複数周波数帯での静電容量センシングによる指の識別手法

陳 明輝[1,a)]　チャコン サラス ディマス アントニー[1,b)]　矢谷 浩司[1,c)]

概要：どの指が物体に触れているか識別することができれば，指によるインタラクションの幅が大きく広がる．本稿では，導電性の物体にユーザが触れたときに，どの指が触れたかを速く正確に特定する手法を紹介する．本研究において我々は，信号を出力するリストバンドと信号を検知するコンパクトな回路を設計し，導電性の物体に触れた指を特定するシステムを構築した．本システムでは，手の皮膚組織を高周波の信号を伝える導波管として用い，伝わった複数周波数帯の信号の位相や振幅を処理して比較することで，導電性の物体に触れた指を特定することが可能となっている．本稿では，複数周波数帯の信号から指を特定する手法を述べたのち，本システムがスマートウォッチなど日常で用いるデバイスに利用できる可能性について議論する．最後に，本システムを用いた将来のインターフェースの可能性について述べる．

キーワード：指の識別，静電容量センシング，タッチインタフェース

Finger identification using dual-frequency capacitive sensing

Minghui Chen[1,a)]　Dimas Antony Chacon Salas[1,b)]　Koji Yatani[1,c)]

Keywords: Finger identification; capacitive sensing; touch interface

1. 序論

物体を操作する際に広く一般的に行われている手段として，指を用いて触れるという方法がある．指で触れるという動作はタッチスクリーン，タッチボタン，指の動きをセンシングする機能を持った素材など，様々な場面で用いられている．特にタッチスクリーンでは，触れることにより座標や触れた時刻以外にも多くの情報を得ることができる [3]．また，マルチタッチ，ジェスチャーを含む動作 [12,15]，手のひらや拳を用いた接触 [22]，向きや回転などの指の特性 [18] など，接触のあり方を拡張するために行われた研究も数多く存在する．

Finger Identification（Finger aware interaction [15,20] や Finger specific interaction [3] とも呼ばれる）は特定の接触事象においてどの指が使われたかを決定することでタッチ入力を用いるインタラクションを拡張する手法の一つである．一般的に “Finger Identification” という用語は，端末をどの人物やどちらの手で使用しているかを特定するという文脈で使われることがある [13]．しかし，本論文ではこの用語を「接触に使う手の中でどの指を用いているか識別する」という意味に限定して用いることとする．この方法を用いることでそれぞれの指に別の機能を持たせることなどが可能となり，一回の接触によってより多くの情報を得ることが可能となる [3,8]．

同一の手における指を区別するための研究はこれまで数多く行われてきた．光学的な手法を用いた識別 [10,14,15,20] や指紋を用いた識別 [13]，静電容量を用いた識別 [9,16] がこれまでに行われてきたが，どの手法に関してもなんらかの短所を持っていた．例えば，実用的な場面で人々が光学的計測装置や大きなセンサーを手につけることはほとんど存在しないといえる．本論文では，使用者がリストバンド

1 東京大学大学院 工学系研究科
Interactive Intelligent Systems Laboratory,
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
a) iraka@iis-lab.org
b) antony@iis-lab.org
c) koji@iis-lab.org

© 2020 Information Processing Society of Japan

を腕に身につけることで迅速，正確かつ柔軟に指の識別が可能となるような新しい手法を提案する．本論文による貢献は以下の通りである．

- 静電容量検出を用いた指の識別方法の提案
- 特定の条件下におけるシステムの実装と検証

2. 関連研究

2.1 指の識別

指の識別には，大きく分けて受動的な方法および能動的な方法という 2 種類が存在する．受動的な方法では触れた動作そのものから得られる情報のみを利用するが，能動的な方法では指の識別を効率化するために必要な情報を触れる動作に追加で用いている．Freehand detection としても知られている受動的な方法では手に追加のセンサーやアクチュエーターの装着は行わない．これに対して能動的な方法では手に追加の装置を装着し，手の可動性は幾分減るものの識別の精度を高めることを可能としている．

2.1.1 受動的手法

指の識別の最も一般的で自然な方法は，深度カメラのようなコンピューターの視覚に基づいた検出器である．関連した装置の例として Kinect[*1]や LeapMotion[*2]があり，これらを用いることで手の骨格データを得ることができる．骨格データを画面や物体などの空間座標にマッピングする事によって，ユーザーがどの指を用いて接触しているのか決定することが可能となる．

Glass+Skin [20] はメニュー画面を操作する際の指の識別を検討した．彼らは指先の位置を捉えるためカメラを用い，実際に触れた位置との比較を行った．この研究において指の識別はユーザースタディにおける調査の一部分でしかなかったため，識別の精度に関する具体的な言及は行われていなかった．

Touch180 [14] は，手の形状を取得するためにタッチスクリーンの下部に魚眼レンズカメラを設置し，ユーザのジェスチャーをタッチスクリーンの入力に対応づけるため VGG-16 CNN モデルの学習を行った．この方法では，スマートフォンサイズのタッチスクリーンに対して，98.56%の精度を示した．

人間の手の幾何学的な特性は指の識別の役に立つことが多い．Au ら [1] は，片手の 5 本の指が全てタッチスクリーンに触れている際における，幾何学的な情報に基づいた指の識別システムを提案した．このシステムでは 96.0%の精度を示し，4 本の指を用いた操作では反応時間およそ 1 秒程度で実行をすることができた．また，この方法を用いることで左手か右手かの判定もできることについても言及していた．このようなシステムでは，手の幾何学的な関係に注目するためにユーザはあらかじめ決められた通りに指を置かなければならないという問題がある．

Benko ら [2] は前腕部における筋肉のセンシングが指の識別に適用できる事を示し，5 本の指に対し 300ms 程度の遅延で 90%の精度が得られることを示した．前腕部に電極が取り付けられているものの，本手法では電極から信号を受信する事によって機能するため，この手法もまた受動的手法であると言える．この研究では，指の識別と感圧検知の両方を実現することに成功し，ユーザインターフェースにおける幾つかの応用例について示している．

指紋はそれぞれの指が持つ特有の特徴であり，それぞれの指の識別を可能とする．Fiberio [13] はタッチスクリーン上で指紋を検出するシステムの一例である．投射機のスクリーンの下に，指紋を照らす導波管として光学ファイバープレートを設置しており，その指紋を高解像度カメラによって記録する．得られた指紋を分類する事によって，Fiberio は一度に複数の指を識別することが可能である．

方法論に関する別のアプローチとして，指が特定の場所をタッチしたという情報を豊富に得るために静電容量を用いるというものがある．Le ら [16] は CNN を用いた静電容量タッチスクリーンにおいて指の画像を識別する可能性について検討し，92%の精度で左右の親指の識別が可能であることを示した．静電容量による方法は，指の形状・向き・傾斜・指の関節を含む指の特徴を検出できるなど数多くの可能性を秘めていることがわかる [23]．TriTap [22] は，同様の方法をスマートウォッチに適用し，3 本の指の識別において 98%程度の精度を実現した．以前の研究とは異なり，分類に end-to-end のモデルではなく，静電容量の画像から抽出した幾何学的な情報を用いていることが特徴であり，スマートウォッチのような複数の指での操作が困難なほど画面が小さいデバイスに関してはこのような方法が適していると結論づけている．

2.1.2 能動的手法

それぞれの指に情報を付加する方法としては最も非効率だが，光学的トラッカーは指の検出に関して信頼性がある．なぜなら，この仕組みは検知のしやすい視覚的な差異によって識別が可能だからである．

InfiniTouch [15] は，スクリーン上のタッチパターンと OptiTrack[*3]の反射装置から生じるジェスチャーの正確な対応づけを行った．CNN モデ ルを用いてジェスチャーのモデルをタッチスクリーン上のイベントに対応づけ，分類の誤りが主に指の配置によってもたらされる事を明らかにした．

Goguey ら [10] は 3 本の指による接触中に指を識別するため，画像処理の識別子として色付きのマーカーを使用して検証を行った．

*1 Kinect, Microsoft, https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect
*2 LeapMotion, ultraleap, https://www.ultraleap.com/
*3 OptiTrack, https://optitrack.com/

© 2020 Information Processing Society of Japan

センサーやアクチュエータを手に装着することにより，正確な特徴量を抽出できる可能性をより高めることができる．センサーのデータを扱う 1 つの方法として，指先とタッチスクリーンの距離を計測するというものがある．FingMag [19] は指に取り付けた磁石とデバイスに搭載した磁力計を用いて，3 本の指を対象とした指の識別で 96%の精度を記録した．研究者らはスマートウォッチを実験機材として選択し，磁力計とタッチスクリーンから収集したデータを合わせ CNN ネットワークに入力として与えた．この方法を用いることで，極端な角度でタッチスクリーンに接触している指に対してもうまく機能することを彼らは示した．

DualKey [11] は人差し指と中指の 2 本を用いたスマートウォッチでの文字入力に注目したシステムである．スクリーンからの距離を測るため一つの指に赤外線カメラを装着し，99.5%の精度で 2 つの指の接触を検知できることを示した．

それぞれの指に固有の見えない信号を割り当てる，という異なる側面からウェアラブルデバイスに注目した研究も存在する．デバイスは受け取った信号に紐づいた指を調べることで，どの指で触れたかどうかを明らかにすることができる．Beauty tech nails [24] が行った研究では，RF-ID 受信機に触れた時に通信する RF-ID チップをそれぞれの爪に貼り付けることで指の識別を行った．RF-ID チップは各指にそれぞれの機能を提供するという役割を果たしながらも，軽量で人体に害がなく，美容品としても十分に活用することのできる製品である．

また，FingeRing [6] によって指に装着された加速度計は指の識別に適していることが示された．加速度計を用いる利点として，物体に触れている際にその物体が指の識別を阻害しないという点がある．WhichFingers [17] でもこの考えを適用し，キーボードやトラックパッドに触れた際に振動センサを用いることで指の識別を行った．

2.2 静電容量を用いた接触検知

人体を電気的な導体とみなして指の接触を検知することは研究課題の一つとなっている．人体は常に生体電気信号を放射しているが，それと同時に広範囲に広がる電磁場を捉えるアンテナとしての役割も果たしている．

Touché [21] は体を伝わる信号の振幅の分布であるスペクトルを元にした検出を通して，人体がどの様にして物体と相互作用するのかを検出する方法を紹介した．この研究において，彼らは安価で堅牢なスペクトル検知器を実装するため，周波数掃引を行う技術を用いた．結果としてこのシステムは静電容量に関して精度良く検出することが可能となり，訓練済みの分類器を用いると 99%の精度での判定が可能となった．

インピーダンスを元にした静電容量検知の利点を生かした多くの研究の中には，複数の電極群によって前腕部上の接触位置を検知した鈴木らの研究 [23] も含まれる．Zhang らによる別の研究 [25] では，幾つかの対になった電極のスキャンを通したインピーダンスの特徴を測定する事によるインピーダンストモグラフィーを使い，高く鮮明な構造的特徴を検知できる事を示した．

DiamondTouch [4] は人体を用いて時間領域における符号化情報の転送を試みた．ユーザーは特定の信号を発している椅子に座り，指の識別に必要な電気的な情報が体を通して指先へと流れる．その後，静電容量検出器がその信号を受け取り，それを復号することで個人の識別情報を得ることができる．この研究では装置がタッチ操作を計測している間，ユーザは何も身につけることなく同一の画面を操作するということが可能となっている．

静電容量検出法は，体全体の姿勢検知に関する技術にも応用できる．これらの技術は位相，信号の大きさ，および磁気ベクトル情報を空間座標または傾斜度に対して適用させることで得られる．[19] はこの技術を指の識別のために用いたシステムの一例である．また，Zhang らによって作成された [26] では，手や腕の上で指が触れる位置を取得するため，位相の検出器と RF 発信器を装着した．この装置によって，推定された位置の標準誤差は 7.6mm まで抑えられたこと彼らは示した．また，AuraRing[19] は自由度が 5 つある指の動きを再現するため，磁気発信器と検出器を備えた腕輪を作成し，動的精度が 4.4mm 程度になることを示した．

3. センシングの原理

今回提案する指の識別を行う手法は，指の空間的な位置関係の差異や人体組織を通じた電磁波の伝播特性を用いる．人体は高周波信号の導波管として機能し、信号の伝わる長さに応じて群遅延や振幅が変化することが知られている [25]．手首にはそれぞれ異なる位置に 2 つの電極を設置し，それぞれが周波数 f， $2f$ の交流信号を皮膚上で発生させる．指先から電極までの距離はそれぞれの指ごとに異なっているため，指先で受信される信号は位相と振幅が異なる周波数 f と $2f$ の交流成分の組み合わせになるはずである．

信号源は $f = 49\,\mathrm{MHz}$ と $2f = 98\,\mathrm{MHz}$ の高周波を発信する信号発生器である．信号発生器は，一つの指先で計測される差異が一定であり続けるように両周波数成分の位相と大きさを同期し続けなければならない．最も高い周波数では，指の相対的な誘電率は主に皮質骨や脂肪組織によって決定され，誘電率の値はおおよそ 15 から 20 程度である [7]．このことから周波数は 98 MHz で 0.68 – 0.79m 程度であることがわかり，位相差が伝送距離 1cm あたり 4.6°- 5.3°程度であることが読み取れる．指組織の伝導率は周波数 98 MHz で約 0.07 S/m であり，1cm あたりの減衰

図 1: ハードウェア部品の概要

は約 0.62 dB となる [5,7]．指先でのこれらの値を取得することにより，どの指が触れたかを正しく識別する事が可能となる．

検出器は入力信号の周波数成分の位相と大きさの差分を取得することによって指の識別を行う．指からの信号を受信すると，まず検出器によって信号が周波数 f と $2f$ のものに分けられる．次に周波数 f と $2f$ の比較を行うため，周波数 f の信号を乗算器によって 2 倍にする．その後，周波数 $2f$ の信号と 2 倍に変換された周波数 f の信号の位相と振幅の差異を，測定器を用いて計測する．こうして得られた位相と振幅の検出結果に対して A/D 変換を行うことで，それぞれの指を特徴付ける信号源の特性についてのさらなる調査を行うことが可能となる．

4. システム実装

本節では，我々が実装した指を識別するシステムの実装方法について説明する．システムは信号を発生する装置，信号を検出する装置，そしてソフトウェアという三つの部分によって構成されている (図 1, 4)．

4.1 信号発生器の構成

信号を発生する装置は，手根骨の位置で装着するリストバンドである．実験においては，不快感をユーザに感じさせる可能性があるものの環境条件を安定的に制御するために，本リストバンドを手首にきつく取り付けることにした．安定して信号を発生するため，安定的な $f = 49$ MHz 交流信号を発生させるために ICS501 クロック発生器 IC を使用し，続いて信号の周波数を 98 MHz に倍増させるために ICS570 クロックバッファ IC を使用した．図 2(a) が

図 2: オシロスコープによって得られた波形 (a) リストバンドで発生する信号 (b) 指先の信号検知器で受信した信号 (c) バンドパスフィルターを通じた信号 (d) 位相ー振幅検知器からの画像例

示すように位相固定ループ（PLL）構造によって，周波数 49 MHz の波形と 98 MHz の波形のエッジが同時に上昇することが担保される．水晶発振器によってクロック周波数を決定し，クロック発生器の性能を調整できるようになっている．

交流電源の雑音の影響を排除するために，リチウムイオン電池を信号発生装置の電源とした．二つの周波数の信号をより良く分離するために，ソース端の抵抗を ICS570 のデータシートの推奨する 27Ω から変更して直接短絡させるようした．こうして，どちらの周波数の信号に対しても負荷効果が減少した．この信号発生器では，二つの周波数の信号の矩形波が，手の皮膚組織の等価静電容量による歪みを伴って生成されることに注意しなければならないが，本システムの信号発生器においては問題にならない．二つの周波数帯は全く異なる周波数成分を含み，そして 3 次の高周波信号（周波数 147 MHz 以上）は，後で説明するように，信号検知器の部分で完全に取り除かれるためである．

二つの周波数を出力する信号線は，皮膚に取り付けた電極に接続する．手の掌に対して手首の左右両側の皮膚に 2 枚の銅の電極を取り付ける．左側の電極には 49MHz の交流信号を，右側の電極には 98MHz の交流信号を出力する．いずれの電極にも 0V から 5V の範囲の電圧の波形を出力する．電極上に貼った薄いプラスチックテープは皮膚に対して交流結合を形成し，直流成分を遮断しつつ高周波信号を通過させる．これによりリストバンドで消費されるエネルギーを節約するものの，信号の出力効率を低下させる事はない．指先では 150 mVpp の合流信号を取得できた (図 2(b))．

4.2 信号検出器の構成

信号検出器のハードウェアは，プリアンプ段階，フィルタリング段階，アナログ乗算段階，位相・振幅検出段階，ADC 段階の 5 段階で構成されている．検出した信号の整合性を保存するため，全ての段階において帯域幅は，検出した入力信号の帯域幅を完全にカバーするようにした．信号検出器の入力インターフェースには，50 Ω の終端 RF コ

図 3: スペクトラムアナライザから得られたボード線図 (a) 49 MHz 帯 (b) 98 MHz 帯

ネクターを用いた．本節では，それぞれの段階の実装を紹介する．

プリアンプ段階は，増幅器およびインピーダンス変換器として機能する．この段階をさらに分解すると，高ゲイン段階とパワーブースト段階によって構成されている．高ゲイン段階に入る前，負荷終端抵抗器と直列に繋がったコンデンサーは 1 MHz 以下の信号をカットするハイパスフィルタとして機能し，50/60 Hz の交流電源からの信号を含む低周波のノイズを除去する．続く高ゲイン段階では，$A = 20$ V/V のゲインに調整されたオペアンプ OPA847 を用い，次のパワーブースト段階のために最大 1.5 Vpp の信号を得る．パワーブースト段階では，ボルテージフォロアとしてオペアンプ OPA698 を使用し，次のフィルタ段階に十分な電力を渡すようにした．

フィルタ段階では，前段階で増幅した信号を 2 つの 3 次バンドパスフィルタによって 49 MHz 帯と 98 MHz 帯に分離する．図 3 はスペクトラムアナライザによって測定されたフィルタの特性を示している．検出の結果を乱さないためにバンドパス構造によって着目する帯域よりも高い周波数や低い周波数の成分を除去し，次の段階に信号を渡す．信号をそれぞれのフィルターを通した後には，追加のオペアンプ OPA820 を用いて出力インピーダンスを変換する．フィルタは図 2(c) のような波形を出力する．

フィルタ段階を通過した 49 MHz 帯の信号は，周波数を 2 倍にするために乗算器 AD835 に入力される．ここで入力信号に対して固定された位相変位を伴う 98 MHz の信号が生成される．この 2 倍の周波数となった信号は，前述のフィルタを通過した 98 MHz の信号と共に検出器に送られる（図 2(d)）．

位相・振幅検出段階では，アナログ RF 位相・ゲイン検出器（AD8302）を用いて，ゲインの対数差と位相の差に比例したアナログ電圧を出力する．データシートによれば，AD8302 は 0 度から 180 度までの範囲でしか位相差を区別することができないため，AD8302 を 2 つ並列して使用した．検出器の位相検出範囲を最大限に活かすため，RC 回路の組み合わせを工夫して 98 MHz 帯の信号を互いに位相が直交する 2 つの信号に分割した．この設計により 360 度の位相を取得することができるようになった．

最後に，レール・ツー・レール増幅器により，検出器の出力を ADC 操作に適した 0V から 5V までの範囲に広げている．この信号の値を PC で読み込むため，ADC アプリケーションに Arduino Pro Mini モジュールを使用した．

図 4: 可視化のためのユーザーインターフェイス．上のグラフは振幅と位相の極座標、下の UI はデータ解析用のボタンと標識

4.3 ソフトウェアの構成

収集したデータを分析，可視化するために，Python によるサーバーを構築して Arduino からデータを収集した．構築したサーバーは，シリアルポートから収集したデータをローカルネットワークに送信するものである．

データ分析，可視化には JavaScript を用いたウェブページ（図 4）を使用した．2 つの信号の振幅と位相の差異を示す極座標のグラフをウェブページ上に表示した．データロギング用に指の識別クラスを表すボタンも併せて用意した．ウェブページのスクリプトの中には，2 つの信号の振幅と位相の差異を入力値として取り込み，指の識別番号（1 から 5 まで）を出力する k-NN 分類アルゴリズムを実装した．

5. 予備実験

予備実験では，構築したシステムが機械学習の手法を用いてどの程度精度よく指を識別できるかを検証することとした．この予備実験では，実験参加者 1 名 (男性，大学院生) の協力により，データの収集を行った．触る対象となる物体として，50Ω の接続ケーブルによって検出器に接続したメタルパッドを用いた．実験を開始する前に参加者の手首にリストバンドをきつく締めた．実験中は手首を固定し，掌を腕ごと動かすようにして，データを収集した．

データの収集では，実験参加者が指を 1 本ずつ順番にメタルパッドに乗せるように指示し，どの指であるかを保存した．サンプルは合計 50 個収集し，分類アルゴリズムが識別のため 8-NN モデルを訓練した．特徴量として 2 つの信号の振幅と位相を用いた．さらに引き続いてテストのために，実験参加者にはメタルパッドにランダムで指を乗せてもらい，乗せた指の種類を記録した．このセッションで

© 2020 Information Processing Society of Japan

図 5: リストバンドを装着している参加者

Pred> / GT	1	2	3	4	5
1	26				
2		24	2		
3			25	1	
4			5	20	1
5				2	24

図 6: 可視化した実験結果．左：テストデータの極座標プロット．2 つの信号の振幅差（Δm）と位相差（Δp）を極座標上に表示している．; 右：テストデータセットの混同行列．

は指 1 本あたり 26 個のサンプルを収集した．

2 次元空間におけるデータの可視化と混同行列形式で表したテストデータの分類結果は以下の通りである．同じ指から収集したデータはクラスター化していることが分かり，データが一定の分布に従っていることを示唆した．テストデータによると，5 本の指に対して Precision は 92.2%，Recall は 91.6%，F1 スコアは 91.9%であった．誤りは主に中指と薬指に由来していた．

実験を実施した際に，手首の動きや皮膚の状態により未だに一定の不安定性が生じることを確認した．特定の指から取得したデータが縞状に動いていることが図 6 から分かるように，ユーザーが意図的または無意識に手首を動かすたびに測定値が収集した元のモデルから逸脱した．

結果は，ハードウェアが正常に機能するためには毎回較正する必要があることを示した．筆者らのモデルに手首の動きを加えることで，より精密な指の識別を実現できる可能性がある．一方で，ある参加者から収集した特徴は全員において見られる特徴ではない．一人一人が独特の特徴パターンを有しており，これは手の形状や組織の分布に起因するものと考えられる．

6. 結論と今後の方向性

6.1 結論

指の識別は，タッチインターフェイス設計の可能性を拡張する．筆者らは，指の識別を達成するため静電容量検知を用いた解決法を提案した．実験結果によると，我々のシステムは高精度で 5 本の指を識別できた．2 つの周波数を用いるという核となる概念は比較的簡単であり，スマートウオッチやスポーツ用リストバンドなどの既存の製品に統合する事も可能である．

6.2 今後の研究

ハードウェアの構築，またはより良い性能を求める識別アルゴリズムに対するさらなる検討を提案する．これを実現する方法の 1 つとしては，より精密な位相や大きさの解像度を達成するために異なる周波数の下でハードウェアを試験する事が考えられる．また，手首の動きによる影響を除外できないか試みる予定である．

現在，我々のシステムは対象物体に対して単一の接触にしか対応できていない．マルチタッチにも対応できるようシステムを拡張する事も有望な方向性である．

最後に，本システムの適切な応用についてさらに模索していく予定である．考えられる応用としては，タッチスクリーンとの相互作用，日常にある物体，およびマルチタッチで操作するには小さすぎるか，不便すぎる電導性の物体への応用などが挙げられる．

謝辞

本研究を遂行して本論文を執筆するにあたり，常に丁寧なご指導をしてくださった矢谷浩司准教授に感謝申し上げます．

また，システムの設計と評価にあたり，研究室の坂口達彦さん，周中一さん，シュラーメク・ゼファンさんには多くのご協力を賜りました．ありがとうございました．

そして，本論文の和訳と修正に協力してくださった研究室の杉山悠司さん，竹ノ内朝陽さんにも心より感謝いたします．

最後に，いつも議論などを通じてサポートしてくださった研究室メンバーの皆さんに感謝の意を表します．

参考文献

[1] Au, O. K.-C. and Tai, C.-L.: Multitouch finger registration and its applications, *OZCHI '10* (2010).
[2] Benko, H., Saponas, T. S., Morris, D. and Tan, D. S.: Enhancing input on and above the interactive surface with muscle sensing, *ITS '09* (2009).
[3] Colley, A. and Häkkilä, J.: Exploring finger specific touch screen interaction for mobile phone user interfaces, *OZCHI* (2014).
[4] Dietz, P. H. and Leigh, D.: DiamondTouch: a multi-user touch technology, *UIST '01* (2001).
[5] Dove, I.: Analysis of Radio Propagation Inside the HumanBody for in-Body Localization Purposes (2014).
[6] Fukumoto, M. and Suenaga, Y.: "FingeRing": a

full-time wearable interface, *CHI '94* (1994).

[7] Gabriel, C., Gabriel, S. and Corthout, E.: The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey., *Physics in medicine and biology*, Vol. 41 11, pp. 2231–49 (1996).

[8] Ghomi, E., Huot, S., Bau, O., Beaudouin-Lafon, M. and Mackay, W. E.: Arpège: learning multitouch chord gestures vocabularies, *ITS '13* (2013).

[9] Gil, H., Lee, D., Im, S. and Oakley, I.: TriTap: Identifying Finger Touches on Smartwatches, *CHI '17* (2017).

[10] Goguey, A., Vogel, D., Chevalier, F., Pietrzak, T., Roussel, N. and Casiez, G.: Leveraging finger identification to integrate multi-touch command selection and parameter manipulation, *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Vol. 99, pp. 21–36 (2017).

[11] Gupta, A. and Balakrishnan, R.: DualKey: Miniature Screen Text Entry via Finger Identification, *CHI '16* (2016).

[12] Harrison, C., Schwarz, J. and Hudson, S. E.: TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces, *UIST '11* (2011).

[13] Holz, C. and Baudisch, P.: Fiberio: a touchscreen that senses fingerprints, *UIST '13* (2013).

[14] Kim, I., Park, K.-W., Yoon, Y. and Lee, G.: Touch180: Finger Identification on Mobile Touchscreen using Fisheye Camera and Convolutional Neural Network, *UIST '18 Adjunct* (2018).

[15] Le, H. V., Mayer, S. and Henze, N.: InfiniTouch: Finger-Aware Interaction on Fully Touch Sensitive Smartphones, *UIST '18* (2018).

[16] Le, H. V., Mayer, S. and Henze, N.: Investigating the feasibility of finger identification on capacitive touchscreens using deep learning, *IUI '19* (2019).

[17] Masson, D., Goguey, A., Malacria, S. and Casiez, G.: WhichFingers: Identifying Fingers on Touch Surfaces and Keyboards using Vibration Sensors, *UIST '17* (2017).

[18] Mayer, S., Le, H. V. and Henze, N.: Designing finger orientation input for mobile touchscreens, *MobileHCI '18* (2018).

[19] Park, K.-W. and Lee, G.: FingMag: Finger Identification Method for Smartwatch, *CHI EA '19* (2019).

[20] Roy, Q., Guiard, Y., Bailly, G., Lecolinet, E. and Rioul, O.: Glass+Skin: An Empirical Evaluation of the Added Value of Finger Identification to Basic Single-Touch Interaction on Touch Screens, *ArXiv*, Vol. abs/1901.08325 (2015).

[21] Sato, M., Poupyrev, I. and Harrison, C.: Touché: enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects, *CHI '12* (2012).

[22] Schweigert, R., Leusmann, J., Hagenmayer, S., Weiss, M., Le, H. V., Mayer, S. and Bulling, A.: KnuckleTouch: Enabling Knuckle Gestures on Capacitive Touchscreens using Deep Learning, *MuC'19* (2019).

[23] Suzuki, Y., Sekimori, K., Shizuki, B. and Takahashi, S.: Touch Sensing on the Forearm Using the Electrical Impedance Method, *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 255–260 (2019).

[24] Vega, K. and Fuks, H.: Beauty tech nails: interactive technology at your fingertips, *TEI '14* (2014).

[25] Zhang, Y., Xiao, R. and Harrison, C.: Advancing Hand Gesture Recognition with High Resolution Electrical Impedance Tomography, *UIST '16* (2016).

[26] Zhang, Y., Zhou, J., Laput, G. and Harrison, C.: SkinTrack: Using the Body as an Electrical Waveguide for Continuous Finger Tracking on the Skin, *CHI '16* (2016).

© 2020 Information Processing Society of Japan