

スマートウォッチのための
空間的指位置推定に関する研究

2018年3月

石川 優

スマートウォッチのための
空間的指位置推定に関する研究

石川優

システム情報工学研究科

筑波大学

2018年 3月

概要

手首装着型のウェアラブルデバイス（以降、スマートウォッチ）は小型ながら高い計算能力を持ち、腕時計と同サイズで手首に装着できるため、即時的な情報へのアクセスが可能である特徴が着目されている。その主な操作方法としてスマートフォンと同じくタッチパネルやボタン、音声を用いるが、特にタッチパネルにおいてはディスプレイのサイズが小さいため、Fat Finger Problem や同時に表示可能な情報量の制約がある。

そこで本研究は手の甲のウェアラブルデバイスのための入力領域としての適性に着目する。手の甲には、通常衣服に覆われずに露出している、触れることに対する社会的受容性が高い、体表面であるため触覚フィードバック及び自己受容感覚が利用できるなどの特徴がある。

本研究では、手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定する手法を示す。プロトタイプとして指の 2 次元位置と、高さ方向のタッチング、ホバリングなどの状態を推定するウェアラブル入力インタフェース Novest を示す。ここでの指の状態とは、手の甲と操作に用いる指との距離が遠い順にレンジ外、ホバリング、タッチングの 3 状態である。本手法により手の甲を高さ異なる 2 層の透明なトラックパッドのように利用することが可能となる。同様の課題に対して様々なアプローチが提案されているが、本手法では手首幅サイズの測距センサアレイが取得する距離データ及び反射光の強さをを用いることにより、右手にデバイスや素子を装着することなく高精度に指の 2 次元位置推定と指の状態識別を実現する。本手法では、軸毎に座標を推定して結果的に高精度に指の 3 次元位置推定を実現する。y 座標は、各センサから得られる反射光の強さの離散的な分布を補間して連続的な分布としたのち、分布の最大値を取る位置とすることでセンサの間隔以上の精度で推定する。x 座標は、先に導出した y 座標に最も近いセンサの距離データに指の寸法を考慮したオフセットを追加した値とする。z 座標は、異なる高さに設置されたセンサから得られる反射光の強さに基づく複数の数値を使った機械学習手法を適用することにより指の状態を推定する。そして、本手法の有効性を評価実験により示した。

次に、手の甲を入力領域として利用する入力インタフェースの設計指針を示すことを目的として、ユーザが手の甲をポインティングする際にどの程度の分割数をどの程度の精度でポインティングが可能かを実験により調査した。そして、実験から得られた知見を設計指針としてまとめ、Novest を対象に適用方針と適用結果を示した。実験は、手の甲上に複数個のボタンを配置することを想定して指示精度をはじめとする 3 種類の指標と、視覚情報の有無の両条件においてポインティングタスクを対象とした実験を行った。予備実験から仮説を立て、本実験の結果をもとに仮説検証を行うことにより知見を抽出した。

本研究の成果により、Novest を備えたスマートウォッチを装着するだけで手の甲をトラックパッドのように利用することが可能となった。次に、設計指針を反映させた Novest を示し、反映前後の違いについて考察を行った。なお、本設計指針は、今後の手の甲を入力領域とするインタフェース開発におけるセンシング手法の開発やインタラクション設計への寄与が期待される。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	論文構成	2
第2章	関連研究	4
2.1	Around Device Interaction と指示位置推定に関する研究	4
2.1.1	体表面を利用するインタフェース	4
2.1.2	デバイスの周辺領域を利用するインタフェース	6
2.1.3	指示位置推定手法	8
2.2	タッチベースな eyes-free 入力インタフェース	8
2.3	ポインティングに関する人間工学的知見	11
第3章	手の甲上における指の空間的位置推定システム：Novest	13
3.1	Novest の機能要件	14
3.2	指の位置推定	16
3.2.1	y 座標の位置推定	16
3.2.2	x 座標の位置推定	17
3.2.3	指の状態識別手法	17
3.3	Novest のプロトタイプの実装	17
3.3.1	小型測距センサアレイ	17
3.3.2	指の位置推定	19
3.3.3	指の状態識別	21
3.4	評価実験	23
3.4.1	基礎性能評価実験（評価実験1）	23
3.4.2	実験参加者	24
3.4.3	セットアップ	24
3.4.4	手続き	26
3.5	結果	28
3.5.1	指の位置推定精度	28
3.5.2	指の状態識別精度	28
3.6	考察	30
3.6.1	利用可能なボタンのサイズ	30
3.6.2	指示方法の影響	31
3.6.3	被指示面の影響	32
3.6.4	ホバリングの位置推定精度及び識別精度	33

3.7	実利用状況を考慮した性能評価実験（評価実験 2）	33
3.7.1	指の状態識別機能の修正	34
3.7.2	実験参加者	34
3.7.3	セットアップ	35
3.7.4	手続き	36
3.7.5	トレーニングフェーズ	36
3.7.6	テストフェーズ	37
3.8	結果	37
3.8.1	指の位置推定精度	37
3.8.2	X 軸における位置推定誤差の平均	37
3.8.3	Y 軸における位置推定誤差の平均	38
3.8.4	指の状態識別精度	39
3.9	考察	40
3.9.1	評価実験 1 と評価実験 2 の比較	40
3.9.2	自由記述	40
3.10	補助的評価実験	41
3.10.1	セットアップ	41
3.10.2	手続き	42
3.11	結果	43
3.12	考察	43
第 4 章	eyes-free 入力を含めた手の甲上におけるポインティング特性調査	45
4.1	Sighted/Unsighted を対象とした計測実験	45
4.1.1	セットアップ	46
4.1.2	実験参加者	51
4.1.3	手続き	51
4.2	仮説	51
4.3	結果	53
4.3.1	計測結果（Sighted の場合）	53
4.3.2	計測結果（Unsighted の場合）	54
4.3.3	Sighted と Unsighted の比較	55
4.3.4	インタビュー	55
4.4	考察	56
4.5	設計指針	57
4.6	アプリケーション	58
4.6.1	ナンバーキーボード	59
4.6.2	ドロワーイング	59
4.6.3	マルチタッチ入力を使ったアプリケーション	60

4.7	設計指針の適用.....	60
4.7.1	機能要件.....	61
4.7.2	Novest2の実装.....	62
4.7.3	Novest2のキャリブレーションの結果と簡易的な性能評価.....	63
4.7.4	応用アプリケーション.....	64
4.7.5	考察.....	64
第5章	結論	67
5.1	本研究の貢献.....	68
5.2	今後の展望.....	68
	謝辞.....	70
	著者論文リスト.....	71
付録A	Novestのプロトタイプ.....	73
付録B	ポインティング特性調査実験結果.....	75
	参考文献.....	89

図目次

図 3.1	Novest の概要図.....	13
図 3.2	認識可能な入力様式.....	15
図 3.3	第 2 指（人差し指）の各部名称.....	16
図 3.4	測距センサアレイ.....	18
図 3.5	y 座標の推定方法の概要図.....	20
図 3.6	x 座標の推定方法の概要図.....	21
図 3.7	評価実験用の手の甲（上）及び平面（下）のマーカ.....	22
図 3.8	Support Vector Machine による指の状態識別の概要図.....	23
図 3.9	評価実験 1 における実験条件：a) 丸棒+平面, b) 丸棒+手の甲, c) 指+平面, d) 指+手の甲.....	25
図 3.10	評価実験用プログラム.....	26
図 3.11	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）（*: $p<.05$, **: $p<.01$ ）.....	29
図 3.12	指+手の甲での位置推定結果（P1）.....	29
図 3.13	タッチングとホバリングの位置推定精度（エラーバーは標準偏差を示す） （**: $p<.01$ ）.....	30
図 3.14	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.....	31
図 3.15	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.....	32
図 3.16	評価実験 2 の実験環境 左) 立位, 右) 座位.....	34
図 3.17	位置推定の平均誤差（エラーバーは実験参加者間の標準偏差を示す）.....	38
図 3.18	手首の回転方向とその名称.....	42
図 3.19	評価実験 2 の実験環境： a) 全体図, b) 角度計, c) 正面図（外転方向 6 度 の場合）.....	42
図 3.20	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）.....	43
図 3.21	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）.....	44
図 3.22	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）.....	44
図 4.1	計測実験の実験環境 上) Sighted, 下) Unsighted.....	46
図 4.2	評価用アプリケーション画面（9 分割の場合）.....	47
図 4.3	調整時間計測用端子及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 及び GND 用端子.....	48
図 4.4	予備実験結果（P4） 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を示す	50
図 4.5 Accuracy Rate の結果 (*:p<.05, **:p<.01, ***:p<.001)	54
図 4.6 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および移動, c) DEL キー	59
図 4.7 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 (ボタン入力), d) 線形入力による S の描画.....	59
図 4.8 Processing 上でのマルチタッチ入力デモ 左) ピンチイン 右) ピンチアウト	60
図 4.9 Novest2 のキャリブレーション結果 (赤い楕円はキャリブレーション時に保存されたポインティング位置に基づく 95%信頼楕円を示す)	63
図 4.10 メッセージアプリへの Novest2 適用例 a) タッチパネルによる文字入力, b) c) Novest2 による手の甲上におけるタッチングでの予測変換候補選択 (移動) d) ホバリングによる候補選択 (決定)	65
図 4.11 a) インタフェースの通常表示, b) 機能別の色分け (シアン: 大文字 (小文字) 変換, マゼンタ: 一文字消去, オレンジ斜線: 予測変換選択) と機能の重畳部 (黄色), c) 手の甲からの入力とタッチパネルの入力の併用による同一位置のインタフェースとしての二重利用	65
図 A.1 マイコン部分を含む Novest のインタフェース部分	73
図 A.2 測距センサに接続する信号線及び電源線	73
図 B.1 Accuracy Rate の結果 (*:p<.05, **:p<.01, ***:p<.001)	75
図 B.2 分割数別の指示精度 (**:p<.01, ***:p<.001)	75
図 B.3 分割数別の調整時間 (**:p<.01, ***:p<.001)	76
図 B.4 各指示位置の番号 a) 9 分割, b) 16 分割, c) 25 分割	76
図 B.5 9 分割における指示位置毎の Accuracy Rate 上) Sighted 下) Unsighted..	77
図 B.6 16 分割における指示位置毎の Accuracy Rate 上) Sighted 下) Unsighted	77
図 B.7 25 分割における指示位置毎の Accuracy Rate 上) Sighted 下) Unsighted	78
図 B.8 9 分割における指示位置毎の調整時間 上) Sighted 下) Unsighted.....	78
図 B.9 16 分割における指示位置毎の調整時間 上) Sighted 下) Unsighted	79
図 B.10 25 分割における指示位置毎の調整時間 上) Sighted 下) Unsighted.....	79
図 B.11 9 分割における指示位置毎の指示精度 上) Sighted 下) Unsighted	80
図 B.12 16 分割における指示位置毎の指示精度 上) Sighted 下) Unsighted.....	80
図 B.13 25 分割における指示位置毎の指示精度 上) Sighted 下) Unsighted	81
図 B.14 Sighted 9 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円.....	82
図 B.15 Unsighted 9 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円	83
図 B.16 Sighted 16 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円.....	84

図 B.17	Unsighted 16 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円.....	85
図 B.18	Sighted 25 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円.....	86
図 B.19	Unsighted 25 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円.....	87
図 B.20	36 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円.....	88

表目次

表 3.1	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	30
表 3.2	SVM による混同行列 (それぞれの太文字は指の各状態を示す. O:レンジ外, H:ホバリング, T:タッチング)	38
表 4.1	予備実験結果.....	49
表 4.2	ポインティング実験結果まとめ.....	54

第1章 序論

本論文では、スマートウォッチのための空間的指位置推定に関して行った一連の研究について述べる。本章ではまず、本研究の背景及び課題について述べ、次に本研究の目的と貢献について述べる。最後に本論文の構成について述べる。

1.1 背景

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が登場しており、世界で1億台以上の市場規模にまでの成長が見込まれている[1]。スマートウォッチの特徴として情報への即時的なアクセスや小型ながらも音楽アプリケーションやマップアプリケーションなど、スマートフォンの基本的なアプリケーションの利用が可能であることが挙げられ、新しいフォームファクタのデバイスとして注目されている。これらのデバイスは、操作方法として主にスマートフォンと同じ操作方法（タッチパネルやボタン、音声入力）を利用する。

しかし、音声入力は周囲の環境により発声できない場合や発声内容が他者に把握される課題があり、ボタン入力では入力の自由度が限られる課題がある。また、デバイスサイズが小さいスマートウォッチにおいては主な入力領域であるタッチパネルのサイズも小さいため、指がボタンなどの操作対象に対して大きくなり意図しない入力をしてしまう課題（Fat Finger Problem）[2, 3]や、5mm四方以下のボタンサイズではエラー率が高い[80]といった課題がある。

このスマートウォッチの入力領域の制約を緩和するため、デバイスの内蔵素子や追加のセンサを利用すること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[4, 7, 10, 12, 20]。特に周辺領域の中でも体表面は、即座に触れられて広い面を持っているうえ、触覚フィードバックや体性感覚が得られるという特徴が入力領域として優れており着目されている。例えば、前腕や胴体、手のひら、手の甲などが利用されている。

特に、手の甲は、通常衣服に覆われずに露出しているうえ、触れることの社会的受容性が高い部位であり、右手人差し指で手のひらや首などに触れる際、手のひらと同程度の体上の入力領域として好まれる位置である[5]。また、スマートウォッチのディスプレイに隣接しており、手の甲を入力領域として利用する場合、ディスプレイによる視覚的フィードバックを利用できる。ジェスチャ入力が容易かつ快適に行える位置と

して前腕の次に好まれる位置である[6]。さらに、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、自動車のハンドルを握っている際など）にももう一方の手で容易に触れることができる。これらの特徴から、手のひらや前腕などと同様にインタフェースの入力領域としての適性があると考えられる。そして、手の甲を入力領域として利用する様々な手法が提案されている。

しかし、これまでに提案されている手の甲を入力領域とするインタフェースは、大きなセンサや複数個所にセンサが必要であった。複数個所のセンサや素子の装着には煩わしさがある。また、前腕や手のひらと異なり、これまでに手の甲をポインティングする形式の入力領域として利用するインタフェースを開発する場合に考慮すべき設計指針は見られなかった。ポインティング実験を通じて得られた知見を設計指針としてまとめることでセンサ開発を行う研究者やエンジニア、ユーザインタフェースを設計するデザイナーらの各々が事前に調査や実験をする手間を省き、ユーザのポインティング特性に適したより効率的なインタフェースの開発が可能となると考えられる。

1.2 本研究の目的

スマートウォッチのようなウェアラブルデバイスは今後さらに増加することが予想されており、情報への即時性や携帯性、利用可能なアプリケーションの観点から現在スマートフォンで行われているタスクを代替していくことが期待される。また、手の甲は体表面の一部であり、触覚フィードバックや自己受容感覚を得ることができ、入力領域として適した特徴を有している。しかし、スマートウォッチの主な入力インタフェースであるタッチパネルの入力領域の小ささが利用方法やデバイスの小型化の制約となっていると考えられる。そして、ADIの中から手の甲を使ったインタフェースが提案されているが使用するセンサのサイズやセンサの設置個所の数に課題がある。

そこで本研究は、手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の3次元空間に挿入された指の3次元座標を推定する手法を提案する。本手法により手の甲をホバリングが認識可能なタッチパネルのように利用することが可能となる。さらに、ユーザの手の甲上におけるポインティング精度や特徴に関する知見を実験から抽出して設計指針としてまとめ、提案手法に適用して応用アプリケーションを示す。タッチパネルよりも大きな手の甲を入力領域として利用することにより、オクルージョンの影響を緩和する。また、指ではタッチが難しいサイズのボタンが利用できるようになり、タッチパネルにおける入力インタフェース用の画面領域を小さくすることが可能になる。

1.3 論文構成

第2章では、スマートウォッチをはじめ、様々なデバイスの周辺領域を利用するイ

インタフェースの事例について、体表面を入力領域とする場合と体表面以外を入力領域とする場合に分けて述べる。次に、手の甲上におけるポインティング特性調査実験において目視できない状態も対象とすることから、操作対象を目視することなく入力を行うタッチベースの eyes-free 入力インタフェースについて述べる。最後に、ポインティングに関する人間工学的知見について述べる。

第 3 章では、手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定する手法を示す。そして、本手法を適用したウェアラブル入力インタフェースのプロトタイプである Novest の動作原理について述べ、3 種類の性能評価実験を通して本手法の有効性について述べる。

第 4 章では、ユーザの手の甲におけるポインティング特性（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）の調査を目的に実施した実験について述べる。Sighted 及び Un sighted の両状態を対象としたポインティングタスクによりポインティング特性を調査した。そして、そこから得られた知見をまとめた設計指針について述べたのち、Novest を対象として具体的な設計指針の適用方針を示す。さらに、設計指針を適用した場合の Novest を含んだアプリケーション例を示す。

最後に 5 章では、本研究の貢献について整理したのち、手の甲を入力領域として利用するインタフェースの今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

本章では、本研究の位置づけを明確にするため、既存のシステムについて述べる。スマートウォッチだけでなくモバイルデバイスを含む小型デバイスなどの入力領域やインタラクションを拡張するため、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) の事例について述べる。様々な手法が提案されており、赤外線フォトリフレクタ[4]、交流信号[7]や音波[8]、赤外線深度センサ[9]、磁界[10]、超音波[11]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。また、ADI の他にも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。そこで、まず ADI のうち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。次に、指位置をシステムの入力として用いた研究を示す。最後に、Sighted/Un sighted の両状態を含んだポインティングに関する研究事例として、タッチ入力を使った eyes-free 入力（入力の際に入力に関する視覚的フィードバックを利用しない）インタフェース及びポインティング特性に関する人間工学的知見を扱った研究について述べる。

2.1 Around Device Interaction と指示位置推定に関する研究

本節では、スマートウォッチのようなウェアラブルデバイスをはじめ、スマートフォンを代表とするモバイルデバイスなどを操作対象として体表面やデバイスの周辺領域を入力領域として利用した関連研究について述べる。

2.1.1 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。本項では体表面を入力領域として利用した入力インタフェースについて述べる。

はじめに、光学系素子を使って体表面をインタフェースとして利用する研究について述べる。Skin Buttons[12]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スマートウォッチ側面から周辺の皮膚上に向けて設置して、レーザダイオードにより皮膚上に投影されたアイコンの位置において近接センサを使っ

てボタンインタフェースを利用可能にしている。PALMbit[13]は赤外線投光光源及び近赤外線カメラにより指先での選択操作を、PalmRC[14]は部屋に設置された深度センサにより手のひら上でスワイプ入力やボタン入力を実現している。OmniTouch[9]では、肩に取り付けられた深度センサにより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[15]は、スマートウォッチ側面に取り付けられたフォトリフレクタアレイを用いて手の甲上において指位置を推定している。SenSkin[16]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のバンドにより、バンド間の皮膚に力が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である。皮膚をアナログスティックのように2次元入力可能なインタフェースとして利用可能にした。SkinWatch[17]では、スマートウォッチ背面に設置された赤外線アレイにより、スマートウォッチ周辺の皮膚の変形を検出してジェスチャ入力を可能にしている。

CheekInput[18]は、ヘッドマウントディスプレイの底部の顔側に位置する箇所に取り付けられた赤外線フォトリフレクタを利用して、頬に力を加えた際に生じる皮膚の変形を検出することで両頬において16種類のジェスチャ入力を実現している。

次に、体表面をタップした際に生じる音波や振動、微小な加速度変化などを利用した手法について述べる。Skinput[8]とThe Sound of Touch[19]は、体内を伝搬する音波の周波数や強度から、前腕や手、指上などでのタップやジェスチャを認識している。前者は、周波数特性を調整した複数のピエゾフィルムを上腕部に取り付けたセンサを利用している。後者は人差し指に発信機とアームバンド型の受信機を装着する場合と、アームバンドだけを用いる場合の2仕様で異なる入力様式を実現しており、発信機を用いる場合では前腕上において1次元的なボタンインタフェースを実現している。

TapSkin[20]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手の甲と前腕上でタップ入力を実現している。SonarWatch[21]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。4個のマイクロフォンと6軸の慣性力センサから構成されるSoundCraft[22]は、Multiple Signal Classification (MUSIC) technique [23]を応用することによりスマートウォッチ周辺において指や手などを用いたスナッピングやラビング、オブジェクト上のタッピングによる発生した音響信号の位置の特定を実現した。指などに発せられる音によるパイメニュー選択やスケッチだけでなく、スピーカから発せられるホワイトノイズを利用してスマートフォンと連携した3Dモデル閲覧アプリケーションも示している。

SkinMarks[24]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。DuoSkin[25]は金箔を利用した薄いタトゥーシール型の静電容量センサを構築することにより解像度は低いものの、皮膚上に直接的にスライドバーやトラックパッドを実装している。iSkin[26]は、形状をカスタマイズして視覚的なデザインが可能であり、かつ、薄く伸縮可能な静電容量センサと抵抗式タッチセンサ

の特徴を持つセンサであり、手の甲やその他の体表面上において離散的なインタフェースを利用可能にしている。

次に、交流信号や静電容量センサを利用した手法について述べる。SkinTrack[7]は、操作に用いる指（人差し指）に指輪型の発信機が印加する交流信号が手の甲を通じてスマートウォッチのバンド型受信機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[27]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[28]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。

最後に、FingerPad[29]は、親指の先に取り付けられた永久磁石と人差し指の先に設置された磁気センサアレイにより微細で秘匿性の高い入力を可能にしている。

手の甲を入力領域として利用する入力インタフェースも提案されているが、従来手法は、操作に用いる指に信号や磁場を発生させるデバイスや素子が必要であった。一方本手法では、手首幅サイズのセンサを用いて、操作に用いる指にデバイス等を装着することなく手の甲上における指の2次元位置と指の状態識別を高精度に実現する点に差異がある。

2.1.2 デバイスの周辺領域を利用するインタフェース

Around Device Interaction (ADI) では、体表面以外のデバイスの領域を利用した研究もされており、本項ではそれらの研究について述べる。Abracadabra[10]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[30]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。永久磁石が非電源供給で磁場を発生させられる特徴を利用したインタフェースである。

SideSwipe[31]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ファクタで実現した AuraSense[32]や、スマートフォン上で実現した Goc らの手法[33]がある。Soli[34]は、ミリ波レーダーを使って指による微小で連続的なジェスチャ認識を実現している。zSense[35]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[11]や Wei らの手法[36]は、スマートフォンやスマートウォッチに内蔵されたスピーカとマイクを利用して、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からデバイス最近隣の指位置を高精度に推定している。UbiTouch[37]や UbiK[38]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、剛体上に置かれたスマートフォン周辺でのタップ位置を推定している。Okuli[39]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。SoundTrak[40]は、スマートウォッチに取り付けられた

4 個のマイクロフォンと操作に用いる指に取り付けられたスピーカを使って 3 次元空間内の指の位置推定を実現している。初期位置からの音波の位相差により求めた指の移動を逐次蓄積していくことにより受信機と発信機を分離させた状態で位置推定を実現している。Toffee[41]は、四隅に振動音響センサが設置された小型のモバイルデバイスが机などの剛体に置かれた場合に、このデバイスの周囲で発生した音響振動の到達時間の差を用いることにより音源位置の推定を実現している。これによりモバイルデバイスの周囲にボタンが疑似的に配置され、テーブルトップのように扱うことが可能になる。

Butler[4]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アレイを用いて、テーブルのような剛体上に置かれたスマートフォン周辺におけるドラッグや回転などの入力を実現した。デバイスの両端にセンサアレイを取り付け、1 辺のセンサアレイにつき 1 本の指の大まかな相対位置を検出することにより両手を使って拡大縮小の入力も実現している。FlexAura[42]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、デバイスを把持した際に変化するセンサの信号強度の分布の変化からデバイスの持ち方を検出している。The Gesture Watch[43]や HoverFlow[44]は、スマートフォンやスマートウォッチを想定した腕時計のベゼル部分に取り付けられた複数の測距センサにより、デバイスの周辺領域における腕全体を使ったジェスチャ認識を実現している。

PalmSpace[45]は、モバイルデバイスに取り付けられた深度センサによりデバイスを持っていない方の手の姿勢推定をコンテンツの 3 次元回転に利用した。手の姿勢とモデルの回転を同期させることによりモバイルデバイスに表示されている 3D モデルの直観的かつ正確な回転を可能にしている。WatchSense[46]は、手の甲に向けて前腕に取り付けられた小さな深度センサを用いたコンピュータビジョンベースの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マルチフィンガーインタラクションを提案している。

Tanase ら[47]は、テーブルトップインタフェース周囲に外側に向けて測距センサを配置してユーザの位置や接近を検出し、自動でコンテンツの向きを修正やユーザの位置に基づくコンテンツへのインタラクションを実現している。Medusa[48]は、テーブルトップインタフェースの周囲にフレームから外向きと画面と同じ向きに多数の測距センサを用いて操作を行っているユーザの立ち位置とどのユーザの手か、右手か左手かを識別して、識別結果に基づきそれぞれの対象に異なる機能の割り当てを実現している。

LucidTouch[49]や nanoTouch[50]は、カメラやタッチパネルを使ってデバイスの背面を入力領域として利用することによりオクルージョンの問題を解決している。背面に位置する指はモバイルデバイス本体により隠れて見えなくなってしまうが、疑似的な指の位置を前面のディスプレイに表示することにより高精度でポインティングが行えるようになっている。WatchIt[51]はリストバンド型の 4 個のポテンショメータによるタッチ入力や連続的な入力認識によりリスト選択や簡単な eyes-free 入力を実現して

いる。WatchOut[52]は、スマートウォッチのケースやベゼル、バンド上におけるタップやスワイプなどのジェスチャを、加速度センサやジャイロセンサにより得られるデータに2段階のSVMを適用することにより識別している。

先の体表面上を利用したADIと同様に手の甲を含む体表面周辺やデバイス周辺において指の位置を高精度に推定する手法の提案がされているが、操作に用いる指にデバイスや素子を装着することなく指の位置推定に加えて指の状態識別を同時に高精度に実現する点に差異がある。WatchSense[46]は操作に用いる指にデバイスや素子を装着することなく手の甲上の指位置及び状態識別を実現しているが、前腕に設置されたスマートウォッチの数倍のサイズの深度カメラによるコンピュータビジョンベースの手法を利用しており計算量が多い。これに対して、本手法はスマートウォッチ側面と同等サイズのセンサにより手の甲上の指の位置推定及び状態識別を実現している点異なる。

2.1.3 指示位置推定手法

ZeroTouch[53]は、ディスプレイのベゼルのような枠状の筐体内に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[54]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[55]を提案している。親指に取り付けられたNailOを人差し指で操作することにより片手で通常のスマートフォンなどのタッチパネルのような入力を実現している。uTrack[56]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。NanoStylus[3]は、スマートウォッチのため入力インタフェースとして指先に装着可能な超小型のアクティブな静電容量式スタイラスと1次元的なタッチ入力インタフェースを使うことにより、オクルージョンを抑制しつつ微細な入力を可能にした。

本研究では、スマートウォッチ側面のみセンサを設置して手の甲上の指の位置に加え、タッチングやホバリングなどの状態の識別を実現する。距離データと反射光の強さを活用することにより両状態において高精度に指位置推定を実現する。手の甲を入力領域として利用することによりオクルージョンを緩和し、ディスプレイ上の小さいボタンを利用できるようにする。

2.2 タッチベースな eyes-free 入力インタフェース

本研究では手の甲上におけるポインティング特性（どの程度の分割数をどの程度の精度でポインティングが可能か）を調査するため、Sighted/Un sightedの両状態を対象に調査するにあたって本節では視覚情報を用いない入力（eyes-free 入力）インタフェ

ースを扱った研究について述べる。eyes-free 入力インタフェースは、視覚情報を触覚や聴覚などの他の感覚器官から得られる情報により補完して対象の操作を実現する。ここでは盲目のユーザのための入力インタフェースも視覚情報を利用しないという観点から eyes-free 入力インタフェースであると捉えて関連研究として示す。

体表面の触覚フィードバックや自己受容感覚を利用した eyes-free 入力が提案されている。先の体表面を利用した ADI でも挙げたが、EarPut[28]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。耳の触覚フィードバックを利用することにより触れている位置を直接目視することなく耳を数か所に分割して繰り返し触ることが可能となっている。PalmGesture[57]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、PalmRC[14]は部屋に設置された深度カメラ、DigiTap[58]は加速度センサと小型カメラ、LED を用いてそれぞれ手のひらで連続的[57]、離散的[14, 58]な指位置入力を実現している。

Huang らは、thumb-and-fingers interface において連続・離散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、その結果を踏まえた設計を行った DigitSpace[59]を提案している。ホールセンサアレイと永久磁石を利用しており、FingerPad[29]も同様の原理を利用している。親指と、人差し指もしくは人差し指と中指を利用することにより微細かつ他人に直接目視されにくく、爪に磁石やセンサを取り付けることにより指の触覚フィードバックを阻害することなく入力が可能となっている。PinchWatch[60]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[61]は前腕上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 を提案している。

No-look Flick[62]は、スマートフォンのタッチパネルを使って親指でかな入力を行う場合のボタンサイズによるポインティング精度を調査している。結果、タッチパネルを均等に 4 分割するレイアウトでは 100%のポインティング精度だが、9 分割では 83.1%まで低下することが確認されている。Pasquero ら[63]は、触覚フィードバックを与えるための圧電素子や入力用の静電容量センサなどによるつまみ、タッチ、ウォッチフェイスを覆うジェスチャ入力が可能でモバイルデバイスと連携した腕時計型による eyes-free インタラクションの有効性を示している。Blaskó ら[64]は、タッチパネルの端やベゼルに設置された並べられた断続的な触覚フィードバックを与えるための凸部により、複雑かつ連続的なコマンド入力をする手法を提案した。B2B-Swipe[65]ではスマートウォッチのベゼルの位置を触覚フィードバックで認識できる点に着目して 16 パターンのスワイプ入力を新たに追加した。

Hamdan ら[66]は、ランナーのための eyes-free 入力インタフェースを設計することを目的として、どの箇所での程度の精度で胴及び両腕上でのタップ入力が可能かを調査した。Vo ら[67]は胴を入力領域とする場合においてユーザが胴上で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[7]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、

離散的なインタフェースを実現している。Oh ら[5]は盲目のユーザを対象として体表面上のインタラクシオンデザインと好みの調査を行った。

触覚フィードバック以外の感覚を使った手法も提案されている。Virtual Shelves[68]は、モバイルデバイスでの利用を想定した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。自分の体を中心とした球の表面上に配置されたアイコンの場所に端末を移動させることによりユーザが慣れれば従来のボタン入力を利用した方法よりも短時間でアイコン選択が可能なが示唆されている。

earPod[69]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。指に位置に応じて音声が再生中でも次の音声を割り込んで再生させることにより混乱なく、練習により視覚を使ってメニュー選択を行う場合と同程度の所要時間で選択が可能になることが示唆されている。KITTY[70]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。

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[71]は、タッチパネルを伴う 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より友好的にする方法の調査を実施した。

Slide Rule[72]や Access Overlays[73]、No-Look Notes[74]、BrailleTouch[75]、TypeInBraille[76]は、触覚フィードバックに乏しいタッチパネル上でマルチタッチやジェスチャ入力と音声フィードバックを使って盲目のユーザへのユーザビリティを向上させている。Slide Rule[72]は指の位置ではなくタッチパネル上における数種類のジェスチャに機能を振り分けることにより、視覚情報を用いることなく横断的にアプリケーションを利用することができる。Access Overlays[73]では、2次元的に配置されたアイコンへアクセスを可能にする 3 種類の異なるインタフェースが提案されている。いずれも音声フィードバックを使っており、指の位置の逐次的なフィードバックや 2次元位置の x,y 座標へ分割することによる段階的なアクセス、アイコンの相対的な位置のフィードバックにより、視覚情報を用いることなく 2次元的なアイコンの位置を把握することができる。No-look Notes[74]は、シングルタッチをキーの音声フィードバックを伴う位置探索に利用してマルチタッチを決定キーとすることでテキスト入力を実現している。BrailleTouch[75]と TypeInBraille[76]は点字の概念をタッチパネルに持ち込み、前者は両手の各指を点字の各点に対応させることによりボタンの位置情報を気にすることなくテキストの入力を実現しており、後者はタップに利用する指の本数とスワイプを使ってテキスト入力を実現している。また、VoiceOver[77]はジェスチャと音声フィードバックを用いた一般的なアプリケーションである。Mobile Lorm Glove[78]は、盲ろう者のための 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。

本研究では、手の甲でのポインティングにおいても触覚フィードバックや自己受容感覚がある点に着目して eyes-free 入力インタフェースの入力領域としての利用可能性

を見込み、ポインティング特性調査実験にて手の甲を目視できない状態も対象とする。そして、実験から得られた知見をインタフェースの開発の際に利用する設計指針としてまとめる。さらに、設計指針を提案手法に適用してアプリケーションを示す。

2.3 ポインティングに関する人間工学的知見

本節では、入力手法としてではなく、人間に生来備わっている触覚や自己受容感覚に着目してポインティング特性を調査した人間工学分野の研究について述べる。

指によるポインティングに関する人間工学的知見としてタッチパネル上におけるタッチパフォーマンス評価が数多く行われている。Colle ら[79]は 12.1 インチのタッチパネル、Hara ら[80]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。タッチパネル上の複数のボタンサイズやボタンの感覚においてポインティングの精度や、扱いやすさに関する主観的評価を実施して一定以上のサイズ未満になるとパフォーマンスが下がること、また、一定のサイズ以上になるとパフォーマンスが上がらなくなることが示されている。

また、スマートフォンのようなモバイルデバイスに対する親指によるボタンサイズやスペースを対象にしたポインティングのパフォーマンス評価も行われている[81, 82, 83, 84, 85]。これらにおいても人差し指を対象とした実験同様、ボタンサイズによるパフォーマンスの変化が示され、また、親指の構造からモバイルデバイスのボタン位置によってもパフォーマンスが変化することが知られている。Goncalves ら[86]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ており、低温状況下ではパフォーマンスが低下することが知られている。

また、皮膚感覚や自己受容感覚に着目した様々なパフォーマンス評価が行われている。Voisin ら[87]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、相乗的に感覚の精度が向上させることを示している。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 8cm であることが示されている[88]。これは腕を外骨格型のアクチュエータにより特定の平面内を動かされ、かつ、腕を目視できない場合において指位置がどこにあるかを指示するタスクによる結果であり、関与した感覚は右腕の自己受容間隔のみを使った場合の認識精度である。

また、Bolanowski ら[89]は、能動的に環境の物体に触れる active-touch[90]、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を推定する実験を行った。結果、intra-touch の場合、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、認識精度が低いことが確認されている。

Gustafson ら[91]は、手の平と人差し指を使ってデバイスによる視覚的情報の提示及びフィードバックを利用しない Imaginary Interfaces[92]のコンセプトのもと Imaginary Phone のコンセプトを提唱している。空間記憶によるアイコン位置とそれら

の手のひらへの転移学習による想起率や、空間を入力領域とする Imaginary Interfaces と手のひらを入力領域とする Imaginary Phone を対象とした空間記憶に基づく指定位置のポインティング精度評価を行っている。ポインティング精度については、左手を参照位置として空間をポインティングする Imaginary Interfaces の手法よりも手のひらを使う Imaginary Phone の方が有意に高精度となることが示されている。さらに、この結果について視覚と触覚の観点からどの感覚がパフォーマンスに影響しているかをデバイスの形状や表面的な凹凸、指先や手のひらの触覚フィードバックなどに着目した実験により詳細に調査を行っている[93]。結果、指先よりも手のひらの触覚フィードバックが効果的に働いていることを確認している。

PalmType[94]は、スマートグラスのためのテキスト入力を目的とした手のひらにおける直観的かつ効率的な QWERTY キーボードのキー配置を実験参加者間の議論の結果から抽出して、プロトタイプを使ったパフォーマンス評価にて有効性を示している。

人間工学的な観点からも様々な研究が行われているが、これまで手の甲をどの程度の分割数をどの程度の精度でポインティングが可能か（ポインティング特性）に関する調査は見られず、手の甲を入力領域とするインタフェースを開発する場合に考慮すべき設計指針は示されていない。本研究は、今後の手の甲を入力領域として利用するインタフェースの開発を見据え、Sighted/Un sighted の両状態を対象にポインティング特性調査実験を通じて設計指針を示す。手の甲は有毛の部位であることから手のひらの場合の知見と異なる結果が導き出されることが想定される点に本研究を実施する意義がある。また、指示対象領域である手の甲を 2 次元的な指示対象として明確な指示位置を設けず、実験実施者に任意に調整させることにより、センシング手法によらない手の甲を入力領域とするインタフェース開発に共通する知見を抽出して設計指針としてまとめる。

第3章 手の甲上における指の空間的位置推定システム：Novest

本章では、手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定する手法を示す。本手法により、手の甲をトラックパッド化してスマートウォッチ操作時に発生するオクルージョンの緩和を実現する。次に、本手法を適用した入力インタフェース Novest について述べる。Novest は、片手首幅に収まるサイズの小型測距センサアレイを用いて手の甲上で指の位置と、タッチング、ホバリングなどの指の状態を推定するウェアラブル入力インタフェースである（図 3.1）。はじめに機能要件について述べ、次に動作原理及び実装した Novest のプロトタイプについて述べる。最後に性能評価を目的とした複数の評価実験を通して本手法の有効性を示して考察を述べる。

なお、スマートウォッチへの入力を目的として手の甲上での指位置推定を実現する手法は既にいくつか提案されている [7, 15, 32, 46]。しかし、スマートウォッチと同程度のサイズのセンサのみを用いて、操作に用いる指にデバイスや素子を装着することなく指位置推定に加えて指の状態識別を同時に実現した事例は見られない。

そこで本手法は、手首幅サイズの測距センサアレイが収集する距離データと反射光の強さを併用することで、手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を高精

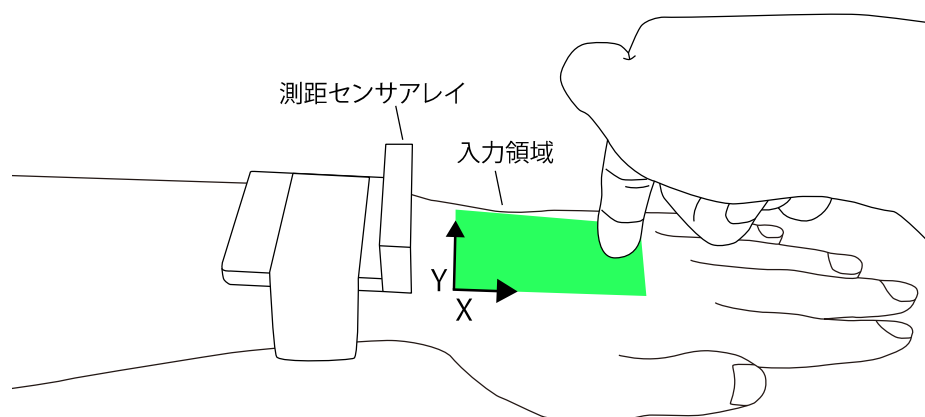


図 3.1 Novest の概要図

度に推定する。本手法を適用した Novest はスマートウォッチ側面に透明な 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。手の甲から遠い 1 層目のみ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 (図 3.2)。

具体的には本章で、まず 1) スマートウォッチ側面に取り付けられた距離データ及び反射光の強さを取得可能な小型測距センサアレイを使って手の甲上の指位置推定及び指の状態 (レンジ外, ホバリング, タッチング) の識別を実現する仕組みとハードウェアの構成について述べる。そして、2) 実験参加者による指と手の甲に加えてロボットアームと平面を対象とした基礎的性能評価実験と、立位と座位を対象とするより実利用環境を考慮した性能評価実験、加えて手の甲の角度へのロバスト性を評価する補助的評価実験を通して本手法の有効性を示す。

3.1 Novest の機能要件

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使って手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定することにより、オクルージョンを生じさせずに手の甲上にてボタン入力や線形入力などのトラックパッドライクな入力を可能とするインタフェースの実現を試みる。具体的にはトラックパッドライクな入力に必要と考えられる以下の 2 種類の機能を持たせる (図 3.2)。

- 指の 2 次元位置推定
- 指の状態識別

本項において 2 点目の指の状態識別とは、手の甲上の操作に用いる指と手の甲間の距離を 3 つの状態 (レンジ外, ホバリング, タッチング) に分けて識別することとする。したがって、指の 2 次元位置推定と状態識別のそれぞれは、手の甲上の指の x, y 座標と z 座標を求める機能に相当する。なお、本手法における指の状態識別は、指の高さ方向の状態を以下のように 3 状態に分け、これらを識別する。

- 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 (図 3.2 下)
- 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 (図 3.2 上)

なお、本研究では、手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定することにより手の甲をトラックパッド化するが、ユーザへの視覚的フィードバックは通常のディスプレイ上のみのため、手の甲上の座標とディスプレイ座標の対応関係がわ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

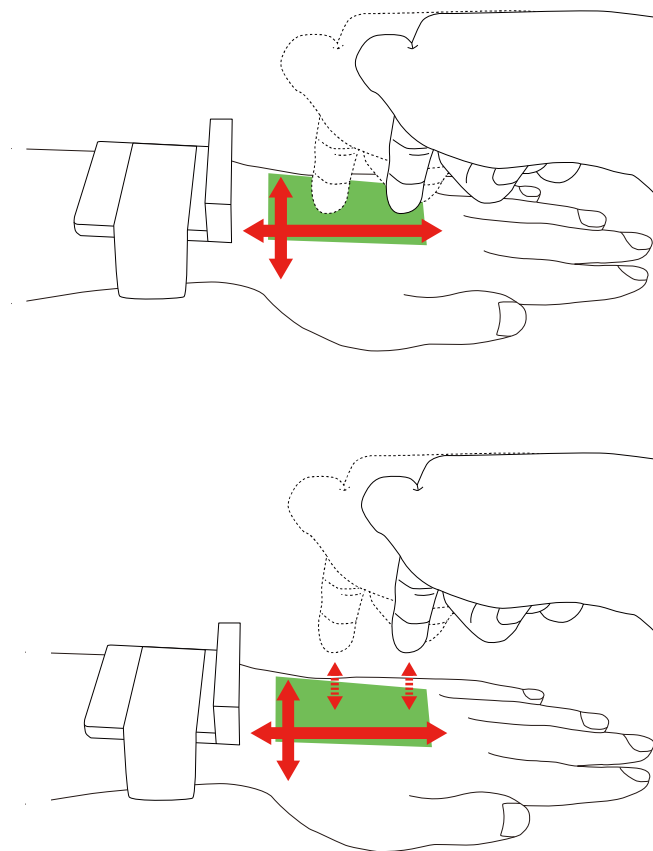


図 3.2 認識可能な入力様式

上) タッチングでの位置入力 下) ホバリングでの位置入力

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。ホバリングでは入力が行われないことから、手の甲上での指位置をディスプレイに表示されるポインタにより把握して位置決めしてから入力することが可能である。ホバリングからレンジ外への遷移では入力が行われずにポインタが消失するだけであり、ホバリングからタッチング、タッチングからホバリングの一連の流れはマウスのクリック、ホバリングからタッチング状態を維持することによりドラッグに相当しており、手の甲を通常のトラックパッドのように利用することが可能になる。

なお、本手法では、操作に用いる指は1本で第2指（人差し指）であることを前提として距離データ及び反射光の強さを取得可能な測距センサアレイを使用することで先に述べた2機能を実現する。位置推定においては第2指のサイズを考慮した手法を示すが、これらの2種類のデータは第2指のサイズの影響を受けることが想定される。

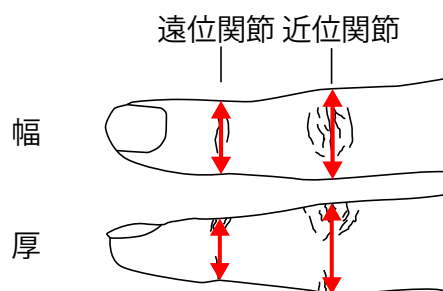


図 3.3 第 2 指（人差し指）の各部名称

そこで本研究では，第 2 指の各部位の名称を[95]の定義に則って図 3.3 のように呼称して評価実験にて図に示す 4 か所（遠位関節及び近位関節の幅と厚）の計測を行い，本手法を適用したシステムの性能に与える影響を確認する。

3.2 指の位置推定

本節では，指の位置推定の仕組みについて述べる．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一の手法で実現する．なお，手の甲上では検出対象範囲の左下端を原点として図 3.1 のように座標系を定義する．推定は y 座標の位置推定から x 座標の順で行うため， y 座標の位置推定方法から述べる．指の位置推定では，手の甲上の 2 次元的な指の位置を推定するため，手首幅方向に距離データ及び反射光の強さが取得可能な測距センサを複数個並べることを想定する。

3.2.1 y 座標の位置推定

y 座標の推定には反射光の強さを利用して推定する．スマートウォッチのようなウェアラブルデバイスでは電源に制約があることから利用するセンサ数は可能な限り少なくする．そこで本手法では，スプライン補間により各センサの反射光の強さを滑らかに補間して高精度に y 座標を推定する． y 座標は指が指し示す位置（第 2 指の指先）を通る X 軸に水平な線と指の表面との交点であると想定する．そして，センサに対して最も近い位置，つまり反射光が最も強くなる位置と仮定する．したがって，補間された反射光の強さの分布の最大値を取る座標を y 座標とする。

3.2.2 x 座標の位置推定

推定した y 座標に最も設置位置に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。オフセットを加算する理由は、測距センサが取得する距離データはセンサの先端部から第 2 指の表面までの最短距離を示すデータであり、指が指し示す位置（第 2 指の指先）が第 2 指の表面から 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。

3.2.3 指の状態識別手法

指の状態識別では、操作に用いる第 2 指と手の甲間の距離の識別を行う。この機能を実現するため、手の甲に対して鉛直上向き方向（高さ方向）の第 2 指の位置に関する情報を収集する必要がある。そこで本手法では、手首幅方向だけでなく手の甲の高さ方向（手の甲を平面とみなした場合の法線方向のうち、手のひらと逆向きの方向）にもセンサを配置する。手の甲の高さ方向にセンサを並べることにより指の状態識別が可能になる。

第 2 指と手の甲との間の距離がある場合（ホバリング）では、手の甲側のセンサから発せられた信号の指にあたる量が減少するため、手の甲から遠いセンサが取得する反射光の強さが手の甲に近い側のセンサよりも強くなることが想定される。第 2 指と手の甲との距離が小さい場合（タッチング）では、反射光の差が小さくなると考えられる。すべてのセンサに反応がない場合をレンジ外と考えられる。このように指の状態識別が可能になる。本手法ではこの仕組みを利用するため、測距センサアレイを高さ方向に 2 段配置する。そして、反射光の強さから算出した指の状態を示す特徴量を機械学習により分類することにより指の状態識別を行う。

3.3 Novest のプロトタイプの実装

本節では、本手法を適用したウェアラブル入力インタフェースのプロトタイプ Novest と実装に沿った動作原理について述べる。

3.3.1 小型測距センサアレイ

実装した測距センサアレイを図 3.4 に示す。測距センサアレイの大きさは、縦 15mm 横 50mm 厚み 8mm である。横方向の大きさは、SONY 社製 Smart Watch 3[96]の側面(縦 10mm 横 51mm)に準じている。また、日本人男女の手首幅の平均は 55.5mm(SD

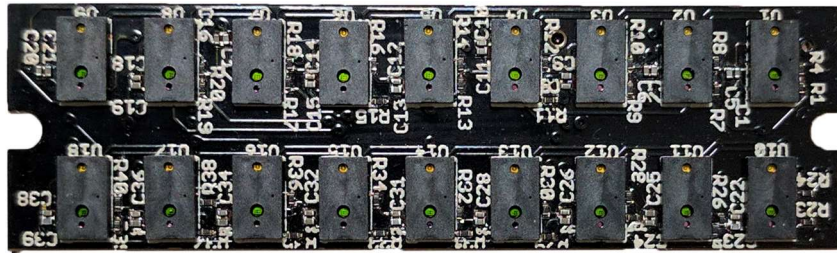


図 3.4 測距センサアレイ

=4.3mm)であり、これに収まるサイズとしている。センサボード左右の溝は、測距センサアレイを筐体に固定するための溝である。筐体は黒色のアクリルを用いてレーザーカッターにより製作した。付録 A に筐体を含むプロトタイプの全体像を示す。

距離データ及び反射光の強さが取得可能な測距センサとして STMicroelectronics 社製の測距センサ VL6180X を用いる。なお、VL6180X は 850nm の赤外線レーザーを使った Time of Flight 方式の測距センサであり、ここでの反射光の強さは、測距センサが距離計測のために発したレーザー光が物体に当たって反射して戻ってきた反射光の強さを示す。単位は Mega-counts per second であり、1 秒あたりにレーザーから発せられた光のうち物体に反射して受光部に当たったフォトン数を示している。

測距センサアレイには、測距センサを 2 行 9 列の計 18 個設置する。各測距センサの行間隔は 8mm、列間隔は 5mm である。センサの行と列の間隔は、プロトタイプボードの設計にあたって位置調整が可能な 2 個の測距センサを利用してセンサの計測精度の調査から決定している。配置数は手首幅の制約（センサボードのサイズの制約）から決定した。

測距センサの設置位置や向きは、VL6180X の検出範囲が画角 25 度の円錐状に広がっていることを考慮して決定した。行間隔については、第 2 指を想定して先端を半球状に加工した木製の直径 12mm の棒を 5mm から 10mm 程度センサの高さ方向に動かした場合に、上下のセンサの反射光の強さに差が表れる間隔としている。また、手の甲にセンサが近すぎると手の甲との干渉により反射光の強さを正しく収集できなくなることから手の甲から遠い位置に測距センサの発光部がくるように配置している。列間隔については、最も計測精度が低下すると想定される隣接する 2 個のセンサの中間位置において両方の測距センサが取得する距離データの精度が仕様書の誤差範囲内に収まる間隔としている。なお、計測対象範囲については、センサから X 軸方向に 20mm 以上の 80mm 以内としている。結果、2 行 9 列計 18 個の測距センサを並べている。以降、2 行あるセンサアレイのうち体表面(手の甲)に近い側の測距センサアレイを下段、遠い側を上段と呼ぶ。

この測距センサアレイをフラットケーブルで NXP Semiconductors 社製のプロトタイプピンボード mbed LPC1768 に接続し、18 個の測距センサを I2C 通信（データ通信用）と IO エキスパンダ（素子選択用）を用いて制御する。VL6180X は、Time of

Flight 形式の測距センサであるため、2 個以上の VL6180X を同時に発光すると干渉を起して正しく距離を計測することができない。したがって、今回では発光している VL6180X が常に 1 個になるように時分割処理を行っている。なお、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 38ms (26Hz) である。

また、LPC1768 と PC との接続はシリアル通信 (115200bps) により行っている。1 度のデータの更新で上段 9 個のセンサの距離データ (全 9 バイト) と全 18 個のセンサの反射光の強さを示すデータ (1 個のセンサにつき 2 バイトの全 36 バイト) を取得する。したがって、1 度の通信で 1 バイトの通信用ヘッダーと 45 バイトのデータの計 46 バイトを PC に送信している。

3.3.2 指の位置推定

本項では、x,y 座標の推定方法について述べる。指位置推定には、上段の測距センサアレイを利用する。これは、下段の測距センサが取得する距離データは、手の甲の面との干渉により指までの距離を正しく計測できなかったためである。また、指の位置推定は、x,y 座標それぞれ別の方法により推定する。y 座標の推定には反射光の強さ、x 座標の推定には距離データを利用する。

まず、指の位置の y 座標を求める方法について述べる。y 座標の推定には反射光の強さの分布を用いる方法を提案する。図 3.5 は、手の甲と操作に用いる指、Novest を鉛直上方から見た図である。ここでは手首幅方向に測距センサを 5 個並べた状態を例に説明する。測距センサアレイの前に垂直に指が置かれた場合、指の y 座標は指が測距センサアレイに最も近い位置 (指の x 座標が最も小さい位置) の y 座標、つまり反射光の強さが最も強くなる y 座標と等しいと考えられる。しかし、5 個しか測距センサがない場合、センサから得られる反射光の強さのデータは、図 3.5 左の棒グラフのように 5 個だけであり、センサの間の y 座標を求めることができない。

そこで、各センサから得られる反射光の強さの離散的な分布に対して 3 次スプライン補間を行い、連続的な分布とすることにより疑似的に Y 軸方向の分解能を高くする。そして、この連続的な分布の最大値を取る位置を y 座標とする。3 次スプライン補間では計測された反射光の強さのデータ点を必ず通過して、かつ、各データの位置で連続となる 3 次関数を求めることができる。これによりセンサの間にもピークができるようになり、y 座標をセンサの間隔以上に細かく求めることが可能になる。

x 座標の推定には、距離データを使用する。x 座標は、先に推定された y 座標に最も近いセンサの距離データに日本人の第 2 指遠位関節幅の平均の半分に相当する 7.45mm ではなく 6.45mm をオフセットとして加えた値とする (図 3.6)。オフセットの値の変更理由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 14.9mm[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て 6.45mm と設定している。

推定に利用する距離データ及び反射光の強さを示すデータは、指の移動に対する反応速度と位置推定精度を考慮してローパスフィルタ（単純移動平均：反射光の強さを示すデータ 5 個，距離データ 8 個）を用いてノイズを抑制している。

なお，x,y 座標の推定に三角測量のような手法を用いなかった理由は，Time of Flight 方式のセンサは計測する物体の形状の影響を受けると考えられ，実際に計測を行ったところ計測対象である指が測距センサの正面から外れるほど計測される距離データの誤差が大きくなったためである．そこで測距センサの正面からずれる方向である y 座標では距離データを用いる方法ではなく，反射光の強さの分布を用いる方法を取ることにより推定精度を高めている．反射光の強さの分布を用いた理由は，反射光の強さは逆二乗則に基づき減衰するが，指が測距センサの正面にない場合であっても指が同様の位置に置かれた場合には同様の分布を得られるためである．また，x 座標は，y 座標に基づき指の位置に最も近く，最も測定値が信頼できると考えられる測距センサを選択して，その距離データを用いている．物体がセンサの正面付近にあれば，Time of Flight 方式のセンサであることから正しい距離データを返すと考えられるためである。

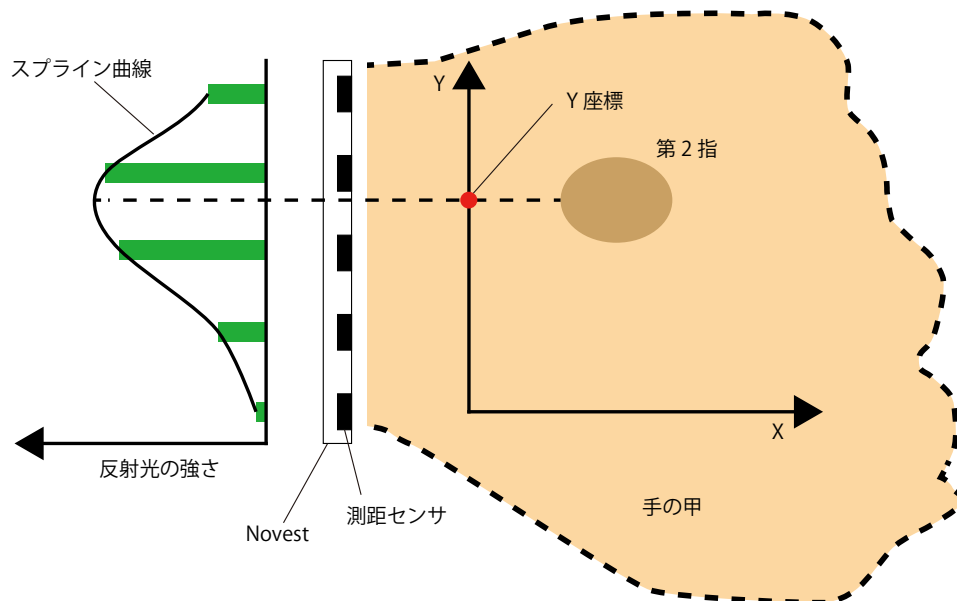


図 3.5 y 座標の推定方法の概要図

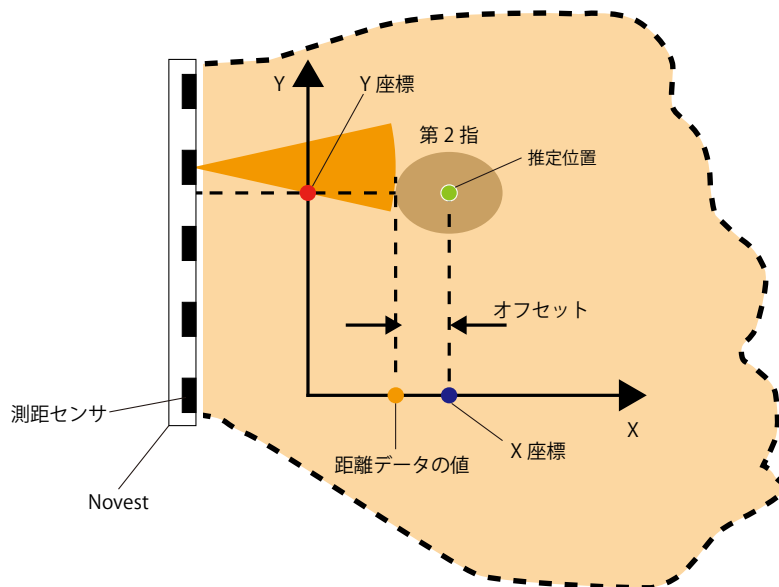


図 3.6 x座標の推定方法の概要図

3.3.3 指の状態識別

今回、指の位置推定及び状態識別を可能にする領域として図 3.7 の左下のマーカを原点とし、図 3.1 に示した座標系において X 軸方向に -10~50mm, Y 軸方向に -5~45mm を検出可能領域（図 3.7 下）と定める。そして、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。なお、ここでの物体が検出される場合とは、指の位置推定結果が検出可能領域内であった場合である。

図 3.8 は手の甲と操作に用いる指、測距センサアレイを側面から見た図である。本研究では手の甲上の指の状態識別において、タッチングとホバリングを図 3.8 のように一定の高さで区切ることを目指す。本研究では、手の甲からの距離が異なる位置に設置されたセンサを用いて、このような指の状態識別を Support Vector Machine (SVM) により実現する。このように区切る理由は、決まった高さを基準に指の状態を識別することにより指を移動させた場合にタッチングとホバリングが入れ替わってしまう場合を抑制できると考えたためである。

なお、SVM は分類に用いられる教師あり学習の 1 種である。SVM は、教師データ



図 3.7 評価実験用の手の甲（上）及び平面（下）のマーカ

として与えられた各クラスに属するデータ点との距離「マージン」を基準として、マージンを最大化するような各クラス間の境界（学習器）を求める。たとえば、2次元平面内に2クラスに分かれたデータ群があるとすると、この場合、SVMは2クラスのデータ群に属する点のうち、2クラス間を分類する直線に最も近い点との距離をマージンとする。そして、このマージンが最大になるような直線を1本定める。また、SVMにおけるマージンには、評価関数に基づき、ある程度の教師データの分類の誤りを許容するソフトマージン、許容しないハードマージンがある。ハードマージンの場合、外れ値により未知のデータに対する性能悪化が考えられるため、本研究ではソフトマージンを用いる。

SVMではどのクラスに属するかが既知である教師データが必要であり、教師データを収集する工程（トレーニングフェーズ）が必要である。本研究の評価実験においては教師データを収集するトレーニングフェーズと識別性能を評価するテストフェーズに分けて実験を実施した。両フェーズにおいて実験参加者にはホバリングの状態では手の甲と指間の距離が一定になるように指示をし、タッチングの場合では手の甲を指で

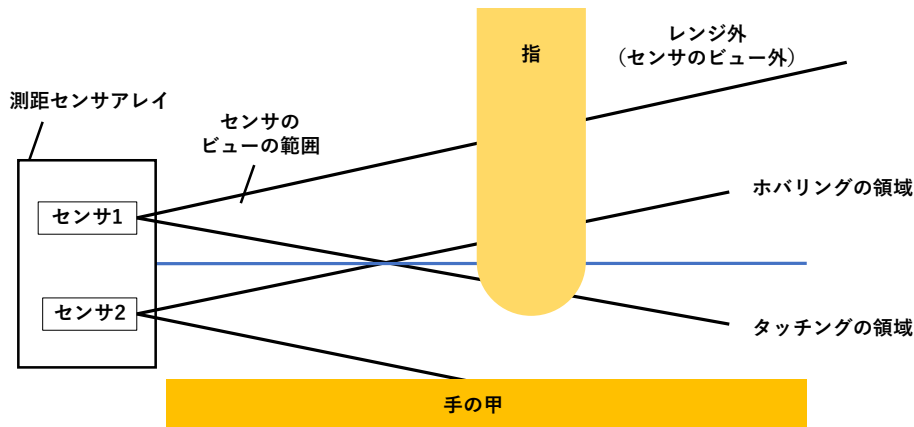


図 3.8 Support Vector Machine による指の状態識別の概要図

触れるよう指示をした。このときのホバリングとタッチングそれぞれのデータを教師データとする SVM を用いることでホバリングとタッチングの境界をなるべく平面に近い形で定められると考えられる。

SVM の実装には、libSVM[97]を用いる。SVM に与えた特徴量は、次にあげる 44 個である。下段に対する上段の反射光の強さの比 (9 個) とその平均・合計・標準偏差・最大値・最小値・範囲、隣接するセンサの反射光の強さの差 (16 個)、上段と下段の反射光の強さの差 (9 個) とその平均・標準偏差・合計、下段の反射光の強さの合計に対する上段の反射光の強さの合計の比である。これらを-1 から 1 にスケールして利用する。

ただし、この指の状態識別方法に関しては評価実験で収集したコメントから、手の甲と操作に用いる指間の距離を一定に保つことが難しいと感じることがわかったため、3.9.2 項にて代替手法について考察を行う。

3.4 評価実験

本章では、Novest の性能評価を目的とした評価実験について述べる。

3.4.1 基礎性能評価実験 (評価実験 1)

Novest の基礎性能評価を目的に、1) Novest の指位置推定精度、2) 推定精度の分布を調査した。また、Novest の利用方法である指 (第 2 指) と手の甲の条件に加えて、指示方法にロボットアーム、被指示面として平面を加えた条件を対象として比較を行うことにより指や面の違いが Novest の位置推精度定及び状態識別精度に与える影響

を確認した。

3.4.2 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。事前アンケートによりスマートフォンとスマートウォッチの利用経験を調査した結果，実験参加者にはスマートウォッチ利用経験者はいなかった。実験参加者全員がスマートフォンを人差し指で操作する際には通常右手を使い，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。また，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。

3.4.3 セットアップ

指示方法と被指示面の違いがNovestの指の位置推定精度と状態識別精度に与える影響を調査するため，指示方法（指，丸棒）及び被指示面（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3.9）でポインティングタスクを実施した。実験条件は以下の4種類：

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

である。

丸棒は，直径12mmの円筒形のヒノキ材であり，指示に用いる指の形状に近づけるため先端を半球状に加工した。本評価実験では，この丸棒をヴェ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，0.87mm（SD=0.43mm）であった。この精度は，タッチパネル（Microsoft社製Windows Surface Pro，OS: Windows 8.1 Pro 64bit，CPU:i5-3317U@1.7GHz，RAM:4GB）とSurfaceペン，Processingのアプリケーションにより計測を行った結果である。

ポインティングタスクのターゲットとして図3.7のように手の甲上及び平面に十字のマーカを1cm間隔で20箇所用意した。1個のマーカの大きさは5mm×5mmである。なお，マーカを手の甲に付ける際には，マーカ毎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。このタトゥーシールはインクジェットプリンタで印刷することができる。また，実験条件を統制するため，タトゥーシールにマーカとともに測距センサアレイを設置する位置も印刷した。実験参加者

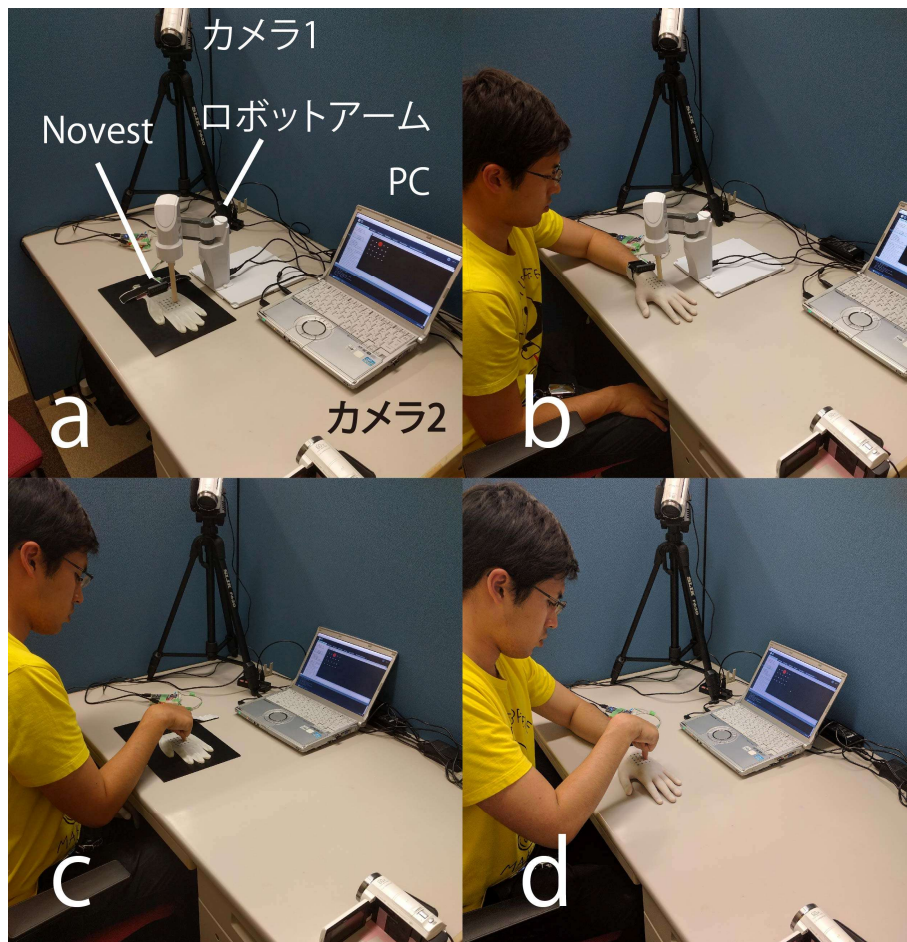


図 3.9 評価実験 1 における実験条件：a) 丸棒+平面, b) 丸棒+手の甲, c) 指+平面, d) 指+手の甲

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印刷された測距センサアレイの先端部分と一致し、かつ、第 3 指（中指）の手首方向への延長線上と印刷された測距センサアレイの前面が垂直になる位置とした。手の甲と平面の表面の状態を一致させるため、平面条件ではプラスチック製の板に手袋を貼り付けた（図 3.7 下）。

次に各実験条件について述べる。手の甲を被指示面とする実験条件 b) および d) では指を伸ばしてもらい、手のひらが机につく状態とした。また、肘も机につけることにより左手を安定させた。また、実験条件 b) 及び d) において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て平面を被指示面とする実験条件 a) および c) では Novest の下に高さ方向のオフセットとして 5mm のアクリル板を挿入した。

実験後にポインティングの様子を確認するため、実験中の様子を図 3.9 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@2.5GHz, RAM:8GB）上の Processing で実行した。本評価プログラムでは 3.3 節で述べ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。また、位置推定と同時に SVM の特徴量の算出も行い、指位置推定結果が検出範囲内だった場合には続いて指の状態識別を行う。

3.4.4 手続き

実験は、実験の説明及び事前アンケート、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、実験参加者が指示を行う実験条件 c) と d) は実験参加者毎に入れ替えた。

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、Novest が計測対象とする第 2 指の遠位関節と近位関節それぞれの関節厚と関節幅の計 4 か所（図 3.3）を[95]に定められている方法により計測した。

ポインティングタスクでは、評価実験用プログラムが画面に表示した赤いマーカ（図 3.10）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て全 20 箇所のマーカそれぞれを 3 回ずつ指示してもらった。この点についてはロボットアームを用いた丸棒の場合でも同じである。これを 1 セットとしてタスク 1, 2, 4 では 3 セット、タスク 3 では 1 セット実施した。なお、1 回の指示につき、15 回分の指位置推定結果と指の状態識別結果、SVM の特徴量を保存した。セット間及びタスク間には 2 分間の休憩を挟んだ。その間に、タスク中に何か感じたこと、気づい

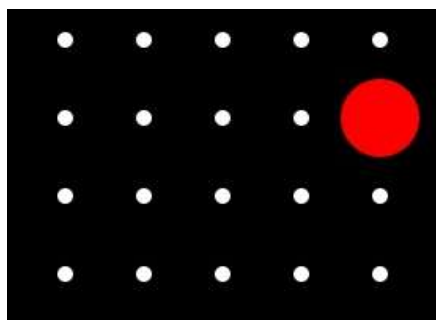


図 3.10 評価実験用プログラム
（白い点はマーカに対応しており、赤い点が指示位置を示す）

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した。なお、タスク中、指の姿勢の意図的な調整やマーカ以外の位置の指示などを防ぐため、実験参加者のポインティングの結果（指位置推定結果及び状態識別結果）に関するフィードバックは一切行わなかった。さらに、実験参加者への注意事項として、

- 1) ゆっくりでも正確に指示するよう心がけてもらうこと
- 2) 指が面に対して垂直になるよう意識すること
- 3) 右腕を体側や机などに接触させないこと
- 4) 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、セット毎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。キャリブレーションは測距センサアレイの仕様書に従って行った。測距センサアレイから50mmの位置に白色の物体を設置して複数回距離計測を行い、50mmとの差分をオフセットとして以降の計測された距離データに加算する方法を取った。また、キャリブレーションを行ったのは距離データのみである。

タスク1, 2ではタスクを始め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て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ており、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机の上に置いてもらい、ロボットアームのポインティングが終了するまで左手を動かさないように注意して待ってもらった。

タスク4ではタスクを開始する前に少なくとも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10~15mm程度離れた状態を保つように注意してもらった。なお、練習の際には評価実験用プログラムは3.3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及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。

全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収集した。1度の試行で指示する回数は、タスク3と同じく1セット分である。これ

を次節で述べる Kruskal-Wallis 検定の対象とした 8 人分，つまり 8 回行った。

3.5 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 3.11，分布を図 3.12 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 57600 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ものと考えられる。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。

3.5.1 指の位置推定精度

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 (実験条件 d) が最も低く，平均 4.2mm (SD=1.2mm) であった。その他の実験条件における指位置の推定精度は，実験条件 a), b), c) それぞれ平均 2.1mm (SD=0.3mm)，平均 3.0mm (SD=0.9mm)，平均 3.6mm (SD=1.1mm) だった。

ホバリングでの位置推定精度は平均 5.5mm (SD=1.4mm) であった (図 3.13)。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 21600 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。

3.5.2 指の状態識別精度

タッチング (タスク 1) とホバリング (タスク 4) の識別における混同行列を表 3.1 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

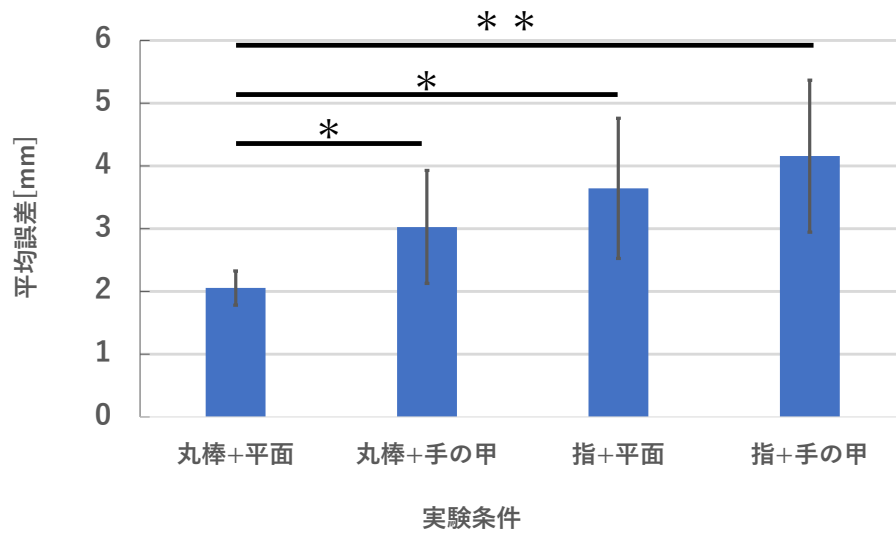


図 3.11 タッチングの位置推定精度 (エラーバーは標準偏差を示す) (*:p<.05, **:p<.01)

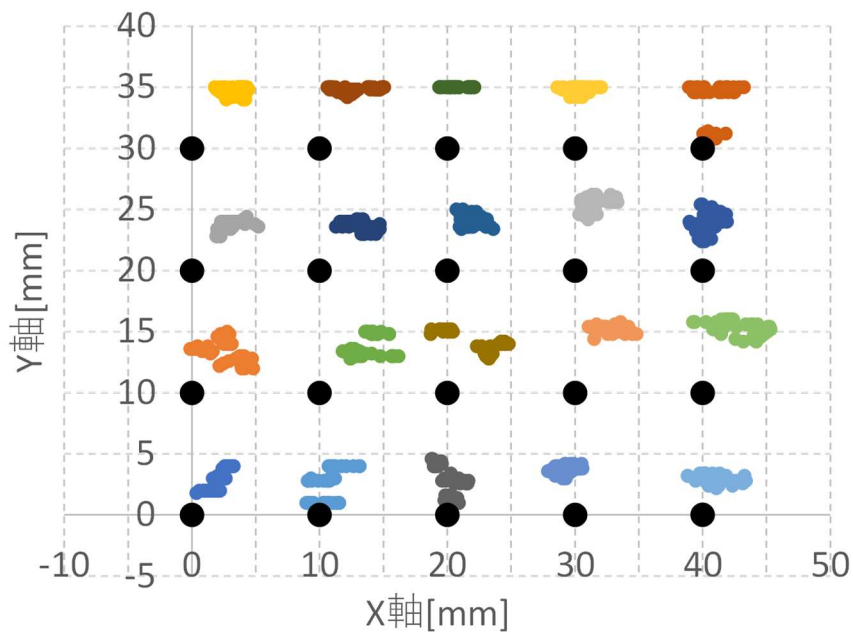


図 3.12 指+手の甲での位置推定結果 (P1)

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。

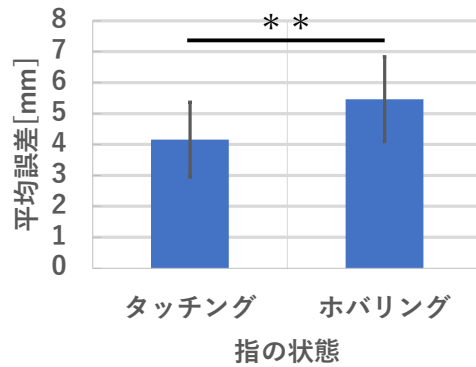


図 3.13 タッチングとホバリングの位置推定精度 (エラーバーは標準偏差を示す)
(**:p<.01)

表 3.1 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

		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

3.6 考察

3.6.1 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ついて, Holz ら[98]に則れば, 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, 6.6mm (SD=1.3mm) 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 Holz ら[98]の traditional touch input で直径 15.0mm, OmniTouch[9]の wall 条件で直径 16.2mm 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今回の検出可能領域に 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.

3.6.2 指示方法の影響

実験条件 a) (丸棒+平面) と実験条件 c) (指+平面) との間 (被指示面が平面であり、指示方法が異なる 2 群間) 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と考えられる。

指のサイズ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 か所の測定結果と、指+平面の X 軸方向及び Y 軸方向の平均誤差との決定係数を算出した (図 3.14, 図 3.15)。指+平面での第 2 指の各部位と X 軸方向及び 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、指のサイズ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 3.12 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、実験参加者全体で実験条件 d) (指+手の甲) で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 3.9 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

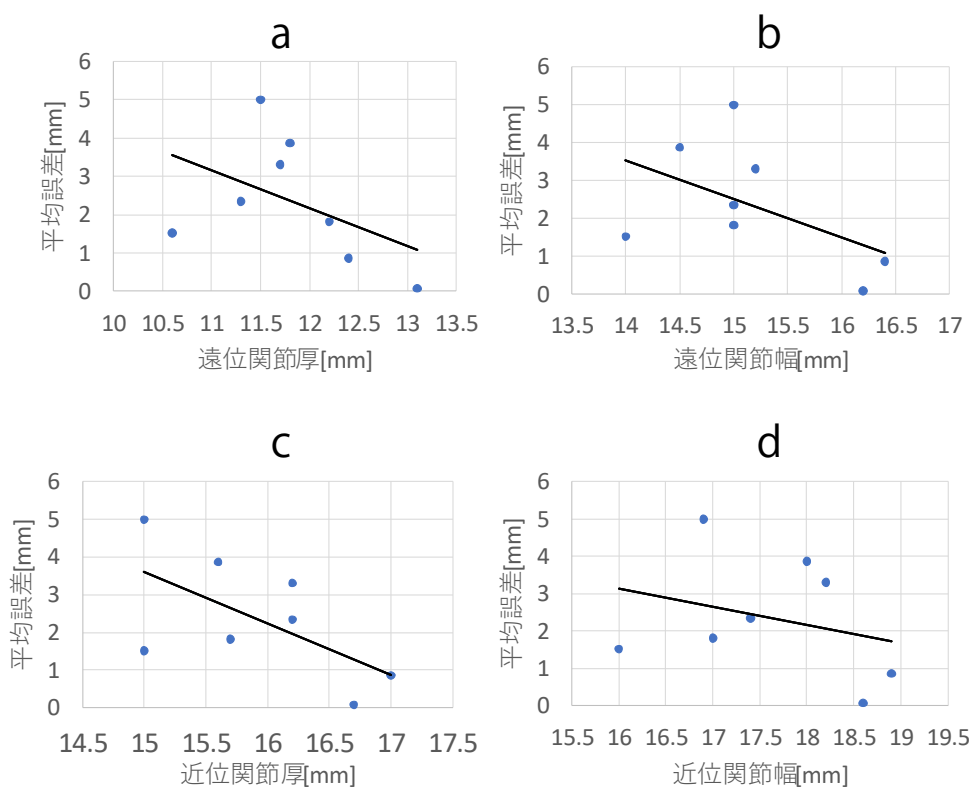


図 3.14 第 2 指の各部位と x 軸方向の平均誤差との回帰分析結果

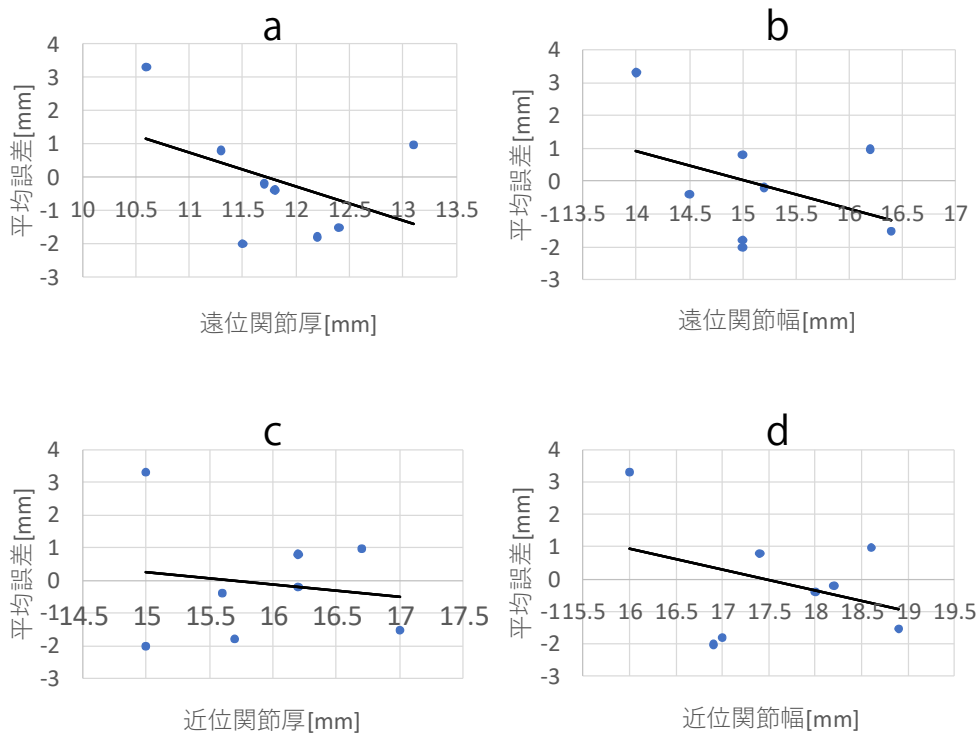


図 3.15 第 2 指の各部位と y 軸方向の平均誤差との回帰分析結果

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、指のサイズ（図 3.3 に示す 4 か所の寸法）よりも指の姿勢がより大きな影響を与えたと考えられる。

3.6.3 被指示面の影響

実験条件 a) (丸棒+平面) と実験条件 b) (丸棒+手の甲) との間（指示方法が丸棒であり、被指示面が異なる 2 群間）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と考えられる。一方、指+手の甲・指+平面の実験条件間（指示方法が指であり、被指示面が異なる 2 群）では有意な差はなかった。

指示方法に丸棒を用いた群間で有意差があった原因は、手首付近に測距センサアレイを設置したことにあると考えられる。本実験では、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。しかし、実験参加者が肘を水平方向（机上の平面内）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。

一方、指示方法に指を用いた場合に有意差がなかった理由は、指での指示精度がロボットアームに比べて低く、ばらつきが大きかったためであると考えられる。

3.6.4 ホバリングの位置推定精度及び識別精度

先に述べたように、タッチングとホバリングでは指の位置推定精度に有意差があり、かつ、タッチングに比べ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。本評価実験のホバリングでのポインティングタスクは、実験参加者に指の位置や状態に関する視覚的フィードバックを一切与えなかったため、ホバリング状態での指の状態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。これについては複数の実験参加者からホバリングでは直接マーカに触れないため、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。また、測距センサの特性上、測距が可能なセンサビューの境界付近では距離データの標準偏差が大きくなる。こちらについても指の状態識別結果に関する視覚的フィードバックが与えられなかったために、距離データの値が不安定な位置に指が位置していたと考えられる。

また、タッチングとホバリングの識別精度の平均は、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 5mm 程度と小さかったため、ホバリングとタッチングの教師データの差が小さく識別精度が低下したと考えられる。この識別精度低下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、実際に Novest のホバリング状態を利用するアプリケーションでは、ホバリング状態の際にディスプレイにポインタを表示する。つまり、ユーザは操作に用いる指がセンサビュー内にあるかどうか、つまり、指がレンジ外か、ホバリングとタッチングのどちらか(レンジ内)を視覚的フィードバックにより確認することができる。したがって、評価実験の際にも指の状態(レンジ外かレンジ内か)に関するフィードバックを与えることにより指の位置推定と状態識別の両機能の精度が向上すると考えられる。そのため、評価実験 2 で用いる評価用アプリケーションでは指などの物体がセンサビュー内に存在しているか否かを示す視覚的フィードバックを提示する機能を追加した。

3.7 実利用状況を考慮した性能評価実験（評価実験 2）

本節ではよりスマートウォッチの実利用状況を考慮した実験環境における Novest の

指の位置推定及び指の状態識別精度の評価を目的として実施した実験について述べる。本実験では、スマートウォッチの実利用状況を想定して指 + 手の甲の組み合わせで座位と立位の 2 姿勢を対象としたポインティングタスクを実施した(図 3.16)。

3.7.1 指の状態識別機能の修正

評価実験 1 での指の状態識別については、3.3.3 節で述べたようにセンサビュー内に物体がない場合をレンジ外として、物体がある場合のみ SVM の状態識別を行った。評価実験 2 を実施するにあたって先行研究[7]を参考に、レンジ外も SVM の状態識別の対象とした。これにより、指の状態識別を統一的に扱うことが可能となる。識別に利用する特徴量は 3.3.3 項で述べた特徴量と同じである。

3.7.2 実験参加者

基礎的評価実験に参加して外れ値とならず分析を行った 8 名の実験参加者（女性 1 名、男性 7 名、平均 23.8 歳 (SD=4.0 歳)、P1-P8) に再度実験に協力をしてもらった。なお、本実験の所要時間はおよそ 1 時間 40 分であり、謝礼として 2,000 円を支払った。さらに、本実験は実験の構成や収集するデータ数について[7, 9, 44]の実験を参考に設計を行った。

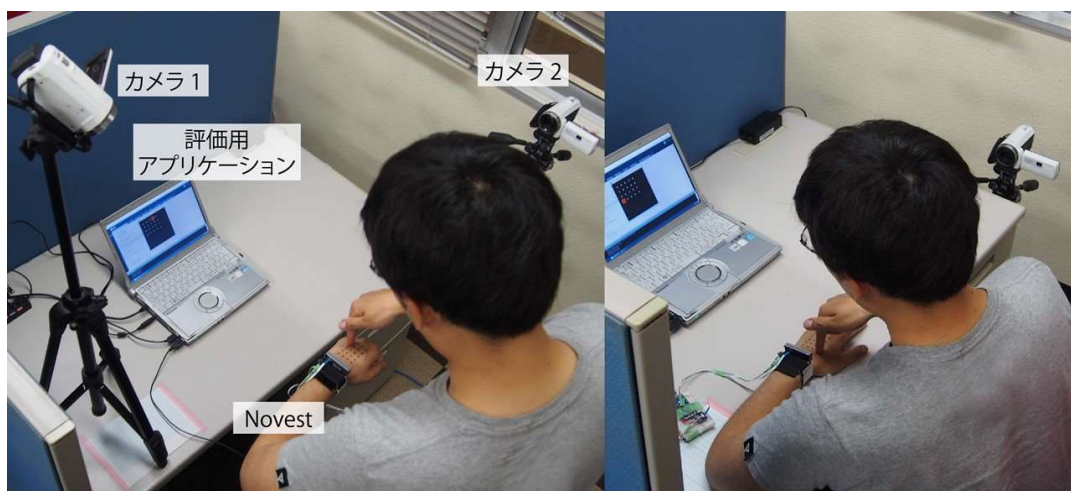


図 3.16 評価実験 2 の実験環境 左) 立位, 右) 座位

3.7.3 セットアップ

本実験では、座位（タスク 1）及び立位（タスク 2）において Novest の性能評価（指の位置推定及び指の状態識別精度評価）を行う。加えて、指の状態である 3 状態（レンジ外 / ホバリング / タッチング）を非タッチング（レンジ外 / ホバリング） / タッチングの 2 状態に分類した場合のタッチング識別精度の評価も行った。座位では、実験参加者は、左手は指を伸ばした状態で机に腕が付くようにしてもらい（図 3.16 右）、立位では、指の状態は任意として腕は体側につける以外に支えがない状態を維持してもらった（図 3.16 左）。

マークは、基礎的性能評価実験で使用したのと同じもの（同じマークサイズ・マーク数・マーク間隔）を利用した。ただし、本実験では、実験参加者の手の甲に直接シールを貼り付けた。また、実験中の様子を 2 台のビデオカメラで撮影した。カメラ 1 はどのように実験参加者がポインティングを行っているかを確認するために記録した。カメラ 2 は実験参加者の指の状態（手の甲との距離）を確認するために記録した。

本実験を実施するにあたり、評価実験 1 での結果を考慮してシステムに変更を加えた。評価実験 1 ではホバリングを含む、指の状態識別に関する視覚的フィードバックを一切与えなかったために、ホバリングのデータが曖昧になり識別精度が低下したと考えられる。そこで、実際のアプリケーションではホバリングとタッチング状態ではポインタによる視覚的フィードバックが与えられることを考慮して両フェーズ時に指がセンサビュー内に存在するか否かを示す視覚的フィードバック機能を実装した。

この機能を実装するため、まず、センサビュー内に物体があるかどうかを識別するための基準を設けた。センサビューの境界付近では距離データが不安定になり標準偏差が大きくなることから距離データの標準偏差を指標として利用した。事前の実験により標準偏差の調査を行い、標準偏差がある一定値よりも小さくなった場合にセンサビュー内に指などの物体が存在していると判断した。

上段の測距センサ毎に 8 個の距離データ（ローパスフィルタを適用するデータと同じデータ）を使って標準偏差を算出し、さらにこの標準偏差 10 個の移動平均を算出して指標とした。上段のセンサ毎に値が算出できるため、合計 9 個の標準偏差の移動平均を取得できる。これらの標準偏差のうち、1 個以上の標準偏差が 0.1mm 以上 2.5mm 以下であった場合に、Novest のセンサビュー内に物体が存在していると判断した。下限値を 0.1mm 以上とした理由は、センサビューに物体が存在しない場合、距離データが 0 となり、標準偏差が 0mm となるためである。上限値については、事前の実験で指を Novest のセンサビュー内で動かしている場合及びセンサビューの境界付近において指の位置推定が正確に機能する場合で安定して識別できる値として決定した。

視覚的フィードバックは、センサビュー内に物体が存在しない場合に評価用アプリケーションの画面全体を赤く、存在する場合には黒くするという方法により与えた。ただし、ホバリング及びタッチングのデータ収集開始時もしくは収集途中で画面が赤くなってもデータの保存は継続して行った。

3.7.4 手続き

本実験は、実験の説明、ポインティングタスク、自由記述のアンケートの順に行った。順序効果を取り除くため、座位（タスク 1）と座位（タスク 2）は実験参加者毎に入れ替えた。基礎的性能評価実験と同様に、実験参加者には評価実験 1 で利用した評価用アプリケーション（図 3.10）に従ってポインティングを行ってもらった。マークの更新はフットペダルによって行った。フットペダルが踏まれてからデータの保存を開始して保存が終了したのちビープ音を鳴らした。ビープ音が鳴り終わったあと、新しいマークを提示した。

本実験では、実験参加者に以下の 7 個の指示を行った。

- 1) ゆっくりでも指示された位置を正確に指示すること
- 2) 指示に用いる指は後前腕部に垂直にすること
- 3) 左手と左腕は可能な限り動かさないようにすること
- 4) 指示されたマークを指示してからフットペダルを踏むこと
- 5) ホバリングを行う際には指が手の甲に近づけすぎないように注意すること
- 6) タッチングの際には指を強く押し付けすぎて指が曲がらないようにすること
- 7) フットペダルを踏んでからビープ音が鳴るまで指を動かさないようにすること

3.7.5 トレーニングフェーズ

はじめにレンジ外のデータを 500 個収集した。この際、実験参加者の左手の甲や右手の指示に用いる指がセンサビュー内でないこと（評価用アプリケーションの画面が赤いこと）を確認しながら収集した。次にホバリングのデータを収集した。実験参加者には、手の甲からポインティングに用いる指が 15mm ほど離れるように指示をした。加えて、手の甲に近づきすぎないように指示した。また、評価用アプリケーション画面が黒い状態を確認してからフットペダルを踏むように注意した。1 秒間の間に 25 個のデータをそれぞれのマークにおいて収集した。最後に、タッチングのデータを 2 秒間の間に 50 個のデータをそれぞれのマークにおいて収集した。ホバリングとタッチングのデータを収集する際の指示位置の提示順序はランダムとして、各マークを一度だけ提示した。

ここまでの一連の流れを 1 セットとして合計 3 セット実施した。それぞれのセット間には少なくとも 2 分間の休憩を設けた。実験参加者から申請があった場合には最大 5 分間まで延長した。なお、休憩ごとに評価実験 1 と同じく Novest はキャリブレーションを行い、再装着を行った。また、休憩時間での実験参加者の行動に制約は設けなかった。

最終的に、実験参加者毎に非タッチング / タッチングクラスでそれぞれ 6,000 個のデータを収集した。そしてトレーニングフェーズで収集したすべてのデータをトレ

ニングデータとして指の状態識別器を生成するために使用した。

3.7.6 テストフェーズ

テストフェーズの手続きは収集するタッチングのデータ数を除いてトレーニングフェーズと同じである。テストフェーズにおいては、すべての指の状態においてそれぞれのマークにつき 25 個のタッチングのデータを収集した。つまり、3 状態（レンジ外/ホバリング/タッチング）のすべての状態において 500 個ずつのデータを収集した。ここまでの一連の流れを 1 セットとして、合計 3 セットを実施した。したがって、テストデータの合計は 72,000 個（500 データ×3 状態×3 シーケンス×2 姿勢×8 実験参加者）である。テストフェーズではトレーニングフェーズの最後に生成した per-user classifier を用いてリアルタイムで指の状態識別を行い、その結果を保存した。

3.8 結果

位置推定精度の結果を図 3.17 に示し、指の状態識別の混同行列を表 3.2 に示す。

3.8.1 指の位置推定精度

指の位置推定精度については、X、Y 軸それぞれの位置推定精度が従属変数であり、独立変数は実験参加者の姿勢と指の状態、実験参加者である。

指の位置推定精度は、座位+ホバリング、座位+タッチング、立位+ホバリング、立位+タッチングの 4 実験状況において、それぞれ 4.2 mm (SD = 1.0 mm), 4.2 mm (SD = 1.5 mm), 4.9 mm (SD = 1.4 mm), 5.3 mm (SD = 1.8 mm)であった。それぞれの実験参加者の姿勢においての指の位置推定精度は、4.2 mm (SD = 1.2 mm), 5.0 mm (SD = 1.4 mm)であった。位置推定誤差の平均に対して一元配置分散分析を行った結果、有意傾向($p < .10$)があった。TukeyHSD による多重比較を行った結果、座位 + ホバリングと立位 + タッチングとの間に有意傾向($p < .10$)があった。

3.8.2 X 軸における位置推定誤差の平均

X 軸における位置推定誤差の平均を従属変数、指の状態（レンジ外/ホバリング/タッチング）、実験参加者の姿勢（立位/座位）、実験参加者を独立変数（実験参加者を変量因子）として三元配置分散分析を行った結果、実験参加者の姿勢と実験参加者との間 ($p < .001$), 実験参加者の姿勢と指の状態との間 ($p < .01$) との間 ($p < .001$) に交互作用が

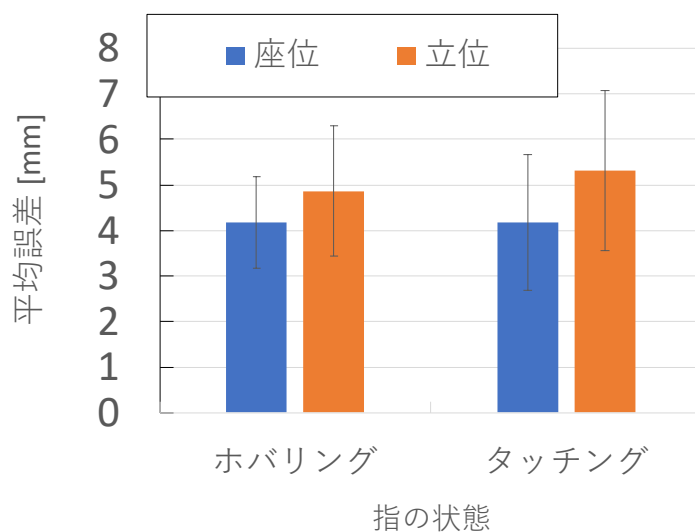


図 3.17 位置推定の平均誤差（エラーバーは実験参加者間の標準偏差を示す）

表 3.2 SVM による混同行列（それぞれの大文字は指の各状態を示す，O：レンジ外，H：ホバリング，T：タッチング）

		per-user classifier						general classifier					
		座位			立位			座位			立位		
		O	H	T	O	H	T	O	H	T	O	H	T
入力	O	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	99.9	0.0	0.0	99.8	0.2	0.0
	H	0.0	96.0	4.8	0.3	95.0	4.6	0.0	92.9	7.0	0.0	92.5	6.9
	T	0.0	4.0	95.1	0.0	1.4	98.5	0.0	6.6	93.4	0.0	4.5	95.5

見られた。特に，X 軸における位置推定誤差の平均は，実験参加者の姿勢と実験参加者の組み合わせで変化している。実験参加者の姿勢と指の状態の組み合わせの場合には，立位 + タッチングにおける誤差が他の実験環境と比較して大きかった。

3.8.3 Y 軸における位置推定誤差の平均

X 軸の場合と同様に，Y 軸における位置推定誤差の平均を従属変数，指の状態，実験参加者の姿勢，実験参加者を独立変数（実験参加者を変数因子）として 3 元配置分散分析を行った結果，実験参加者の姿勢と実験参加者との間($p < .001$)と，指の状態と実験参加者との間($p < .05$)に交互作用があった。この結果から Y 軸における誤差距離の平

均は実験参加者に依存して変化していると考えられる。これをより詳細に分析するため、実験参加者を独立変数とする 1 元配置分散分析を実施し、その結果、実験参加者に主効果が見られた ($p < .01$)。したがって、Y 軸における誤差距離の平均は、実験参加者のメンタルモデルもしくは指示に用いる指がマーカを指示する際の癖により変化する可能性がある。この点に関しては、Holz ら[98]の結果と一貫している。

また、評価実験 1 にて計測した指のサイズを水準として、X,Y 軸における位置推定誤差の平均を対象に一元配置分散分析を行った。しかし、有意差はなかった。さらに、決定係数の算出を行った結果、それぞれの部位の X,Y 軸における誤差距離の平均に対する決定係数は、近位関節幅：0.07, 0.14, 遠位関節幅：0.00, 0.03, 近位関節厚：0.08, 0.10, 遠位関節厚：0.06, 0.07 であった。したがって、それぞれの軸における距離誤差の平均と指示に用いる指の各部位との関連は小さく、Novest はユーザの指の形状や大ききの影響を受けにくいと考えられる。

3.8.4 指の状態識別精度

P5 の 3 回目の立位の general-classifier の結果が、Smirnov-Grabbs 検定により 1% の有意水準で外れ値として検出された。したがって、per-user classifier の場合においても、general classifier の場合と同じ 3 回目のデータの結果を取り除いた。

指の状態識別精度は、per-user classifier をデフォルトパラメータで用いた場合、リアルタイムでの識別精度は立位と座位、両姿勢においてそれぞれ 94.5% (SD = 4.5%), 93.2% (SD = 7.4%), 93.9% (SD = 6.1%) であった。さらに、グリッドサーチによりパラメータ調整を行い、事後処理により識別精度を算出した結果、座位と立位、両姿勢のそれぞれにおいて、97.2% (SD = 2.8%), 97.9% (SD = 3.2%), 97.5% (SD = 3.0%) であった。

グリッドサーチによるパラメータ調整を行った general classifier を使用して、事後処理により識別精度を算出した結果、座位と立位、両姿勢のそれぞれにおいて 95.5% (SD = 3.9%), 96.0% (SD = 4.2%), 95.7% (SD = 4.0%) であった。この識別精度は、一名の実験参加者を一つのデータセットとして leave-one-out cross validation により算出した。グリッドサーチにより調整されたパラメータはみな $C = 512, \gamma = 0.5$ であった。タッチ検出精度は、同じパラメータで 95.8% (SD = 3.9%) であり、指の状態識別精度とほぼ同程度の精度であった。

per-user classifier と general classifier の両方の精度について詳細に調査するため、姿勢と実験参加者を水準として 2 元配置分散分析を行った。なお、実験参加者を変量因子とした。デフォルトパラメータの場合とグリッドサーチによるパラメータ調整を行った場合の両状態に対して分散分析を行ったが、有意差はなかった。

結果、本評価実験における指の状態識別精度は、評価実験 1 の場合よりも高くなった。この理由は、評価実験 1 では指の状態に関する視覚的フィードバックが与えられなかったためであると考えられる。

3.9 考察

3.9.1 評価実験 1 と評価実験 2 の比較

結果的に、本実験での指の位置推定と指の状態識別精度は、基礎的性能評価実験でのそれらの精度を上回る結果となった。本来であれば、安定した座位のみを対象に実施した評価実験 1 の結果の方が左腕の支えがなく不安定である立位の状態を含めた評価実験 2 の場合よりも精度が高くなるはずである。この要因として本評価実験においては実験参加者に指の状態に関する視覚的フィードバックを与えたことによるものであると考えられる。

実験参加者は指がセンサビュー内にあるかどうかの視覚的フィードバックが与えられたことによりフィードバックをガイドのように用いることができたと考えられる。視覚的フィードバック切り替えの基準を距離データの標準偏差としたため、センサビュー境界付近の不安定な距離データがなくなり、特にホバリングとタッチングの基準が明確になり指の 3 状態の識別が容易になったと考えられる。

また、P5 の指の状態識別結果が外れ値となった理由について考察するため、ビデオによる確認を行ったところ、指と手の甲が接近していた上に、手の甲が下向きに曲げられていたことが分かった。この 2 点が識別精度を低下させた原因であると考えられる。

3.9.2 自由記述

自由記述においては、複数の実験参加者から立位でのポインティングの方が手の甲を水平になるように調整できたため、簡単だったとコメントをもらった。指の状態を従属変数とした 3 元配置分散分析では両軸において実験参加者の姿勢と実験参加者に交互作用があったことから、座位でのポインティングが得意な実験参加者と立位でのポインティングが得意な実験参加者がいたことが示唆された。

また、手の甲が平らではなく、手の甲と指間の距離が変化するため、手の甲と指間の距離を一定に保つことが難しかったもしくは不安だった (P1,P7,P8) とコメントがあったことから、SVM によるタッチングとホバリングの高さによる識別するインタフェースデザインが操作を難しくしていたことが考えられる。

この点に関して指の状態を、閾値を利用して識別する手法の検討を行った。ホバリングについては、指の位置推定に用いた測距センサの反射光の強さを示すデータに対して閾値処理を行い、ある閾値を超えればホバリングとする。タッチングについては、指位置推定に用いた測距センサ (上段) とその直下の測距センサ (下段) が取得した反射光の強さの差が閾値を下回ればタッチングとする。レンジ外については、検出可能

領域内に何も物体が検出されない場合とする。これらの閾値については調整により決定した。この方法ではタッチングを手の甲付近だけにすることができるため、操作性の難しさが解消されると考えられる。

3.10 補助的評価実験

本節では、手首の角度が本手法の指位置推定及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補助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、平面の角度は、平面の場合を 0 度として手首を曲げる方向が伸展方向の場合を正の角度、屈曲方向の場合を負の角度として扱う (図 3.18)。

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の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 度の指示平面内のずれとして定義する。

3.10.1 セットアップ

実験環境を図 3.19a 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。ロボットアームが把持する丸棒は評価実験で使った丸棒と同じものを使用した。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の甲の表面とみなす。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 XPS13, OS: Windows 10 Pro 64bit, CPU:i7-7560U@2.4GHz, RAM:16GB) 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 3.19b)、角度計測を行いながら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 3.19c)。

タッチングの状態では丸棒の先端をおよそ 1mm 浮かせた状態とした。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。

なお、本実験での指の状態識別には SVM を用いた手法を適用している。



図 3.18 手首の回転方向とその名称

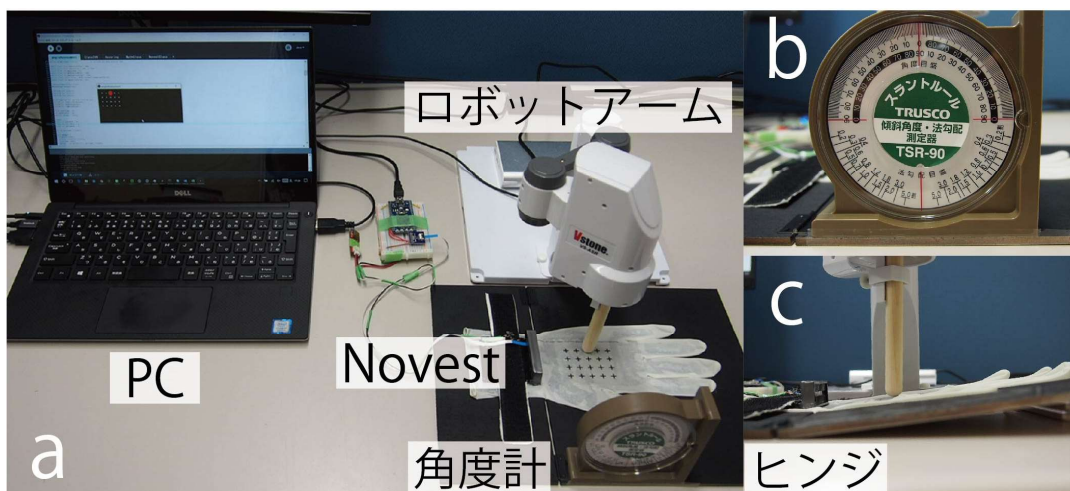


図 3.19 評価実験 2 の実験環境： a) 全体図， b) 角度計， c) 正面図（外転方向 6 度の場合）

3.10.2 手続き

まず、状態識別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い、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 セットとして角度毎にタッチングとホバリングそれぞれ合計 2700 個の教師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識別を高精度に推定できたため、この角度のデータを教師データとして利用した。また、先の評価実験 1, 2 と同様にセット間には Novest を取り除き、キャリブ

レーションを行ったのちに再設置した。

テストデータの収集は、ホバリングを含んだ位置推定及び識別推定を-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2700個（900個×3セット）である。

3.11 結果

指位置推定及び状態識別精度の結果をそれぞれ図 3.20, 図 3.21, 図 3.22 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度までであれば、ホバリングの指位置精度は低下するものの、95%以上の精度で指の状態識別が可能であった。

3.12 考察

伸展方向において指の位置推定及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のビューの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、内転角度が大きくなるにつれ、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、上下段のセンサが取得する反射光の強さ

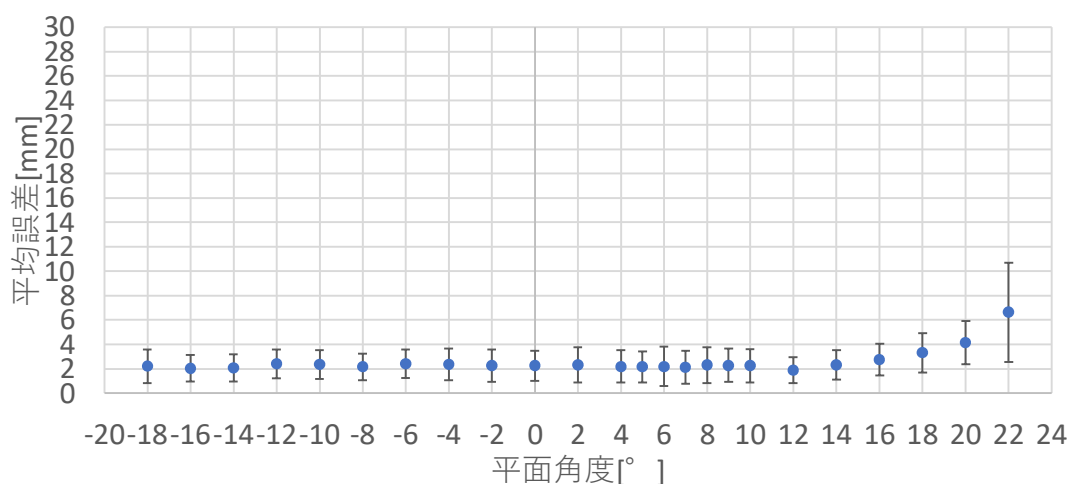


図 3.20 平面角度によるタッチングの位置推定精度変化（エラーバーは収集したデータの標準偏差を示す）

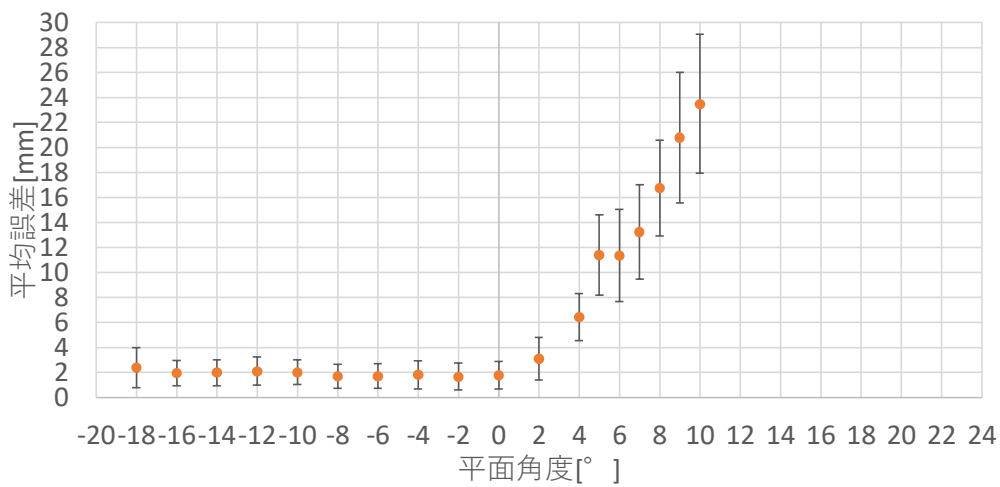


図 3.21 平面角度によるホバリングの位置推定精度変化 (エラーバーは収集したデータの標準偏差を示す)

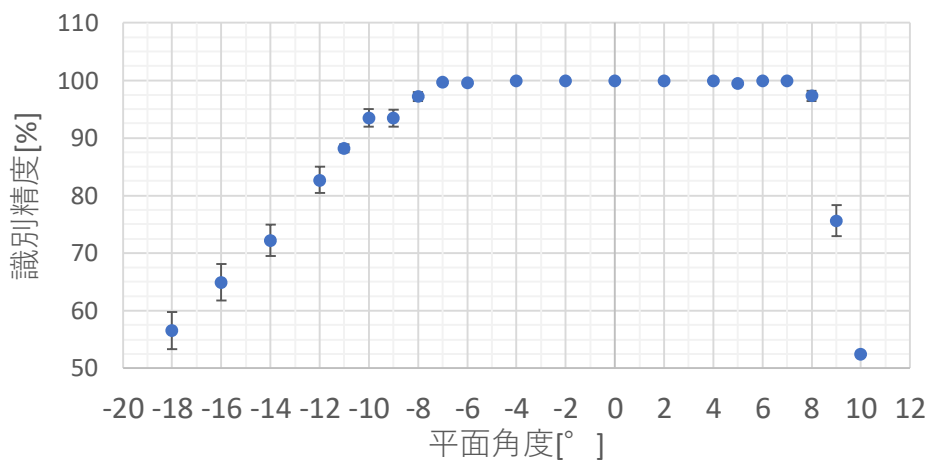


図 3.22 平面角度による状態識別精度変化 (エラーバーは収集したデータの標準偏差を示す)

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。

より大きな手の甲の角度変化に対応する方法として、より画角の広いセンサを用いる方法や、センサの設置角度をわずかに手首の伸展もしくは屈曲方向に傾けることにより検出範囲を広げる方法が考えられる。

第4章 eyes-free 入力を含めた手の甲上 におけるポインティング特性調査

第3章では、手の甲上の3次元空間に挿入された指の3次元座標の推定方法を提案して、プロトタイプである Novest を示して手法の有効性を確認した。しかし、手の甲に展開された仮想的なインタフェースを効率的に利用するためには、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）に関する知見が必要であると考えられる。この知見を得ることで手の甲のどのような位置にどのようなサイズでインタフェースを配置すべきかの指針が得られるため、手の甲を効果的に利用するインタフェースの開発に繋がると考えられる。

本章では、手の甲を入力領域として利用する入力インタフェースの設計指針を示すことを目的として、ユーザの手の甲上におけるポインティング特性に関する知見を設計指針としてまとめることを目的に行った実験と、まとめた設計指針の Novest への適用とその結果を示す。そして、アプリケーションを提示して最後に考察について述べる。

ポインティング特性の調査を目的とした実験では、3種の指標（指示精度、調整時間、Accuracy Rate）を対象として仮説検証を行い、また、視覚の状態については手の甲から触覚フィードバックが得られることから eyes-free 入力への応用も考慮した設計指針を示すため、目視できる状態（Sighted）及び目視できない状態（Unsighted）の両状態を対象とした。

本ポインティング特性調査実験では、はじめに、対象とする分割数を検討するための予備実験を実施した。次に予備実験の結果から Sighted, Unsighted 及び両者の比較に関する9個の仮説を立てたのち本実験を実施した。本実験の結果に対して仮説検証を行い、ここから得た知見を設計指針としてまとめた。そして、第3章で示した Novest を対象に設計指針の適用方針と適用した結果を示す。最後に、設計指針を適用した Novest の簡易的な性能評価とアプリケーションの事例を示して考察を行う。

4.1 Sighted/Unsighted を対象とした計測実験

本節では、手の甲を入力領域として利用するインタフェース開発のための設計指針

の策定を目的としたポインティング特性調査実験のセットアップや手続き，対象とする分割数を決定するために実施した予備実験について述べる。

4.1.1 セットアップ

実験環境を図 4.1 に示す。本実験は座位の状態で行った。Sighted では手の甲上のポインティング位置を目視で確認することができるが，Unsighted 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。

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

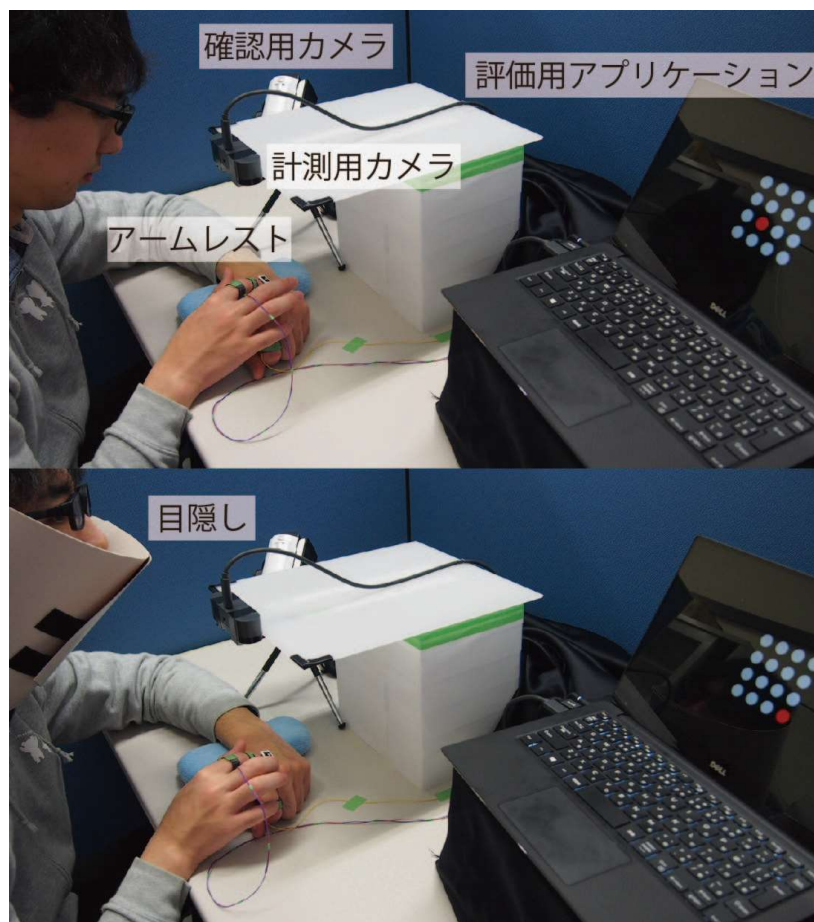


図 4.1 計測実験の実験環境 上) Sighted, 下) Unsighted

うに指示した。また、ポインティング対象の手の甲の領域については、指側が指関節部分、手首側が尺骨茎状突起部までとした。

本実験では、PC(OS: Windows 10 Pro, CPU: Core i7-7560U@2.4GHz, RAM: 16GB)上で動作する Processing の評価用アプリケーションに従って手の甲のポインティングを行うポインティングタスクを行った。手の甲を異なる数に分割して、それぞれの分割数でそれぞれの分割位置をどの程度の精度と時間でポインティング可能かを調査した。

ポインティングタスクで利用した評価用アプリケーションの画面を図 4.2 に示す。図 4.2 は、手の甲を9分割する場合を示している。そして、白い点は指示位置を表し、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。今回、実験参加者への指示位置の提示は図 4.2 のように正方形で行った。

ただし、手の甲上でのポインティングにおいて実験参加者が選択する位置の特徴や自発的に行う工夫も調査するため、手の甲上実際に実験参加者が指で指示する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。実験参加者への実験の説明において、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グループ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を示しながら説明した。

加えて、分割数毎に実験参加者自身が決定した指示位置を可能な限り同じ位置を指示するよう指示した。また、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。また、迅速かつ正確にポインティング可能な位置を検討ための時間に制限は設けず、実験参加者から十分であることを告げられるまでとした。

本実験での計測対象は手の甲上でのポインティング位置と調整時間であり、評価指

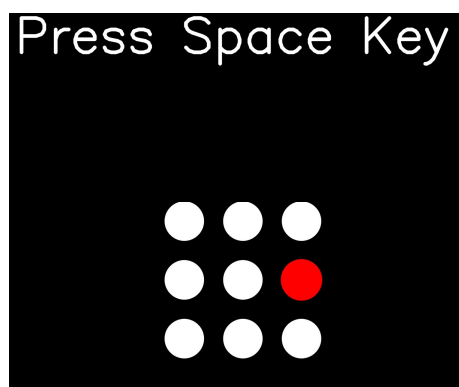


図 4.2 評価用アプリケーション画面（9分割の場合）

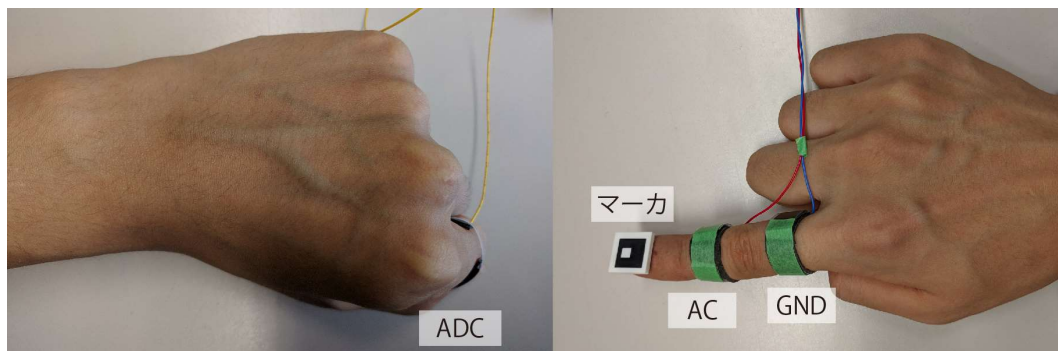


図 4.3 調整時間計測用端子及び位置計測用マーカ 左) 左手の ADC 用端子, 右) 右手のマーカ, AC 及び GND 用端子

標としてポインティング位置に基づき算出される Accuracy Rate を用いる。ポインティング位置の計測は、Huang ら[59]や Lin ら[61]の方法を参考にマーカを用いる方法で行う。本実験では 12mm 四方の亚克力製の ArUco マーカを実験参加者の人差し指に取り付けた(図 4.3)。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 を設置して 720p 90fps 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、マーカの計測精度は、2.3mm (SD=0.9mm)であった。また、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が調整する際には SlideThrough[61]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。

次に、調整時間の計測方法について述べる。本実験では調整時間を計測するため、実験参加者に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。この方法により、ポインティング対象である手の甲とポインティングに用いる指の触覚フィードバックを妨げることなく指が手の甲に触れたことを検出することができる。端子として右手の人差し指に指先側から 2MHz, 2Vpp の交流信号及びグランド(図 4.3 右)、左手の人差し指には電圧計測用(図 4.3 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。なお、フットペダルを用いた理由は、指が移動する際に指と手の甲の接触状態が変化することにより安定した電圧計測が困難であったためである。

また、計測されたポインティング位置に基づく評価指標である Accuracy Rate について説明する。Accuracy Rate は、ポインティング対象である指示位置を混同せずに指示できた程度を示す指標として用いられている[59, 61]。本実験においてもどれほど複

数の指示位置を区別して指示できているかを確認するための指標として用いる。しかし、先行研究[59, 61]が用いた Accuracy Rate は 1 次元的に配置された指示位置を対象とした定義となっており、本実験のように 2 次元的に配置された指示位置を考慮した定義となっていない。そこで本研究では Accuracy Rate を 2 次元におけるポインティング用に再定義した。本研究での 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、そこに属する点（ポインティング位置）のうち他の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。

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、右利きの大学生及び大学院生 6 名（M6, 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。予備実験では図 4.2 に示す 9（3×3）をはじめとして 16（4×4）、25（5×5）、36（6×6）分割を対象とした。同分割数内での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毎に 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たことをビデオにより確認した。したがって、Sighted, Unsighted の 36 分割のサンプルはそれぞれ 5 個、4 個である。

予備実験の結果を表 4.1 と図 4.4 に示す。図 4.4 は予備実験において最も 36 分割における Accuracy Rate が高かった 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である。色が付いた点は保存されたポインティング位置、各楕円は 95%の信頼楕円、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（Accuracy Rate を低下させる点）を示す。Sighted/Unsighted とともに 36 分割において 90%の Accuracy Rate を達成できた実験参加者はいなかった（本稿における Accuracy Rate の定義は 4.2 節にて述べる）。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、分割数の実施順序を分割数が少ない方からとした点については Lin ら[61]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。

表 4.1 予備実験結果

		Accuracy Rate [% (SD)]	
		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)

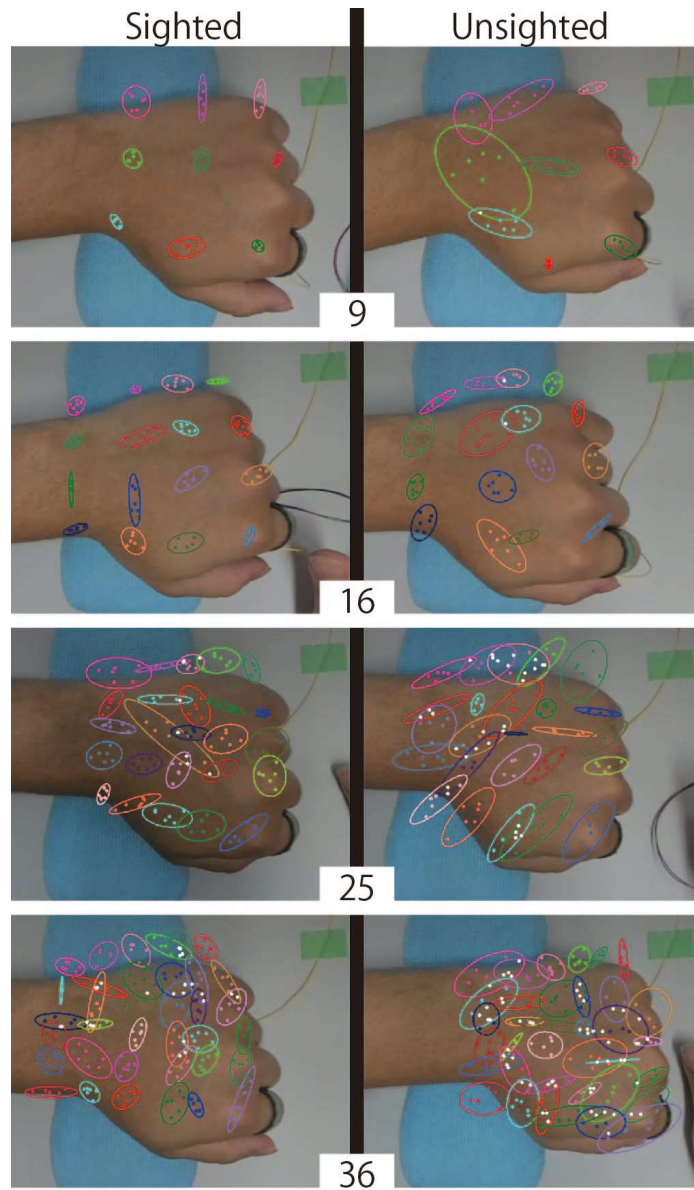


図 4.4 予備実験結果 (P4) 各点は保存されたポインティング位置, 各楕円は各指示位置の 95%信頼楕円, 白い点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

4.1.2 実験参加者

本実験は、右利きの大学生及び大学院生 9 名 (F2, 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 分割を行わない以外は予備実験と同じである。したがって、25 分割までは予備実験と本実験は完全に同じ実験であることから、結果については予備実験のデータも本実験で収集したデータと同じ扱いをする。

4.1.3 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、Un sighted の順に実施した。1 回のポインティングの一連の流れは、以下の 3 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一度押す。
- 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。

フットペダルが踏まれたら評価用アプリケーションは、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。ビープ音を鳴らし終わると次のポインティング目標を提示する。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。

また、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経る。この工程を経ることによって全ての分割位置が提示順序によらず、同一の条件でのポインティングとなる。また、ポインティングが左手の甲以外の箇所から開始されるこの動作は、手の甲上のインタフェースを利用し始める際の動作と考えることができ、手の甲で連続的にポインティングを行うよりも一般的な知見を得ることができると考えられる。なお、スペースキーを押す工程は Lin ら [61] の実験設計を参考にしている。

4.2 仮説

本節では、予備実験の結果から Sighted 及び Un sighted のそれぞれ及び両者の比較に関して立てたポインティング特性に関する仮説について述べる。評価指標である指示精度、調整時間、Accuracy Rate に関して以下のように仮説を立てて本実験により検

証を行う。

Sighted の場合:

H1：分割数、位置による調整時間及び指示精度に差があるとは言えない

H2：すべての実験参加者が 16 分割までは 95%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、調整時間及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（表 4.1）から 16 分割まではすべての実験参加者が 95%以上の Accuracy Rate を維持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：手の甲の中央付近に比べ、周辺部の調整時間が短い

H6：手の甲の中央付近に比べ、周辺部の指示精度は高い

H7：MP 関節付近の Accuracy Rate は他の箇所比べて高い

H8：MP 関節付近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ポインティングすることは難しく、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グループ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付近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 関節及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 Un sighted 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。

4.3 結果

本節では、本実験の計測結果及びインタビューの結果を示す。Accuracy Rate の結果を図 4.5 に示す。また、実験参加者の平均及び標準偏差を表 4.2 に示す。各指標の分割数毎及び指示位置毎のグラフを付録 A 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。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。

4.3.1 計測結果 (Sighted の場合)

9 分割では 1 名を除いた実験参加者が 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。9, 16, 25 分割での Accuracy Rate は、それぞれ 99.9% (SD = 0.5%)、99.2% (SD = 1.7%)、95.0% (SD = 5.1%)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、有意差はなかった。調整時間を従属変数とした場合にも有意差がなかった。また、位置を独立変数、調整時間を従属変数として Steel-Dwass 検定にて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、分割数及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言えない。

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 検定を行った結果、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。しかし、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。

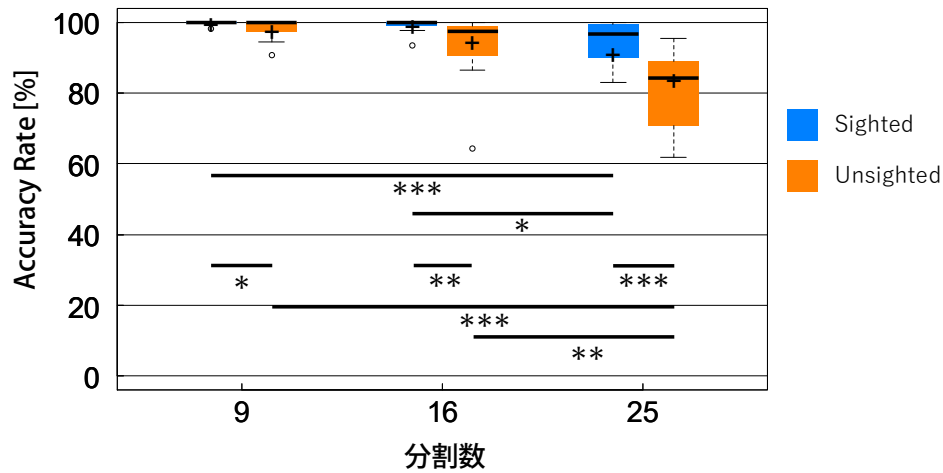


図 4.5 Accuracy Rate の結果 (*:p<.05, **:p<.01, ***:p<.001)

表 4.2 ポインティング実験結果まとめ

分割数	Accuracy Rate [% (SD)]		
	9	16	25
Sighted	99.9(0.5)	99.2(1.7)	95.0(5.1)
Unsighted	98.2(2.8)	93.3(9.2)	81.8(10.4)

分割数	指示精度 [mm (SD)]		
	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)

分割数	調整時間 [ms (SD)]		
	9	16	25
Sighted	1228(508)	1084(590)	1180(802)
Unsighted	2013(888)	1916(885)	2016(1063)

4.3.2 計測結果 (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毎に、全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。

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。

4.3.3 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、ウィルコクソンの符号付順位検定を、指示精度及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。

4.3.4 インタビュー

全実験終了後に、可能な限り迅速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、その他思ったこと、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分割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 分割は全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わかった。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取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取っていた。中には 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一つずつジグザグにスライドして辿った実験参加者もいた。

4.4 考察

Sighted/Un sighted とともに分割数が増加しても指示精度や調整時間は変化しないが、Accuracy Rate は 25 分割が他の分割数に対して有意に低いことがわかった。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同程度の自信を持って位置決定を行っているが、隣接する指示位置を明確に区別できていないと考えられる。これは Lin ら[61]の結果と一致する。一方、前腕の場合と異なり手の甲の場合においては位置による指示精度、調整時間、Accuracy Rate に有意な差があるとは言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し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及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。

Un sighted の場合、すべての分割数間で Accuracy Rate が有意に低下していることから 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、Un sighted 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 Un sighted の比較では仮説が立証され、今回対象としたすべての指標において Sighted が Un sighted 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[98]や Gustafson ら[91]による保存されたポインティング位置の信頼区間を利用した算出方法を参考に、

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。本研究ではポインティング目標を定めなかったことから 95%の信頼楕円の長軸を直径としているため、特定の点を基準とした信頼楕円よりも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。文献によれば、最小のボタンサイズは、Traditional touch input で 15.0mm[98]、Gustafson[91]によれば empty space interface で 27.9mm (0.32)、palm interface で 17.7mm (SD = 0.22)である。手の甲上において Sighted の場合では、9、16、25 分割で最小ボタンサイズはそれぞれ 12.3mm (SD = 5.8)、14.4mm (SD = 5.8)、15.2mm (SD = 6.8)であり、Traditional touch input の場合とおおよそ等しい。また、empty space interface に対しては、標準偏差の 2 倍の範囲を含めても 16 分割の場合のボタンサイズよりも小さい。一方、Palm interface に対しては、平均値は小さいが、標準偏差が大きい。

したがって、Sighted の状態で手の甲上をポインティング対象とする場合は、空中を対象とする場合と比較して小さな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、手のひらを対象とする場合と比較するとポインティング位置のサイズの標準偏差が大きくなった。この原因は 2 点考えられる。第一に、ポインティング位置の決定に有用な皺を代表とする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が減少し、位置決定の曖昧さに繋がり、指示位置のばらつきが大きくなったことが原因であると考えられる。第二に、Gustafson ら[91]によりポインティングの位置決定には、指先よりも手のひらの触覚フィードバックの方が大きく貢献することが確認されていることから、手のひらのポインティング位置の把握に機能する触覚フィードバックが手の甲に比べて優れている点である。この点については、手の甲は有毛な部位、手のひらが無毛な部位である違いがあり、Bolanowski ら[89]らの結果と類似している。

4.5 設計指針

本節では、実験から得られた知見をもとに、手の甲を入力領域としたインタフェースを設計する場合の設計指針を示す。なお、これらの知見は、ポインティングの際に Slide-through 方式[61]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
- 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
- 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
- D4：高精度に利用可能な分割数には個人差がある
- 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

D1 については、Accuracy Rate の観点から視覚情報の有無により適した分割数が異

なるため、Sighted の場合は 16 分割、Un sighted の場合は 9 分割が推奨される。ただし、入力誤りが許容される用途については Un sighted では 16 分割の適用も考えられる。

D2 については、Sighted の場合は、Un sighted 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 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 については、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、実験参加者のポインティング位置の特徴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 については、Sighted の場合では、16 分割までほぼすべての実験参加者が Accuracy Rate 100% 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% 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 の基準ではほぼすべての実験参加者が高い Accuracy Rate を維持できる。

D5 については、16 分割の場合、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。したがって、16 分割におけるこれらの部位の積極的な利用はユーザに友好的なデザインであると推測される。

4.6 アプリケーション

本節では、Novest が可能にする 2 種類のアプリケーションを示し(図 4.6, 図 4.7)、マルチタッチへの適用に関して述べる。両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。なお、図中のスマートウォッチのディスプレイ上に表示されている赤いポインタがタッチング、黄緑色のポインタがホバリングの状態であることを示している。

今回、アプリケーションを適用するスマートウォッチとして SONY 社製 Smart Watch 3 を利用したが、Novest ではディスプレイ上のボタンサイズに入力領域が依存しないため、より小さなタッチパネルに対しても同様のアプリケーションが利用できるように留意されたい。

4.6.1 ナンバーキーボード

ナンバーキーボードが手の甲に展開されたように操作することができる (図 4.6). Novest の指の状態識別機能により手の甲上においてホバリングからタッチング, タッチングからホバリングに移行することにより通常のタッチパネルと同じように仮想的に手の甲上に展開されたボタンインタフェースを利用できる. また, ホバリングによりディスプレイ上での指位置を確認しながら指の移動が可能である. Novest の指位置推定精度上, 手の甲上に 20 個のボタンを配置できることから, 数字 (0-9) に加え, ENT キーや DEL キーを合わせた 12 個のキーのナンバーキーボードが利用できる.

4.6.2 ドローイング

Novest では, 連続的な位置入力も可能であることからドローイングアプリケーションも利用できる (図 4.7). 大文字の N のように不連続かつ位置合わせが必要な複数の線をホバリング状態で移動することにより無駄な線を描くことなく, 通常のタッチパネルと同じように描くことができる. また, ボタンインタフェースを利用して色を切り替え, Novest は線形入力が可能なことから S や B のような曲線も描くことがで



図 4.6 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および移動, c) DEL キー



図 4.7 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 (ボタン入力), d) 線形入力による S の描画

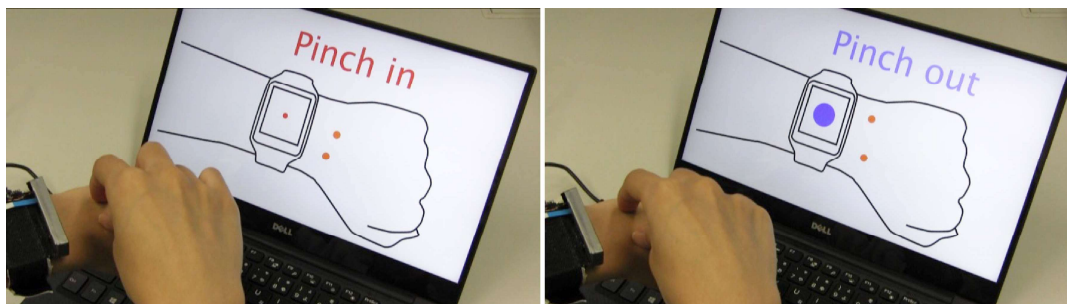


図 4.8 Processing 上でのマルチタッチ入力デモ 左) ピンチイン 右) ピンチアウト

きる。したがって、手の甲上でオクルージョンを生じさせることなく様々な文字や図形を描くことが可能である。

4.6.3 マルチタッチ入力を使ったアプリケーション

3.9.2 節で述べた閾値処理による指の状態識別を用いる場合、親指と人差し指を同時に用いるマルチタッチ入力と指の状態識別が同時に可能となる。Processing 上でマルチタッチを認識させたデモアプリを示す (図 4.8)。ここでのマルチタッチ入力は、ピンチイン・ピンチアウト (拡大・縮小) である。マルチタッチ入力を利用するアプリケーションとして、たとえば、集合場所への経路の確認や周辺状況の確認を行うマップアプリケーションや、画面よりも大きな画像の閲覧や画像への書き込みを行うアプリケーションなどが考えられる。これらのアプリケーションは画面を大きく使うため、マルチタッチによる拡大 (縮小) が頻繁に行われると考えられ、マルチタッチ時のオクルージョンを生じさせずに操作できる点は有用であると考えられる。

なお、マルチタッチ入力は、指の位置推定の際に反射光の強さの分布に対してピーク検出を行い、2点までの指位置推定を行うことで実現している。下段の反射光の強さの分布は、ピンチインの場合、指をつまむ動作とともに双峰性の分布から徐々に2個のピークが近づいていき、最終的に単峰性の分布に変化する。このピークの移動を認識することによりピンチイン入力が可能となる。

4.7 設計指針の適用

本節では、Sighted の場合を対象として、4.5 節でまとめた設計指針を Novest に適用することで適用方針を示す。これにより手の甲を入力領域として利用するインタフェースの開発ガイドラインとして手の甲を入力領域とする場合における指の位置のセンシング手法の開発やインタフェースのデザインに貢献すると考えられる。以降、第3章

で提案した Novest と本節で設計指針を反映させた Novest を明確に区別するため、後者を Novest2 とする。

まずは、設計指針の各項目に基づいて Novest の再設計を行ったのち、簡易的に Novest2 の性能評価を行う。次に Novest2 のアプリケーションを示す。そして、最後に設計指針を反映した結果について考察を行う。

4.7.1 機能要件

まず、D1 において Sighted の場合では、手の甲上を 16 分割する場合に最も効率的に手の甲を入力領域として利用できる。この時、D5 から MP 関節及び中手骨の根元部分である手首までを計測対象範囲とする必要がある。Novest に利用している測距センサである VL6180X の計測可能な距離は 255mm までであることから、第 3 章と同様に尺骨茎状突起部に設置することにより指先方向に関しては計測可能であると考えられる。一方で、第 2 指の MP 関節から第 5 指までの MP 関節の幅は、およそ 79.8mm (SD=5.7mm)[95]であり、また、尺骨茎状突起部から最も離れた第 3 指の MP 関節までの距離は、手掌長第 3 指の 102.1mm (SD=6.3mm)[95]よりも長いと考えられる。VL6180X の検出範囲が 12.5 度の画角で広がっていることからセンサから 102mm の距離の位置において Novest の計測対象範囲は 85mm となり、第 2 指の MP 関節から第 5 指までの MP 関節の幅を検出対象領域とすることができる。

次に、D2 のポインティング位置決定まで位置調整を考慮して決定までの不感帯を設ける。表 4.2 から Sighted かつ 16 分割の場合の調整時間は 1084ms (SD=590ms)であることから、1500ms 程度の不感帯を設ける。ただし、この点に関しては Slide-through 方式[61]での知見であることから、Novest が識別対象とする指の状態で言い換えるとタッチング状態を利用した場合に相当する。Novest では手の甲上において指の状態識別が可能であることから Novest2 では、タッチングで位置調整を行い、ホバリングを決定キーとして用いることにより、不感時間によらない決定方法を適用することが可能になると考えられる。入力をキャンセルする場合にはタッチングのまま指を検出対象範囲外に移動する方法とする。

D3 においては、16 分割を対象としていることからユーザ間のばらつきは他の分割数に比べて小さいと考えられるが、開始の際にユーザに対してキャリブレーションを実施する。また、利用時のインストラクションとして可能な限り同じ位置を繰り返しポインティングすること、MP 関節や中手骨に沿ってポインティングを行うよう指示する。

D4 について、今回は共通的なインタフェースとして具体例を示すことを目的として D1 に基づき 16 分割とする。

ここまで挙げられた Novest2 に必要な機能は以下の 3 機能である。

- 1) 手の甲上の指位置を 16 個の指示位置を区別
- 2) ポインティング位置の決定までに 1500ms の不感時間帯を設定

3) タッチングとホバリングの識別

これらのそれぞれの機能の実装方法に関して検討を行う。

1) では Novest が手の甲上の指位置を高精度かつ連続的に推定したが、Novest2 においては 16 分割と離散的に指の位置を区別できればよい。Novest では、3.3.1 項で述べたように指の位置を高精度に推定するためのセンサ間隔を決定しているが、位置推定が離散的になったことにより精度の低下が許容されると考えられる。センサ間隔を拡大することにより部品点数を減られると考えられる。この点に関しては、実装コスト面及び操作速度面の観点からメリットがあると考えられる。また、VL6180X は順次スキャンを行っているため、部品点数が減ることによりデータ更新速度が向上すると考えられる。

2) では、手の甲上の指が 1500ms 間同じ指示位置を指示していた場合、その指示位置を選択したと認識する。

3) については Novest と同様に反射光の強さから得られる特徴量を用いた SVM を用いてレンジ外を含む指の 3 状態を識別することにより実現する。

4.7.2 Novest2 の実装

本節では、前節で述べた 3 機能それぞれの実装方法について述べる。

1) に関して、キャリブレーションにより各ユーザに適した範囲に手の甲を分割する。キャリブレーションは、3.7 節での評価実験のように指示された位置をポインティングした際の指の各状態の教師データの収集に加えて指の位置推定結果も保存して、その結果に基づき手の甲を 16 分割することにより行う。16 分割の区画はこの指の位置推定結果に基づき、各指示位置に対して行われたポインティング位置の平均値を区画の中心位置とする。そして、入力であるポインティングの位置を最近の中心位置を持つ区画に割り当てることにより手の甲をユーザのポインティングの特性に合わせた区画配置で入力を行うことができる。

先に述べたように手の甲を 16 分割する場合、Novest よりも位置推定精度を落とすでも区画を区別できると考えられる。そこで、Novest2 では、Novest で利用している上下段それぞれ 9 個の測距センサを 1 個おきに利用する。つまり、上下段それぞれ 5 個ずつ (合計 10 個) の測距センサを利用する。このとき、各測距センサの間隔は 10mm となる。第 2 指遠位関節厚の 12.4mm (SD=1.1mm)[95]であることから、少なくとも 1 個の測距センサの検出範囲には入るため、位置推定精度は Novest と比較して低下するが指の位置推定を行うことができると考えられる。また、Novest では指の位置推定結果を安定させるため移動平均フィルタを適用したが、精度の低下が許容されることから移動平均フィルタの対象とするデータ数を減らすことによりポインティングへの応答速度も向上させられると考えられる。

なお、指の位置推定方法は、センサを減らした場合でも 3.2 節と同様の方法で行う。ただし、Novest2 での y 座標の推定は、上段の 5 個の測距センサから得られる反射光

の強さの分布を利用する。

2) に関して、ポインティングしている指が属すると推定された区画に 1500ms 間留まった場合にその区画が選択されたとする。

3) のタッチングとホバリングの識別に関しては、Novest の場合と同様に 1) のキャリブレーションの際に収集した教師データをもとに学習器を生成して識別する。ただし、利用する測距センサの個数を減らしたことにより識別に利用できる特徴量が 44 個から 28 個まで減る。特徴量は、下段に対する上段の反射光の強さの比 (5 個) とその平均・合計・標準偏差・最大値・最小値・範囲, 隣接するセンサの反射光の強さの差 (8 個), 上段と下段の反射光の強さの差 (5 個) とその平均・標準偏差・合計, 下段の反射光の強さの合計に対する上段の反射光の強さの合計の比である。これらを -1 から 1 にスケールして利用する。

4.7.3 Novest2 のキャリブレーションの結果と簡易的な性能評価

キャリブレーションの結果と識別精度の参考として著者が評価実験 2 の座位と同様の手続きで識別精度及び区画推定精度を計測した結果を示す (図 4.9)。ただし、今回は指示位置についてキャリブレーションを行い、特定の位置を定めないことからタトゥーシールのマーカは使用しなかった。区画推定精度を指定された区画にどれほど正確にポインティング位置を割り当てられているかを示す指標とする。簡易的な本実験の目的は、特徴量を 28 個まで減らしたことによる識別精度への影響を確認と、適切な区画への位置推定結果の割り振り精度を確認することである。

Novest2 のキャリブレーションの結果の一例を図 4.9 に示す。トレーニングフェーズで収集したポインティング位置に基づいて 95%信頼楕円を描画した結果、信頼楕円が交わっていないことから 16 個の指示位置を区別できていることが確認できる。した

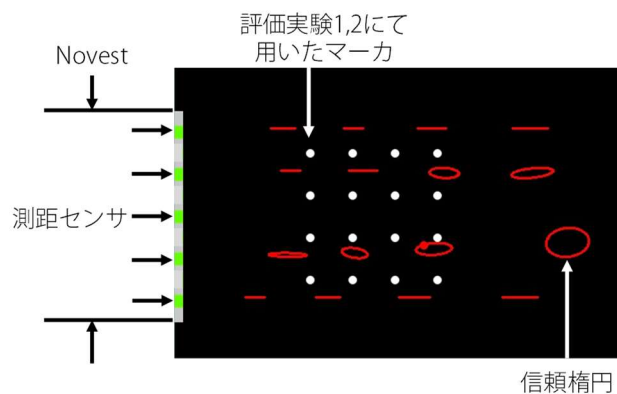


図 4.9 Novest2 のキャリブレーション結果 (赤い楕円はキャリブレーション時に保存されたポインティング位置に基づく 95%信頼楕円を示す)

がって、これらの信頼楕円のそれぞれの中心位置を区画の中心位置として定めることでユーザの特性に応じた区間の配置が可能になる。

識別精度については SVM のデフォルトパラメータでのリアルタイム識別による結果が 97.1% (SD=0.5%)、トレーニングフェーズの各セットをデータセットとする leave-one-out による結果が 97.6% (SD=0.4%)であった。これらの識別精度は Novest の 93.9% (SD = 6.1%)と同等であると考えられる。したがって、18 個から 10 個に測距センサを減らした場合にも指の状態識別は可能であることが示唆される。一方、区画推定精度は、99.8% (SD=0.3%)であった。ここからは、設計指針に基づき設計した Novest2 が適切に手の甲を 16 分割して認識できていることが示唆される。

4.7.4 応用アプリケーション

Novest2 のアプリケーションを図 4.10 に示す。図 4.10 は、メッセージングアプリやメールアプリなどテキスト入力時への応用を示す。通常の内容は図 4.11a のように画面下部からキーボード、予測変換候補、既に入力されたテキスト、入力フォームからなる。なお、ここで利用しているキーボードは、キーボード領域が極めて小さい Whirlscape Inc.社製の Minuum である[99]。このキーボードを用いた場合でもタッチ入力を想定するとボタンの大きさを確保するため予測変換候補を表示できる画面範囲は少なく、2,3 個の短い単語の表示が限界である。この問題に対して Novest2 を適用した場合、予測変換候補を視認可能であるが、タッチ入力に困難な大きさで最大 16 個同時に表示できる。ボタンサイズを小さくできるため、表示領域を変更せず、入力済みのメッセージを閲覧しながら選択することができる (図 4.11b,c)。同様に、小さな領域にスタンプや定型文を同時表示することも考えられる。

また、図 4.11 の a と b に示すように、今回のアプリケーションでは予測変換候補のインタフェースと大文字 (小文字) 変換キー (変換キー) と削除キーがオーバーラップしている。しかし、タッチパネルからの入力と Novest2 からの入力を区別することにより、画面上の同一の位置にある 2 個のインタフェースを二重に利用することが可能になる。

4.7.5 考察

本節では、Novest を対象として設計指針の適用方針と適用結果を示した。第 3 章で開発した手の甲上で高精度に指の位置推定精度及び指の状態識別を実現する Novest に設計指針を適用することにより、利用する測距センサが 44%減少 (18 個から 10 個)、データの更新頻度がおよそ 37%向上 (38ms から 24ms) する結果となった。利用するセンサ数の減少は、部品点数および実装部品点数の両面から実装コストの低下につながる。また、データ更新頻度の向上は入力に対するレスポンスの向上に直接的に影響

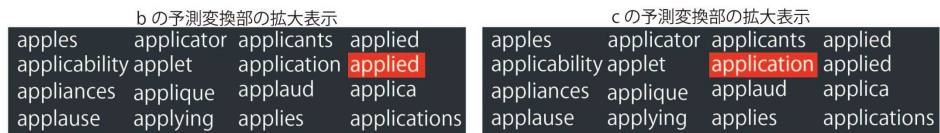
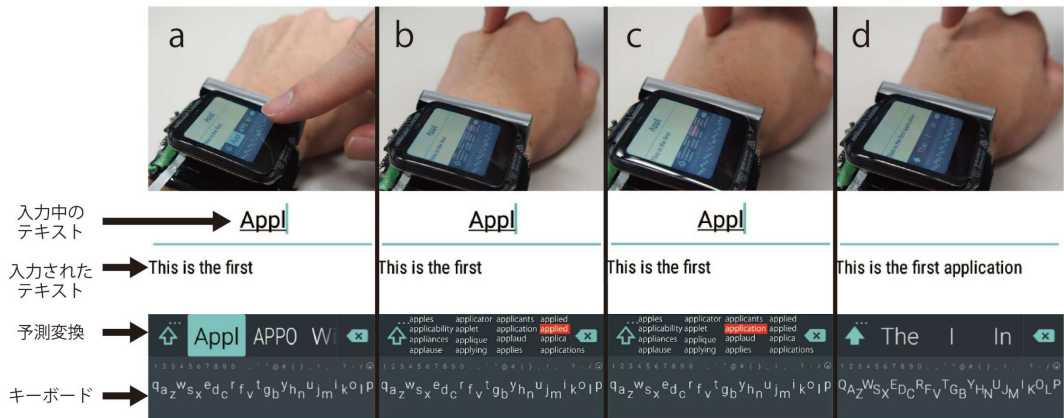


図 4.10 メッセージアプリへの Novest2 適用例 a) タッチパネルによる文字入力, b) c) Novest2 による手の甲上におけるタッチングでの予測変換候補選択 (移動) d) ホバリングによる候補選択 (決定)

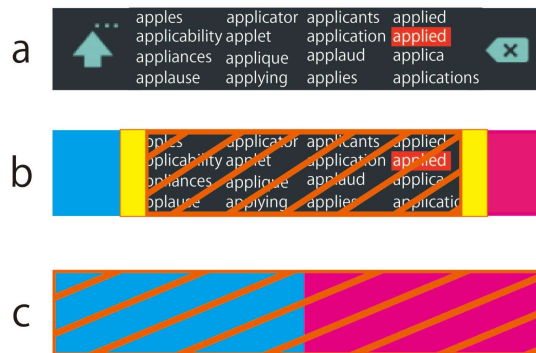


図 4.11 a) インタフェースの通常表示, b) 機能別の色分け (シアン: 大文字 (小文字) 変換, マゼンタ: 一文字消去, オレンジ斜線: 予測変換選択) と機能の重畳部 (黄色), c) 手の甲からの入力とタッチパネルの入力の併用による同一位置のインタフェースとしての二重利用

しており, 入力インタフェースとして望ましい結果である. さらに, 図 4.9 の白い点は Novest の評価実験において対象とした指示位置を示しており, 赤で示したポイントング位置に基づく信頼楕円がより広い範囲に広がっていることから, 同じセンサを用いた場合でも入力領域を拡張できることが示された.

また、Novest2 の場合、ハードウェアを Novest と共有しているため Novest を設置する場合には精度や連続的な入力が必要な用途と Novest2 は 16 分割の機能で実現可能な用途をソフトウェア的に切り替えることにより多くアプリケーションに適用できると考えられる。

これらの改善は、手の甲を対象とするポインティング特性の調査を行い、そこから抽出して得た設計指針に基づく再設計によって実現された。4.5 節にまとめた設計指針の項目は、手の甲を入力領域とするインタフェースに共通しているため、従来手法への適用や今後のインタフェース開発のためのセンサ開発やインタラクションデザイン的设计への貢献が期待できる。

また、ディスプレイ上の同じ位置にあるインタフェースの二重利用は視認性の観点から問題がなければ限られたスペースを有効活用する方法であると考えられる。したがって、図 4.11 c) で示すように変換キーと削除キーのボタンを広げることが可能であり、タッチパネルのボタンサイズの大型化により操作が簡単かつ効率的になる可能性がある。このようなインタフェースの二重利用のメッセージアプリの予測変換以外への適用例として、たとえば、ミュージックアプリの再生ボタンや先送りボタンと、スクロールが必要な歌詞の同時表示や、通知の内容と削除、返信、リマインダーなどの機能の同時表示が考えられる。

第5章 結論

本研究は、スマートウォッチのための入力領域としての手の甲の適性に着目して、手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の3次元空間に挿入された指の3次元座標を推定する手法を提案した。そして、本手法を適用したウェアラブル入力インタフェース Novest を実装して評価実験により本手法の有効性を示した。さらに、実験により抽出したユーザの手の甲上におけるポインティング特性に関する知見を設計指針としてまとめ、これを考慮した入力インタフェース Novest2 とアプリケーションを示した。

Novest では、スマートウォッチ側面に取り付けられた測距センサアレイを利用することにより操作に用いる指にデバイスや素子を装着することなく手の甲上の指の2次元位置推定及び指の状態（レンジ外/ホバリング/タッチング）識別を高精度に実現した。18個の測距センサが取得する距離データと反射光の強さを利用して指の2次元位置を推定し、反射光の強さから構成される特徴量を利用した機械学習手法を利用することにより指の状態識別を実現した。2次元位置推定だけでなく状態識別も実現することにより手の甲上でボタンインタフェースやドロワーアプリケーションを可能になることを示した。ロボットアームを用いた基礎的な評価実験1及び実利用環境での姿勢（立位）を含んだ評価実験2により、指の姿勢に制約があるものの、指の状態の視覚的フィードバックを実験参加者に与えることにより高精度に指の位置推定及び状態識別を実現したことを示した。さらに、手首の角度変化を模した角度調整可能な平面とロボットアームを用いて手の甲の角度変化に対するロボラスト性評価を行い、Novestの指の位置推定と指の状態識別の2機能が機能する手の甲の角度について示した。指位置に関しては手の甲が大きく変化しても高精度に推定可能なことを示した。

次に、ユーザの手の甲上におけるポインティング特性に関する知見をポインティング計測実験により抽出して設計指針としてまとめ、Novestを対象とした場合の適用事例と適用結果を示した。加えて、適用アプリケーションを示したのちに考察を行った。計測実験では、手の甲を目視できる状態（Sighted）と目視できない状態（Unsighted）の2状態を対象として複数の分割数を対象とするポインティングタスクを実施した。予備実験の結果から視覚情報の有無が調整時間や指示精度、Accuracy Rateを指標としていくつかの仮説を立てたのち、本実験の結果をもとに仮説検証を行った。

仮説検証の結果、Sightedにおいては16分割、Unsightedにおいては9分割が機能と効率を両立する分割数であること、視覚情報の有無により位置決定に要する時間が有意に変化することを確認した。また、16分割の場合には、親指以外の4指のMP関

節や指伸筋の腱，中手骨との対応を多くの実験参加者が自発的に利用するため，これらの部位の積極的利用はユーザに友好的なデザインであることが示唆された。

そして，実験から得られた結果をまとめた設計指針を Sighted の場合を対象として Novest に適用した結果，使用部品数の削減やデータ更新速度の向上につながった。さらに，アプリケーションにおいては指ではタッチが困難な大きさのボタンも利用可能であることが示唆された。

5.1 本研究の貢献

本研究は，手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定する手法を提案した。そして，本手法を適用することにより手の甲のスマートウォッチの入力領域としての適性に着目して指の位置推定及びタッチングやホバリングなどの状態識別を高精度に実現するウェアラブル入力インタフェース Novest を示した。

これまでも手の甲を入力領域とする入力インタフェースは提案されていたが，操作に用いる指にデバイスを装着することなく，スマートウォッチ側面と同程度のサイズのセンサを用いて指の位置推定に加えてタッチングやホバリングなどの状態識別を高精度に実現する手法及びプロトタイプを示した点が第一の貢献である。

次に，手の甲を入力領域として利用するインタフェースの設計指針を示すことを目的に，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可能か（ポインティング特徴）に関する調査を行った。そして仮説検証によりポインティング特性に関する知見を設計指針としてまとめて，Novest を対象に設計指針の適用した結果についても述べた。本実験では，ユーザが手の甲を目視できる状態とできない状態の両状態を対象としており，Around Device Interaction に限らず手の甲を入力領域として利用するインタフェースの一般的な設計指針がまとめられていると考えられる。この点が第二の貢献である。

5.2 今後の展望

本節において，本研究が提案した手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標を推定する手法と，手の甲上におけるポインティング特性に関する知見の今後の展望について述べる。

本研究の提案手法である手首幅サイズの測距センサアレイにより手の甲上の 3 次元空間に挿入された指の 3 次元座標の推定手法を適用した Novest は，手首幅サイズの測距センサアレイを用いて，操作に用いる指にデバイスを装着することなく指の 2 次元位置及びタッチングとホバリングなどの状態識別を実現でき，平面の角度変化に対し

て特定の角度内であれば性能が低下しない。そして、Novest は入力インタフェースであるため、視覚的フィードバックを与えるデバイスとしてスマートグラスやミックスリアリティに用いられるようなシースルータイプのヘッドマウントディスプレイなどと利用可能であると考えられる。

Novest をモジュールとして、もしくは Novest2 で示したようにセンサの設置間隔や数、状態識別に用いる特徴量を変更することにより同様の動作原理およびシステム構成で手の甲以外の入力領域、たとえば、スマートグラスの頬をトラックパッド化することも可能になると考えられる[6]。スマートグラスにおいては、スマートウォッチと同様にデバイス本体の小型化に伴うタッチパネルの小型化により利用可能なアプリケーションへの制約や、タッチパネル操作時に伴う疲労の問題が指摘されている。この課題に対して本研究の提案内容が有効に機能すると考えられる。また、CheekInput[18]のような直接頬に触れる手法は化粧への影響に懸念があることが知られている[100]が本手法では皮膚に触れる必然性はない点も適性があると考えられる。したがって、スマートウォッチ以外のデバイスと Novest の併用に関する調査が期待される。

また、手の甲上におけるユーザのポインティング精度及び特徴（どの程度の分割数をどの程度の精度でポインティングが可能か）を調査して、得られた知見を設計指針としてまとめた。本研究が示した設計指針は、手の甲を入力領域として利用するインタフェースに共通する知見がまとめられていると考えられる。したがって、本研究で用いた測距センサアレイを用いた手法以外の方法や、ウェアラブル型以外の入力インタフェースへの適用も考えられ、今後の手の甲を入力領域として利用するためのよりよいセンシング手法の開発支援や開発の効率化への貢献が期待できる。

ただし、設計指針として抽出した知見は、視覚情報の違いによるポインティング特性実験によるものであり、特に目視ができない状態においてはなぜ今回のポインティング特性が得られたかという理由まで言及できていない。たとえば、指先と手の甲の触覚フィードバックではなく、左腕と右腕の肩から指先までの自己受容感覚が手の甲上におけるポインティングに優位に機能しているとすれば、手袋を装着して手の甲に直接触れられない場合でも eyes-free 入力インタフェースの入力領域として利用できる可能性がある。したがって、より詳細に本研究が示した設計指針を理解するため、手の甲上のポインティングに有効に機能する感覚に関する調査を目的とした実験が実施されることが期待される。

謝辞

本論文の執筆にあたり、筑波大学システム情報系の星野准一准教授，ならびに，志築文太郎准教授には多くのご助言をいただきました。本論文に関する指導に加え，星野准一准教授には2012年に学部4年生時の研究室配属以降，志築文太郎准教授には博士後期課程2年以降，研究の進め方や実験結果の分析方法，論文執筆などに関してご指導をいただきました。深く感謝いたします。

本論文の審査にあたり，星野准一准教授，鈴木健嗣教授，中内靖教授，星野聖教授，志築文太郎准教授には的確なご指摘を頂き，本論文をまとめるに至りました。星野聖教授には再三にわたり発表の改善方法や提案の明確化に関してご指導ご鞭撻をいただきました。深く感謝申し上げます。

また，所属研究室であるエンタテインメントコンピューティング研究室の同期やOB，OGの方々には研究に関するコメントや実験データの整理，開発での協力だけでなく，普段の生活においてもたくさんのバックアップをしていただきました。特に，秋元和久氏，飯田裕章氏，永島卓哉氏，平野琢也氏には本稿の作成に当たり，たくさんのサポートをしていただきました。深く感謝いたします。

最後に，博士後期課程への進学を理解し，大学及び大学院での生活を支援してくださった家族や，特に精神面でのサポートや様々な刺激を与えてくれた友人たちのおかげで研究を進めることができました。

最後に，本研究を進めるにあたり，ご協力くださいました皆様に心より感謝申し上げます。

著者論文リスト

本研究に関連する論文

論文誌

- [1] 石川優, 志築文太郎, 星野准一: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.19, No.2 (2018).

査読付き国際会議論文

- [2] Ishikawa, Y., Shizuki, B. and Hoshino, J.: Evaluation of finger position estimation with a small ranging sensor array. In Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction (SUI 2017). ACM, pp.120-127(2017).

その他論文

- [3] Ishikawa, Y., Shizuki, B. and Hoshino, J.: Evaluation of finger position estimation with a small ranging sensor array. In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS 2017), October 17-20(2017). (Invited)
- [4] Ishikawa, Y. and Hoshino, J.: Novest: Position Estimation of Finger on Back of Hand with a Small Ranging Sensor Array. In International Conference on Entertainment Computing, Springer, Cham, pp.477-480(2017).

本研究に関連しない論文

論文誌

- [5] 石川優, 牟田将史, 田丸順基, 中田英輔, 上原皓, 星野准一: 花水: 多視点観察及び移動が可能なフォグスクリーン, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.2, pp.227-236(2014).

査読付き国際会議論文

- [6] Ishikawa, Y., Muta, M., Tamaru J., Nakata, E., Uehara, A. and Hoshino, J.: HANASUI: Multi-view Observable and Movable Fogscreen, In International Conference on Entertainment Computing (ICEC 2014), Springer Berlin

Heidelberg CY, pp.189-196(2014).

その他論文

- [7] Ishikawa, Y., Furudate, Y. and Hoshino, J.: TamaPeeler: An Interactive Cooking Tool for Children's Dietary Education. In International Conference on Entertainment Computing, Springer, Cham, p.427-430(2017).
- [8] 古舘佑子, 石川優, 星野純一: たまピラ: 家庭での食育支援システム. 研究報告ゲーム情報学 (GI), pp.1-4(2016).
- [9] 石川優, 星野純一: 花水: 移動可能なフォグディスプレイによるバーチャル手持ち花火. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 2014(72), pp.1-6(2014).
- [10] 牟田将史, 石川優, 里井大輝, 星野純一: i 文鎮: 書くことを楽しくする文鎮, 情報処理学会第 31 回 EC 研究会, Vol.2014-GN-91, No.60, March 13-15 (2014).
- [11] 石川優, 浦野幸, 于沛超, 星野純一: 吹き矢の楽しさを増強する VR 空間の提案, 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 一般社団法人 映像情報メディア学会 pp.2-5(2012).

付録A Novest のプロトタイプ

本付録では、第3章の評価実験で用いた Novest のプロトタイプの全体図と測距センサ LV6180 を動作させる回路図をそれぞれ図 A.1 と図 A.2 を示す。測距センサアレイはレー

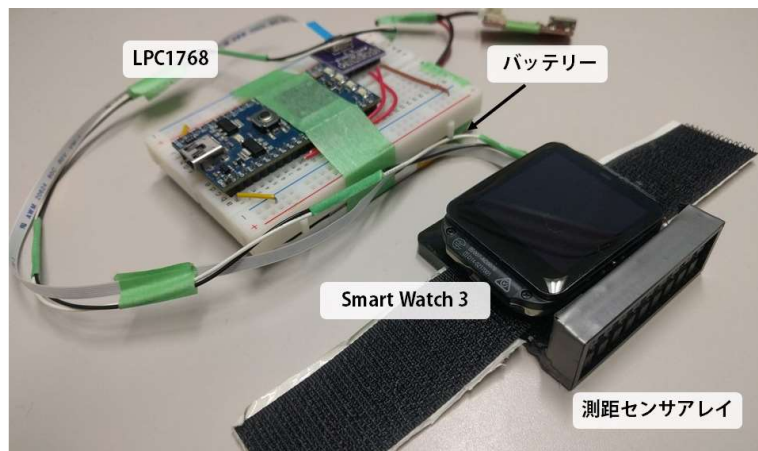


図 A.1 マイコン部分を含む Novest のインターフェース部分

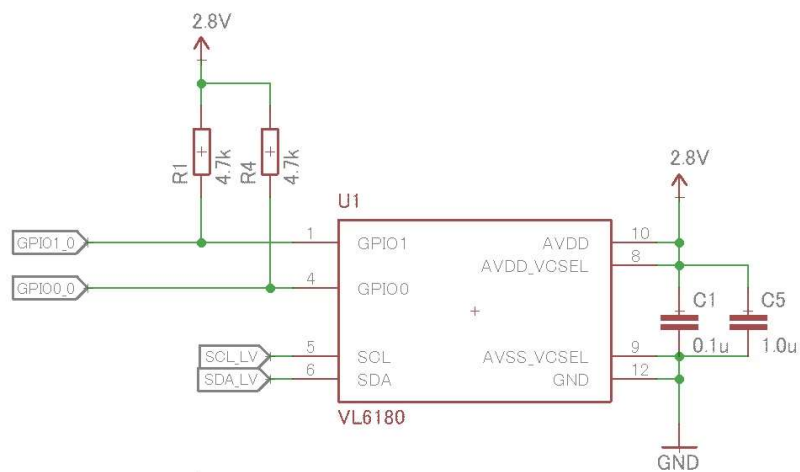


図 A.2 測距センサに接続する信号線及び電源線

ザカッターで製作した筐体に収めたのち、スマートウォッチが位置する場所に固定のためアクリル板に接着させ、平面に対して垂直になるようにしている。手首に巻く際にはマジックテープを用いている。

また、測距センサアレイには、図 A.2 に示す回路が 18 個あり、これらを I2C 通信とアドレス設定のための素子選択用の GPIO を用いて制御する。デバッグのためプロトタイプングボードを利用しており I2C 通信の信号線 2 本と電源線 4 本の 6 本の線でセンサボードと接続している。

付録B ポインティング特性調査実験結果

本付録では、4章で実施したポインティング計測実験で収集したデータを掲載する。図 B.1 から図 B.3 では分割数毎の計測結果，図 B.5 から図 B.13 では指示位置毎の計測結果を示す。なお、各指示位置と対応する番号の対応関係を図 B.4 に示す。図 B.14 から図 B.20 に指示位置毎の計測結果と 95%信頼楕円を描画した結果を示す。

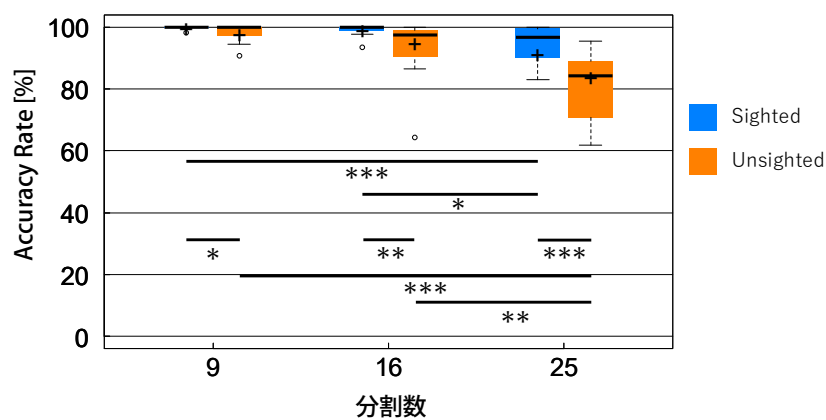


図 B.1 Accuracy Rate の結果 (*:p<.05, **:p<.01, ***:p<.001)

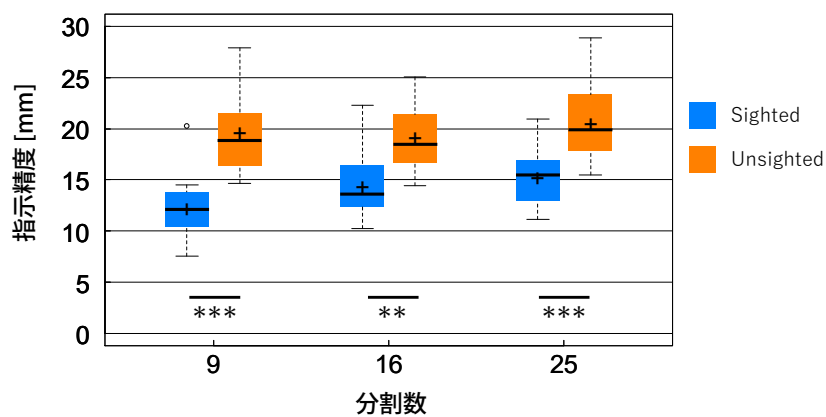


図 B.2 分割数別の指示精度 (**:p<.01, ***:p<.001)

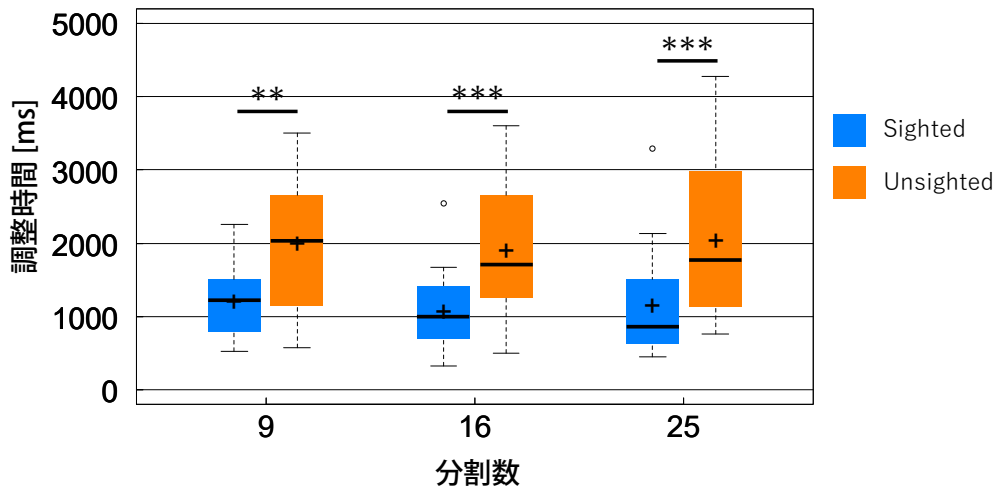


図 B.3 分割数別の調整時間 (**:p<.01, ***:p<.001)

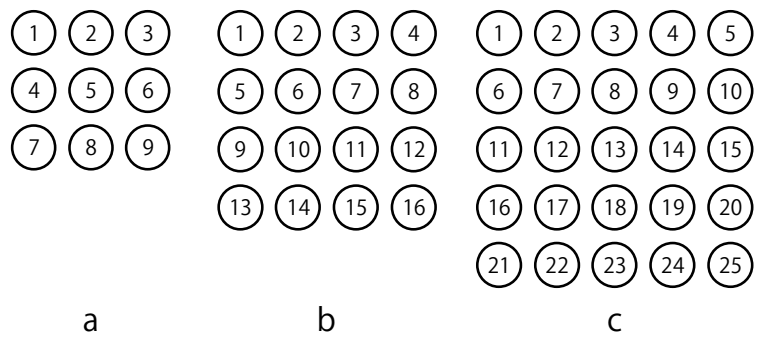


図 B.4 各指示位置の番号 a) 9分割, b) 16分割, c) 25分割

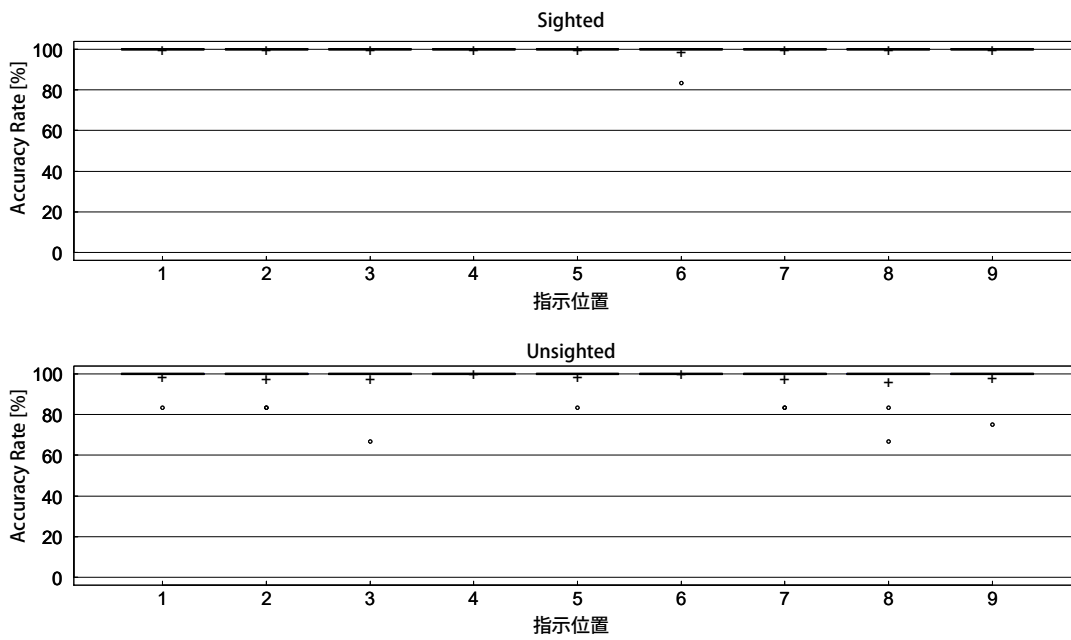


図 B.5 9分割における指示位置毎の Accuracy Rate 上) Sighted 下) Unsighted

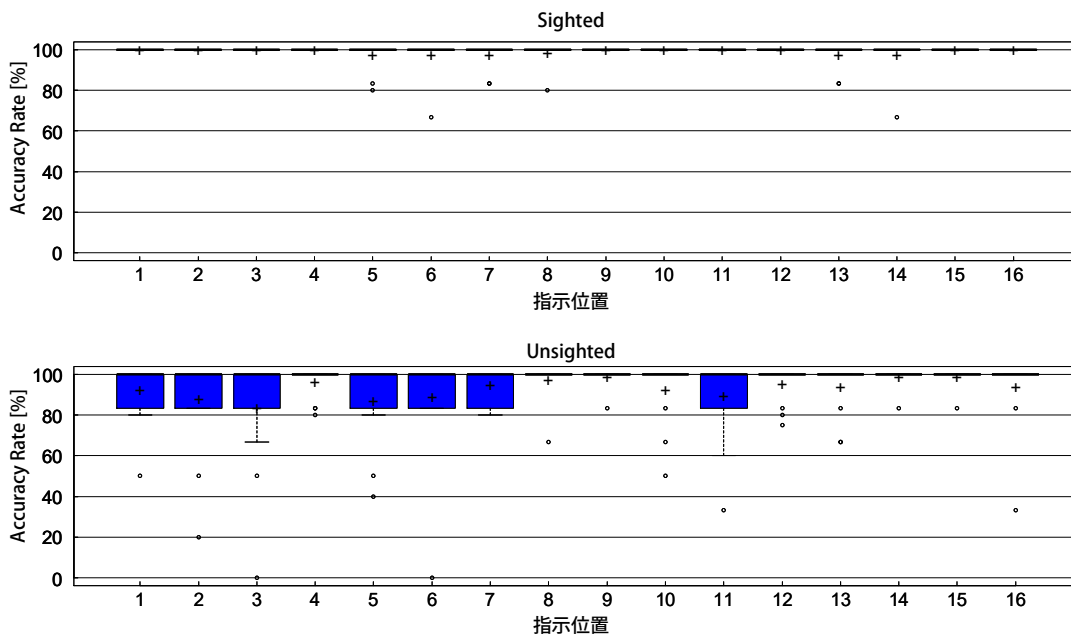


図 B.6 16分割における指示位置毎の Accuracy Rate 上) Sighted 下) Unsighted

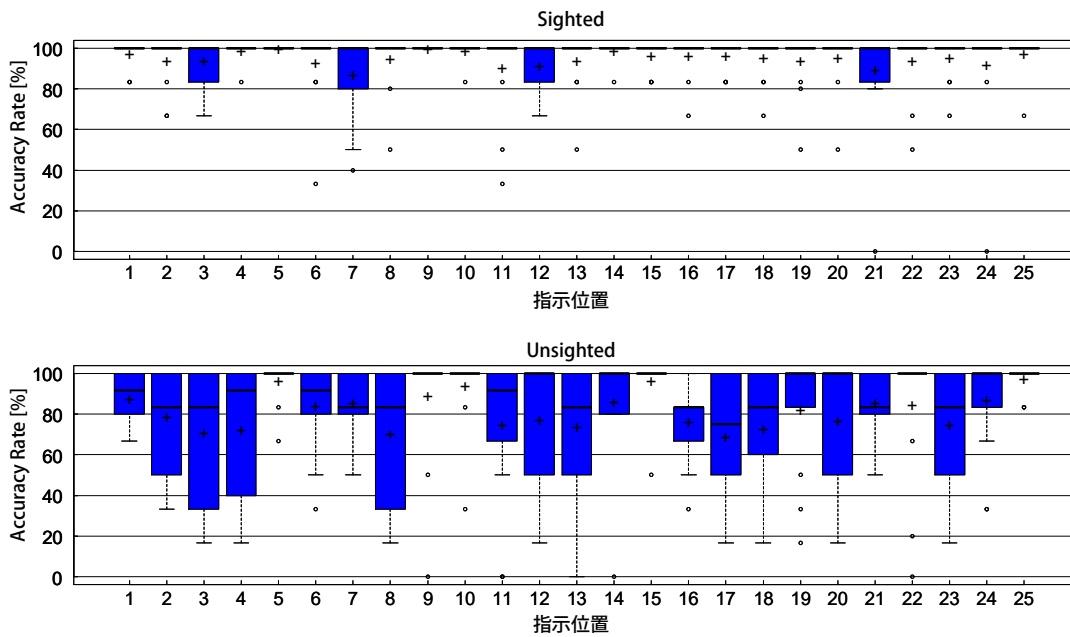


図 B.7 25 分割における指示位置毎の Accuracy Rate 上) Sighted 下) Unsighted

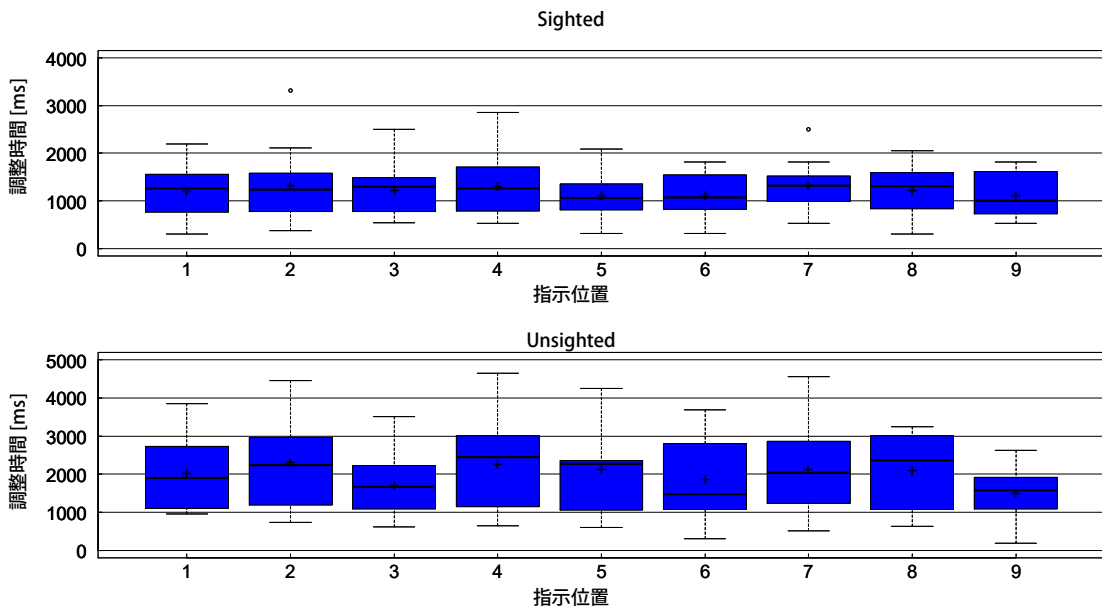


図 B.8 9 分割における指示位置毎の調整時間 上) Sighted 下) Unsighted

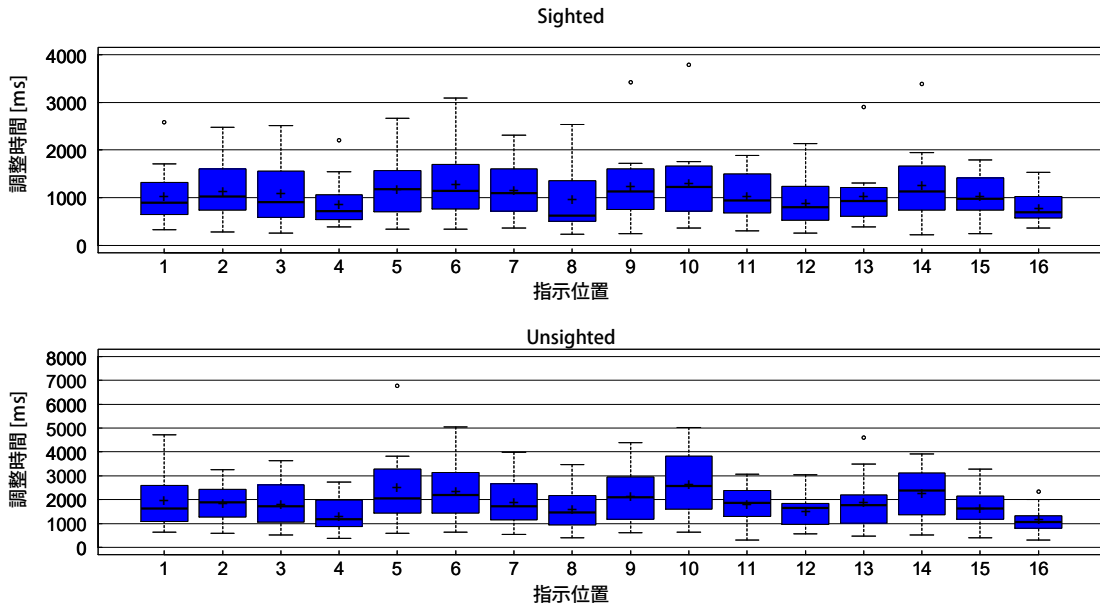


図 B.9 16 分割における指示位置毎の調整時間 上) Sighted 下) Un sighted

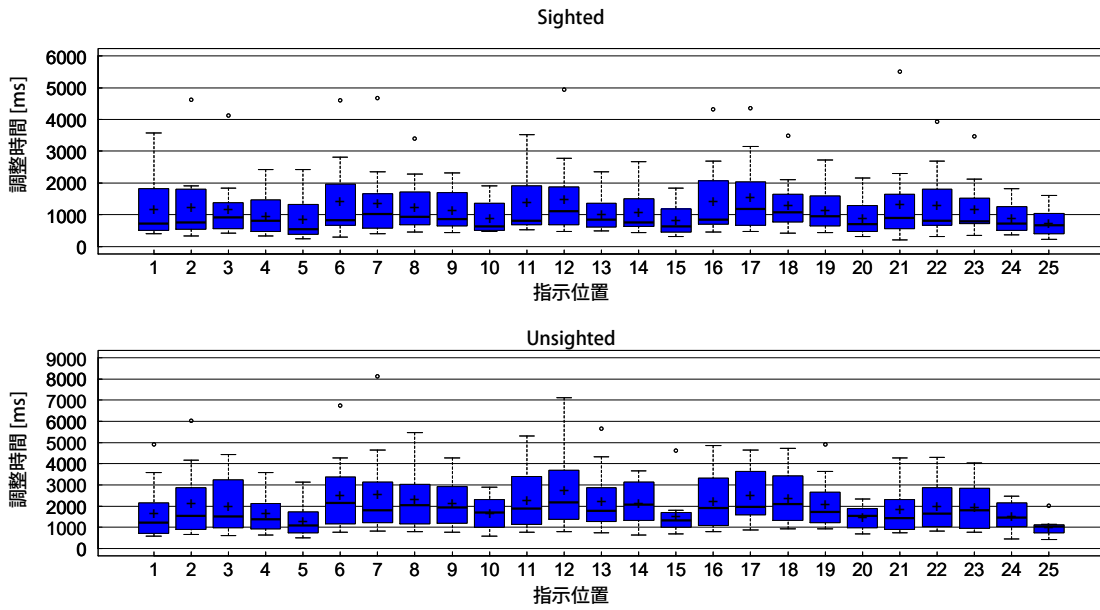


図 B.10 25 分割における指示位置毎の調整時間 上) Sighted 下) Un sighted

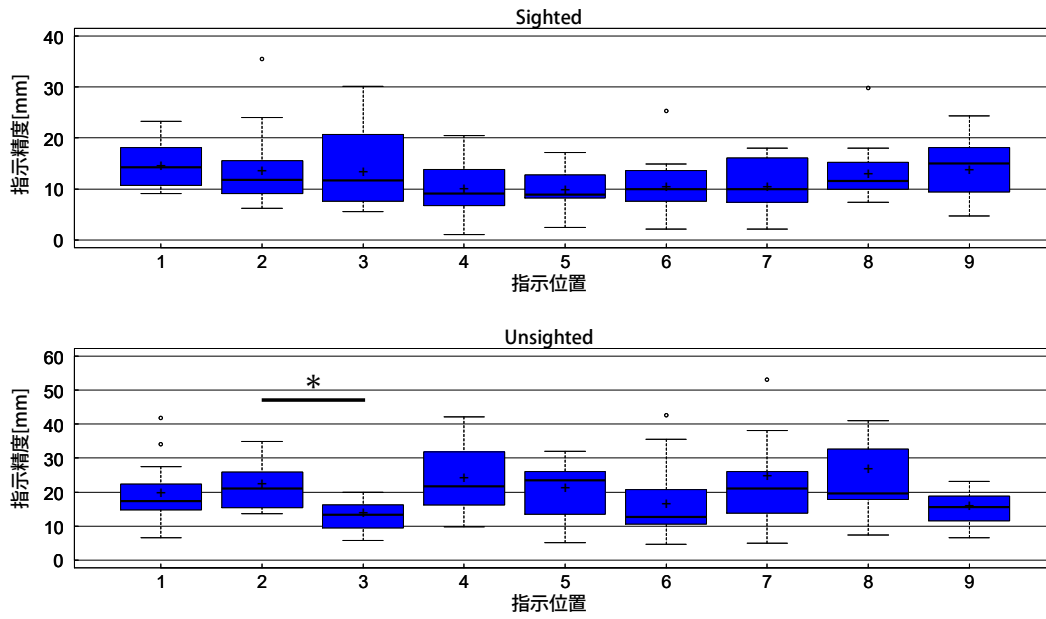


図 B.11 9分割における指示位置毎の指示精度 上) Sighted 下) Un sighted

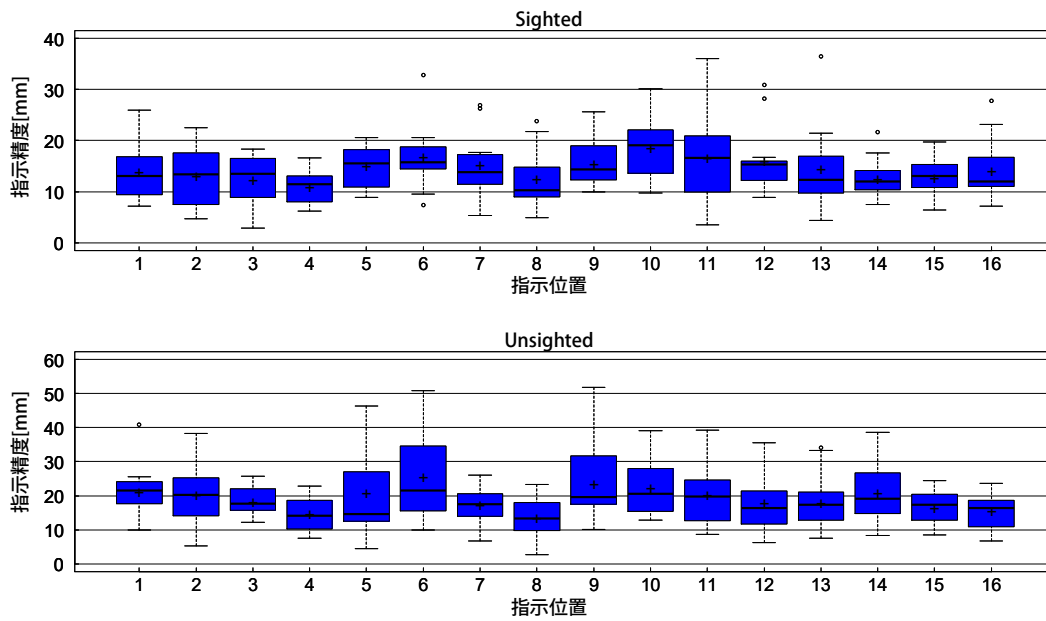


図 B.12 16分割における指示位置毎の指示精度 上) Sighted 下) Un sighted

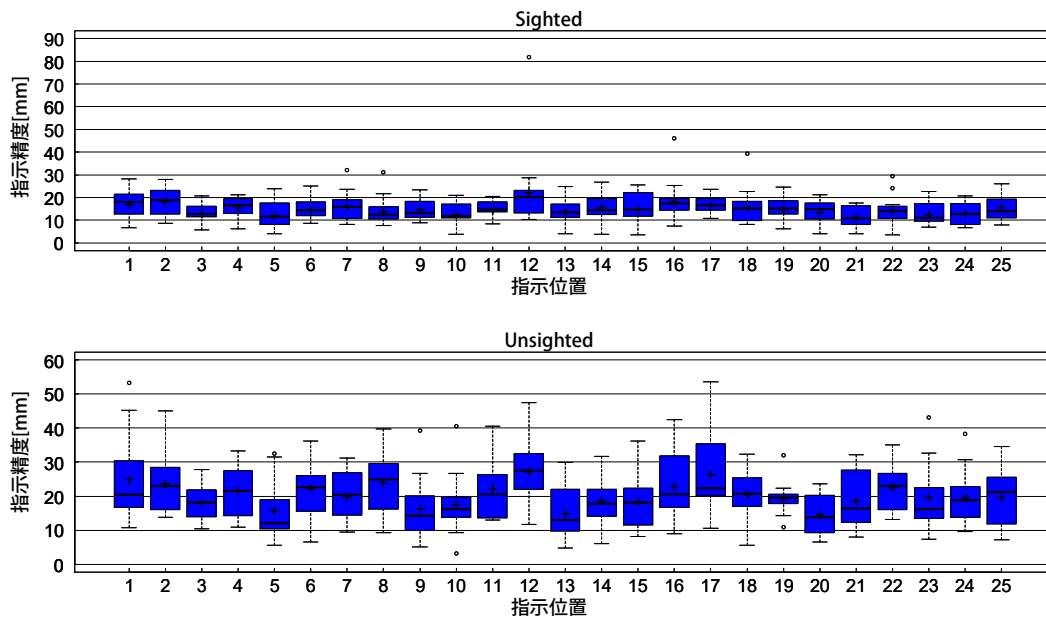


図 B.13 25 分割における指示位置毎の指示精度 上) Sighted 下) Unsighted

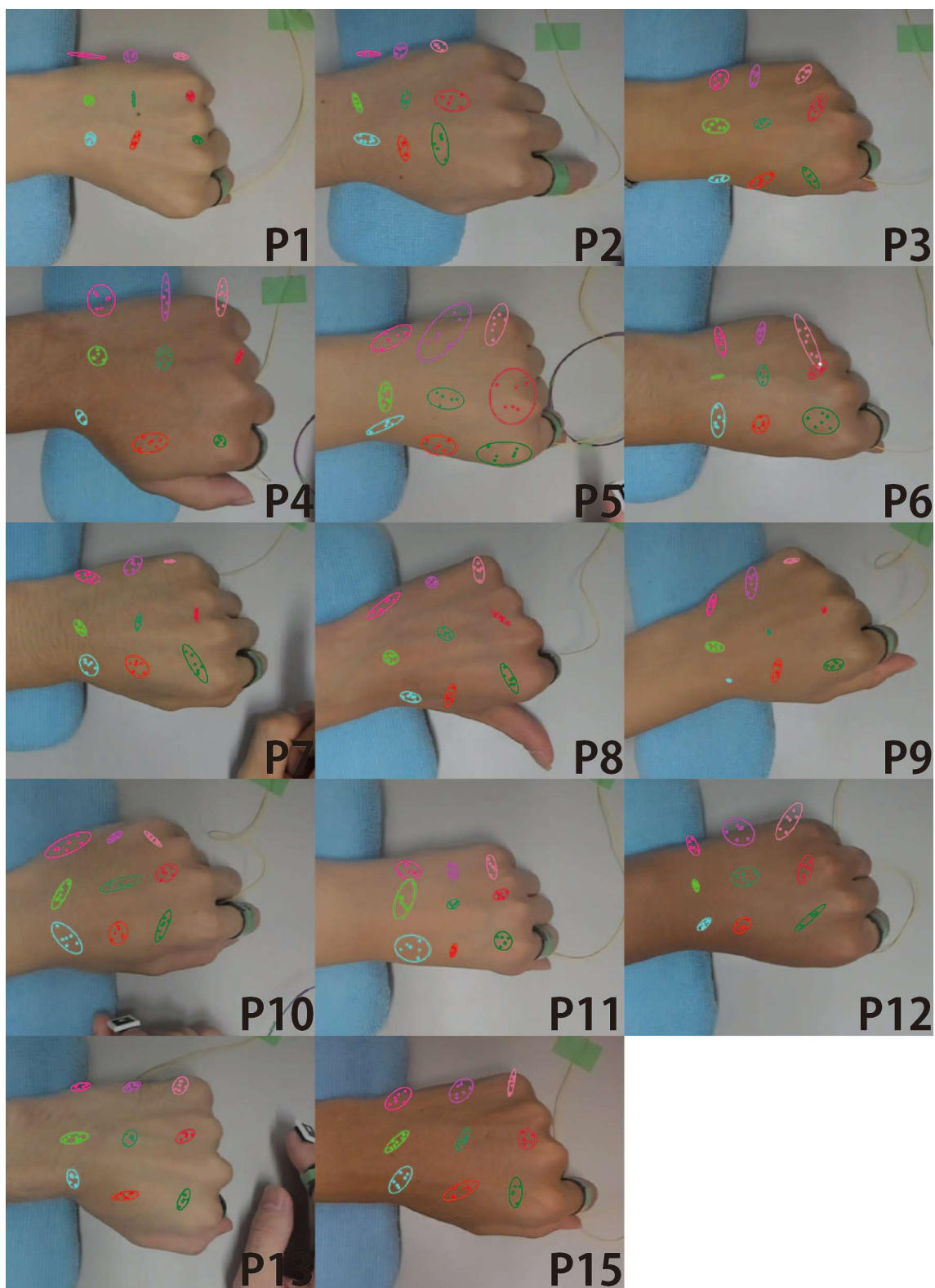


図 B.14 Sighted 9 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
 各点はポインティング位置，白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

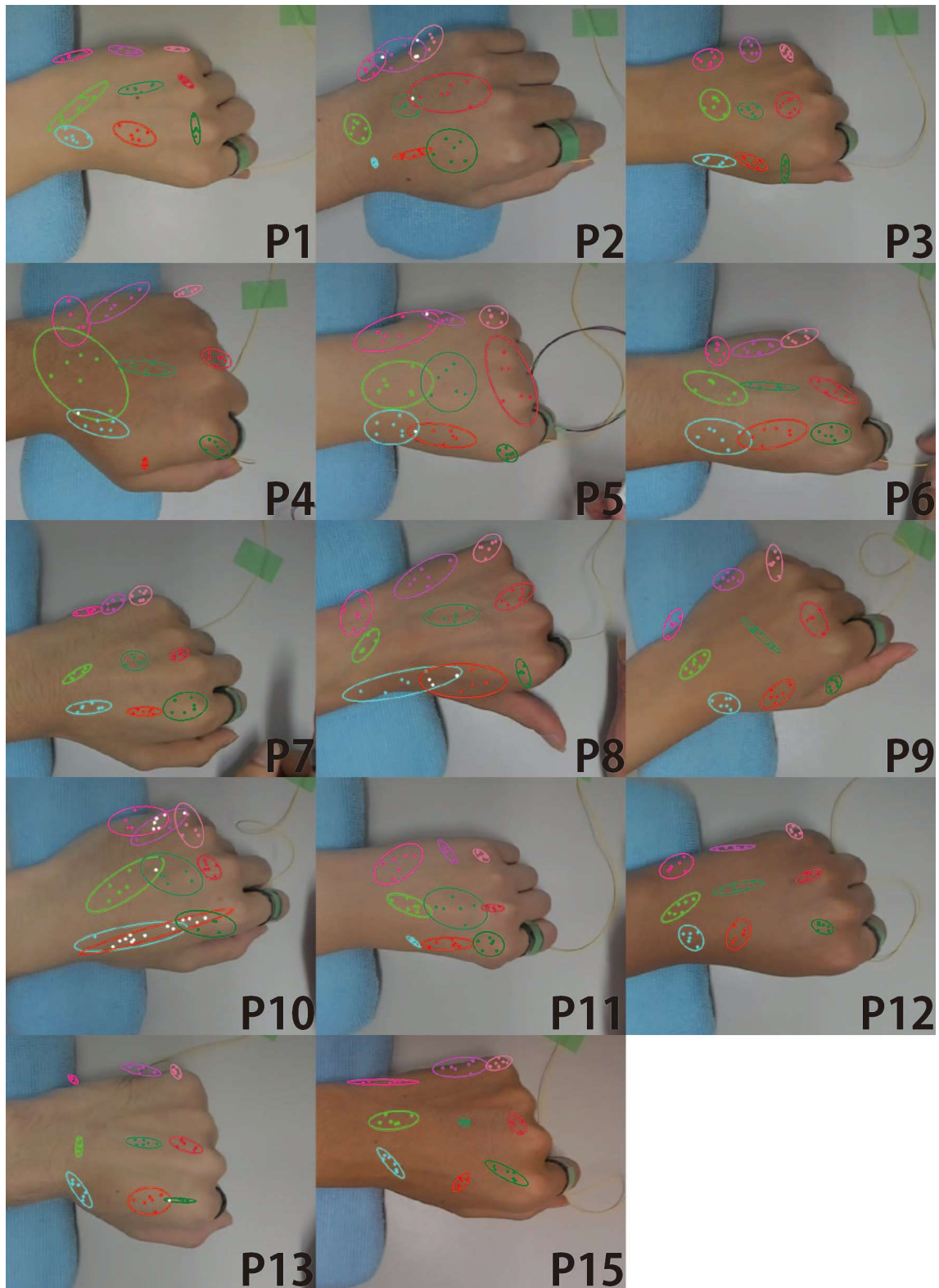


図 B.15 Un sighted 9 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
 各点はポインティング位置，白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す



図 B.16 Sighted 16 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
 各点はポインティング位置，白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

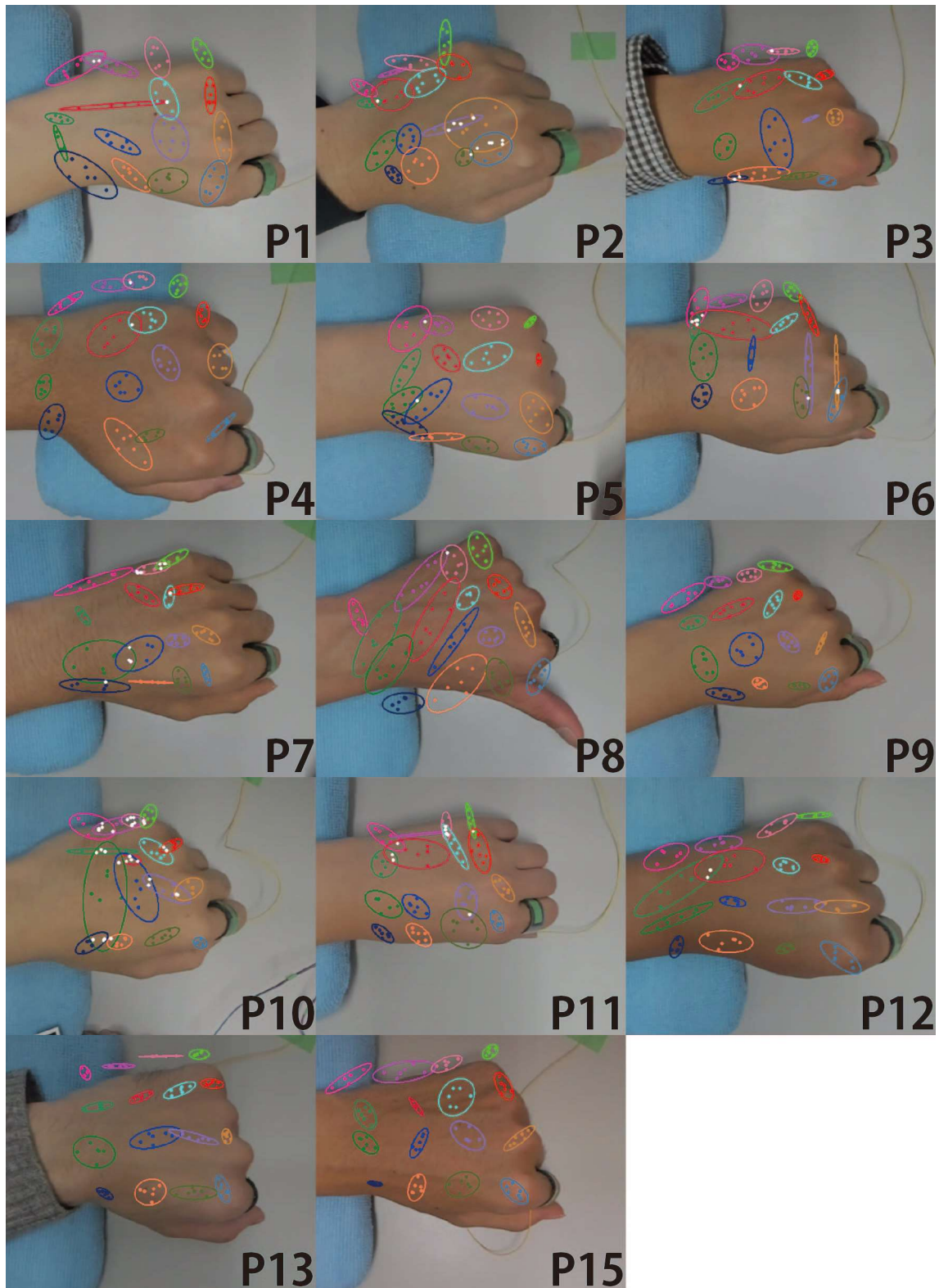


図 B.17 Unsighted 16 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
 各点はポインティング位置，白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

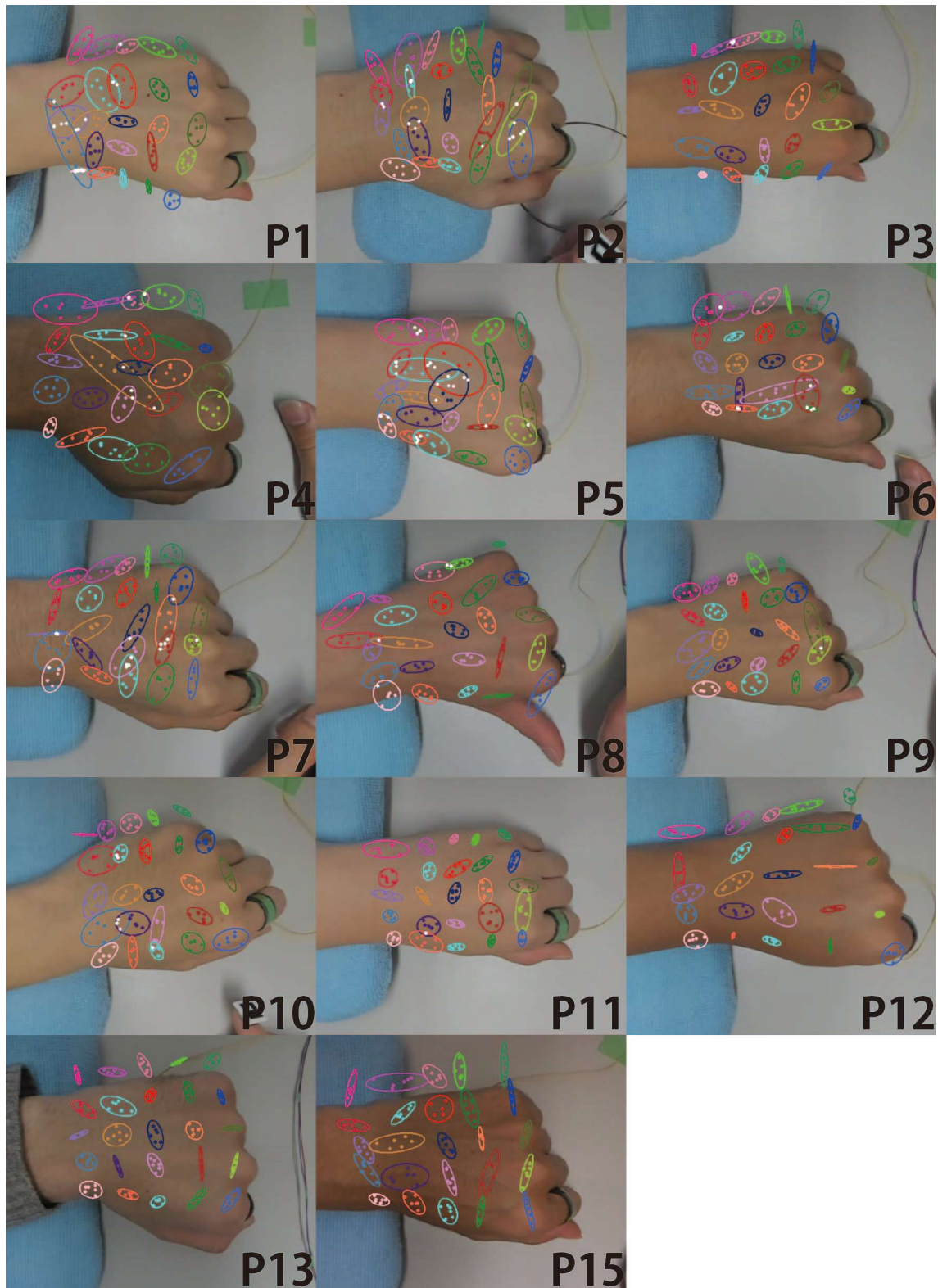


図 B.18 Sighted 25 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
 各点はポインティング位置，白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

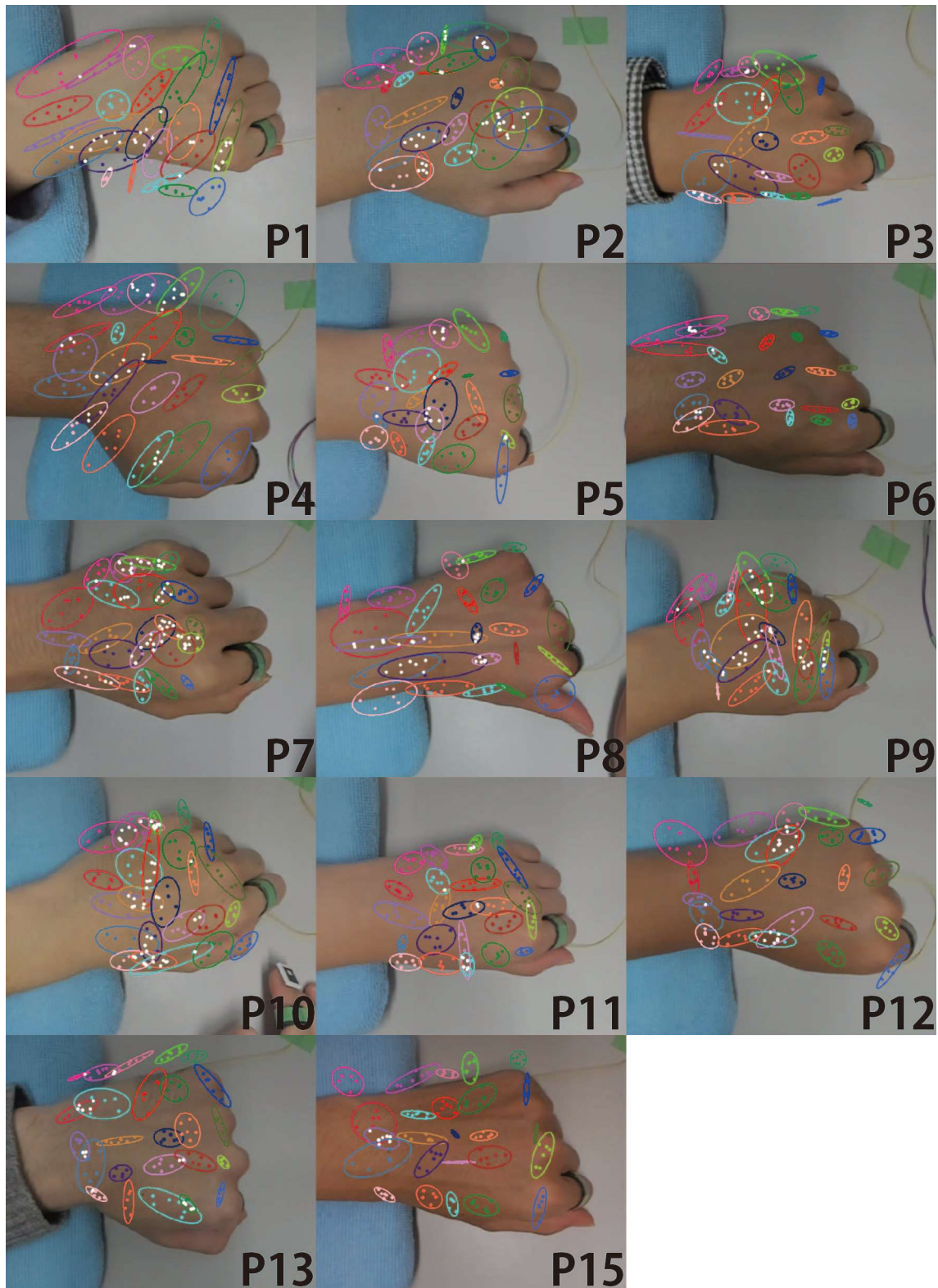
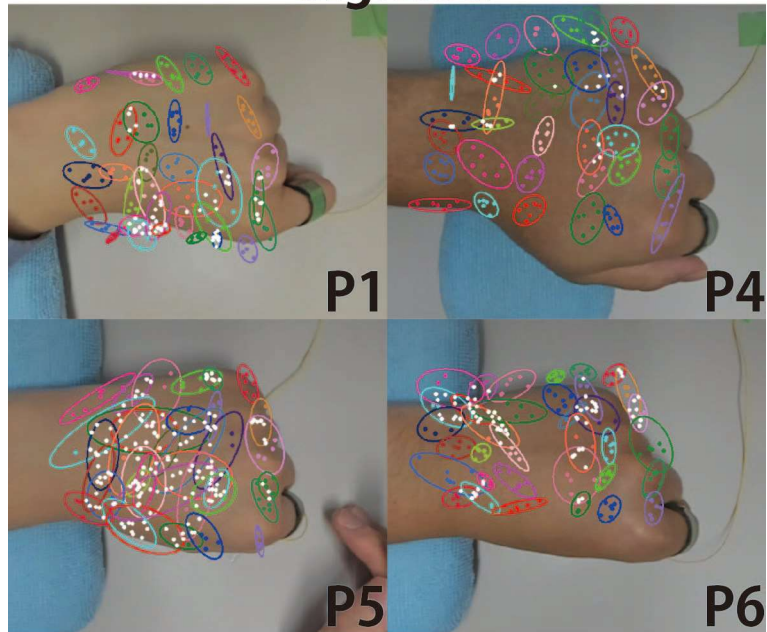


図 B.19 Unsighted 25 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
各点はポインティング位置，白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

Sighted



Un sighted

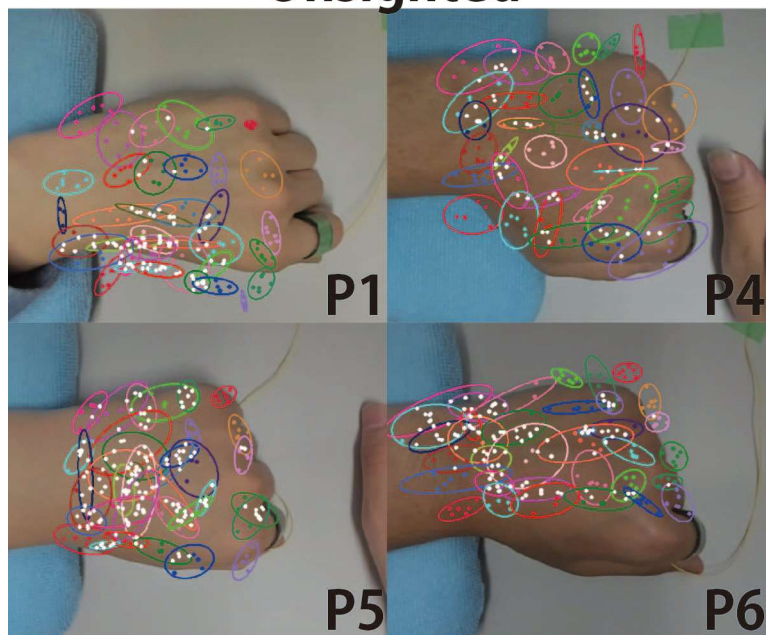


図 B.20 36 分割の場合のポインティング位置と 95%信頼楕円
上) Sighted, 下) Un sighted
各点はポインティング位置, 白色の点は 2 個以上の楕円に含まれるポインティング位置を示す

参考文献

- [1] 総務省：第一部 特集 IoT・ビッグデータ・AI～ネットワークとデータが創造する新たな価値～，オンライン，入手先
<<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc131410.html>>
(参照 208-01-30)
- [2] Siek, K. A., Rogers, Y., and Connelly, K. H.: Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs. In IFIP Conference on Human-Computer Interaction, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.267-280 (2005).
- [3] Xia, H., Grossman, T., and Fitzmaurice, G.: NanoStylus: Enhancing Input on Ultra-Small Displays with a Finger-Mounted Stylus. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, ACM, pp.447-456 (2015).
- [4] Butler, A., Izadi, S. and Hodges, S.: SideSight: Multi-touch Interaction Around Small Devices. In: Proceedings of the 21st Annual ACM symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 201-204 (2008).
- [5] Oh, U., and Findlater, L.: Design of and subjective response to on-body input for people with visual impairments. Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility, ACM, pp.115-122 (2014).
- [6] Weigel, M., Mehta, V., and Steimle, J.: More than touch: understanding how people use skin as an input surface for mobile computing. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.179-188 (2014).
- [7] Zhang, Y., Zhou, J., Laput, G. et al.: SkinTrack: Using the Body as an Electrical Waveguide for Continuous Finger Tracking on the Skin. In: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 1491-1503 (2016).
- [8] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skininput: Appropriating the Body as an Input Surface. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp.453-462 (2010).
- [9] Harrison, C., Benko, H. and Wilson, A.D.: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. In: Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 441-450 (2011).
- [10] Harrison, C. and Hudson, S.E.: Abracadabra: Wireless, High-Precision, and Unpowered

- Finger Input for Very Small Mobile Devices. In: Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 121-124 (2009).
- [11] Nandakumar, R., Iyer, V., Tan, D. et al.: FingerIO: Using Active Sonar for Fine-Grained Finger Tracking. In: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 1515-1525 (2016).
- [12] Laput, G., Xiao, R., Chen, X.A. et al.: Skin Buttons: Cheap, Small, Low-Powered and Clickable Fixed-Icon Laser Projectors. In: Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology. ACM, pp. 389-394 (2014).
- [13] Yamamoto, G., and K. Sato.: PALMbit: A Body Interface Utilizing Light Projection onto Palms. *Inst. Image Information and Television Engineers* 61.6 pp. 797-804 (2007).
- [14] Dezfuli, N., Ljalilbeigi, M., Huber, J. et al.: PalmRC: Imaginary Palm-based Remote Control for Eyes-free Television Interaction. In: Proceedings of the 10th European Conference on Interactive Tv and Video. ACM, pp.27-34 (2012).
- [15] Nakatsuma, K., Makino, Y. and Maeno, T.: Touch Interface on Back of the Hand. In: ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies. ACM, p. 19 (2011).
- [16] Ogata, M., Sugiura, Y., Makino, Y. et al. SenSkin: Adapting Skin as a Soft Interface. In: Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 539-544 (2013).
- [17] Ogata, M., and Imai, M.: SkinWatch: Skin Gesture Interaction for Smart Watch, In Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference, ACM, pp.21-24 (2015).
- [18] Yamashita, K., Kikuchi, T., and Masai, K. et al.: CheekInput: Turning Your Cheek into an Input Surface by Embedded Optical Sensors on a Head-mounted Display, In Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, ACM, No.9 (2017).
- [19] Mujibiya, A., Cao, X., Tan, D.S. et al.: The Sound of Touch: On-body Touch and Gesture Sensing Based on Transdermal Ultrasound Propagation. In: Proceedings of the 2013 ACM international Conference on Interactive Tabletops and Surfaces. ACM, pp. 189-198 (2013).
- [20] Zhang, C., Bedri, A., Reyes, G. et al.: TapSkin: Recognizing On-Skin Input for Smartwatches. In: Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces. ACM, pp.13-22 (2016).
- [21] Liang, R.H., Lin, S.Y., Su, C.H., et al. SonarWatch: Appropriating the Forearm as a Slider Bar. In: SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies. ACM, p. 5 (2011).
- [22] Han, T., Hasan, K., Nakamura, K., Gomez, R. et al.: SoundCraft: Enabling Spatial Interactions on Smartwatches using Hand Generated Acoustics. In Proceedings of the

30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, pp. 579-591 (2017).

- [23] R. Schmidt.: Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. In IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.34, No.3, pp.276-280 (1986).
- [24] Weigel, M., Nittala, A.S., Olwal, A. et al.: SkinMarks: Enabling Interactions on Body Landmarks Using Conformal Skin Electronics. In: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp.3095-3105 (2017).
- [25] Kao, H. L. C., Holz, C., Roseway, A., Calvo, A., and Schmandt, C.: DuoSkin: rapidly prototyping on-skin user interfaces using skin-friendly materials. In Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers, ACM, pp.16-23 (2016).
- [26] Weigel, M., Lu, T., Bailly, G., Oulasvirta, A., Majidi, C., and Steimle, J.: Iskin: flexible, stretchable and visually customizable on-body touch sensors for mobile computing. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.2991-3000 (2015)
- [27] Matthies, D.J.C., Perrault, S.T., Urban, Bodo. et al.: Botential: Localizing On-Body Gestures by Measuring Electrical Signatures on the Human Skin. In: Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. ACM, pp. 207-216 (2015).
- [28] Lissermann, R., Huber, J., Hadjakos, A. et al.: EarPut: Augmenting Ear-worn Devices for Ear-based Interaction. In: Proceedings of the 26th Australian Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures: the Future of Design. ACM, pp.300-307 (2014)
- [29] Chan, L., Liang, R.H., Tsai, M. et al.: FingerPad: Private and Subtle Interaction Using Fingertips. In: Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp.255-260 (2013).
- [30] Ketabdar, H., Roshandel, M., and Yüksel, K. A.: Towards Using Embedded Magnetic Field Sensor for Around Mobile Device 3D Interaction. In Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services. ACM, pp. 153-156 (2010)
- [31] Zhao, C., Chen, K.Y., Aumi, M.T.I. et al. SideSwipe: Detecting In-air Gestures Around Mobile Devices Using Actual GSM Signals. In: Proceedings of the 27th Annual ACM symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 527-534 (2014).
- [32] Zhou, J., Zhang, Y., Laput, G. et al.: AuraSense: Enabling Expressive Around-Smartwatch Interactions with Electric Field Sensing. In: Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp.81-86 2016).
- [33] Goc, M.L., Taylor, S., Izadi, S. et al.: A low-cost Transparent Electric Field Sensor for 3D Interaction on Mobile Devices. In: Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on

- Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 3167-3170 (2014).
- [34] Lien, J., Gillian, N., Karagozler, M. et al. Soli: Ubiquitous Gesture Sensing with Millimeter Wave Radar. ACM Transactions on Graphics, Vol.35(4), No.142 (2016).
- [35] Withana, A., Peiris, R., Samarasekara, N. et al.: zSense: Enabling Shallow Depth Gesture Recognition for Greater Input Expressivity on Smart Wearables. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 3661-3670 (2015)
- [36] Wang, W., Liu, A.X., Sun, K.: Device-Free Gesture Tracking Using Acoustic Signals. In: Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, pp. 82-94 (2016).
- [37] Wen, E., Seah, W., Ng, B. et al.: UbiTouch: Ubiquitous Smartphone Touchpads using Built-in Proximity and Ambient Light Sensors. In: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. ACM, pp. 286-297 (2016).
- [38] Wang, J., Zhao, K., Zhang, X. et al.: Ubiquitous Keyboard for Small Mobile Devices: Harnessing Multipath Fading for Fine-Grained Keystroke Localization. In: Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM, pp. 14-27 (2014).
- [39] Zhang, C., Tabor, J., Zhang, J. et al.: Extending Mobile Interaction Through Near-Field Visible Light Sensing. In: Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, pp. 345-357 (2015).
- [40] Zhang, C., Xue, Q., Waghmare, A. et al. SoundTrak: Continuous 3D Tracking of a Finger Using Active Acoustics, In Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, ACM, vol.1(2), No.30, (2017).
- [41] Xiao, R., Lew, G., Marsanico, J. et al.: Toffee: Enabling Ad Hoc, Around-Device Interaction with Acoustic Time-of-Arrival Correlation. In Proceedings of the 16th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices & Services, ACM, pp.67-76 (2014).
- [42] Liu, S. and Guimbretiere, F.: FlexAura: A Flexible Near-Surface Range Sensor. In: Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 327-330 (2012).
- [43] Kim, J., He, J., Lyons, K. et al.: The Gesture Watch: A Wireless Contact-Free Gesture based Wrist Interface. In: Wearable Computers, 2007 11th IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 15-22 (2007).
- [44] Kratz, S. and Rohs, M.: HoverFlow: Expanding the Design Space of Around-Device Interaction. In: Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. ACM, p. 4 (2009).

- [45] Kratz, S., Rohs, M., Guse, D. et al.: PalmSpace: Continuous Around-Device Gestures vs. Multitouch for 3D Rotation Tasks on Mobile Devices. In Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, ACM, pp.181-188 (2012).
- [46] Sridhar, S., Markussen, A., Oulasvirta, A. et al.: WatchSense: On-and Above-Skin Input Sensing through a Wearable Depth Sensor. In: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 3891-3902 (2017).
- [47] Tănase, C. A., Vatavu, R. D., Pentiu, Ș. G. et al.: Detecting and Tracking Multiple Users in the Proximity of Interactive Tabletops. Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol.8, No.15, pp.61-64 (2008).
- [48] Annett, M., Grossman, T., Wigdor, D. et al.: Medusa: A Proximity-Aware Multi-touch Tabletop. In Proceedings of the 24th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, pp. 337-346 (2011).
- [49] Wigdor, D., Forlines, C., Baudisch, P. et al.: Lucid Touch: A See-Through Mobile Device. In: Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 269-278 (2007).
- [50] Baudisch, P. and Chu, G.: Back-of-Device Interaction Allows Creating Very Small Touch Devices. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 1923-1932 (2009).
- [51] Perrault, S. T., Lecolinet, E., Eagan, J. et al.: Watchit: simple gestures and eyes-free interaction for wristwatches and bracelets. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.1451-1460 (2013).
- [52] Zhang, C., Yang, J., Southern, C., Starner, T. E. et al.: WatchOut: Extending Interactions on a Smartwatch with Inertial Sensing. In Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers, ACM, pp.136-143 (2016).
- [53] Moeller, J. and Kerne, A.: ZeroTouch: An Optical Multi-Touch and Free-Air Interaction Architecture. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 2165-2174 (2012).
- [54] Wang, J., Vasisht, D. and Katabi, D.: RF-IDraw: Virtual Touch Screen in the Air Using RF Signals. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 44.4: pp.235-246 (2015).
- [55] Kao, H.L.C., Dementyev, K.A., Paradiso, J.A. et al.: NailO: Fingernails as an Input Surface. In: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 3015-3018 (2015).
- [56] Chen, K.Y., Lyons, K., White, S. et. al.: uTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors. In: Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, pp. 237-244 (2013).
- [57] Wang, C.-Y., Hsiu, M.-C., Chiu, P.-T. et al.: PalmGesture: using palms as gesture interfaces

- for eyes-free input. Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. ACM, pp.217–226 (2015).
- [58] Prätorius, M., Valkov, D., Burgbacher, U. et al.: K.: DigiTap: An Eyes-free VR/AR Symbolic Input Device. In Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, ACM, pp.9-18 (2014).
- [59] Huang, D.-Y., Chan, L., Yang, S. et al.: DigitSpace: Designing Thumb-to-Fingers Touch Interfaces for One-Handed and Eyes-Free Interactions. Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.1526–1537 (2016).
- [60] Loclair, C., Gustafson, S. and Baudisch, P.: PinchWatch: a wearable device for one-handed microinteractions. In Proc. MobileHCI Workshop on Ensembles of On-Body Devices, 4 pages (2010).
- [61] 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. In Proceedings of the 24th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, pp. 481-488 (2011).
- [62] 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, In Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services, ACM, pp.161-170 (2013).
- [63] Pasquero, J., Stobbe, S. J., and Stonehouse, N.: A haptic wristwatch for eyes-free interactions. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.3257-3266 (2011).
- [64] Blasko, G., and Feiner, S.: An interaction system for watch computers using tactile guidance and bidirectional segmented strokes. In Proceedings of the Eighth International Symposium on Wearable Computers, IEEE, pp. 120-123 (2014).
- [65] 久保勇貴, 志築文太郎, 田中二郎.: ベゼル間の距離の短さを利用した超小型端末向けタッチジェスチャ, 情報処理学会論文誌, vol.58, No.5, pp.1061-1072 (2017).
- [66] Hamdan, N. A. H., Kosuru, R. K., Corsten, C. et al.: Run&Tap: Investigation of On-Body Tapping for Runners. In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ACM, pp.280-286 (2017).
- [67] Vo, D.-B., Lecolinet, E., and Guiard, Y.: Belly gestures: body centric gestures on the abdomen. Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational, ACM, pp.687–696 (2014).
- [68] Li, F. C. Y., Dearman, D., and Truong, K. N.: Virtual Shelves: Interactions with Orientation Aware Devices, In Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, pp.125-128 (2009).
- [69] Zhao, S., Dragicevic, P., Chignell, M. et al.: earPod: Eyes-free Menu Selection using Touch

- Input and Reactive Audio Feedback, In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.1395-1404 (2007).
- [70] Kuester, F., Chen, M., Phair, M. E. et al.: Towards keyboard independent touch typing in VR. In Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, ACM, pp.86-95 (2005).
- [71] McGookin, D., Brewster, S., and Jiang, W.: Investigating Touchscreen Accessibility for People with Visual Impairments, In Proceedings of the 5th Nordic Conference on Human-computer Interaction: Building Bridges, ACM, pp.298-307 (2008).
- [72] 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, Proceedings of the 10th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ACM, pp.73-80 (2008).
- [73] Kane, S. K., Morris, M. R., Perkins, A. Z. et al.: Access Overlays: Improving Non-Visual Access to Large Touch Screens for Blind Users. Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, pp.273-282 (2011).
- [74] Bonner, M., Brudvik, J., Abowd, G. et al.: No-Look Notes: Accessible Eyes-Free Multi-Touch Text Entry, In: The Eighth International Conference on Pervasive Computing, Lecture Notes in Computer Science, vol.6030, pp.409-426 (2010)
- [75] Romero, M., Frey, B., Southern, C., and Abowd, G. D.: BrailleTouch: Designing a Mobile EyesFree Soft Keyboard. In Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, ACM, pp.707-709 (2011).
- [76] Mascetti, S., Bernareggi, C., and Belotti, M.: TypeInBraille: Quick Eyes-Free Typing on Smartphones, Computers Helping People with Special Needs, vol.7383, pp.615-622 (2012).
- [77] Apple Inc.: VoiceOver (オンライン) , 入手先
<<https://www.apple.com/accessibility/iphone/vision/>>, (参照日 2017-12-24)
- [78] Gollner, U., Bieling, T., and Joost, G.: Mobile Lorm Glove – Introducing a Communication Device for Deaf-Blind People, In Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, ACM, pp.127-130 (2012).
- [79] 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(13), pp.1406-1423 (2004).
- [80] Hara, K., Umezawa, T., and Osawa, N.: Effect of button size and location when pointing with index finger on smartwatch, In International Conference on Human-Computer Interaction, Lecture Notes in Computer Science, vol.9170, pp.165-174 (2015).
- [81] Parhi, P., Karlson, A. K., and Bederson, B. B.: Target size study for one-handed thumb use

- on small touchscreen devices. In Proceedings of the 8th Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services, ACM, pp.203-210 (2006).
- [82] 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, 52-59 (2012).
- [83] Trudeau, M. B., Young, J. G., Jindrich, D. L., et al.: Thumb motor performance varies with thumb and wrist posture during single-handed mobile phone use, *Journal of biomechanics*, vol.45, No.14, pp.2349-2354 (2012).
- [84] 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(6), pp.746-756 (2010).
- [85] 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(1), pp.68-76 (2010).
- [86] Goncalves, J., Sarsenbayeva, Z., van Berkel, N., et al.: Tapping Task Performance on Smartphones in Cold Temperature, *Interacting with Computers*, Vol.29(3), 355-367 (2016).
- [87] 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(2), pp.251-260 (2002).
- [88] Fuentes, C. T., and Bastian, A. J.: Where Is Your Arm? Variations in Proprioception Across Space and Tasks, *Journal of neurophysiology*, vol.103(1), pp.164-171 (2009).
- [89] Bolanowski, S.J., Verrillo, R. T., and McGlone, F.: Passive, active and intra-active (self) touch, *Somatosensory & Motor Research*, vol.16(4), pp.304-311 (1999).
- [90] Gibson, J. J.: Observations on active touch. *Psychological review* 69(6), pp.477-491 (1962).
- [91] Gustafson, S., Holz, C., and Baudisch, P.: Imaginary Phone: Learning Imaginary Interfaces by Transferring Spatial Memory from a Familiar Device, In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, pp.283-292 (2011).
- [92] Gustafson, S., Bierwirth, D., and Baudisch, P.: Imaginary Interfaces: Spatial Interaction with Empty Hands and without Visual Feedback. In Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User Interface Software and Technology, ACM, pp.3-12 (2010).
- [93] Gustafson, S. G., Rabe, B., and Baudisch, P. M.: Understanding Palm-Based Imaginary Interfaces: The Role of Visual and Tactile Cues when Browsing. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.889-898 (2013).

- [94] Wang, C. Y., Chu, W. C., Chiu, P. T. et al.: PalmType: Using Palms as Keyboards for Smart Glasses. In Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, ACM, pp. 153-160 (2015).
- [95] 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/>> (参照日 2017-06-07)
- [96] 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/>> (参照日 2017-06-07)
- [97] Chang, C.C. and Lin, C.J.: LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 27:1-27:27 (2011).
- [98] Holz, C. and Baudisch, P.: The Generalized Perceived Input Point Model and How to Double Touch Accuracy by Extracting Fingerprints. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 581-590 (2010).
- [99] Whirlscape Inc.: Minuum (オンライン), 入手先 <<http://minuum.com/>>, (参照日 2018-01-15)
- [100] Serrano, M., Ens, B. M., and Irani, P. P.: Exploring the Use of Hand-To-Face Input for Interacting with Head-Worn Displays, In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp.3181-3190 (2014).