

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学院
システム情報工学研究群修士論文

母指球の押し込みを起点としたジェスチャ操作

高倉 礼
修士（工学）
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2022年3月

概要

コンピュータを操作する時、ユーザはホームポジションを基点として指の伸展および屈曲のみにて文字入力を行うことにより、手を動かすことなしに文字を入力し続けることができる。そのため、ホームポジションを維持することにより、効率的に文字入力を行える。しかし、ポインティングを行うためにはポインティング機器を操作する必要があるため、ユーザはしばしばホームポジションから指を離す必要がある。そこで、本研究では母指球の押し込みを起点としたジェスチャ操作を2種類考案した。この操作ではそれぞれ、母指球による押し込み動作に基づく操作によりポインティングおよびカーソル移動操作が実行でき、母指球による押し込みを行ったのちに、親指のタップによりショートカット入力が、親指のスワイプによりカーソル移動操作が実行できる。本操作は、ユーザがホームポジションに指を置いた状態においても自由に動かせる手の部位である母指球および親指のみを操作に用いる。そのため本操作は、ホームポジションから指を離すことなしに実行できる。本操作の操作性および使い勝手を評価した結果、本操作によるポインティングは困難であるものの、カーソル移動操作およびショートカット入力は問題なく実行できることがわかった。実験より得られたデータに基づき、ユーザによる操作の判定を行う推論モデルを導入したところ、初めて使用するユーザにおいて、タップにより選択された領域を88.7%、スワイプ方向を95.8%の精度により判定でき、ユーザに最適化した場合において、タップにより選択された領域を95.6%、スワイプ方向を97.2%の精度により判定できることがわかった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	キーボードおよびタッチパッドを用いた入力の問題点	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	3
1.3	本論文の貢献	3
1.4	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	ホームポジション周辺における操作	5
2.1.1	キーボード全体を利用して操作を行う手法	5
2.1.2	ホームポジションから指を動かさずに操作を行う手法	6
2.1.3	本研究の位置付け	6
2.2	タッチパッド操作における入力語彙拡張	6
2.2.1	コンピュータのタッチパッド操作における入力語彙拡張	6
2.2.2	スマートフォンのタッチパネル操作における入力語彙拡張	7
2.2.3	本研究の位置付け	7
2.3	コンピュータ操作のショートカット入力	8
2.3.1	ジェスチャに基づくショートカット入力手法	8
2.3.2	本研究の位置付け	9
第3章	母指球の押し込みを起点としたジェスチャ操作の概要	10
3.1	母指球の押し込みに基づく操作	10
3.2	母指球の押し込みを起点とした親指による操作	11
第4章	母指球の押し込みに基づく操作	12
4.1	パームレストへの母指球の押し込みに基づく操作手法	12
4.2	実装	12
4.3	予備実験	15
4.3.1	機器	15
4.3.2	手順	15
4.3.3	結果および考察	16
4.4	実験 1: ポインティング性能の評価	16
4.4.1	機器	16

4.4.2	手順	18
4.4.3	結果および考察	19
	ターゲット選択時間	19
	ターゲット選択精度	20
	使用感	20
	本手法に対する参加者からのコメント	21
4.5	実験 2: カーソル移動操作性能の調査	21
4.5.1	機器および手順	22
4.5.2	結果および考察	23
	修正に要した時間	23
	使用感	24
	参加者のコメント	24
4.6	議論	24
第 5 章	母指球の押し込みを起点とした親指による操作	26
5.1	タッチパッドへの母指球の押し込みを起点とした親指による操作	26
5.1.1	親指によるタップジェスチャ	26
5.1.2	親指によるスワイプジェスチャ	28
5.2	実装	28
5.3	予備実験	30
5.3.1	手順	30
5.3.2	参加者からのコメント	30
5.3.3	議論および改良案の検討	31
	タップとスワイプの判定処理の調整	31
	親指によるタップにより選択できる領域の配分最適化	31
	スワイプの方向を判定する軸の修正	31
5.4	操作手法の改良を目的とした調査	31
5.4.1	データ収集実験	32
	手順	32
	収集したデータ	33
5.4.2	実験結果	33
	タップとスワイプを弁別できる親指の移動量の分析	33
	親指によるタップにより選択される領域の分析	35
	親指によるスワイプの方向の分析	35
5.5	手法の改良結果	39
5.5.1	タッチおよびスワイプの判定処理	39
5.5.2	親指のタップによる選択領域の判定処理	39
	Leave-One-Person-Out 交差検証	40
	参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証	40

5.5.3	親指のSwipeによるSwipe方向の判定処理	41
	Leave-One-Person-Out 交差検証	41
	参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証	42
第 6 章	議論	43
6.1	母指球の押し込みに基づく操作	43
6.2	母指球の押し込みを起点とした親指による操作	43
6.2.1	ユーザ最適化	43
6.2.2	時系列情報を用いたジェスチャ識別	44
第 7 章	おわりに	45
	謝辞	46
	参考文献	46
	著者論文リスト	53
付 録 A	実験の際に用いた各種書類	56
A.1	4 章の実験にて使用したアンケート	57

目次

1.1	ホームポジションに指を配置した様子. 左) 外付けキーボードの場合. 右) ラップトップコンピュータ備え付けのキーボードの場合.	2
1.2	ポインティング機器を用いてポインティングを行う様子. 左) 外付けキーボードでは主にマウスを用いる. 右) ラップトップコンピュータでは主にタッチパッドを用いる.	2
1.3	本研究にて考案した操作を行う様子. 左) 外付けキーボードではパームレストを押し込むことを操作の起点とし, 右) ラップトップコンピュータではタッチパッドを押し込むことを操作の起点とする.	3
3.1	母指球の押し込みにより操作を行う手順. 赤い円はパームレスト上の押下されている位置を表す.	10
3.2	母指球による押し込みを起点として親指により操作を行う手順. 赤い円はタッチパッドに触れている位置を表す.	11
4.1	パームレストを押下することによりポインタを操作する様子. A) パームレストへかかる圧力が閾値未満である時はポインタは動かない. B) パームレストへ閾値以上の圧力がかかることにより, ポインタを操作できる. パームレストの押下位置および押下圧力に基づき, ポインタの移動方向および移動速度が決まる.	13
4.2	本操作を実行できるパームレスト. A) 押下圧力に基づきポインティングおよびカーソル移動操作が実行できるパームレスト. B) パームレストの内部には感圧センサが十字方向に4つ取り付けられている.	13
4.3	システムの回路図.	14
4.4	実験用に作成されたパームレスト. パームレストは, 高さがキーボード最下列のキーと同程度の高さとなるように作成された.	15
4.5	参加者の左手に設置されたパームレストにおいて測定されたセンサ値の分布. 値が大きいほど大きい圧力が加わったことを表す. 赤縦線は得られたセンサ値の平均値 + 標準偏差 $\times 3$ の値である.	17
4.6	参加者の右手に設置されたパームレストにおいて測定されたセンサ値の分布. 値が大きいほど大きい圧力が加わったことを表す. 赤縦線は得られたセンサ値の平均値 + 標準偏差 $\times 3$ の値である.	17
4.7	参加者がポインティング性能実験を行っている様子.	18

4.8	ポインティング性能実験にて参加者へ提示された画面.	18
4.9	手法ごとのターゲット選択時間. 値が小さいほど, 速くターゲットを選択できることを表す.	19
4.10	手法ごとのターゲット選択精度. 値が大きいほど, ターゲット選択の制度が高いことを表す.	20
4.11	手法ごとの SUS 得点. 値が大きいほど, 使用感が良いことを表す.	21
4.12	実験参加者がカーソル移動操作性能実験を行っている様子.	22
4.13	カーソル移動操作性能実験にて参加者に提示された画面.	22
4.14	各手法が 1 文字あたりの修正に要した時間.	23
4.15	手法ごとの SUS 得点.	23
4.16	ジョイスティック入力における入力量と時間の対応関係. 縦軸はジョイスティック入力に対する入力量を表し, 横軸は時間を表す. 横の点線が閾値を表し, 縦の点線はユーザがポインタを止めたいと思ったタイミングを表す. 橙色の領域分だけユーザの意図を超過した入力の実行される.	25
5.1	本操作手法の操作手順. 図右側はシステムが認識しているタッチパッド上のタッチ点を表しており, タッチ点は赤い円として描画される. 1) キーボードのホームポジションへ指をおいた状態 (白枠線はタッチパッドの領域を表す). 2) 母指球をタッチパッドへ押し込むことにより, ジェスチャの待機状態となる. 3) 親指を動かすジェスチャより操作が実行される.	27
5.2	本操作手法にて操作を実行できるジェスチャ. これらのジェスチャは, 1) 母指球を押し込んだ後にジェスチャすることにより操作が実行できる. 2) 特定の角度に親指を開き, タッチパッドをタップするジェスチャ. 3) 親指にてスワイプするジェスチャ.	28
5.3	母指球によるタッチと判定する領域 (橙色にて示した左右両端下 30%の領域).	28
5.4	本手法における操作の状態遷移図. P_x は x (母指球または親指) がタッチパッドへ触れたことを表し, R_x は x (母指球または親指) がタッチパッドから離れたことを表す. また, 点線は状態遷移のみであり, 実線は状態遷移に加えて入力が実行されることを表す.	29
5.5	データ収集実験の様子.	32
5.6	実験中のコンピュータの画面表示.	32
5.7	本手法を用いたジェスチャにおける親指の移動量の分布 (全参加者).	34
5.8	本手法を用いたジェスチャにおける親指の移動量の分布 (参加者ごと).	34
5.9	本手法を用いた親指によるタップにより領域が選択された時の, 母指球と親指がなす角度の分布 (全参加者).	36
5.10	本手法を用いた親指によるタップにより領域が選択された時の, 母指球と親指がなす角度の分布 (参加者ごと).	36
5.11	親指のタップにより領域が選択された時のタッチ点の分布 (全参加者). 灰色は母指球, 赤緑青は親指によるタッチを表す.	37

5.12 親指のタップにより領域が選択された時のタッチ点の分布（参加者ごと）。灰色は母指球，赤緑青は親指によるタッチを表す。	37
5.13 親指によるスワイプの開始点を原点とした時の終了点の分布（全参加者）。	38
5.14 親指によるスワイプの開始点を原点とした時の終了点の分布（参加者ごと）。	38
5.15 親指のタップにより選択された領域を判定する推論モデルの混同行列。左）Leave-One-Person-Out 交差検証。右）参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証。	40
5.16 親指のスワイプによるスワイプ方向を判定する推論モデルの混同行列。左）Leave-One-Person-Out 交差検証，右）参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証。	41

第1章 はじめに

コンピュータの操作には、文字を入力するためにキーボードが、ポインティング（ポインタを移動させる操作）を行うためにマウスまたはタッチパッドが主に使用される。そのため、文字入力とポインティングとを切り替えるためには操作機器の切り替えが必要であり、頻繁に文字入力とポインティングを切り替える作業（例えば、表計算ソフトを用いたデータ入力作業、EC サイトにおける届け先住所の入力）では、作業効率へ悪い影響があると考えられる。そこで本研究では、キーボードに指を置いたまま機器の持ち替えを必要とせずに文字入力およびポインティングを実行できる操作手法を提案する。

本章では、まずキーボードおよびタッチパッドを用いた入力における課題点を示す。次に、本研究の目的および課題解決のためのアプローチを示す。そして、本研究の貢献を示したのちに、本論文の構成を述べる。

1.1 キーボードおよびタッチパッドを用いた入力の課題点

キーボードを用いた文字入力において手の移動を最小限に抑えるために、指を特定のキーに並べて配置することが推奨されている（具体的には、左手の小指から人差し指までを順番に A, S, D, F のキーへ、右手の小指から人差し指までを順番に ; , L, K, J のキーへ配置すること。図 1.1）。この時ユーザが指を置く場所はホームポジションと呼ばれる。ユーザはホームポジションを基点として指の伸展および屈曲のみにて文字入力を行うことにより、手を動かすことなしに文字を入力し続けることができる。そのため、ホームポジションを維持することにより、効率的に文字入力を行える [YEYG03]。

一方で、ポインティングを行うためにはポインティング機器（マウスまたはタッチパッド）を操作する必要があるため、ユーザはしばしばホームポジションから指を離すことが要求される。一般的なラップトップコンピュータはキーボードの下部にタッチパッドを備えているため、ホームポジションから指を離すことなくポインティングを行うこともできる。しかし、ホームポジションから指を動かさずに操作に利用できる指は両手の親指のみに制限され、かつホームポジションへ指をおいた状態においては親指を動かせる範囲が制限される。したがって、遠くの対象を選択するには親指を何度もタッチパッド上にて動かす必要があるため、遠くの対象を素早く選択することは難しい。そこで多くのユーザはホームポジションから指を離し、完全にポインティング機器へ持ち替えた状態にてポインティングを行う（図 1.2）。しかしながら、ホームポジションからポインティング機器の持ち替えには 400 ms 以上の時間がかかる [CMN80, CEB78] ため、表計算ソフトを用いたデータ入力作業および EC サイトにお



図 1.1: ホームポジションに指を配置した様子. 左) 外付けキーボードの場合. 右) ラップトップコンピュータ備え付けのキーボードの場合.



図 1.2: ポインティング機器を用いてポインティングを行う様子. 左) 外付けキーボードでは主にマウスを用いる. 右) ラップトップコンピュータでは主にタッチパッドを用いる.

ける届け先住所の入力などの, 頻繁に文字入力とポインティングとを切り替える必要がある作業では作業効率に悪い影響があると考えられる. これらの作業ではポインティングの代替としてカーソルキーを用いたカーソル移動操作により, キーボードのみで作業を行うことができるものの, 多くのキーボードにおいてカーソルキーはホームポジションから離れた場所に配置されており, 依然としてホームポジションとカーソルキーとの間にて指を行き来させる手間が生じる.

また, 多くの OS にはグローバルショートカット (コピー, カット, およびペースト等) が定義されており, そのほか, アプリケーションごとに多くのショートカットが定義されている. これらのショートカットは修飾キー (主に Control キー) とともにキーボード上のキーを押下されることにより実行できる. テキストエディタである Vim¹および Emacs²では, 明示的なモード変更, または修飾キーとともにキーを押下することにより, ホームポジションから指を大きく動かすことなくカーソル移動操作を実行できる. しかし, キーボードショート

¹<https://www.vim.org>

²<https://www.gnu.org/software/emacs/>

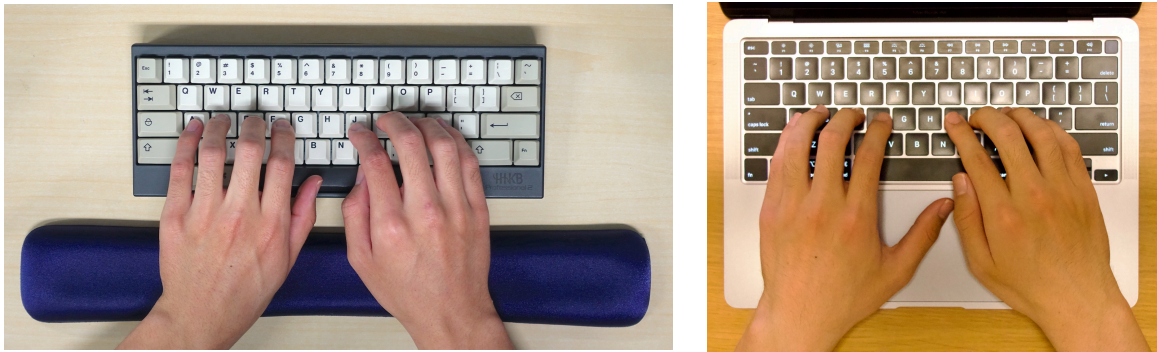


図 1.3: 本研究にて考案した操作を行う様子. 左) 外付けキーボードではパームレストを押し込むことを操作の起点とし, 右) ラップトップコンピュータではタッチパッドを押し込むことを操作の起点とする.

カットによるカーソル移動操作はキーと上下左右方向の対応付けが難しい [GDB07, LNPS05] ことから, カーソルキーと同様の速度にて入力できるようになるためには長期利用による習熟を要する.

1.2 本研究の目的とアプローチ

本研究の目的は, コンピュータの作業にて頻繁に行われるポインティング, カーソル移動操作, ショートカット入力, および文字入力の間における操作切替のコストを削減することである. 特に, キーボードのホームポジションから指を離さずに多くの操作を実行できれば, 操作切替のコストを最小限に抑えられると考えられる. 本論文では, ユーザの母指球 (親指の付け根にあるふくらみ) による押し込み動作を起点として利用することにより, 母指球および親指のみでポインティング, カーソル移動操作, およびショートカット入力が実行可能な操作手法を提案する (図 1.3). この操作手法により, ユーザはキーボードのホームポジションから指を離さずとも, 多様な操作を実行できる. 本操作は, 外付けキーボードおよびラップトップコンピュータにてそれぞれ使用できる. なお, 外付けキーボードにて使用する場合にはパームレスト (キーボードに指を置いた際に母指球を置く場所) を, ラップトップコンピュータにて使用する場合にはラップトップコンピュータ備え付けのタッチパッドを母指球を押し込む対象として用いる.

1.3 本論文の貢献

本論文では, パームレストにて実行する操作およびタッチパッドにて実行する操作の 2 種類の操作手法を述べる. 本論文の貢献を以下に列挙する.

- 母指球によるタッチパッドへの押し込みを起点とし, 母指球による操作, および母指球

および親指を用いた一連のジェスチャ操作により、ポインティング、カーソル移動操作およびショートカット入力が行える操作手法を示した。

- 本操作を用いてコンピュータを操作する実験を行い、本操作の操作性能を評価することにより、本操作がユーザの作業効率を向上できる可能性があることを示した。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を述べる。まずはじめに、第1章において本論文の背景、研究目的、およびアプローチを述べた。以降では、第2章にて、本研究に関連する研究ならびに本研究の位置付けを述べる。第3章では、本研究にて考案された、母指球の押し込みを起点としたジェスチャ操作の概要を説明する。第4章では、母指球の押し込みに基づく操作により、ポインティングおよびカーソル移動操作を行う操作手法を示すと同時に、この手法の使い勝手を評価した結果に基づく議論を行う。第5章では、母指球の押し込みを起点とした親指による操作により、カーソル移動操作およびショートカット入力が行える操作手法を示すと同時に、この手法の使い勝手を評価した結果に基づく手法の改良に関する議論を行う。第6章では、第4章および第5章から得られた知見に基づき、本操作手法の今後の課題を議論する。最後に第7章では、本研究のまとめを述べる。

第2章 関連研究

本論文では，ホームポジションから指を離すことなしにポインティング，カーソル移動，およびショートカット入力を実行できる操作手法を示す．それに先立ち，本章では本研究に関連する，ホームポジション周辺における操作に関する研究，タッチパッド操作における入力語彙を拡張する研究，およびコンピュータ操作のショートカット入力に関する研究の概要を述べたのちに，それぞれの研究に対する本研究の位置付けを示す．

2.1 ホームポジション周辺における操作

機器の持ち替えを必要とせずにキーボードのホームポジション周辺において操作を行える手法が多く研究されてきた．本節では，キーボード全体を利用して操作を行う手法，およびホームポジションから指を動かさずに操作を行う手法をそれぞれ述べたのちに，それらの研究に対する本研究の位置付けを述べる．

2.1.1 キーボード全体を利用して操作を行う手法

Taylor ら [TKH⁺14] は，キーボードのキー間に赤外線距離センサを配置することにより，キーボードの上の空間にてジェスチャに基づく入力およびポインティングが実行できる手法を示した．Tung ら [TCY⁺15] は，静電容量センサを張り巡らせたキーボードカバーを用いて，キーボード上においてタッチパッド同様のポインティングが実行できる手法を示した．Wilson および Cutrell [WC05] は，キーボードを俯瞰撮影するカメラの映像からユーザの手の移動量を計測することにより，キーボード上にてポインティングが実行できる手法を示した．高田 ら [高田 16] は，ユーザが押下している複数のキーの位置の重心に基づきポインティングが実行できる手法を示した．Parsoya ら [PR19] は，修飾キーを押下しつつ，キーボード上の複数キーを押下することにより，キャレット（次に文字を入力および消去できる位置を表すカーソル）を移動できる手法を示した．

これらの手法は，ポインティング機器を用いて行う操作をキーボード上にて実行できるため，機器の持ち替えが必要ない．したがって，機器の持ち替えに要する時間を削減できることから，作業効率の向上が期待できる．しかし，ユーザはこれらの手法の操作を行うために依然としてホームポジションから指を離す必要がある．

2.1.2 ホームポジションから指を動かさずに操作を行う手法

Aboelsaadat ら [Abo07] はキーボードのキーをジョイスティックにすることにより、キーボードのみでポインティングおよび複数のジョイスティックを組み合わせた多様なジェスチャ操作が実行できる手法を示した。Shi ら [SZR⁺18] は、キーボードのキーキャップに静電容量センサを搭載し、各キー上にてジェスチャ操作を行うことにより、そのキーに紐づいた多様な入力を実行できる手法を示した。Rekimoto [Rek03] は、タッチパッドへ親指が触れている間、キー入力がクリック等のポインティング用の入力へ変化する手法を示し、その手法によりホームポジションから指を動かすことなくポインティング操作が完結できることを示した。

これらの手法はホームポジションから指を離すことなく、文字入力およびポインティングが実行できるため、機器を頻繁に切り替える作業において作業効率の向上が期待できる。しかし、これらの手法はキーボードをタイピング以外の操作に用いるため、提案されている操作とキーボードにおける操作が相互に干渉し、ユーザの意図しない操作が実行される可能性がある。

2.1.3 本研究の位置付け

本研究にて考案した操作はホームポジションから指を動かすことなく実行できる。そして、本操作は母指球による押し込みを起点に用いるため、母指球による押し込みを行わなければ操作が実行されないことから、ユーザの意図しない操作が実行されることは少ないと考えられる。さらに、本操作は母指球による押し込み後もキーボードにおける操作へ干渉しないことから、意図せず母指球による押し込みが行われたとしても、ユーザの文字入力作業を妨げない点にて優れる。

2.2 タッチパッド操作における入力語彙拡張

タッチパッドおよびタッチパネルの操作における入力語彙を拡張する手法がこれまでに多く提案されてきた。本節では、デスクトップコンピュータまたはラップトップコンピュータのタッチパッド操作における入力語彙を拡張する研究、およびスマートフォンのタッチパネル操作における入力語彙を拡張する研究をそれぞれ述べたのちに、それらの研究に対する本研究の位置付けを述べる。

2.2.1 コンピュータのタッチパッド操作における入力語彙拡張

Fruchard ら [FLC17] および Heo ら [HGL14] は、タッチパッド上の異なる2点間を繋ぐようにスワイプまたはタップする操作を示した。これにより彼らは、タッチパッドの領域全体を利用して入力語彙を拡張できることを示した。Nakamura ら [NS18, NS20] は、タッチパッドへ左右どちらの手で触れたか、および親指とそれ以外の指のどちらで触れたかを識別する手法を提案し、タッチパッドの入力語彙を拡張できることを示した。Ikematsu ら [IY20] は、爪

によりタッチパッドへ触れたことを検知する手法を提案し、タッチパッドの入力語彙を拡張できることを示した。また Ikematsu ら [IFS19] は、タッチパッドの内縁から外縁にまたがる導電性のシートにてタッチインタラクションを行うことにより、タッチパッド外にてボタン入力およびジョイスティック入力の実行できる手法も示した。Géry ら [CVPC07] は、タッチパッドの中心部の領域にて通常のポインティング、内縁部にてジョイスティック入力の実行できる手法を示した。これにより Géry らはタッチパッドにて詳細なポインティングと大雑把なポインティングの両方が実行できることを示した。

これらの手法はタッチパッドにおける入力語彙を拡張できるため有用である。しかし、操作を実行するためにはホームポジションから指を動かす必要があり、ホームポジションに指をおいた状態、すなわち親指のみしか使用できない環境ではこれらの操作を実行することは難しい。

2.2.2 スマートフォンのタッチパネル操作における入力語彙拡張

ホームポジションに指をおいた状態ではポインティングに母指球および親指しか利用できないことから、ホームポジションに指をおいた状態においては操作の入力語彙が少ないという課題がある。これは、スマートフォン片手把持状態における操作の入力語彙が少ないという課題に類似している。スマートフォン片手把持状態における操作の入力語彙を拡張する手法はこれまでに多く提案されており、本研究を進めるための知見を得るためにこれらの手法を調査した。

Hakka ら [HIST19] は、選択対象の領域内にて開始および終了する短いスワイプにより、そのスワイプ方向および選択対象に応じた処理が実行できる手法を提案した。Roudaut ら [RLG09] は、選択対象を親指にて選択したのちに、その親指を上下左右方向へ転がすように押し込むジェスチャを行うことにより、親指を押し込んだ方向および選択対象に対応した処理が実行できる手法を提案した。Huy ら [LKB⁺18] は、母指球を画面へ押し込むことによりメニューが表示できる手法を提案し、その手法を用いることにより片手把持状態においても多様な処理が選択および実行できることを示した。Huang ら [HFT⁺19] は、スマートフォンに取り付けた剪断力を検知できるシートにより、スマートフォンにてジョイスティック入力の実行できる手法を提案した。

2.2.3 本研究の位置付け

スマートフォンにおける入力拡張手法は、デスクトップコンピュータ、およびラップトップコンピュータの入力語彙を拡張する手法としても適用できると考えられる。本操作は母指球による押し込みを起点として用いるため、母指球による押し込みを行わなければ既存の入力手法をそのまま利用できる。したがって、本操作はこれらの入力語彙を拡張できる手法と併用することにより、さらなる入力語彙の拡張を図ることができる。

2.3 コンピュータ操作のショートカット入力

コンピュータ操作における作業効率向上のために、しばしばショートカット入力を用いられる。本節では、ジェスチャに基づくショートカット入力手法を提案する研究をいくつか述べたのちに、それらの研究に対する本研究の位置付けを述べる。

2.3.1 ジェスチャに基づくショートカット入力手法

より良い想起性およびより容易な操作となることを目的としたショートカット入力手法がこれまでに多く研究されてきた。それらの多くは、ラップトップコンピュータのインカメラに鏡を取り付け、キーボード上における手指の動きを追跡することにより、新しいショートカット入力手法を実現している[ZLAV18, ZV16, CSMV21]。Zheng ら [ZLAV18] は、アルファベットのキーを押下したのちに、親指を開くジェスチャを行うことにより、押下したキーに対応したショートカットが実行できる手法を示した。また Zheng ら [ZV16] は、ショートカットを実行するために使用された指を判別することにより、同じキーにて複数のショートカットを実行できる手法も示した。Chhibber ら [CSMV21] は、ラップトップコンピュータ周辺の手の姿勢に基づき、ハンドジェスチャによりショートカット入力を実行できる手法を示した。これらの研究のほか、ユーザによる操作を計測するために専用のキーボードを用いる手法も多く提案されてきた[BRA18, SYT⁺18, MF16, KST13]。Buschek ら [BRA18] は、キーを押下したのちに手首をひねることにより、押下したキーおよび手首をひねった方向に基づいたショートカットが実行できる手法を示した。Sekimori ら [SYT⁺18] および Mockler ら [MF16] は、それぞれ導電布および導電性のキーキャップを用いて、スペースキー上のタッチ位置を静電容量値の変化に基づいて検出することにより、ショートカット入力を実行できる手法を示した。Kurosawa ら [KST13] はキーボード上のキーを指で擦るように動かす操作を判別することにより、擦った方向および擦ったキー数に基づいてショートカット入力を実行できる手法を示した。

これらの研究にて提案されている操作を行うためには、追加の機器およびソフトウェアを導入する必要があるため、多くのコンピュータへすぐに導入することが難しい。

一方で、追加の機器を必要とせずに実行できるショートカット入力を行う手法が提案されてきた。Appert ら [AZ09] は、ポインタを用いて特定のストロークを描くことにより、描いたストロークに対応するショートカットが実行できる手法を示した。Cui ら [CZL⁺19] は、タッチパッド上にてキーボードの配置に基づくストロークを行うより、描いたストロークに対応するショートカットが実行できる手法を示した。Berthelley ら [BCA⁺15] は、修飾キーを押下したのちに、タッチパッド上の特定の領域をタップすることによりショートカットが実行できる手法を示した。これらの手法は追加の機器が不要であることから、多くのコンピュータへすぐに導入できる。しかし、これらの手法はホームポジションから指を離して操作する必要がある。

2.3.2 本研究の位置付け

本操作をパームレストにて行う場合には，パームレストへ追加の機器を導入する必要があるものの，コンピュータに接続するだけで使用できる（つまり，コンピュータに標準で実装されているポインティングデバイスおよびキーボードのドライバを用いる）ため追加のソフトウェアが不要である．また，本操作をタッチパッドにて行う場合には，追加のソフトウェアを導入する必要があるものの，ラップトップコンピュータに搭載されているタッチパッドのみにて実行できるため，多くのラップトップコンピュータへすぐに導入できる．そのため，追加の機器およびソフトウェアを導入する必要がある先行研究と比較して，コンピュータへ導入する敷居が低い点において本操作は優れている．さらに，本操作はホームポジションから指を離さずに実行できるため，機器の持ち替えや指の移動などの操作直前の準備にかかる時間を削減できる．

第3章 母指球の押し込みを起点としたジェスチャ操作の概要

ホームポジションから指を離すことなしにコンピュータの操作へ利用できる手の部位には、親指を除く四指基底部以下の手の平、および親指がある。これらの部位のうち、小指球部はホームポジションへ指を配置した時の手の支点として配置される（この傾向は、4.3.3 節にて述べる内容に基づく）。ホームポジションから指が離れた時も、支点である小指球が大きく動かなければ、ユーザは指をホームポジションへ容易に戻すことができる。そのため、支点である小指球を動かして操作を行うことは好ましくない。したがって本研究では、母指球および親指を操作に使用することとした。本章では、ホームポジションから指を離すことなしにコンピュータの操作を可能とする本操作手法の概要を示す。

3.1 母指球の押し込みに基づく操作

ホームポジションに指が配置されている状態においても、ユーザは指の屈曲および伸展、ならびに手首の内転および外転により、母指球を前後左右へ動かせる。そのため、ユーザは母指球を用いて2次元の方向をもつ操作を実行できる。コンピュータにおける2次元の方向をもつ操作には、主にポインティングおよびカーソル移動が挙げられる。したがって、本研究では母指球の押し込みによりポインティングおよびカーソル移動が実行できる操作手法を考案した（図 3.1）。キーボードのホームポジションに指が配置された状態において、母指球はパームレストへ配置されることから、本手法はパームレスト部分にて実行できるように設計した。

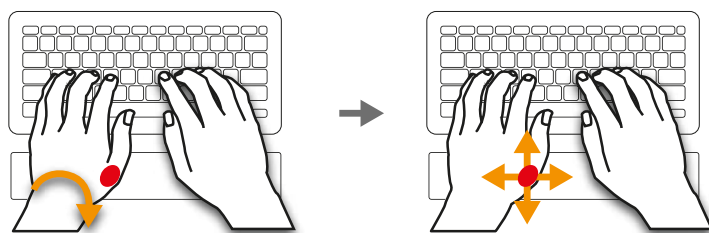


図 3.1: 母指球の押し込みにより操作を行う手順。赤い円はパームレスト上の押下されている位置を表す。

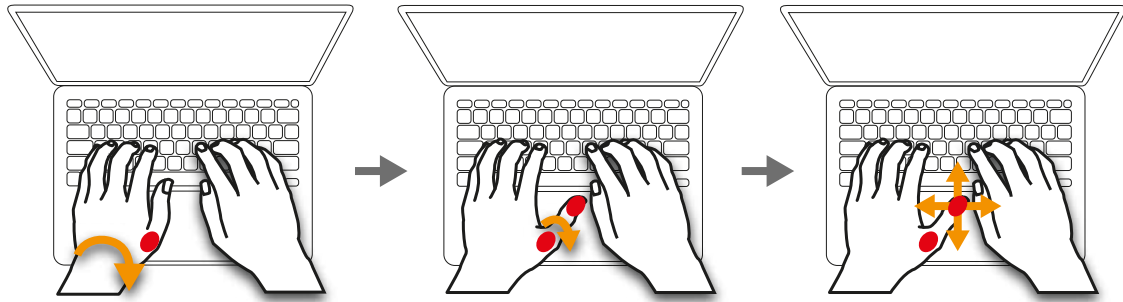


図 3.2: 母指球による押し込みを起点として親指により操作を行う手順. 赤い円はタッチパッドに触れている位置を表す.

4 章にて, 母指球の押し込みによりポインティングおよびカーソル移動が実行できる操作手法を示すとともに, この手法の使い勝手を評価した結果を示す.

3.2 母指球の押し込みを起点とした親指による操作

母指球による押し込みによる操作のみでは, 2 次元の方向をもつ操作および押し込みによる操作しか実行できない. したがって, 母指球を用いた操作による入力語彙を拡張するために, 母指球と親指を組み合わせた操作手法を考案した (図 3.2). 本操作手法は, 母指球による押し込みを行ったのちに親指によりタップまたはスワイプを行うものであり, ユーザは本操作手法を用いることにより, ショートカット入力およびカーソル移動操作を実行できる. 親指はホームポジションから指を離すことなしに操作へ利用できる手の部位であるため, 本手法は一貫してホームポジションから指を離すことなしに実行できる. また本手法は, タッチパッドへの母指球による押し込みを起点とすることにより実行するため, 親指のみによる操作では, 従来のタッチパッドにおけるポインティングが実行可能である. そのため, 本手法は母指球による押し込みを行わなければ従来のポインティングの操作へ干渉せず, かつ既存の入力語彙拡張手法と併用できる点にて優れる.

5 章にて, 母指球の押し込みを起点とした親指による操作を示す. その後, 本手法を用いた参加者実験により得られた知見に基づき, 母指球および親指を用いた操作における傾向を分析するとともに, 本手法の改良を行う.

第4章 母指球の押し込みに基づく操作

母指球を押し込む動作に基づきポインティングおよびカーソル移動が実行できる操作手法を考案した。ユーザは本操作手法を用いることにより、機器の持ち替えなしに作業し続けられるため、作業効率の向上を期待できる。本操作手法では、感圧センサが組み込まれたパームレストの押下された位置および押下圧力に基づき、ポインタおよびカーソルの移動方向および移動速度が定まる。本章では、本操作手法を示すとともに使い勝手を評価した結果を示す。

4.1 パームレストへの母指球の押し込みに基づく操作手法

ユーザは本操作手法を用いることにより、母指球を用いてポインティングおよびカーソル移動操作を実行できる（図 4.1）。本手法はユーザの押下圧力に応じて2つの段階を持つ。

最初の段階は無操作段階である。無操作段階は、パームレストへかかる押下圧力が操作に必要な閾値を下回っている状態であり、この状態においては操作は実行されない。これにより、ユーザの意図しない操作が発生することを防ぐことができる。そして、パームレストへ一定以上の圧力がかかることにより操作段階になる。

操作段階では、ユーザが押し込んだパームレストの位置および押下圧力の大きさに基づき、ポインティングおよびカーソル移動操作が実行される。例えば、ユーザがパームレストの右側を押し込めば、ポインタまたはカーソルは画面右方向へ移動する。ユーザがパームレストの前側を押し込めば、ポインタまたはカーソルは画面上方向へ移動する。この時、ユーザが押し込み続ける限りポインタまたはカーソルは移動し続け、またユーザが押し込む強さが大きいほど移動速度は速くなる。さらに、ユーザがパームレストを真下へ押し込むことによりクリック操作を実行できる。

本操作手法を用いるユーザは、母指球のみでポインティングおよびカーソル移動操作が実行できるため、ホームポジションから指を動かすことなく操作し続けることができる。したがって、ポインティングと文字入力とを頻繁に切り替える作業においても、機器の持ち替えによる時間を削減できるため、作業効率の向上が期待できる。

4.2 実装

本操作手法を実現するために作成した機器を図 4.2 に、回路図を図 4.3 に示す。本機器は3D プリンタにより作成したパームレスト、4つの感圧センサ（FSR400）、およびマイクロコントローラ（Adafruit Feather 32u4 BlueFruit LE）から構成されている。

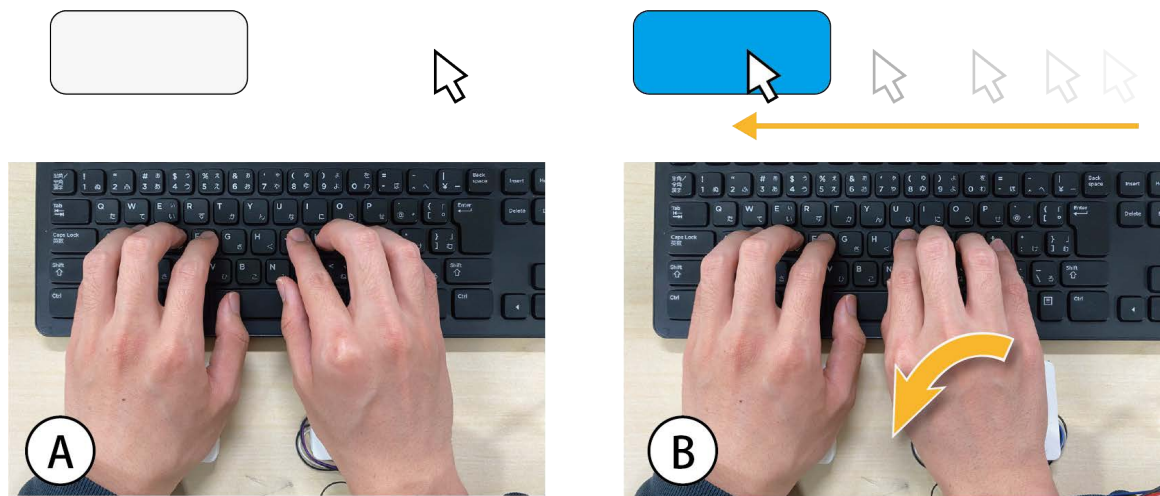


図 4.1: パームレストを押下することによりポインタを操作する様子. A) パームレストへかかる圧力が閾値未満である時はポインタは動かない. B) パームレストへ閾値以上の圧力がかかることにより、ポインタを操作できる. パームレストの押下位置および押下圧力に基づき、ポインタの移動方向および移動速度が決まる.

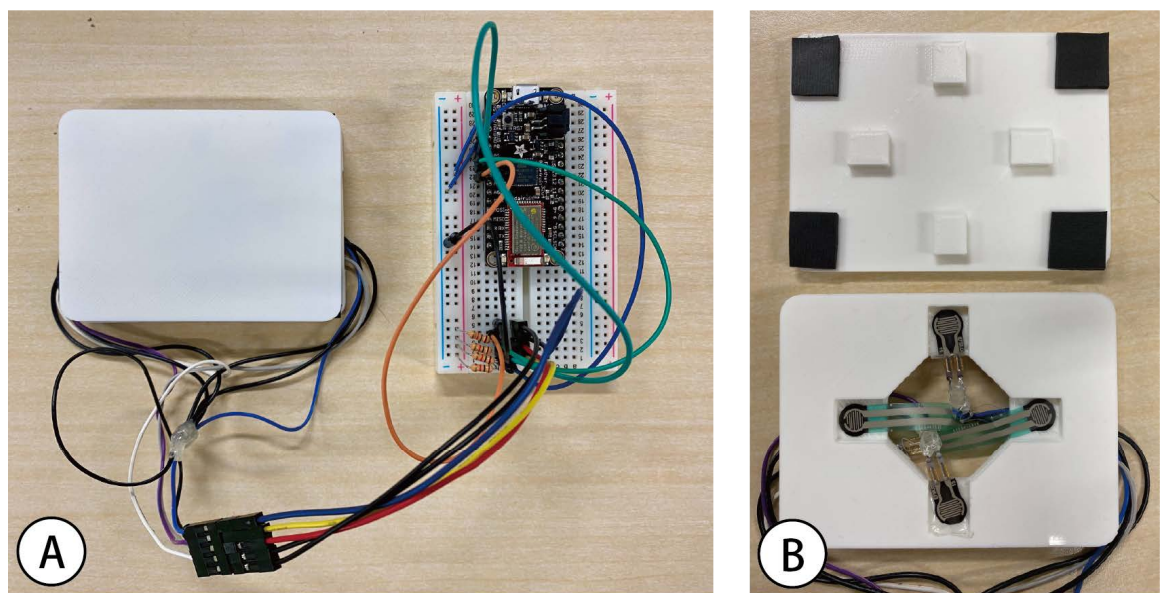


図 4.2: 本操作を実行できるパームレスト. A) 押下圧力に基づきポインティングおよびカーソル移動操作が実行できるパームレスト. B) パームレストの内部には感圧センサが十字方向に4つ取り付けられている.

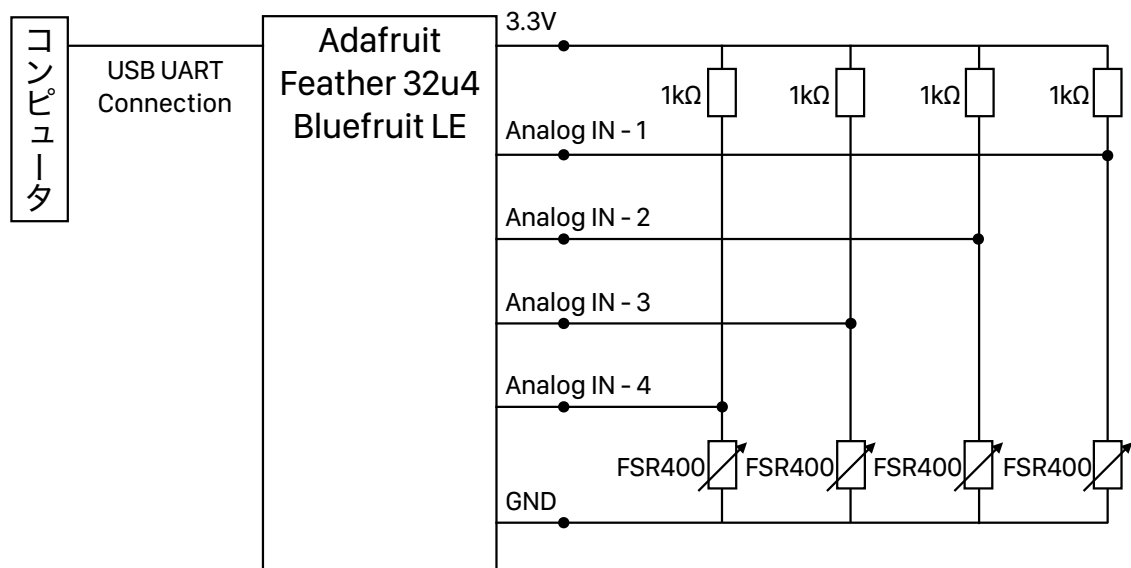


図 4.3: システムの回路図.

作成したパームレストは上層と下層からなる 2 層構造となっている。上層の表面は平面となっており、ユーザは上層の表面に手をのせて操作を行う。裏面には 5mm の突起が 4 つあり、ユーザの押し込みに応じて下層の感圧センサが押し込まれる。下層の表面には 3mm の窪みが 4 つあり、それぞれの窪みには瞬間接着剤を用いて感圧センサが固定されている。下層の裏面は 4 隅を除き空洞となっている。この空洞を通して配線が行われ、感圧センサとマイクロコントローラが接続される。この上層と下層を組み合わせることにより本機器が構成される。なお、上層の裏面の四隅には厚さ 3mm のゴムシートがスペーサとして取り付けられており、上層と下層を組み合わせた時でも、感圧センサとパームレスト上層との間に 1mm の空間が生まれる。これにより、上層の自重により感圧センサが押し込まれることを防ぐことができる。

感圧センサは圧力が加わると抵抗値が減少する性質がある。そのため、固定抵抗と組み合わせることによって、圧力により電圧が変化する分圧回路を作成できる。本機器は、固定抵抗に 1kΩ を用いた分圧回路から得られる電圧をマイクロコントローラにて測定することにより、ユーザがパームレストを押し込む動作を認識する。本機器は、パームレスト内部において前後左右の十字方向にそれぞれ 1 つずつ感圧センサが取り付けられているため、ユーザがパームレストを押し込んだ際の前後左右それぞれの位置における圧力を測定できる。

なお今回使用したマイクロコントローラは、入力された電圧（アナログ値）をコンピュータが処理できる信号（デジタル値）へ変換できる機能（Analog Digital Converter）を有しており、さらに、得られたデジタル値をコンピュータのポインタまたはカーソルを動かすための信号へ変換できる機能（Human Interface Device クラス）を有している。多くのコンピュータでは、この信号をポインティング機器およびキーボードの標準ドライバにて処理できる。し



図 4.4: 実験用に作成されたパームレスト．パームレストは，高さがキーボード最下列のキーと同程度の高さとなるように作成された．

たがって，本機器はコンピュータに接続するだけですぐに使用できる．

4.3 予備実験

ユーザがパームレストへ手を置いているだけの状態，および文字入力等のポインティングおよびカーソル移動操作以外の作業を行っている状態においても，ユーザの手の重さにより，パームレストへはある程度の圧力が生じている．この圧力により，ユーザの意図しない操作が実行される可能性がある．そのため，ユーザが本操作手法を必要としない状態において，意図しない操作が実行されることを制限する必要がある．したがって，本操作における無操作段階と操作段階とを分ける閾値を求めるために予備実験を行った．

本予備実験には，21 歳–25 歳の大学生および大学院生 8 名がボランティアで参加した．なお，参加者は女性が 1 名，男性が 7 名，平均年齢は 23.4 歳（SD=1.40 歳）であり，全参加者は普段からポインティング機器としてタッチパッドを使用していた．

4.3.1 機器

実験には Windows 10 のラップトップコンピュータ（Lenovo 社，ThinkPad T14 Gen1），24 インチのディスプレイ（DELL 社，ST2410B）および，JIS 配列の外付け QWERTY キーボード（DELL 社，KB113）を用いた．パームレストにおける参加者の押下圧力を計測するために，4.2 節にて述べたパームレストを用いた．なお，パームレストの高さは，キーボードの最下列のキーと同程度の高さに合わせて，高さ 15 mm となるように作成した（図 4.4）．

4.3.2 手順

はじめに，参加者は高さ 70 cm の机の前に設置された椅子に着席した後，椅子の高さを最も作業しやすい高さへ調節するよう指示された．その後，参加者は外付けキーボードのホーム

ポジションに指を置くように指示された。この時、実験者はパームレストをその中心が参加者の手首の中央に来るように設置した。この状態において、参加者はタイピング練習アプリケーションである e-typing¹を用いて、日本語の短文 15 文をローマ字入力にてなるべく速く正確にタイピングするように指示された。参加者 1 人あたりが要した時間は平均 3 分であった。

4.3.3 結果および考察

実験において、パームレストに組み込まれた 4 つの感圧センサがそれぞれ取得したセンサ値の分布を図 4.5（左手）および図 4.6（右手）に示す。圧力センサが測定した圧力は 0 (0 N) から 1023 (約 30 N) の値にて取得された。グラフの横軸はセンサ値を、縦軸はセンサ値の分布割合を表す。結果より、左手のパームレストにおいて右側および前側、ならびに右手のパームレストにおいて左側および前側に設置されたセンサ値が小さい傾向が示された。このことから、参加者は手の平の小指球を支点としてパームレストに手を置き、かつ体へ腕を引き寄せた状態にてタイピングしていると考えられる。したがって、ユーザの意図しない操作を防ぐためには、全ての感圧センサに対して同一の閾値を設けるのではなく、それぞれの感圧センサごとに適切な閾値を決定することが好ましいと考えられる。そこで統計学の知見に基づき、それぞれの感圧センサにおける閾値を、平均値 + 標準偏差 × 3 の値として定めた。なお、今回の予備実験により得られたデータの分布において、この閾値を超える値は全データの 1% 以下となるため、ユーザの意図しない操作を概ね防げると考えられる。

4.4 実験 1: ポインティング性能の評価

本操作手法を用いたポインティングの操作性能を評価するために実験を行った。実験には、予備実験の参加者のうち 6 名がボランティアで参加した。参加者のうち、女性が 1 名、男性が 5 名であり、平均年齢は 23.5 歳 (SD=1.04 歳) であった。

4.4.1 機器

実験には予備実験と同じ機器に加えて、4 種類のポインティング手法（マウス（DELL 社、MS111-L）、トラックパッド、トラックポイント [RS90]、本手法）を用いた。これらのうち、トラックパッドおよびトラックポイントは実験に使用したラップトップコンピュータに搭載されているものを用いた。マウス、トラックパッドおよびトラックポイントのポインタ移動速度は Windows 10 におけるデフォルトの速度とし、本手法におけるポインタの移動速度は Windows 10 のジョイスティック入力におけるポインタ移動速度とした。なお、本手法における操作の閾値には予備実験において決定した閾値を用いた。

¹<https://www.e-typing.ne.jp>

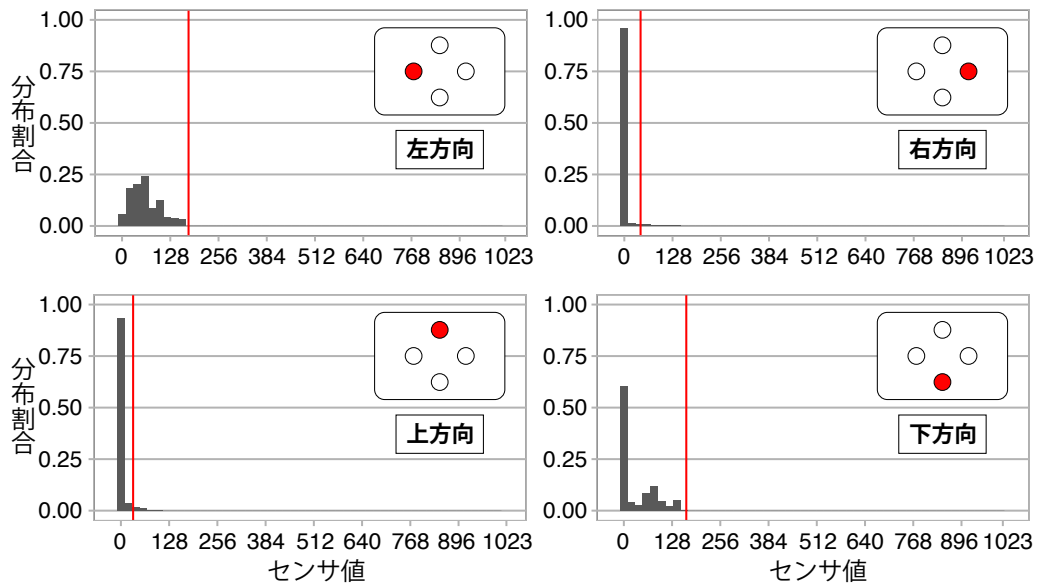


図 4.5: 参加者の左手に設置されたパームレストにおいて測定されたセンサ値の分布. 値が大きいほど大きい圧力が加わったことを表す. 赤縦線は得られたセンサ値の平均値 + 標準偏差 $\times 3$ の値である.

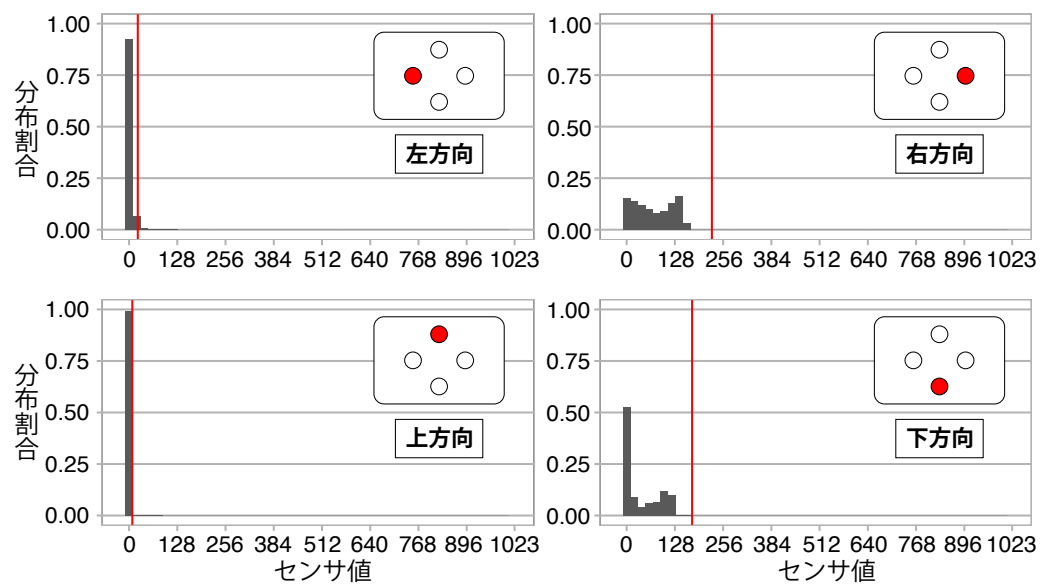


図 4.6: 参加者の右手に設置されたパームレストにおいて測定されたセンサ値の分布. 値が大きいほど大きい圧力が加わったことを表す. 赤縦線は得られたセンサ値の平均値 + 標準偏差 $\times 3$ の値である.



図 4.7: 参加者がポインティング性能実験を行っている様子。

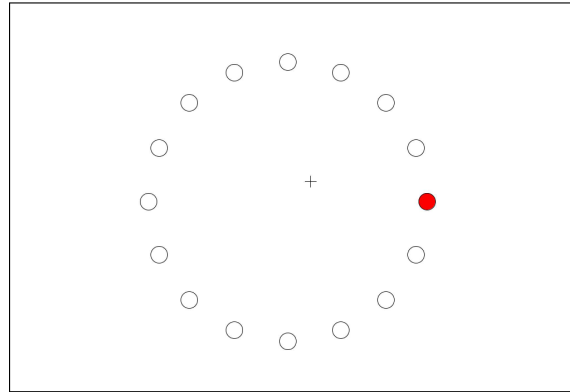


図 4.8: ポインティング性能実験にて参加者へ提示された画面。

4.4.2 手順

はじめに、参加者は高さ 70 cm の机の前に設置された椅子に着席した後、椅子の高さを最も作業しやすい高さへ調節するよう指示された（図 4.7）。その後、参加者はキーボードのホームポジションに指を置くように指示された。この時、実験者はパームレストをその中心が参加者の手首の中央に来るように設置した。参加者は、4 種類のポインティング手法のうち指示された手法のみを用いて、画面上に表示されるターゲットを一定の順番で選択する作業を行った [ISO12, MB92, SM04]。実験時に参加者へ提示された画面の例を図 4.8 に示す。実験では画面中央を中心とした円上に、円形のターゲットが 16 個配置された。このターゲットのうち、次に選択するターゲットが 1 つだけ赤くなる。参加者はポインタを移動させ、ポインタがターゲットの内側にある時にクリック操作を行うことによってターゲットを選択できた。この時参加者は、右手のみを用いてポインティング機器を扱い、ターゲットをなるべく速く正確に選択するように指示された。16 個のターゲットを一定の順番にて選択することを 1 試行とし、参加者はこの作業を対角ターゲット間の距離 2 条件（100 mm, 250 mm）、ターゲットの直径 2 条件（5 mm, 15 mm）の組み合わせ 4 条件それぞれ 1 試行ずつ行った。4 試行ごとに、参加者は自由記述および使用したポインティング手法の使用感を評価する SUS（System Usability Scale）[Bro96, BKM09] の得点を測定するためのアンケートに回答した。参加者は上記の手順を 4 種類全てのポインティング手法にて行ったため、参加者はそれぞれ 16 回 × 対角ターゲット間距離 2 条件 × ターゲットの直径 2 条件 × ポインティング手法 4 条件 = 合計 256 回のターゲット選択を行った。なお、使用するポインティング手法の使用順およびターゲット条件の提示順は参加者ごとにカウンターバランスをとった。実験全体にて要した時間は実験参加者 1 人あたり約 30 分であった。

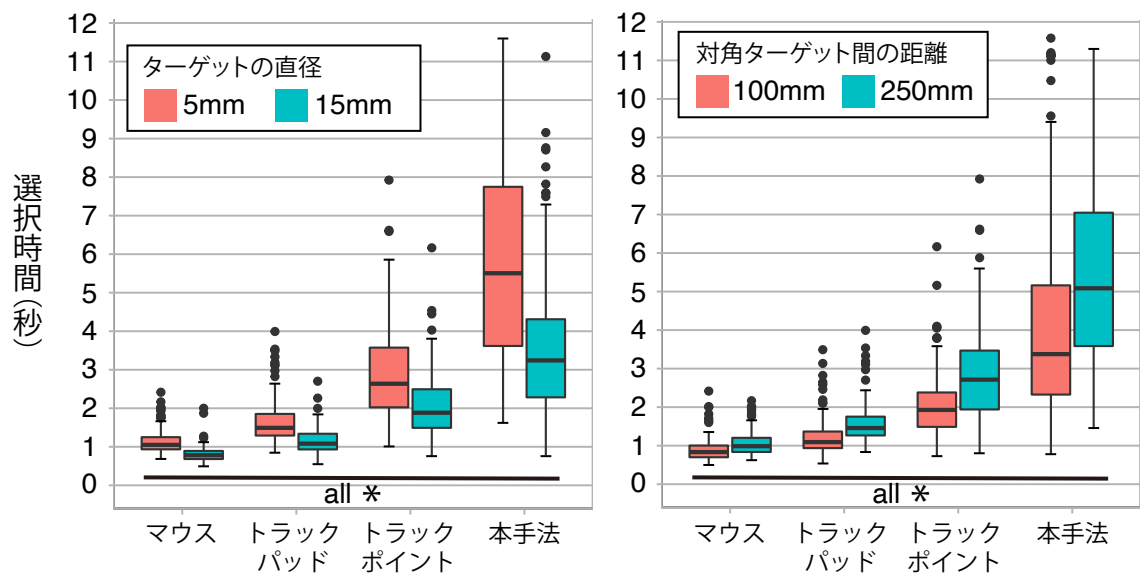


図 4.9: 手法ごとのターゲット選択時間。値が小さいほど、速くターゲットを選択できることを表す。

4.4.3 結果および考察

手法ごとのターゲット選択時間、ターゲット選択精度および使用感を比較するために検定を行った。主効果検定はクラスカル=ウォリス検定、事後検定にはボンフェローニ補正をしたウィルコクソンの順位和検定を用いた。いずれも有意水準は 0.05 とした。

ターゲット選択時間

ターゲット選択時間は、ターゲット 1 つあたりの選択に要した時間である。実験より得られた各手法のターゲット選択時間を図 4.9 に示す。ポインティング手法、ターゲットの直径、および対角ターゲット間距離をそれぞれ独立変数とした主効果検定の結果、全ての独立変数において主効果が示された（それぞれ、 $\chi^2_3 = 1.04 \times 10^3, p = 2.20 \times 10^{-16}$; $\chi^2_1 = 1.13 \times 10^2, p = 2.20 \times 10^{-16}$; $\chi^2_1 = 61.0, p = 5.78 \times 10^{-15}$ ）。事後検定の結果、全ての手法間、ターゲットの直径、および対角ターゲット間距離に有意差が検出された（全て $p < 2.20 \times 10^{-16}$ ）。

この結果から、マウス、トラックパッド、トラックポイント、および本手法の順番にて、速くターゲットを選択できることがわかった。特に、ターゲット選択に要した平均時間がマウスおよびトラックパッドにおいて 1 秒程度であることに対し、本手法が 5 秒程度であることから、機器の持ち替えの時間を考慮しても、本手法が既存手法よりも選択時間を要するポインティング手法であることがわかる。

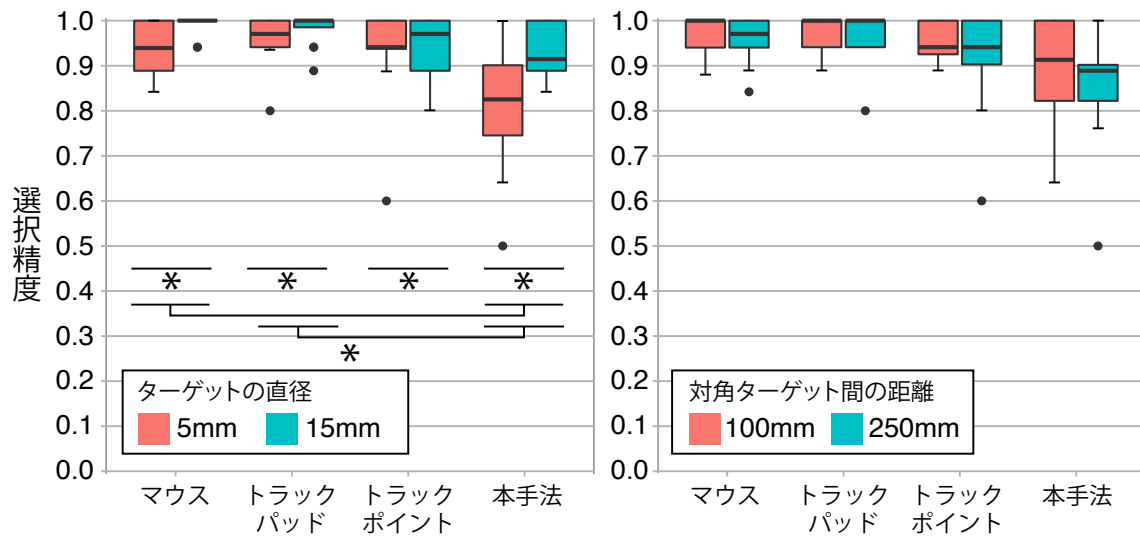


図 4.10: 手法ごとのターゲット選択精度. 値が大きいほど, ターゲット選択の精度が高いことを表す.

ターゲット選択精度

ターゲット選択精度は, 実験において参加者が行った総クリック回数の内, 正しくターゲットを選択できた割合である. 実験より得られた各手法のターゲット選択精度を図 4.10 に示す. ポインティング手法, ターゲットの直径, および対角ターゲット間距離をそれぞれ独立変数とした主効果検定の結果, 手法 ($\chi^2_3 = 16.1, p = 1.08 \times 10^{-3}$) およびターゲットの直径 ($\chi^2_1 = 7.44, p = 6.36 \times 10^{-3}$) において主効果が示された. 事後検定の結果, マウスと本手法 ($p = 9.47 \times 10^{-4}$), トラックパッドと本手法 ($p = 4.29 \times 10^{-4}$), ならびに, 全てのターゲットの直径間 ($p = 4.16 \times 10^{-4}$) に有意差が示された.

この結果から, 本手法はマウスおよびトラックパッドよりも選択精度が低いポインティング手法であることがわかった. ただし, 本手法はターゲットの直径が 15 mm であるときの平均選択精度が 9 割を超えていることから, 小さいターゲットの選択を苦手としているものの, 大きいターゲットの選択においては十分な選択精度を有していると考えられる.

使用感

SUS 得点は 0 点から 100 点の数値により示され, 高いほど使用感が良いことを表す. 実験より得られた SUS 得点を図 4.11 に示す. ポインティング手法を独立変数とした主効果検定の結果, 手法間 ($\chi^2_3 = 16.1, p = 1.08 \times 10^{-3}$) に主効果が示された. 事後検定の結果, マウスとトラックポイント ($p = 3.25 \times 10^{-2}$), マウスと本手法 ($p = 9.34 \times 10^{-5}$), トラックパッドとトラックポイント ($p = 3.66 \times 10^{-2}$), およびトラックパッドと本手法 ($p = 1.06 \times 10^{-4}$)

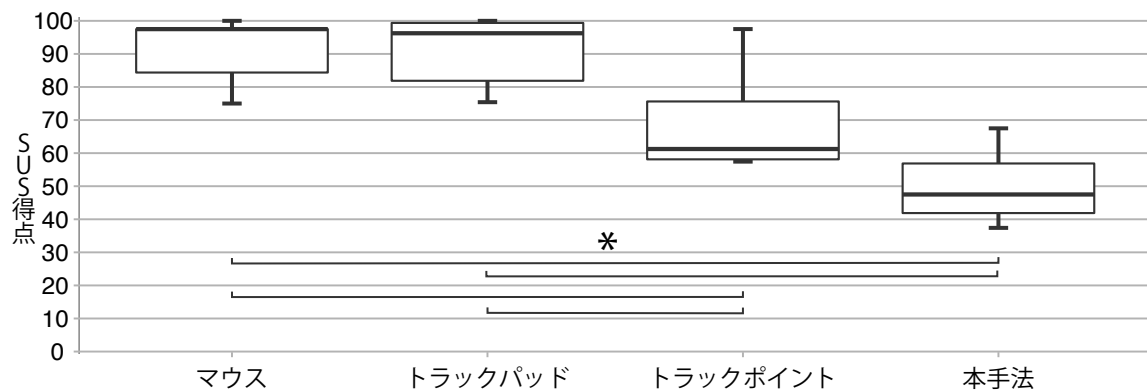


図 4.11: 手法ごとの SUS 得点. 値が大きいほど, 使用感が良いことを表す.

にて有意差が示された.

この結果より, 既存手法と比較して本手法の SUS 得点が低く, ユーザにとって扱いづらいポインティング手法であることがわかった. しかし, トラックポイントの SUS 得点も低いことから, 本手法とトラックポイントが共に採用しているジョイスティック入力によるポインタ移動が参加者にとって良い使用感ではなかったとも考えられる.

本手法に対する参加者からのコメント

アンケートにおいて, 3名の参加者が「普段使用しているポインタ速度と違うため, 思うように動かせなかった」とコメントした. 今回の手法において, 全ての手法のポインタ移動速度は実験者によりシステムのデフォルトの速度に決められていたため, 各参加者が好む速度ではなかったことから, このコメントが得られたと考えられる.

また, 参加者全員が本手法に対して, 「ポインタを止めることが難しかった」とコメントした. これは, 全ての参加者のポインタ移動においてしばしば観察できるものであった. 一方で, 参加者のうち2名は本手法に対して「上下左右のいずれか一方向ならば動かしやすい」とコメントした. これは, 本手法にて使用した機器が感圧センサを前後左右にそれぞれ1つずつのみ使用しているからであると考えられる. したがって, 感圧センサの数を増やす, または前後左右の方向のみで実行できる操作を本手法に割り当てることにより, ユーザの使用感の向上が期待できると考えられる.

4.5 実験 2: カーソル移動操作性能の調査

実験 1 における参加者の「上下左右のいずれか一方向でならば動かしやすい」というコメントから, 本手法は, 文字入力時のキャレット移動またはメニュー選択などの移動方向が制限されるカーソル移動操作であれば, 高い選択性能を実現できると考えられる. したがって次



図 4.12: 実験参加者がカーソル移動操作性能実験を行っている様子.

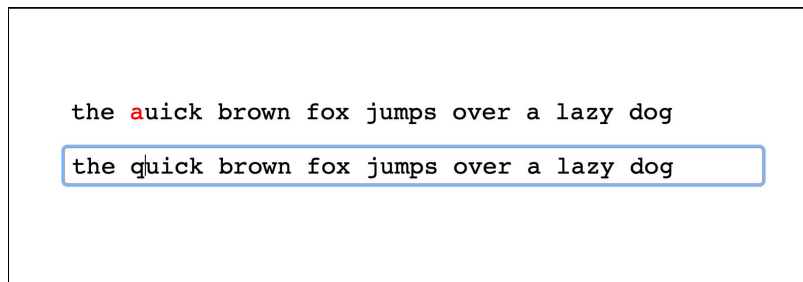


図 4.13: カーソル移動操作性能実験にて参加者に提示された画面.

に、本手法をカーソル移動操作に用いた場合の操作性能および使い勝手の評価を行った。特に、本実験ではカーソル移動操作のうち、キャレット操作における操作性能を調査した。実験には、予備実験の参加者のうち 6 名がボランティアで参加した。参加者は全員男性であり、平均年齢は 23.3 歳 ($SD=1.03$ 歳) であった。

4.5.1 機器および手順

実験には実験 1 と同じ機器を用いた。はじめに、参加者は高さ 70 cm の机の前に設置された椅子に着席した後、椅子の高さを最も作業しやすい高さへ調節するよう指示された。その後、参加者はキーボードのホームポジションに指を置くように指示された。この時、実験者はパームレストをその中心が参加者の手首の中央に来るように設置した。

実験時に参加者へ提示された画面の例を図 4.13 に示す。実験において参加者は、マウス、キーボードのカーソルキー、および本手法の中から、指示されたカーソル操作手法のみを用

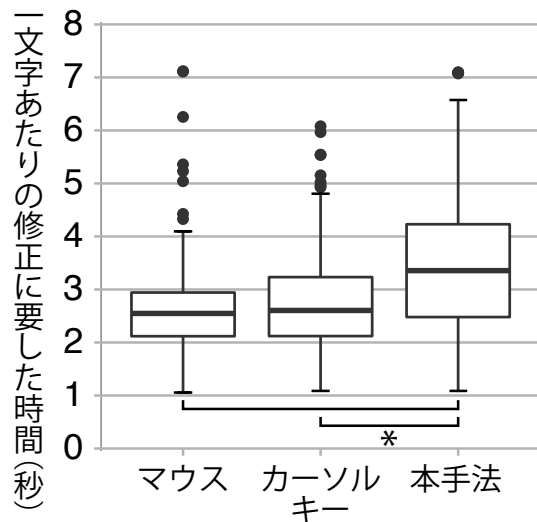


図 4.14: 各手法が 1 文字あたりの修正に要した時間.

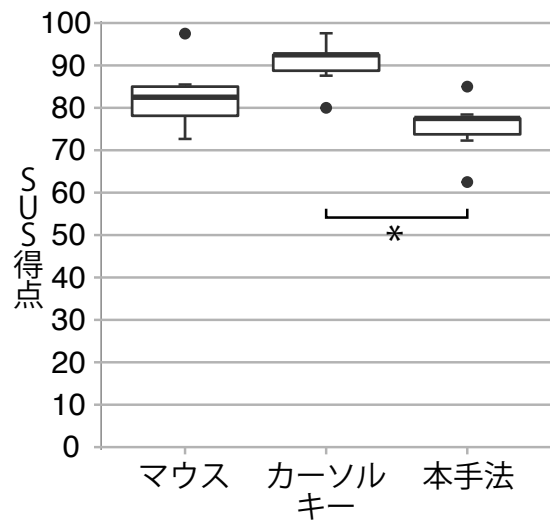


図 4.15: 手法ごとの SUS 得点.

いて、キャレットを操作した。はじめに、修正すべき 1 文字が赤くなった文字列が参加者へ提示された。参加者は、右手のみを用いてカーソル移動操作を行い、文字入力欄の文字列を提示された文字列と同じ文字列へ速く正確に修正するよう指示された。参加者はこの作業を 20 回行うことを 1 試行とし、1 手法あたり 2 試行ずつ行った。なお、参加者が入力する文字はアルファベットの中から重複なく選出された。また、修正する文字の位置までは 1 回の作業あたり平均 10 文字分のキャレット移動が必要であった。参加者は各手法にて 2 試行終えるごとに、自由記述および使用した手法の使用感を評価する SUS 得点を測定するためのアンケートに回答した。参加者は上記の作業を 3 種類全ての手法にて行ったため、20 回 × 2 試行 × カーソル操作手法 3 条件 = 合計 120 回の修正作業を行った。実験全体にて要した時間は実験参加者 1 人あたり約 15 分であった。

4.5.2 結果および考察

手法ごとの修正に要した時間、および使用感を比較するために検定を行った。主効果検定はクラスカル=ウォリス検定、事後検定にはボンフェローニ補正をしたウィルコクソンの順位和検定を用いた。いずれも有意水準は 0.05 とした。

修正に要した時間

実験より得られた 1 文字あたりの修正に要した時間を図 4.14 に示す。カーソル操作手法を独立変数とした主効果検定の結果、手法間 ($\chi^2_2 = 70.9, p = 3.97 \times 10^{-16}$) に主効果が示された。事

後検定の結果、マウスと本手法 ($p = 5.01 \times 10^{-14}$), カーソルキーと本手法 ($p = 3.33 \times 10^{-10}$) にて有意差が示された。

この結果より、本手法はマウスおよびカーソルキーよりもキャレット移動に時間を要する手法であることがわかった。ただし、各手法が修正に要した平均時間は、マウスが 2.62 秒、カーソルキーが 2.74 秒、本手法が 3.50 秒であり、本手法と既存手法の作業時間の差は 1 秒以内となっている。そのため、今回の実験にて参加者が初めて本手法を使用したこと、および短期間の実験であったことを考慮すれば、ユーザが本手法に慣れることにより、キャレット移動をマウスおよびカーソルキーより高い速度にて実行できる可能性は十分に考えられる。

使用感

実験より得られた使用感の良さを表す SUS 得点を図 4.15 に示す。カーソル操作手法を独立変数とした主効果検定の結果、手法間 ($\chi^2_2 = 8.40, p = 1.50 \times 10^{-2}$) に主効果が示された。事後検定の結果、カーソルキーと本手法 ($p = 1.59 \times 10^{-2}$) にて有意差が示された。

この結果から、本手法は既存手法と比較して使用感が悪いことわかった。ただし、本手法の SUS 得点が平均 75.4 点と高い点数であることから、本手法は参加者にとって十分に使いやすい手法であったと考えられる。

参加者のコメント

アンケートにおいて、参加者のうちの 3 人が本手法に対して、「ホームポジションから手を動かさずにキャレットを動かせるため、とても便利である」とコメントした。このコメントから、ユーザは本手法を用いて快適にキャレットを操作できたと考えられる。

一方、参加者のうちの 2 名が本手法に対して「1 文字だけキャレットを動かすような細かい操作が要求される時に 2 文字以上動くことが多かった」とコメントした。このコメントから、本手法はユーザが詳細な操作を行おうとしても、詳細なカーソル移動が難しい手法であると考えられる。

4.6 議論

実験 1 より、本手法をポインティングに使用した場合、機器の持ち替え時間を考慮しても既存手法より選択時間を要し、かつ選択精度が低いことがわかった。また、参加者の使用感の評価およびコメントから、本手法はユーザにとって使いづらい手法であることが示された。一方で実験 2 より、本手法をキャレット操作に使用した場合、ユーザに十分受け入れられる使い勝手を有しており、ユーザが本手法に慣れることにより、より高い速度にてキャレット操作を実行できる可能性が示された。これらから、本手法による 2 次元の方向を持つ操作においては、操作方向を十字方向のみへ制限するなどの試みが必要であると考えられる。

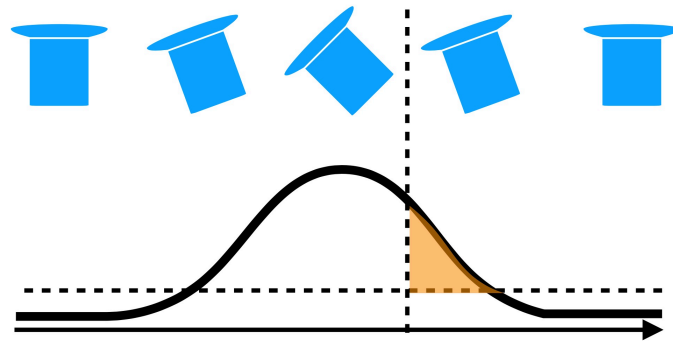


図 4.16: ジョイスティック入力における入力量と時間の対応関係。縦軸はジョイスティック入力に対する入力量を表し、横軸は時間を表す。横の点線が閾値を表し、縦の点線はユーザーがポインタを止めたいと思ったタイミングを表す。橙色の領域分だけユーザーの意図を超過した入力の実行される。

また、実験1において「ポインタを止めることが難しかった」、実験2において「1文字だけキャレットを動かすような細かい操作が要求される時に2文字以上動くことが多かった」というコメントが得られたことから、本手法において採用しているジョイスティック入力の扱いが難しいと考えられる。この傾向は、同じくジョイスティック入力を採用しているトラックポイントのSUS得点が低いこと（図4.11）からも伺える。ジョイスティック入力は連続的な入力であるため、ユーザーが止めたいと判断したタイミングにおいても、入力の発生しない閾値を下回るまでは入力が発生する（図4.16）。つまり、トラックポイントであればスティックの傾きが、本手法であればパームレストにかかる圧力が閾値を下回るまでは入力が発生する。そのため、ユーザーの意図よりも入力が大きくなる傾向が見られたと考えられる。したがって、ジョイスティック入力において、ユーザーの意図通りの操作が実行できる仕組みを検討することは今後の課題である。

第5章 母指球の押し込みを起点とした親指による操作

4章にて示した手法は母指球のみを操作に用いるため、2次元の方向をもつ操作および押し込みによる操作しか実行できなかった。したがって、母指球を用いた操作の入力語彙を拡張するために、母指球と親指を組み合わせた操作手法を考案した（図 5.1）。親指はホームポジションから指を離すことなしに操作へ利用できる手の部位であるため、本操作手法は一貫してホームポジションから指を離すことなしに実行できる。本操作手法では、ユーザの母指球によるタッチパッドへの押し込み動作を起点とする。したがって、母指球をタッチパッドへ押し込まなければ、既存のポインティングデバイスの機能をそのまま利用でき、かつタッチパッド用に開発された入力手法（例えば、ScraTouch [IY20] およびホットコーナー¹など）と併用できる。

5.1 タッチパッドへの母指球の押し込みを起点とした親指による操作

本操作手法は母指球をタッチパッドへ押し込んだのちに、親指を動かすことにより、ショートカット入力、カーソル移動を実行できる操作手法である。そのため、ユーザはホームポジションから指を離すことなく本手法を実行できる。本節では、本操作手法にて判定するジェスチャを示す。

なお、以降で示すジェスチャはいずれも母指球をタッチパッドへ押し込んだ（図 5.2-1）のちに行うジェスチャである。

5.1.1 親指によるタップジェスチャ

親指によるタップジェスチャにより、ショートカット入力を行える（図 5.2-2）。このジェスチャでは、ユーザの母指球および親指のそれぞれのタッチ点からなる直線がタッチパッドの下端方向となす角に基づき、領域が選択され、その領域に割り当てられたショートカットが実行される。選択できる領域（0 度から 90 度）が均等に 3 つの領域へ分割され、それぞれの領域にはユーザが自由にショートカットを割り当てられる。例えば、0 度から 30 度ならコピー、30 度から 60 度ならペースト、60 度から 90 度なら全選択と割り当てられる。

¹<https://support.apple.com/guide/mac-help/mchlp3000/mac>

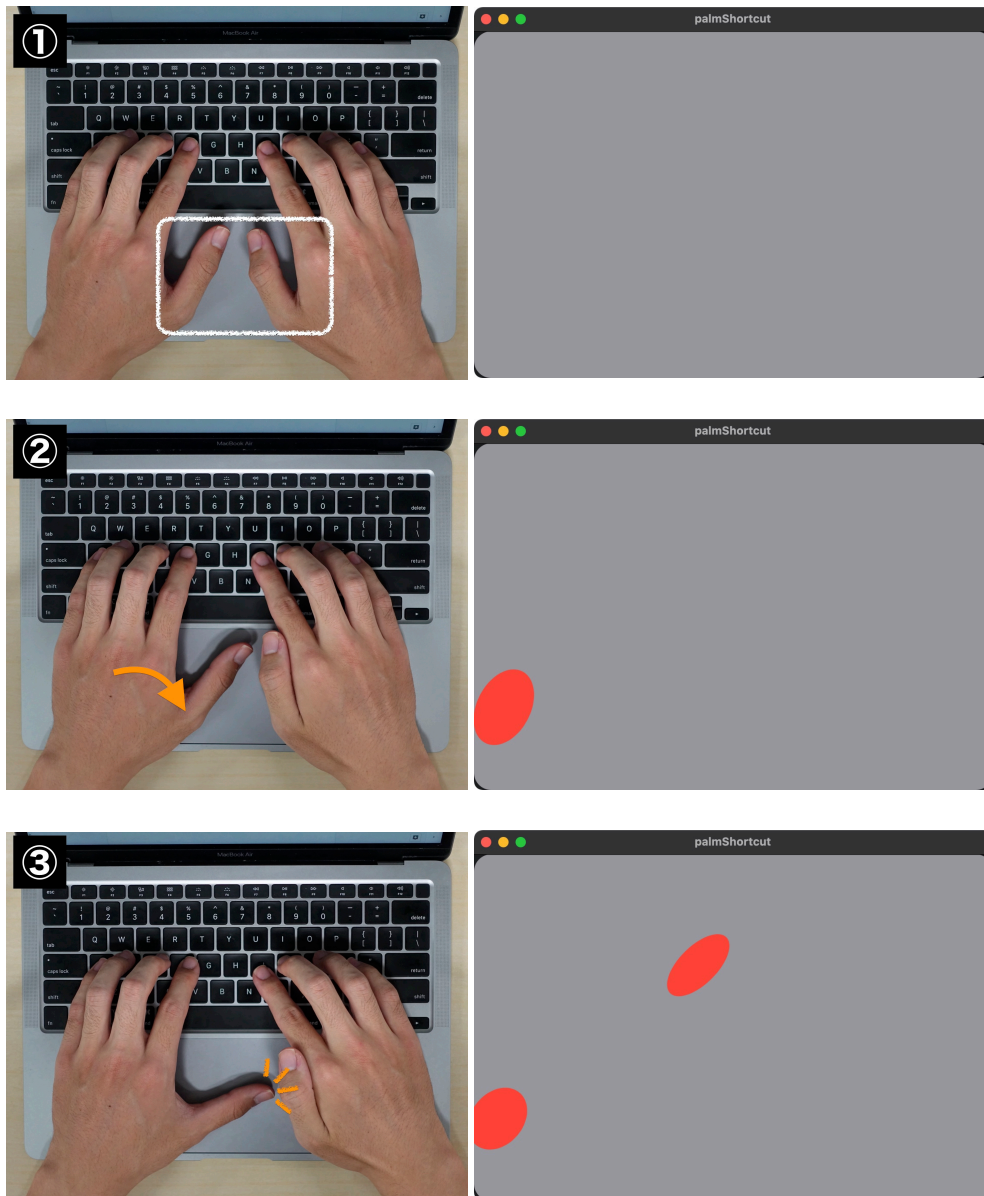


図 5.1: 本操作手法の操作手順. 図右側はシステムが認識しているタッチパッド上のタッチ点を表しており、タッチ点は赤い円として描画される. 1) キーボードのホームポジションへ指をおいた状態 (白枠線はタッチパッドの領域を表す). 2) 母指球をタッチパッドへ押し込むことにより、ジェスチャの待機状態となる. 3) 親指を動かすジェスチャより操作が実行される.

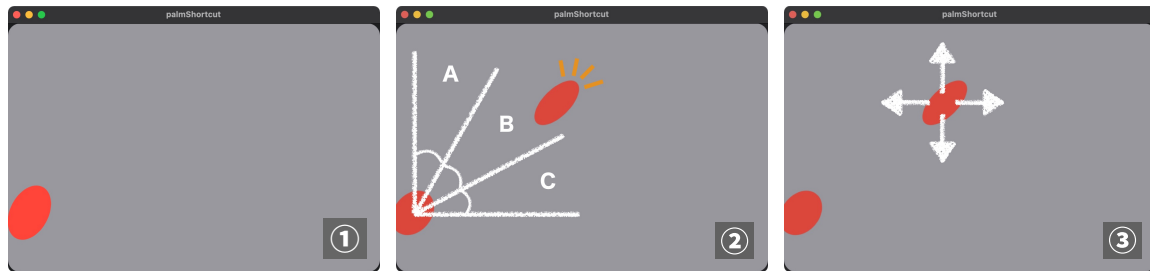


図 5.2: 本操作手法にて操作を実行できるジェスチャ．これらのジェスチャは，1) 母指球を押し込んだ後にジェスチャすることにより操作が実行できる．2) 特定の角度に親指を開き，タッチパッドをタップするジェスチャ．3) 親指にてスワイプするジェスチャ．

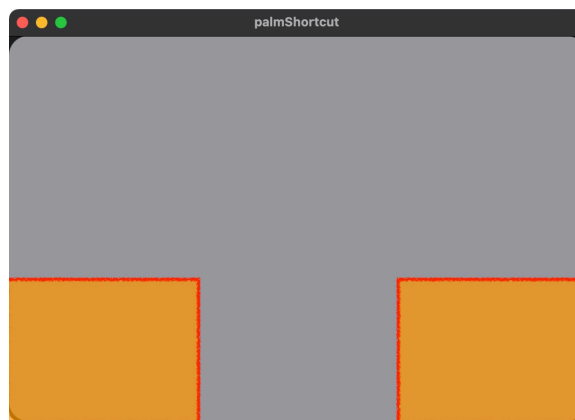


図 5.3: 母指球によるタッチと判定する領域（橙色にて示した左右両端下 30%の領域）．

5.1.2 親指によるスワイプジェスチャ

親指によるスワイプジェスチャにより，カーソル移動を行える（図 5.2-3）．例えば，親指を左へスワイプした場合，左カーソル移動の入力となる．

キーボード上において，カーソルキーはホームポジションから離れた場所に配置されるため，キーボード上のカーソルキーを操作するためにはホームポジションから指を離す必要がある．本手法を用いることにより，ユーザはホームポジションから指を離すことなくカーソル移動を実行できるため，カーソル移動を頻繁に利用する表計算ソフトでの作業において作業効率の向上が期待できる．

5.2 実装

本操作手法を実現するために，macOS にて動作するシステムを作成した．なお，タッチ点の情報は Swift 言語の `MultitouchSupport.framework` を用いることにより取得した．しかし，`MultitouchSupport.framework` のみでは，タッチパッドへのタッチが母指球によるタッチか判

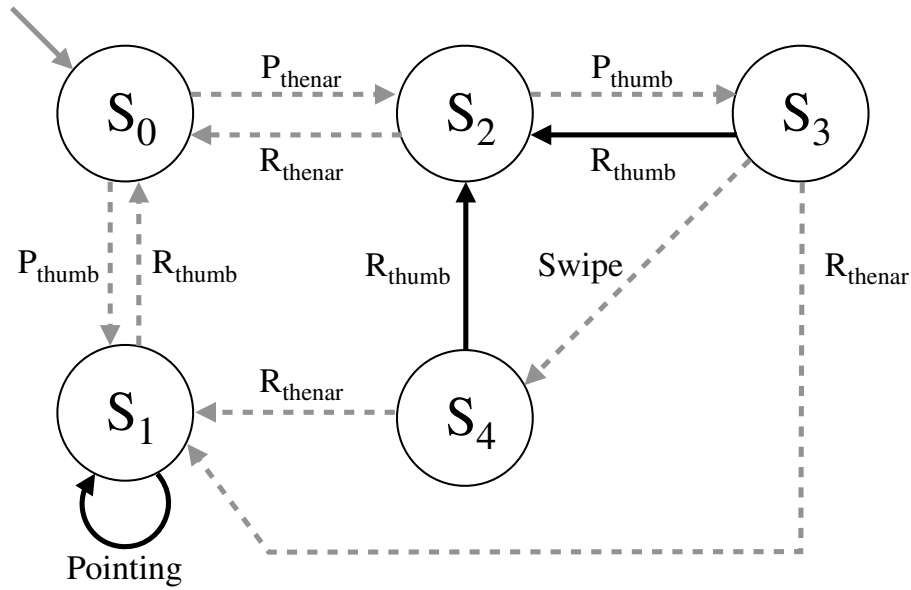


図 5.4: 本手法における操作の状態遷移図. P_x は x (母指球または親指) がタッチパッドへ触れたことを表し, R_x は x (母指球または親指) がタッチパッドから離れたことを表す. また, 点線は状態遷移のみであり, 実線は状態遷移に加えて入力の実行されることを表す.

表 5.1: 状態遷移図における各状態の説明.

状態	状態の説明
S_0	タッチパッドへ触れていない状態 (初期状態)
S_1	タッチパッドを用いてポインティングを行っている状態
S_2	母指球のみがタッチパッドへ触れている状態
S_3	母指球および親指が両方タッチパッドへ触れている状態
S_4	親指によるスワイプが行っている状態

定できない. したがって本システムにおいては, タッチパッドにおける操作の大半がタッチパッドの中央およびその下部にて行われること [MGB⁺16] に基づき, タッチパッドの両端下 30% の領域 (図 5.3) へのタッチを母指球によるタッチとして判定することとした.

本操作手法における状態遷移図を図 5.4 に, 状態遷移図における各状態の説明を表 5.1 に示す. 本操作は母指球による押し込みを行うことにより初めて実行できる. そのため, 母指球よりも先に親指がタッチパッドへ触れたときは, 通常のポインティングが実行される. さらに本操作の途中であっても, タッチパッドから親指が離れるよりも先に母指球が離れた時は, 本操作の実行がキャンセルされる. これらの本操作が実行されづらい状態遷移を導入することにより, ユーザの意図しない操作が実行される可能性を低減できる. なお, この状態遷移

におけるタップとスワイプの判定には macOS 標準のジェスチャ判定処理²を用いた。

5.3 予備実験

本操作手法の使い勝手を評価するために、大学生および大学院生 6 名 (P_1 – P_6) に本操作手法を用いて表計算ソフトウェア (Numbers.app³) の操作を行ってもらった。なお、参加者は全員男性であり、平均年齢は 23.8 歳 ($SD=1.60$ 歳) であった。

実験には 5.2 節にて述べたシステムを用い、このシステムを動作するコンピュータには MacBook Air (2020 年モデル, macOS 12.1, CPU: Intel Core i7-1060NG7, RAM: 16GB) を用いた。なお、本操作手法を用いた表計算ソフトの操作においては、親指のタップによる領域選択にて、0 度から 30 度ならコピー、30 度から 60 度ならペースト、60 度から 90 度なら全選択が実行でき、親指のスワイプによるカーソル移動にてセル間の移動が実行できた。

5.3.1 手順

はじめに、参加者は高さ 70 cm の机の前に設置された椅子に着席した後、椅子の高さを最も作業しやすい高さへ調節するよう指示された。その後、参加者はキーボードのホームポジションに指を置くように指示された。本予備実験における作業内容は、セル間の移動、特定のセルのコピー、および別のセルへのペーストを本手法のみを用いて 5 分間自由に行ってもらったものであった。参加者は作業中に思ったことを自由に発言すること、および実験終了後に本手法の使い勝手についてコメントすることを要求された。なお、作業中におけるタッチパッドにおけるタッチ点の重心座標、およびユーザの操作によりシステムがどの入力を実行したのかのログを 120 fps にて収集した。

5.3.2 参加者からのコメント

実験より得られた参加者からのコメントを以下に列挙する。

- 下方向へのセル間の移動が難しい (P_1, P_2, P_4)。
- 左右方向へのセル間の移動は容易に実行できる (P_1, P_2, P_4)。
- スワイプしたつもりだが、何も操作が実行されない時があった (P_3, P_4)。
- コピー操作は親指をかなり開かないと実行できないため、よく別のショートカットが実行される (P_2, P_5, P_6)。
- 間違って操作が実行されないように、手をわずかに浮かせながら作業したため疲れた (P_1, P_3)。

²<https://developer.apple.com/documentation/swiftui/draggesture>

³<https://www.apple.com/numbers/>

- 手の移動が必要ないため、操作に慣れれば素早く表操作ができそう (P₄, P₆).

5.3.3 議論および改良案の検討

本小節では予備実験より得られた参加者のコメントから、本手法の改良案を検討する。

タップとスワイプの判定処理の調整

参加者2名から「スワイプしたつもりだが、何も操作が実行されない時があった」というコメントが得られた。その後ログを解析した結果、参加者がスワイプを意図して実行したジェスチャにおける親指の移動量が小さく、システムではタップ操作（コピー）として判定されていることがわかった。これは、本手法におけるタップとスワイプの判定に macOS 標準のジェスチャ判定処理を用いていることが原因であると考えられる。本手法を使用するためにユーザは母指球にてタッチパッドへ触れる必要があり、その状態では親指を動かせる範囲が制限される。そのために、ジェスチャ判定処理にてスワイプと判定されるために必要な指の移動量を満たせなかったと考えられる。このことから、本手法におけるタップとスワイプを判定できる適切な閾値を決める必要がある。

親指によるタップにより選択できる領域の配分最適化

参加者3名から「コピー操作は親指をかなり開かないと実行できないため、よく別のショートカットが実行される」というコメントが得られた。このコメントから、親指を大きく開く動作は難しいと考えられる。したがって、ユーザが無理なく親指を開ける範囲を調査するとともに、ショートカットを実行できる領域の角度の分割配分を調べる必要があると考えられる。

スワイプの方向を判定する軸の修正

予備実験において参加者3名が「下方向へのセル間の移動が難しい」および「左右方向へのセル間の移動は容易に実行できる」と述べていることから、縦軸方向へ親指をスワイプすることは困難であるが、横軸方向へ親指をスワイプすることは容易であるといえる。これは、母指球を固定した状態において、親指を円弧に動かすことは骨格上容易であるが、上下左右方向へ正確に動かすことは困難であることが原因であると考えられる。したがって、ユーザの上下左右方向それぞれの方向への親指のスワイプを収集し、ユーザの指の動きに合わせて、スワイプの上下左右方向を判定する軸を修正する必要があると考えられる。

5.4 操作手法の改良を目的とした調査

先述した改善案に基づき、本手法の改良を目的としたデータ収集実験を行った。本実験では、1) タップとスワイプを弁別できる親指の移動量、2) 親指によるタップにより選択され

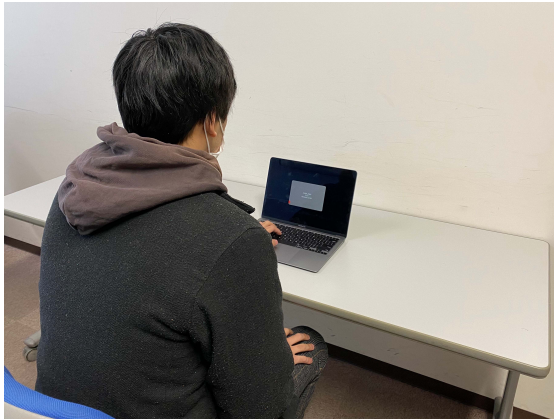


図 5.5: データ収集実験の様子.

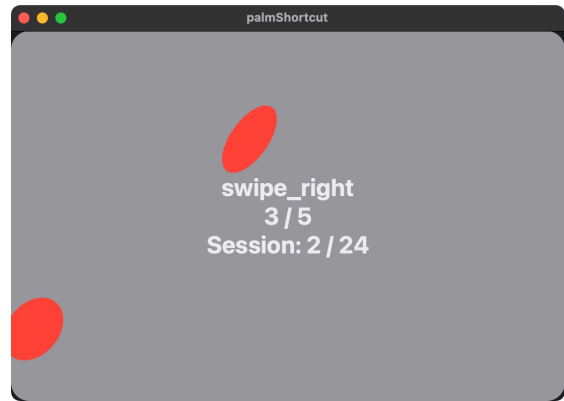


図 5.6: 実験中のコンピュータの画面表示.

る領域, 3) 親指によるスワイプの方向の3つの視点から分析を行い, 本手法の具体的な改良方法を検討する.

5.4.1 データ収集実験

本実験には21歳–26歳の大学生および大学院生15名 (P_1 – P_{15}) がボランティアにて参加した. 参加者は女性が6名, 男性が9名であり, 平均年齢は23.9歳 ($SD=1.06$ 歳) であった. 参加者の手の大きさ ([oAISA22] における L2) は平均184mm ($SD=17.5$ mm) であり, 親指の長さ ([oAISA22] における L9) は平均64.3mm ($SD=4.93$ mm) であった. なお, 手の大きさおよび親指の長さはデジタルノギス (シンワ測定株式会社, 19996) を用いて計測した.

実験には5.2節にて述べたシステムを用い, システムを動作させるコンピュータにはMacBook Air (2020年モデル, macOS 12.1, CPU: Intel Core i7-1060NG7, RAM: 16GB) を用いた. このコンピュータのタッチパッドの大きさは縦80mm, 横120mmであった.

手順

はじめに, 参加者は高さ70cmの机の前に設置された椅子に着席した後, 椅子の高さを最も作業しやすい高さへ調節するよう指示された. その後, 参加者は実験者から本手法の操作方法の説明を受けた. そして, 参加者は本操作に慣れるために, 本操作手法を用いて3分程度の練習を行った. 練習後, 参加者は実験タスクを行った (図 5.5). 実験タスクは, 母指球によるタッチパッドへの押し込みを行ったのちに, コンピュータの画面上の表示 (図 5.6) にしたがってジェスチャを行うものであった. ユーザに提示されたジェスチャの一覧を表 5.2 に示す. 実験ではこれら8つのジェスチャが無作為な順番にて提示された. なお, 参加者はホームポジションに指をおいた状態にて, 提示されたジェスチャを左手のみを用いて正確に実行するように指示された.

表 5.2: 参加者が実験にて行ったジェスチャの一覧.	
表示名	操作内容
tap_high	親指を閉じて、タッチパッド上部をタップする
tap_middle	親指を軽く開き、タッチパッド中腹をタップする
tap_low	親指を大きく開き、タッチパッド下部をタップする
swipe_up	親指を上方向へスワイプする
swipe_down	親指を下方向へスワイプする
swipe_left	親指を左方向へスワイプする
swipe_right	親指を右方向へスワイプする
cancel	上記のジェスチャ中に、母指球のみをタッチパッドから離す

各提示ごとにジェスチャを5回行うことを1セッション、8種類のジェスチャごとに3セッション行うことを1セットとし、各参加者はこれを3セット行った。したがって、参加者ごとに8ジェスチャ×5回×3セッション×3セット＝ジェスチャ360回分のデータが得られた。なお、実験時間は参加者1人当たり15分程度であった。

収集したデータ

実験において、ユーザによるジェスチャの開始点と終了点のデータを収集した。ジェスチャの開始点は、ユーザの母指球および親指の両方がタッチパッドへ触れた時とし、ジェスチャの終了点は、ユーザの母指球または親指のどちらかがタッチパッドから離れた時とした。それぞれのタッチ点からは、タッチパッド上におけるタッチ点（楕円）の重心の座標、楕円の長径および短径、ならびに指の傾きおよび押下圧力をデータとして収集した。また、ジェスチャの開始点および終了点の組み合わせから、ジェスチャの実行時間、指の移動方向および移動量、ならびに母指球と親指のどちらが先にタッチパッドから離れたかをデータとして収集した。さらに、ジェスチャの開始点および終了点のそれぞれにおいて、母指球と親指がなす直線がタッチパッドの下端方向となす角度を収集した。

なお、タッチパッド上におけるタッチ点からの情報取得には、Swift 言語の MultitouchSupport.framework を用いた。

5.4.2 実験結果

本小節では、データ収集実験より得られたデータに基づき分析を行う。

タップとスワイプを弁別できる親指の移動量の分析

タップおよびスワイプそれぞれの操作における親指の移動量について、参加者全体における分布を図 5.7 に、参加者ごとの分布を図 5.8 に示す。

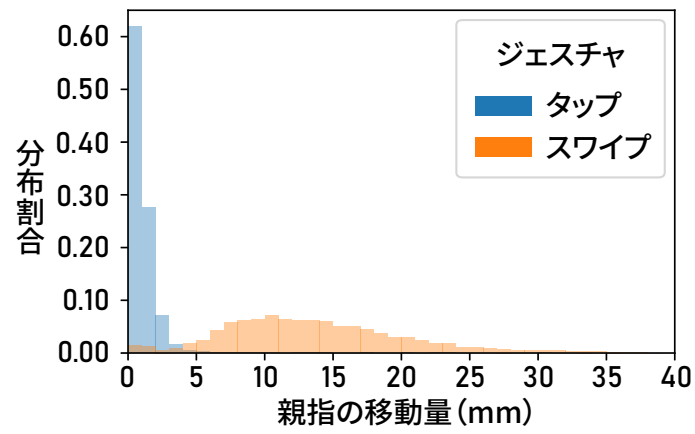


図 5.7: 本手法を用いたジェスチャにおける親指の移動量の分布（全参加者）.

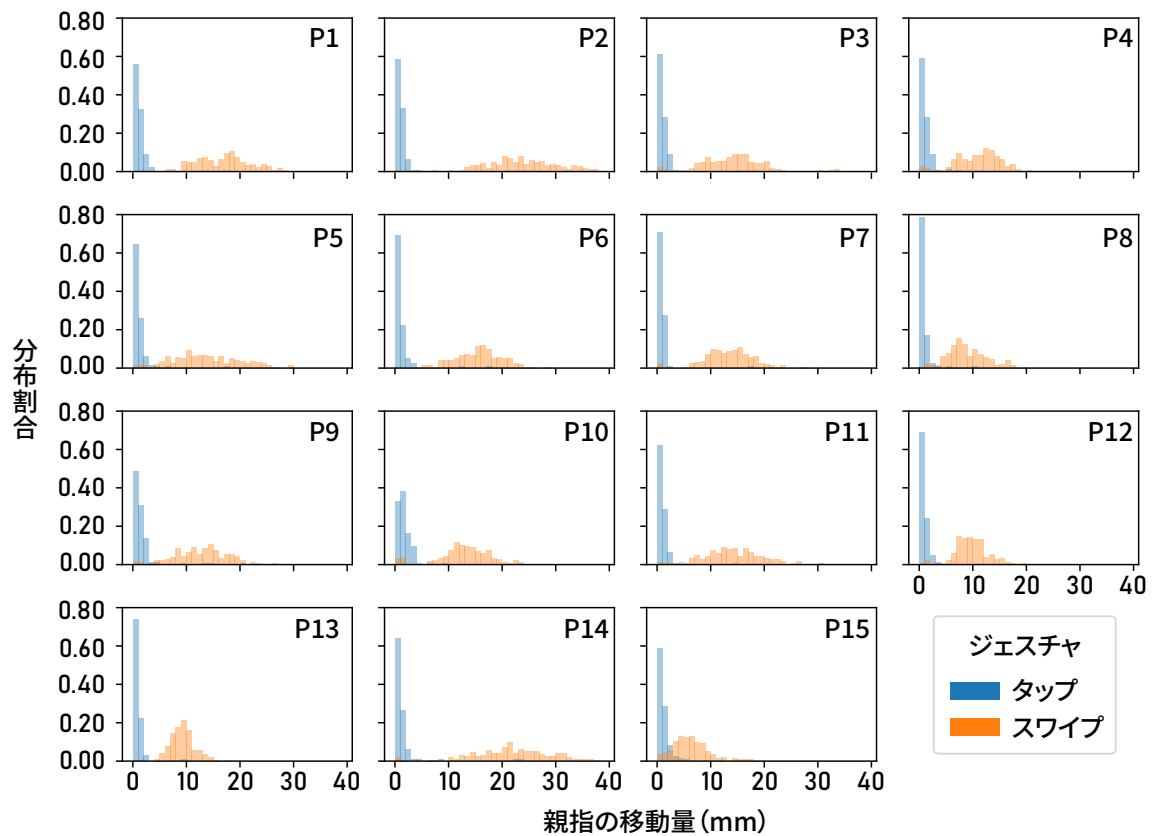


図 5.8: 本手法を用いたジェスチャにおける親指の移動量の分布（参加者ごと）.

図 5.7 より、タップとスワイプでは親指の移動量が明確に分かれていることがわかる。特に、タップでは親指が 1 mm から 2 mm 程度しか動いておらず、一方でスワイプは 5 mm 以上親指が動く傾向があることが観察された。この傾向は参加者ごとの分布（図 5.8）においても概ね同じ傾向が観察された。そのため、この傾向に基づいて閾値を設定することにより、タップとスワイプを弁別できると考えられる。

親指によるタップにより選択される領域の分析

親指のタップにより領域が選択された時の、母指球と親指がタッチパッドの下端方向となす角度について、参加者全体における分布を図 5.9 に、参加者ごとの分布を図 5.10 に示す。

図 5.9 より、60 度から 90 度の分布が少なく、かつそれぞれの操作の分布が大きく重複していることが観察できる。このことから、均等に分割した場合において、ユーザは意図した領域をうまく選択できないと考えられる。一方で、参加者ごとの分布（図 5.10）に着目した場合、それぞれの操作にて分布が明確に分かれていることがわかる。したがって、領域の分割はユーザごとに最適な領域の分割配分が異なるといえる。

より詳細な分析を行うために、本手法を用いた親指によるタップ時の母指球および親指のタッチ点の分布を観察した。参加者全体における分布を図 5.11 に、参加者ごとの分布を図 5.12 に示す。

図 5.11 より、それぞれの操作が割り当てられている領域が明確に分かれておらず、重複している点が多々見られる。特に、tap_low の分布が広い一方で、tap_middle および tap_high の分布は比較的集中している。さらに、母指球のタッチ点が親指のタッチ点の分布よりも下部に集中している。これは、参加者ごとの傾向（図 5.12）からも読み取れる。したがって、親指を大きく開く操作は難しいことが読み取れる。しかし、参加者ごとに見たときに、それぞれの操作におけるタッチ点の分布は明確に分かれていることから、先述したように、ユーザごとに最適な領域の分割配分は異なるといえる。

親指によるスワイプの方向の分析

親指によるスワイプの移動方向および移動量を分析するために、スワイプ開始点を原点とした時のスワイプ終了点の分布を観察した。参加者全体における分布を図 5.13 に、参加者ごとの分布を図 5.14 に示す。

図 5.13 より、親指のスワイプの移動方向が、親指の開閉時に自然に動かせる円弧上に沿っていることが観察できる。このことから、親指を伸展および屈曲する方向へ動かすことが難しく、内転および外転する方向へ動かすことが容易であるといえる。この傾向は先行研究における傾向と一致している [TUKD12, 黒澤 15]。特に、swipe_up および swipe_down は大きく左右方向へ流れていることから、上下方向へのスワイプは左右方向へのスワイプよりも実行が難しいことが窺える。一方で、それぞれのスワイプ終了点の分布には重複が少ない。これは参加者ごとに観察しても（図 5.14）も同様の傾向が見られる。したがって、スワイプの方向を判定する軸を調整することにより、スワイプ方向の誤判定を減らせると考えられる。

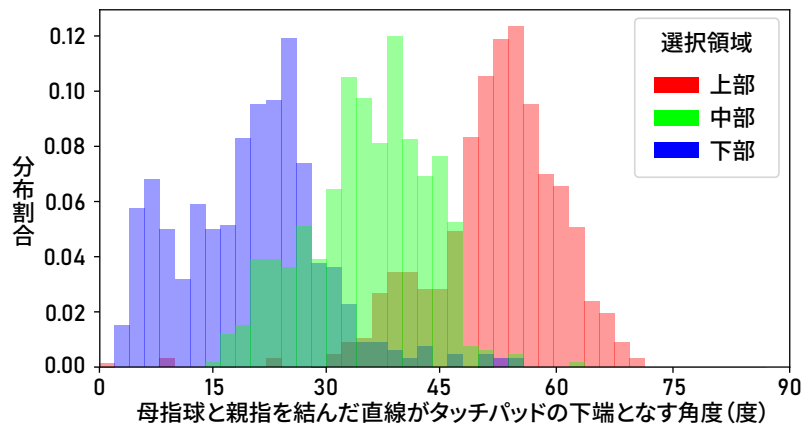


図 5.9: 本手法を用いた親指によるタップにより領域が選択された時の、母指球と親指がなす角度の分布（全参加者）.

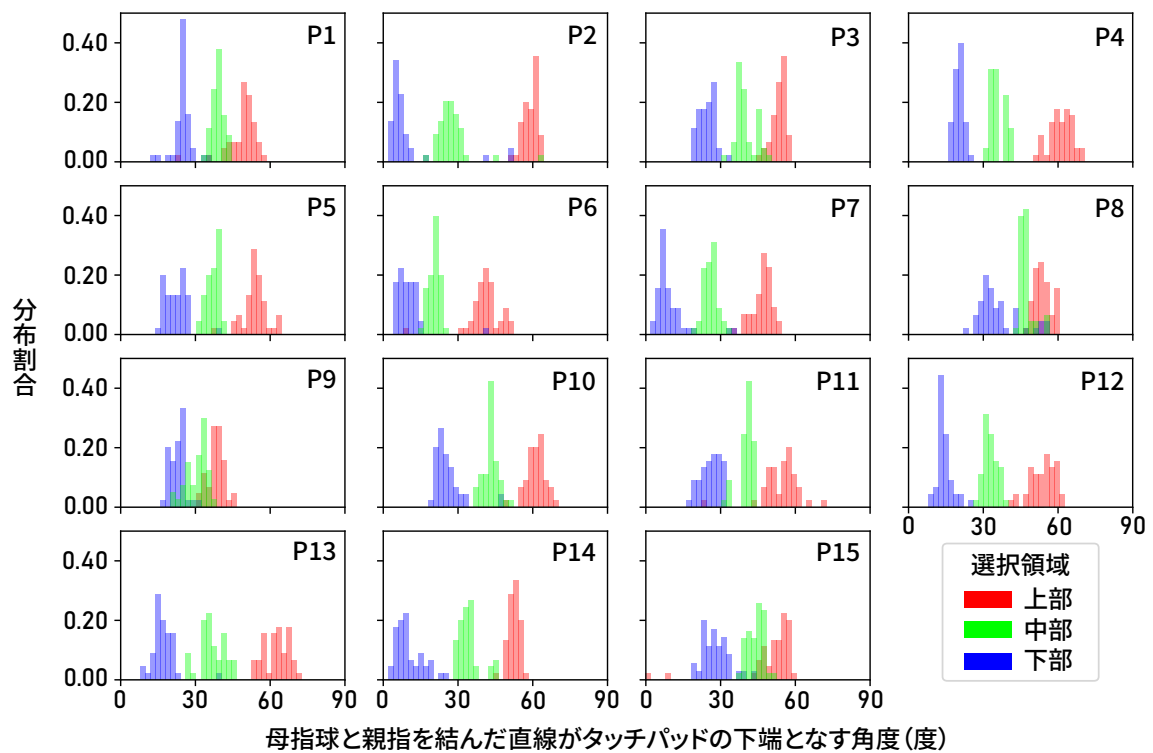


図 5.10: 本手法を用いた親指によるタップにより領域が選択された時の、母指球と親指がなす角度の分布（参加者ごと）.

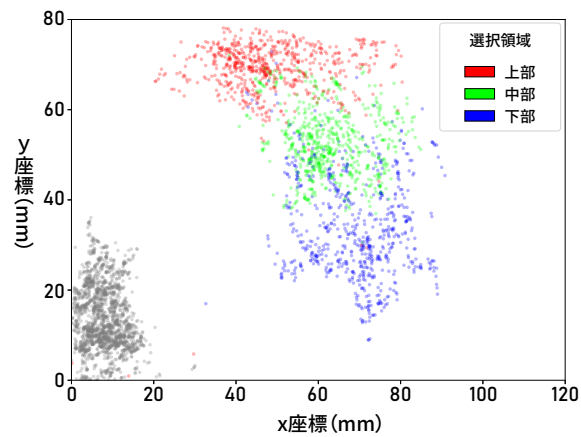


図 5.11: 親指のタップにより領域が選択された時のタッチ点の分布（全参加者）。灰色は母指球，赤緑青は親指によるタッチを表す。

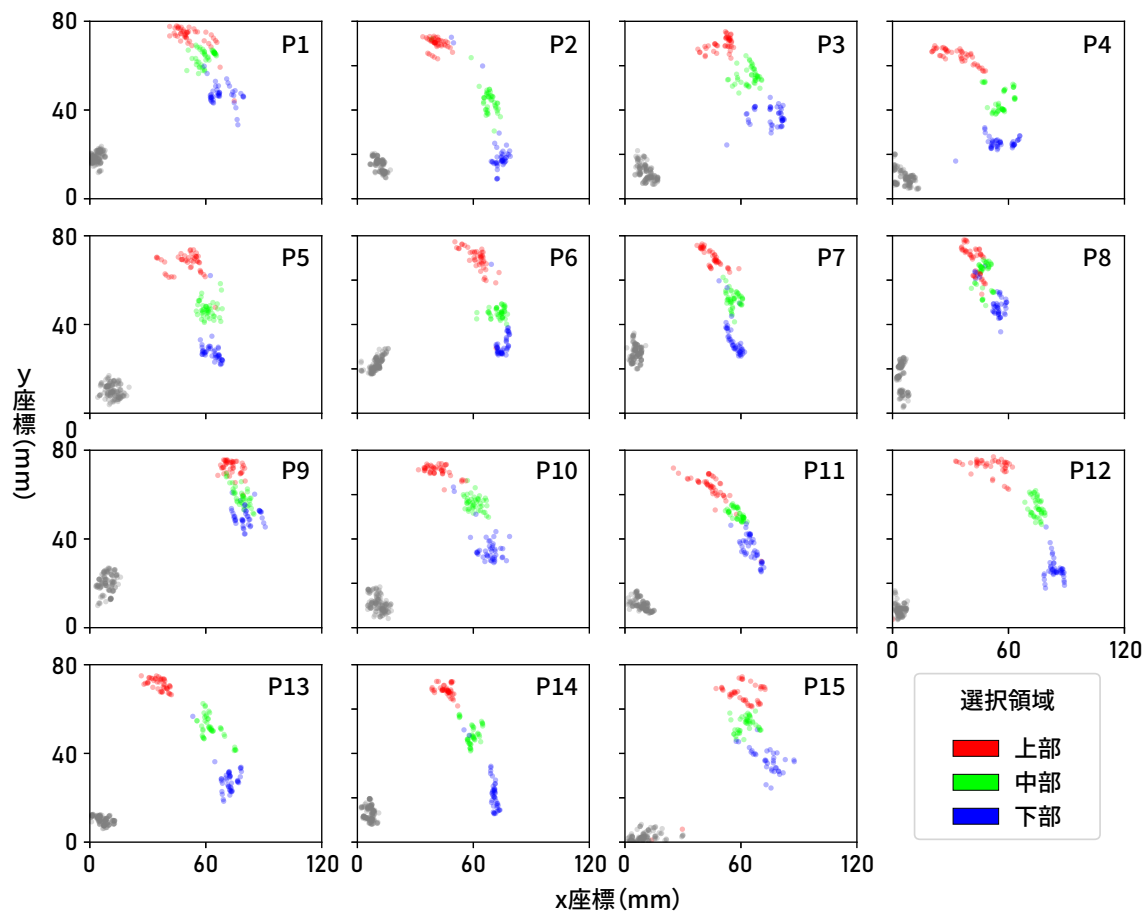


図 5.12: 親指のタップにより領域が選択された時のタッチ点の分布（参加者ごと）。灰色は母指球，赤緑青は親指によるタッチを表す。

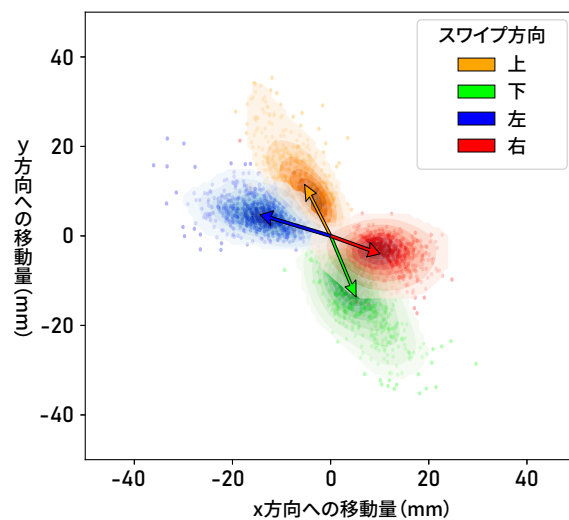


図 5.13: 親指によるスワイプの開始点を原点とした時の終了点の分布（全参加者）.

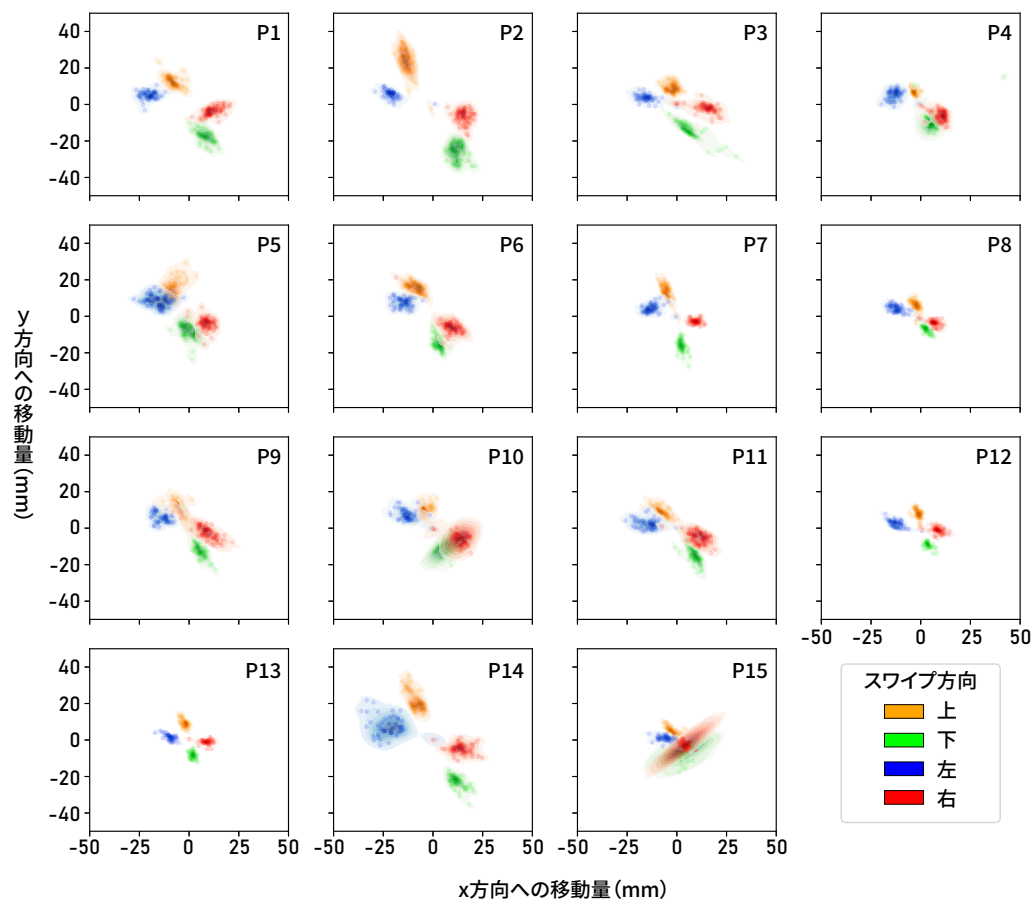


図 5.14: 親指によるスワイプの開始点を原点とした時の終了点の分布（参加者ごと）.

5.5 手法の改良結果

実験の結果から、本手法におけるジェスチャの判定を以下の手順にて行うように修正した。

1. ユーザの親指の移動量からタップかスワイプか判定する。
2. タップまたはスワイプのそれぞれにおいて個別に判定する。
 - (a) タップ時は、タップしたタッチパッド上の座標、および母指球と親指がタッチパッドの下端方向となす角度に基づいて、3つの領域のうち、どの領域が選択されたのかを判定する。
 - (b) スワイプ時は、修正された軸に基づき、親指の移動方向からスワイプの方向を判定する。

ここで、1の判定処理にはNelder-Mead法[NM65]による閾値最適化を、2の(a)および(b)の判定処理にはそれぞれ機械学習を用いることとした。本節では、それぞれの判定処理の具体的な処理、およびその精度に対する議論を述べる。

5.5.1 タッチおよびスワイプの判定処理

タップとスワイプを弁別する最適な閾値を決定するために、データ収集実験にて得られた親指の移動量のデータを用いて、Nelder-Mead法[NM65]による閾値最適化を行った。先述したデータ分布から、Nelder-Mead法における最適化における初期値を5.00 mmとして処理を実行した。なお、この最適化処理にはPython言語のSciPyライブラリ[VGO⁺20]を用いた。

最適化結果、本実験において得られたデータにおいては、3.75 mmを閾値とすることにより、F1 Scoreが0.975と高い精度にてタップとスワイプを弁別できることが示された。したがって、本システムのタップとスワイプを判定するための閾値を3.75 mmと定めた。

5.5.2 親指のタップによる選択領域の判定処理

ユーザが親指によるタップにより選択された領域を判定するために、機械学習アルゴリズムを用いて推論モデルを作成した。なお、機械学習アルゴリズムには、Scikit-learnライブラリ[PVG⁺11]のRandomForestClassifierを、機械学習アルゴリズムのハイパーパラメータ最適化にはOptunaライブラリ[ASY⁺19]によるグリッドサーチを用いた。

本実験により得られたデータを用いて作成する推論モデルについて、以下の2種類の精度を検証した。

1. 参加者1名のデータをテストデータとし、残りの参加者のデータを訓練データに用いた検証（Leave-One-Person-Out交差検証）
2. 参加者1人のみのデータを用いた5分割交差検証

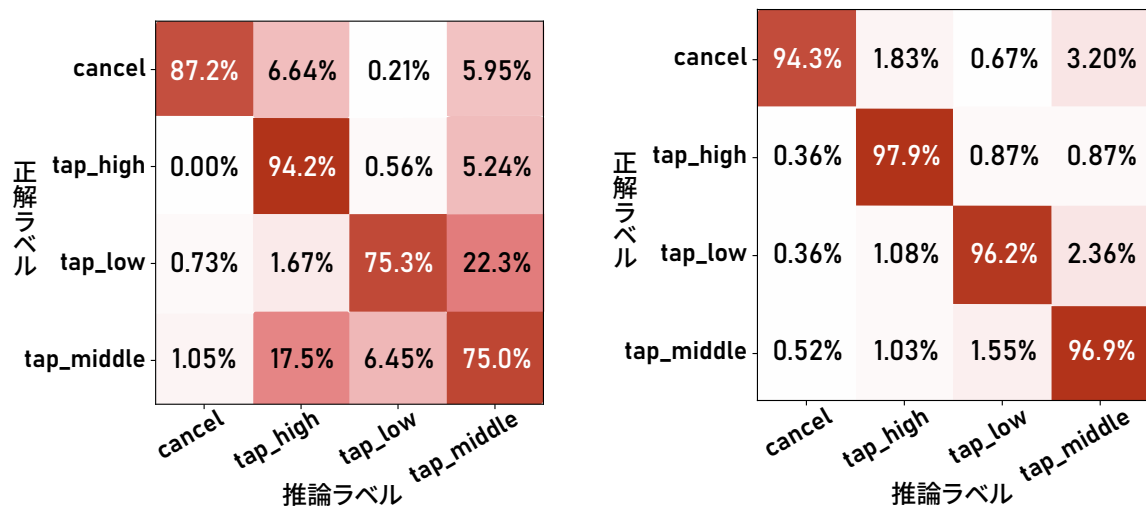


図 5.15: 親指のタップにより選択された領域を判定する推論モデルの混同行列. 左) Leave-One-Person-Out 交差検証. 右) 参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証.

なお, それぞれのモデルの訓練および精度検証用のコンピュータには MacBook Air (2020 年モデル, macOS 12.1, CPU: Intel Core i7-1060NG7, RAM: 16GB) を用いた. 推論モデルの訓練およびハイパーパラメータの最適化にかかった時間は合計で 5 分程度であった.

Leave-One-Person-Out 交差検証

Leave-One-Person-Out 交差検証では, まず参加者ごとにデータを分割し, 1 名のデータをテストデータ, 残りの全ての参加者のデータを訓練データとして推論モデルを作成および精度を評価する. 次に, 全ての参加者のデータが 1 回ずつテストデータとなるようにモデルを作成および精度の評価を行い, その平均精度を検証する. これにより, 未知のユーザに対する汎用的な推論モデルの精度を検証できる.

Leave-One-Person-Out 交差検証における混同行列を図 5.15 左に示す. 検証の結果, Leave-One-Person-Out 交差検証における推論モデルの平均精度は 88.7% (SD=15.9%) であった. この結果より未知のユーザに対してもある程度高い精度にてユーザが選択した領域を判定できると考えられる. しかし, 標準偏差が大きいことから, ユーザによっては本手法をうまく実行できない可能性が高い.

参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証

5 分割交差検証では, まず全データを均等に 5 組へ分割したのち, うち 1 組をテストデータ, 残りの 4 組を訓練データとして推論モデルを作成および精度を評価する. 次に, それぞれの組が 1 回ずつテストデータとなるように 5 回の推論モデル作成および精度の評価を行い,

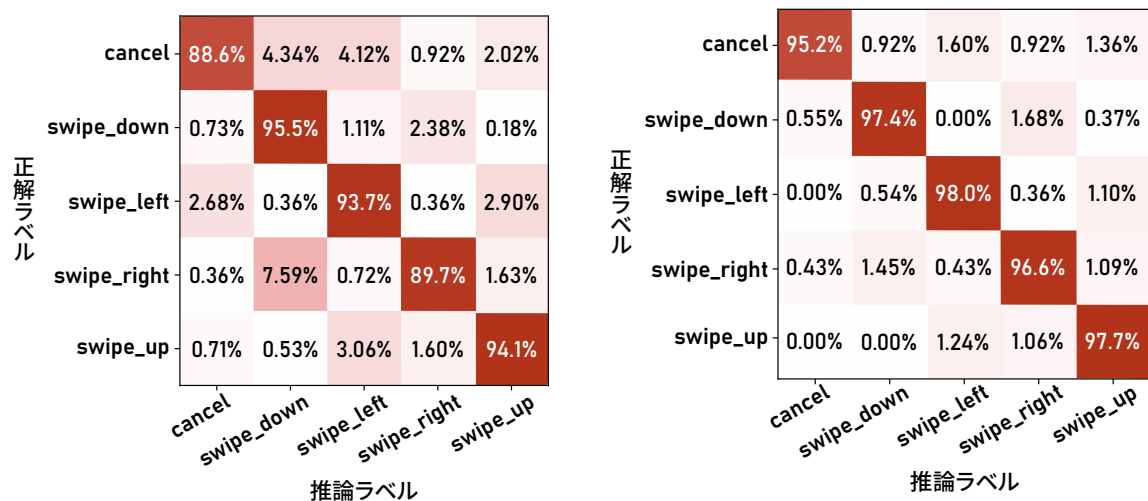


図 5.16: 親指のSwipeによるSwipe方向を判定する推論モデルの混同行列. 左) Leave-One-Person-Out 交差検証, 右) 参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証.

その平均精度を検証する. これにより, 訓練データとテストデータの分割に依存しない汎用的な推論モデルの精度を検証できる. 特に, 参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証では, ユーザに最適化した場合における推論モデルの精度を検証できる.

参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証における混同行列を図 5.15 右に示す. 検証の結果, 参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証における推論モデルの平均精度は 95.6% (SD=4.04%) であった. この結果より, ユーザ最適化を行うことにより高い精度にてユーザが選択した領域を判定できると考えられる.

5.5.3 親指のSwipeによるSwipe方向の判定処理

ユーザが親指によりどの方向へSwipeしたのかを判定するために, 5.5.2 節同様の手順にて推論モデルを作成した. 本小節では, 作成した推論モデルの精度検証を行う.

Leave-One-Person-Out 交差検証

Leave-One-Person-Out 交差検証における混同行列を図 5.16 左に示す. 検証の結果, Leave-One-Person-Out 交差検証における推論モデルの平均精度は 95.8% (SD=4.14%) であった. この結果より, 未知のユーザのジェスチャであっても高い精度にてSwipe方向を判定できると考えられる. さらに, ユーザが本操作手法を初めて使用したことを考慮すれば, ユーザが本操作に慣れることにより, さらに高い精度にてジェスチャを実行できると考えられる.

参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証

参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証における混同行列を図 5.16 右に示す。検証の結果、参加者 1 人のみのデータを用いた 5 分割交差検証における推論モデルの平均精度は 97.2% (SD=2.43%) であった。この結果より、ユーザ最適化を行うことにより高い精度にてスワイプ方向を判定できると考えられる。

第6章 議論

本章では、4章および5章から得られた知見に基づき、母指球の押し込みに基づく操作、および母指球の押し込みを起点とした親指による操作のそれぞれにおける今後の課題を議論する。

6.1 母指球の押し込みに基づく操作

母指球の押し込みに基づく操作の使い勝手を調査した結果、本操作によるポインティングは困難であるものの、キャレット移動などのカーソル移動操作は問題なく実行できることがわかった。さらに、今回の実験が30分以内に完了する短期的な実験であり、実験参加者が本手法を初めて使用したことを考慮すれば、ユーザが本手法の扱いに慣れることによって、既存手法よりも効率的な操作を実行できる可能性がある。

今回行った実験において、母指球による押し込みに基づくポインティングおよびカーソル移動操作では、詳細な操作が難しいことが実験参加者のコメントより示された。また、参加者の「普段使用しているポインタ速度と違うため、思うように動かせなかった」というコメントからも、ユーザごとに好みのポインタ移動速度およびカーソル移動速度へ制御できる仕組みが必要であると考えられる。例えば、ユーザが母指球を押し込む時間が長いときは遠くの対象を選択する操作を行っているときとみなし、カーソル移動速度を大きくし、反対に、ユーザが母指球を何度も押し込む操作を行っているときは詳細な操作を行っているときとみなし、カーソル移動速度を小さくする方法が考えられる。したがって、これらのユーザ特性に基づいた実装を行うことは今後の課題である。

6.2 母指球の押し込みを起点とした親指による操作

5章にて示した調査から得られた知見に基づき、本節では、母指球による押し込みに基づく操作へ導入することが好ましいと考えられるユーザ最適化および時系列情報を用いたジェスチャ識別についてそれぞれ述べる。

6.2.1 ユーザ最適化

精度評価における Leave-One-Person-Out 交差検証から、タップによる選択領域が88.7%、スワイプ方向が95.8%の精度により判定できることが示された、この検証結果より、本操作手法を初めて使用するユーザでも問題なく使用できると考えられる。一方で、参加者1人のみの

データを用いた5分割交差検証にて、タップによる選択領域が95.6%、スワイプ方向が97.2%の精度により判定できることが示されたため、最終的にはユーザ1名のみのデータを使用して推論モデルを作成すること、すなわちユーザ最適化を行うことが好ましいと考えられる。つまり、はじめはLeave-One-Person-Out交差検証にて得られた推論モデルを用いてユーザの操作の判定を行い、本手法を用いたユーザの操作によるデータが集まり次第、ユーザに最適化した推論モデルを作成および移行する仕組みが良いと考えられる。

なお、ユーザの身体的特性は時間とともに変化すると考えられる。ユーザ1名のみのデータを用いた推論モデルの学習にかかる時間は、ハイパーパラメータの最適化を含めても2分程度であることから、ユーザがコンピュータにて作業していないタイミングにて学習を完了できる。そのため、ユーザ最適化のための推論モデルの再学習は定期的に行うことが好ましいと考えられる。

6.2.2 時系列情報を用いたジェスチャ識別

今回、ジェスチャ判定する推論モデルを作成するために、実験において得られたデータのうち、ジェスチャの開始点および終了点のデータのみを用いた。しかし、ユーザによる一連のジェスチャにおいては、ジェスチャの開始点から終了点までは様々な経路にて実行される。例えば、指を一度移動をさせてから元の場所に戻す動作、および押下した領域から別の領域へ指を移動させてから離す動作などが考えられる。開始点と終了点における情報のみでは、これらのユーザの指の動きをジェスチャ判定に考慮できない。したがって、ジェスチャの開始点から終了点までの全ての時系列情報を用いて、推論モデルを作成する必要があると考えられる。時系列情報を考慮した推論モデルを作成できる方法として、複数時点のデータを用いて1つの入力を作成できるMotion History Image[BD01]を用いる方法、深層学習手法であるRNN (Recurrent Neural Network) [RHW86] およびLSTM (Long Short Term Memory) [HS97]を用いる方法が挙げられる。したがって、時系列情報を考慮した推論モデルを作成し、その精度を検証することは今後の課題である。

第7章 おわりに

本論文において、母指球の押し込みを起点としたジェスチャ操作を示した。本操作は、母指球による操作、および母指球による押し込みを起点とした親指による操作の2種類からなる。母指球による操作では、母指球を押し込むことによりポインティングまたはカーソル移動操作を実行でき、母指球による押し込みを起点とした親指による操作では、タップによる領域選択によりショートカット入力を、スワイプによりカーソル移動操作を実行できる。本操作は、多くのコンピュータへすぐに導入することができ、かつ全ての操作をホームポジションから指を離すことなしに実行できる点において有用である。

母指球による操作の操作性および使い勝手を評価した結果、ポインティングは困難であるものの、カーソル移動操作（本研究においてはキャレット移動）は問題なく実行できることがわかった。母指球による押し込みを起点とした親指による操作の使い勝手を評価する予備実験を行ったところ、タップによる選択およびスワイプによるカーソル移動がユーザの意図通り実行されないことが観察された。これを踏まえ、母指球による押し込みを起点とした親指による操作を用いたデータ収集実験を行った。そして実験から得られたデータを用いて、親指のタップにより選択される領域、ならびに親指のスワイプによる親指の移動量および移動方向の分析を行った。その結果に基づき、ジェスチャの開始点および終了点のデータおよび機械学習アルゴリズムである Random Forest を用いて、親指のタップにより選択された領域、および親指のスワイプによるスワイプ方向を判定できる推論モデルを作成した。その結果、未知のユーザのよるタップにより選択された領域を 88.7%、スワイプ方向を 95.8%の精度により判定でき、ユーザに最適化した場合において、タップにより選択された領域を 95.6%、スワイプ方向を 97.2%の精度により判定できることがわかった。

謝辞

研究室に配属されてから3年間、多くの経験と学びが得られた貴重な時間でした。本論文の執筆にあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生、川口一画先生、Simona Vasilache 先生には、多くのご意見とご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。特に、主指導教員である志築文太郎先生には、研究の進め方や論文の執筆方法のみならず、研究に対する心構えなど多岐にわたるご指導をいただきました。私がここまで研究を続けられたのは、志築文太郎先生の懇切丁寧なご指導があつてのことです。重ねて感謝いたします。

また、インタラクティブプログラミング研究室の先輩方、同期ならびに後輩たちには、私の研究がより良くなるように多くの助言や意見、研究のアイデアをいただきました。なかでも、学群生の時に右も左もわからない私を導いてくださった八箇恭平さん、私の研究の相談を快く受けてくださった鈴木健介さん、そして、これまでの研究発表にて共著として携わってくださった、横山海青さん、富永浩暉さん、國分晴利さん、野崎陽奈子さん。みなさまには深く感謝しております。

最後に、ここまで私を育ててくださった家族、学生生活に彩りをくださった友人のみなさま、私を支えてくださった全ての方々に心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [Abo07] Wael Aboelsaadat. Joystick Keyboard: Physically Integrated Typing and Pointing. Technical report, 2007.
- [ASY⁺19] Takuya Akiba, Shotaro Sano, Toshihiko Yanase, Takeru Ohta, and Masanori Koyama. Optuna: A Next-Generation Hyperparameter Optimization Framework. In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, KDD '19, pp. 2623–2631. Association for Computing Machinery, 2019.
- [AZ09] Caroline Appert and Shumin Zhai. Using Strokes as Command Shortcuts: Cognitive Benefits and Toolkit Support. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 2289–2298. Association for Computing Machinery, 2009.
- [BCA⁺15] Mathieu Berthelley, Elodie Cayez, Marwan Ajem, Gilles Bailly, Sylvain Malacria, and Eric Lecolinet. SpotPad, LociPad, ChordPad and InOutPad: Investigating Gesture-Based Input on Touchpad. In *Proceedings of the 27th Conference on l'Interaction Homme-Machine*, IHM '15. Association for Computing Machinery, 2015.
- [BD01] A.F. Bobick and J.W. Davis. The Recognition of Human Movement Using Temporal Templates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, No. 3, pp. 257–267, 2001.
- [BKM09] Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. *Journal of usability studies*, Vol. 4, No. 3, pp. 114–123, 2009.
- [BRA18] Daniel Buschek, Bianka Roppelt, and Florian Alt. Extending Keyboard Shortcuts with Arm and Wrist Rotation Gestures. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. 21 in CHI '18, pp. 1–12. Association for Computing Machinery, 2018.
- [Bro96] John Brooke. SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale. In *Usability evaluation in industry*, pp. 189–194. Taylor & Francis, 1996.

- [CEB78] Stuart K. Card, William K. English, and Betty Burr. Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT. *Ergonomics*, pp. 601–613, 1978.
- [CMN80] Stuart K. Card, Thomas P. Moran, and Allen Newell. The Keystroke-Level Model for User Performance Time with Interactive Systems. *Communications of the ACM*, Vol. 23, No. 7, pp. 396–410, 1980.
- [CSMV21] Nalin Chhibber, Hemant Bhaskar Surale, Fabrice Matulic, and Daniel Vogel. Typealike: Near-Keyboard Hand Postures for Expanded Laptop Interaction. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 5, No. 486, pp. 1–20, 2021.
- [CVPC07] Géry Casiez, Daniel Vogel, Qing Pan, and Christophe Chaillou. RubberEdge: Reducing Clutching by Combining Position and Rate Control with Elastic Feedback. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’07, pp. 129–138. Association for Computing Machinery, 2007.
- [CZL⁺19] Wenzhe Cui, Jingjie Zheng, Blaine Lewis, Daniel Vogel, and Xiaojun Bi. HotStrokes: Word-Gesture Shortcuts on a Trackpad. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, pp. 1–13, 2019.
- [FLC17] Bruno Fruchard, Eric Lecolinet, and Olivier Chapuis. MarkPad: Augmenting Touchpads for Command Selection. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’17, pp. 5630–5642. Association for Computing Machinery, 2017.
- [GDB07] Tovi Grossman, Pierre Dragicevic, and Ravin Balakrishnan. Strategies for Accelerating On-Line Learning of Hotkeys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’07, pp. 1591–1600. Association for Computing Machinery, 2007.
- [HFT⁺19] Mengting Huang, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Taichi Tsuchida, Hiroyuki Manabe, and Yoshifumi Kitamura. ShearSheet: Low-Cost Shear Force Input with Elastic Feedback for Augmenting Touch Interaction. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS ’19, pp. 77–87. Association for Computing Machinery, 2019.
- [HGL14] Seongkook Heo, Jiseong Gu, and Geehyuk Lee. Expanding Touch Input Vocabulary by Using Consecutive Distant Taps. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’14, pp. 2597–2606. Association for Computing Machinery, 2014.

- [HIST19] Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Bounded Swipe: Swipe Gesture Inside a Target. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction*, OzCHI '19, pp. 312–316. Association for Computing Machinery, 2019.
- [HS97] Sepp Hochreiter and Jurgen Schmidhuber. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, Vol. 9, No. 8, pp. 1735–1780, 11 1997.
- [IFS19] Kaori Ikematsu, Masaaki Fukumoto, and Itiro Siio. Ohmic-Sticker: Force-to-Motion Type Input Device That Extends Capacitive Touch Surface. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 1021–1030. Association for Computing Machinery, 2019.
- [ISO12] ISO. Ergonomics of Human-System Interaction - Part 411: Evaluation Methods for the Design of Physical Input Devices. Technical report, 2012.
- [IY20] Kaori Ikematsu and Shota Yamanaka. ScraTouch: Extending Interaction Technique Using Fingernail on Unmodified Capacitive Touch Surfaces. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 4, No. 3, pp. 81:1–81:19, 2020.
- [KST13] Toshifumi Kurosawa, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Keyboard Clawing: Input Method by Clawing Key Tops. In Masaaki Kurosu, editor, *Proceedings of International Conference on Human-Computer Interaction. Interaction Modalities and Techniques*, HCII '13, pp. 272–280. Springer, 2013.
- [LKB⁺18] Huy Viet Le, Thomas Kosch, Patrick Bader, Sven Mayer, and Niels Henze. Palm-Touch: Using the Palm as an Additional Input Modality on Commodity Smartphones. In *Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 353–358, 2018.
- [LNPS05] David M. Lane, H. Albert Napier, S. Camille Peres, and Aniko Sandor. Hidden Costs of Graphical User Interfaces: Failure to Make the Transition from Menus and Icon Toolbars to Keyboard Shortcuts. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 18, No. 2, pp. 133–144, 2005.
- [MB92] I. Scott MacKenzie and William Buxton. Extending Fitts' Law to Two-Dimensional Tasks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '92, pp. 219–226. Association for Computing Machinery, 1992.
- [MF16] Justin Mockler and Eric Fagg. SmartBar: Refining a Capacitive-Enabled Spacebar for Gamers. In *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play Companion Extended Abstracts*, CHI PLAY Companion '16, pp. 221–227. Association for Computing Machinery, 2016.

- [MGB⁺16] Sylvain Malacria, Alix Goguey, Gilles Bailly, Géry Casiez, France Cnrs Ltci, T l com Paristech, and Universit  Paris-saclay Universit  De Lille. Multi-Touch Trackpads in the Wild. In *Actes de la 28i me conference francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, IHM '16, pp. 19–24, 2016.
- [NM65] J. A. Nelder and R. Mead. A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 308–313, January 1965.
- [NS18] Takuto Nakamura and Buntarou Shizuki. Distinction System of Left and Right Hands Placed on a Keyboard of Laptop Computers. In *Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction*, OzCHI '18, pp. 587–589. Association for Computing Machinery, 2018.
- [NS20] Takuto Nakamura and Buntarou Shizuki. Identification Method of Digits for Expanding Touchpad Input. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Human-Computer Interaction. Multimodal and Natural Interaction*, HCII '20, pp. 463–474. Springer International Publishing, 2020.
- [oAISA22] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). AIST 日本人の手の寸法データ-寸法項目一覧 — 研究チーム — 人工知能研究センター, 2022. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/hand/data/list.html> (最終参照日: 2022 年 1 月 13 日).
- [PR19] Arihant Parsoya and Venkatesh Rajamanickam. KeySlide: Using Directional Gestures on Keyboard for Cursor Positioning. In *Proceedings of the 10th Indian Conference on Human-Computer Interaction*, IndiaHCI '19. Association for Computing Machinery, 2019.
- [PVG⁺11] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
- [Rek03] Jun Rekimoto. ThumbSense: Automatic Input Mode Sensing for Touchpad-Based Interactions. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 852–853. Association for Computing Machinery, 2003.
- [RHW86] David E Rumelhart, Geoffrey E Hinton, and Ronald J Williams. Learning Representations by Back-Propagating Errors. *nature*, Vol. 323, No. 6088, pp. 533–536, 1986.
- [RLG09] Anne Roudaut, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. MicroRolls: Expanding Touch-Screen Input Vocabulary by Distinguishing Rolls vs. Slides of the Thumb. In *Proceed-*

- ings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 927–936. Association for Computing Machinery, 2009.
- [RS90] Joseph Rutledge and Ted Selker. Force-to-Motion Function for Pointing. In *Proceedings of IFIP International Conference on Human-Computer Interaction*, INTER-ACT '90, pp. 701–706. Springer International Publishing, 1990.
- [SM04] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 61, No. 6, pp. 751–789, 2004.
- [SYT⁺18] Kodai Sekimori, Yusuke Yamasaki, Yuki Takagi, Kazuma Murata, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Ex-Space: Expanded Space Key by Sliding Thumb on Home Position. In *Proceedings of 23rd International Conference on Human-Computer Interaction*, Vol. 10903 of *HCII '18*, pp. 68–78. Springer International Publishing, 2018.
- [SZR⁺18] Yilei Shi, Haimo Zhang, Hasitha Rajapakse, Nuwan Tharaka Perera, Tomás Vega Gálvez, and Suranga Nanayakkara. GestAKey: Touch Interaction on Individual Keycaps. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–12. Association for Computing Machinery, 2018.
- [TCY⁺15] Ying Chao Tung, Ta Yang Cheng, Neng Hao Yu, Chiuan Wang, and Mike Y. Chen. Flickboard: Enabling Trackpad Interaction with Automatic Mode Switching on a Capacitive-Sensing Keyboard. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1847–1850. Association for Computing Machinery, 2015.
- [TKH⁺14] Stuart Taylor, Cem Keskin, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, and John Helmes. Type-Hover-Swipe in 96 bytes: A Motion Sensing Mechanical Keyboard. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1695–1704. Association for Computing Machinery, 2014.
- [TUKD12] Matthieu B. Trudeau, Tawan Udtamadilok, Amy K. Karlson, and Jack T. Dennerlein. Thumb Motor Performance Varies by Movement Orientation, Direction, and Device Size During Single-Handed Mobile Phone Use. *Human Factors*, Vol. 54, No. 1, pp. 52–59, 2012.
- [VGO⁺20] Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, C J Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef

Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen, E. A. Quintero, Charles R. Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, Vol. 17, pp. 261–272, 2020.

- [WC05] Andrew D. Wilson and Edward Cutrell. FlowMouse: A Computer Vision-Based Pointing and Gesture Input Device. In *Proceedings of IFIP International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT '05, pp. 565–578. Springer International Publishing, 2005.
- [YEYG03] Eldad Yechiam, Ido Erev, Vered Yehene, and Daniel Gopher. Melioration and the Transition from Touch-Typing Training to Everyday Use. *Human Factors*, Vol. 45, No. 4, pp. 671–684, 2003.
- [ZLAV18] Jingjie Zheng, Blaine Lewis, Jeff Avery, and Daniel Vogel. FingerArc and FingerChord: Supporting Novice to Expert Transitions with Guided Finger-Aware Shortcuts. In *User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 347–363, 2018.
- [ZV16] Jingjie Zheng and Daniel Vogel. Finger-Aware Shortcuts. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 4274–4285. Association for Computing Machinery, 2016.
- [高田 16] 高田峻介, 志築文太郎, 高橋伸. キーボード上における 2 つのキーの連続押下を開始符号とする操作手法. 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-HCI-168, pp. 1–6, 2016.
- [黒澤 15] 黒澤敏文, 志築文太郎, 田中二郎. 携帯情報端末上のスワイプ方向に着目したタッチジェスチャ UI. 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-HCI-163, pp. 1–10, 2015.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 査読なし国内会議論文

1. 高倉礼, 志築文太郎, 高橋伸. パームレストにおける押し込み動作に基づくカーソル操作手法の検討. 情報処理学会研究報告, Vol. 2021-HCI-193, 情報処理学会, 2021 年 6 月, 7 pages.
2. 高倉礼, 鈴木健介, 志築文太郎. Thenar-First: 母指球による押し込みを開始符号としたジェスチャ操作. 第 26 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム（インタラクシオン 2022）, 情報処理学会, 2022 年 3 月, 6 pages. (To Appear)

その他の論文

- 査読あり国際会議論文

3. Rei Takakura, Kyohei Hakka, and Buntarou Shizuki. Exploration of Passive Haptics Based Learning Support Method for Touch Typing. In Proceedings of 31ST AUSTRALIAN CONFERENCE ON HUMAN-COMPUTER-INTERACTION (OzCHI 2019), Association for Computing Machinery, December, 2019, pp. 529–533.
4. Hinako Nozaki, Kaori Minawa, Rei Takakura, Buntarou Shizuki. Investigating Reaction Accuracy of Extended Touchscreen with Conductive Ink for Mobile Virtual Piano. Asian CHI Symposium 2021, Association for Computing Machinery, May, 2021, pp. 111–113.
5. Koki Tominaga, Shun Fujita, Rei Takakura, Buntarou Shizuki. Investigating the Effects of Position and Angle of Virtual Keyboard on Text Entry Performance and Workload. Asian CHI Symposium 2021, Association for Computing Machinery, May, 2021, pp. 25–27.
6. Kaisei Yokoyama, Rei Takakura, Buntarou Shizuki. JoyFlick: Japanese Text Entry Using Dual Joysticks for Flick Input Users. In Proceedings of 18th IFIP TC13 International Conference On Human-Computer Interaction (INTERACT 2021), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12934, Springer, August, 2021, pp. 107–125.

- 査読あり国内論文誌論文

7. 横山海青, 高倉礼, 志築文太郎, 川口一画. フリック入力に基づく2本の押し込み機能付きジョイスティックを用いたテキスト入力手法. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 23, No. 4, 2021年11月, pp. 383–396.

- 査読あり国内会議論文

8. 横山海青, 高倉礼, 志築文太郎. JoyFlick: フリック入力に基づくゲームパッド向けかな文字入力手法. 第28回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集 (WISS 2020), 日本ソフトウェア科学会, 2020年12月, pp. 97–102.
9. 高倉礼, 鈴木健介, 國分晴利, 志築文太郎. 能動的音響計測に基づくスタイラスの把持状態識別手法の検討. 第29回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集 (WISS 2021), 日本ソフトウェア科学会, 2021年12月, pp. 135–142.

- 査読なし国内会議論文

10. 漆山裕太, 高倉礼, 鈴木翔大, 志築文太郎, 高橋伸. 異なる手形状に対する周波数応答の予備調査. 情報処理学会研究報告, Vol. 2019-HCI-184, 情報処理学会, 2019年7月, 8 pages.

11. 富永浩暉, 高倉礼, 志築文太郎. VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および作業負荷に与える影響の調査 (第 2 報) . ヒューマンインタフェースシンポジウム 2021 論文集, ヒューマンインタフェース学会, 2021 年 9 月, pp. 400–407.
 12. 高倉礼, 志築文太郎. ディスプレイの設置位置および文字入力欄の表示位置による文字入力への影響. 第 25 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム (インタラクション 2021) , 情報処理学会, 2021 年 3 月, pp. 624–629.
- 予稿なし国内会議発表
13. 高倉礼, 八箇恭平, 志築文太郎. 受動触覚を用いたタッチタイピング学習支援手法の検討. 第 27 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集 (WISS 2019) , 日本ソフトウェア科学会, 2019 年 9 月.

付 録 A 実験の際に用いた各種書類

本研究の実験において，ユーザに回答してもらったアンケートを載せる．なお，本研究におけるアンケートは Google Forms¹ を用いて作成した．

¹https://www.google.com/intl/ja_jp/forms/about/

A.1 4章の実験にて使用したアンケート

palmMouseアンケート

 takakura@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)
[アカウントを切り替える](#) 

名前

回答を入力

年齢

回答を入力

利き手

☐ 右手

☐ 左手

☐ 両手

普段使用しているポインティングデバイス

☐ マウス

☐ トラックパッド

☐ トラックポイント (ThinkPadのキーボード中央にある赤いもの)

☐ その他:

実験に使用した手法

☐ マウス

☐ トラックパッド

☐ トラックポイント

☐ パームマウス

このデバイスをしばしば使いたいと思う

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスは不必要なほど複雑であると感じた

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスは容易に使えると思った

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスを使うのに技術専門家のサポートを必要とするかもしれない

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスにある様々な機能はよくまとまっていると感じた

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスでは一貫性のないところが多くあったと思った

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

大抵のユーザはこのデバイスの使用方法について素早く学べるだろう

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスはとても使いにくいと思った

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスを利用できる自信がある

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

このデバイスを利用し始める前に知っておくべきことが多くあると思う

	1	2	3	4	5	
全く思わない	☐	☐	☐	☐	☐	そう思う

自由記述

システムを使用して使いやすかった点、および使いにくいと思った点などを記述いただけると助かります。または、システムを使用した感想を記述してください。

回答を入力

送信

[フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム

