

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

指の識別に基づくタッチパッド操作拡張

中村 拓人

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 志築 文太郎

2020年3月

概要

タッチパッドの操作には、1本指でのクリック操作やドラッグ操作、複数指でのスクロール操作やピンチ操作などがあり、システムはタッチパッドに触れる指の本数とそれらの動作に基づきコマンドを実行する。ただし、多数のツールやモードを頻繁に切り替える必要があるアプリケーションでは、ユーザはメニューバーやツールバーなどのグラフィカルユーザインタフェース（GUI）を介するかキーボードショートカットを入力して、ツールやモードの切り替えを行うために現在行なっている作業を一時中断する必要がある。そこで、本研究では、タッチパッド操作に用いられている指を識別し、指の種類組み合わせに基づき、操作に用いられている指の本数と動作が同様であっても異なるコマンドを実行する手法を考案した。このタッチパッド操作拡張手法により、ユーザはタッチパッド操作の入力開始に伴いツールやモードの指定が可能となる。本研究においては、提案手法を実現すべく、まず、インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システムを検討し、動作確認から、このシステムがカメラを用いた画像処理を行うが故の課題を持つことを明らかにした。この結果から、カメラを用いない指の識別システムとして、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システムを2種類設計および実装した。1つ目の、ホームポジション上に手が置かれた状態にてタッチパッドを操作する親指の左右を識別するシステムにおいて、性能評価のために行った実験の結果、親指の左右の平均識別率は80.8%であった。2つ目の、親指から小指までの5種類の指の識別を行うシステムにおいて、性能評価のために行った実験の結果、手の左右を区別しない5本指の平均識別率は42.8%、手の左右を区別した10本指の平均識別率は30.2%であった。これに対し、複数種の指を同じカテゴリとしてまとめて識別することにより、識別率を向上できる（手の左右を考慮しない場合、親指と親指以外の指の平均識別率86.3%、親指と小指とそれ以外の指の平均識別率72.0%）ことが分かった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	タッチパッド操作の入力語彙	1
1.2	タッチパッド操作における問題点	2
1.3	本研究の目的とアプローチ	2
1.4	貢献	3
1.5	本論文の構成	3
第2章	関連研究	5
2.1	タッチパッド操作拡張	5
2.2	ホームポジション上における操作拡張手法	6
2.3	指の種類の識別	7
2.4	指の姿勢の識別	7
2.5	手指の左右の識別	8
2.6	カメラを用いた手の状態認識	8
2.7	関連研究に対する本研究の位置付け	9
第3章	指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法	10
3.1	概要	10
3.2	実用例	12
3.2.1	画像編集ソフトウェア	12
3.2.2	ウェブブラウザ	12
第4章	インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システム	14
4.1	設計	14
4.2	実装	15
4.2.1	キーボードおよびタッチパッド周辺の画像の撮影	15
4.2.2	手の抽出	15
4.2.3	手の左右の識別	18
4.2.4	指先の抽出および指の種類の識別	18
4.2.5	プロトタイプ	20
4.3	システムの課題	22
4.3.1	手の抽出に関する課題	22

4.3.2	指の重なりに関する課題	22
4.3.3	指の識別にあたるインカメラの常時使用	22
第 5 章	タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システム 1	24
5.1	設計	24
5.2	実装	25
5.2.1	学習フェーズ	25
5.2.2	識別フェーズ	25
5.2.3	プロトタイプ	26
5.3	実験	28
5.3.1	実験参加者	28
5.3.2	実験機器	28
5.3.3	タスク	28
	学習タスク	28
	タップタスク	29
	ムーブタスク	29
5.3.4	実験手順	30
5.3.5	実験結果	31
5.3.6	考察	33
第 6 章	タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システム 2	36
6.1	設計	36
6.2	実装	38
6.2.1	学習フェーズ	38
6.2.2	識別フェーズ	38
6.2.3	プロトタイプ	38
6.3	実験	38
6.3.1	実験参加者	39
6.3.2	実験機器	39
6.3.3	タスク	39
	学習データサンプリングタスク	39
	テストデータサンプリングタスク	39
6.3.4	実験手順	41
6.3.5	実験結果	42
6.3.6	考察	48
第 7 章	議論	52
7.1	指の識別	52
7.2	学習コスト	52

7.3 追加で実施すべき調査	53
第8章 まとめ	54
謝辞	55
参考文献	56
付録A 鏡固定具の設計図	65
A.1 鏡固定具の三面図	66
付録B 実験の際に用いた各種書類	67
B.1 承諾書	68
B.2 実験同意書	69
B.3 実験の実施要領	70
B.4 実験に関する説明書	71

目次

1.1	マルチタッチによるジェスチャ入力の場合.	4
3.1	指の識別に基づくタッチ패드操作の例（1本指の場合）.	11
3.2	指の識別に基づくタッチ패드操作の例（複数指の組み合わせの場合）.	11
3.3	指の識別に基づくタッチ패드操作の例（手の左右を識別した場合）.	11
4.1	ラップトップのインカメラによる撮影範囲の比較図. a) 通常の撮影範囲. b) インカメラに鏡を取り付けた際の撮影範囲.	15
4.2	左) 鏡固定具. 右) 実際にラップトップに鏡固定具を取り付けた様子.	16
4.3	実際にインカメラに鏡を取り付けた場合の撮影範囲の例. a) ディスプレイの開き角度が90°の場合. b) ディスプレイの開き角度が130°の場合.	16
4.4	手の抽出の過程. 左) 入力した操作状態画像. 右) 手の抽出結果.	17
4.5	手の左右の識別方法.	18
4.6	手の左右の識別の過程. 左) 抽出した手の領域. 右) 手の左右の識別結果.	19
4.7	指先の抽出の過程. 左) 抽出した手の領域. 右) 指先の抽出結果.	19
4.8	インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システム.	20
4.9	タッチ패드領域の抽出. 上) 画像処理の簡易化のための工夫. 下) タッチ패드領域の抽出例.	21
4.10	インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システムのソフトウェア実行画面.	21
4.11	手の領域抽出の失敗例. 机の色と肌色が区別できず, 同化して領域が抽出されている.	22
4.12	左右の手の指同士が重なることに起因する手の左右の識別の失敗例. 1つの大きな左手の領域として識別されている.	23
4.13	手の姿勢に起因する指先抽出の失敗例. 指先が4点しか抽出できていない.	23
5.1	ホームポジションに手が置かれた状態における親指の動作例. 親指の接触面の状態はタッチ패드上の各座標に則する.	25
5.2	タッチ패드操作に用いられている親指の左右を識別するシステムのソフトウェア実行画面. タッチ패드操作に用いられる親指の左右識別の様子.	27
5.3	左) 鏡を取り付けたインカメラから取得されるキーボードおよびタッチ패드周辺の映像. 右) 射影変換により表示されたタッチ패드領域の映像.	27

5.4	学習タスクにおけるデータ収集の様子.	29
5.5	タップタスクの様子.	30
5.6	ムーブタスクの様子.	31
5.7	タップタスクにおける親指の左右の識別率.	32
5.8	ムーブタスクにおける親指の左右の識別率.	32
5.9	P_1 のタッチパッド領域ごとの識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.	34
5.10	P_2 のタッチパッド領域ごとの識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.	34
5.11	P_3 のタッチパッド領域ごとの識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.	34
5.12	P_4 のタッチパッド領域ごとの識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.	35
5.13	P_2 - P_4 のタッチパッド領域ごとの平均識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.	35
6.1	タッチパッドに対する指の接触部位.	37
6.2	タッチパッドに対する指の接触面.	37
6.3	学習データサンプリングタスクにて右手の親指を水平方向になぞっている様子.	40
6.4	テストデータサンプリングタスクにて左手の親指にて提示された領域をタッチしている様子.	41
6.5	テストデータサンプリングタスクにおける3つの条件. a) 机条件. b) 膝条件. c) ベッド条件.	42
6.6	各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の5本指の識別率.	44
6.7	各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の10本指の識別率.	45
6.8	実験参加者全員の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の5本指の識別率.	46
6.9	実験参加者全員の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の10本指の識別率.	47
6.10	5本指の識別における指ごとの識別率の混同行列.	49
6.11	10本指の識別における指ごとの識別率の混同行列.	49
6.12	各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の親指と親指以外の指の識別率.	50
6.13	各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の親指と小指とそれ以外の指の識別率.	51

第1章 はじめに

タッチパッドは、ラップトップコンピュータ（以下、ラップトップ）においてカーソル移動や決定操作を行うためのポインティングデバイスである。また、近年普及している静電容量方式のタッチパッドは複数の指の接触位置を同時に検出することができるマルチタッチの機能を搭載しており、複数指での特定のなぞり方による入力が行える。タッチパッドの操作には、1本指でのクリック操作やドラッグ操作、複数指でのスクロール操作やピンチ操作などがある。システムは、これらの操作をタッチパッドに触れている指の本数とそれらの動作に基づきジェスチャ入力として認識し、アプリケーションに応じたコマンドを実行する。すなわち、タッチパッドの役割は単なるポインティングデバイスに限らず、様々なジェスチャ入力を可能とするデバイスとしての役割を担っている。

本研究において、タッチパッド操作に用いられている指の識別に基づく、タッチパッド操作拡張手法を示す。また、タッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムを設計および実装し、その評価を行う。

本章において、まず、タッチパッド操作の入力語彙の現状を述べる。さらに、タッチパッド操作における問題点を示す。次に、本研究の目的と問題解決のためのアプローチを示す。また、本研究の貢献を記し、最後に本論文の構成を示す。

1.1 タッチパッド操作の入力語彙

本研究では、タッチパッドを介してシステムを操作するために行うことができるジェスチャ入力の種類のことを入力語彙と呼称する。タッチパッドへの基本的な入力は、指にて接触した後そのまま離す（タップ操作）、指にて接触してなぞった後に離す（フリック操作やスワイプ操作）、指にて接触した後押し込み離す（クリック操作）、そして、指にて接触した後押し込みなぞった後に離す（ドラッグ操作）ことにより行われる。なお、指にて接触してなぞった後に離す操作の内、上下左右のいずれかの方向に、1本指にて短くなぞるものはフリック操作、指の本数に関わらず長くなぞるものはスワイプ操作と呼称される。また、マルチタッチの機能が搭載されたタッチパッドでは、1本指でのジェスチャ入力のみならず複数指でのジェスチャ入力を行うことが可能である。マルチタッチによるジェスチャ入力の例を図 1.1 に示す。このマルチタッチの機能は、オペレーティングシステムやアプリケーションの様々なコマンドの実行を可能としている。例えば、図 1.1 (a) の2本指でのスクロール操作は画面やウィンドウに収まらないコンテンツのページ送りに、図 1.1 (b), (c) の2本指でのピンチイン・ピンチアウト操作はコンテンツの拡大縮小に、図 1.1 (d) の2本指での回転操作はコンテンツ

の回転に用いられる。また、Apple Inc. の提供するオペレーティングシステムである macOS では、例えば、デスクトップの作業領域の切り替えに、図 1.1 (e) の 3 本指でのスワイプ操作を、アプリケーションの一覧表示に、図 1.1 (f) の 4 本指でのピンチイン操作を割り当てることが可能である [Inc19a]。さらに、Apple Inc. の MacBook に搭載されているトラックパッドや Magic Touchpad 2 には感圧タッチ [Inc19b] と呼称される圧力を検出する機能が搭載されており、通常の接触後や押し込み後にさらなる押し込み操作を行うことが可能である。これにより、通常のタップ操作やクリック操作とは異なるコマンドを実行することができる。このように、システムはタッチパッドに接触している指の本数とその動き方に基づき、ジェスチャの種類を認識しコマンドを実行する。ただし、現状ではタッチパッドに接触している指の本数は識別されているが、親指、人差し指、中指、薬指、および小指の内どの指を用いて操作が行われているか、あるいは右手と左手のどちらの指にて操作が行われているかは識別されていない。

1.2 タッチパッド操作における問題点

ユーザはアプリケーションを用いた作業の際、しばしば多数のツールやモードの切り替えを頻繁に行うが、その都度、メニューバーやツールバーなどのグラフィカルユーザインタフェース (GUI) を介するか、キーボードショートカットを入力してツールやモードの切り替えを行う必要がある。例えば、画像編集ソフトウェアにおいて、ユーザは図形を編集するために図形描画ツールと図形選択ツールを頻繁に切り替えて作業を進める。その際、ツールバーに並ぶツールを選択するか、各ツールに割り当てられたキーボードショートカットを入力することによりツールを切り替え、タッチパッドを操作し図形描画や図形選択を行うこととなる。そのため、図形描画から図形選択に作業を移す際、あるいはその逆の際に、ツールの切り替えのために作業を一時中断する必要が生じる。このように、画像編集ソフトウェアのような対象となるオブジェクトを複数のツールやモードを切り替えて編集するアプリケーションでは、ツールやモードの切り替えに伴い GUI への視線移動やキーボードへの手の移動が生じ、操作対象に注目したまま作業を行うことが阻害される問題がある。

1.3 本研究の目的とアプローチ

本研究の目的は前節にて述べた問題を解決することである。これに対し、ユーザが操作対象に注目したままツールやモードを切り替えながら編集作業を進めるために、システムにタッチパッド操作の入力開始に伴いツールやモードの指定を行わせることを考えた。そこで、タッチパッド操作に用いられている指を識別し、指の種類を組み合わせまたは触れている手の左右に基づき、操作に用いられている指の本数と動作が同様であっても異なるコマンドを実行する手法を考案した。

このタッチパッド操作拡張手法を実現するために、タッチパッドに用いられている指を識別するシステムを 2 種類検討した。1 つはラップトップの画面上部に搭載されたインカメラお

よびタッチパッドから取得したタッチ点の座標データを用いた指の識別システムであり、もう1つはカメラを用いず、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システムである。本論文においては上記2種類のシステムの詳細を述べるとともに、前者についてはシステムの動作確認から判明した課題について述べ、後者についてはシステムの評価のために行った実験の結果を述べる。

1.4 貢献

本論文の貢献を以下に列挙する。

- タッチパッド操作に用いられている指の識別に基づく、タッチパッド操作拡張手法を示した。
- タッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムの設計および実装を行い、実験を通してシステムの性能を評価し上記のタッチパッド操作拡張手法の実現可能性を示した。

1.5 本論文の構成

本論文の構成を述べる。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る。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章にて、タッチパッド操作に用いられている指の識別に基づく、タッチパッド操作拡張手法を詳述する。第4章では、検討したタッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムの内の1つである、インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システムを述べる。続く第5章および第6章では、カメラを用いず、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システムを述べる。第7章では、検討したシステムより明らかになったタッチパッド操作拡張手法の今後の課題を議論する。最後に第8章にて本研究のまとめを述べる。

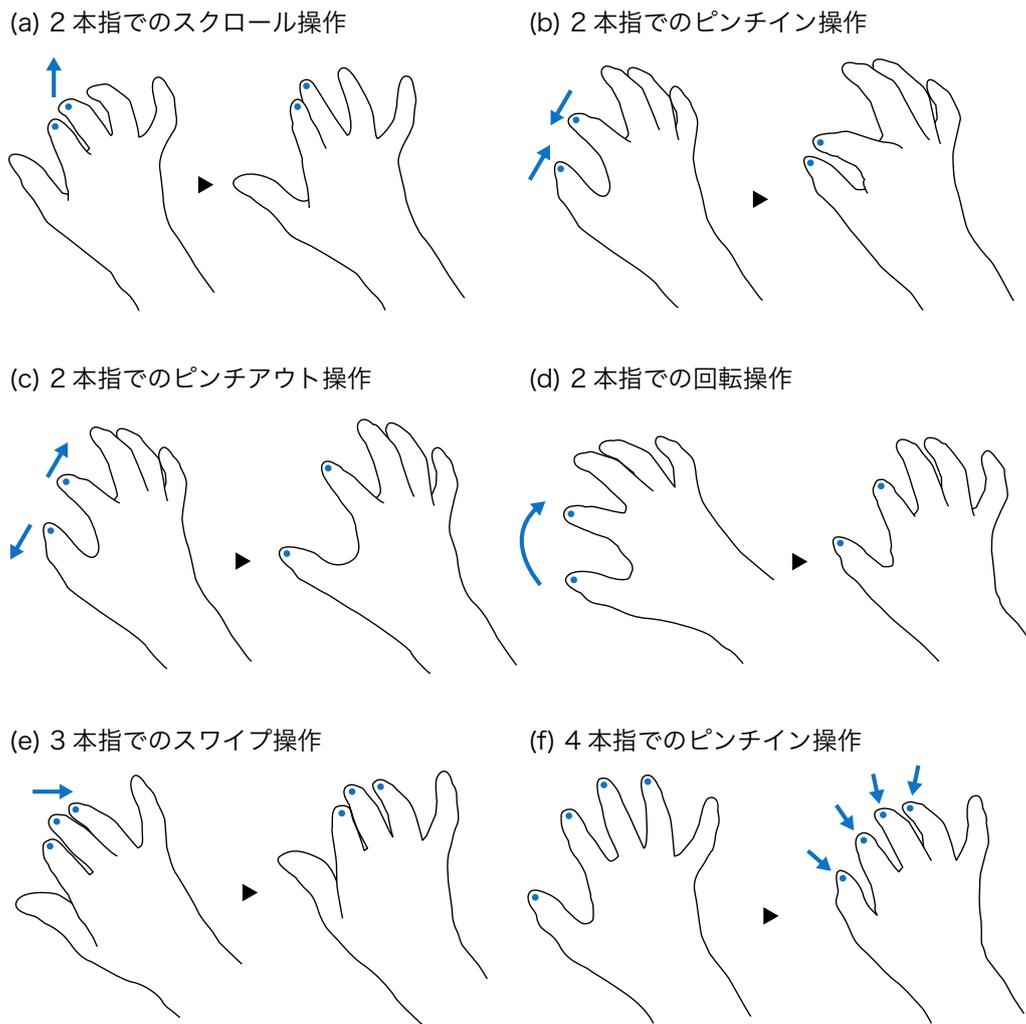


図 1.1: マルチタッチによるジェスチャ入力の場合。

第2章 関連研究

これまでに、ラップトップにおいて、タッチパッド操作拡張手法およびキーボードのホームポジション（以下、ホームポジション）上における操作拡張手法が多数提案されている。また、指の種類、指の姿勢の識別、および手指の左右の識別など手の状態の識別手法に関する研究が多数なされている。本章にて、これらの研究の概要と関連研究に対する本研究の位置付けを述べる。

2.1 タッチパッド操作拡張

Cuiら [CZL⁺19] はユーザーが特定の修飾キーを押している間、タッチパッド領域に仮想キーボードを配置する手法を提案した。この手法により、ユーザはコマンド名のスペルの順にキーをなぞることにより、ショートカットコマンドを実行可能である。Berthelleyら [BCA⁺15] は、特定のキーを長押しすることにより画面上にコマンドメニュー群が格子状に表示され、任意のコマンドメニュー領域に相当するタッチパッド領域をタップすることでコマンドを実行する手法、および特定のキーを長押しすることにより画面の4頂点および4辺にコマンドメニューが表示され、タッチパッドにてベゼルスワイプすることでコマンドを実行する手法を提案している。Fruchardら [FLC17] は市松模様状に貼られたマーカにより領域が区分けされたタッチパッドを用いて、特定の領域の組にて開始終了する指のなぞり操作によりコマンドの実行やアプリケーションの起動を可能とする手法を提案した。Blockら [BG10] は、ラップトップコンピュータへの入力デバイスとしてマウスとタッチパッドを兼用して用いる際、マウスを利き手で操作すると仮定し、左手によるタッチパッド操作をアプリケーションの特定の操作に割り当てた。阿部 [阿部02] は、タッチパッドの表面に格子状に突起や溝を設けることにより、タッチパッド上にて指を滑らせる際に上下左右方向を指先で感知できるようにした。Ikematsuら [IS18] は、インピーダンス値が変化するオブジェクトを介した間接的なタッチを導入することにより、タッチ入力の状態をタッチ・非タッチの2値ではなく、連続値として取得することを可能とし、タッチパッドに対するタッチ入力を拡張した。また、Ikematsuら [IFS19] は、タッチパッド横の領域に抵抗値が変化する感圧センサを設置し、タッチパッド表面の特定の位置に感圧センサの電極を貼り付け、タッチパッドの流出電流値から抵抗値変化を計測することで、感圧センサによる入力を可能とした。Jungら [JYL17] は40 × 25の点字表示用モジュールを格子状に並べることにより構成されたタッチパッドを開発し、指にて形状を認識可能な触覚フィードバックとフィードフォワードをユーザに与えることを可能とした。このタッチパッドにより、触覚フィードバックやフィードフォワードを得て、アプリ

ケーション内のスライダーやボタンの操作を行うことができる。Gu ら [GHH⁺13] は、タッチパッドの幅をラップトップコンピュータのキーボードの幅と等しくなるよう拡張し、水平方向に長いなぞりジェスチャ入力を容易にした。

さらに、特殊な構造のタッチパッドを用いることにより、タッチパッド上での空中ジェスチャ入力を可能とした手法が提案されている。Choi ら [CHK⁺11] や Heo ら [HHL13] は、赤外線距離センサを格子状に並べて製作されたタッチパッドにより表面からホバー操作を入力可能とした。

2.2 ホームポジション上における操作拡張手法

多くのラップトップがキーボードの下にタッチパッドを配置しており、ホームポジションはラップトップを扱う際の基本の構えとなるため、ホームポジション上における操作拡張手法についても調査した。暦本 [Rek03] は、親指がタッチパッドに触れている間、キーボード上の特定のキーをマウスボタンおよびホイールキーとして機能させるシステムを開発した。このシステムにより、ユーザはホームポジションに手を置いたまま、マウスを操作するのと同等の操作を行うことが可能となる。黒澤ら [KST13] は、爪によるキーボードのキートップに対する引っ掻きを新たな操作手法として提案した。この手法は、爪による引っ掻き音を分析し、ユーザがキートップを上下左右どの方向へ引っ掻いたか、またどの程度強く引っ掻いたかを識別して操作に用いている。Tung ら [TCY⁺15] は、キーボードカバーに静電容量を感知する導線を格子状に組み込み、キーボードに対する指のタッチの検出を可能とした。これによりキーボードとタッチパッドを1つのインタフェースとして統合し、キーボード上におけるタッチパッド操作を可能とした。Taylor ら [TKH⁺14] は、キーボードのキーとキーの間に赤外線距離センサを埋め込み、キーボード上での空中ジェスチャを入力可能とした。Block ら [BGV10] は、キーボードのキートップ表面にプロジェクターを用いてショートカットコマンドを表すメニューアイコンを表示することにより、使用中のアプリケーションのコンテキストに合わせて動的に各キーのコマンド割り当てを変更可能とした。また、複数のキーを用いたスライダーを表示することも可能とした。高田ら [高田 16] は、キーボードのFキーおよびJキーの一連の押下を開始符号とし、キーボード上の左手が置かれる領域のキーを用いたなぞり操作にてポインティングが行える手法を提案した。Zheng ら [ZLAV18] は、特殊な手の姿勢にてキー操作を行うことでショートカットコマンドを実行可能とする手法として FingerArc と FingerChord を提案した。前者は、中指、薬指、および小指を折り曲げた状態にて人差し指で特定のキーを押し離した際に人差し指と親指の角度に基づいたコマンドが実行される手法である。後者は、薬指および小指を折り曲げた状態にて薬指で特定のキーを押した後、薬指で押しているキーの周囲のキーを人差し指にて押すことで2つのキーの相対位置に基づいたコマンドが実行される手法である。

2.3 指の種類の種類

タッチジェスチャによる端末操作の入力語彙を拡張するために、操作に用いられる指の種類を識別する手法が複数提案されている。まず、タッチスクリーンから取得した静電容量画像を使用して指の識別を行う手法が幾つか検討されている。Leら [LMH19] はスマートフォンのタッチスクリーンから静電容量画像を取得し、畳み込みニューラルネットワークを使用してタッチスクリーンに触れている指を識別した。実験の結果、彼らは親指が左右の手どちらのものであるかの識別精度が92%であったと報告している。Gilら [GLIO17] はスマートウォッチのタッチスクリーンから静電容量画像を取得し、機械学習（ランダムフォレスト）を使用して、親指、人差し指、および中指を識別した。彼らは、タスク中のタップとスワイプにおける指の識別の精度が、自然な指の姿勢では93%、誇張した指の姿勢では98%であったと報告している。

また、手や指にセンサを取り付けることで指の種類を識別を試みた手法も複数提案されている。Guptaら [GAB16,GB16] は赤外線近接センサを人差し指の腹に取り付けることにより、スマートウォッチに対する人差し指のタッチと中指のタッチを識別する手法を提案している。Parkら [PL19] は磁石を内蔵した指輪を用いて、スマートウォッチに対する人差し指、中指、および薬指のタッチを識別する手法を提案している。この手法では、スマートウォッチに内蔵された磁気センサを使用して磁場を計測し、機械学習（サポートベクターマシン）を用いたアルゴリズムにより指の種類を識別している。Massonら [MGMC17] は親指から小指までの各指に振動センサを取り付け、キーボードまたはタッチパッドへの入力イベントの発生時に最大の振動が検出された指を操作に用いられた指として検出する手法を提案している。Benkoら [BSMT09] は、筋電センサを腕に取り付けタッチスクリーンへジェスチャ入力を行う際の筋電図を取得し、機械学習にて分類することによりタッチジェスチャに用いられている指の種類を識別した。Marquardtら [MKG10,MKL+11] は、赤外線反射材によるタグが各指先に取り付けられた構造の手袋を用いて、タグの認識が可能なディスプレイ（Microsoft PixelSense¹）に対するタッチに用いられた指の識別を行う手法を提案している。Vegaら [VF14] は、電子タグが内蔵された付け爪を付けることにより、タグリーダーが内蔵された平面に対してタッチを行っている指の種類を識別した。

2.4 指の姿勢の識別

タッチスクリーンやタッチパッドにタッチしている指の3次元姿勢を識別する研究が多数なされている。まず、Benkorら [BWB06] と Forlinesら [FWSB07] は、タッチスクリーンに対するタッチ入力の語彙を増やすため、タッチスクリーンに対して垂直にタッチした指と斜めにタッチした指を識別した。これに続き、Wangら [WCRI09] と Xiaoら [XSH15] は、タッチスクリーンに対して斜めにタッチした指の傾き（タッチパネルに対して垂直方向軸まわりの回転角度）をタッチスクリーンの静電容量画像を用いて推定した。池松ら [池松 19] は、タッ

¹<https://social.technet.microsoft.com/wiki/contents/articles/13616.pixelsense.aspx> (2020年1月15日閲覧)

チスクリーンおよびタッチパッド上の流出電流値の変化からタッチにおいて爪にてタッチしているかどうかを検出し、タッチ面に対する指の傾きを推定した。また、竹岡ら [TMR10] は複層ラインレーザの照射と高速カメラの撮影タイミングの同期により、タッチ操作面近傍における手指の3次元姿勢を検出した。Kamiyamaら [KVM⁺05] は、粒状のマーカを格子状に並べて埋め込んだゲル状の板を2層に重ねた作られた特殊なタッチパネル、およびその背面に設置されたカメラを用いてマーカ位置の変化を検出することで、タッチパネルに触れた指先の姿勢および力の方向を推定した。

2.5 手指の左右の識別

ユーザの手の左右を識別する手法が提案されている。Zhangら [ZZC⁺14] はタッチスクリーンから取得したタッチ点、作業領域、指の向き、および指の位置の情報と人体解剖学に基づき、ユーザの手の左右を識別する手法を提案した。Walther-Franksら [WFHAM11] は赤外線カメラにてタッチパネル表面に映るユーザの腕から指先までの影をグレースケール画像として取得し、影の濃淡と人体解剖学に基づきユーザの手の左右を識別した。Ewerlingら [EKF12] は、光学式のタッチパネルにおいて5本の指全てが接触している場合に、タッチ点の位置関係から左手と右手の区別をする手法を提案している。AuとTai [AT10] も同様に、5本の指全てが自然な姿勢にてタッチパネルに接触している場合に、タッチ点の位置関係からそれぞれのタッチ点がどの指に対応するものかを識別し、手の左右を区別する手法を提案している。

2.6 カメラを用いた手の状態認識

RGBカメラを用いて画像処理を行い、手の状態を認識した研究が複数ある。Malikら [ML04] は、2つのカメラにてタッチパッド上を撮影し、映り込んだ手を画像処理により抽出し指先検出を行った。Zhengら [ZV16] 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、キーボード上の手の画像を取得し、手、指、およびそれらの姿勢を識別し、キーボードショートカットを拡張した。Athalye [Ath18] はタッチジェスチャを認識できないラップトップコンピュータの画面に対するタッチを検出できるようにするため、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、画面に反射して映り込んだ指を画像処理にて抽出し画面と指との距離を推定した。

また、深度カメラや赤外線カメラなど特殊なカメラを搭載したセンサを用いて手の状態を認識した研究もある。Melaxら [MKO13] は、人間の手を17の関節を持つ機構として定義し、深度カメラを用いて撮影した手の深度画像に対して定義した手の関節の位置を最適に当てはめることで手の骨格を推定した。また、Microsoft CorporationのKinect²から取得した深度画像を用いてリアルタイムでのハンドトラッキングや平面へのタッチ検出を行う手法が提案さ

²<https://web.archive.org/web/20160509224645/http://www.xbox.com/ja-JP/kinect/>
(2020年1月15日閲覧)

れている [XCZ⁺18, Wi10, MVER12]. Colley と Häkkinen [CH14] は、卓上にて Leap Motion³をスマートフォンの下に並べて設置することにより、スマートフォンへのタッチに用いられる指の種類を識別した。

2.7 関連研究に対する本研究の位置付け

本研究の目的は、タッチパッド操作が主軸となるアプリケーションにおいて、操作対象を注目したまま円滑に作業を進められるようにすることである。そこで、タッチパッド操作の入力開始に伴いツールやモードの指定が行えるようタッチパッド操作を拡張する手法として、タッチパッド操作に用いられている指を識別し、同様のタッチパッド操作であっても別のコマンドを実行できるよう割り当てる手法（指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法）を考案した。この手法は、先行のタッチパッド操作拡張手法と組み合わせることにより、さらに入力語彙を増やすことができると考えられる。また、多くのラップトップがキーボードの下にタッチパッドを配置しているため、タッチパネル上に手を置いた状態にて、親指でのタッチパッド操作が可能である。そのため、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法は先行のホームポジション上に置ける操作拡張手法とも組み合わせることで応用することができる。したがって、1.2節にて述べたタッチパッド操作における問題を解決するだけでなく、多くのラップトップ操作拡張手法をさらに拡張する可能性を持つ。

また、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法を実現すべく、タッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムを検討する上で、なるべく市販されているラップトップが搭載しているセンサのみを用いてシステムが動作することを目指した。具体的には、既存の相互容量方式のタッチパッドおよびインカメラ（RGB カメラ）を用いて指を識別するシステムの設計および実装を行なった。

³<https://www.leapmotion.com/ja/> (2020年1月15日閲覧)

第3章 指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法

本章において、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の概要を述べ、実用例を示す。

3.1 概要

タッチパッド操作が主軸となるアプリケーションにおいて、ツールやモードの切り替えに伴う GUI への視線移動やキーボードへの手の移動は、操作対象に注目したまま作業を行うことを阻害する要因となる。この問題を解決するため、タッチパッド操作の入力開始と同時にツールやモードの指定を行うことを考えた。そこで、タッチパッドに接触している指の本数だけでなく、指の種類や触れている手の左右を識別することにより、タッチパッド操作の入力語彙を拡張することに着目した。よって、ユーザが親指、人差し指、中指、薬指、および小指の内どの指またはどのような指の組み合わせにてタッチパッドを操作しているか、あるいは右手と左手のどちらの指にて操作しているかに基づき、操作に用いられている指の本数と動作が同様であっても異なるコマンドを割り当て実行可能とすることを考案した。この手法により、ツールやモードは異なるがタッチパッド操作が同様の作業を、タッチパッド操作に用いる指あるいは指の組み合わせを切り替えることにより実行することができる。例えば1本指でのタッチパッド操作ならば、同じタップ操作やクリック操作、あるいはドラッグ操作であっても、親指での操作と人差し指での操作と中指での操作を別の操作として入力することを可能とする（図3.1）。また、複数指の組み合わせでのタッチパッド操作ならば、同じスクロール操作やタッチパッド操作であっても、指の組み合わせ方が異なれば別々の操作として入力することを可能とする（図3.2）。さらに、タッチパッド操作に用いられる手の左右を識別することで、同様のタッチパッド操作を別々の操作として入力可能とする（図3.3）。

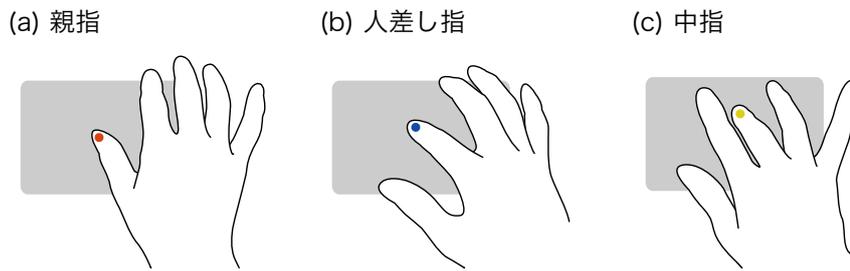


図 3.1: 指の識別に基づくタッチパッド操作の例 (1 本指の場合).



図 3.2: 指の識別に基づくタッチパッド操作の例 (複数指の組み合わせの場合).

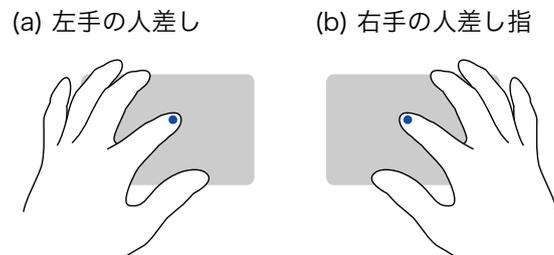


図 3.3: 指の識別に基づくタッチパッド操作の例 (手の左右を識別した場合).

3.2 実用例

画像編集ソフトウェアとウェブブラウザを対象とした具体的な実用例を示す。

3.2.1 画像編集ソフトウェア

画像編集ソフトウェアには多数のツールやコマンドが存在し、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の利点を活かせると考えられる。表 3.1 に提案手法の画像編集ソフトウェアでの実用例を示す。例えば、1 本指でのポインティング操作であっても、親指を消しゴムツール、人差し指をペンツール、中指を図形選択ツールに割り当てることが可能となる。また、2 本指でのスクロール操作について、親指と人差し指の組み合わせを対象の透明度の変更に、人差し指と中指の組み合わせを画面のスクロールに割り当て、2 本指でのスワイプ操作について、中指と薬指の組み合わせを Redo・Undo（履歴操作）に割り当てることも可能である。ここで、2 本指でのスクロール操作と 2 本指でのスワイプ操作は似た操作であるが、操作に用いる指の組み合わせの違いから、意図しないコマンドの実行を軽減できると期待できる。さらに、2 本指での回転操作について、親指と人差し指の組み合わせを対象の回転に、人差し指と中指の組み合わせを対象のシアー（剪断変形）に割り当てることで、似たコマンドを同様のタッチパッド操作にて実行可能にできる。このようにユーザの好みに合わせて様々なツールやコマンドをそれぞれの拡張されたタッチパッド操作に割り当てることが可能となる。

表 3.1: 提案手法の画像編集ソフトウェアでの実用例。

操作	指の種類・組み合わせ	割り当てるツール・コマンド
1 本指でのポインティング	親指	消しゴムツール
	人差し指	ペンツール
	中指	図形選択ツール
2 本指でのスクロール	親指と人差し指の組み合わせ	対象の透明度の変更
	人差し指と中指の組み合わせ	画面のスクロール
2 本指でのスワイプ	中指と薬指の組み合わせ	Redo・Undo（履歴操作）
2 本指での回転	親指と人差し指の組み合わせ	対象の回転
	人差し指と中指の組み合わせ	対象のシアー

3.2.2 ウェブブラウザ

表 3.2 に提案手法のウェブブラウザでの実用例を示す。例えば、1 本指でのクリック操作の場合、人差し指でのクリックを通常の左クリック（主クリック）に割り当て、親指でのクリックを右クリック（副クリック）、中指でのクリックを中クリック（ホイールクリック）に割り当てることができる。また、別の活用方法として、1 本指でのカーソル移動操作について、用

いる指の種類に応じてカーソルの移動速度を変更することが可能である。これにより、細かな作業をする時と大きくカーソルを移動したい時とでタッチパッド操作に用いる指を切り替えることにより、操作のし易さを調節することができる。さらに、右手による2本指でのスクロール操作を画面のスクロールに割り当て、左手による2本指でのスワイプ操作を戻る・進むコマンドに割り当てることで、意図しない操作の実行を軽減できる。

表 3.2: 提案手法のウェブブラウザでの実用例。

操作	指の種類・手の左右	割り当てるツール・コマンド
1本指でのクリック	親指	右クリック (副クリック)
	人差し指	左クリック (主クリック)
	中指	中クリック (ホイールクリック)
1本指でのカーソル移動	親指	低速度でのカーソル移動
	人差し指	通常速度でのカーソル移動
	中指	高速度でのカーソル移動
2本指でのスクロール	右手	画面のスクロール
2本指でのスワイプ	左手	戻る・進む (ページ送り操作)

第4章 インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システム

指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法を実現すべく、タッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムとして、ラップトップの画面上部に搭載されたインカメラおよびタッチパッドから取得したタッチ点の座標データを用いた指の識別システムを検討した。本章では、検討したシステムの設計および実装を示し、システムの動作確認から判明したシステムの課題について述べる。

4.1 設計

市販されている多くのラップトップが画面上部にインカメラを搭載していることに着目し、インカメラに鏡を取り付けキーボードおよびタッチパッド周辺の画像を取得し（図4.1参照）、画像処理を行うことでユーザの手指の状態を認識することを考えた。そこで、タッチパッド操作に用いられている指の識別を以下の手順にて行うよう設計した。

1. ラップトップのインカメラに鏡を取り付け、キーボードおよびタッチパッド周辺の画像が取得できるよう調節する。
2. インカメラの撮影範囲内にユーザの手が映らない状態にて、キーボードおよびタッチパッド周辺の画像（初期状態画像）を撮影する。
3. 撮影した初期状態画像からタッチパッドの領域を抽出する。
4. タッチパッドに指が接触した際、タッチパッド領域内におけるタッチ点の座標を取得し、キーボードおよびタッチパッド周辺の画像（操作状態画像）を撮影する。
5. 撮影した操作状態画像を用いて、撮影範囲内に映っている手を抽出する。
6. 抽出した手の左右を識別し、指先を抽出する。
7. 抽出したタッチパッドの領域、タッチ点の座標、撮影した操作状態画像内での指先の座標から、タッチ点と指先を対応づける。
8. 各指先の指の種類を識別し、タッチ点と対応づけることにより、タッチパッド操作に用いられている指を決定する。

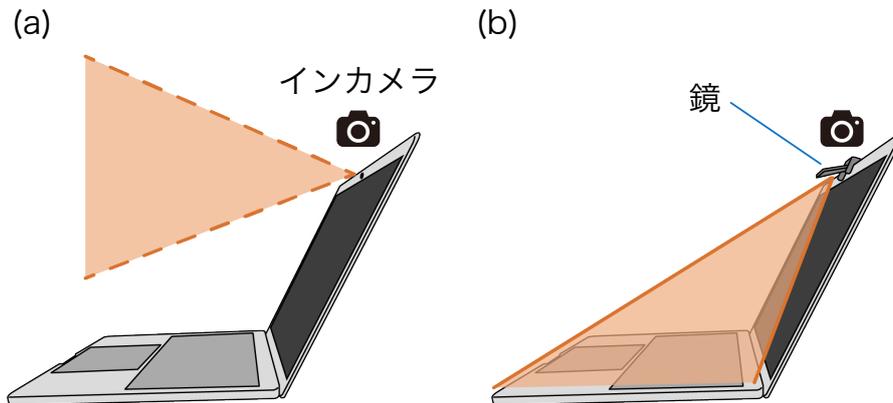


図 4.1: ラップトップのインカメラによる撮影範囲の比較図. a) 通常の撮影範囲. b) インカメラに鏡を取り付けた際の撮影範囲.

なお, 上記の手順の内 1-3 は下準備として事前に行い, 4-8 はリアルタイムにてタッチパッドに指が接触する都度行うものとする.

4.2 実装

本節では, 設計したシステムの実装について述べる.

4.2.1 キーボードおよびタッチパッド周辺の画像の撮影

ラップトップのインカメラにてキーボードおよびタッチパッド周辺の画像を撮影するため, インカメラに鏡を取り付ける固定具 (鏡固定具, 図 4.2, 三面図: 付録 A.1) を 3D プリントにて制作した. この固定具により, インカメラに取り付けられた鏡の傾きは $0-120^\circ$ の範囲にて自由に変更可能である. 実際にインカメラに鏡を取り付けた場合の撮影範囲の例を図 4.3 に示す.

4.2.2 手の抽出

まず, 操作状態画像の平滑化のため, ガウシアンフィルタをかける. 続いて, Song ら [SSP+14] のアルゴリズム 4.1 を用いて肌色領域を抽出し, 肌色の領域を黒, それ以外の色の領域を白とするように 2 値化する. 最後に, 抽出した肌色領域の輪郭線を抽出する.

$$S(u) = \begin{cases} 1 & (\min(R(u) - G(u), R(u) - B(u)) > \tau) \\ 0 & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (4.1)$$

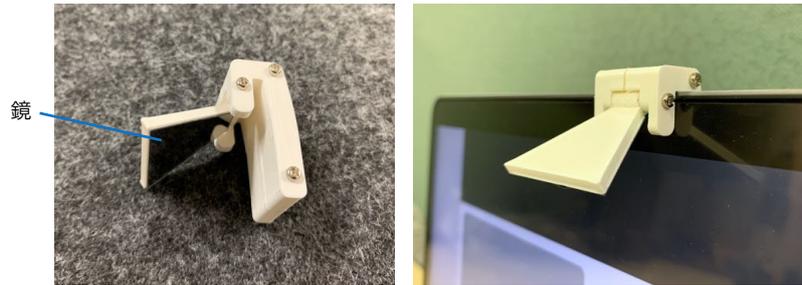


図 4.2: 左) 鏡固定具. 右) 実際にラップトップに鏡固定具を取り付けた様子.

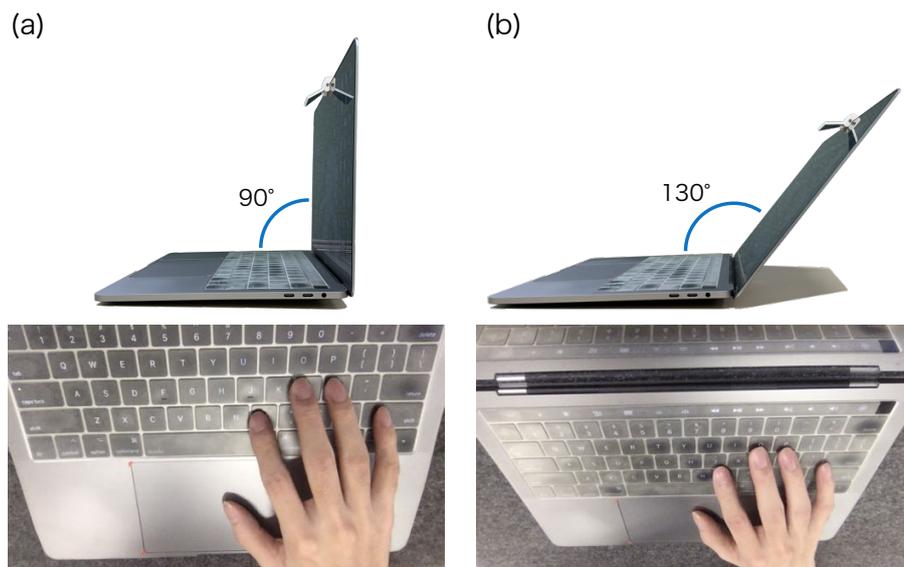


図 4.3: 実際にインカメラに鏡を取り付けた場合の撮影範囲の例. a) ディスプレイの開き角度が 90° の場合. b) ディスプレイの開き角度が 130° の場合.

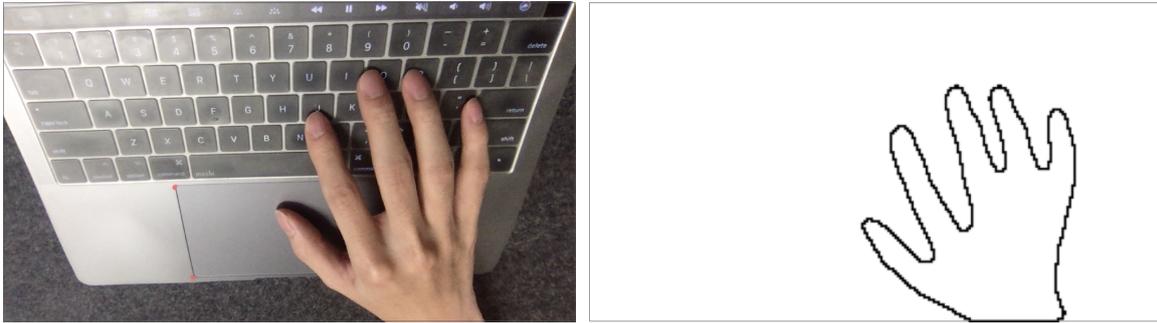


図 4.4: 手の抽出の過程. 左) 入力した操作状態画像. 右) 手の抽出結果.

$R(u)$, $G(u)$, および $B(u)$ は各座標 u の RGB 値, τ はその座標が手に属するかどうかを決定するための閾値である. なお, 閾値はシステムの使用時, 事前に手の抽出を試し調節する. 手の抽出結果の例を図 4.4 に示す.

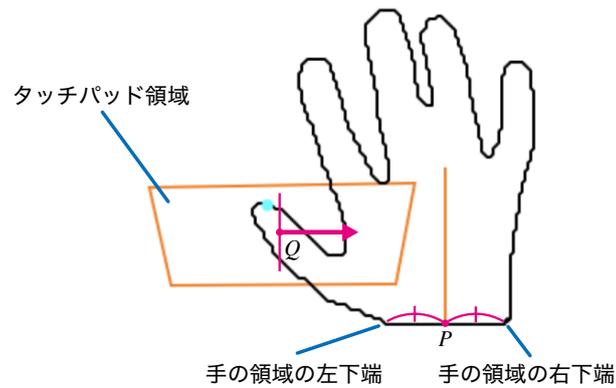


図 4.5: 手の左右の識別方法.

4.2.3 手の左右の識別

抽出した手の領域の左下端および右下端の midpoint (P) とタッチパッド領域の中心 (Q) の x 座標を比較し、抽出した手の領域の左右の識別を行う (図 4.5). P が Q より右にある場合は抽出された手を右手と識別し、そうでない場合は左手として識別する. 手の左右の識別結果の例を図 4.6 に示す.

4.2.4 指先の抽出および指の種類識別

まず、抽出した手の領域の輪郭線の曲率から指先と指間腔 (指と指の間) を抽出する (図 4.7). 手の領域が右手ならば、抽出した指先の x 座標が小さいものから順に親指, 人差し指, 中指, 薬指, および小指に割り当てる. 反対に、手の領域が左手ならば、抽出した指先の x 座標が大きいものから順に親指, 人差し指, 中指, 薬指, および小指に割り当てる. 最後に、取得したタッチ点の座標を操作状態画像内のタッチパッド領域上に射影変換した座標と、抽出した指先の座標の距離を算出し、距離が最も近いものを対応づける.

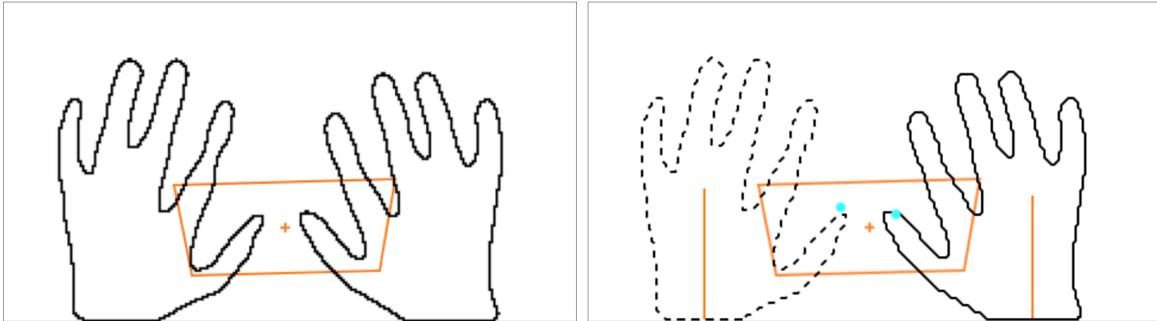


図 4.6: 手の左右の識別の過程. 左) 抽出した手の領域. 右) 手の左右の識別結果.

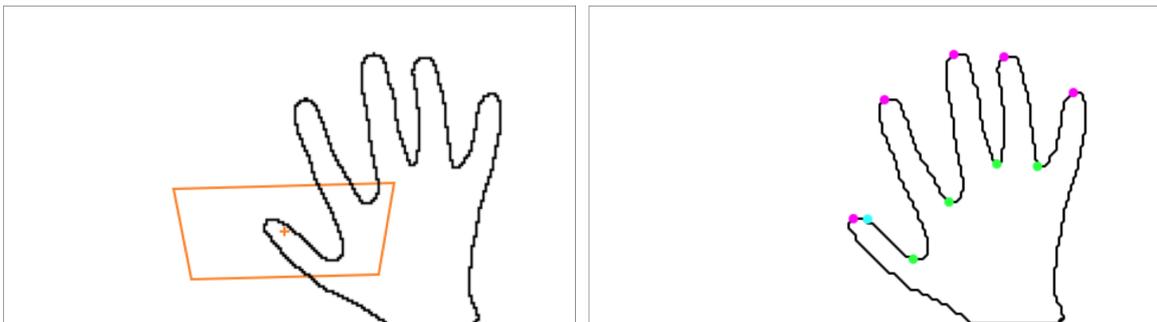


図 4.7: 指先の抽出の過程. 左) 抽出した手の領域. 右) 指先の抽出結果.

4.2.5 プロトタイプ

システム使用時の全体像を図4.8に示す。まず、ハードウェアに関して、ラップトップとして MacBook Pro (Apple Inc., 13 インチ, 2017 年モデル) を使用し、タッチ패드およびインカメラは MacBook Pro 備え付けのものを用いた。また、インカメラの撮影範囲内に手の肌色と近い色の物体が存在すると手の認識が正しく行えないため、ラップトップの下にデスクマット (セイワ・プロ社, カラートイレマット, 40-529, 黒色) を敷いた。

さらに、タッチパッドの領域の抽出に関わる画像処理を簡易にするため、タッチパッドの四隅にマーカとなる赤色のシール (モリトク社, カラーシール, NMBS-31E, 直径5mm) を半円になるように切断し貼付した (図4.9)。次に、ソフトウェアに関して、タッチパッド操作に用いられている指の識別を行うソフトウェアを macOS において動作するアプリケーションとして実装した (図4.10)。また、タッチパッドに対する指の接触およびタッチ点の座標を取得するために `MultiTouchSupport.framework` を用い、インカメラを用いてキーボードおよびタッチパッド周辺の画像を撮影するため、`AVFoundation.framework` を使用した。

著者によりプロトタイプの動作確認を行ったところ、インカメラの撮影範囲内にタッチパッド操作に用いられる手が指先から手首まで映っている場合に、指の識別が可能であることが確認できた。



図4.8: インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システム。

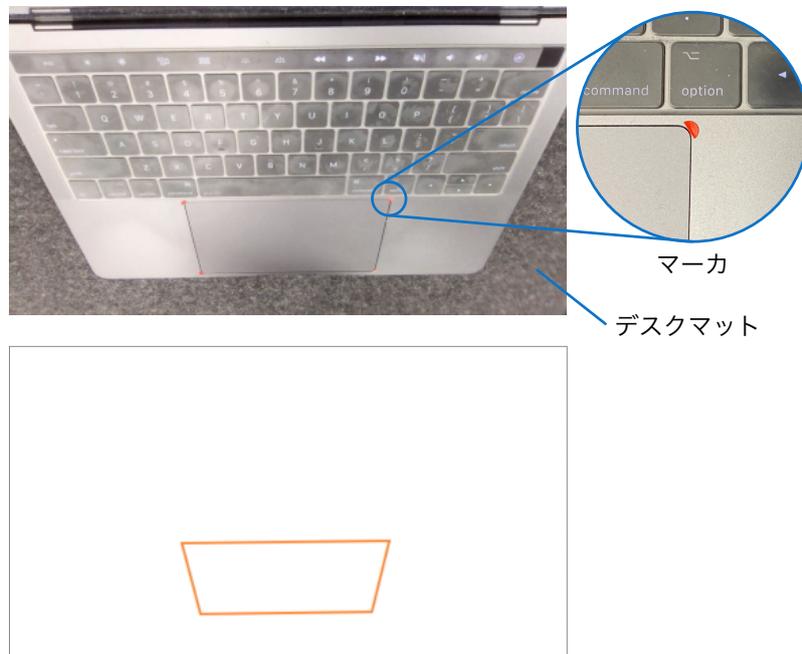


図 4.9: タッチパッド領域の抽出. 上) 画像処理の簡易化のための工夫. 下) タッチパッド領域の抽出例.

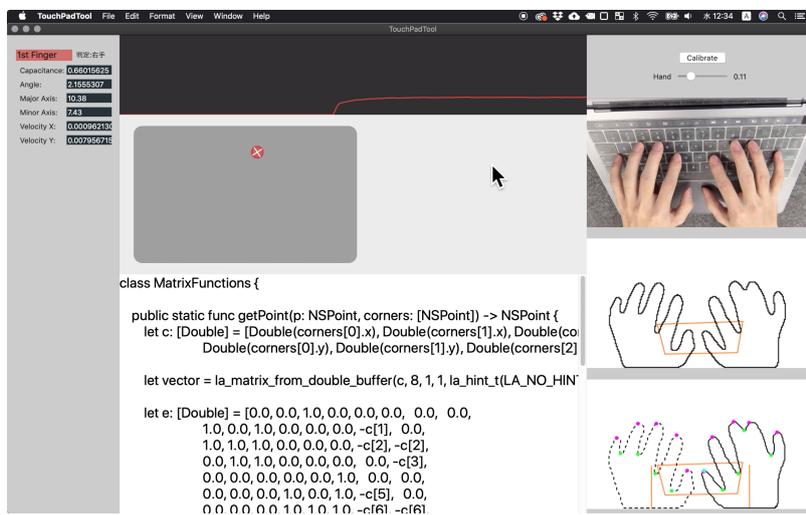


図 4.10: インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システムのソフトウェア実行画面.

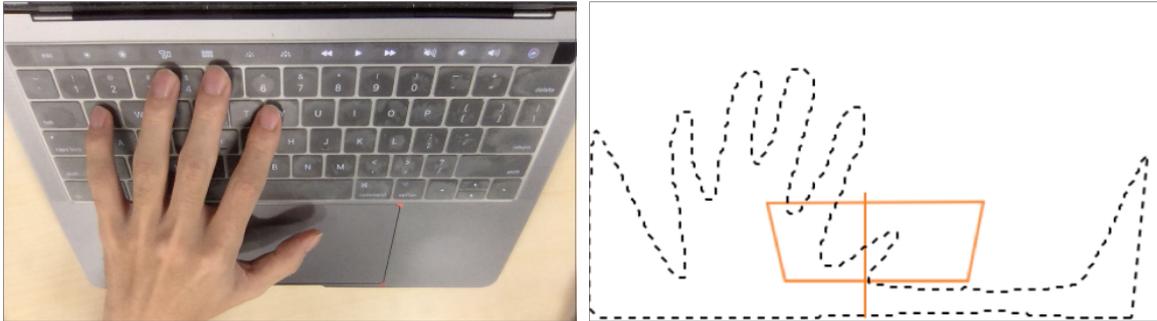


図 4.11: 手の領域抽出の失敗例. 机の色と肌色が区別できず, 同化して領域が抽出されている.

4.3 システムの課題

著者によるシステムの動作確認から判明したシステムの課題について述べる.

4.3.1 手の抽出に関する課題

本システムは MacBook Pro のインカメラを用いているが, カメラの露出や明るさ, ホワイトバランスが自動で変化する仕様であり, 環境光による影響を強く受けることが判明した. そのため, ユーザの手の抽出の際に行う肌色検出が安定せず, しばしば正しく手の抽出が行えないことがあった. この問題は, 露出や明るさ, ホワイトバランスを制御可能なインカメラを搭載するラップトップを用いるか, 外付けのウェブカメラを用いることによって解決できる可能性がある. また, 肌色に近い色の物体がインカメラの撮影範囲に映り込むと, ユーザの手の領域のみを正しく抽出することができないため, ラップトップを置く机の表面の色は肌色に近い色を避ける必要がある. 実際の手の領域抽出の失敗例を図 4.11 に示す.

4.3.2 指の重なりに関する課題

左右の手の指同士が重なることにより手の左右を正しく識別できない問題 (図 4.12), および手の姿勢によっては指先を正しく抽出できない問題 (図 4.13) があることが判明した. これらの問題により, タッチパッド操作に用いられる指の正しい識別が行えないため, 手の領域抽出アルゴリズムおよび指先検出アルゴリズムを改善する必要がある.

4.3.3 指の識別にあたるインカメラの常時使用

本システムは, ラップトップ備え付けのタッチパッドおよびインカメラ以外に外付けのセンサを必要としないため, 既存のラップトップに適用し易い点が利点である. しかし, タッチパッド操作に用いる指を識別するにあたり, 常時インカメラを独占して使用するため, システムの使用中はインカメラを本来の使用目的であるビデオチャットに用いることができない.



図 4.12: 左右の手の指同士が重なることに起因する手の左右の識別の失敗例. 1つの大きな左手の領域として識別されている.

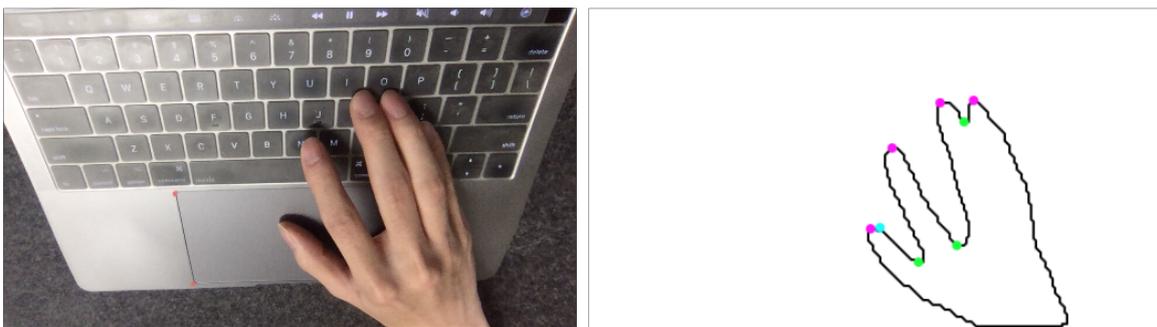


図 4.13: 手の姿勢に起因する指先抽出の失敗例. 指先が4点しか抽出できていない.

第5章 タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システム1

4.3節のシステムの課題にて、インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システムが、カメラを用いた画像処理を行うが故の課題を持つことを述べた。そこで、カメラを用いず、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いて指の識別を行うシステムを検討した。本章では、タッチパッド操作に用いられている親指の左右を識別するシステムについて、システムの設計および実装を示し、システムの性能調査のために行った実験の結果を述べる。

5.1 設計

図5.1に示すように、ホームポジション上に手が置かれた状態では、親指の動作が制限されることに着目した。そして、この親指の動作の制限により、タッチパッドに対する親指の角度や接触面の形状、面積はタッチパッド領域上の各座標に則すると考えた。また、この親指の動作の制限は、親指の付け根の位置や手首の位置、あるいは中指や薬指の指先の位置に依存し、左右の手により線対称的に異なるため、タッチパッドに対する親指の角度や接触面のデータを特徴量とした分類を行うことで、左右の親指の識別が可能であると仮説を立てた。そこで、ユーザの手がホームポジション上に置かれている状態を前提条件とし、タッチパッド操作に用いている親指の左右を識別するシステムの設計を行った。

本システムの親指の左右識別は、学習フェーズおよび識別フェーズの2つのフェーズにて構成される。学習フェーズでは、タッチパッドを左右の親指にて操作した際のタッチ点に関するデータを収集し、データセットを作成し、機械学習モデルの生成を行う。また、識別フェーズでは、学習フェーズにて生成した機械学習モデルを利用してタッチパッド操作に用いられる親指の左右分類を行い、その分類結果を基に最終的な親指の左右を識別する。

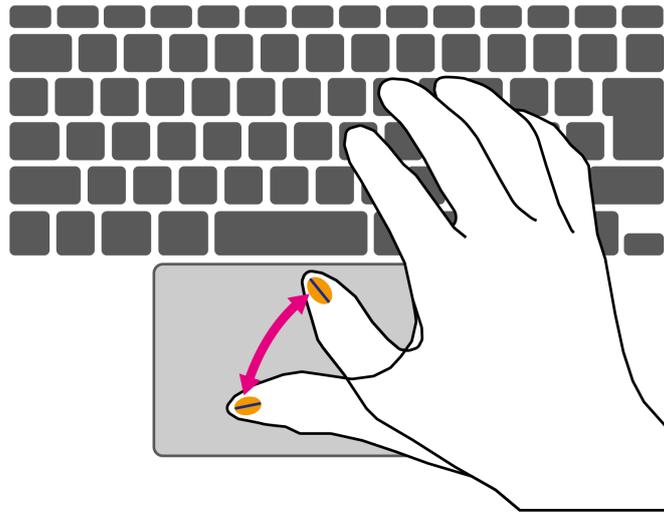


図 5.1: ホームポジションに手が置かれた状態における親指の動作例. 親指の接触面の状態はタッチパッド上の各座標に則する.

5.2 実装

学習フェーズおよび識別フェーズの実装について述べる.

5.2.1 学習フェーズ

学習フェーズでは, タッチパッドを左右それぞれの親指にてなぞった際のタッチ点に関するデータを収集する. 収集するデータは, タッチパッドに対する親指の接触面を楕円とした時, その楕円の中心の x 座標, y 座標, 楕円の長径, 短径, および長径の傾きとした. 左右それぞれの親指のデータを規定数収集後, 勾配ブースティング木を用いて機械学習モデルを生成する. この際, 説明変数として, タッチ点 (楕円) の中心の x 座標, y 座標, 楕円の長径, 短径, 直近 5 フレームにおける長径の傾きの平均値, および楕円率 (短径と長径の比) の 6 つの値を入力し, 目的変数として親指の左右に対応するラベル (左ならば -1 , 右ならば $+1$) を入力することとした. なお, 楕円の特長上, 長径の傾きは $0-180^\circ$ の範囲となるため, タッチパッドに対する親指の角度もこの範囲内のものとなる.

5.2.2 識別フェーズ

識別フェーズでは, 親指によるタッチパッド操作中リアルタイムにて親指の左右を識別する. まず, タッチパッドに親指が接触している間, タッチ点に関するデータを毎フレーム取得する. ここで, 取得するデータは学習フェーズと同様に, タッチ点 (楕円) の中心の x 座標, y 座標, 楕円の長径, 短径, および長径の傾きとした. 続いて, 学習フェーズにて生成した機械

学習モデルに特徴量（予測変数）を入力し，親指の左右の分類結果 $hand$ ($hand = -1$ or $+1$) およびその確信度 p ($0 \leq p \leq 1$) を取得する．なお，この際入力に用いる予測変数は，機械学習モデルを生成する際の説明変数と同様に，タッチ点（楕円）の中心の x 座標， y 座標，楕円の長径，短径，直近 5 フレームにおける長径の傾きの平均値，および楕円率である．最後に，以下の式 (5.1) に基づき直近 15 フレームにおける分類結果と確信度を掛け合わせた値の平均値 $majorHand$ を算出し，識別結果 $resultHand$ を出力する．

$$\begin{aligned}
 majorHand &= \frac{\sum_{i=1}^{15} (hand_i \times p_i)}{15} \\
 resultHand &= \begin{cases} left & (majorHand < 0) \\ unknown & (majorHand = 0) \\ right & (majorHand > 0) \end{cases} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

この式において $hand_i$ および p_i は直近 15 フレームにおける分類結果と確信度であり，最も古い値が $i = 1$ ，最も新しい値が $i = 15$ の時のものである．識別フェーズの実装上，タッチパッドに親指が接触してから最初の 14 フレームは識別結果を出力しないものとした．

5.2.3 プロトタイプ

上記の設計に基づき，プロトタイプのソフトウェアを macOS において動作するアプリケーションとして実装した．実装にあたり，機械学習のために CoreML.framework および CreateML.framework を，タッチパッドからタッチ点のデータを取得するために MultitouchSupport.framework を使用した．ソフトウェア実行時のスクリーンショットを図 5.2 に示す．機械学習モデルは，著者によるプロトタイプの動作確認時，勾配ブースティング木，ランダムフォレスト，決定木，Support Vector Machine，およびロジスティック回帰の 5 種の分類アルゴリズムの内最も分類精度が高かった勾配ブースティング木を用いて生成することとした．本ソフトウェアには，タッチパッド上の親指の位置をユーザがラップトップの画面を見ながら確認できるよう，リアルタイムのタッチパッド領域の映像を画面上に表示する機能を搭載した．この機能を用いる場合は，第 4 章のシステムの実装に用いた鏡固定具（図 4.2）を用いてキーボードおよびタッチパッド周辺の映像を撮影する．なお，タッチパッド領域の映像は，画像処理により抽出したタッチパッド領域に射影変換を経て表示される（図 5.3）．

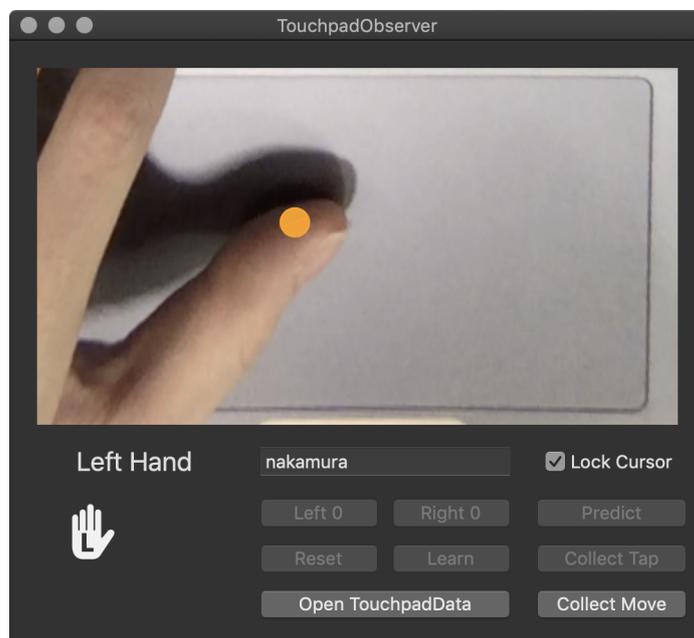


図 5.2: タッチパッド操作に用いられている親指の左右を識別するシステムのソフトウェア実行画面. タッチパッド操作に用いられる親指の左右識別の様子.



図 5.3: 左) 鏡を取り付けたインカメラから取得されるキーボードおよびタッチパッド周辺の映像. 右) 射影変換により表示されたタッチパッド領域の映像.

5.3 実験

本システムの識別性能を調査するため、5.2.3 節にて示したプロトタイプを用いて実験を行った。

5.3.1 実験参加者

大学生および大学院生のボランティア 4 名（全員男性， P_1 – P_4 ）を実験参加者とした。実験参加者は 22–24 歳（平均 22.75 歳）であり，内 1 名（ P_1 ）が左利きであった。また，すべての実験参加者が日常的にラップトップを使用しており，タッチパッドの扱いに習熟していた。実験開始前に実験参加者の手長および親指第一関節の周囲を計測した。この結果，手長は平均 19.0 cm（最長 19.5 cm，最短 18.5 cm），親指第一関節の周囲は平均 6.7 cm（最長 7.0 cm，最短 6.3 cm）であった。

5.3.2 実験機器

実験にて使用するラップトップとして MacBook Pro（Apple Inc.，画面サイズ：13 インチ，タッチパッドのサイズ：135.5 mm × 84.0 mm，タッチパッドの解像度：26 × 18 ピクセル）を用いた。また，実験を円滑に行うため，鏡固定具を用いてタッチパッド上の親指の位置をラップトップの画面にて実験参加者が確認できるようにした。さらに，タッチパッド領域全体を満遍なく用いて実験を行うことを目的として，タッチパッド領域を縦横 $8 \times 8 = 64$ の領域に分割し，画面上に表示されるタッチパッド領域には格子模様を表示した。

5.3.3 タスク

実験のタスクは，学習タスク，タップタスク，およびムーブタスクにて構成される。

学習タスク

学習タスクでは，両手をホームポジション上に構えた状態にて，左右それぞれの親指を用いてタッチパッド領域を満遍なくなぞった際のタッチ点に関するデータを収集し，5.2.1 節にて述べた機械学習モデルを生成する。実験参加者には，タッチパッドの 64 領域のそれぞれにつき 50 フレーム分のデータの収集が完了するまでタッチパッド領域をなぞらせた。なお，画面上のタッチパッドの各領域は，1 度指が通過すると青く表示され，50 フレーム分のデータの収集を完了すると赤く表示する仕様にしてあり，実験参加者は画面の表示を参考にタッチパッドの画面をなぞった。実験参加者 1 人あたりの総収集データ数（機械学習モデルの生成に入力したデータ数）は 2 指 × 64 領域 × 50 フレーム = 6400 である。学習タスクにおけるデータ収集の様子を図 5.4 に示す。

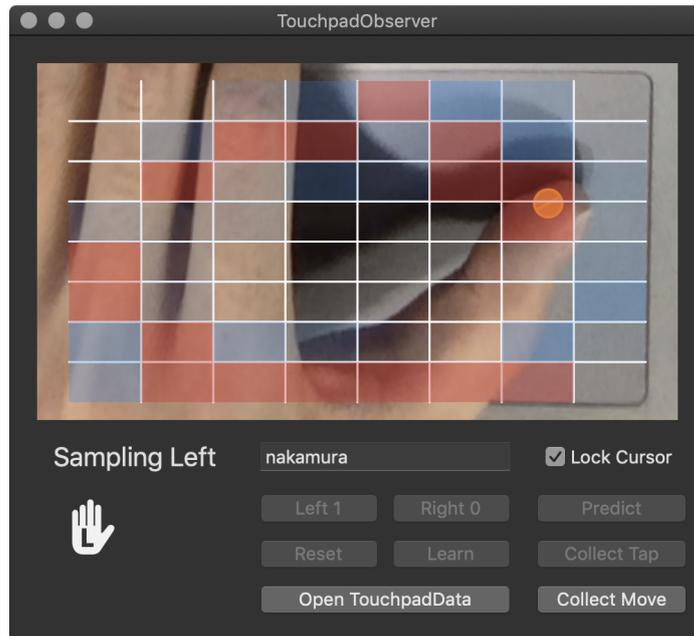


図 5.4: 学習タスクにおけるデータ収集の様子.

タップタスク

タップタスクでは、図 5.5 に示すように画面上に提示された領域を左右それぞれの親指にてタップするタスクを実験参加者に行わせた。ここで、指がタッチパッドに触れてから離れるまでの間、タッチ点に関するデータを取得し、5.2.2 節のアルゴリズムに従った識別結果を収集した。左右の親指につきタッチパッドの 64 領域分のタップを取得するため、タップタスクにて提示される領域数は 2 指 \times 64 領域 = 128 領域である。なお、タップタスクにて提示される領域の順番は、親指の左右および各領域についてランダムとした。また、実験参加者が提示されたタップ領域内にてタップできなかった場合、画面上に“Repeat”と表示し、提示されたタップ領域内におけるタップが成功するまでタップをやり直させた。

ムーブタスク

ムーブタスクでは、図 5.6 に示すように画面上に提示された領域の片方の領域を親指にてタッチし、タッチ状態を維持したままもう一方の領域まで親指を移動させた後に指を離すタスクを実験参加者に行わせた。なお、画面上に表示される矢印の始点が含まれる領域をタッチの開始領域とし、矢印の終点が含まれる領域をタッチ終了領域とした。ここで、タップタスクと同様に、指がタッチパッドに触れてから離れるまでの間、タッチ点に関するデータを取得し、5.2.2 節のアルゴリズムに従った識別結果を収集した。左右の親指それぞれに対し、タッチ開始領域をタッチパッドの 64 領域に割り当て、タッチ終了領域をタッチ開始領域ではないランダムな領域に割り当てた。したがって、ムーブタスクにて提示される領域の組の総数は

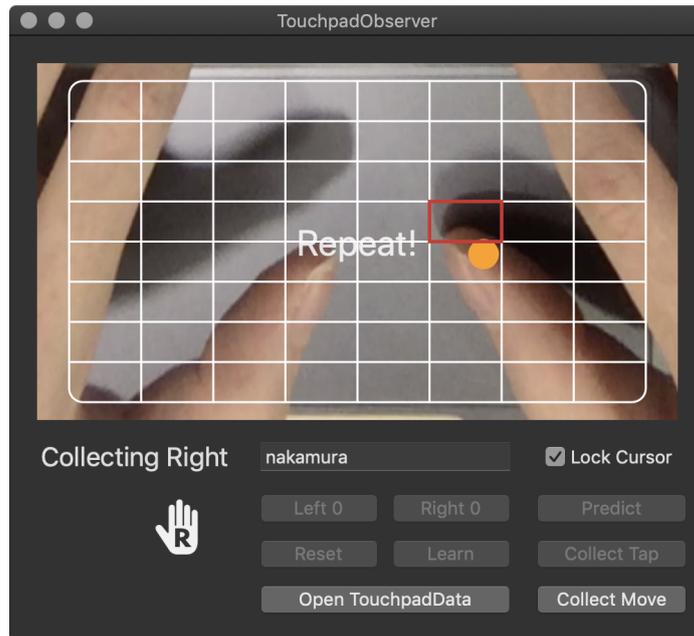


図 5.5: タップタスクの様子.

2 指 × 64 領域 = 128 領域である. なお, ムーブタスクにて提示される領域の組の順番は, 親指の左右および各領域の組についてランダムとした. また, 実験参加者が提示された開始領域内にてタッチを開始できなかった場合, あるいは提示された終了領域内にてタッチを終了できなかった場合, 画面上に “Repeat” と表示し, 正しくタッチの開始終了が成功するまでやり直させた.

5.3.4 実験手順

まず, 実験参加者には椅子に座った状態にて学習タスクを行った後, タッチパッドに対し自由にタップ操作やなぞり操作を行い, 生成した機械学習モデルを用いた親指の左右識別を試してもらった. その後, 実験監督者に指示された順番にてタップタスクおよびムーブタスクを続けて行ってもらった. 次に, 実験参加者には1度立ち上がり, 1分ほど休憩をとってもらった. 最後に, 再び椅子に座り, 実験監督者に指示された順番にてタップタスクおよびムーブタスクを続けて行ってもらった. なお, 実験参加者には, タップタスクおよびムーブタスクを表 5.1 に示す実行順序にて行わせた. また, 実験参加者には, 実験全体を通してなるべくホームポジションを崩さずにタスクを行うこと, タッチパッドを押し込まないこと, および体勢を大きく変化させないことを指示した. 実験中, ラップトップのインカメラにて撮影される実験参加者の手元の映像を録画した.

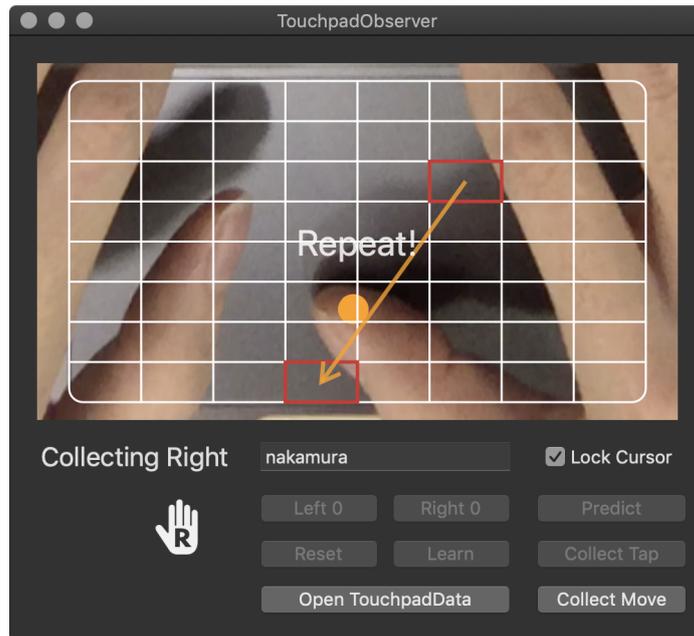


図 5.6: ムーブタスクの様子.

表 5.1: 実験参加者のタップタスクおよびムーブタスクの実行順序

実験参加者	タスク 1	タスク 2	タスク 3	タスク 4
P_1	タップ	ムーブ	タップ	ムーブ
P_2	タップ	ムーブ	ムーブ	タップ
P_3	ムーブ	タップ	ムーブ	タップ
P_4	ムーブ	タップ	タップ	ムーブ

5.3.5 実験結果

タップタスクの内, 先に行ったものをタップタスク 1, 後に行ったものをタップタスク 2 と呼称する (ムーブタスクについても同様).

図 5.7 にタップタスクにおける親指の左右の識別率を示す. タップタスク 1 およびタップタスク 2 の平均識別率はそれぞれ 77.7% (SD = 12.5%), 79.9% (SD = 14.2%) であった. 一元配置分散分析の結果, タップタスク 1 およびタップタスク 2 の間には有意差はなかった ($F_{1,6} = 0.0404$, $p = 0.8473 > 0.05$). また, タップタスク全体の平均識別率は 78.8% (SD = 13.4%) であった.

続いて, 図 5.8 にムーブタスクにおける親指の左右の識別率を示す. ムーブタスク 1 およびムーブタスク 2 の平均識別率はそれぞれ 83.2% (SD = 6.0%), 82.3% (SD = 10.0%) であった. 一元配置分散分析の結果, ムーブタスク 1 およびムーブタスク 2 の平均識別率の間には

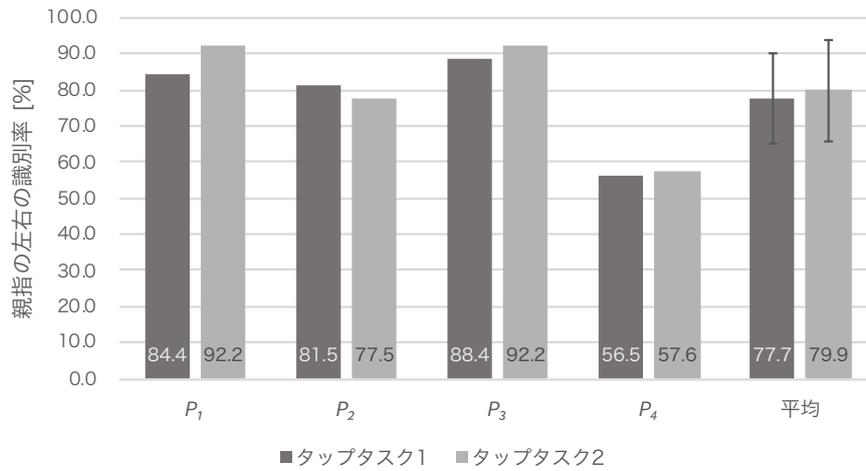


図 5.7: タップタスクにおける親指の左右の識別率.

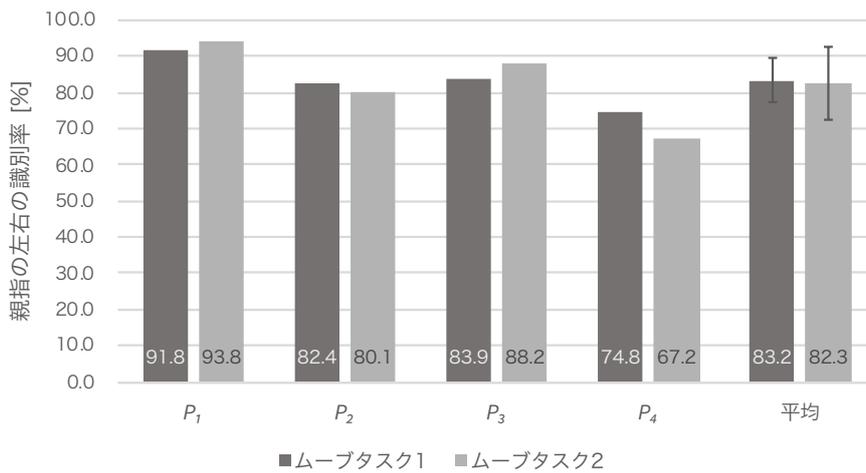


図 5.8: ムーブタスクにおける親指の左右の識別率.

有意差はなかった ($F_{1,6} = 0.0184$, $p = 0.8966 > 0.05$). また, ムーブタスク全体の平均識別率は 82.8% (SD = 8.3%) であった.

一限配置分散分析によりタップタスクとムーブタスクの識別率を比較したところ, 2つの間には有意差はなかった ($F_{1,14} = 0.4545$, $p = 0.5112 > 0.05$). 両タスクの平均識別率は 80.8% (SD = 10.2%) であった.

5.3.6 考察

実験結果より，タップタスク全体の親指の左右の平均識別率が78.8%，ムーブタスク全体の親指の左右の平均識別率が82.8%であったため，より高い識別率を達成するには改善が必要であるが，タッチパッドから取得可能なデータのみを用いて指の識別が行える可能性があることが分かった．

実験中に撮影した実験参加者の手元の映像を確認したところ，タップタスクおよびムーブタスクの双方において実験参加者の内最も識別率の低かった P_4 は，ホームポジションにおける手の構えが崩れやすい傾向がみられた．したがって，本システムはホームポジションにおける手の構えが崩れた状態では識別率が低下する可能性があると考えられる．ラップトップにてタッチパッドを操作する際，常にホームポジション上に手を構えているとは限らないため，ホームポジション上という制約をなくしたシステムの検討が必要である．

さらに，各実験参加者のタッチパッド領域ごとの識別率のヒートマップを図5.9–図5.12に示す．また，右利きの実験参加者（ P_2 ， P_3 ，および P_4 ）について平均をとったタッチパッド領域ごとの識別率のヒートマップを図5.13に示す．ヒートマップ全体を通して，タッチパッドの下部領域の識別率が低いことが分かる．そのうえ，図5.13を観察するに，右利きの場合にはタッチパッド左下領域の識別率が低くなる傾向が見られるため，ユーザの利き手によりタッチパッド領域に対する識別率に偏りが生じる可能性がある．

50%	50%	50%	100%	100%	83%	80%	100%	40%	71%	34%	39%	75%	84%	75%	65%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	46%	100%	72%	100%	100%	83%	50%	74%
0%	50%	100%	100%	100%	100%	50%	100%	100%	54%	100%	84%	88%	100%	80%	96%
0%	50%	100%	100%	100%	100%	50%	0%	82%	80%	77%	100%	100%	100%	100%	62%
32%	0%	100%	100%	100%	44%	50%	50%	50%	77%	85%	74%	88%	78%	66%	100%
50%	50%	50%	100%	50%	50%	0%	100%	53%	81%	78%	53%	86%	80%	74%	100%
50%	0%	0%	0%	50%	50%	67%	50%	15%	40%	33%	43%	50%	49%	76%	85%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	57%	67%	39%	31%	0%	51%	78%	99%

図 5.12: P_4 のタッチパッド領域ごとの識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.

50%	83%	83%	100%	100%	94%	77%	83%	74%	90%	78%	78%	86%	95%	84%	87%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	81%	71%	100%	89%	92%	97%	89%	81%	78%
17%	83%	93%	100%	100%	100%	83%	100%	87%	62%	91%	92%	82%	98%	83%	90%
67%	83%	100%	83%	100%	100%	83%	67%	76%	80%	91%	82%	95%	95%	92%	70%
62%	33%	67%	100%	100%	65%	83%	79%	83%	76%	67%	75%	96%	79%	81%	98%
60%	64%	74%	83%	74%	62%	33%	100%	67%	73%	81%	77%	87%	90%	80%	96%
67%	33%	30%	17%	67%	83%	89%	80%	65%	66%	51%	52%	65%	67%	77%	76%
49%	64%	50%	33%	50%	43%	67%	67%	65%	59%	44%	66%	50%	74%	86%	85%

図 5.13: P_2-P_4 のタッチパッド領域ごとの平均識別率. 左) タップタスクの平均. 右) ムーブタスクの平均.

第6章 タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システム2

第5章のシステムの検討結果より、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いて親指の左右の識別が行える可能性があることが判明した。そこで、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法は識別可能な指の種類が多いほど入力語彙が増すため、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いて識別可能な指の種類を明らかにすべく、親指、人差し指、中指、薬指、および小指の5種類の指の識別を行えるか検討することとした。本章では、検討したタッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システムについて、システムの設計および実装を示し、システムの性能調査のために行った実験の結果を述べる。

6.1 設計

5.3.6節にて述べたように、ホームポジション上に手を構えた状態に限らず指の種類が識別が行えることが望ましいため、タッチパッドを操作する際の手の構えの制約をなくした。ホームポジション上に手を構えた状態という制約をなくした上で、図6.1のように、例えば親指であれば指の側面がタッチパッドに触れ、人差し指や中指であれば指の腹がタッチパッドに触れることに着目した。タッチパッドに対する指の接触部位が異なることで、タッチパッドに対する指の接触面の形状が異なる(図6.2参照)ため、人間には分からない微細な違いであっても、機械学習ならば分類できる可能性があると考えた。そこで、タッチパッド操作に用いている指について、親指、人差し指、中指、薬指、および小指の5本の指の識別可能性を検討するシステムの設計を行った。なお、第5章のシステムは、タッチパッドに指が触れてから離れるまでの間、継続的に指の識別を行っていたが、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の仕様上タッチの開始時点で指の識別が行われている必要があるため、本システムではタッチパッドに指が触れた瞬間に1度指の識別を行うこととした。

本システムの指の識別は、第5章のシステムと同様に学習フェーズおよび識別フェーズの2つのフェーズにて構成される。学習フェーズでは、タッチパッドを左右の手の5本の指それぞれにて操作した際のタッチ点に関するデータを収集し、データセットを作成し、機械学習モデルの生成を行う。また、識別フェーズでは、学習フェーズにて生成した機械学習モデルを利用して、タッチパッド操作に用いられている指の分類を行い、その結果をそのまま指の識別結果とする。

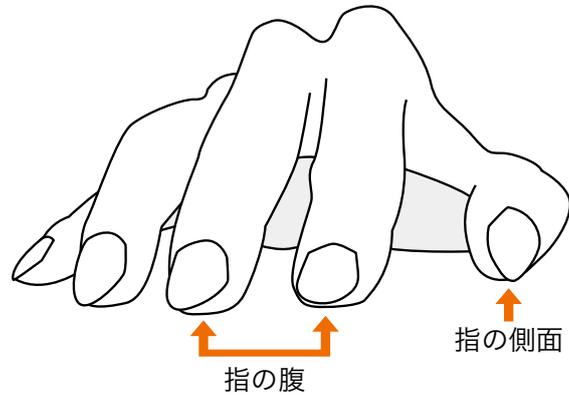


図 6.1: タッチパッドに対する指の接触部位.

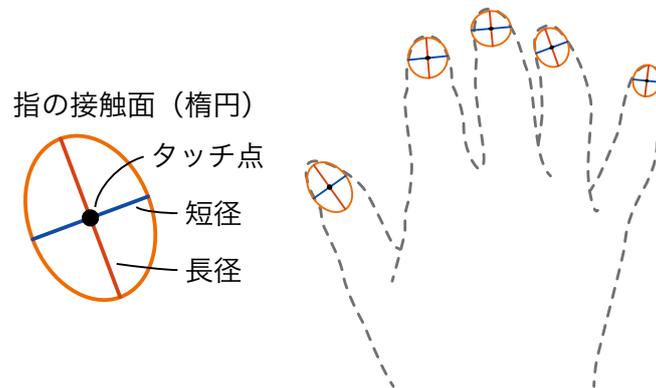


図 6.2: タッチパッドに対する指の接触面.

6.2 実装

本節では，学習フェーズおよび識別フェーズの実装について述べる．

6.2.1 学習フェーズ

学習フェーズでは，左右の手の5本の指にてタッチパッドを水平方向および垂直方向の2方向になぞる際のタッチ点に関するデータを収集する．収集するデータは，タッチパッドに対する親指の接触面を楕円とした時，その楕円の中心の x 座標， y 座標，楕円の長径，短径，長径の傾き，楕円率（長径と短径の比を算出した値），面積（静電容量に比例する値），および面積密度（面積当たりの静電容量）の8つとした．左右の手の5本指のデータを規定数収集後，勾配ブースティング木を用いて機械学習モデルを生成する．この際，説明変数として上記に挙げた8つの値を学習データとして入力し，目的変数として，識別する指の種類に基づいた各指に対応するラベルを入力することとした．

6.2.2 識別フェーズ

識別フェーズでは，タッチパッドへの指の接触開始時にタッチ点に関するデータを取得し，1度指の識別を行う．なお，取得するデータは，学習フェーズと同じ8つの値である．指の識別結果は，学習フェーズにて生成した機械学習モデルに特徴量（上記の8つの値）を入力し，出力された指の種類の分類結果のラベルに基づき決定する．なお，2本以上の指にてタッチパッドに触れた際は，指ごとに同じプロセスを適用する．

6.2.3 プロトタイプ

上記の設計に基づき，プロトタイプのソフトウェアを macOS において動作するアプリケーションとして実装した．実装にあたり，5.2.3 節のプロトタイプと同様に，機械学習のために CoreML.framework および CreateML.framework を，タッチパッドからタッチ点のデータを取得するために，MultitouchSupport.framework を使用した．機械学習モデルに関しても 5.2.3 節のプロトタイプと同様の理由にて，勾配ブースティング木を用いることとした．

6.3 実験

本システムによる指の識別性能を調査するため，6.2.3 節にて示したプロトタイプを用いて実験を行った．

6.3.1 実験参加者

大学生および大学院生を含む男性 12 名 (P_1 – P_{12}) を実験参加者として雇用した。実験参加者は 22–25 歳 (平均年齢 23.2 歳) であり, 内 1 名 (P_6) が左利きであった。また, すべての実験参加者が日常的にラップトップを使用しており, タッチパッドの扱いに習熟していた。

6.3.2 実験機器

実験にて使用するラップトップとして MacBook Pro (Apple Inc., 画面サイズ: 13 インチ, タッチパッドのサイズ: 135.5 mm × 84.0 mm, 解像度: 26 × 18 ピクセル) を用いた。なお, タッチパッド領域全体を満遍なく用いて実験を行うことを目的として, タッチパッド領域を縦横 $5 \times 5 = 25$ の領域に分割し, タッチパッドの表面には 25 の領域が分かるよう線が描かれた保護フィルムを貼った。また, 後述のテストデータサンプリングタスクにおけるベッド条件のために, 折りたたみ式のキャンプベッド (AZUMAYA、LFS-709GY、190 cm × 67 cm × 35 cm) を用いた。

6.3.3 タスク

実験のタスクは, 学習データサンプリングタスクおよびテストデータサンプリングタスクにて構成される。

学習データサンプリングタスク

学習データサンプリングタスクでは, タッチパッドを水平方向および垂直方向に満遍なくなぞった際のタッチ点に関するデータを収集する。実験参加者には, タッチパッドの 25 領域のそれぞれにつき 30 フレーム分のデータの収集が完了するまでタッチパッド領域をなぞらせた。なお, タッチパッドの各領域は, 1 度指が通過すると青く表示され, 30 フレーム分のデータの収集を完了すると赤く表示する仕様にしてあり, 実験参加者は画面の表示を参考にタッチパッドの画面をなぞった。実験参加者 1 人あたりの総収集データ数は $5 \text{ 指} \times 2 \text{ 手} \times 2 \text{ 方向} \times 25 \text{ 領域} \times 30 \text{ フレーム} = 15,000$ である。学習データサンプリングタスク中の様子を図 6.3 に示す。このタスクでは, 水平方向ならば「左から右へ」と「右から左へ」の両方向になぞるよう実験参加者に指示した (垂直方向でも同様)。また, 表 6.1 に示すように, 指の種類については親指から小指の順に, 手の左右については右手左手の順に, なぞる方向については水平垂直の順になるよう学習データを収集した。

テストデータサンプリングタスク

テストデータサンプリングタスクでは, 図 6.4 に示すように画面上に提示された指にて提示された領域をタップするタスクを実験参加者に行わせた。ここで, タッチパッドへの指の

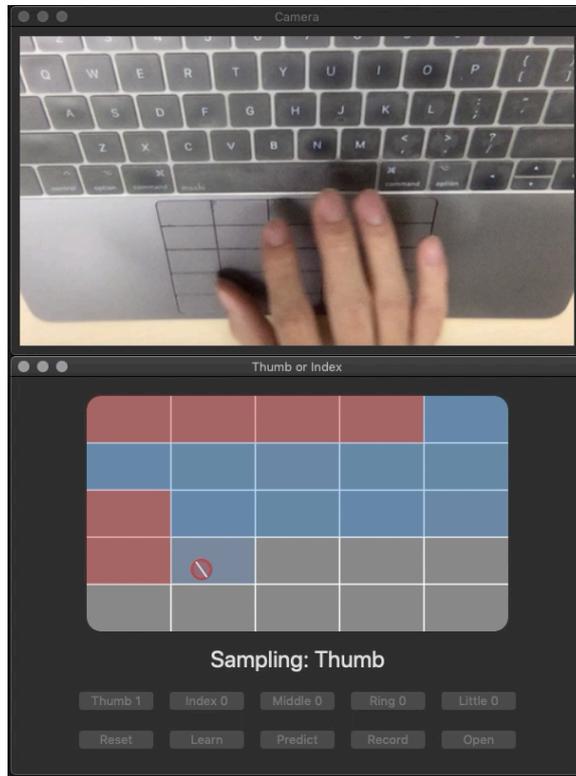


図 6.3: 学習データサンプリングタスクにて右手の親指を水平方向になぞっている様子.

表 6.1: 学習データの収集順序.

順番	指の種類	手の左右	なぞる方向
1	親指	右手	水平
2	親指	右手	垂直
3	親指	左手	水平
4	親指	左手	垂直
5	人差し指	右手	水平
6	人差し指	右手	垂直
⋮	⋮	⋮	⋮
20	小指	左手	垂直

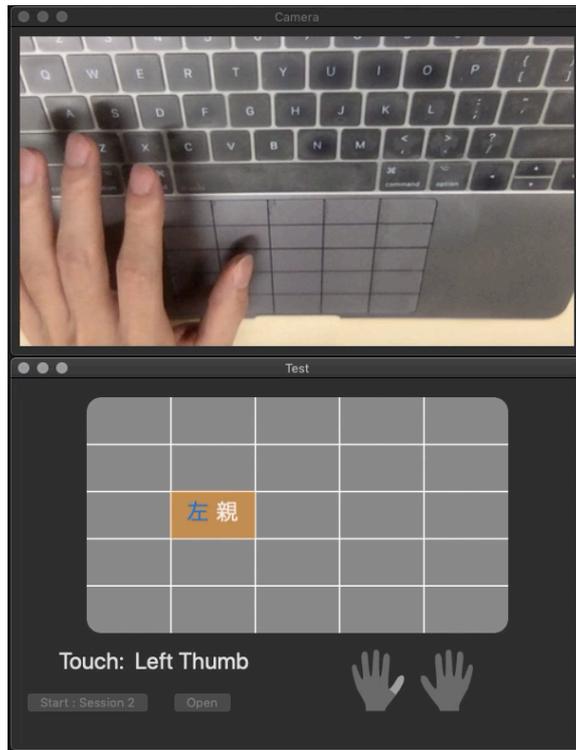


図 6.4: テストデータサンプリングタスクにて左手の親指にて提示された領域をタッチしている様子.

接触開始時のタッチ点に関するデータ（テストデータ）を収集した。なお、提示される指の種類はランダムであり、タッチする領域の提示順序は指ごとにランダムとした。また、実験参加者が提示された領域内にてタップできるまで、次の提示はなされないようにした。

本システムの堅牢性を調査するため、図 6.5 に示す机条件、膝条件、ベッド条件の 3 条件にてテストデータを収集した（机条件：実験参加者は机の上にラップトップコンピュータを置き椅子に座った状態、膝条件：ラップトップコンピュータを膝の上に置いて椅子に座った状態、ベッド条件：ベッドにうつ伏せになり、目前にラップトップコンピュータを置いた状態）。1つの条件につき左右の手の 5 本の指にて提示されたすべての領域をタップすることを 1 セッションとして、実験参加者には、この 3 条件のそれぞれにつき 2 セッションのタスクを実行してもらった。すなわち、実験参加者 1 人あたりの総収集データ数は 5 指 × 2 手 × 25 領域 × 3 条件 × 2 セッション = 1,500 である。

6.3.4 実験手順

まず、実験の実施要領（付録 B.3）に従い、実験参加者へ実験に関する説明書（付録 B.4）を用いて実験の説明を行った後、実験参加への同意を得て、承諾書（付録 B.1）および実験同

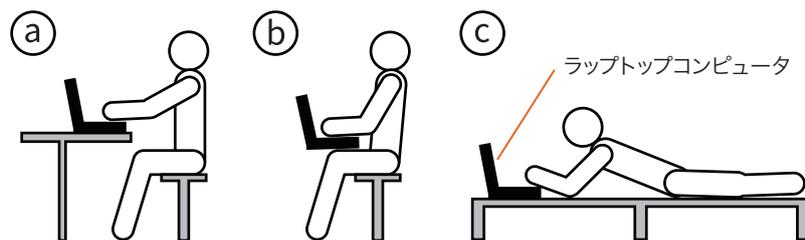


図 6.5: テストデータサンプリングタスクにおける3つの条件. a) 机条件. b) 膝条件. c) ベッド条件.

表 6.2: 条件の順序.

実験参加者	セッション 1, 4	セッション 2, 5	セッション 3, 6
P1, P2	机	膝	ベッド
P3, P4	机	ベッド	膝
P5, P6	膝	机	ベッド
P7, P8	膝	ベッド	机
P9, P10	ベッド	机	膝
P11, P12	ベッド	膝	机

意書（付録 B.2）に署名をもらった。次に、実験参加者には図 6.5 の机条件にて学習データサンプリングタスクを行ってもらった。その後、テストデータサンプリングタスクを6セッション実行してもらった。この際、実験参加者には表 6.2 に示す条件の順序にてタスクを実行させた。なお、実験参加者はテストデータサンプリングタスクのセッション間に2分以上の休憩をとった。実験に要した時間は、実験参加者ごとに約70分であった。実験終了後、実験参加者は謝金として1,660円を受け取った。

6.3.5 実験結果

学習データサンプリングタスクにて収集した学習データを用いて機械学習モデルを生成し、テストデータサンプリングタスクにて収集したデータをテストデータとして使用し、条件ごとに手の左右を区別しない5本指の識別率および手の左右を区別した10本指の識別率を調査した。

まず、各実験参加者の学習データおよびテストデータを用いて、実験参加者ごとの指の識別率を算出した。5本指の識別率を図 6.6 に、10本指の識別率を図 6.7 に示す。全条件の平均識別率は、5本指の識別の場合42.8% (SD = 7.34%)、10本指の識別の場合30.2% (SD = 6.91%)であった。5本指の識別の場合および10本指の識別の場合の双方において、3つの条件のうち机条件が最も高い識別率であった（5本指の識別：45.4%, SD = 8.92%, 10本指の

識別：32.3%, SD = 7.92%)。一方で，一元配置分散分析の結果，3条件の間には有意差はなかった（5本指の識別： $F_{2,33} = 0.7578$, $p = 0.4767 > 0.05$, 10本指の識別： $F_{2,33} = 0.5158$, $p = 0.6018 > 0.05$ ）。また，一元配置分散分析の結果，5本指の識別率と10本指の識別率の間に有意差が見られ（ $F_{1,22} = 17.178$, $p = 0.004238 < 0.01$ ），5本指の識別率の方が10本指の識別率よりも有意に高いことが分かった。

次に，実験参加者全員の学習データを用いて機械学習モデルを生成し，各実験参加者のテストデータを用いて，実験参加者ごとの指の識別率を算出した。5本指の識別率を図6.8に，10本指の識別率を図6.9に示す。全条件の平均識別率は，5本指の識別の場合41.9%（SD = 5.64%），10本指の識別の場合30.1%（SD = 4.36%）であった。各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた際と同様に，5本指の識別の場合および10本指の識別の場合の双方において，3つの条件のうち机条件が最も高い識別率であった（5本指の識別：44.3%, SD = 7.83%, 10本指の識別：32.3%, SD = 6.76%）が，一元配置分散分析の結果，3条件の間には有意差はなかった（5本指の識別： $F_{2,33} = 1.0194$, $p = 0.3719 > 0.05$, 親指と親指以外の指の識別： $F_{2,33} = 0.9986$, $p = 0.3792 > 0.05$ ）。また，一元配置分散分析の結果，5本指の識別率と10本指の識別率の間に有意差が見られ（ $F_{1,22} = 29.744$, $p = 1.77 \times 10^{-5} < 0.01$ ），5本指の識別率の方が10本指の識別率よりも有意に高いことが分かった。

各実験参加者の学習データを用いた場合と実験参加者全員の学習データを用いた場合に有意差があるか，一元配置分散分析を行ったところ，5本指の識別の場合および10本指の識別の双方において有意差はなかった（5本指の識別： $F_{1,22} = 0.104$, $p = 0.7502 > 0.05$, 10本指の識別： $F_{1,22} = 4.0 \times 10^{-4}$, $p = 0.984 > 0.05$ ）。



図 6.6: 各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の 5 本指の識別率.



図 6.7: 各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の 10 本指の識別率.



図 6.8: 実験参加者全員の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の 5 本指の識別率.



図 6.9: 実験参加者全員の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の 10 本指の識別率.

6.3.6 考察

実験の結果，各実験参加者の学習データを用いた場合と実験参加者全員の学習データを用いた場合の双方において，手の左右を区別しない5本指の平均識別率は50%を下回り，手の左右を区別した10本指の平均識別率は30%程度であった．このことから，現状のシステムでは手の左右を区別するかどうかに関わらず親指から小指までの5種類の指の識別を行うことが困難であると分かる．そこで，指の種類間における誤識別の傾向を分析するため，各実験参加者の学習データおよびテストデータを用いて，各実験参加者の指ごとの識別率の混同行列を出力した．5本指の識別における指ごとの識別率の混同行列を図6.10に，10本指の識別における指ごとの識別率の混同行列を図6.11に示す．図6.10より，人差し指，中指，および薬指は互いに誤識別する傾向があることが分かる．また，親指を小指と誤識別する傾向があることも分かる．ここから，親指から小指までの5種類の指を識別するのではなく，複数種の指を同じカテゴリとしてまとめて識別を行うことを考えた．そこで，指の左右を区別せずに，親指と親指以外の指の識別率，および親指と小指とそれ以外の指の識別率をそれぞれ算出した．親指と親指以外の指の識別率を図6.12に，親指と小指とそれ以外の指の識別率を図6.13に示す．全条件の平均識別率は，親指と親指以外の指の識別の場合86.3% (SD = 3.41%)，親指と小指とそれ以外の指の識別の場合72.0% (SD = 6.28%)となり，いずれの場合も5種類の指の識別率よりも高い識別率となった．これより，現状のシステムであっても，複数種類の指を同じカテゴリとしてまとめて扱うよう工夫することにより，指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法を実行できる可能性がある．

また，指の識別率の向上について，現在のシステムの識別フェーズでは，タッチした瞬間の1フレーム分のみのデータを用いて指の識別を行っているが，指がタッチパッドに接触してから数フレーム分のデータを用いて指の識別をするようアルゴリズムを変更することにより，指の識別率を向上できる可能性がある．

		指の識別結果				
		親指	人指し指	中指	薬指	小指
実際に用いられた指	親指	53.8%	6.7%	4.6%	10.7%	24.2%
	人指し指	3.5%	36.8%	26.8%	19.1%	13.8%
	中指	2.5%	29.1%	35.1%	20.0%	13.4%
	薬指	2.4%	22.1%	25.9%	32.9%	16.8%
	小指	13.3%	11.2%	7.8%	12.2%	55.4%

図 6.10: 5 本指の識別における指ごとの識別率の混同行列.

		指の識別結果									
		左小指	左薬指	左中指	左人差し指	左親指	右親指	右人指し指	右中指	右薬指	右小指
実際に用いられた指	左小指	46.9%	5.4%	5.4%	9.5%	8.9%	1.4%	4.4%	3.4%	4.4%	10.2%
	左薬指	13.1%	18.3%	12.9%	14.5%	1.9%	0.7%	10.7%	13.6%	10.2%	4.1%
	左中指	11.2%	11.4%	20.3%	16.3%	2.1%	0.1%	14.9%	13.4%	7.1%	3.1%
	左人差し指	12.9%	8.8%	15.0%	26.2%	2.8%	0.8%	12.6%	12.1%	6.3%	2.4%
	左親指	17.1%	8.4%	3.8%	8.5%	47.6%	1.4%	2.3%	1.2%	3.6%	6.0%
	右親指	2.1%	1.9%	2.3%	1.2%	9.7%	43.5%	5.0%	2.3%	9.1%	23.0%
	右人指し指	4.7%	8.9%	9.6%	13.9%	1.3%	2.0%	24.3%	18.9%	10.4%	6.0%
	右中指	4.8%	10.8%	12.8%	12.5%	1.1%	0.9%	19.3%	20.4%	10.2%	7.1%
	右薬指	5.6%	14.6%	9.5%	9.3%	1.4%	1.7%	16.3%	19.0%	15.4%	7.1%
	右小指	11.3%	4.8%	2.9%	4.1%	2.9%	12.6%	6.9%	5.9%	9.6%	39.1%

図 6.11: 10 本指の識別における指ごとの識別率の混同行列.

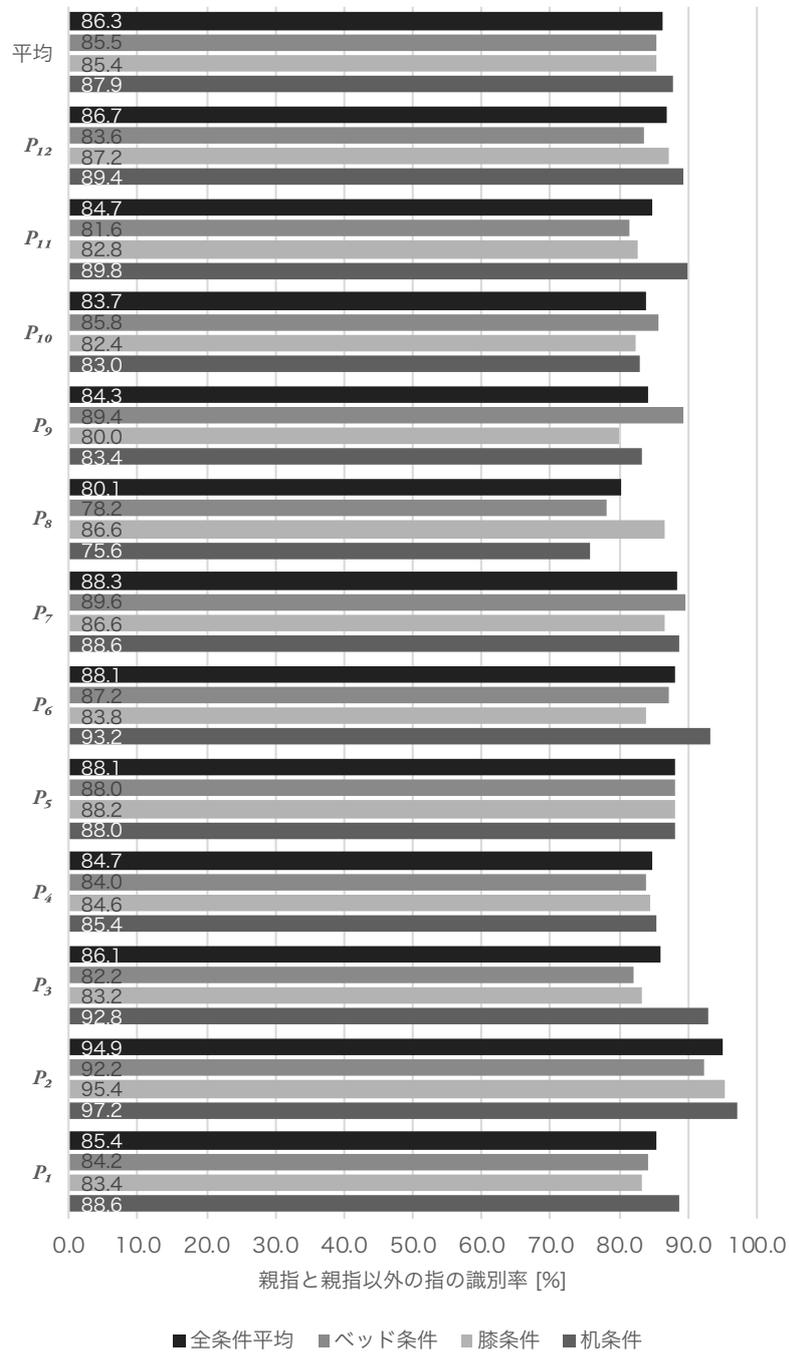


図 6.12: 各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の親指と親指以外の指の識別率.



図 6.13: 各実験参加者の学習データにて生成した機械学習モデルを用いた場合の親指と小指とそれ以外の指の識別率。

第7章 議論

本章では，検討したタッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムより明らかになった指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の今後の課題について議論する．

7.1 指の識別

本論文では，インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システム，およびタッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システムを検討した．前者は，4.3節にて述べたように，カメラを用いた画像処理を行うことに起因する課題および常時インカメラを独占使用する欠点を持つ．後者に関しては，現状の指の識別アルゴリズムでは3種類以上の指の識別率が80%未満であり，第3章に示したように親指から小指までの5種類の指を左右の手を区別して10種類の指として扱うことは難しい状態である．したがって，指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の利点を最大限に引き出すためには，システムを改良し指の識別率を向上する必要がある．カメラを用いず，かつラップトップに搭載されているセンサのみを用いてタッチパッドに用いられる指の識別を行うシステムの改良案の1つとして，ラップトップに搭載されたマイクを用いてタッチパッドに触れる際の筐体の振動を分析することにより，指の識別結果を補強することを考えた．また，今回検討したシステムの実験では，机の上にラップトップを設置した状態のみにて機械学習の学習データを収集したが，様々な姿勢にて学習データを収集することにより，識別率を向上し堅牢性を高めることができる可能性がある．一方で，指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法にて必ずしも親指から小指までの全ての指を個別に識別する必要性がないことも考えられる．例えば，薬指と小指は他の指と比較してタッチジェスチャにて使用されることが稀であるため，識別対象から除外しても良いことにすれば，全ての指を個別に識別する必要性はない．また，6.3.6節で述べたように，複数種の指を同じカテゴリにまとめて識別する場合も，個別に識別しなければならぬ指の種類が減少する．すなわち，識別可能な指の種類を減少させる代わりに高い識別率を得るという方向性でのシステムの改良も考えられる．

7.2 学習コスト

指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法は，タッチパッドに用いられる指の種類を区別して扱うことにより，同様のタッチパッド操作でも異なるコマンドを実行することを可能とする利点を持つが，これにより入力語彙が増える一方で手法を利用するにあたる学習コス

トが増えることが懸念される。つまり、実行するコマンドに対応する指の組み合わせとその指の動作の仕方を記憶する必要があるため、手法の導入にあたる学習コストについての検証が必要である。

7.3 追加で実施すべき調査

本論文では、タッチパッドに用いられる指の識別システムを検討し、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の実現性を検証したが、手法の使用感調査は未実施である。指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法が実際に動作するアプリケーションを実装し、定量評価および定性評価のための実験を行う必要がある。また、使用感調査に並行して既存のタッチパッドの使用状況についても調査を行うべきである。指ごとの使用頻度や使用頻度の高いタッチパッド領域を調査することにより、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法の改善およびタッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムの改良の手がかりを得ることができると考えられる。

第8章 まとめ

本論文において、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法を示した。この手法により、タッチパッド操作に用いられている指の本数と動作が同様であっても異なるコマンドを実行することが可能となる。ユーザは、タッチパッド操作に用いる指の組み合わせを切り替えることにより、入力の開始に伴い作業中のアプリケーションのツールやモードを指定することができる。また、本論文では、指の識別に基づくタッチパッド操作拡張手法を実現すべく、タッチパッド操作に用いられている指を識別するシステムを2種類検討した。まず、多くのラップトップにインカメラが搭載されていることに着目し、ラップトップのインカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システムを検討した。このシステムは、タッチパッド操作に用いられている指の識別が可能であるが、環境光やラップトップ設置場所の色の影響を強く受けるため環境の事前準備が必要であること、指同士の重なりにより手の領域抽出に失敗し誤識別が発生することなど、カメラを用いた手法であるが故の課題を持つことが分かった。そこで、カメラを用いず、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いて指の識別を行うシステムを検討した。手始めに、ホームポジション上に手が置かれた状態において、タッチパッドを操作する親指の左右を識別するシステムを設計・実装し、指の識別の可能性を検証した。システムの性能評価のために行った実験の結果、親指の左右の平均識別率は80.8%であった。続いて、タッチパッドから取得可能なデータのみを用いて識別可能な指の種類を明らかにするため、親指から小指までの5種類の指の識別を行うシステムを設計・実装し、性能評価のための実験を行った。実験の結果、手の左右を考慮しない5本指の平均識別率は42.8%、手の左右を考慮した10本指の平均識別率は30.2%であり、現状のシステムでは手の左右の考慮に関わらず親指から小指までの5種類の指の識別を行うことが困難であると分かった。これに対し、複数種の指を同じカテゴリとしてまとめて識別することにより、識別率を向上できる（手の左右を考慮しない場合、親指と親指以外の指の平均識別率86.3%、親指と小指とそれ以外の指の平均識別率72.0%）ことを示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に，志築文太郎先生には，日頃から研究の進め方，論文執筆の方法，研究発表の仕方等，数え切れないほど多くのご指導をいただきました。本論文を執筆することができたのは，志築文太郎先生の丁寧かつ熱心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皆様には，研究生活と日常生活の両面において大変お世話になりました。特に WAVE チームの皆様には，チームゼミをはじめ研究生活での様々な場面にて，多くのアドバイスやアイデアを頂きました。深く感謝いたします。

最後に，学生生活において私を支えてくださった家族と友人，大学院生活においてお世話になった全ての方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [AT10] Oscar Kin-Chung Au and Chiew-Lan Tai. Multitouch Finger Registration and Its Applications. In *Proceedings of the 22nd Conference of the Computer-Human Interaction Special Interest Group of Australia on Computer-Human Interaction, OzCHI '10*, pp. 41–48, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [Ath18] Anish Athalye. Turning a MacBook into a Touchscreen with \$1 of Hardware, 2018. <https://www.anishathalye.com/2018/04/03/macbook-touchscreen/> (2020年1月15日閲覧).
- [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*, pp. 4:1–4:8, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [BG10] Florian Block and Hans Gellersen. Two-handed Input in a Standard Configuration of Notebook with External Mouse. In *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries, NordiCHI '10*, pp. 62–71, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [BGV10] Florian Block, Hans Gellersen, and Nicolas Villar. Touch-display Keyboards: Transforming Keyboards into Interactive Surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10*, pp. 1145–1154, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [BSMT09] Hrvoje Benko, T. Scott Saponas, Dan Morris, and Desney Tan. Enhancing Input on and above the Interactive Surface with Muscle Sensing. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '09*, pp. 93–100, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [BWB06] Hrvoje Benko, Andrew D. Wilson, and Patrick Baudisch. Precise Selection Techniques for Multi-Touch Screens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '06*, pp. 1263–1272, New York, NY, USA, 2006. ACM.

- [CH14] Ashley Colley and Jonna Häkkinä. Exploring Finger Specific Touch Screen Interaction for Mobile Phone User Interfaces. In *Proceedings of the 26th Australian Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures: The Future of Design*, OzCHI '14, pp. 539–548, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [CHK⁺11] Sangwon Choi, Jaehyun Han, Sunjun Kim, Seongkook Heo, and Geehyuk Lee. ThickPad: A Hover-tracking Touchpad for a Laptop. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology*, UIST '11 Adjunct, pp. 15–16, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [CZL⁺19] Wenzhe Cui, Jingjie Zheng, Blaine Lewis, Daniel Vogel, and Xiaojun Bi. Hot-Stroke: Word-Gesture Shortcuts on a Trackpad. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 165:1–165:13, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [EKF12] Philipp Ewerling, Alexander Kulik, and Bernd Froehlich. Finger and Hand Detection for Multi-Touch Interfaces Based on Maximally Stable Extremal Regions. In *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '12, pp. 173–182, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [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, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [FWSB07] Clifton Forlines, Daniel Wigdor, Chia Shen, and Ravin Balakrishnan. Direct-Touch vs. Mouse Input for Tabletop Displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, pp. 647–656, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [GAB16] Aakar Gupta, Muhammed Anwar, and Ravin Balakrishnan. Porous Interfaces for Small Screen Multitasking Using Finger Identification. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 145–156, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [GB16] Aakar Gupta and Ravin Balakrishnan. DualKey: Miniature Screen Text Entry via Finger Identification. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 59–70, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [GHH⁺13] Jiseong Gu, Seongkook Heo, Jaehyun Han, Sunjun Kim, and Geehyuk Lee. Long-Pad: A Touchpad Using the Entire Area Below the Keyboard of a Laptop Computer. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 1421–1430, New York, NY, USA, 2013. ACM.

- [GLIO17] Hyunjae Gil, DoYoung Lee, Seunggyu Im, and Ian Oakley. TriTap: Identifying Finger Touches on Smartwatches. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3879–3890, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [HHL13] Seongkook Heo, Jaehyun Han, and Geehyuk Lee. Designing Rich Touch Interaction Through Proximity and 2.5D Force Sensing Touchpad. In *Proceedings of the 25th Australian Computer-Human Interaction Conference: Augmentation, Application, Innovation, Collaboration*, OzCHI '13, pp. 401–404, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [IFS19] Kaori Ikematsu, Masaaki Fukumoto, and Itiro Siio. Ohmic-Sticker: Force-to-Motion Type Input Device for Capacitive Touch Surface. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. LBW0223:1–LBW0223:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [Inc19a] Apple Inc. Mac で Multi-Touch ジェスチャを使う, 2019. <https://support.apple.com/ja-jp/HT204895> (2020年1月15日閲覧).
- [Inc19b] Apple Inc. 感圧タッチトラックパッドの使い方, 2019. <https://support.apple.com/ja-jp/HT204352> (2020年1月15日閲覧).
- [IS18] Kaori Ikematsu and Itiro Siio. Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch Through Resistive Objects. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 521:1–521:8, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [JYL17] Jingun Jung, Eunhye Youn, and Geehyuk Lee. PinPad: Touchpad Interaction with Fast and High-Resolution Tactile Output. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 2416–2425, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [KST13] Toshifumi Kurosawa, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Keyboard Clawing: Input Method by Clawing Key Tops. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction: Interaction Modalities and Techniques - Volume Part IV*, HCI'13, pp. 272–280, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer-Verlag.
- [KVM⁺05] Kazuto Kamiyama, Kevin Vlack, Terukazu Mizota, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, No. 1, pp. 68–75, January 2005.

- [LMH19] Huy Viet Le, Sven Mayer, and Niels Henze. Investigating the Feasibility of Finger Identification on Capacitive Touchscreens Using Deep Learning. In *Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '19*, pp. 637–649, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [MGMC17] Damien Masson, Alix Goguey, Sylvain Malacria, and Géry Casiez. WhichFingers: Identifying Fingers on Touch Surfaces and Keyboards Using Vibration Sensors. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17*, pp. 41–48, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [MKG10] Nicolai Marquardt, Johannes Kiemer, and Saul Greenberg. What Caused that Touch? Expressive Interaction with a Surface through Fiduciary-Tagged Gloves. *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS 2010*, pp. 139–142, 2010.
- [MKL⁺11] Nicolai Marquardt, Johannes Kiemer, David Ledo, Sebastian Boring, and Saul Greenberg. Designing User-, Hand-, and Handpart-Aware Tabletop Interactions with the TouchID Toolkit. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, pp. 21–30, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [MKO13] Stan Melax, Leonid Keselman, and Sterling Orsten. Dynamics Based 3D Skeletal Hand Tracking. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, I3D '13*, p. 184, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [ML04] Shahzad Malik and Joe Laszlo. Visual Touchpad: A Two-handed Gestural Input Device. In *Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces, ICMI '04*, pp. 289–296, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [MVER12] Sundar Murugappan, Vinayak, Niklas Elmqvist, and Karthik Ramani. Extended Multitouch: Recovering Touch Posture and Differentiating Users Using a Depth Camera. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12*, pp. 487–496, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [PL19] Keunwoo Park and Geehyuk Lee. FingMag: Finger Identification Method for Smartwatch. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '19*, pp. LBW2216:1–LBW2216:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [Rek03] Jun Rekimoto. ThumbSense: Automatic Input Mode Sensing for Touchpad-based Interactions. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '03*, pp. 852–853, New York, NY, USA, 2003. ACM.

- [SSP⁺14] Jie Song, Gábor Sörös, Fabrizio Pece, Sean Ryan Fanello, Shahram Izadi, Cem Keskin, and Otmar Hilliges. In-air Gestures Around Unmodified Mobile Devices. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 319–329, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [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 the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1847–1850, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [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 the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1695–1704, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [TMR10] Yoshiki Takeoka, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Z-touch: An Infrastructure for 3D Gesture Interaction in the Proximity of Tabletop Surfaces. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '10, pp. 91–94, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [VF14] Katia Vega and Hugo Fuks. Beauty Tech Nails: Interactive Technology at Your Fingertips. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, pp. 61–64, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [WCRI09] Feng Wang, Xiang Cao, Xiangshi Ren, and Pourang Irani. Detecting and Leveraging Finger Orientation for Interaction with Direct-Touch Surfaces. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, pp. 23–32, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [WFHAM11] Benjamin Walther-Franks, Marc Herrlich, Markus Aust, and Rainer Malaka. Left and Right Hand Distinction for Multi-touch Displays. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Smart Graphics*, Vol. 6815 of *SG '11*, pp. 155–158, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer.
- [Wil10] Andrew D. Wilson. Using a Depth Camera as a Touch Sensor. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '10, pp. 69–72, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [XCZ⁺18] Chenxuan Xi, Jianxin Chen, Chenxue Zhao, Qicheng Pei, and Lizheng Liu. Real-Time Hand Tracking Using Kinect. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Signal Processing*, IC DSP 2018, pp. 37–42, New York, NY, USA, 2018. ACM.

- [XSH15] Robert Xiao, Julia Schwarz, and Chris Harrison. Estimating 3D Finger Angle on Commodity Touchscreens. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces, ITS '15*, pp. 47–50, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [ZLAV18] Jingjie Zheng, Blaine Lewis, Jeff Avery, and Daniel Vogel. FingerArc and FingerChord: Supporting Novice to Expert Transitions with Guided Finger-Aware Shortcuts. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18*, pp. 347–363, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [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, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [ZZC⁺14] Zhensong Zhang, Fengjun Zhang, Hui Chen, Jiasheng Liu, Hongan Wang, and Guozhong Dai. Left and Right Hand Distinction for Multi-touch Tabletop Interactions. In *Proceedings of the 19th International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '14*, pp. 47–56, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [阿部 02] 阿部直哉. タッチパッド入力の可能性. Technical Report 76(2002-HI-099), 大阪学院大学情報学部, 2002.
- [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, 第2016-HCI-168巻, pp. 1–6. 情報処理学会, 2016.
- [池松 19] 池松香, 山中祥太. ScraTouch: 静電容量方式タッチサーフェスにおける爪を使用したタッチ入力拡張技法. 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 (WISS 2019), pp. 85–90. 日本ソフトウェア科学会, 2019.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 査読あり国際会議論文
 1. Takuto Nakamura and Buntarou Shizuki. Identification Method of Digits for Expanding Touchpad Input. In Proceedings of the 22nd International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2020), Springer International Publishing, July 2020. (採録決定)
 2. 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 Human-Computer Interaction (OzCHI 2018), ACM, December 2018, pp. 587–589.
- 査読なし国内会議論文
 1. 中村拓人, 志築文太郎. タッチパッド操作拡張のための指の識別手法. 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, 2019年12月, Vol.2019-HCI-185, 6ページ.
 2. 中村拓人, 志築文太郎. ラップトップコンピュータに対しタッチパッド操作を行う親指の左右識別手法. 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, 2019年03月, Vol.2019-HCI-182, 6ページ.
- その他の発表
 1. 中村拓人, 志築文太郎. ラップトップコンピュータにおけるタッチパッド操作を行う指の左右識別システム. 第26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 (WISS 2018), 日本ソフトウェア科学会, 2018年09月, 2ページ.

その他の論文

- 査読あり国際会議論文

1. Keita Saito, Takuto Nakamura, Kazushi Kamezawa, Ryo Ikeda, Yuki Hashimoto, and Buntarou Shizuki. Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushi-ware. In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2020), ACM, February 2020, 9 pages. (採録決定)
2. Takuto Nakamura, Koshi Ikegawa, Shogo Tsuchikiri, Keita Saito, Kazushi Kamezawa, Yuki Hashimoto, and Buntarou Shizuki. Touch Interface Design System in Multilayered Urushi Circuit. In Proceedings of the 2019 ACM CHI symposia on ASIAN CHI SYMPOSIUM: EMERGING HCI RESEARCH COLLECTION (Asian CHI Symposium 2019), ACM, May 2019, 7 pages.
3. Yuta Urushiyama, Takuto Nakamura, and Buntarou Shizuki. A Design of Eyes-Free Kana Entry Method Utilizing Single Stroke for Mobile Devices. In Proceedings of the 2019 ACM CHI symposia on ASIAN CHI SYMPOSIUM: EMERGING HCI RESEARCH COLLECTION (Asian CHI Symposium 2019), ACM, May 2019, 8 pages.
4. Takuto Nakamura, Akira Ishii, and Buntarou Shizuki. Head Posture Recognition based on Neck Shape Measurement. In Proceedings of the 2018 ACM CHI symposia on ASIAN CHI SYMPOSIUM: EMERGING HCI RESEARCH COLLECTION (Asian CHI Symposium 2018), ACM, April 2018, 7 pages.
5. Koshi Ikegawa, Shuhei Aoyama, Shogo Tsuchikiri, Takuto Nakamura, Yuki Hashimoto, and Buntarou Shizuki. Investigation of Touch Interfaces Using Multilayered Urushi Circuit. In Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2018), ACM, March 2018, pp. 115–122.

- 査読なし国内会議論文

1. 三縄香織, 中村拓人, 志築文太郎. ユーザの顔の向きに基づいたスマートウォッチ画面点灯時間の最適化手法. 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, 2020年01月, Vol.2020-HCI-186, 7ページ.
2. 漆山裕太, 中村拓人, 志築文太郎. 指の軌跡に基づくモバイル端末向けアイズフリーかな文字入力の提案. 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, 2019年01月, Vol.2019-HCI-181, 8ページ.
3. 漆山裕太, 中村拓人, 志築文太郎. 指の軌跡に基づく手元の視認が不要なスマートフォン向けかな文字入力手法. 第26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 (WISS 2018), 日本ソフトウェア科学会, 2018年09月, 2ページ.

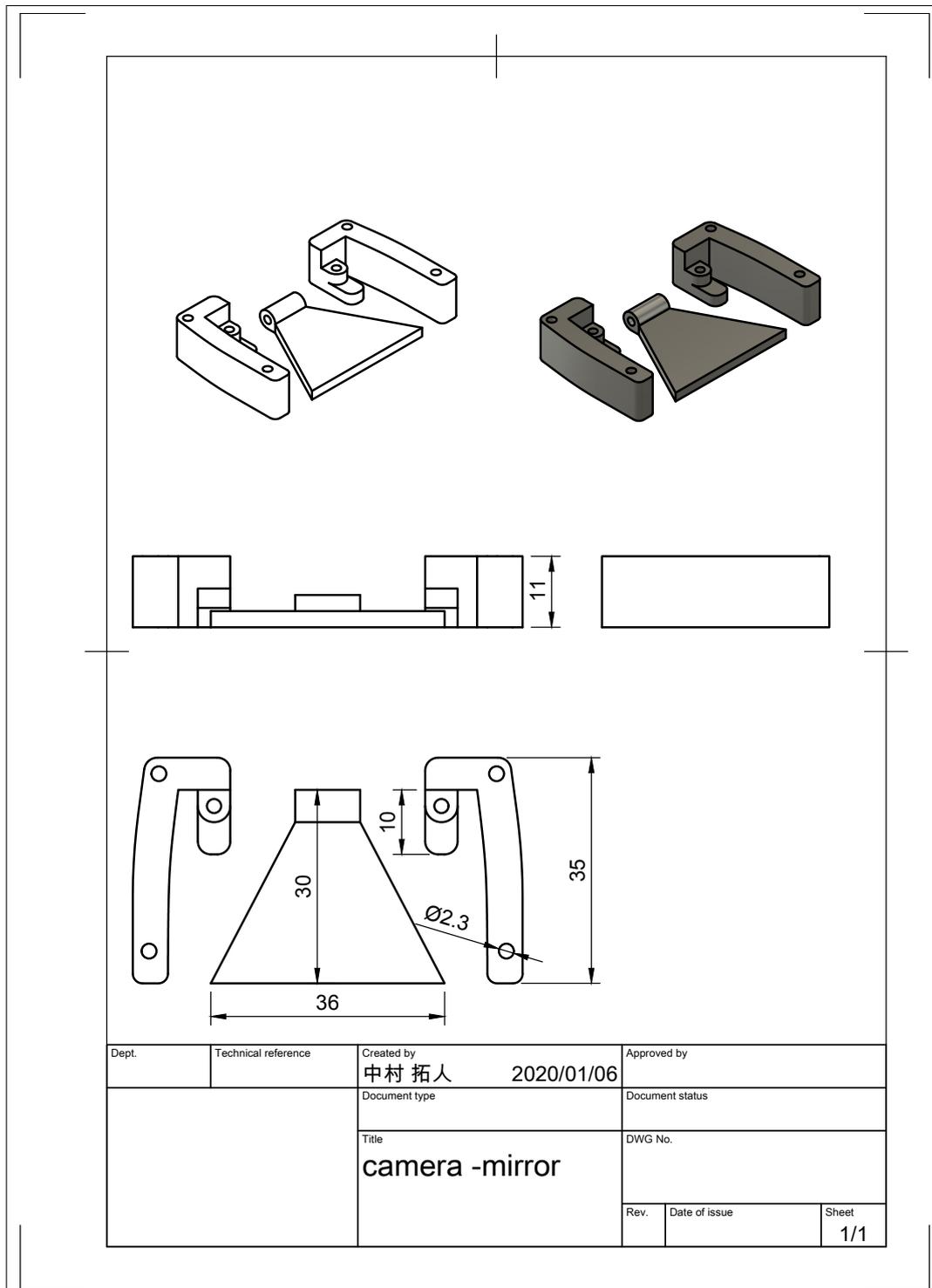
- 査読なし国内会議発表

1. 中村拓人, 石井晃, 志築文太郎, 高橋伸. 頸部装着型デバイスを用いた頭部姿勢認識システム. 第25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 (WISS 2017), 日本ソフトウェア科学会, 2017年12月. (予稿なし)

付録A 鏡固定具の設計図

本付録にて，第4章の，インカメラおよびタッチ点の座標データを用いた指の識別システム，および第5章の，タッチパッドから取得可能なデータのみを用いた指の識別システム1にて用いた鏡固定具の三面図を示す。

A.1 鏡固定具の三面図



付録B 実験の際に用いた各種書類

本研究における実験にて用いた，承諾書，実験同意書，実験の実施要領，実験に関する説明書を以下に示す．

B.1 承諾書

承 諾 書

年 月 日

研究代表者
志築 文太郎 殿

氏 名
name

印
signature

平成31年 4月 26日付けで依頼のありましたことについて、承諾します。

基盤研究 (A)

18H04104

B.2 実験同意書

タッチパッド操作に用いる指の識別手法に関する性能評価実験のお願い

文責：中村 拓人

この度は実験にご協力いただき、ありがとうございます。

- 本実験の目的は、タッチパッド操作に用いる指の識別手法の性能を評価することです。
- 実験中に、写真および動画の撮影、音声の録音を行う場合がありますが、これは実験の様子を記録するために行い、その写真、動画および音声を発表において利用する場合は、本人の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- この実験によって得られたデータは、個人が特定できない様に処理いたします。これらのデータを発表において利用する場合は、研究目的においてのみ利用いたします。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。
- 実験への参加は、協力者の自由意志によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが、いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます。

年 月 日

被験者 所属 _____

署名 _____

説明者 所属 システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻 _____

署名 _____

B.3 実験の実施要領

タッチパッド操作に用いる指の識別手法に関する性能評価実験の実施要領

文責：中村 拓人

1. ストップウォッチを用いて実験時間の計測を開始する
2. 実験参加者へ【実験に関する説明】の<はじめに>に従って実験の説明をする
3. 【承諾書】に記入してもらう
4. 【タッチパッド操作に用いる指の識別手法に関する性能評価実験のお願い】に記入してもらう
5. 【実験に関する説明】の<実験タスクの説明>以降を読んでもらい、実験のタスクを確認してもらう
6. 実験用プログラムを起動し、被験者の名前を入力してラップトップのカメラを起動する
7. 学習データサンプリングタスクを行なってもらう
8. 姿勢を指示し、テストデータサンプリングタスクを行なってもらう
9. 2分間休憩をしてもらう
10. 姿勢を指示し、テストデータサンプリングタスクを行なってもらう
11. 2分間休憩をしてもらう
12. 姿勢を指示し、テストデータサンプリングタスクを行なってもらう
13. 2分間休憩をしてもらう
14. 姿勢を指示し、テストデータサンプリングタスクを行なってもらう
15. 2分間休憩をしてもらう
16. 姿勢を指示し、テストデータサンプリングタスクを行なってもらう
17. 2分間休憩をしてもらう
18. 姿勢を指示し、テストデータサンプリングタスクを行なってもらう
19. 【振込先登録依頼書】に記入してもらう
20. ストップウォッチを停止し、時間を記録する。

B.4 実験に関する説明書

実験に関する説明

文責 中村 拓人

<はじめに>

本日は、実験にご協力いただき誠にありがとうございます。本実験はタッチパッド操作に用いる指の識別手法の性能評価を目的とした実験です。実験では、実験監督者の指示およびコンピュータの画面の提示にしたがって、タッチパッドをなぞったりタッチしたりするタスクを行ってまいります。なお、タスクは図1に示す3つの姿勢にて行ってまいります。実験の所要時間は約1時間です。



図1. テストデータサンプリングタスク中の姿勢

<実験タスクの説明>

実験タスクは大きく以下の2つに分かれます。

- 学習データサンプリングタスク
- テストデータサンプリングタスク

<学習データサンプリングタスク>

- 学習データサンプリングタスクでは、実験監督者の指示した指と方向にてタッチパッドをなぞってください。
- 画面に提示されたタッチパッドの領域がすべて赤くなるまで満遍なくタッチパッドをなぞってください。
- 左右方向と指示があった場合は、「左から右へ」と「右から左へ」の双方向になぞるよう意識してください。上下方向と指示があった場合も同様です。



図2. 学習データサンプリングタスク中の画面

<テストデータサンプリングタスク>

- テストデータサンプリングタスクでは、画面に提示された指を用いて提示された領域をタッチしてください。
- 画面に提示された指が切り替わる際に音がなります。
- 実際のタッチパッドに描かれた領域と見比べながら、なるべく正確にタッチを行ってください。

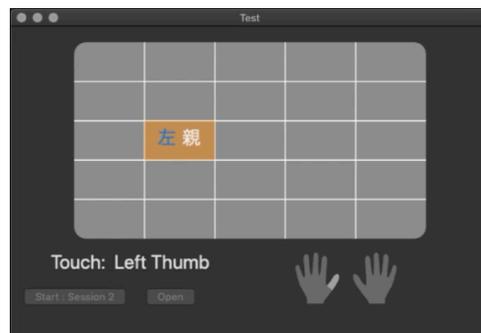


図3. テストデータサンプリングタスク中の画面

□ タスクを行う姿勢

テストデータサンプリングタスクは図1に示す、卓上にラップトップコンピュータを置き椅子に座った姿勢、膝にラップトップコンピュータを置き椅子に座った姿勢、床にラップトップコンピュータを置き床にうつ伏せになった姿勢の3つの姿勢のそれぞれにて2回ずつ行います。

<実験手順>

以下に実験の手順を示します。

1. 椅子に深く腰掛けてください。
2. 卓上のラップトップコンピュータを用いて、学習データサンプリングタスクを行なってください。
3. 実験監督者の指定した姿勢にてテストデータサンプリングタスクを行なってください。
4. タスク終了後2分以上の休憩をとってください。
5. 3, 4を合計6セット行います。

<注意事項>

- 「タッチ」をするという指示の場合、タッチパッドに触れるだけで、押し込まないでください。
- タスクを早くこなす必要はありませんが、正確に、自然な姿勢にて行ってください。
- 間違えた指でタスクを進めたことに気づいた場合は実験監督者に伝えてください。