

# 手の甲上の離散的なインタフェースの利用を想定した ポインティング特性調査

石川 優<sup>1,a)</sup> 志築 文太郎<sup>2,b)</sup> 星野 准<sup>—2,c)</sup>

受付日 2018年4月20日, 採録日 2018年11月7日

**概要:** 手の甲は通常露出している, ジェスチャ入力が容易かつ快適に行えるなど, 入力領域として適した特徴を有しており, Around Device Interaction のための入力領域として利用する手法が提案されている. 本研究は, 手の甲を入力領域とする入力インタフェースの開発の基準となる Design Implications を示すため, 手の甲が目視できる状態 (Sighted) およびできない状態 (Unsighted) の両状態を対象としたポインティング実験を行った. 本実験では, 手の甲上を 9, 16, 25 カ所に分割した場合を対象に, ユーザの手の甲上におけるポインティング特性 (分割数および指示精度) を調査した. その結果, 指示精度および位置決めまでに要する時間 (調整時間) は手の甲の分割数が増加しても有意差はないが, Sighted においては 25 分割, Unsighted においては 16 分割以上で隣接するボタンどうしを混同する割合が有意に高くなることを確認した. また, すべての分割数において Unsighted の場合, Sighted よりも指示精度は有意に低下し, 調整時間は有意に長くなることを確認した. 本実験から得られた Design Implications は今後, 手の甲を入力領域とする入力インタフェース開発の共通の知見としての利用が期待され, より良いインタフェースデザインの開発に貢献すると考えられる.

**キーワード:** around device interaction, eyes-free インタラクション, ポインティング特性, 離散的インタフェース, スマートウォッチ

## Investigation of Pointing Characteristics using the Back of the Hand as an Input Area for a Discrete Interface

YU ISHIKAWA<sup>1,a)</sup> BUNTAROU SHIZUKI<sup>2,b)</sup> JUNICHI HOSHINO<sup>2,c)</sup>

Received: April 20, 2018, Accepted: November 7, 2018

**Abstract:** The back of the hand (BoH) is used as an input area for Around Device Interaction because it has some merits: it is usually exposed, and gestures here is perceived ease and comfort of use. This paper presents the design implications based on the result of a user study to investigate the relationships between the pointing accuracy and number of partitions of BoH. The number of partitions was 9, 16 and 25. We conducted the user study in Sighted and Unsighted conditions; in Sighted condition, participants could see their finger pointing to their BoH; in Unsighted, they could not. The result of the user study, although the number of partitions increased, the pointing accuracy and the time to point did not change significantly. However, in the case of 25 partitions in Sighted condition and 16 partitions in Unsighted condition, the percentages confusing partitions arranged next to each other increased significantly. From these results, we extracted 5 design implications that would contribute to researchers or designers who intend to develop an input interface using the BoH.

**Keywords:** around device interaction, eyes-free interaction, pointing characteristic, discrete interface, smart-watch

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 筑波大学システム情報系  
Faculty of Engineering, Information and System, University  
of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

a) [ishikawa.yu@entcomp.esys.tsukuba.ac.jp](mailto:ishikawa.yu@entcomp.esys.tsukuba.ac.jp)

b) [shizuki@cs.tsukuba.ac.jp](mailto:shizuki@cs.tsukuba.ac.jp)

c) [jhoshino@esys.tsukuba.ac.jp](mailto:jhoshino@esys.tsukuba.ac.jp)

## 1. はじめに

広い面を持ち、すぐに触れられる体表面はスマートウォッチのようなウェアラブルデバイスの入力領域を拡張する Around Device Interaction [1] の入力領域としての利用が注目されている。たとえば、手のひら [2] や前腕 [3]、手の甲 [4], [5], [6], [7], [8] を利用した入力手法が提案されている。

体表面のうち、手の甲にはウェアラブルデバイスの入力領域として適した特徴がある。右山人差し指で体表面を入力領域として用いる場合、手のひらと同程度に好まれる位置とされている [9]。また、ジェスチャの入力領域として利用する場合には、ジェスチャが容易かつ快適に行える位置として前腕の次点であり [10]、手のひらと異なり手を握っている場合（たとえば、バッグを持っている場合や自動車のハンドルを握っている場合など）にもう一方の手で触れられる。さらに、体表面に共通した特徴として、触覚フィードバックと自己受容感覚があり、eyes-free 入力への利用可能性がある。

手の甲を入力領域とした応用例として手の甲を目視する状態 (Sighted) と目視しない状態 (Un sighted) の2状態としての応用が考えられる。Sighted でウェアラブルデバイス上のメッセージアプリケーションを使う場合、タッチディスプレイの大部分をキーボードやメッセージが占め、スタンプや予測変換候補を表示するスペースはほとんど残されていない。手の甲を入力領域として使うことにより、テキストメッセージの上に半透明でオーバーレイ表示されたスタンプや、指では選択が難しい小さなサイズの予測変換候補を容易に選択できると考えられる。Un sighted の場合、大型ディスプレイに対して手の甲をリモコンのように扱うメニュー選択アプリケーションの利用が考えられる。手の甲を入力領域とすることで操作時に画面から目を離さず、かつ、手を下げた状態で手の甲上でメニューの選択ができると考えられる。

しかし、これまで手の甲を入力領域とする入力インタフェース利用時におけるユーザビリティやシステムの性能評価は行われてきたが、ユーザが手の甲上においてどの程度の分割数をどの程度の精度でポインティングできるか (ポインティング特性) については調査されていない。ポインティング特性に関する知見が得られれば、手の甲上においてどの位置にどの程度のサイズでボタンのような離散的なインタフェースを配置すべきかの指針が得られるため、手の甲を入力領域として効果的に利用する入力インタフェースの開発につながると考えられる。

そこで本研究では、今後の手の甲を入力領域として利用する入力インタフェース開発のための Design Implications を示すことを目的として、手の甲を離散的なインタフェースの入力領域とする場合を想定したポインティング特性調

査を行った。なお、eyes-free 入力への応用も考慮して、手の甲を目視できる状態 (Sighted) および目視できない状態 (Un sighted) を対象とした。

本稿では、まず、右山人差し指で左手の甲に仮想的に配置された離散的な指示位置をポインティングするタスクを対象とした予備実験を実施した。予備実験の結果から、手の甲上でのポインティングに関して想定される仮説を立て、本実験の実験結果と照らし合わせることにより仮説検証を行った。そして、手の甲を入力領域とした入力インタフェースの開発の際に必要な Design Implications とその適用方法を示す。最後にアプリケーションと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

本章では、まず手の甲を入力領域として利用する入力インタフェースとタッチベースな eyes-free 入力インタフェースについて述べたのち、ポインティング動作に関する人間工学的知見について述べる。最後に、本研究の位置づけについて述べる。

### 2.1 手の甲を利用したインタフェース

Nakatsuma らの手法 [11] は、フォトリフレクタを用いて手の甲上における指位置推定を実現している。Skin-Track [4] は交流信号を発するリング型送信機とリストバンド型受信機を、Novest [8] はスマートウォッチ側面に取り付けられた測距センサを用いて指位推定およびタッチングとホバリングの識別を実現している。AuraSense [12] は、複数のアンテナ配置により作り出される静電場を利用して、手の甲を含むスマートウォッチ周辺領域において1次元入力やジェスチャ入力など多様な入力様式を実現している。WatchSense [7] は、前腕に取り付けられた深度カメラを用いた指位置推定手法により手の甲およびその上方に位置する複数の指を同時に利用したインタラクション手法を提案している。TapSkin [5] は、手の甲と手首付近の前腕において、スマートウォッチに内蔵された慣性力センサとマイクロフォンを用いてタップ位置を推定している。

また、シリコンベースの素材 [13] やタトゥーシール [14] を利用した薄型の静電容量センサや、静電容量センサと抵抗式タッチセンサを組み合わせたセンサ [15] は手の甲やその他の体表面上でタッチ検出や離散的な入力を可能にしている。

### 2.2 タッチベースな eyes-free 入力インタフェース

体表面の触覚フィードバックを利用した eyes-free 入力インタフェースが提案されている。EarPut [16] は静電容量センサを利用して耳をインタフェース化している。PalmGesture [2] は手首部分に取り付けられた赤外線レーザと小型カメラ、PlamRC [17] は部屋に設置された深度カ

メラ, DigiTap [18] は加速度センサと小型カメラ, LED を用いて手のひらで連続的 [16], [17], 離散的 [18] な入力を実現している。

Huang らは, thumb-and-fingers interface において離散・連続の両入力様式での親指の可動範囲のうち快適に触れられる部位や, 離散・連続の両入力様式の入力精度に関する調査を行い, その結果をふまえた DigitSpace [19] を提案している。DigitSpace は, ホールセンサアレイと永久磁石を利用しており, FingerPad [20] も同様の原理を利用している。PinchWatch [21] では, リストバンド型デバイスと胸部に設置されたカメラにより親指と手のひらによる片手入力手法が提案されている。

Lin らは前腕におけるポインティング特性を調査し, その結果に基づき超音波センサを利用した PUB [3] を提案している。Hamdan ら [22] は, ランナーのための eyes-free 入力インタフェースの設計を目的として, 胴および両腕上においてどの箇所でもどの程度の精度でタップ入力が可能かを調査した。Vo ら [23] は胴においてユーザがどのようにジェスチャを行うかを eyes-free 入力を前提として調査した。Harrison ら [24] は, 前腕や手のひらなどをタップした際に生じる機械的な振動を利用して, タップ位置を推定し, 離散的な入力インタフェースを実現している。Oh らは盲目のユーザを対象として体表面上のインタラクションデザインと好みの調査を行った [9]。

体表面以外を使った手法も提案されている。Virtual Shelves [25] は, 空間知覚と運動記憶に基づくアプリケーションのショートカット手法である。earPod [26] は, 円形型のタッチパッド上で指をスライドさせた際に音声フィードバックを行うことでメニュー選択を実現している。KITTY [27] は, 両手に装着するグローブ型のテキスト入力用 eyes-free 入力インタフェースで, 指の各部位に設置されたタッチセンサを利用している。No-look Flick [28] は, スマートフォンのタッチディスプレイを使って親指でかな入力を行う場合のボタンサイズとポインティング精度の関係性を調査している。

また, eyes-free 入力は本質的に盲目のユーザのためにデザインされたインタフェースと視覚情報を必要としない点で同じであるため, これらについても述べる。McGookin ら [29] は, タッチスクリーンの MP3 プレイヤを対象に, ジェスチャとコントロールパネルの両入力を利用する手法の調査を実施した。SlideRule [30] や Access Overlays [31], No-Look Notes [32], Brailletouch [33], TypeInBraille [34], VoiceOver [35] は, マルチタッチやジェスチャ入力と音声フィードバックにより, 触覚フィードバックの乏しいタッチパネルでのインタラクションを実現している。Mobile Lorm Glove [36] は, 盲ろうのユーザのための 35 個の繊維タイプの圧力センサと 32 個の振動モータからなるテキスト入力用グローブ型インタフェースである。

## 2.3 ポインティングに関する人間工学的知見

タッチパネル上におけるタッチパフォーマンス評価が行われている。Colle ら [37] は 12.1 インチのタッチパネル, Hara ら [38] はスマートウォッチに対する人差し指によるポインティングのパフォーマンス評価を行った。また, スマートフォンのようなモバイルデバイスのボタンサイズやスペースを対象にした親指によるポインティングのパフォーマンス評価も行われている [39], [40], [41]。Goncalves ら [42] は, 低温度下におけるスマートフォンへの入力パフォーマンス評価を行った。

また, 皮膚感覚や自己受容感覚に関するパフォーマンス評価が行われている。Voisin ら [43] らは, 物体形状の推定タスクにおいて皮膚感覚と自己受容感覚が同時に機能して相乗的に推定の精度が向上することを確認した。一方, 自己受容感覚のみを利用する場合の指先位置の認識誤差は, 平均 8 cm であることを示した [44]。

また, Bolanowski ら [45] は, 能動的に環境の物体に触れる active-touch [46], 受動的に触れられる passive-touch, 人体に触れる intra-touch (active-touch かつ passive-touch の動作) を対象に, 皮膚上における物体の大きさの認識に関する実験を行った。結果, passive-touch 側の部位が前腕のような有毛な部位 (皮膚) 上の場合では, 認識精度が低下することを確認した。

Gustafson ら [47] は, 手のひらと人差し指を使ってデバイスによる視覚的情報の提示およびフィードバックを利用しない Imaginary Interfaces のコンセプトのもとで Imaginary Phone のコンセプトを提唱している。そこで, 左手を基準として空間を入力領域とする場合と手のひらを入力領域とする場合を対象に, 指定された位置へのポインティングの精度評価を行った。そして, 精度は, 空間を入力領域とする場合よりも手のひらを入力領域とする場合の方が有意に高くとなることが確認されている。

## 2.4 本研究の位置づけ

手の甲やその他の体表面を入力領域として利用する入力インタフェースでは指位置推定精度が評価されている [4], [7], [8], [19]。たとえば, SkinTrack [4] では手の甲を含む 4 か所の体表面上において 15 mm と 30 mm 間隔のグリッド状に並んだ十字マークを指示させた際の指位置推定精度を示している。しかし, 手の甲にマーカを設置しない場合や Unsighted でポインティングを行う場合の調査は行われていない。

そこで本研究は, 手の甲を目視できる状態 (Sighted) とできない状態 (Unsighted) の両状態において, 複数の分割数を対象に実験を実施して手の甲を入力領域として利用する入力インタフェース開発のための Design Implications を示す。このために手の甲にマーカを設置せず, かつ, 特定のセンシング方法を前提せずにポインティング特性を調

査する実験を行った。この実験の結果に基づいて手の甲を離散的なインタフェースの入力領域として利用する場合に考慮すべきボタンのサイズと配置方法について述べる。本研究が示す Design Implications は、今後の手の甲を入力領域とする入力インタフェースや入力インタフェースのためのセンシング手法の設計および開発に貢献する。

### 3. ポインティング特性調査実験

本章では、ポインティング特性の調査を目的とした実験について述べる。本実験では、右手人差し指を用いて左手の甲上の離散的なインタフェースを使う場合を想定してポインティング特性を調査した。実験中の実験参加者の状態は、手の甲が目視できる状態 (Sighted) と目視できない状態 (Un sighted) の 2 状態を対象とした。なお、条件を統制するため、本実験の実験参加者は全員右利きとした。

#### 3.1 セットアップ

実験環境を図 1 に示す。計測対象はポインティング位置と調整時間である。Un sighted では、実験参加者の首周りに部分的な目隠しを装着することでポインティング対象である手の甲を目視できないようにした。

本実験では、PC (OS : Windows 10 Pro, CPU : Core i7-7560U@2.4GHz, RAM : 16 GB) 上の Processing で動作する評価用アプリケーションに従い、ポインティングを行ってもらった。アプリケーション画面を図 2 に示す。各点は指示位置を示し、赤い点は実験参加者にポインティングをしてもらう指示位置 (ポインティング目標) を示している。指示位置全体の提示は正方形で行う (図 2) が、実験参加者が手の甲上で選択する位置の特徴や工夫も調査するため、手の甲上の各指示位置は実験参加者自身が迅速かつ正確にポインティングできると考える位置に移動可能とした。

指示位置の移動のルールとして各指示位置の相対位置関係の入れ替えは禁止とした。可能な配置かどうかの判断がつかない場合には実験実施者に質問するよう指示をしたが、全実験参加者からこの点について質問はなかった。位置検討時間に制限は設けず、実験参加者が十分だと申告があった時点で終了とした。また、分割数ごとに実験参加者自身が決定した指示位置と同じ位置を、可能な限り指示するよう指示した。なお、本実験での正確とは記録されたポインティング位置を楕円で囲んだ際に、ある楕円に属するポインティング位置が他の楕円に含まれない割合を指標として、この割合が高いほど正確であると図で例示をしながら説明した。

ポインティング位置は、人差し指が手の甲に触れてからも調整可能とした。ただし、調整する際には Slide through [3] の方式に倣って肌に触れながら皮膚上をスライドさせるように指示をした。ポインティング位置の計測のため、

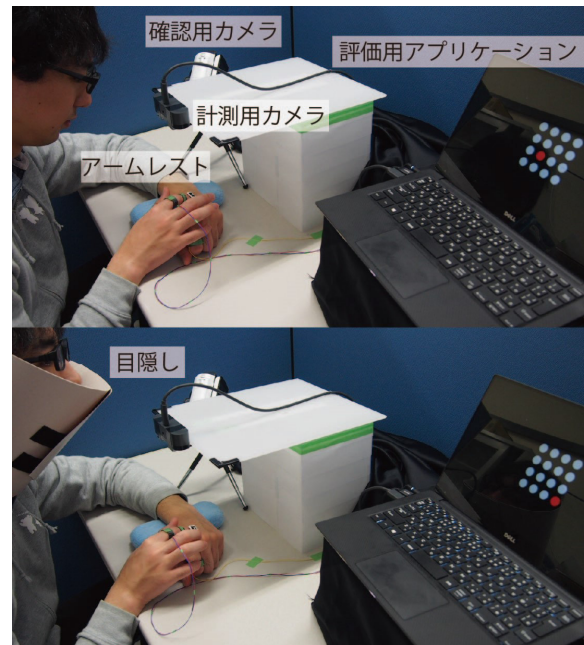


図 1 実験環境図。上) Sighted, 下) Un sighted (目隠しを装着)  
 Fig. 1 Experimental conditions, Left) Sighted, Right) Un sighted with a blindfold.

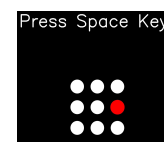


図 2 評価用アプリケーション画面 (9 分割の場合)  
 Fig. 2 Screen of evaluation application (the case of 9 partitions).

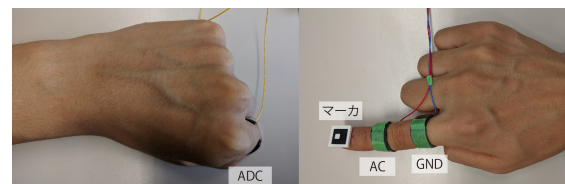


図 3 調整時間計測用端子および位置計測用マーカ。左) 左手の ADC 用端子, 右) 右手のマーカ, AC および GND 用端子  
 Fig. 3 Terminals for measurement of adjust time and a maker for position measurement. Left) a terminal for ADC on a participant's left hand, Right) an AR marker and terminals for AC emitter and GND on a participant's right hand.

12 mm 四方の亚克力製の AR マーカを実験参加者の人差し指に取り付けた (図 3)。また、実験参加者の左手の手の甲の上方に鉛直下向きに Logicool 社製 C1000e を設置し、720 p 90 fps によりマーカの位置 (ポインティング位置) の計測を行った。なお、マーカ位置計測精度は 2.3 mm (SD = 0.9 mm) である。

また、調整時間を計測するため、実験参加者の指に端子を取り付け、右手人差し指が左手の甲に触れる瞬間の検出を行った。端子として右手の人差し指に指先側から

2 MHz, 2 Vpp の交流信号およびグランド (図 3 右), 左手の人差し指には電圧計測用 (図 3 左) の銅箔を巻き付けた。電圧計測用の端子は, ピークホールド回路を通したのちに Arduino UNO の AD コンバータ (ADC) に接続している。Arduino により電圧を計測し, これを閾値処理することにより人差し指と手の甲の接触を検出した。閾値は実験参加者ごとに調整を行った。ポインティング位置の確定にはフットペダルを用いた。したがって, 調整時間は実験参加者の右手人差し指が左手の甲に触れてからフットペダルを踏む (位置決定) までの時間である。

左手は軽く握った状態で机に置き, アームレストを使って手の甲と机の面が平行になるよう調整してもらった。また, ポインティングタスク中には左手を動かさないように指示した。また, ポインティング対象の手の甲の領域は, 指側が MP 関節部分, 手首側が尺骨茎状突起部までとした。

本実験で対象とする分割数 (ここでは指示位置の数を指す) を決めるため, 右利きの大学生および大学院生 6 名 (男性 6 名, 平均年齢 23.2 歳 (SD = 1.8 歳), P1–P6) を対象に予備実験を実施した。予備実験では, 9 (3 × 3), 16 (4 × 4), 25 (5 × 5), 36 (6 × 6) 分割を対象とした。全指示位置の指示を 1 セットとして 6 セットを連続で実施した。指示位置の提示順序はランダムとした。分割数の実施順序は, 予備実験と本実験ともに少ない方から, 分割数ごとに Sighted, Unsighted の順に実施した。

予備実験において, P3 のみ疲労を訴えたため 36 分割は実施しなかった。また, P2 の Unsighted の 36 分割において左手を動かしていることをビデオにより確認した。したがって, 36 分割の Sighted, Unsighted のサンプルはそれぞれ 5 個, 4 個である。一例として Accuracy Rate が最も高かった P4 のポインティング位置とともに 95% 信頼楕円を描画した結果を図 4 に示す。また, 表 1 に予備実験の結果を示す。Sighted, Unsighted とともに 36 分割において 100% の Accuracy Rate を達成できた実験参加者がいなかった (本稿における Accuracy Rate の定義は 3.3 節で述べる)。したがって, 本実験では, 9, 16, 25 の 3 種類の分割数を対象とした。なお, 実施順序を分割数が少ない方からとした点は Lin ら [3] と同様に, 学習効果がある可能性があるが, 手の甲のポインティングにおいて実験参加者の限度を評価するという目的は達成できる。

本実験は, 右利きの大学生および大学院生 9 名 (女性 2 名, 平均年齢 23 歳 (SD = 1.7 歳), P7–P15) を対象に実施した。本実験の実験所要時間は 1 時間から 1 時間半で謝礼として 3,000 円を支払った。ただし, P14 のデータに関しては, 手の甲のポインティング対象範囲について誤解があったことをコメントにより確認したため除いた。なお, 本実験の構成は, 36 分割を行わない点以外は予備実験と同じであることから, 結果については予備実験と本実験で収集した両データを同等に扱った。

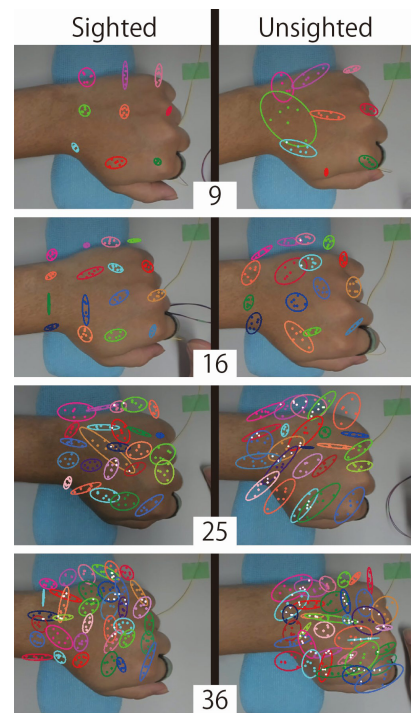


図 4 P4 の予備実験結果 (各点は保存されたポインティング位置, 各楕円は各指示位置の 95% 信頼楕円, 白い点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置)

Fig. 4 P4's results of preliminary experiment (Each point shows the saved pointing position, each ellipse shows 95% confidence ellipses on each pointing position and white points show the pointing positions included two or more ellipses).

表 1 予備実験結果

Table 1 Results of preliminary experiment.

		Accuracy Rate [%]	
		Sighted	Unsighted
分割数	9	99.7 ± 0.7	97.5 ± 3.3
	16	99.3 ± 1.0	94.6 ± 3.7
	25	91.2 ± 4.7	83.7 ± 7.5
	36	63.3 ± 21.6	53.8 ± 14.3

### 3.2 手続き

はじめに実験全体について説明したのち, タスクを実施し, 最後に簡単なインタビューを行った。タスクは, 分割数ごとに区切って行い, それぞれの分割数において指示位置の検討時間, Sighted, Unsighted の順に実施した。なお, この順序では慣れの影響があると考えられるが, 本実験の目的は Sighted および Unsighted 両条件のポインティング特性を調査することである。しかし, Sighted に比べて Unsighted の経験が少ないと考えられる。この不慣れさを緩和するため, Unsighted の練習を兼ねて Sighted を先に実施した。

1 回のポインティングの一連の流れは, 以下の 5 ステップからなる。1) 赤く示されたポインティング目標を確認してから右手でスペースキーを 1 度押す。2) 左手の甲上のポインティング目標を右手人差し指でポインティングす

る. 3) ポインティング目標をポインティングできたらフットペダルを踏む. 4) ビープ音が鳴るまで指を静止させる. 5) 次のポインティング目標が提示される.

実験参加者にはこの一連の流れを評価用アプリケーションが自動的に閉じるまで繰り返してもらった. 評価用アプリケーションは, フットペダルが踏まれたらポインティング位置の保存を開始する. そして, 保存が終了したのちビープ音を鳴らす. ポインティングは, ポインティング目標が更新されるたびにスペースキーを押す工程を入れた. この工程によりウェアラブルデバイスの実利用状況に近いパフォーマンスが得られると考えられる. なお, この点は Lin ら [3] の実験設計と同じである.

### 3.3 仮説

本実験では, 計測したポインティング位置の Accuracy Rate および指示精度, 調整時間を指標として評価する. なお, Accuracy Rate は, 本研究では 2 次元に配置された指示位置を実験参加者が位置調整可能な条件下で計測を行ったため, Lin ら [3] が用いた 1 次元におけるポインティング用の定義を 2 次元におけるポインティング用に再定義した. 本稿での Accuracy Rate の定義は各指示位置で保存されたポインティング位置を 95%信頼楕円で囲んだ場合に, ある指示位置で保存されたポインティング位置が他の指示位置の 95%信頼楕円に属さない点の割合とする. 指示精度は, 同一の指示位置に対して行われたポインティング位置に基づき導出した 95%信頼楕円の長軸として, 値が小さいほど指示精度が高いとする.

これらの指標に関して予備実験の結果から, Sighted, Unsighted それぞれに対して以下のように仮説を立てて検証を行う.

**Sighted** の場合:

**H1:** 分割数, 位置による調整時間および指示精度に差があるとはいえない.

**H2:** すべての実験参加者が 16 分割までは 95%以上の Accuracy Rate を維持できる.

H1 について, Sighted の場合には分割数によらず, 直接的にポインティング目標をポインティングできるため, 調整時間および指示精度に差は出ないと考えられる. H2 については, 予備実験の結果から 16 分割まではすべての実験参加者が隣接する指示位置を混同することなくポインティングできると考えられる.

**Unsighted** の場合:

**H3:** 分割数が増加すると調整時間が増加する.

**H4:** 分割数が増加すると Accuracy Rate は低下する.

**H5:** 手の甲の中央部に比べ, 周辺部の調整時間が短い.

**H6:** 手の甲の中央部に比べ, 周辺部の指示精度は高い.

**H7:** MP 関節部の Accuracy Rate は他の箇所比べて高い.

表 2 計測実験の結果

Table 2 Results of measurement experiment.

	Accuracy Rate [%]		
	9	16	25
Sighted	99.9 ± 0.5	99.2 ± 1.7	95.0 ± 5.1
Unsighted	98.2 ± 2.8	93.9 ± 9.2	81.8 ± 10.4

	指示精度 [mm]		
	9	16	25
Sighted	12.3 ± 5.8	14.4 ± 5.8	15.2 ± 6.8
Unsighted	20.9 ± 11.1	19.1 ± 8.7	20.6 ± 8.8

	調整時間 [ms]		
	9	16	25
Sighted	1228 ± 508	1084 ± 590	1180 ± 802
Unsighted	2013 ± 888	1916 ± 885	2016 ± 1063

**H8:** MP 関節部の指示精度は他の箇所比べて高い.

H3, H4 については, 分割数が増加すると他の指示位置との区別が困難になると考えられる. ポインティング位置に関する視覚的フィードバックがないため, ポインティング目標を直接的にポインティングできず, 手の甲に触れてからポインティング位置を調整する時間が必要となるため, 調整時間は増加して Accuracy Rate は低下すると考えられる. H5, H6 については, 手の甲の周辺部は隣接する指示位置が少なくポインティング位置を調整する方向が限定されるため, ポインティング位置の調整が手の甲の中心部の指示位置に対して比較的容易になり調整時間は短く, 指示精度は高いと考えられる. H7, H8 については, MP 関節の凹凸が触覚フィードバックのみでも位置の特定が容易な指標として利用できるため Accuracy Rate は他の箇所に比べて高くなり, 指示精度も高くなると考えられる.

**Sighted** と **Unsighted** との比較:

**H9:** 同分割数ですべての指標において **Unsighted** の場合よりも **Sighted** の場合の方が優れた結果となる.

H9 について, **Unsighted** の場合, 位置決定を容易にするための明確な触覚フィードバックが得られる部位は MP 関節および尺骨茎状突起部のみであると考えられる. 一方, **Sighted** の場合には触覚フィードバックに加え, 血管やあざ, 傷跡などの視覚的特徴も位置決定指標として有効に機能すると考えられる. さらに, 視覚的特徴により触覚フィードバックでは細かい位置把握が困難な指伸筋やその腱, 中手骨によるわずかな凹凸も有用な指標となると考えられる. したがって, **Sighted** の場合が **Unsighted** の場合に比べて位置決定に利用できる参照箇所が多いため, 優れた結果となると考えられる.

### 3.4 結果

実験参加者の各指標の平均および標準偏差を表 2 に示す. データの解析を行う前に, 保存されたデータ点と調整時間に対して有意水準 5%の Smirnov-Grabbs 検定を用いて外れ値を除外した. その結果, データ点での外れ値は Accuracy Rate 算出用データで 4.0% (336 個), 指示精

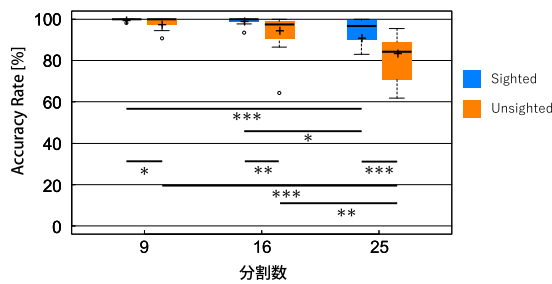


図 5 分割数ごとの Accuracy Rate の結果 (\*:  $p < .05$ , \*\*:  $p < .01$ , \*\*\*:  $p < .001$ )

Fig. 5 Result of Accuracy Rate in the case of each number of partition (\*:  $p < .05$ , \*\*:  $p < .01$ , \*\*\*:  $p < .001$ ).

度算出用データで 5.3% (444 個), 調整時間の外れ値は 7.2% (518 個) であった。なお, 位置の外れ値を抜いたのち, 調整時間の外れ値を除外した。Accuracy Rate の結果を図 5 に示す。また, 調整時間算出用データについては, P2, P3 のデータ収集時に誤りがあったため除外している。

本節では, 仮説に基づき分析を行った結果を示す。

### 3.4.1 Sighted の場合

9 分割で 1 名を除き, 実験参加者が 100% の Accuracy Rate を達成したが, 16, 25 分割においてはそれぞれ 10 名と 3 名のみであった。

H1 について, 分割数を独立変数, 指示精度を従属変数として一元配置分散分析を行った結果, 5% の有意水準で有意であり TukeyHSD による多重比較を行った結果, 9 分割と 25 分割の間に有意差があった ( $p < .05$ )。調整時間を従属変数とした場合の一元配置分散分析では有意差がなかった。また, 位置を独立変数, 調整時間を従属変数として Steel-Dwass 検定で対比較を行った結果, 5% の有意水準で有意ではなかった。同様に指示精度を従属変数とした場合にも有意差がなかった。したがって, 分割数および指示位置の違いによって調整時間, 指示精度に差はあるとはいえない。

H2 について, 分割数を独立変数, Accuracy Rate を従属変数として Steel-Dwass 検定にて 25 分割が 9, 16 分割に対して有意に低かった。また, Sighted かつ 16 分割の場合, 99% 以上の Accuracy Rate を達成できた実験参加者は 10 名であった。Sighted かつ 9 分割の場合には, P6 を除いたすべての実験参加者が 99% 以上の Accuracy Rate を達成した。なお, P6 は Sighted かつ 16 分割の場合において 100% の Accuracy Rate を達成していた。

### 3.4.2 Unsighted の場合

H3 は, 分割数を独立変数, 調整時間を従属変数として一元配置分散分析を行った結果, 5% の有意水準で有意差はなかった。

H4 から H8 については, すべて Steel-Dwass 検定により対比較を行った。この検定を用いた理由は Shapiro-Wilk 検定による 5% の有意水準で正規性が棄却されたためである。

H4 については, 分割数を独立変数, Accuracy Rate を従属変数とした場合, 9-25 分割間 ( $p < .001$ ), 16-25 分割間 ( $p < .01$ ) で有意であった。9-16 分割間では有意傾向 ( $p < .10$ ) であった。

H5 は, 指示位置を独立変数, 調整時間を従属変数として分割数ごとに, すべての分割数における指示位置間において 5% の有意水準で有意差がなかった。

H6, H8 は, 指示位置を独立変数, 指示精度を従属変数とした場合, 9 分割での 1 対の指示位置を除き, すべての分割数における指示位置間において 5% の有意水準で有意ではなかった。9 分割の場合, 図 2 で右上の位置と上段の中央の点が 5% 有意水準で有意に指示精度が高かった。

H7 は, 指示位置を独立変数, Accuracy Rate を従属変数として, すべての分割数における指示位置間において 5% の有意水準で有意ではなかった。

### 3.4.3 Sighted と Unsighted の比較

H9 について Sighted の 9 分割において P10 の Accuracy Rate が外れ値となったことから, 9 分割においては P10 のデータを抜いて検定を行った。

Accuracy Rate においては 5% の有意水準で正規性が棄却されたため Wilcoxon の符号付き順位検定を, 指示精度および調整時間においては対応の t 検定を行った。結果, Accuracy Rate においては 9 分割 ( $p < .05$ ) のみ有意傾向, 16 分割 ( $p < .01$ ), 25 分割 ( $p < .001$ ) では有意に Unsighted の方が低かった。指示精度においては 9 分割 ( $p < .001$ ), 16 分割 ( $p < .01$ ), 25 分割 ( $p < .001$ ) とすべての分割数で有意に Unsighted の方が低かった。調整時間においても, 9 分割 ( $p < .01$ ), 16 分割 ( $p < .001$ ), 25 分割 ( $p < .001$ ) とすべての分割数で有意に Unsighted の方が長かった。

### 3.4.4 インタビュー

全実験終了後に, 可能な限り迅速かつ正確にポインティングを行うために工夫したこと, 特に意識したこと, そのほか思ったこと, 感じたことを尋ねた。

Sighted については, すべての実験参加者から特に工夫なく各指示位置を混同することなく指示できたというコメントを得た。

Unsighted については, 9 分割はすべての実験参加者から容易に指示できた, 特別な意識をすることなくできたというコメントを得た。すべての実験参加者が 16 分割から意識的に工夫をしていたことが分かった。特に 16 分割では指示位置が 4 行から構成されているため, 1 名を除き, 4 指の指伸筋の腱や中手骨の凹凸の把握が容易なため, MP 関節を基準に指をスライドさせるという方法であった。25 分割についてはすべての実験実施者が難しいと感じており, その理由は主に 5 行の位置と 4 本の指伸筋の腱や中手骨との対応がとれなくなるからであった。この点に対して多くの実験参加者がいずれかの指伸筋の腱を上下に分割し

て利用するという手段をとっていた。なかには 25 分割は奇数であり中央部があり、中央は容易に把握できたという認識から、MP 関節や形状突起部のような領域の縁と中央の中間点と考えた実験参加者や、手の甲に直交座標系をイメージして指示位置に最寄りの手の甲の 4 隅から隣接する指示位置を 1 つずつジグザグにスライドしてたどった実験参加者もいた。

### 3.5 考察

Sighted, Unseen ともに分割数が増加しても指示精度や調整時間は変化があるとはいえないが、Accuracy Rate は 25 分割が他の分割数に対して有意に低いことが分かった。したがって、分割数が増加しても実験参加者はほぼ同じ位置を同程度の精度で繰り返し指示できていて同程度の所要時間で位置決定を行っているが、隣り合わせの指示位置を明確に区別できていないと考えられる。また、手の甲の場合においては前腕の場合 [3] と異なり、手の甲上の指示位置間で指示精度、調整時間、Accuracy Rate に有意な差があるとはいえない結果となった。

Sighted の場合、16 分割まで Accuracy Rate の低下が有意ではなかったことから、16 分割が機能と効率を両立させていると考えられる。また、16 分割での 95%信頼楕円を観察すると MP 関節を端として指伸筋の腱および中手骨の位置に沿うようにポインティングが行われていることが確認できた。このことから、16 分割では工夫というまでの特別な意識はせずに、視覚的かつ触覚的にフィードバックが得られる部位を好んでポインティングを行ったと考えられる。しかし、指先方向の位置に関しては個人差があり、指示する位置について指導するか、実験参加者ごとにキャリブレーションを行う必要があると考えられる。

Unseen の場合、Accuracy Rate が低下している (9–16 分割数間のみ有意傾向) ことから 9 分割が機能と効率を両立する分割数であるとされる。

インタビューにおいて、16 分割においては Sighted で観察されたような指伸筋の腱や中手骨を利用したことを確認した。しかし、Unseen かつ 16 分割の場合の Accuracy Rate が 9 分割と比較して低下した (有意傾向があった) ことからポインティング位置に関する視覚的フィードバックが正確な位置決めに必要な役割を果たしていると考えられる。

Sighted と Unseen の比較では、今回対象としたすべての指標において Sighted が Unseen よりも優れる結果となった。したがって、手の甲上でのポインティングは 9 分割の場合のみ Accuracy Rate が有意傾向ではあったものの、ポインティング位置に関する視覚的フィードバックがポインティングのパフォーマンスを向上させることが確認できた。

さらに、利用可能な最小のボタンサイズを検討するため、

Holz ら [48] の方法を参考に円形のボタンサイズを算出した。なお、本研究では 95%信頼楕円の長軸 (指示精度) を直径とする円形ボタンのサイズを用いた。本研究ではマーカなどにより手の甲上の指示位置を定めなかったことから特定の点を基準とした場合と比べて、ボタンサイズが大きく算出されている可能性があることに留意されたい。

結果として、Sighted の場合で利用可能な最小のボタンサイズは、9, 16, 25 分割でそれぞれ 12.3 mm (SD = 5.8), 14.4 mm (SD = 5.8), 15.2 mm (SD = 6.8) であり、Unseen の場合では、それぞれ 20.9 mm (SD = 11.1), 19.1 mm (SD = 8.7), 20.6 mm (SD = 8.8) であった。Gustafson ら [47] の場合、empty space interface で 27.9 mm (SD = 0.32), palm interface で 17.7 mm (SD = 0.22) である。

Sighted と Unseen ともにボタンの平均サイズは、empty space interface に対して小さい。このことから手の甲をポインティング対象とする場合の方が空中をポインティング対象とする場合に比べて同じ位置を繰り返しポインティングできると考えられる。一方、palm interface と比較すると Sighted の場合、平均は小さいが標準偏差は大きく、Unseen の場合、平均と標準偏差ともに大きい。標準偏差が大きくなった原因は 2 点考えられる。1 点目は、手の甲は手のひらに比べて皺のようなポインティング位置決定に有用な視覚的特徴や特徴的な触覚フィードバックを提供する部位が少ない点である。ポインティング位置決定に用いられる参照箇所の少なさが、位置決定の曖昧さにつながったことが原因と考えられる。2 点目は、手のひらが手の甲よりもポインティング位置決定に有用な触覚フィードバックを提供している点である。なお、手のひら上のポインティングでは、Gustafson ら [47] により位置決定に手のひらの触覚フィードバックの重要性が確認されている。

## 4. Design Implications

実験結果から、手の甲を入力領域とした入力インタフェースを設計する場合に考慮すべき項目を示す。なお、これらの知見は、ポインティングの際に Slide through 方式を適用した場合の知見である。

**D1:** 視覚情報の有無により機能と効率を両立する分割数が異なる。

Accuracy Rate の観点から視覚情報の有無により機能と効率を両立させる分割数が異なる。Sighted の場合は 16 分割、Unseen の場合は 9 分割が推奨される。ただし、Unseen の場合において入力誤りが許容される用途の場合には 16 分割の適用が考えられる。

**D2:** 視覚情報の有無により位置決定に要する時間が異なる。

Sighted の場合は、Unseen の場合に比べて調整時間が有意に短いことから Sighted のみを想定している場合と



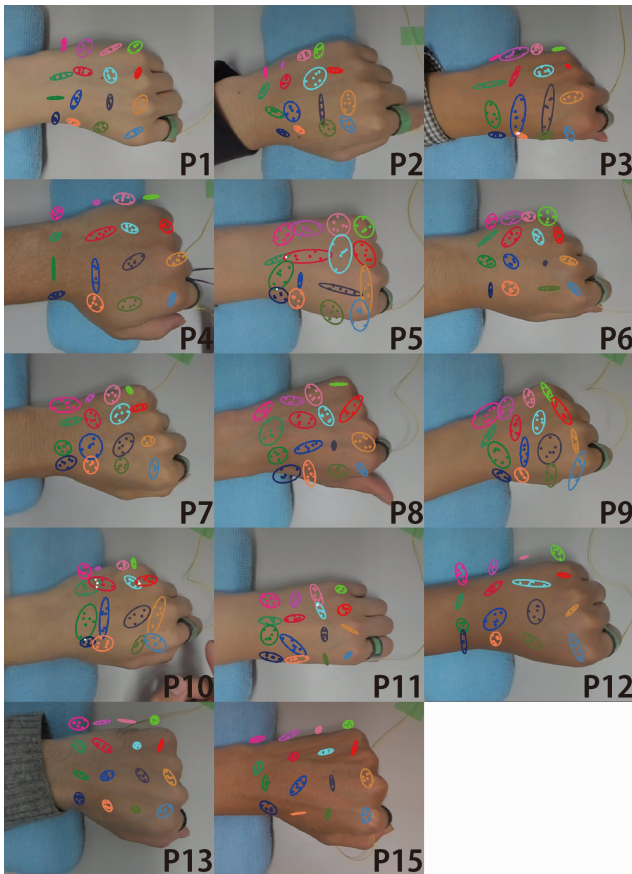


図 6 Sighted かつ 16 分割におけるポインティング位置と 95%信頼楕円

Fig. 6 Pointing positions and 95% ellipses in sighted condition and 16 partitions.

Un sighted も含んだアプリケーションの場合には位置決定までに要する時間の閾値の調整が必要となる。

**D3** : 位置に関するインストラクションやキャリブレーションが必要。

すべての分割数, 特に 16 分割以外の場合においては, ポインティング位置の厳密な指定とインストラクションが必要になる。もしくは, 実験参加者の個性に合わせたボタンの位置調整 (キャリブレーション) が必要となる。

**D4** : 高精度に利用可能な分割数には個人差がある。

Sighted の場合では, 16 分割まで 1 名を除き, すべての実験参加者が 100% の Accuracy Rate を達成でき, 25 分割でも 100% を達成できる実験参加者は 3 名いた。Un sighted の場合では, 9 分割の場合でも 100% の Accuracy Rate を達成できた実験参加者はほぼ半数であり, 16 分割の場合でも 100% の Accuracy Rate を達成できる実験参加者は 3 名いた。したがって, 工夫の違いや手の甲の凹凸の付き方にも依存すると考えられるが, Accuracy Rate を可能な分割数は実験参加者により異なる。ただし, D1 の基準では多くのユーザが高い Accuracy Rate を維持できる。

**D5** : 16 分割時における MP 関節や指伸筋の腱, 中手骨の積極的な利用。

16 分割においては, 多くの実験参加者がポインティングに関する前提知識を与えられない状態で MP 関節から指伸筋の腱や中手骨に沿ってポインティングを行ったと考えられる (図 6)。したがって, 16 分割でインタフェースを配置する場合, これらの部位の積極的な利用はポインティング位置の正確さと所要時間に効果的であると考えられる。

## 5. インタフェースデザイン

本章では, 今後の手の甲を入力領域として利用する入力インタフェース開発の参考のため, 4 章で示した Design Implications の適用例を示す。

ここでは測距センサアレイを用いたセンシング手法 [8] への適用例を示す。なお, 2 章で述べた他の手の甲を入力領域とする入力インタフェースへの適用も考えられる。

また, Sighted と Un sighted では適用するアルゴリズムが異なるため, Sighted, Un sighted の順に述べる。

### 5.1 Sighted の場合

D1 から 16 個のボタン配置する。D2 から位置決定のための所要時間に 1 秒程度の不感時間を設ける。

D3 では, ボタン位置のキャリブレーション機能を実装する。キャリブレーションでは, 16 カ所のボタン位置を 5 回ずつポインティングしてもらい, 5 回の平均値をボタンの中心位置とする。ボタンのサイズについては, 95%信頼楕円として信頼楕円が重複する位置についてはどちらの楕円にも属さない, ニュートラルな位置とする。また, 推奨されるボタン配置のインストラクションとして, D5 から MP 関節を端点として親指以外の指の指伸筋の腱もしくは中手骨に沿って各ボタンの間隔が広がるように指示を行う。

### 5.2 Un sighted の場合

D1 から 9 個のボタン配置する。D2 から位置決定のための所要時間に 2.5 秒程度の不感時間を設ける。

D3 から Sighted の場合と同様に 9 個のボタン配置を 5 回ずつポインティングしてもらい, 5 回の平均値をボタンの中心位置とする。ボタンのサイズについては, Sighted の場合と同様とした。ただし, Un sighted の場合においては D5 のような位置に関する統一的な配置に関する基準が見られなかった。したがって, 使用に関するインストラクションにおいては, 第 2, 3, 5 指の MP 関節および指伸筋の腱, 中手骨を基準として各ボタン間隔が広がるように指示することが考えられる。

## 6. アプリケーション

本章では, 手の甲上に離散的なインタフェースを利用したアプリケーションの利用が想定される事例について述べる。

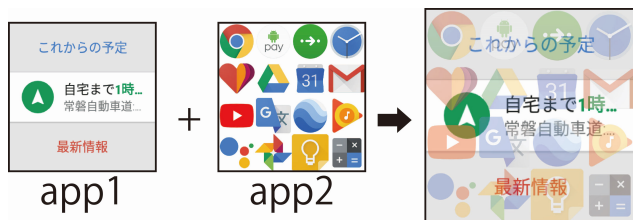


図 7 アプリケーションマネージャ (ユーザは右図のように重畳表示された app1 と app2 のそれぞれをタッチパネルと手の甲上の入力で操作)

Fig. 7 application manager (users can operate superimposed app1 and app2 such as the right image with input on touch panel and BoH respectively).

### 6.1 Sighted: アプリケーションマネージャ

スマートウォッチにおける各アプリケーションは階層化された構造を持つため、移動に時間と手数を要する。手の甲をタッチパネルに次ぐ、第2の入力領域として利用することによりアプリケーション間遷移を単純化するアプリケーションマネージャを示す (図 7)。

手の甲を第2の入力領域とすることによりディスプレイ上の同一の位置に2機能を割り当てることが可能となる。この例の場合は、タッチパネル上ではディスプレイに表示されているアプリケーション1の操作を、手の甲上においては重畳表示される各アプリケーションのアイコンの選択 (アプリケーション2) が可能となる。

### 6.2 Sighted: メッセンジャーアプリケーション

通常のメッセンジャーアプリケーションでは自分と相手の双方の入力済みテキスト、現在入力中のテキスト、キーボード、予測変換候補から画面が構成される。ただ、スマートウォッチの小型なディスプレイでは、予測変換候補に割ける画面リソースが少ない。タッチディスプレイ上のボタンを指で操作することを考えると表示可能な候補の数はせいぜい2, 3個である。この課題に対して手の甲を入力領域とすれば、Sightedの場合では最大16個の予測変換候補を表示できると考えられる。

また、入力領域としてタッチパネルと手の甲を同時に利用することにより、ディスプレイ上においてタッチパネルと手の甲のそれぞれで利用可能なインタフェースが重畳可能となる。重畳が許容されることで画面上のインタフェースのサイズを大きくでき、フィッツの法則の目標到達の困難さの低下につながると考えられる。

### 6.3 Unsighted: アイコン選択アプリケーション

腕付近から分離した位置のディスプレイに提示されている情報を Unsighted の状態で使用する応用例について述べる。応用例の1つとして大型ディスプレイやヘッドマウントディスプレイ (HMD) 上でのリスト状やタイル状のメニュー選択やアイコン選択が考えられる。大型のディス

プレイとのインタラクションにおいて手の甲を入力領域として利用すれば、手を下げた状態での入力が可能となり、gorilla-arm-effect [49] のような腕の疲労を抑制しながらディスプレイを目視して操作できる可能性がある。また、実環境の視覚情報を遮断するタイプのHMDにおいても手を大きく動かさずに入力を行える可能性がある。

## 7. 今後の課題および展望

今回の実験では、視覚情報の有無が対象とした計測指標に有意な差を与えることを確認した。そして実験の結果から触覚の影響が示唆された。しかし、今回の実験結果と触覚の関連性に関して得られる知見はきわめて限定的である。文献 [50] によれば、手のひらと手の甲の2点弁別閾はそれぞれおよそ5mm, 10mmとされているが、このような生理学的な知見と本実験においてコンピュータビジョンにより計測した位置計測結果との関連性については明確になっていない。したがって、右手人差し指と左手の甲のどちらの触覚が優位に機能したのか、触覚のどの機能が今回の計測結果に影響を与えたのかなど、手の甲上のポインティング特性に関してより詳細に理解するためには Gustafson ら [47] のようにシリコン製の手の甲のモデルや指先へのカバーなどを利用した段階的な調査実験が必要である。

また、Unsighted の状態においては、スマートウォッチ画面のタッチパネル上でも9分割程度であればユーザインタフェースの工夫により離散的なインタフェースや適切な触覚フィードバックを扱える可能性も考えられる。しかし、Imaginary Interfaces [47] と同様にタッチディスプレイの小型化による省電力化につながる可能性も考えられるため、手の甲を利用する利点があると考えられる。また、仮にタッチディスプレイ上で Unsighted かつ9分割のポインティングができた場合においても、タッチディスプレイと手の甲を同時に利用することにより2倍の18個以上のボタンが利用できるため、より多くの選択肢が必要な用途への拡張が考えられる。より多くの分割数を高精度にポインティングする方法として音声フィードバックの利用が考えられる。この点については、今後手の甲上での入力に適した方法の調査が必要である。

6.3節で述べた外部デバイスとの連携では、スマートウォッチのための Around Device Interaction の入力領域としてではなく、環境に設置するタイプのセンサ (たとえば、PCのディスプレイ上部などのユーザの周囲に配置されたRGBDカメラ) に対する入力領域としての利用が考えられる。なぜなら、手の甲はユーザの体に対して通常外向きであり、オクルージョンが生じにくいと考えられるためである。本研究の知見を活用した入力インタフェースと環境に設置されたセンサを使うことにより、ユーザはデバイスフリーかつ低疲労でアプリケーションを操作できるようになることが期待される。

## 8. まとめ

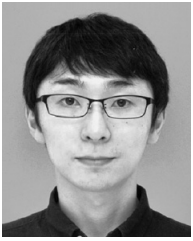
本稿は、手の甲を入力領域として利用する離散的なインタフェースを開発する場合に考慮すべき Design Implications を示すことを目的とし、ポインティング特性（分割数および指示精度）を調査した。3種類の分割数と手の甲が目視できる状態（Sighted）、できない状態（Un sighted）の両状態を対象とした結果、Sighted の 9–25 分割間の指示精度および Un sighted の一対の指示位置間を除き、指示精度および位置決めまでに要する時間（調整時間）は手の甲の分割数（ボタン配置数）が増加しても有意差がないことを確認した。ただし、Accuracy Rate の観点から Sighted においては 25 分割以上、Un sighted においては 16 分割以上で隣接するボタンどうしを混同する割合が有意に高くなることを確認した。また、ポインティング位置に関する視覚的フィードバックはポインティングパフォーマンスに貢献しており、すべての指標において Sighted が Un sighted よりも優れる結果となることを確認した。今回の実験により得られた Design Implications は Sighted, Un sighted の両状態において、今後手の甲を入力領域とする入力インタフェースの開発の基準として開発者支援となることが期待される。

**謝辞** 本稿を作成するにあたり、修正に協力いただいた同研究室の平野琢也氏に謹んで感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] 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).
- [2] Wang, C.Y., Hsiu, M.C., Chiu, P.T., et al.: PalmGesture: Using Palms as Gesture Interfaces for Eyes-Free Input, *Proc. 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp.217–226, ACM (2015).
- [3] Lin, S.Y., Su, C.H., Cheng, K.Y., et al.: Y.: Pub-Point Upon Body: Exploring Eyes-Free Interaction and Methods on an Arm, *Proc. 24th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.481–488, ACM (2011).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Zhang, C., Xue, Q., Waghmare, A., et al.: SoundTrak: Continuous 3D Tracking of a Finger Using Active Acoustics, *Proc. ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol.1, No.2, ACM (2017).
- [7] 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).
- [8] Ishikawa, Y., Shizuki, B. and Hoshino, J.: Evaluation of Finger Position Estimation with a Small Ranging Sensor Array, *Proc. 5th Symposium on Spatial User Interaction*, pp.120–127, ACM (2017).
- [9] Oh, U. and Findlater, L.: Design of and Subjective Response to On-Body Input for People With Visual Impairments, *Proc. 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility*, pp.115–122, ACM (2014).
- [10] Weigel, M., Mehta, V. and Steimle, J.: More Than Touch: Understanding How People Use Skin as an Input Surface for Mobile Computing, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.179–188, ACM (2014).
- [11] Nakatsuma, K., Makino, Y. and Maeno, T.: Touch Interface on Back of the Hand, *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, p.19, ACM (2011).
- [12] 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).
- [13] Weigel, M., Lu, T., Bailly, G., et al.: iSkin: Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing, *Proc. 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2991–3000, ACM (2015).
- [14] Kao, H.L.C., Holz, C., Roseway, A., et al.: DuoSkin: Rapidly Prototyping On-Skin User Interfaces Using Skin-Friendly Materials, *Proc. 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp.16–23, ACM (2016).
- [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] 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).
- [17] 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).
- [18] Prätorius, M., Valkov, D., Burgbacher, U., et al.: K.: DigiTap: An Eyes-free VR/AR Symbolic Input Device, *Proc. 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.9–18, ACM (2014).
- [19] Huang, D.Y., Chan, L., Yang, S., et al.: DigitSpace: Designing Thumb-to-Fingers Touch Interfaces for One-Handed and Eyes-Free Interactions, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1526–1537, ACM (2016).
- [20] 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).
- [21] Loclair, C., Gustafson, S. and Baudisch, P.: Pinch-Watch: A Wearable Device for One-Handed Microinteractions, *Proc. MobileHCI Workshop on Ensembles of*

- On-Body Devices*, p.4 (2010).
- [22] Hamdan, N.A.H., Kosuru, R.K., Corsten, C., et al.: Run&Tap: Investigation of On-Body Tapping for Runners, *Proc. 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp.280–286, ACM (2017).
- [23] Vo, D.-B., Lecolinet, E. and Guiard, Y.: Belly Gestures: Body Centric Gestures on the Abdomen, *Proc. 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational*, pp.687–696, ACM (2014).
- [24] 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).
- [25] Li, F.C.Y., Dearman, D. and Truong, K.N.: Virtual Shelves: Interactions with Orientation Aware Devices, *Proc. 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.125–128, ACM (2009).
- [26] Zhao, S., Dragicevic, P., Chignell, M., et al.: earPod: Eyes-free Menu Selection using Touch Input and Reactive Audio Feedback, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1395–1404, ACM (2007).
- [27] Kuester, F., Chen, M., Phair, M.E., et al.: Towards Keyboard Independent Touch Typing in VR, *Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.86–95, ACM (2005).
- [28] Fukatsu, Y., Shizuki, B. and Tanaka, J.: No-look Flick: Single-handed and Eyes-free Japanese Text Input System on Touch Screens of Mobile Devices, *Proc. 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp.161–170, ACM (2013).
- [29] McGookin, D., Brewster, S. and Jiang, W.: Investigating Touchscreen Accessibility for People with Visual Impairments, *Proc. 5th Nordic Conference on Human-computer Interaction: Building Bridges*, pp.298–307, ACM (2008).
- [30] Kane, S.K., Bigham, J.P. and Wobbrock, J.O.: Slide Rule: Making Mobile Touch Screens Accessible to Blind People Using Multi-Touch Interaction Techniques, *Proc. 10th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp.73–80, ACM (2008).
- [31] Kane, S.K., Morris, M.R., Perkins, A.Z., et al.: Access Overlays: Improving Non-Visual Access to Large Touch Screens for Blind Users, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.273–282, ACM (2011).
- [32] Bonner, M., Brudvik, J., Abowd, G., et al.: No-Look Notes: Accessible Eyes-Free Multi-Touch Text Entry, *The 8th International Conference on Pervasive Computing*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.6030, pp.409–426 (2010).
- [33] Romero, M., Frey, B., Southern, C. and Abowd, G.D.: BrailleTouch: Designing a Mobile EyesFree Soft Keyboard, *Proc. 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp.707–709, ACM (2011).
- [34] Mascetti, S., Bernareggi, C. and Belotti, M.: TypeIn-Braille: Quick Eyes-Free Typing on Smartphones, *Computers Helping People with Special Needs*, Vol.7383, pp.615–622 (2012).
- [35] Apple Inc.: VoiceOver (online), available from <https://www.apple.com/accessibility/iphone/vision/> (accessed 2017-12-24).
- [36] Gollner, U., Bieling, T. and Joost, G.: Mobile Lorm Glove – Introducing a Communication Device for Deaf-Blind People, *Proc. 6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp.127–130, ACM (2012).
- [37] Colle, H.A. and Hiszem, K.J.: Standing at a kiosk: Effects of key size and spacing on touch screen numeric keypad performance and user preference, *Ergonomics*, Vol.47, No.13, pp.1406–1423 (2004).
- [38] Hara, K., Umezawa, T. and Osawa, N.: Effect of Button Size and Location When Pointing with Index Finger on Smartwatch, *International Conference on Human-Computer Interaction*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.9170, pp.165–174 (2015).
- [39] Trudeau, M.B., Udtamadilok, T., Karlson, A.K., et al.: Thumb Motor Performance varies by Movement Orientation, Direction, and Device Size during Single-Handed Mobile Phone Use, *Human factors*, Vol.54, No.1, pp.52–59 (2012).
- [40] Park, Y.S. and Han, S.H.: Touch Key Design for One-Handed Thumb Interaction with a Mobile Phone: Effects of Touch Key Size and Touch Key Location, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol.40, No.1, pp.68–76 (2010).
- [41] Park, Y.S. and Han, S.H.: One-Handed Thumb Interaction of Mobile Devices from the Input Accuracy Perspective, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol.40, No.6, pp.746–756 (2010).
- [42] Goncalves, J., Sarsenbayeva, Z., van Berkel, N., et al.: Tapping Task Performance on Smartphones in Cold Temperature, *Interacting with Computers*, Vol.29, No.3, pp.355–367 (2016).
- [43] Voisin, J., Lamarre, Y. and Chapman, C.E.: Haptic Discrimination of Object Shape in Humans: Contribution of Cutaneous and Proprioceptive Inputs, *Experimental Brain Research*, Vol.145, No.2, pp.251–260 (2002).
- [44] Fuentes, C.T. and Bastian, A.J.: Where Is Your Arm? Variations in Proprioception Across Space and Tasks, *Journal of Neurophysiology*, Vol.103, No.1, pp.164–171 (2009).
- [45] Bolanowski, S.J., Verrillo, R.T. and McGlone, F.: Passive, active and intra-active (self) touch, *Somatosensory & Motor Research*, Vol.16, No.4, pp.304–311 (1999).
- [46] Gibson, J.J.: Observations on active touch, *Psychological Review*, Vol.69, No.6, pp.477–491 (1962).
- [47] Gustafson, S., Holz, C. and Baudisch, P.: Imaginary Phone: Learning Imaginary Interfaces by Transferring Spatial Memory from a Familiar Device, *Proc. 24th Annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, pp.283–292, ACM (2011).
- [48] 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).
- [49] Boring, S., Jurmu, M. and Butz, A.: Scroll, Tilt or Move It: Using Mobile Phones to Continuously Control Pointers on Large Public Displays, *Proc. 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group: Design: Open 24/7*, pp.161–168, ACM (2009).
- [50] Mancini, F., Bauleo, A., Cole, J., Lui, F., et al.: Whole-Body Mapping of Spatial Acuity for Pain and Touch, *Annals of Neurology*, Vol.75, No.6, pp.917–924 (2014).



石川 優 (正会員)

2018年筑波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後期課程修了。博士(工学)。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, 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。