情報処理学会論文誌 Vol.59 No.3 979–991 (Mar. 2018)

Novest：測距センサアレイによる手の甲上での指位置推定システム

石川 優[1,a)] 志築 文太郎[2,b)] 星野 准一[2,c)]

受付日 2017年6月11日, 採録日 2017年12月8日

概要：本稿は，スマートウォッチ側面に取り付けられた小型測距センサアレイを利用して手の甲上をトラックパッドのように利用可能にするシステム，Novest を示す．Novest は，測距センサアレイにより得られる距離データと信号強度データを利用することで，指の 2 次元位置推定および指と手の甲間の距離の状態（タッチングとホバリング）の識別を実現する．製作したプロトタイプを対象とした評価実験において，ロボットアームが把持する丸棒と人の指・平面と手の甲の組合せの条件で指位置推定精度およびタッチングとホバリングの識別精度を求めた．結果，指 + 手の甲での指位置推定の平均誤差は 4.2 mm であった．また，タッチングとホバリングの識別精度は 94.2%であった．

キーワード：スマートウォッチ，ウェアラブルデバイス，Around Device Interaction，トラックパッド，入力手法，ホバリング

Novest: Position Estimation System of Finger on Back of the Hand with a Range Sensor Array

Yu Ishikawa[1,a)] Buntarou Shizuki[2,b)] Junichi Hoshino[2,c)]

Received: June 11, 2017, Accepted: December 8, 2017

Abstract: In this article, we present the system named ‘Novest’ which enables the user to use user’s back of the hand (BoH) as a trackpad with a small ranging sensor array attached on the side of a smartwatch. Novest can estimate the 2D position of the user’s finger and distinguish the state (touching and hovering) of distance between the finger and BoH with using the distance data and the received signal strength data acquired with a ranging sensor array. In our performance evaluation of the prototype of Novest, we evaluated the finger position estimation accuracy and the state classification of touching and hovering accuracy. We conducted it under the combination of the pointing methods, which are a round bar held by a robot arm and a finger, and pointed places, which are a flat surface and BoH. The results show that the mean error of finger position estimation is 4.2 mm under a finger + BoH condition. In addition, the state classification of touching and hovering accuracy is 94.2%.

Keywords: smartwatch, wearable device, around device interaction, trackpad, input method, hovering

1. はじめに

スマートウォッチのような手首装着型のウェアラブルデバイス（以降，単にスマートウォッチ）の主な入力方式は，音声認識もしくはタッチスクリーン，ボタンに限られている．そのうえ，音声入力は，秘匿性の観点から公共の場や静穏な場での使用に問題があり，タッチスクリーンではオクルージョンが生じる問題がある．

1 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305–8573, Japan
2 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305–8573, Japan
a) ishikawa.yu@entcomp.esys.tsukuba.ac.jp
b) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp
c) jhoshino@esys.tsukuba.ac.jp

© 2018 Information Processing Society of Japan

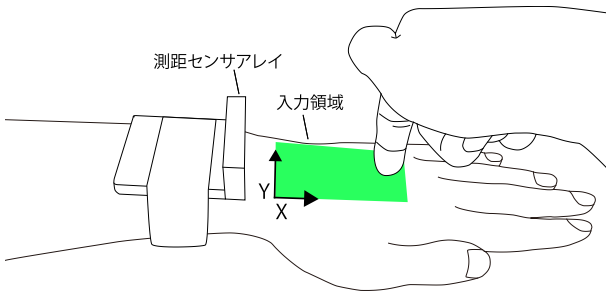


図 1　Novest の概要図
Fig. 1　Overview of Novest.

そこで，デバイスの内蔵素子やデバイスに新たなセンサの追加によりデバイス周辺を入力領域として利用するアプローチ Around Device Interaction（ADI）が提案されている．たとえば，交流信号 [1] や音波 [2]，赤外線深度センサ [3]，磁界 [4]，赤外線フォトリフレクタ [5]，超音波 [6] などを利用して，人体表面やデバイスの周辺での入力を実現する研究がある．

本研究が提案する Novest は，**図 1** のようにデバイス側面の測距センサアレイにより，手の甲をトラックパッド化するシステムである．Novest は，手の甲上の指位置を高精度に推定する．さらに，操作に用いられる指と手の甲間の距離を長い順にレンジ外・ホバリング・タッチングの 3 状態に分け，後の 2 状態を機械学習により識別する．したがって，小型測距センサアレイから透明な 2 層の平面からなるトラックパッドが展開されているモデルのインタフェースとなる．1 層目を使う場合をホバリング，2 層目も使う場合をタッチングとするイメージである．また，ホバリングをマウスとマウスポインタとの関係のように，トラックパッド上空での指位置を表すポインタを表示する状態とすることで，手の甲上での視覚的フィードバック欠如による操作性の低下の問題を解決する．手の甲を選択した理由は，通常衣服に隠れておらず，人前で触れることの社会的受容性が高い部位だからである．

本稿では，小型測距センサアレイを使った指位置推定およびタッチングとホバリングの識別手法を示す．評価実験の結果，指の姿勢に制限があるものの，手の甲上の指位置を高精度（平均：4.2 mm（SD = 1.2 mm））に推定できていることが分かった．

2.　関連研究

デバイス周辺を入力領域として利用する ADI や入力インタフェースとしての指位置推定手法が提案されている．ここでは ADI を，体表面を入力領域とする手法とそれ以外の領域を利用する手法に分類する．また，指位置をシステムの入力として用いた研究を示す．

2.1　体表面を利用するインタフェース

体表面の，即座に触れられる広い面という特徴が入力領域として優れているため，様々な研究が提案されている．

Skin Buttons [7] は，レーザダイオードと赤外線近接センサから構成される光学的なモジュールを用いて，スマートウォッチ周辺の皮膚上にボタンインタフェースを実現している．PALMbit [8] は赤外線投光光源および近赤外線カメラにより指先での選択操作を，PalmRC [9] は深度センサにより手のひらでのボタン入力を実現している．OmniTouch [3] では，手のひらや前々腕部上でボタンに加えて，ドラッグ入力を実現している．Nakatsuma ら [10] は，フォトリフレクタアレイを用いて手の甲を入力領域としている．SenSkin [11] は，前腕に取り付けられた 2 本のフォトリフレクタアレイにより，皮膚が力を加えられた際に生じる皮膚の変形を利用する入力インタフェースを実現している．

Skinput [2] と The Sound of Touch [12] は，体内を伝搬する音波の周波数や強度から，前腕や手，指上のタップやジェスチャを認識している．TapSkin [13] は，スマートウォッチに内蔵されているマイクロフォンと加速度センサを利用してタップ位置を推定している．SonarWatch [14] では，超音波式距離センサと静電容量式タッチセンサを腕時計側面に設置し，後前腕部をスライドバーとして利用する方法を示している．

SkinMarks [15] では，導電性ポリマで作られたタトゥーシールで，薄く曲げ伸ばしが可能な，タッチセンサや曲げセンサ，EL ディスプレイなど多様な入出力インタフェースを皮膚上で実現している．

SkinTrack [1] は，指に印加された交流信号が手の甲を通じてスマートウォッチに到達するまでに生じる位相のずれや強度を測定することによって手の甲上の指位置を高精度に推定している．Botential [16] は，静電容量センサと筋電センサを用いて，端子が触れた体の部位を識別している．EarPut [17] は静電容量センサを利用して，耳をタッチインタフェース化している．

FingerPad [18] は，指先に取り付けられた永久磁石と磁気センサにより微細で秘匿性の高い入力を可能にしている．

2.2　デバイスの周辺領域を利用するインタフェース

Abracadabra [4] は，永久磁石を取り付けた指やデバイスの 2 次元位置を省電力かつ高精度に推定し，小型デバイスへの入力を実現している．MagiTact [19] は，スマートフォンに内蔵された地磁気センサを使い，デバイス周辺において永久磁石を使ったジェスチャ認識を実現している．

SideSwipe [20] は，デバイス周辺のジェスチャによる GSM 信号の乱れを独自のアンテナで取得し，ジェスチャ認識を実現している．電界センシングを用いてジェスチャ認識やホバリング状態の指位置推定を腕時計型のフォーム

© 2018 Information Processing Society of Japan

ファクタで実現した AuraSense [21] や，スマートフォン上で実現した Goc らの手法 [22] がある．Soli [23] は，ミリ波レーダーを使って微小で連続的なジェスチャ認識を実現している．zSense [24] は，数少ない赤外線発光素子と受光素子でスマートウォッチのような小型デバイス周辺でのジェスチャ入力を可能にしている．

FingerIO [6] や Wang らの手法 [25] は，不可聴域の音声信号が周辺物体から反射してくる際に生じる位相のずれを利用し，デバイス最近隣の指位置を高精度に推定している．UbiTouch [26] や UbiK [27] では，剛体を叩く際に生じる音や光の信号強度，振動などを利用し，タップ位置を推定している．

Okuli [28] は，利用する素子の特性と光の反射をモデル化することにより非常に少ない素子で指位置を推定している．Butler ら [5] は，スマートフォン側面に取り付けられたフォトリフレクタを用いて，周辺の剛体上でドラッグや回転などの入力を実現した．FlexAura [29] は，棒状のデバイスの周囲に赤外線フォトリフレクタを敷き詰め，デバイスの持ち方を検出している．The Gesture Watch [30] や HoverFlow [31] は，スマートフォンや腕時計のベゼル部分に取り付けた複数の距離センサにより，デバイスの周辺領域においてジェスチャを認識している．WatchSense [32] は，小さな深度センサによるコンピュータビジョンベースのアルゴリズムによる指先抽出手法により，手の甲の面とその上の領域を同時に利用したインタラクションを提案している．LucidTouch [33] や nanoTouch [34] は，カメラやタッチスクリーンを使って，デバイスの背面を入力領域とすることによりオクルージョンの問題を解決している．

2.3 指位置推定手法

ZeroTouch [35] は，多数の発光素子と受光素子を向き合わせて配置することにより，光の遮り方から指のような物体の位置を推定している．RF-IDraw [36] は，アンテナ配置を工夫することで，少数の RFID タグを装着した指の位置を高精度に推定し，手書き入力を実現している．Kao らは，爪と同等のサイズの静電容量式トラックパッド，NailO [37] を提案している．uTrack [38] は，永久磁石と 2 個の磁気センサを利用し，磁石が取り付けられた指の 3 次元位置を高精度に推定している．

2.4 関連研究と本システムとの位置づけ

多くの手法が提案されているが，小型の測距センサアレイのみで指位置推定に加え，指と手の甲間の距離の 3 状態（レンジ外・ホバリング・タッチング）を識別した事例は見られない．本研究は，測距センサアレイを用いて手の甲上をトラックパッドのように利用するシステム，Novest を提案する．具体的には，1) スマートウォッチ側面に取り付けた小型測距センサアレイにより得られる距離データおよび信号強度データを用いて，2) 手の甲上の指位置を高精度に推定するだけでなく，3) タッチングとホバリングの識別を実現する．

3. Novest のコンセプト

本研究では，スマートウォッチ側面に取り付け可能な小型測距センサアレイを使い，オクルージョンを生じさせず，手の甲上にて微細なボタン入力や線形入力を可能とするインタフェースの実現を試みる．具体的にはこれらの入力に必要な以下の 2 種類の機能を持たせる（**図 2**）．

- 指の 2 次元位置推定
- 指の状態識別

2 点目の状態識別とは，本稿では，指と手の甲間の距離の状態を指すこととする．識別する状態は以下の 3 状態とする．

- レンジ外：指が検出されない状態
- ホバリング：指と手の甲間に距離がある状態
- タッチング：指と手の甲間の距離がない，あるいは非常に小さい状態

本研究では，手の甲をトラックパッド化するが，視覚的フィードバックは通常のタッチスクリーン上のみのため，手の甲上の座標とタッチスクリーン座標の対応関係が分かりにくくなることが予想される．そこでホバリングをマウスやマウスポインタとの関係のように，トラックパッド上空での指位置を表すポインタを表示する状態とすることで解決する．

4. Novest の動作原理

本システムでは，距離データおよび信号強度データを取得可能な測距センサアレイを使用する．また，第 2 指（人差し指）の各部位の名称は文献 [39] の定義にのっとり，**図 3**

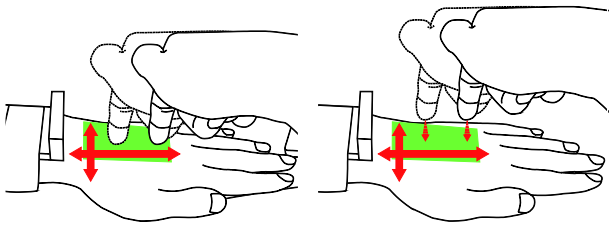


図 2 認識可能な入力様式
Fig. 2 Recognizable input modalities.

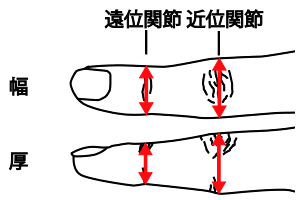


図 3 第 2 指の各部名称
Fig. 3 Term of each part of index finger.

© 2018 Information Processing Society of Japan

のように呼称する．

4.1　指位置推定

指位置推定は，ホバリングとタッチングの両状態において同様の手法で実現する．手の甲上での座標系は図 1 のように定義する．また，本稿では手の甲上での指は 1 本で，第 2 指であることを前提とする．

X 座標の推定には Y 座標の推定結果を利用するため，Y 座標の推定手法を先に述べる．

Y 座標の推定

測距センサにより得られる信号強度データから推定する．省電力化のため，利用可能なセンサの数は限られている．そこで本稿では，スプライン補間により各センサの信号強度データを滑らかに補間し，高精度に Y 座標を推定する．補間された信号強度の分布の最大値を Y 座標とする．

X 座標の推定

推定された Y 座標に最も近いセンサから得られた距離データに，第 2 指遠位関節幅の日本人男女の平均値 [39] の半分をオフセットとして加えた値を X 座標とする．オフセットの加算は，測距センサが指までの最短距離を取得しており，指が指し示す点の位置が X 軸に平行な方向に第 2 指遠位関節幅の半分だけずれていると仮定しているためである．

4.2　指の状態識別手法

測距センサアレイを 2 段に配置し，信号強度データを特徴量とした機械学習により識別を行う．

5.　プロトタイプの実装

本章では，製作したプロトタイプについて説明する．

5.1　測距センサアレイ

実装した測距センサアレイを図 4 に示す．測距センサアレイの大きさは，縦 15 mm 横 50 mm 厚み 8 mm である．横方向の大きさは，SONY 社製 Smart Watch 3 [40] の側面（縦 10 mm 横 51 mm）に準じている．また，日本人男女の手首幅の平均は 55.5 mm（SD = 4.3 mm）であり [39]，これに収まるサイズとしている．

測距センサアレイには，STMicroelectronics 社製 Time of Flight 方式の測距センサ VL6180X を 2 行 9 列の計 18 個を設置する．センサの行間隔は 8 mm，列間隔は 5 mm である．行間隔については，VL6180X が 2 行配置でき，可能な限りセンサが小型化できる間隔として選択している．列間隔は，測距センサアレイ正面から 20 mm の位置にある第 2 指が少なくとも 1 個の測距センサの画角に入る配置，かつ，予備実験にて測定精度に影響がない間隔として決定した．以降，体表面に近い側の測距センサアレイの行を下段，遠い側を上段と呼ぶ．また，VL6180X の検出範囲は，

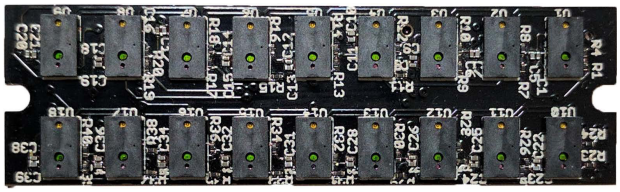


図 4　測距センサアレイ
Fig. 4　Range sensor array of Novest.

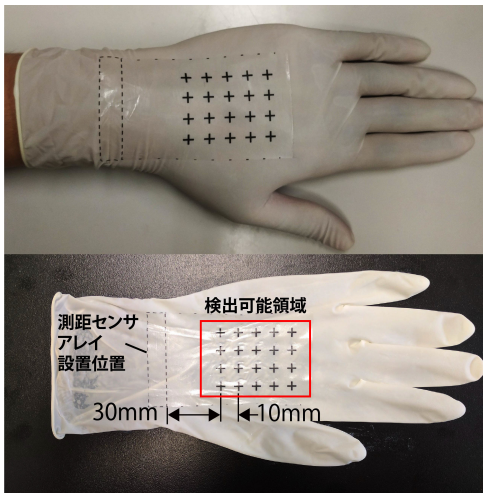


図 5　評価実験用の手の甲（上）および平面（下）のマーカ
Fig. 5　Markers on BoH (upper) and flat surface (lower) used in our performance evaluation.

画角 25 度の円錐状に広がっている．

この測距センサアレイをフラットケーブルで NXP Semiconductors 社製のプロトタイピングボード mbed LPC1768 に接続し，I2C 通信と IO エキスパンダを用いて制御する．また，LPC1768 と PC の接続はシリアル通信により行っている．

5.2　指位置推定

データの更新時間は，センサの仕様上，ビュー内の物体までの距離にも依存しているが，およそ 38 ms（26 Hz）である．

指位置推定には，上段の測距センサアレイを利用する．Y 座標は，上段 9 個のセンサから得られる信号強度データに対してスプライン補間を行い，最も信号強度が高い点とする．

X 座標の推定には，推定された Y 座標に最も近いセンサの距離データに，今回は第 2 指遠位関節幅の半分の 7.45 mm ではなく 6.45 mm のオフセットを加えた．これは，実装を行う過程でセンサが取得する距離データが指までの最短距離よりもやや長かったためである．そこで，第 2 指が遠位関節幅の直径平均 14.9 mm [39] の丸棒と仮定し，測距センサにより得られる距離データが，センサから指を見た場合に表面積が半分になる位置の距離が平均値として出力されているとし，6.45 mm と設定している．

© 2018 Information Processing Society of Japan

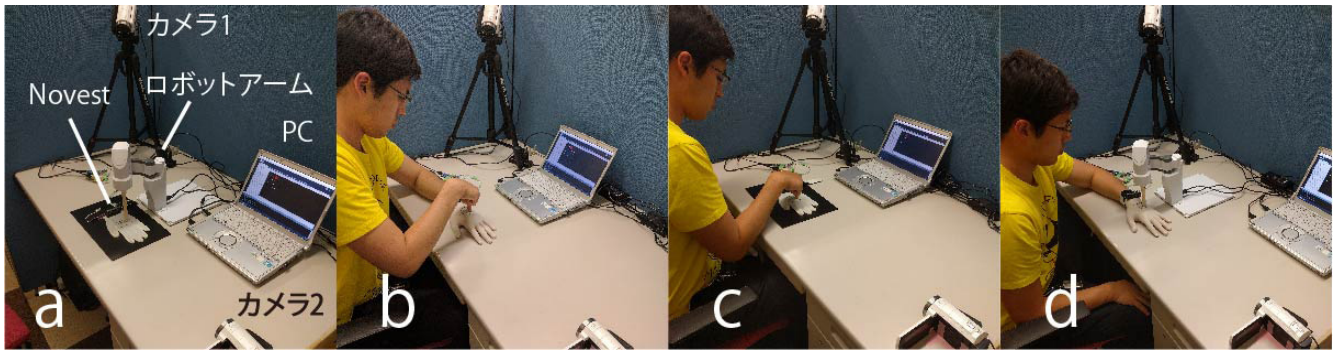


図 6　評価実験 1 における実験条件：a) 丸棒 + 平面，b) 指 + 手の甲，c) 指 + 平面，d) 丸棒 + 手の甲

Fig. 6　Experimental conditions of Evaluation experiment 1: a) bar + flat surface, b) finger + BoH, c) finger + flat surface, d) bar + BoH.

なお，距離データおよび信号強度データについては，ローパスフィルタ（単純移動平均：信号強度データ 5 個，距離データ 8 個）を用いてノイズを抑制している．

5.3　指の状態推定

はじめに，検出可能領域に物体が検出されない場合，指の状態をレンジ外とする．逆にこの領域に物体が存在する場合，ホバリングもしくはタッチングに分類する．今回，センサの性能を考慮し，**図 5** の左下のマーカを原点とし，図 1 の向きに定めた座標系において，X 軸方向に −10〜50 mm，Y 軸方向に −5〜40 mm を検出可能領域（図 5 下）と定める．

ホバリングとタッチングの分類は，Support Vector Machine (SVM) Classifier (デフォルトパラメータ RBF kernel, $\gamma = 0.2$) により実現する．今回我々は libSVM [41] を利用した．SVM に与えた特徴量は，次にあげる 44 個である．すなわち，下段に対する上段の信号強度の比（9 個）とその平均・合計・標準偏差・最大値・最小値・範囲，隣接するセンサの信号強度の差（16 個），上段と下段の信号強度の差（9 個）とその平均・標準偏差・合計，下段の信号強度の合計に対する上段の信号強度の合計の比である．我々は，これらを −1 から 1 にスケーリングして利用する．

6.　評価実験 1

本システムの性能を確認するため，評価実験を行った．本評価実験では，1) Novest の指位置推定精度，2) 推定精度の分布を調査し，指や面の違いが推定精度に与える影響を確認した．

6.1　実験参加者

右利きの大学生・大学院生の男女 9 名（女性 1 名，男性 8 名，23.8 歳（SD = 3.7 歳），P1–P9）を対象とした．今回の実験では，実験条件を統制するために右利きの実験参加者のみを募った．実験参加者には，スマートウォッチ利用経験者は 1 名のみであった．実験参加者はスマートフォンを人差し指で操作する際には右手を使っており，スマートフォンの利用歴は平均 57.6 カ月（SD = 16.8 カ月）であった．実験の所要時間は，休憩時間を含めておよそ 1 時間 40 分だった．実験参加者には謝礼として 2,000 円を支払った．

6.2　セットアップ

Novest の指位置推定精度と，指や手の甲の違いが精度に与える影響を調査するため，指示方法（指，丸棒）および被指示面（手の甲，平面）それぞれ 2 種類ずつ組み合わせた，以下に示す 4 実験条件（**図 6**）でポインティングタスクを実施した．

a) 丸棒 + 平面
b) 指 + 手の甲（タスク 1：タッチング，タスク 4：ホバリング）
c) 指 + 平面（タスク 2）
d) 丸棒 + 手の甲（タスク 3）

丸棒は，直径 12 mm の円筒形のヒノキ材であり，指の形状に近づけるため先端を半球状に加工した．なお直径は，本システムの指位置推定精度への影響が最も大きいと推測される指の部位，第 2 指遠位関節厚の日本人男女平均 12.4 mm [39] に準じた．なお，本評価実験では，この丸棒をヴイストン株式会社製水平多関節ロボットアーム　アカデミックスカラロボットにより動かした．なお，ロボットアームの指示精度は，タッチスクリーン（Microsoft 社製 Windows Surface Pro, OS：Windows 8.1 Pro 64bit，CPU：i5-3317U@1.7 GHz, RAM：4 GB）と Surface ペン，Processing により計測したところ，0.87 mm（SD = 0.43 mm）であった．

ポインティングタスクのターゲットとして，図 5 のように手の甲上もしくは平面に十字のマーカを 1 cm 間隔で 20 カ所用意した．マーカの大きさは 5 mm × 5 mm である．なお，マーカを手の甲に付ける際には，マーカごとの相対的な位置ずれを抑えるため，タトゥーシール（エレコム社製 EJP-TAT10）を利用した．なお，タトゥーシールには，

© 2018 Information Processing Society of Japan

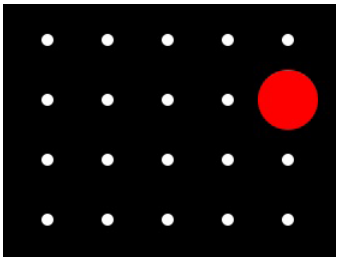


図 7　評価実験用プログラム（白い点はマーカに対応しており，赤い点が指示位置を示す）

Fig. 7　Program for performance evaluation (white points are correspond to markers and participants have to indicate the red point).

マーカとともに測距センサアレイを置く位置も印刷した．また，実験参加者の皮膚への影響を抑えるため，肌に密着するタイプの薄手の乳白色のゴム手袋を装着してもらい，その上にタトゥーシールを貼り付けた．タトゥーシールを貼り付ける位置は，尺骨茎状突起の先端が測距センサアレイの先端と一致し，かつ，第 3 指（中指）の延長線上とセンサ面が垂直になる位置とした．

実験条件を統制するため，平面条件ではプラスチック製の板に同じ手袋を貼り付けた（図 5 下）．また，机に手のひらをつけた場合，手の甲が手首に対して低くなる点を考慮し，条件 a) および c) では Novest の下に高さ方向のオフセットとして 5 mm のアクリル板を挿入した．

実験中の様子を図 6 のカメラ（カメラ 1，カメラ 2）で撮影した．カメラ 1 は実験参加者の左前上方から，ポインティング中の指とマーカが写るように設置した．カメラ 2 は実験参加者の右側からポインティング中の指の姿勢が写るように設置した．

評価実験用プログラムは，PC（OS：Windows 10 Pro 64bit, CPU：i5-2520M@2.5 GHz, RAM：8 GB）上の Processing で実行した．評価用プログラムは，5.2 節に示したアルゴリズムに基づき，毎秒 26 回指位置推定を行うことができる．位置推定結果が検出可能領域内であった場合に指の状態識別も同時に行う．

6.3　手続き

実験は，実験の説明および指の部位の計測，ポインティングタスク，自由記述アンケートの順に行った．順序効果を除くため，タスク 1 とタスク 2 は実験参加者ごとに交互に入れ替えた．

はじめに，スマートフォンの利用歴や普段操作に用いる指などに関する事前アンケートを行った．その後，第 2 指遠位，近位関節それぞれの関節厚と関節幅の計 4 カ所を計測した．実験手順については，資料を見せながら説明した．

ポインティングタスクでは，評価実験用プログラム（**図 7**）が画面に表示した赤いマーカに対応する平面もしくは手の甲上のマーカを指示してもらった．指示順序はランダムとし，全 20 カ所のマーカそれぞれを 3 回ずつ指示してもらった．これを 1 セットとし，タスク 1，2，4 では 3 セット，タスク 3 では 1 セット行ってもらった．なお，1 回の指示につき，15 回分の指位置推定結果と SVM の特徴量を保存した．セット間およびタスク間には 2 分間の休憩を挟んだ．その間に，タスク中に実験参加者が感じたこと，気づいたことがあった場合にはコメントをしてもらった．

マーカの指示位置は，実験参加者がマーカを指示し終えたと感じた時点で実験参加者自身にフットペダル（ルートアール社製 RI-FP3BK）を踏んでもらうことで更新される．なお，タスク中，指の姿勢の意図的な変更やマーカ以外の位置の指示などを防ぐため，指の位置推定結果および状態識別結果に関するフィードバックはいっさい行わなかった．さらに，実験参加者への注意事項として，ゆっくりでも正確に指示するよう心がけてもらうこと，指が面に対して垂直になるよう意識すること，右腕を体側や机などに接触させないこと，タスク中は左手を動かさないようにすることの 4 点を伝えた．なお，今回の実験では，セットごとに測距センサアレイのキャリブレーションと再装着（タスク 1，3，4）もしくは再設置（タスク 2）を行った．

タスク 1，2 ではタスクに入る前に本システムの操作方法に慣れてもらうため，練習タスクを 3 分間ずつ実施した．この練習タスクでは，PC 画面上にマーカと指の推定位置を示すポインタを表示し，自由にポインタを動かしてもらった．練習を始める際に，指が面に対して垂直になるよう説明し，練習中に指の姿勢が崩れた場合には適宜指摘を行った．

タスク 3 では，実験参加者にはロボットアームの指示範囲にタスク 1 と同じように左手を置いてもらい，ロボットアームのポインティングが終了するまで待ってもらった．

タスク 4 ではタスクに入る前に，少なくとも 3 分間の休憩を設け，実験参加者が希望する場合には，最大 5 分間の休憩を設けた．休憩後，タスク 4 でも練習を行ってもらった．この練習では，指の推定位置を示すポインタの色が黄緑のときをホバリング，赤のときをタッチングであることを伝え，ホバリング（黄緑）を維持しながら指を動かす練習を 3 分間行ってもらった．また，指を手の甲から 10〜15 mm 離した状態を保つように注意してもらった．なお，練習の際，評価実験用プログラムは 5.3 節に示したアルゴリズムに基づき，著者が事前に用意した学習データを用いてタッチングとホバリングの識別を行った．なお，この学習データは，検出可能領域内でタッチングおよびホバリング状態で指を 30 秒間ずつ無作為に動かした際に得た特徴量である．

すべてのタスクが終了した後，自由記述アンケートで感想や気になったことを記述してもらった．

なお，丸棒 + 平面のデータは，ロボットアームの指示範囲に平面のマーカをセットして回収した．1 度の施行で指

© 2018 Information Processing Society of Japan

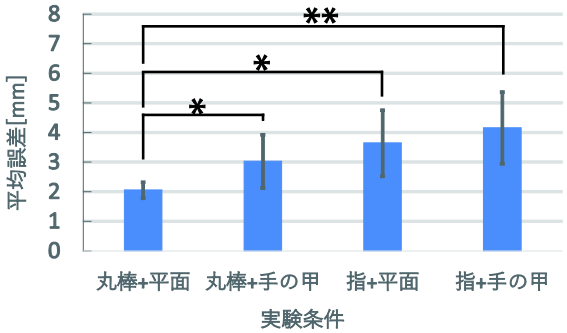


図 8　タッチングの位置推定精度（エラーバーは標準偏差を示す）
Fig. 8　Accuracy of position estimation (error bars show standard deviation across participants) (*: $p < .05$, **: $p < .01$).

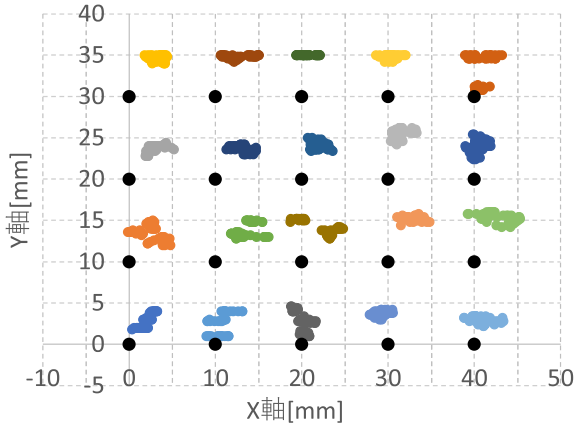


図 9　指 + 手の甲での位置推定結果 (P1)
Fig. 9　Position estimation of P1 under finger + BoH.

示する回数は，タスク 3 と同じく 1 セット分である．これを，6.4 節で述べる Kruskal-Wallis 検定の対象とした 8 人分，つまり 8 回行った．

6.4　結果

実験参加者 P6 の指位置推定の誤差が，有意水準 1%の Smirnov-Grubbs 検定により外れ値となったため，以降の分析から P6 のデータを取り除いてある．

タッチングでの位置推定精度を**図 8**，分布を**図 9** に示す．なお，有意水準 1%の Smirnov-Grubbs 検定により，外れ値を取り除いてある．外れ値は 149 個（全データ 57,600 個の 0.26%）あった．この外れ値は，実験参加者がフットペダルを踏むタイミングが早すぎたことによる．ビデオに記録されていたフットペダル音から，マーカを指示する以前にフットペダルを踏んでいたことを確認した．

実験条件を要因として Kruskal-Wallis 検定を行った結果，実験条件間に有意差があった（$p = .0006 < .001$）．なお，Kruskal-Wallis 検定を用いた理由は，等分散性のための Levene 検定で帰無仮説が棄却された（$p = .016 < .05$）ためである．Mann-Whitney の U 検定と Bonferroni 法による多重比較を行った結果，丸棒 + 平面・指 + 手の甲間（$p = .005 < .01$），丸棒 + 平面・指 + 平面間（$p = .013 < .05$），丸棒 + 平面・丸棒 + 手の甲間（$p = .038 < .05$）に有意差があった．指位置推定精度は，4 実験条件のうち指 + 手の甲が最も低く，平均 4.2 mm（SD = 1.2 mm）であった．

ホバリングでの位置推定精度は平均 5.5 mm（SD = 1.4 mm）であった．なお，実験参加者間の平均に対しても有意水準 1%で Smirnov-Grubbs 検定を行ったところ，P3 が外れ値となったため除いてある．さらに，有意水準 1%の Smirnov-Grubbs 検定により，外れ値を取り除いてある．外れ値は 88 個（全データ 21,600 個の 0.41%）あった．タスク 1（タッチング，指 + 手の甲）のデータと対応のある t 検定を行った結果，有意差があった（$p = .003 < .01$）．したがって，ホバリングでの位置推定精度は，タッチングに比べて有意に低いことが示された．

次に，タッチングとホバリングの識別における混同行列を**表 1** に示す．まず，per-user classifier の場合，タッチング（指 + 手の甲）とホバリングの各セットをまとめたデータを標本として leave-one-out cross-validation を行った．識別精度は平均 91.8%（SD = 8.3%）であった．general classifier では，実験参加者を標本とした leave-one-out cross-validation を行った結果，平均 89.8%（SD = 6.0%）であった．

表 1　SVM によるタッチングとホバリングの識別結果の混同行列
Table 1　Confusion matrix of touching and hovering classification with SVM.

		識別結果			
		per-user classifier		general classifier	
		タッチング	ホバリング	タッチング	ホバリング
入力	タッチング	90.7	7.0	91.2	11.7
	ホバリング	9.3	93.0	8.8	88.3

7.　評価実験 2

手首の角度が本手法の指位置推定および状態識別精度に与える影響を調べるため，ロボットアームと角度調整可能な平面を用いた簡易的な評価実験を行った．なお，本実験では，角度調整を手首の伸展・屈曲の両方向で行うため，評価実験 1 の際に加えた高さ方向のオフセットは取り除いた．

以降，角度については，手首の伸展方向を正の角度，屈曲方向を負の角度として扱う．

なお，Novest は，透明な 2 層の平面からなるモデルのインタフェースであり，平面が傾くことにより指示位置が 0 度の平面における指示位置からずれた場合にも 0 度の平面における指示位置を上下方向に平行移動したように取り扱う．よって，ここでは指示位置を傾いた平面上の指示位置ではなく 0 度の指示位置の鉛直上方および下方とした．したがって，Novest に対して角度を調整して変化するのは，指示位置の高さのみであり，指示位置推定精度は 0 度の指

© 2018 Information Processing Society of Japan

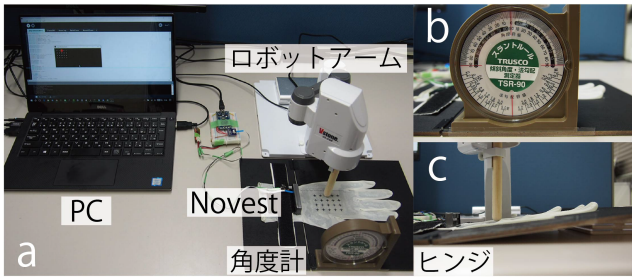


図 10　評価実験 2 の実験環境：a) 全体図，b) 角度計，c) 正面図（伸展方向 6 度の場合）

Fig. 10　Experimental environment of Evaluation experiment 2: a) overall view, b) slant scale, c) front view (in the case of extension at 6 degree).

示平面内のずれとして定義する．

7.1　セットアップ

実験環境を**図 10** に示す．ロボットアームは評価実験 1 と同じものを利用した．指示対象についても評価実験 1 と同様に黒い板材にタトゥーシールを貼り付けたゴム手袋を貼り付けた．本実験では，この平面を手首の表面と見なす．平面の角度を調整するため，板材にヒンジを取り付けた．ヒンジの関節部分の位置は，評価実験 1 において Novest の先端を尺骨茎状突起の先端と一致させたのと同様に，Novest の先端と一致させた．評価用アプリケーションは，PC（DELL Inc. 社製 XPS 13，OS：Windows 10 Pro 64bit，CPU：i7-7560U@2.4 GHz，RAM：16 GB）上の Processing で実行した．

平面の角度は，平面の可変部の端部に角度計（トラスコ中山株式会社製　スラントルール　TSR-90）を設置し（図 10 b），可変部の下にプラスチック材をスペーサーとして挟むことで調整した（図 10 c）．

タッチングの状態では丸棒の先端をおよそ 1 mm 浮かせた状態とし，ホバリングは予備実験からタッチング + 13 mm 上方とした．また，傾斜に対する高さ調整は，Novest 先端を原点として，傾きを傾斜角とする関数により行った．

7.2　手続き

まず，状態推定のための教師データを収集した．今回は，タッチングとホバリングを同一のセット内で行ったが，1 セットで収集するデータ数は評価実験 1 においてユーザを対象とした場合と同じく，それぞれ 900 個とした．順序はタッチング，ホバリングの順とした．セット数も同じく 3 セットとし，タッチングとホバリングのそれぞれ合計 2,700 個のデータを収集して教師データとして利用した．なお，予備実験において −8 度から 8 度までの教師データを試した結果，−6 度での教師データが最も広い角度で状態を高精度に推定できたため，この角度のデータを利用した．また，セット間には Novest を取り除き，キャリブレーションを行った．

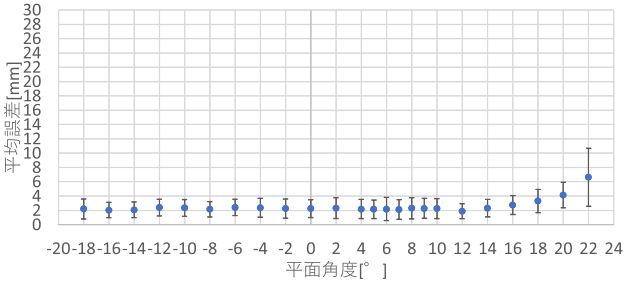


図 11　平面角度によるタッチングの位置推定精度変化（エラーバーは収集したデータの標準偏差を示す）

Fig. 11　Change of the position estimation accuracy of touching based on surface angle (error bars show the standard deviation of collected data).

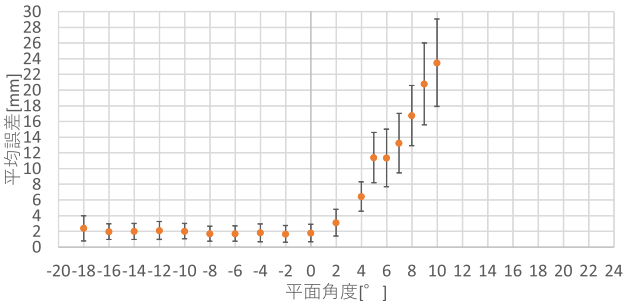


図 12　平面角度によるホバリングの位置推定精度変化（エラーバーは収集したデータの標準偏差を示す）

Fig. 12　Change of the position estimation accuracy of hovering based on surface angle (error bars show the standard deviation of collected data).

テストデータの収集は，ホバリングを含んだ位置推定および識別推定を −18 度から +10 度まで，タッチングのみの位置推定を −18 度から +22 度まで行った．前者はホバリングの識別精度が 50%台となるまでの角度，後者は 0 度の平均から 2σ 離れるまでの角度である．収集したデータ数は，各角度につき，性能評価実験と同じくタッチングとホバリングでそれぞれ 2,700 個（900 個 × 3 セット）である．

7.3　結果

指位置推定および状態推定精度の結果をそれぞれ**図 11**，**図 12**，**図 13** に示す．

指位置推定精度については，タッチングが −18 度から 20 度，ホバリングが −8 度から 2 度の範囲で本手法が最も有効に機能する範囲であることが確認できた．

状態識別精度については，−8 度から 8 までであれば，指位置精度は低下するものの，95%以上の精度で状態識別が可能であった．

8.　考察

評価実験 1 と評価実験 2 に関する考察をそれぞれ 8.1 節から 8.4 節，8.5 節で述べる．

© 2018 Information Processing Society of Japan

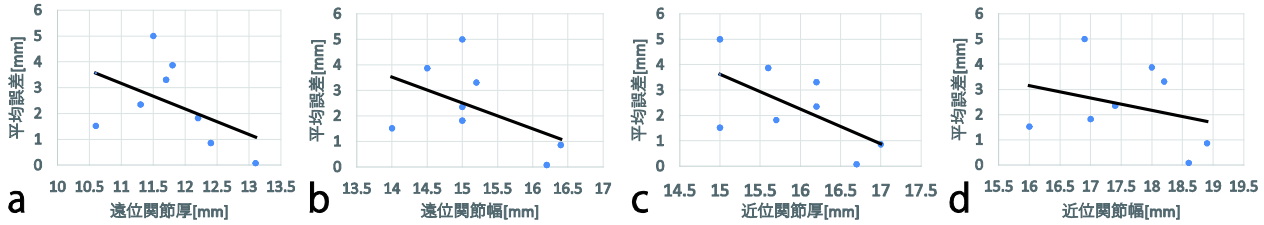


図 14　第 2 指の各部位と x 軸方向の平均誤差との回帰分析結果

Fig. 14　Results of regression analysis between each part of index finger and x axis mean error: a) depth (distal): .21, b) breadth (distal): 0.25, c) depth (proximal): 0.38, d) breadth (proximal): 0.08.

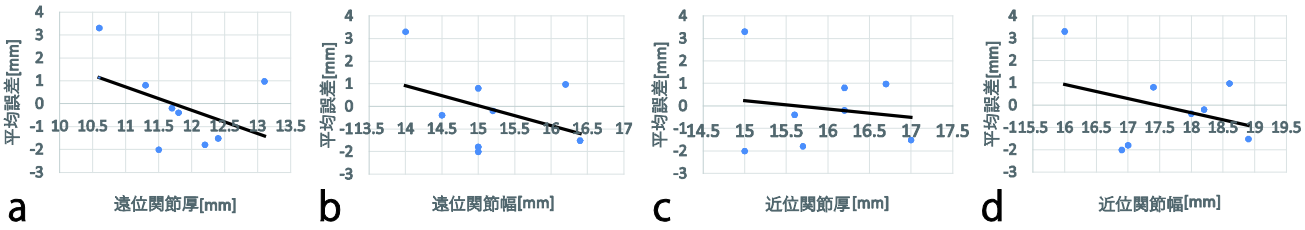


図 15　第 2 指の各部位と y 軸方向の平均誤差との回帰分析結果

Fig. 15　Results of regression analysis between each part of index finger and y axis mean error: a) depth (distal): 0.19, b) breadth (distal): 0.16, c) depth (proximal): 0.02, d) breadth (proximal): 0.12.

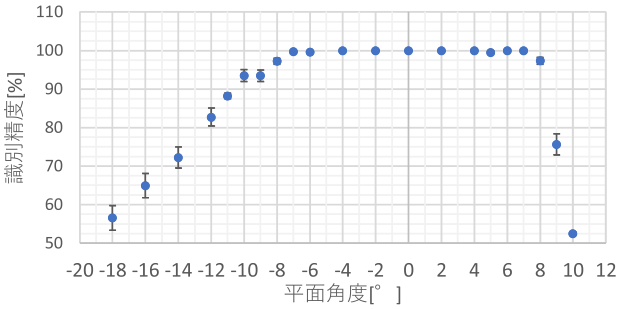


図 13　平面角度による状態識別精度変化（エラーバーは収集したデータの標準偏差を示す）

Fig. 13　Change of finger state classification accuracy based on surface angle (error bars show standard deviation of collected data).

8.1　利用可能なボタンのサイズ

Novest で利用可能なボタンサイズにおいて，Holz ら [42] にのっとれば，今回の実験で得られたデータの 2σ を内包する円形ボタンの直径は，6.6 mm（SD = 1.3 mm）となる．SD は，実験参加者の平均値の標準偏差である．文献によれば，traditional touch input で直径 15.0 mm [42]，OmniTouch [3] の wall 条件で直径 16.2 mm である．Novest では指の姿勢に制約があるものの，利用可能なボタンサイズは，従来法と比較して小さい可能性がある．なお，このボタンサイズは本システムの検出可能領域に 20 個のボタンを配置できることに相当する．また，今回の実験結果から実験参加者はマーカを個別に指示できることが分かった．

8.2　指示方法の影響

丸棒＋平面･指＋平面間に有意差があることから，Novest の指位置推定精度は，指示方法の影響を受けることが示された．

指の太さの影響についても分析を行った．評価実験で計測した第 2 指の 4 カ所の測定結果と，指＋平面の X 軸方向および Y 軸方向の平均誤差との決定係数を算出した（**図 14**，**図 15**）．指＋平面での第 2 指の各部位と X 軸方向および Y 軸方向の平均誤差との決定係数は，それぞれ遠位関節厚：0.21，0.19，遠位関節幅：0.25，0.16，近位関節厚：0.38，0.02，近位関節幅：0.08，0.12 である．よって，今回の実験結果から，指の太さと本システムの指位置推定精度との関連性は低いことが示された．

なお，図 9 の P1 では Y 軸方向にオフセットが生じているように見えるが，実験参加者全体で指＋手の甲の平均誤差と指の各部位の寸法との間の決定係数は 0.3 未満であった．そこで，図 6 のカメラ 2 のビデオを確認したところ，指が Y 軸の正の方向に傾いていた．したがって推定位置のずれは，指の姿勢の影響が反映された結果と考えられる．

以上の結果から，本システムの指位置推定精度に指の部位の特徴よりも姿勢がより大きな影響を与えた可能性が大きい．今後，このことをより多くのサンプルを集めて検証する計画である．

8.3　被指示面の影響

丸棒＋平面・丸棒＋手の甲間に有意差があることから，本手法の指位置推定精度は，被指示面の影響を受けること

© 2018 Information Processing Society of Japan

が示された．一方，指＋手の甲・指＋平面間では有意な差はなかった．

これらの結果は，手首付近に測距センサアレイを設置したことに起因する可能性が考えられる．今回の評価実験では，測距センサアレイを左手首尺骨茎状突起部に設置した．また，実験参加者には左手を動かさないよう伝えた．そのため，実験参加者が肘を水平方向にわずかに動かすだけで手首が回転し，結果として手の甲と後前腕部の相対姿勢が変化するため，誤差が生じた可能性がある．また，実験参加者によっては，尺骨茎状突起の周辺が丸みを帯びていたため，測距センサアレイが手首接線方向に傾き，誤差が生じた可能性も考えられる．

指＋手の甲・指＋平面では有意差がなかった原因は，指での指示精度が低かったためであると考えられる．

8.4　ホバリングの位置推定精度および識別精度

先に述べたように，タッチングとホバリングでは，指位置推定精度に有意差があり，かつ，タッチングに比べてホバリングでは平均誤差だけでなく標準偏差も大きかった．本評価実験でのポインティングタスクは，指の位置推定結果および状態識別結果に関するフィードバックがないため，指示位置は実験参加者の感覚で決められていた．そのため，タッチングに比べてマーカからのずれが大きくなったと考えられる．複数の実験参加者からもマーカを正しく指示できているかが不安というコメントがあった．これらについては 3D トラッカを用いて計測した指位置を Ground Truth とした追加の調査が必要である．

また，タッチングとホバリングの識別精度の平均は，表 1 に示されるように per-user classifier が 91.8%（8.7%），general classifier が 89.8%（6.0%）であった．ただし，有意水準 5%の Smirnov-Grubbs 検定では外れ値となる P6 以外の per-user classifier の識別精度は平均 94.2%（SD = 6.0%）となる．ビデオで確認したところ，P6 は指と手の甲間の距離が，目測であるが 5 mm 程度と小さかった．識別精度についてもフィードバックの欠如が原因と考えられる．

なお，実際のアプリケーションでは，ホバリングにおいてポインタを表示するため，ホバリングにおける指位置推定精度およびタッチングとホバリングの識別精度は向上すると考えられる．

8.5　手首の角度の影響

伸展方向において，指位置推定および状態識別が可能な手首の角度は，丸棒の先端（半球状の部分）が上段の VL6180X のビュー境界に位置する角度とほぼ同じである．屈曲方向での精度の低下は，屈曲角度が大きくなるにつれて指示時に丸棒の位置が下がって丸棒の先端がセンサから見えなくなり，上下段の信号強度に差がなくなったためと考えられる．したがって，本手法の性能を低下させる要因は，位置推定と状態識別精度ともに，操作に用いる指とビューとの相対位置関係，特に指の先端がビュー内に収まっているか否かにあると考えられる．

本手法の適用範囲を拡大するには，センサの取り付け位置や向き，数，ビューがより広いセンサへの変更が考えられる．たとえば，消費電力の観点から数を増やさない場合でも，高多層基板を使い，VL6180 を横向きにすることにより基板自体の大きさは変化させずに上段センサの高さを上げることができる．また，位置推定に利用していない下段を横一列ではなく，上下のジグザグに配置したうえで上下方向に傾ける方法も考えられる．したがって，これに関してはさらなる調査が必要である．

また，屈曲方向に関しては，実際に指で操作する場合には親指や中指などのほかの指が干渉する可能性がある．したがって，より厳密な評価をするためには，ユーザからデータを収集する必要があると考えられる．

9.　アプリケーション

本手法を適用した 2 種類のアプリケーション（ナンバーキーボード（**図 16**），ドローイング（**図 17**））を示す．これらのアプリケーションにおいて，ホバリングは手の甲上の指位置がディスプレイ上にポインタとして表示され，手の甲とディスプレイの対応関係を明示する役割を担っている．

9.1　ナンバーキーボード

手の甲上にナンバーキーボードが展開されたように，ボタン上でホバリングからタッチングへ移行した際にキーが入力される．数字（0–9）に加えて ENT キーや DEL キーを合わせた 12 個のボタンの操作が可能である．

9.2　ドローイング

ボタン入力によるカラーパレット画面への移行および色の選択機能を有するドローイングアプリケーションである．本手法は，線形入力も可能であることから通常のタッチスクリーンと同じようにタッチングしながらの指移動によりドラッグ入力が可能になり，図形や文字を描くことが可能である．

図 16　ナンバーキーボードアプリケーション：a) タッチングによる入力，b) ホバリングによる位置表示，c) DEL キー入力（タッチングによる削除）

Fig. 16　Number key board application: a) input with touching, b) position indication during hovering, c) delete with touching.

© 2018 Information Processing Society of Japan

図 17　ドローイングアプリケーション：a) b) ホバリングによる移動を利用した N の描画，c) カラーパレットによる色選択，d) 曲線による S の描画

Fig. 17　Drawing application: a) b) drawing lines of N by using shift in position with hovering, c) color palette to change color, d) drawing S with a curve.

10.　今後の課題

評価実験 1 では，実験参加者に指が面に対して垂直になるよう注意した．この結果，複数の実験参加者から指の姿勢が辛い，肩が疲れるというコメントがあった．このため，指の姿勢にロバストな手法が必要であると考えられる．具体的には，信号強度データをセンサの上下段で取得しており，姿勢が変化した際には信号強度データの分布に反映されると考えられる．そのため，機械学習に基づく姿勢推定を同時に実行し，位置推定に姿勢を反映させることで，指の姿勢にロバストになり，疲労を軽減できると考えられる．

また，今回の指位置推定精度の性能評価実験では，実験参加者には左手を机に置いた状態で指示を行ってもらった．今後，左腕に支えがない立位や歩行状態で実用的なアプリケーションを操作する際の評価実験の実施を検討していく．なお，立位では，手首の姿勢が 2 次元的に変化するため，手の甲と後前腕部との相対姿勢が動的に変化する．この点については，本手法が機能する手首の傾きを認識することにより対処が可能であると考えられる．具体的には，本研究で用いた測距センサは，ビューが円錐状に広がっているため，信号強度データに手の甲が干渉する範囲がある．この干渉をあらかじめ取得しておくことで，手の甲の角度推定に利用できる可能性がある．

評価実験 2 の実験設計は，透明な 2 層の平面からなるトラックパッドのインタフェースのモデルが手首の角度に対してどれほど恒常的に位置推定および状態推定が可能かを評価する設計とした．一方で，ユーザが Novest を使ってディスプレイのある位置を指示したい場合には，手の甲の凹凸などを指標として利用することで手の傾きによらず，つねに同じ位置を指示する可能性がある．よって，ユーザのメンタルモデルを考慮した結果，傾きに応じて変化する指示位置を指示させたうえで位置推定および状態推定精度を求める実験設計も考えられる．これについては今後検証する計画である．

また，9 章で示したアプリケーションでは，スマートウォッチのディスプレイを使用したものに限ったが，本手法を [3], [7] のような投影システムや文献 [43] のような投影安定化手法と組み合わせることにより，手の甲に直接装置を取り付けることなく，手の甲の広さを活かした操作を提供することが可能になると考えられる．

今回の測距センサアレイのセンサの行間隔は，5.1 節で述べたように 5 mm 間隔である．このとき，消費電力は最大 257 mW である．小型デバイスでは電源に強い制約があるため，今後センサの個数や配置方法などを考慮し，より少ないセンサ数で精度を高める方法を検討する必要がある．

また，今回，指示に使用する指を第 2 指の 1 本と限定したが，複数本での入力への対応も検討していく．

我々が提案する Novest は，スマートウォッチの側面とほぼ同等のサイズであり，皮膚に非接触の状態で検出可能領域内の指位置推定およびタッチングとホバリングの識別が可能である．よって，本システムをスマートグラスのテンプルに設置することにより，Serrano ら [44] が言及しているような従来法よりも効率的かつ社会的受容性の高い，頬のトラックパッド化への応用も可能であると考えられる．

11.　まとめ

手の甲上で指位置推定およびタッチングとホバリングを識別するシステム，Novest を示した．Novest は，スマートウォッチ側面に取り付けられた小型測距センサアレイにより得られる距離データおよび信号強度データから指位置推定およびタッチングとホバリングの識別を実現する．指示方法（指，丸棒）および被指示面（手の甲，平面）の組合せによる指位置推定精度およびタッチングとホバリングの識別精度を確認する性能評価実験を行った．結果，指位置推定精度は平均 4.2 mm（SD = 1.2 mm）と，高精度に推定可能であることを示した．また，タッチングとホバリングの状態識別精度はフィードバックがない状態で，general classifier で平均 89.8%，外れ値を除いた per-user classifier では平均 94.2%の認識率であった．

© 2018 Information Processing Society of Japan

参考文献

[1] Zhang, Y., Zhou, J., Laput, G., et al.: SkinTrack: Using the Body as an Electrical Waveguide for Continuous Finger Tracking on the Skin, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1491–1503, ACM (2016).

[2] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.453–462, ACM (2010).

[3] Harrison, C., Benko, H. and Wilson, A.D.: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.441–450, ACM (2011).

[4] Harrison, C. and Hudson, S.E.: Abracadabra: Wireless, High-Precision, and Unpowered Finger Input for Very Small Mobile Devices, *Proc. 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.121–124, ACM (2009).

[5] Butler, A., Izadi, S. and Hodges, S.: SideSight: Multi-touch Interaction Around Small Devices, *Proc. 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.201–204, ACM (2008).

[6] Nandakumar, R., Iyer, V., Tan, D., et al.: FingerIO: Using Active Sonar for Fine-Grained Finger Tracking, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1515–1525, ACM (2016).

[7] Laput, G., Xiao, R., Chen, X.A., et al.: Skin Buttons: Cheap, Small, Low-Powered and Clickable Fixed-Icon Laser Projectors, *Proc. 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.389–394, ACM (2014).

[8] Yamamoto, G. and Sato, K.: PALMbit: A Body Interface Utilizing Light Projection onto Palms, *Inst. Image Information and Television Engineers*, Vol.61, No.6, pp.797–804 (2007).

[9] Dezfuli, N., Ljalilbeigi, M., Huber, J., et al.: PalmRC: Imaginary Palm-based Remote Control for Eyes-free Television Interaction, *Proc. 10th European Conference on Interactive TV and Video*, pp.27–34, ACM (2012).

[10] Nakatsuma, K., Makino, Y. and Maeno, T.: Touch Interface on Back of the Hand, *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, p.19, ACM (2011).

[11] Ogata, M., Sugiura, Y., Makino, Y., et al.: SenSkin: Adapting Skin as a Soft Interface, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.539–544, ACM (2013).

[12] Mujibiya, A., Cao, X., Tan, D.S., et al.: The Sound of Touch: On-body Touch and Gesture Sensing Based on Transdermal Ultrasound Propagation, *Proc. 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp.189–198, ACM (2013).

[13] Zhang, C., Bedri, A., Reyes, G., et al.: TapSkin: Recognizing On-Skin Input for Smartwatches, *Proc. 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces*, pp.13–22, ACM (2016).

[14] Liang, R.H., Lin, S.Y., Su, C.H., et al.: SonarWatch: Appropriating the Forearm as a Slider Bar, *SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies*, p.5, ACM (2001).

[15] Weigel, M., Nittala, A.S., Olwal, A., et al.: SkinMarks: Enabling Interactions on Body Landmarks Using Conformal Skin Electronics, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3095–3105, ACM (2017).

[16] Matthies, D.J.C., Perrault, S.T., Urban, B., et al.: Botential: Localizing On-Body Gestures by Measuring Electrical Signatures on the Human Skin, *Proc. 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp.207–216, ACM (2015).

[17] Lissermann, R., Huber, J., Hadjakos, A., et al.: EarPut: Augmenting Ear-worn Devices for Ear-based Interaction, *Proc. 26th Australian Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures: The Future of Design*, pp.300–307, ACM (2014)

[18] Chan, L., Liang, R.H., Tsai, M., et al.: FingerPad: Private and Subtle Interaction Using Fingertips, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.255–260, ACM (2013).

[19] Ketabdar, H., Roshandel, M. and Yüksel, K.A.: Towards Using Embedded Magnetic Field Sensor for Around Mobile Device 3D Interaction, *Proc. 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp.153–156, ACM (2010)

[20] Zhao, C., Chen, K.Y., Aumi, M.T.I., et al.: SideSwipe: Detecting In-air Gestures Around Mobile Devices Using Actual GSM Signals, *Proc. 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.527–534, ACM (2014).

[21] Zhou, J., Zhang, Y., Laput, G., et al.: AuraSense: Enabling Expressive Around-Smartwatch Interactions with Electric Field Sensing, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.81–86, ACM (2016).

[22] Goc, M.L., Taylor, S., Izadi, S., et al.: A low-cost Transparent Electric Field Sensor for 3D Interaction on Mobile Devices, *Proc. 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3167–3170, ACM (2014).

[23] Lien, J., Gillian, N., Karagozler, M., et al.: Soli: Ubiquitous Gesture Sensing with Millimeter Wave Radar, *ACM Trans. on Graphics* (*TOG*), Vol.35, No.4, p.142 (2016).

[24] Withana, A., Peiris, R., Samarasekara, N., et al.: zSense: Enabling Shallow Depth Gesture Recognition for Greater Input Expressivity on Smart Wearables, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3661–3670, ACM (2015)

[25] Wang, W., Liu, A.X. and Sun, K.: Device-Free Gesture Tracking Using Acoustic Signals, *Proc. 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.82–94, ACM (2016).

[26] Wen, E., Seah, W., Ng, B., et al.: UbiTouch: Ubiquitous Smartphone Touchpads using Built-in Proximity and Ambient Light Sensors, *Proc. 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.286–297, ACM (2016).

[27] Wang, J., Zhao, K., Zhang, X., et al.: Ubiquitous Keyboard for Small Mobile Devices: Harnessing Multipath Fading for Fine-Grained Keystroke Localization, *Proc. 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.14–27, ACM (2014).

[28] Zhang, C., Tabor, J., Zhang, J., et al.: Extending Mobile Interaction Through Near-Field Visible Light Sensing, *Proc. 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.345–357, ACM (2015).

[29] Liu, S. and Guimbretiere, F.: FlexAura: A Flexible Near-Surface Range Sensor, *Proc. 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.327–330, ACM (2012).

© 2018 Information Processing Society of Japan

[30] Kim, J., He, J., Lyons, K., et al.: The Gesture Watch: A Wireless Contact-Free Gesture based Wrist Interface, *2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp.15–22, IEEE (2007).

[31] Kratz, S. and Rohs, M.: HoverFlow: Expanding the Design Space of Around-Device Interaction, *Proc. 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, p.4, ACM (2009).

[32] Sridhar, S., Markussen, A., Oulasvirta, A., et al.: WatchSense: On-and Above-Skin Input Sensing through a Wearable Depth Sensor, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3891–3902, ACM (2017).

[33] Wigdor, D., Forlines, C., Baudisch, P., et al.: Lucid Touch: A See-Through Mobile Device, *Proc. 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.269–278, ACM (2007).

[34] Baudisch, P. and Chu, G.: Back-of-Device Interaction Allows Creating Very Small Touch Devices, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1923–1932, ACM (2009).

[35] Moeller, J. and Kerne, A.: ZeroTouch: An Optical Multi-Touch and Free-Air Interaction Architecture, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2165–2174, ACM (2012).

[36] Wang, J., Vasisht, D. and Katabi, D.: RF-IDraw: Virtual Touch Screen in the Air Using RF Signals, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.44, No.4, pp.235–246 (2015).

[37] Kao, H.L.C., Dementyev, K.A., Paradiso, J.A., et al.: NailO: Fingernails as an Input Surface, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3015–3018, ACM (2015).

[38] Chen, K.Y., Lyons, K., White, S., et al.: uTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.237–244, ACM (2013).

[39] 独立行政法人産業技術総合研究所：AIST 人体寸法・形状データベース，独立行政法人産業技術研究所（オンライン），入手先 ⟨https://www.dh.aist.go.jp/database/hand/⟩（参照 2017-06-07）．

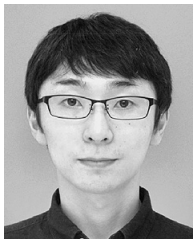
[40] ソニーモバイルコミュニケーションズ株式会社：Smart Watch 3 SWR50，ソニーモバイルコミュニケーションズ株式会社（オンライン），入手先 ⟨http://www.sonymobile.co.jp/product/smartproducts/swr50/⟩（参照 2017-06-07）．

[41] Chang, C.C. and Lin, C.J.: LIBSVM: A Library for Support Vector Machines, *ACM Trans. Intelligent Systems and Technology*, Vol.2, No.3, pp.27:1–27:27 (2011).

[42] Holz, C. and Baudisch, P.: The Generalized Perceived Input Point Model and How to Double Touch Accuracy by Extracting Fingerprints, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.581–590, ACM (2010).

[43] Konishi, T., Tajimi, K., Sakata, N., et al.: Projection stabilizing method for palm-top display with wearable projector, *ISWC 2009: Proc. 13th International Symposium on Wearable Computers*, pp.13–20 (2009).

[44] Serrano, M., Ens, B. and Irani, P.: Exploring the Use of Hand-To-Face Input for Interacting with Head-Worn Displays, *Proc. 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3181–3190, ACM (2014).



石川 優 （学生会員）

2015 年筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程修了．同年より博士後期課程に在学中．ヒューマンインタフェースやバーチャルリアリティに関する研究に従事．

志築 文太郎 （正会員）

1994 年東京工業大学理学部情報学科卒業．2000 年同大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学．博士（理学）．現在，筑波大学大学院システム情報系准教授．ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ．日本ソフトウェア科学会，ACM，IEEE Computer Society，電子情報通信学会，ヒューマンインタフェース学会各会員．

星野 准一 （正会員）

筑波大学システム情報系准教授．博士（情報科学），博士（デザイン学）．エンタテインメントコンピューティングの研究に従事．IEEE，ACM 各会員．

© 2018 Information Processing Society of Japan