのときとほぼ同様であるが、センサ出力の大小関係が逆転しており、スワイプの向きを判定するパラメータが異なっている。また、タッチと1本指スワイプの判定に、センサ応答時間だけでなく、スワイプの向き判定に用いる傾きの比も加えた。これは、タッチにおける立ち下がり前半が、スワイプのそれよりも急峻であることを利用している。

認識実験には、8人の被験者（男性6、女性2）が参加した。全被験者が、プロトタイプを机の上に固定した場合（“デスク”）と、HMDを想定して防護メガネのツルに固定した場合（“メガネ”）の2つに対して行った。両者にはいくつかの違いがある。たとえば“デスク”ではセンサを目視可能であるのに対し“メガネ”では目視不能、“デスク”ではスワイプの向きが左右であるのに対し“メガネ”では前後、となっている。また、“デスク”では7種類のジェスチャを行うのに対し、“メガネ”ではタッチを除く6種類のみを行った。これは、“メガネ”では正確にセンシング電極にタッチすることが難しいためである。フォトリフレクタを用いた認識実験と同様に、被験者にはあらかじめ認識対象となるジェスチャに関する指示を与え、数分間自由にジェスチャを行わせた後に、認識実験を開始した。被験者が行うジェスチャはランダムに指示され、それぞれのジェスチャは10回ずつ行われた（“デスク”は10回×7種類×8人=560。“メガネ”は10回×6種類×8人=480）。

図12に、認識結果を示す。図中、“デスク”は“desk”、“メガネ”は“frame”と表記している。正解率の平均は、“デスク”で93%、“メガネ”で81%となった。さらなる改善が必要であるが、静電容量方式のタッチセンサを用いた場合でも、マルチタッチジェスチャを認識できている。なお、誤りの多くは、スワイプを行う指の本数の誤認識、スワ

イプの向きの誤認識、タッチ/スワイプをスワイプ/タッチと判定する誤認識の3種類、もしくはそれらの複合であった（これらで誤認識の94%を占める。残りはfalse positiveが1、false negativeが8）。図には、上記3種類の誤認識の件数も示す。

5. 議論

実験結果から、フォトリフレクタを用いた場合であっても、静電容量方式のタッチセンサを用いた場合であっても、1つのセンサでマルチタッチジェスチャを認識するための3つの要件が成立し、実際にマルチタッチジェスチャを認識することができた。ただし、実用化に向けて、さらなる改善が必要である。第1にあげられるのは、認識精度の向上である。今回の実験ではすべての被験者に同一の閾値を適用したが、スワイプの速度、指の太さ、指の間隙の大きさなどは被験者によって異なる。そこで、それぞれのユーザに応じた閾値を用いることで、認識精度が向上すると考えられる。また、認識に用いるパラメータを最適化することでも精度を向上させることができる。たとえば、スワイプの向きを立ち上がりとし立ち下がりから判定（フォトリフレクタ）するのか、一方のみから判定（静電容量方式センサ）するのか、また、タッチとスワイプの判定にセンサ出力のレベルも加えるなどが考えられる。認識プログラムではなく、センサにも工夫の余地がある。たとえば、指の間隙の検出能力は、センサが小さい（細い）ほど高まると想定されるが、小さくすればノイズの影響を受けやすくなるため、最適化を図る必要がある。また、センサ感度に非対称性を与える方法についても、改善が可能であると考えている。たとえば、フォトリフレクタの場合であれば、NDフィルタの位置や透過率の最適化、静電容量方式タッチセンサであれば、大小2つの電極の大きさや形状の最適化を行うべきである。非対称性をより複雑に制御できれば、左右のスワイプだけでなく、上下も含めた4種類のスワイプを識別できるようになるかもしれない。また、“メガネ”実験で認識精度が低下した原因の1つとして、指先が弧を描くように動くスワイプが考えられた。認識実験では、スワイプ時の指と電極の方向が厳密に一致していなくても、正しく認識されることが多かったが、一致していることが望ましい。特に、複数の指でスワイプを行うときに、両者の方向が異なっていると、間隙による出力信号の変動が小さくなるため、指の本数の誤認識が多くなると考えられる。これが指数検出誤りの主要因であるならば、電極形状を変更することで、精度を向上させることができるだろう。

省電力化や小型化、低コスト化も重要である。現状の静電容量方式のプロトタイプでは、AD変換器を介してセンサ出力を取り込んでいる。デジタル信号のまま処理をすれば、AD変換器は不要となり、消費電力を削減することができる。また、基本機能は小規模な回路で実現できるため、

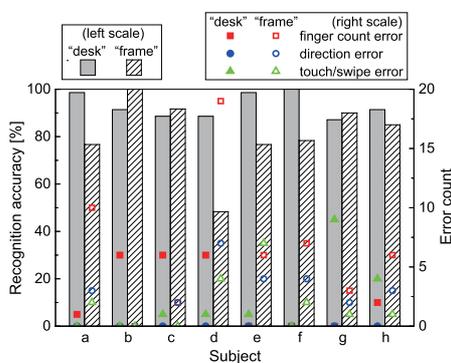


図12 ジェスチャ認識実験結果。“デスク”（図中“desk”）と“メガネ”（同“frame”）における正解率と、誤認識の内訳を示す。正解率の平均は、それぞれ93%と81%であった

Fig. 12 Recognition accuracy and error count.

たとえば、オペアンプやロジック回路を含む安価な市販マイコンを用いれば、小型化と低コスト化が可能となる。

今回行った認識実験では、すべての被験者でジェスチャを認識できたが、4.2.3 項で述べたように、センサ出力の回復が遅れるユーザがいることが分かっている。このようなユーザの場合、正しくジェスチャを認識することが難しい。指にティッシュペーパーを巻いてジェスチャを行えば、そのような現象は見られなくなることから、指先がセンサに触れたときに、汗などの揮発性の導電物質が付着し、ジェスチャ完了後に徐々に揮発していくことが原因であると考えられる。多くのユーザに適用できるように、原因の特定や解決手法の検討、たとえば表面シートの改良、が必要である。

提案手法は1つのセンサだけを用いることが特徴であるが、センサを複数用いることも有効である。たとえば、“メガネ”実験では正確なセンサ位置を確認できないため、タッチジェスチャを排除したが、センサを複数配置すれば、広い範囲のタッチを検出できるようになる。この場合であれば、タッチのみを検出する従来型のセンサと組み合わせればよい。また、非対称な感度を持つセンサを複数用いれば、複数方向のスワイプの認識、ジェスチャ認識精度の向上、入力可能領域の拡大などが可能となるだろう。このような場合であっても、従来のセンサアレイよりセンサの数を少なくすることができる点で、提案手法は有用である。

6. まとめ

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手法を提案した。認識対象とするジェスチャは、すでに広く利用されているタッチとスワイプ、そしてスワイプを行う指の本数とその向きとした。これらのジェスチャを認識するためには、(1) タッチとスワイプでセンサの応答時間が異なる、(2) スワイプを行うときに指と指の間に間隙が生じる、(3) 非対称な感度を持つタッチセンサではスワイプの向きによってセンサ出力に違いが生じる、の3つの要件が成立し、かつそれらの違いが検出可能であればよい。フォトリフレクタを用いた実験により、3つの要件が成立することが示され、被験者を用いた認識実験によりジェスチャを認識できることを示した。次に、低消費電力化が可能な静電容量方式のタッチセンサを用いた場合であっても、マルチタッチジェスチャを認識できることを確認した。今後、認識精度の向上や消費電力の低減など、実用化に向けた課題に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] Chan, V. and Underwood, S.: MSP430 Capacitive Single-Touch Sensor Design Guide, Technical report, Texas Instruments Inc., Application Report SLAA379 (2008).
- [4] 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).
- [5] Davison, B.: Techniques for Robust Touch Sensing Design, Technical report, Microchip Technology Inc., Application Notes, AN1334 (2013).
- [6] Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A multi-user touch technology, *Proc. UIST '01*, pp.219–226 (2001).
- [7] Fukumoto, M. and Tonomura, Y.: Whisper: A wrist-watch style wearable handset, *Proc. CHI*, pp.112–119 (1999).
- [8] Han, J.Y.: Low-cost Multi-touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection, *Proc. UIST '05*, pp.115–118 (2005).
- [9] Harrison, C., Benko, H. and Wilson, A.D.: Omni-Touch: Wearable multitouch interaction everywhere, *Proc. UIST '11*, pp.441–450 (2011).
- [10] 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).
- [11] Harrison, C., Sato, M. and Poupyrev, I.: Capacitive Fingerprinting: Exploring user differentiation by sensing electrical properties of the human body, *Proc. UIST '12*, pp.537–544 (2012).
- [12] Harrison, C., Schwarz, J. and Hudson, S.E.: TapSense: Enhancing finger interaction on touch surfaces, *Proc. UIST '11*, pp.627–636 (2011).
- [13] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skinput: Appropriating the body as an input surface, *Proc. CHI '10*, pp.453–462 (2010).
- [14] Hinckley, K., Pierce, J., Sinclair, M. and Horvitz, E.: Sensing techniques for mobile interaction, *Proc. UIST '00*, pp.91–100 (2000).
- [15] Hinckley, K. and Sinclair, M.: Touch-sensing Input Devices, *Proc. CHI '99*, pp.223–230 (1999).
- [16] Manabe, H.: Single Capacitive Touch Sensor That Detects Multi-touch Gestures, *Proc. ISWC '14*, pp.137–138 (2014).
- [17] Manabe, H.: Multi-touch gesture recognition by single photoreflector, *Adjunct Proc. UIST '13*, pp.15–16 (2013).
- [18] Ogata, M., Sugiura, Y., Osawa, H. and Imai, M.: iRing: Intelligent ring using infrared reflection, *Proc. UIST '12*, pp.131–136 (2012).
- [19] 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).
- [20] Rekimoto, J.: SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, *Proc. CHI '02*, pp.113–120 (2002).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] 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).
- [24] Serikawa, S. and Zhang, L.: Proposal of a touch panel switch with the function of bending and addition — One of a new user interface, *Proc. International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, pp.8–13 (2011).
- [25] Spelmezan, D., Appert, C., Chapuis, O. and Pietriga, E.: Controlling widgets with one power-up button, *Proc. UIST '13*, pp.71–74 (2013).
- [26] Wimmer, R. and Baudisch, P.: Modular and deformable touch-sensitive surfaces based on time domain reflectometry, *Proc. UIST '11*, pp.517–526 (2011).
- [27] Wimmer, R. and Boring, S.: HandSense: Discriminating different ways of grasping and holding a tangible user interface, *Proc. TEI '09*, pp.359–362 (2009).
- [28] 真鍋宏幸：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, *インタラクシオン 2014 予稿集* (2014).



真鍋 宏幸 (正会員)

1976年生。1999年東京工業大学工学部卒業。2001年同大学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、生体信号を用いた入力インタフェースの研究に従事。電子

情報通信学会, ACM 各会員。



稲村 浩 (正会員)

NTTドコモ先進技術研究所勤務。1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1994~1995年にカーネギーメロン大学計算機科学科で訪問研究員。1998年よりNTTドコモ。

2010年慶應義塾大学大学院開放環境科学専攻後期博士課程単位取得退学。同大学博士(工学)。モバイル環境におけるシステムソフトウェア, トランスポートプロトコル, ユーザインタフェースに関する研究開発に従事。電子情報通信学会, ACM, IEEE 会員。