

ScraTouch: 静電容量方式タッチサーフェスにおける 手指の爪を使用したタッチ入力拡張技法

池松 香* 山中 祥太*

概要. 本論文では、静電容量方式のタッチパッドやタッチパネル（タッチサーフェス）において、手指の“爪”を介したタッチ入力手法 ScraTouch を提案する。本手法はタッチサーフェス内電極からの流出電流値変化により爪の接触有無を検出し、新たなタッチ入力としてタッチサーフェス操作へ導入する。本論文では、ラップトップ PC 搭載のタッチパッドを対象に初期的な調査を行い、通常の指によるタッチ入力と爪によるタッチ入力の電気的特性の差異による識別可能性について検討し、また、本手法の適用可能性について議論する。

1 はじめに

スマートフォンやスマートウォッチ、タッチパッドなどの静電容量方式のタッチサーフェスは広く普及し、タッチ入力は現在最も一般的な入力方法として用いられている。一方で、タッチサーフェスの二次元平面におけるインタフェースは、人の身体能力や動作のごく限られた部分を取り入れているに過ぎず、未だ改良・開拓の余地が多く残されている。一例を挙げると、実世界で人は指を使って様々な動作を行うが、これはタッチ入力では用いられないような、指の腹や指先の皮膚による接触に限られたものではなく、指の上を覆う“爪”を使って物に触れる、なぞる、はじく、ひっかく、突つくといった動作も日常的に行っている。しかしながら、こうした爪による動作は一般に、タッチサーフェス入力操作には導入されていない。しかし、爪によるタッチ入力は指の角度を変えるだけで即座に行えるため利便性が高く、また、スタイラスペンや追加のデバイスを利用する操作形態 [12, 20] と比較し、即時性・携帯性の観点から優れていると考えられる。

本研究では、爪によるタッチ入力を導入することでタッチサーフェスの入力を拡張する手法“ScraTouch”を提案する（図 1）。基本アイデアは、爪と指の電気的特性が異なることを利用し、タッチサーフェス内電極からの流出電流を比較することで両者を識別するものである。ScraTouch はタッチサーフェスのタッチセンシング機構のみを利用し、外付けのハードウェアやセンサを必要としない。また、タッチ入力発生後 100ms 程度のセンシングデータを用いたシンプルな閾値判定のみで実現可能であり、高速かつ高精度な識別精度が期待できる。本研究の貢献を下記に要約する。



図 1. タッチサーフェス上での (a) 従来の指によるタッチ入力および、(b) 本論文で提案する爪を介したタッチ入力 (ScraTouch)。指の皮膚と爪の電気的特性の差異より 2 種類の接触部位を識別し、タッチ入力を拡張する。

- タッチサーフェス上で、電気的特性の差異により爪と指を識別するインタラクション拡張手法として ScraTouch を提案した。
- 予備調査を行い、複数の異なる長さの爪によるタッチ入力が検出可能なことを示した。また、タッチ入力開始から一定時間（100ms 程度）経過後に指によるタッチ入力と爪によるタッチ入力は、タッチサーフェスの計測する流出電流値から異なる電気的特性が観察されるため、高精度に識別可能であることを示した。
- 本手法の適用可能性について議論し、アプリケーションの提案を行った。

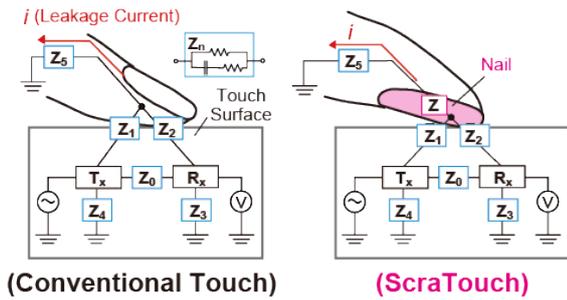


図 2. タッチサーフェス等価回路. (左) 指によるタッチ, (右) 爪によるタッチ (ScraTouch).

2 関連研究

2.1 爪を利用した入力手法

日常的に多くの物体や機器を触れ、操作する手指の上に備わる爪は、ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 研究分野でコンピュータ入出力操作の拡張に利用されることが多い [18]. Tapsense [7] は、テーブルトップや携帯端末に物体が触れる際の音の周波数特性を利用し、指先や爪、指関節などのタッチ部位を推定する手法である。また、爪の表面に装着するウェアラブルな機器を用いてジェスチャ入力 [13, 1] や指の押圧の推定 [10] を行う手法が提案されている。本手法は、[7] と同様に爪にデバイスを装着することなく、指の皮膚によるタッチと爪によるタッチ入力を識別するが、タッチサーフェスで広く一般に採用されている静電容量方式のタッチセンシング機構を利用する点において異なる。また [7] は爪や指で物体を強く叩いて音を鳴らす必要があるが、ScraTouch ではそうした動作を必要としない。

2.2 静電容量方式タッチセンシング

タッチサーフェスは、格子状に並べた電極構造を有している。一方が送信電極群であり、他方はこれらと直行する受信電極群である。タッチサーフェスは高周波信号を送信電極 T_x へ順に印加し、受信電極 R_x でこれを受信する。電極交点に指などの接地された導電体が近接すると、 T_x からの信号の一部は人体を通じ GND へと流出するため、 R_x で検出する信号は減衰する (図 2 (左))。タッチサーフェスはこの流出量 (流出電流値) が一定の閾値を上回るか否かによりタッチ/非タッチ状態を識別する。

流出電流値はタッチ点から GND に至る経路のインピーダンスによって制御可能であることに着目し、Ohmic-Touch [12] は抵抗成分を、Flexibles [20] は容量成分の変化を利用している。本手法はこうした手法と同様にタッチ点から GND に至る経路の電気的特性の差異を入力に用いる。上記以外にも、流出電流値のデータは新規なインタラクション手法の開

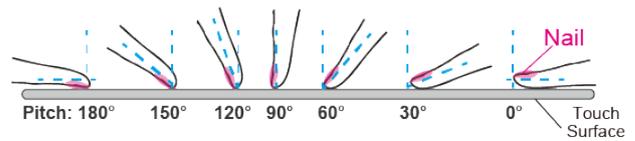


図 3. タッチサーフェスに対する指の Pitch 角度.

拓やインタフェース改善に利用されてきた。例示すると、タッチ入力面へ近接する指の検出 [8], 指先と手のひらの識別 [15], 操作指の識別 [16, 4], 生体認証 [9, 6], 耳によるタッチジェスチャ [21], 操作指の pitch および yaw の推定 [22], 接触面積や形状の推定 [19], タッチ位置座標の精度向上 [14] および、Force-to-Motion 方式の入力 [11] などを実現するものである。本研究では、爪と指の電気的特性の際により生じる流出電流値の変化から、爪でのタッチと指でのタッチを識別する手法を実現する。また、[16, 4, 19, 22] は主に指の接触面積変化による流出電流値の変化をインタラクションに用いる手法であるが、こうした手法を Force Touch やドラッグ操作などと組み合わせる場合、指の皮膚の変形が生じるため識別精度に影響を与えられと考えられる。提案手法は皮膚と比べて固く形の変わりにくい爪を入力に用いるため、上述のような操作との組み合わせについても比較的安定した入力の実現可能であると期待される。

3 ScraTouch

ScraTouch は通常の指の腹または指先の皮膚をタッチサーフェスへ接触させるタッチ入力とは異なり、爪をタッチサーフェスへ接触させるタッチ入力である。爪によるタッチ入力は指の角度を変える (指の第一・第二関節を曲げる) だけで簡単かつ即座に行うことが可能であり、さらに、スタイラスペンや追加のデバイスを利用する操作形態 [12, 20] と比較し携帯性の観点からも利便的である。また、指の関節を曲げた状態でタッチを行うので、通常の指を伸ばした状態でのタッチ入力時と比べ可動域は限定的であるため、片手の複数指でピンチイン・ピンチアウトをすることは困難であるが、複数指の爪によるタッチ入力、スワイプやフリックなどのジェスチャ入力は可能であると考えられる。

爪と指の識別方法について述べる。図 2 に指と爪それぞれによるタッチ入力時の等価回路を示す。爪によるタッチ入力を行う際に、タッチサーフェス内電極は、爪 (Z) を経由した後に人体などのインピーダンス (Z_5) を通じ接地される。タッチ点から GND へ至るインピーダンスが変化すると、流出電流 (i) はそれに伴い変化する。そのため、薄い絶縁体である Z が介在すると、通常の指によるタッチと比べて i は減少する。この i の差異により、爪と指のタッチ

入力は識別可能と考えられる。以上のように、本手法は爪と指の電気的特性の差異を判別に利用するため、タッチサーフェス内のタッチセンシングの機構のみで実現可能であり、外付けのセンサやハードウェアが不要である。さらに、[12, 20]と異なり、インピーダンスを変化させるためのパッシブな外部機構についても必要としない。

一方で、本手法には下記二つの課題がある。まず、通常の指によるタッチ入力であっても、タッチ開始時における指とタッチサーフェスの近接（または僅かな接触）状態の場合、爪によるタッチとの区別が困難であると予想される。なぜなら、タッチ開始直後はタッチサーフェス上方空間から指を下ろしている途中であり、完全に指を下ろし終えたタッチ状態と比較し、指とタッチサーフェスの接触面積は小さい。そのため、この近接状態での流出電流値は低くなり、爪によるタッチの状態と同程度になると推察される。次に、爪の厚さや長さなど、形状の個人差が流出電流値計測に影響することが挙げられる。爪が厚すぎたり、ジェルネイルやネイルチップを使用しているなどの場合には、爪下の皮膚とタッチサーフェス間の距離が大きくなり、タッチ検出に最低限必要な電流の流出が生じない可能性がある。また、爪が長いほど指のPitch角度（指の腹をタッチサーフェスと水平に接触させた状態を 0° とした指とタッチサーフェスのなす角度、図3参照）を 180° に近づけなければ同様の理由によりタッチ検出に必要な電流量が流出しないと考えられる。

4 予備調査

上述の課題を踏まえ、本手法の実現可能性を調査することを目的に二種類の調査を実施した。まず、通常の指によるタッチ入力を行う際の流出電流値と経過時間の関係について調べた。次に爪によるタッチ入力を行う際の流出電流値について、爪の長さの異なる複数の被験者を対象に調査した。本調査はラップトップPC組み込みのタッチパッドを対象とした。

4.1 指によるタッチ入力の流出電流値範囲

通常の指によるタッチ入力時に計測される流出電流値について調査した。4名の被験者（女性2名、男性2名、年齢23–29歳）が調査に参加した。いずれの被験者も爪の長さは2mm未満かつ深爪やネイルチップはしていなかった。本調査では、被験者がタッチサーフェスを日常使用する際の、タッチ経過時間と流出電流値を60Hzのサンプリング周波数で記録した。macOS 10.12上にて動作するデータ取得用の常駐アプリケーションをObjective-CおよびMultitouchSupport.frameworkにより実装し、本アプリケーションを被験者個人所有のMacBook（トラックパッド領域: 112 × 70mm以上）へ導入し4日間分のログを取得した。流出電流値と相関のある

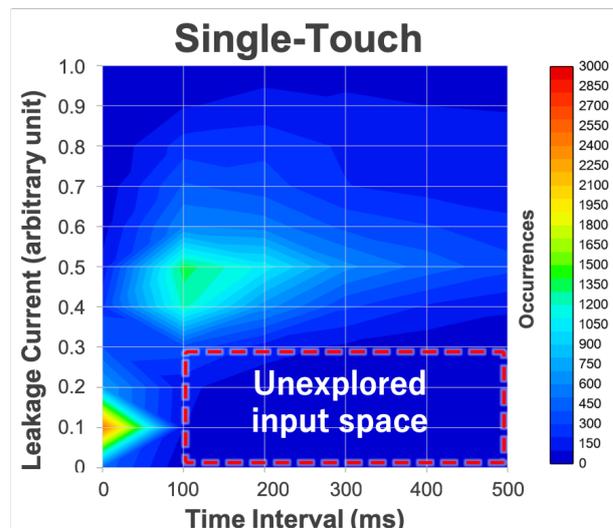


図 4. シングルタッチ入力におけるタッチ開始からの経過時間に対するの流出電流値の分布。

値はサードパーティによるオープンソースのライブラリ（MTDeviceDeclarationsのsizeプロパティ）により取得した。また、被験者らには調査の意図を伝えず各々の作業を自由に行わせた。

4.1.1 結果

図4に、取得した全被験者のデータのうちタッチ継続時間が100ms以上のシングルタッチを対象とし、タッチ開始直後からの経過時間に対する流出電流値の分布について0–500msまでを抜粋し示す。タッチ開始直後は低い流出電流値範囲（0–0.2前後）に多くのデータが分布し、100ms程度経過するとこれより高い流出電流範囲（0.35–0.55前後）にデータが多く分布していることが分かる。これは、タッチ開始直後のタッチサーフェス上方空間から指を下ろしている途中の状態においては指とタッチサーフェスの接触面積は小さく、計測される流出電流値も低くなり、その後時間経過とともに指とタッチサーフェス接触面積が増加し、流出電流量が増加したために生じた分布であると考えられる。本調査結果から、一定時間（100ms程度）経過することで、タッチ開始状態と同程度の低い流出電流値のタッチ入力の発生頻度が低下することを確認した。

4.2 爪によるタッチ入力の検出

本調査では、 $30\text{--}150^\circ$ の間でPitch角度を調整し、利き手人差し指の爪が接触する角度および接触時の流出電流値を調査した。7名の被験者（女性5名、男性2名、年齢23–66歳）が調査に参加した。被験者のうち2名（P1, 2）は爪床が指先から0.5–1mm程度露出している深爪の状態であり、4名（P3, 4, 5, 6）は0.5–2mm程度、1名（P7）は指先の皮膚より

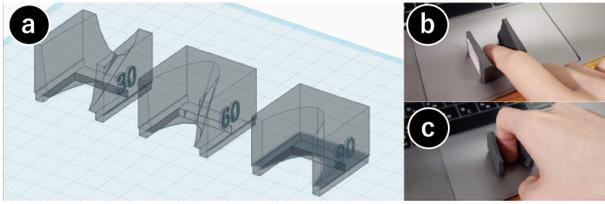


図 5. (a) 調査で使用した指の Pitch 角度を一定に保つ器具. (b) 30–90° は指の腹側の, (c) 120–150° は爪側の指先から第一関節までを器具の斜面に沿わせつつ, タッチサーフェス上でタッチを行う.

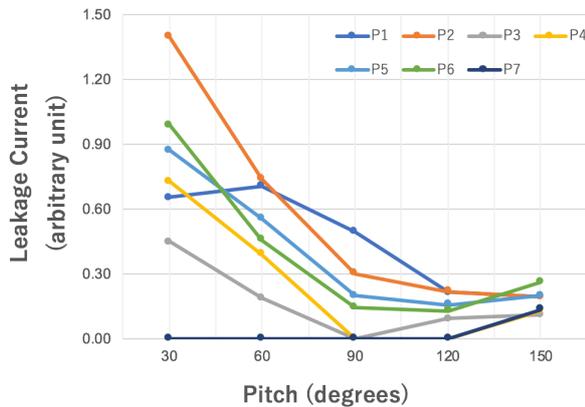


図 6. タッチ開始から 100ms 経過以降の指の Pitch 角度毎の流出電流値の平均.

4mm 程度爪が伸びている状態だった。被験者らは、タッチサーフェス中央部で 30, 60, 90, 120, 150° の Pitch 角度でのタッチ入力を行った。この際、[17] を参考に 3D プリントし作成した指の Pitch 角度を一定に保つ器具を使用した。各角度についてタッチ入力は 5 回行った。1 回のタッチは 2 秒間継続し、この間の流出電流値を 120Hz のサンプリング周波数で記録した。タッチサーフェスは MacBook (Early 2016, macOS 10.13,トラックパッド領域: 112 × 70mm) を使用した。macOS 10.12 上にて動作する調査用のアプリケーションを C++および MultitouchSupport.framework により実装し、流出電流値と相関のある値はサードパーティによるオープンソースのライブラリ (MTDeviceDeclarations の size プロパティ) により取得した。

4.2.1 結果

図 6 にタッチ後 100ms 以降の Pitch 角度毎の流出電流値の平均値を示す。P1, 2, 5, 6 は 120° 以上の、P3, 4 は 90° 以上の、P7 は 30° 以上の Pitch 角度において、爪のみがタッチサーフェスと接触している状態であった。流出電流値が 0 となっている角度は、タッチサーフェスが検出可能な電流値変化が生じず

計測が不可だった角度である。これは、爪の干渉によりタッチサーフェスと指の距離が広がり、流出電流が減少したことが原因であると考えられる。爪を長く伸ばしていた被験者 (P7) を除き 120–150° の Pitch 角度範囲で爪によるタッチ入力が検出可能であった。P7 についても 150° では爪によるタッチ入力が検出可能であった。以上より、被験者の爪の長さに影響を受けるものの、120–150° の Pitch 角度において爪によるタッチ入力の検出が可能であることを確認した。また、本調査で記録した爪によるタッチ入力時の流出電流値は最大で 0.29 であり、かつ全ての試行において流出電流が途中で計測不可になることなく 2 秒間の安定した記録が可能だった。よって爪によるタッチ入力は、図 4 の破線で示す入力空間を活用するタッチ入力拡張手法であるといえる。

4.2.2 考察

上述の調査より、爪によるタッチ入力を行った際の流出電流値の最大値は 0.29 であった。ここでは仮に、マージンを取り 0.30 とした値を判定閾値として使用し、閾値以下を爪によるタッチ入力、閾値以上を指によるタッチ入力として判定する場合について考察する。図 4 の指によるタッチ入力の流出電流値分布から、タッチ開始直後 (経過時間=0ms) は流出電流値 0.3 以下に分布するデータが 80% 以上であるが、100–400ms 経過後はそれぞれ 100ms: 4%, 200ms: 2%, 300ms: 2%, 400ms: 2% となり、爪によるタッチ入力で使用範囲の流出電流値の発生頻度は低くなる。これはすなわち、指でのタッチ入力を爪でのタッチ入力として誤判定する割合と等しい。そのため、100ms 程度の短い待機時間を設けることで、爪によるタッチ入力と指によるタッチ入力は高い精度で区別が可能であると考えられる。この待機時間の分だけタッチ入力後にレイテンシが発生するものの、人間の知覚可能な最短時間 [2] (96ms) を大きく上回るものではない。

5 議論

爪は指の皮膚よりも硬いためタッチ時に形状が変わりにくい。タッチジェスチャやタップによる接触面積変化が流出電流値へ及ぼす影響は、指でのタッチと比較し小さいと考えられる。一方で、本調査から指の Pitch 角度変化は指でのタッチ時と同様に流出電流計測に影響することが分かった。また、Pitch 角度が 180° に近づくとつれ、爪の根元付近の皮膚とタッチサーフェスの近接により、流出電流値は増加すると考えられる。これは、タッチサーフェスの手前側の縁周辺部での入力を行う際に顕著になると予想され、皮膚とタッチサーフェスの意図しない接触が懸念される。こうした可能性を考慮すると、100ms 程度のデータを使用した入力識別後、タッチ入力が終了するまでの間は入力モードを固定する、あるいは

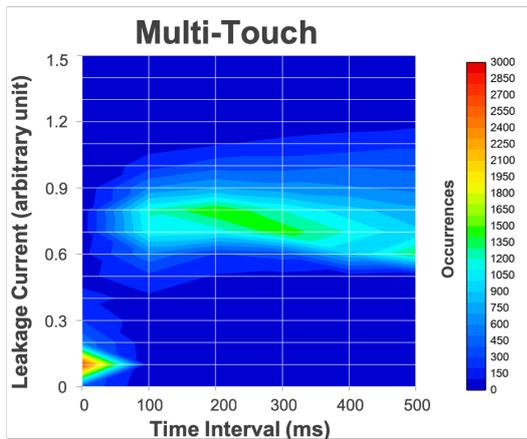


図 7. マルチタッチ入力におけるタッチ開始からの経過時間に対するの流出電流値の分布。

は大きく電流値が変化した場合にのみモードを切り替える動的な閾値の導入などの実装が望ましいといえる。

スマートフォンにおいてはマルチタッチ入力の際に各指の Pitch 角度が大きくなることが知られている [5]。Pitch 角度が大きくなると指とタッチサーフェスの接触面積が小さくなるため、流出電流値が低下し、爪によるタッチ入力の識別に影響を及ぼす可能性がある。今回調査対象としたタッチパッドの日常使用時のデータについては、図 7 に示すようにマルチタッチ入力の場合に誤判定の増加は見られなかった（流出電流値 0.30 以下のデータ分布は 0ms: 80%, 100ms: 2%, 200ms: 1%, 300ms: 1%, 400ms: 0%）。これは、タッチパッドが水平面上に置き使用するタッチサーフェスであるため、マルチタッチ入力の際の指の Pitch 角度に変化が乏しかったためと考えられる。一方で、スマートフォン使用時はマルチタッチ入力の際に Pitch 角度変化による流出電流値の減少を考慮する必要があると推察される。

タッチセンシングの観点から、指でのタッチ入力と比較し流出電流値が低いタッチ入力は SN 比 (signal-to-noise ratio) が低い入力であるため、タッチ座標に微小なジッターが生じることが観察された。これについては、一定時間範囲のタッチ座標を平滑化する、あるいは [14] のようなタッチ入力位置精度を改善する手法を適用することで低減可能と考えられる。

本論文の考察においては、被験者全員のデータから爪と指のタッチ入力の識別可能性を検討した。提案手法は被験者毎にキャリブレーションを行うことでより高精度に識別を行えると考えられる。一方で、爪は日々長さや厚さの変化する身体部位であり、どの程度の頻度でキャリブレーションが必要であるかや、ジェルネイルやネイルチップを使用している場合の検討が今後必要と考えられる。

6 応用例

予備調査に基づき検討可能な、本手法の応用例について述べる。プロトタイプアプリケーションは上述の MultitouchSupport.framework および MT-DeviceDeclarations を用いて実装した。

6.1 ショートカットコマンド

まず、本手法の最もシンプルな応用例として、爪でのタッチ入力時に通常の指でのタッチとは異なる操作を割り当てることが可能である。具体的には、指でのタッチは通常通りカーソル移動や選択操作を行うのに対し、爪でのタッチにコピーコマンドを割り当てたり、PDF リーダーなどでドキュメントを閲覧する際に指のタッチ（ドラッグ操作）では文章の選択を行い、爪のタッチでは文章にマーカーを引く操作を割り当てるといったことが可能である。例示すると、タッチサーフェス入力面を分割し、分割された各位置上での爪のタッチにより、その位置と紐付けられたショートカットコマンドを起動することも可能である。なお、類似のアプリケーションとして MarkPad [3] や Nums (Lucky Technology Ltd.) などが挙げられるが、これらはタッチサーフェスのベゼル部でロングタップやスワイプを行い、モードを切り替えた後にコマンドを選択する必要がある。

6.2 爪での動作を活かした入力

爪による日常動作を活用した入力として、爪ではじく動作（爪によるフリック操作）を導入した操作を実現可能である。爪ではじく動作は、物体を特定の方向へ飛ばす、または散らす際に行われることから、爪によるフリックにより特定のデータを送信・配信するという操作へのメンタルモデル適用を検討する。例示すると、メールの送信操作や Bluetooth を用いたデータ送信操作、または Twitter などの SNS での投稿操作に割り当てる。これは、操作を即時的かつ理解しやすくするのみでなく、意図的に行わなければ発生し得ない爪によるフリック操作を用いるため、「宛先を編集しなかったのに、誤って横にあった送信ボタンをタップしてしまう」といった従来の指によるタッチ入力で生じる操作ミスの低減にもつながると考えられる。

また、爪でこする動作は物体表面の汚れやテクスチャを剥がしたりめくる際に行われる。これを爪によるスライド操作としてタッチサーフェス操作へ導入した場合、くじやクーポンなどスクラッチ印刷を模したコンテンツのスクラッチ部を剥がす操作や、ペイントソフトの消しゴムの操作などへの適用を検討できる。

6.3 操作対象の切り替え

スマートフォンやスマートウォッチなどの画面領域が小さく限られたタッチサーフェスにおいては、

画面上にタッチ可能なコンポーネントが多数存在する場合に、意図しないコンポーネント上へのタッチ入力により誤った操作をしてしまう場合がある。こうしたインタフェースにおいて、頻度高く行う操作は指で、選択頻度の低い操作を爪でのタッチ入力に割り当てることで画面領域を有効活用可能であると考えられる。

7 まとめと今後の展望

本論文では、タッチサーフェス上で、爪および指によるタッチ入力をそれぞれの入力部位の電気的特性の差異により識別する手法を提案した。本論文の調査では、指と爪によるタッチ入力のそれぞれの流出電流値の変化範囲を検証し、タッチ入力後から100ms程度の待機時間を設けることで入力空間がコンフリクトせず、高精度に識別できることを示した。今後は本手法を用いた定量的なユーザ評価により、操作効率および操作性を検証する。

参考文献

- [1] L. Chan, R.-H. Liang, M.-C. Tsai, K.-Y. Cheng, C.-H. Su, M. Y. Chen, W.-H. Cheng, and B.-Y. Chen. FingerPad: Private and Subtle Interaction Using Fingertips. In *Proc. of UIST '13*, pp. 255–260.
- [2] J. Deber, R. Jota, C. Forlines, and D. Wigdor. How Much Faster is Fast Enough?: User Perception of Latency & Latency Improvements in Direct and Indirect Touch. In *Proc. of CHI '15*, pp. 1827–1836.
- [3] B. Fruchard, E. Lecolinet, and O. Chapuis. MarkPad: Augmenting Touchpads for Command Selection. In *Proc. of CHI '17*, pp. 5630–5642.
- [4] H. Gil, D. Lee, S. Im, and I. Oakley. TriTap: Identifying Finger Touches on Smartwatches. In *Proc. of CHI '17*, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [5] A. Goguey, G. Casiez, D. Vogel, and C. Gutwin. Characterizing Finger Pitch and Roll Orientation During Atomic Touch Actions. In *Proc. of CHI '18*, pp. 589:1–589:12.
- [6] A. Guo, R. Xiao, and C. Harrison. CapAuth: Identifying and Differentiating User Handprints on Commodity Capacitive Touchscreens. In *Proc. of ITS '15*, pp. 59–62.
- [7] C. Harrison, J. Schwarz, and S. E. Hudson. TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces. In *Proc. of UIST '11*, pp. 627–636.
- [8] K. Hinckley, S. Heo, M. Pahud, C. Holz, H. Benko, A. Sellen, R. Banks, K. O'Hara, G. Smyth, and W. Buxton. Pre-Touch Sensing for Mobile Interaction. In *Proc. of CHI '16*, pp. 2869–2881.
- [9] C. Holz, S. Buthpitiya, and M. Knaust. Bodyprint: Biometric User Identification on Mobile Devices Using the Capacitive Touchscreen to Scan Body Parts. In *Proc. of CHI '15*, pp. 3011–3014.
- [10] M.-C. Hsiu, C. Wang, D.-Y. Huang, J.-W. Lin, Y.-C. Lin, D.-N. Yang, Y.-p. Hung, and M. Chen. Nail+: Sensing Fingernail Deformation to Detect Finger Force Touch Interactions on Rigid Surfaces. In *Proc. of MobileHCI '16*, pp. 1–6.
- [11] K. Ikematsu, M. Fukumoto, and I. Sii. Ohmic-Sticker: Force-to-Motion Type Input Device for Capacitive Touch Surface. In *Extended Abstracts of CHI '19*, pp. LBW0223:1–LBW0223:6.
- [12] K. Ikematsu and I. Sii. Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch Through Resistive Objects. In *Proc. of CHI '18*, pp. 521:1–521:8.
- [13] H.-L. C. Kao, A. Dementyev, J. A. Paradiso, and C. Schmandt. NailO: Fingernails As an Input Surface. In *Proc. of CHI '15*, pp. 3015–3018.
- [14] A. Kumar, A. Radjesh, S. Mayer, and H. V. Le. Improving the Input Accuracy of Touchscreens Using Deep Learning. In *Extended Abstracts of CHI '19*, pp. LBW1514:1–LBW1514:6.
- [15] H. V. Le, T. Kosch, P. Bader, S. Mayer, and N. Henze. PalmTouch: Using the Palm As an Additional Input Modality on Commodity Smartphones. In *Proc. of CHI '18*, pp. 360:1–360:13.
- [16] H. V. Le, S. Mayer, and N. Henze. Investigating the Feasibility of Finger Identification on Capacitive Touchscreens Using Deep Learning. In *Proc. of IUI '19*, pp. 637–649.
- [17] S. Mayer, P. Gad, K. Wolf, P. W. Woźniak, and N. Henze. Understanding the Ergonomic Constraints in Designing for Touch Surfaces. In *Proc. of MobileHCI '17*, pp. 33:1–33:9.
- [18] S. Mayer, L. Lischke, A. Lankswert, H. V. Le, and N. Henze. How to Communicate New Input Techniques. In *Proc. of NordiCHI '18*, pages = 460–472,.
- [19] I. Oakley, C. Lindahl, K. Le, D. Lee, and M. R. Islam. The Flat Finger: Exploring Area Touches on Smartwatches. In *Proc. of CHI '16*, pp. 4238–4249.
- [20] M. Schmitz, J. Steimle, J. Huber, N. Dezfuli, and M. Mühlhäuser. Flexibles: Deformation-Aware 3D-Printed Tangibles for Capacitive Touchscreens. In *Proc. of CHI '17*, pp. 1001–1014.
- [21] R. Wang, C. Yu, X.-D. Yang, W. He, and Y. Shi. EarTouch: Facilitating Smartphone Use for Visually Impaired People in Mobile and Public Scenarios. In *Proc. of CHI '19*, pp. 24:1–24:13.
- [22] R. Xiao, J. Schwarz, and C. Harrison. Estimating 3D Finger Angle on Commodity Touchscreens. In *Proc. of ITS '15*, pp. 47–50.