

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

指輪型デバイスに対する親指ジェスチャによる
スマートウォッチ向け片手操作手法

國分 晴利
修士（工学）
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2023年3月

概要

スマートウォッチは主にタップジェスチャにて操作されるが、表示されるターゲットが小さいため、誤タップが発生する問題がある。また、指にて入力スペースが覆われるため、タップする箇所を確認できない問題がある。さらに、ユーザはスマートウォッチを装着していない手を用いてスマートウォッチを操作する必要があるため、片手が塞がり使用できない際の操作が難しい。これらの問題を解決するため、本研究ではスマートウォッチの操作領域を拡張し、片手操作を可能にすることを目的とする。本研究では、スマートウォッチの操作領域を拡張するために親指ジェスチャをスマートウォッチの操作に用いる。この操作を実現するため、指輪型デバイスを作製し、5種類の親指ジェスチャを設計した。本研究では、赤外線測距センサを取り付けた指輪型デバイスを用いて親指ジェスチャを識別するシステムを試作した。まず、SVMを用いて1つ目のジェスチャセットを識別する機械学習モデルを作成した。このモデルの識別精度の評価を行ったところ、15分割交差検証にて平均90.07%、leave-one-participant-out 交差検証にて平均87.33%であった。続いて、1つ目のジェスチャセット中の回転のジェスチャが難しい問題を解決するため、2つ目のジェスチャセットを設計した。SVMを用いて2つ目のジェスチャセットを識別するモデルを作成し、識別精度の評価を行ったところ、10分割交差検証にて平均84.65%、leave-one-participant-out 交差検証にて平均69.86%であった。識別精度の向上のため、3つ目のジェスチャセットを設計した。SVMを用いて3つ目のジェスチャセットを識別するモデルを作成し、識別精度の評価を行ったところ、10分割交差検証にて平均92.83%、leave-one-participant-out 交差検証にて平均87.20%であった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	スマートウォッチの問題	1
1.2	先行研究のアプローチ	1
1.3	目的およびアプローチ	2
1.4	貢献	2
1.5	本論文の構成	2
第2章	関連研究	4
2.1	ファットフィンガー問題およびオクルージョン問題に対するアプローチを行った研究	4
2.2	指輪を用いたジェスチャ操作	5
2.2.1	指輪を用いたジェスチャによる片手操作	5
2.2.2	指輪を操作に用いるインタラクションの調査	7
2.3	赤外線測距センサを用いたジェスチャ操作	7
第3章	指輪型デバイスに対する親指ジェスチャによるスマートウォッチ向け片手操作手法	8
3.1	親指ジェスチャ	8
3.2	実装	9
3.2.1	フォトリフレクタ	9
3.2.2	親指ジェスチャの識別	9
3.3	システムの改良の流れ	9
3.4	システムの利用例	10
第4章	試作システム1	11
4.1	指輪型デバイス	11
4.2	親指ジェスチャの設計1	11
4.3	著者実験1	14
4.3.1	結果	14
4.3.2	考察	15
4.4	評価実験1	15
4.4.1	結果	16

4.4.2	考察	17
4.5	新たな特徴量追加後の識別精度の検証	18
4.5.1	結果	18
4.5.2	考察	18
第5章	試作システム2	21
5.1	指輪型デバイスの改良	21
5.2	親指ジェスチャの設計2	21
5.3	実験アプリケーション	24
5.3.1	実験アプリケーションの作成	24
5.3.2	センサデータ収集時のサンプリングレートの変更	24
5.4	著者実験2	25
5.4.1	結果	27
5.4.2	考察	27
5.5	評価実験2	27
5.5.1	結果	28
5.5.2	考察	31
第6章	試作システム3	32
6.1	親指ジェスチャの設計3	32
6.2	著者実験3	32
6.2.1	結果	33
6.2.2	考察	33
6.3	評価実験3	35
6.3.1	結果	36
6.3.2	考察	36
第7章	議論	38
7.1	親指ジェスチャを識別するシステムの改良	38
7.1.1	指輪型デバイスの改良	38
7.1.2	親指ジェスチャの改良	38
7.1.3	機械学習モデルの変更	39
7.2	今後実施すべき調査	39
第8章	おわりに	40
	謝辞	41
	参考文献	42

付 録 A	実験に用いたアンケート	51
A.1	評価実験 2 におけるアンケート	52
A.2	評価実験 3 におけるアンケート	54
付 録 B	各参加者の識別精度を示す混同行列	57

目次

3.1 指輪型デバイスに搭載された測距センサの真上を通過する親指ジェスチャの動作.	8
4.1 作製した指輪型デバイス. 3D プリンタにて作製した指輪および測距センサを配線したユニバーサル基盤から構成される. 赤枠はユニバーサル基盤に配線された測距センサを表す. 右上, 左上, 下の順にセンサ 1, センサ 2, センサ 3.	12
4.2 試作システム 1 にて作製した指輪型デバイスの回路図.	12
4.3 指輪の上面に設計された両端がコの字型の溝に装着されたユニバーサル基盤.	13
4.4 試作システム 1 にて設計した 5 種類の親指ジェスチャ. 手のポーズは開始位置を示す.	13
4.5 試作システム 1 を用いた実験の様子.	15
4.6 評価実験 1 にて収集したジェスチャのデータ数.	16
4.7 Anticlockwise (左) および Swipe Left (右) のセンサデータの例. 縦軸はセンサ値, 横軸はフレーム数を表す.	18
5.1 試作システム 2 にて作製した指輪型デバイス.	22
5.2 試作システム 2 にて作製した指輪型デバイスの回路図.	22
5.3 試作システム 1 にて作製した指輪型デバイス (左) および試作システム 2 にて作製した指輪型デバイス (右) の大きさの比較.	23
5.4 試作システム 2 にて設計した 5 種類のジェスチャ. 手のポーズは開始位置を示す.	23
5.5 ユーザが実験アプリケーションを用いる様子.	25
5.6 著者実験 2 および 3 の流れを示すフローチャート.	26
5.7 試作システム 2 を用いた実験の様子.	28
5.8 評価実験 2 および 3 の流れを示すフローチャート.	29
5.9 評価実験 2 および 3 にて収集したジェスチャのデータ数.	29
6.1 試作システム 3 にて設計した 5 種類の親指ジェスチャ. 手のポーズは開始位置を示す.	33
6.2 試作システム 3 を用いた実験の様子.	34

表 目 次

4.1	試作システム 1 における Anticlockwise, Clockwise, Swipe Left, Swipe Right, および Return の 5 種類からなるジェスチャセットを用いた 15 分割交差検証の混同行列.	14
4.2	試作システム 1 における 5 名の参加者による 15 分割交差検証の混同行列.	16
4.3	試作システム 1 における 5 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.	17
4.4	周波数パワースペクトルを特徴量に加えた試作システム 1 における 5 名の参加者による 15 分割交差検証の混同行列.	19
4.5	周波数パワースペクトルを特徴量に加えた試作システム 1 における 5 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.	19
5.1	試作システム 2 における Swipe Up, Swipe Down, Swipe Left, Swipe Right および Return の 5 種類からなるジェスチャセットを用いた 10 分割交差検証の混同行列.	26
5.2	試作システム 2 における 10 名の参加者による 10 分割交差検証の混同行列.	30
5.3	試作システム 2 における 10 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.	30
6.1	試作システム 3 における斜め方向の上下左右のスワイプジェスチャおよび Return の 5 種類からなるジェスチャセットを用いた 10 分割交差検証の混同行列.	35
6.2	試作システム 3 における 10 名の参加者による 10 分割交差検証の混同行列.	36
6.3	試作システム 3 における 10 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.	37
B.1	評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P1 のデータを検証データとした際の混同行列.	58
B.2	評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P2 のデータを検証データとした際の混同行列.	58
B.3	評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P3 のデータを検証データとした際の混同行列.	59
B.4	評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P4 のデータを検証データとした際の混同行列.	59

B.5	評価実験3における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P5 のデータを検証データとした際の混同行列.	60
B.6	評価実験3における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P6 のデータを検証データとした際の混同行列.	60
B.7	評価実験3における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P7 のデータを検証データとした際の混同行列.	61
B.8	評価実験3における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P8 のデータを検証データとした際の混同行列.	61
B.9	評価実験3における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P9 のデータを検証データとした際の混同行列.	62
B.10	評価実験3における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P10 のデータを検証データとした際の混同行列.	62

第1章 はじめに

スマートウォッチは、タッチスクリーンおよびCPUが搭載された腕時計型のウェアラブルデバイスである。このデバイスでは、主に歩数および心拍数の計測が行えるため、これらを活用して健康管理が行える。これらの他に血圧、睡眠の質、消費カロリーなどが計測できるモデルやタッチによる電子決済が可能なモデルも販売されている。また、スマートウォッチはしばしば、スマートフォンおよびタブレット端末と連携して用いられる。これらの機器と連携する場合、スマートフォンに送られるメールや電話などのSNSの通知をスマートフォンを取り出さずに確認できる。スマートウォッチに搭載されているこれらの機能は、タッチスクリーンを用いて操作される。

1.1 スマートウォッチの問題

このように、様々な用途で用いられるスマートウォッチはタップやスワイプなどのタッチジェスチャにて操作される。タッチジェスチャは、アプリケーションの選択やメッセージの入力などの操作に用いられる。それらの操作時におけるスマートウォッチの問題の1つとして、誤タップが発生するファットフィンガー問題 [SRC05,YMI18,NRMF⁺21] が挙げられる。この問題は、スマートウォッチの画面が小さく [PWS88], それに伴い表示されるターゲットが小さいことによって引き起こされる。また、スマートウォッチの操作の2つ目の問題として、指にて入力スペースが覆われ、タップする箇所を確認できないオクルージョン問題 [YMI18,NRMF⁺21] が挙げられる。ファットフィンガー問題およびオクルージョン問題は、スマートウォッチの画面の大きさおよびユーザのタッチインタラクションに起因する。さらに、スマートウォッチは手首に取り付けるデバイスであるため、スマートウォッチをつけていない手を操作に用いる必要がある。そのため、犬のリードや傘、鞆を持っている場合には片手が塞がるため、操作が難しい。この問題は、スマートウォッチを装着した手にてスマートウォッチの操作を可能にすることによって解決できると考える。

1.2 先行研究のアプローチ

ファットフィンガー問題およびオクルージョン問題を解決し、スマートウォッチの操作を拡張する研究 [SV16,ZBR⁺16,LXH16,WRRD16,HKCB17,YLB⁺20,KO22,AST16,RWJ⁺18] が行われている。そのアプローチの1つとして、ウェアラブルデバイスを用いる手法 [SV16,HKCB17,AST16,RWJ⁺18] が挙げられる。その中でも腕輪型デバイスを用いる研究 [SV16,AST16] が複

数行われている。また、指輪型デバイス [RWJ⁺18] またはその他のウェアラブルデバイスおよびセンサを用いる手法 [HKCB17] が提案されている。その他のアプローチとして、スマートウォッチ内蔵のセンサを用いる手法 [ZBR⁺16, LXH16, WRRD16, KO22] が挙げられる。

また、スマートウォッチの操作に両手が必要な問題を解決するための研究が行われている。この問題のアプローチとしては、主にスマートウォッチ内蔵のセンサを用いる手法 [ZBR⁺16, LXH16, WRRD16, KO22], 追加のウェアラブルデバイスおよびセンサを用いる手法 [HKCB17, AST16, RWJ⁺18] が提案されている。追加のウェアラブルデバイスを用いる手法では、スマートウォッチのタッチスクリーンを遮らずに操作が行える。また、用いるアプリケーションやジェスチャによっては、ハンズフリーにて操作が行える場合も考えられる。

1.3 目的およびアプローチ

本研究は、タッチスクリーンを用いず、スマートウォッチの操作を拡張する片手操作手法を実現することを目的とする。そこで本研究では、指輪型デバイスを用いたスマートウォッチ向けの片手操作手法を提案する。その手法の実現のため、まず、赤外線測距センサ（以降、測距センサ）を搭載した指輪型デバイスを作製した。本手法では、作製した指輪型デバイスに対する親指ジェスチャを用いる。親指ジェスチャを行い、得られたセンサデータに対して機械学習を用いることにより、システムは5種類の親指ジェスチャを識別できる。本手法ではマイクおよびカメラを用いないため、ユーザを特定できるデータの処理および保存は行われない。そのため、本手法にはプライバシーに関わる問題が発生しない利点がある。

1.4 貢献

本研究の貢献は以下の通りである。

- 親指ジェスチャによる片手操作手法を考案した。
- 指輪および親指の距離を測定する赤外線測距センサを搭載した指輪型デバイスの設計および作製を行った。
- 時系列データおよび周波数パワースペクトルを特徴量に用いた機械学習モデルを作成した。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第1章では、本研究の背景、目的およびアプローチ、ならびに貢献を示す。第2章では、本研究に関連する研究を述べ、本研究の位置付けを示す。第3章では、本研究にて提案する手法について述べる。第4章、第5章、および第6章ではそれぞれ試作システム1、2、および3について述べる。第7章では、試作システムの問題点お

よび改善点についての議論ならびに今後の課題を述べる．第 8 章では，本研究のまとめを述べる．

第2章 関連研究

本研究では，スマートウォッチのファットフィンガー問題，オクルージョン問題，および両手操作が必要な問題を解決するために，指輪型デバイスに対する親指ジェスチャを識別するシステムを開発した．本章では，まず，スマートウォッチの問題を解決するために行われた研究を述べる．続いて，指輪を用いたジェスチャ操作に関する研究を述べる．最後に，赤外線測距センサを用いたジェスチャ操作に関する研究を述べる．

2.1 ファットフィンガー問題およびオクルージョン問題に対するアプローチを行った研究

スマートウォッチにおけるファットフィンガー問題およびオクルージョン問題を解決するための研究が行われている．Schneegass ら [SV16] は，前腕部に取り付けた布製のタッチセンサを指にてなぞるジェスチャを識別する手法を提案した．Zhang ら [ZBR⁺16] は，スマートウォッチの慣性センサおよびマイクを用いて，周囲の皮膚上にて複数のタップを識別する手法を提案した．これらの研究は，スマートウォッチの操作領域を拡張している．また，片手操作や入力操作の拡張に対応した以下の手法が提案されている．Wen ら [WRRD16] は，スマートウォッチに搭載された加速度センサおよびジャイロ스코プを用いて，人差し指および親指によるつまむ，叩く，および擦るなどの5種類のジェスチャを識別した．Laput ら [LXH16] は，スマートウォッチ搭載の加速度センサからジェスチャ時の振動を収集して識別する手法を提案した．Hamdan ら [HKCB17] は，モーションキャプチャを用いてユーザがタップした部位を識別する手法を提案した．Yeo ら [YLB⁺20] は，光学式モーションセンサを手首に装着するデバイスのリストバンド部分に組み込むことにより，4方向へのスワイプおよび図形を描くジェスチャを識別する手法を提案した．Kim ら [KO22] は，スマートウォッチに搭載された片側のスピーカから発せられたソナーを反対側のマイクにて受信し，その信号を復調処理することによって得られるソナー指紋を用いることにより，親指，人差し指，および中指によるスマートウォッチへのタップを識別した．本手法ではこれらの手法と異なり，片手のみによる親指のジェスチャを用いる．Aoyama ら [AST16] は，腕輪型デバイスを用いて人差し指の側面における親指の移動量を推定することにより，左右のスライド操作を識別する手法を提案した．本手法は左右の動きのみではなく，5種類のジェスチャを識別できる点にて異なる．

2.2 指輪を用いたジェスチャ操作

指輪を用いたジェスチャによる操作手法を示す。指輪に対するタッチを行い、ジェスチャを識別する手法が提案されている。Lim ら [LCO⁺16] は、圧力センサを用いた八角形の指輪型デバイスに対して複数の指にて触れるマルチタッチジェスチャを識別する手法を提案した。Mujibiya ら [MCT⁺13] は、ユーザの身体にアクティブ信号の送信機および受信機を取り付け、経皮的な低周波超音波の伝搬時の信号の特徴を抽出することにより、前腕部のタッチおよび腕をつかむジェスチャを識別する手法を提案した。Oh ら [OF14] は、静電容量タッチセンサを搭載した指輪を用いて身体の数箇所へのタッチを識別した。また、指輪型デバイスを用いて空中にてポインティングを行う手法 [CLWP13,GJY⁺19,HTKT12] が提案されている。さらに、指輪型デバイスに対して指を接触させることによってジェスチャを識別する手法 [FT97,PKHL20,ZLZ⁺19] が提案されている。WEIGEL ら [WS17] は、変形可能な材料にて作製された指輪を人差し指および親指にてつまむ動作を識別した。

磁石を用いたジェスチャ操作を実現した研究が行われている。Cheung ら [CG19] は、モバイルデバイスと同じ平面上において、指輪型の磁石を用いた回転ジェスチャを識別した。Harrison ら [HH09] は、磁気センサを搭載した腕輪および指に巻いたマジックテープに取り付けられた円盤形のネオジム磁石を用いて、腕輪の周囲の時計回り、反時計回りのスクロールおよびクリック動作を識別した。Ashbrook ら [ABW11] は、永久磁石を搭載した指輪を人差し指に装着し、指輪をひねる動作および指に沿って指先方向にスライドさせる動作を手首に装着した磁力計によって識別する手法を示した。Ketabdar ら [KRY10] は、スマートフォン内蔵の磁気センサ、棒および指輪などの形状の永久磁石を用いることにより 8 種類のジェスチャによるインタラクションを識別した。

これらのジェスチャ操作は、両手を用いる手法が多い。それに対して本手法は、片手操作が可能な点にて異なる。

2.2.1 指輪を用いたジェスチャによる片手操作

指輪を用いたジェスチャによる片手操作手法を示す。その中でも、指輪に対するタッチを行い、ジェスチャを識別する片手操作手法が数多く研究されている。Boldu ら [BDM⁺18b] は、開発した静電容量式のタッチパッドを取り付けた指輪を作製した。腕輪型のコンピュータに接続された指輪は人差し指に取り付けられ、親指を用いる上下左右のスワイプおよびタップの 5 種類のマイクロジェスチャを識別した。また、Boldu ら [BDM⁺18a] は、タッチパッドおよびカメラを搭載した指輪を人差し指に取り付け、人差し指のタップおよび親指スワイプを識別した。Tsai ら [THH⁺16] は、人差し指に装着した指輪に印刷された電極および静電容量センシングを用いて、親指、中指、および掌を用いた 10 種類のマルチタッチジェスチャを識別する手法を提案した。Ghosh ら [GKC⁺16] は、センサに対する横スライド、スワイプ、タップおよび回転のジェスチャを識別可能な静電容量式タッチセンサを取り付けた指輪型デバイスを作製し、それらを用いた親指および人差し指のインタラクションを提案した。Bianchi ら [BJ17] は、ボタンを押下することにより振動を与えられるスマートリングを装着した指にてタッチス

クリーンに触れることによって、異なるユーザ間にてタッチを区別できることや、同じユーザの異なるタッチに異なる意味を関連付けられることを示した。また、Bianchi ら [ABO18] は振動フィードバックが提供可能であり、側面に上下左右の4方向のトグルボタンが搭載されたスマートリングを用いて、8種類の入力を識別する手法を提案した。Hettiarachchi ら [HNY⁺13] は、カメラおよびトリガーボタンを搭載した指輪型デバイスを用いて、シングルクリックまたはダブルクリックを行うことによって環境を撮影した画像を取り込み、指輪型デバイスに接続したデジタルキャンバスに画像を送った後、その画像をパレットとして用いられるシステムを作成した。Yang ら [YGWF12] は、光学式マウスセンサおよびマイクロ RGB カメラを用いて質感を検出することにより、ある面から他の面にスライドを行うジェスチャを識別した。

また、指輪型デバイスを用いて空中にて指を動かすジェスチャを識別する手法 [JCZ⁺13, CCH⁺15, WKTA15, OSOI12, RWJ⁺18] が提案されている。Jing ら [JCZ⁺13] は、慣性センサが取り付けられた指輪を用いて指の向きによる4種類の静的なジェスチャおよび日常生活の動作を識別する手法を提案した。Wilhelm ら [WKTA15] は、指の周囲に電界を形成する4つの電極を備えた指輪を装着し、親指、人差し指、および中指を用いたハンドジェスチャを識別する手法を提案した。Chan ら [CCH⁺15] は、指輪上に設置された魚眼カメラを用いて4種類のピンチジェスチャおよび人差し指以外の指を曲げるジェスチャなどの計7種類のハンドジェスチャを識別する手法を提案した。

指輪型デバイスを用いて指の関節角度を推定する手法が提案されている。Wilhelm ら [WLKA20] は、静電容量センサを搭載した指輪を中指に装着して他の指との距離を測定し、LSTM を用いて測定値および指の角度を対応させることによって、人差し指、中指、および薬指の角度を推定する手法を提案した。Okawa ら [OT15] は、人差し指に振動アクチュエータ搭載の指輪型デバイスを用いて指に振動を入力し、中指に装着したコンタクトマイク搭載の指輪型デバイスに伝達される振動から、人差し指の第3関節の関節角度を10隔にて推定する手法を提案した。

物体を把持する際にも実行可能なジェスチャを識別する手法が提案されている。Wolf [Wol13] は、モーションセンサを搭載した指輪型デバイスを用いて、物体を把持する際にも合理的に機能するタップ、ドラッグ、スワイプ、ピッチ、リリースの5種類のジェスチャを特定した。また、Wolf ら [WSKR13] は、3種類の形状を持つ携帯型タブレット端末を把持し、その背面にてモーションセンサを取り付けた指輪を用いてタップ、リリース、スワイプ、およびピッチの4つのジェスチャを識別する手法を提案した。

音響信号を用いてジェスチャを識別する手法が提案されている。Zhang ら [ZWK⁺17] は、親指にて行う指文字の一筆書きジェスチャを識別する手法を提案した。この手法では、コンタクトマイクおよびジャイロセンサを搭載した指輪を親指に装着し、親指を掌に擦ることによってジェスチャを識別している。また、Zhang ら [ZXW⁺18] は、指輪に取り付けられた送信機から出力された音響信号を手首および親指の指輪に取り付けられた4つの受信機にて収集することによって、12種類の指骨に触れるジェスチャおよび10種類のアメリカの手話のポーズを識別する手法を提案した。

これらは単数あるいは複数のセンサを用いて片手にて操作可能なジェスチャを識別してい

る。本研究では片手にて行えるジェスチャを赤外線測距センサのみを用いて識別できる。

2.2.2 指輪を操作に用いるインタラクションの調査

指輪を操作するインタラクションの調査が行われている。Han ら [HHA⁺17] は、ユーザが指輪を回転させたときに感じられる 6 つの力覚フィードバックを設計し、識別した。Colley ら [CIRH17] は、指輪を用いた 12 種類のインタラクションを評価した。Lim ら [LCO⁺18] は、ユーザが 1 本の指をタッチイベントに用いている間、IMU センサを搭載した指輪を用いて他の指の動きを調査し、20 種類のジェスチャを開発し、それらの評価を行った。

2.3 赤外線測距センサを用いたジェスチャ操作

赤外線測距センサを用いた研究が行われている。Kienzle ら [KH14] は、ジャイロセンサ、赤外線投光器および受光器を搭載した指輪を用いて、任意の部隊表面上にある指先の 2 次元位置を取得する手法を提案した。Hakoda ら [HFST15] は、スマートフォンのケースに 9 つの穴を開け、スマートフォンの背面に赤外線測距センサを配置し、ケースの穴を塞ぐジェスチャを識別した。Li ら [LLP⁺18] は、複数のフォトダイオードを配置したデバイスをメガネフレームおよび腕時計に統合し、空中でのスワイプおよびタップを識別した。Ogata ら [OSOI12] は指輪に取り付けた測距センサにて指の屈曲および回転を識別する手法を提案した。この手法では、ユーザにより指の大きさおよび形が異なるため、ユーザに適した指輪を装着しなければならない。しかし、本手法では指輪の内側の情報を取得しないため、個々人の指に合う指輪を用意する必要がない。

第3章 指輪型デバイスに対する親指ジェスチャによるスマートウォッチ向け片手操作手法

本章において、指輪型デバイスに対する親指ジェスチャによるスマートウォッチ向け片手操作手法の概要を述べる。本研究では、システムごとに指輪型デバイスおよび親指ジェスチャの設計が異なるため、本章にてシステムの実装の概要および改良の流れを述べ、最後にシステムの利用例を述べる。各システムにおける指輪型デバイスおよび親指ジェスチャの設計ならびに実装に関しては次章以降に述べる。

3.1 親指ジェスチャ

本研究では、親指ジェスチャをスマートウォッチの片手操作に用いる。これらのジェスチャの操作には、指輪型デバイスに取り付けた測距センサの検出部分の真上を親指が通過する動作を用いる。そのため本研究では、指輪型デバイスは人差し指に取り付け、親指がある方向に測距センサの検出部分を向けた状態にて親指によるジェスチャを行う（図 3.1）。識別に用いる測距センサは赤外光を用いるため、手の向きを固定せずに親指ジェスチャを行える。

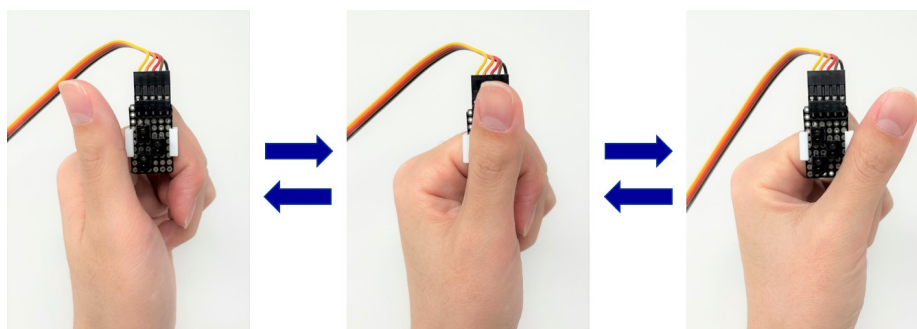


図 3.1: 指輪型デバイスに搭載された測距センサの真上を通過する親指ジェスチャの動作。

3.2 実装

本研究では、親指ジェスチャを識別するために指輪型デバイスを用いる。指輪型デバイスは、指輪および測距センサから構成される。指輪型デバイスはマイクロコントローラ（Arduino Nano）に接続され、測距センサから取得したセンサデータはPCに送信される。

3.2.1 フォトリフレクタ

本手法では、親指ジェスチャを識別するためにフォトリフレクタを用いる。フォトリフレクタは、対象物との距離を計測可能な測距センサである。このセンサは、対象物に光を当て、反射した光を検出することにより、対象物の有無、位置を判定することができる。本研究では、親指の位置を判定するために赤外線LEDおよびフォトランジスタが内部に配置されたフォトリフレクタを用いた。赤外光を用いるフォトリフレクタは、フォトランジスタが捉える反射した赤外光の量によって対象物との距離を計測できる。

3.2.2 親指ジェスチャの識別

本手法では、測距センサを用いて親指との距離を測定し、取得したセンサデータの時系列データを用いて親指ジェスチャを識別している。例えば、スワイプ動作を識別する場合、2つ以上の測距センサがあれば、測距センサの上を指が通る順番がわかればどちらの方向にスワイプが行われたかを識別可能であると考えられる。そのため、同じ直線上にない3つ以上の測距センサを用いれば、90° ずつ離れた隣り合う4種類の方向のスワイプ動作を識別できると考えた。これらの考えのもとに3つの測距センサが同一直線上に存在しないように配置し、スワイプおよび回転などのジェスチャを識別した。

3.3 システムの改良の流れ

本研究では、指輪型デバイスの形状および大きさ、親指ジェスチャの行いやすさ、および誤識別の少なさに注目してシステムの作成および改良を行った。本研究では、3つのシステムを試作した。最初の試作システム1では、指輪型デバイスの作製および5種類の親指ジェスチャの設計を行った。続いて、試作システム2では、指輪型デバイスの小型化、および回転ジェスチャをスワイプジェスチャに変更する改良を行った。その後、試作システム3では、親指ジェスチャの行いやすさおよび識別精度の向上のためにスワイプジェスチャの向きを斜めに変更した。本研究では、これらのシステムを用いて指輪型デバイスに対する親指ジェスチャの識別精度を検証した。

3.4 システムの利用例

本研究では，親指ジェスチャを用いた操作の利用例としてアプリケーションの操作に割り当てることを想定している．用いるアプリケーションとしては，音楽再生アプリケーション，地図アプリケーションなどが挙げられる．音楽再生アプリケーションに上下左右のスワイプを用いる場合，上下のスワイプジェスチャを曲の再生，停止，および決定に用いて，左右のスワイプジェスチャは曲のスキップまたはスクロールに用いることが考えられる．ジェスチャが5種類あれば，キャンセル動作も追加できる．また，地図アプリケーションの場合は，左右のスワイプを拡大，縮小に用いて，上下のスワイプをユーザが設定した拡大率に戻す操作や画面の明るさの変更に割り当てられる．

第4章 試作システム1

本研究では，最初の試作システムを作成するにあたり，指輪型デバイスおよび5種類の親指ジェスチャを設計した．また，それらを用いて著者実験を行い，識別精度を検証した．その後，5名の参加者による実験を行い，収集したデータを元に作成した機械学習モデルの識別精度を検証した．

4.1 指輪型デバイス

本研究では，親指ジェスチャを識別するために指輪型デバイスを作製した．指輪型デバイスは，指輪および測距センサから構成される．指輪は3Dプリンタ（Ultimaker3 Extended）にてPLAフィラメントを用いて作製された（図4.1）．測距センサにはRPR-220反射型フォトセンサを用いた．上下左右の動きを識別するために，ユニバーサル基盤上に測距センサを三角形型に3つ配置した．試作システム1にて作製した指輪型デバイスの回路図を示す（図4.2）．3つの測距センサの配線が行われたユニバーサル基盤は，指輪の上部に設けられた両端がコの字型の溝に引っ掛けて設置された（図4.3）．

4.2 親指ジェスチャの設計1

本研究ではまず，5種類の親指ジェスチャを設計した（図4.4）．これらのジェスチャは，今回作製した指輪型デバイスに対して実行可能なジェスチャから構成されている．5種類の親指ジェスチャは以下の通りである．

- Anticlockwise : 指輪の下から反時計回りに回転させる．
- Clockwise : 指輪の下から時計回りに回転させる．
- Swipe Left : 指輪の右から左にスワイプを行う．
- Swipe Right : 指輪の左から右にスワイプを行う．
- Return : 指輪の右から左にスワイプを行い，その後すぐ左から右にスワイプを行う．

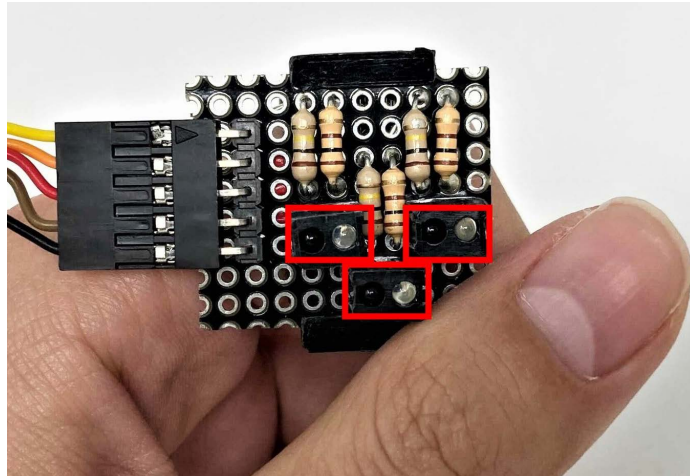


図 4.1: 作製した指輪型デバイス. 3D プリンタにて作製した指輪および測距センサを配線したユニバーサル基盤から構成される. 赤枠はユニバーサル基盤に配線された測距センサを表す. 右上, 左上, 下の順にセンサ 1, センサ 2, センサ 3.

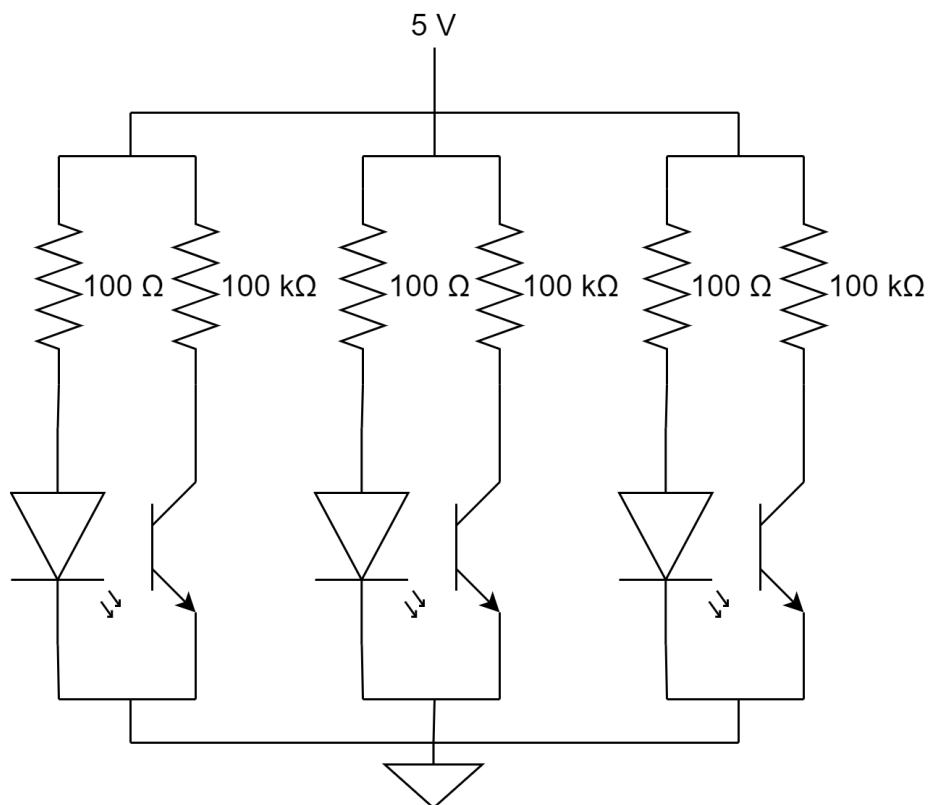


図 4.2: 試作システム 1 にて作製した指輪型デバイスの回路図.



図 4.3: 指輪の上面に設計された両端がコの字型の溝に装着されたユニバーサル基盤.

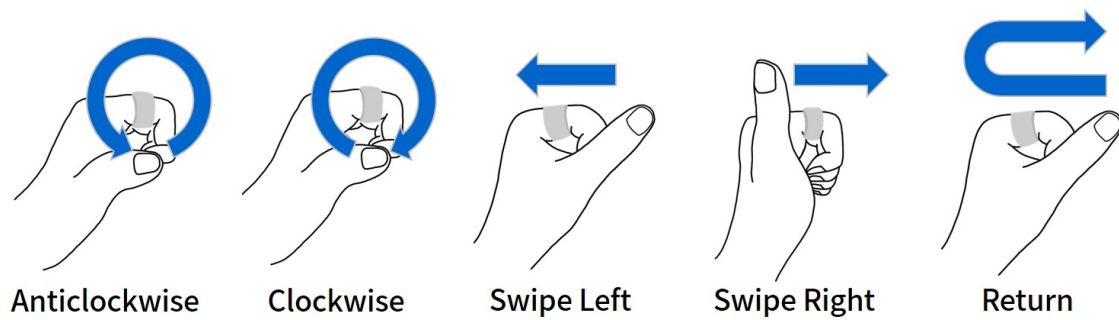


図 4.4: 試作システム 1 にて設計した 5 種類の親指ジェスチャ. 手のポーズは開始位置を示す.

表 4.1: 試作システム 1 における Anticlockwise, Clockwise, Swipe Left, Swipe Right, および Return の 5 種類からなるジェスチャセットを用いた 15 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Anticlockwise	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Clockwise	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	6.67%	0.00%	0.00%	93.33%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	6.67%	0.00%	93.33%
		Anticlockwise	Clockwise	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

4.3 著者実験 1

作製した指輪型デバイスおよび 5 種類の親指ジェスチャの識別精度を検証するため、著者実験を行った。実験は測距センサに対する太陽光の影響を無くするため、ブラインドを下ろした室内にて行った。参加者は左手に指輪型デバイスを装着して椅子に座り、Anticlockwise, Clockwise, Swipe Left, Swipe Right, および Return の 5 種類の親指ジェスチャを行った。ジェスチャを 1 回行う試行において 3 秒間のセンサデータを取得した。このとき、センサデータはサンプリングレート約 88 Hz にて収集された。参加者は、各ジェスチャを 15 回ずつ行い、最終的に 75 回分（5 種類のジェスチャ × 15 回の繰り返し）のセンサデータが収集された。

4.3.1 結果

参加者から収集したセンサデータは、センサ値が閾値を下回った時間を基準として、基準より前の 0.2 秒間（20 特徴点）およびその時間以降の 0.6 秒間（60 特徴点）を合わせた 0.8 秒間（80 特徴点）に整形した。その後、サポートベクタマシン（以降、SVM）を用いて 15 分割交差検証を行い、識別精度を検証した。15 分割交差検証の結果、平均識別精度は 97.33% だった。その結果の混同行列を示す（表 4.1）。

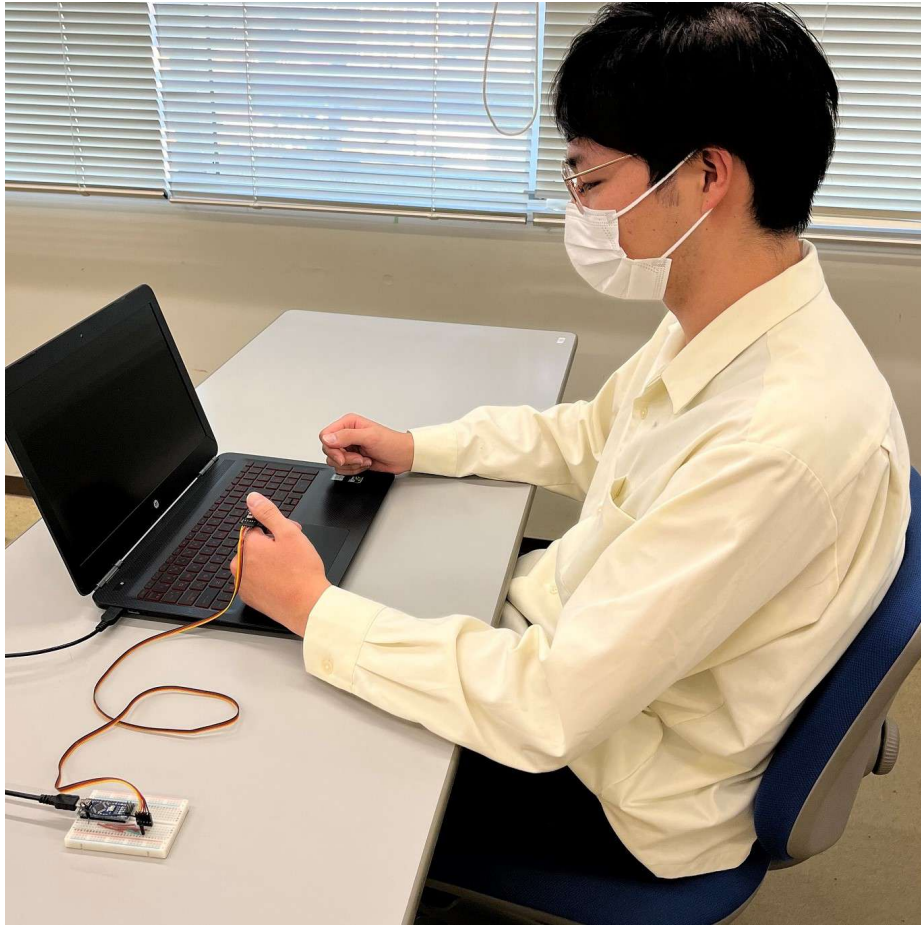


図 4.5: 試作システム 1 を用いた実験の様子.

4.3.2 考察

表 4.1 を見ると全てのジェスチャは識別精度が 90% を越えており, 十分な精度にて親指ジェスチャの識別が行えていると考えられる.

4.4 評価実験 1

著者のみの情報からでは機械学習モデルの汎化性能が検証できないため, 新たな参加者を募り, 評価実験を行った. 本実験では, 著者を含む研究室内の 5 名 (23–26 歳, $M=24.6$ 歳, $SD=1.36$ 歳, 男性, 右利き) がボランティアとして実験に参加した. 実験の様子を図 4.5 に示す.

評価実験 1 は, 著者実験 1 と同じ流れにて実験を行った. 実験は測距センサに対する太陽光の影響を無くすため, ブラインドを下ろした室内にて行った. 参加者は左手に指輪型デバイ



図 4.6: 評価実験 1 にて収集したジェスチャのデータ数.

表 4.2: 試作システム 1 における 5 名の参加者による 15 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベル	Anticlockwise	87.84%	0.00%	12.16%	0.00%	0.00%
	Clockwise	4.05%	81.08%	0.00%	12.16%	2.70%
	Swipe Left	5.41%	0.00%	91.89%	2.70%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	9.33%	0.00%	90.67%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
		Anticlockwise	Clockwise	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

スを装着して椅子に座り、Anticlockwise, Clockwise, Swipe Left, Swipe Right, および Return の 5 種類の親指ジェスチャを行った。親指ジェスチャを 1 回行う試行において 3 秒間のセンサデータを取得した。このとき、センサデータはサンプリングレート約 88 Hz にて収集された。参加者は、各ジェスチャを 15 回ずつ行い、最終的に 375 回分（5 種類のジェスチャ × 15 回の繰り返し × 5 名の参加者）のセンサデータが収集された（図 4.6）。

4.4.1 結果

参加者から収集したセンサデータは、著者実験 1 と同様にセンサ値が閾値を下回った時間を基準として、基準より前の 0.2 秒間（20 特徴点）およびその時間以降の 0.6 秒間（60 特徴点）を合わせた 0.8 秒間（80 特徴点）に整形した。その後、15 分割交差検証を行った結果、平均識別精度は 90.34% だった（表 4.2）。また、SVM を用いて 1 名の参加者のデータをテス

表 4.3: 試作システム 1 における 5 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Anticlockwise	75.68%	0.00%	22.97%	0.00%	1.35%
	Clockwise	4.05%	85.14%	0.00%	8.11%	2.70%
	Swipe Left	6.76%	0.00%	90.54%	2.70%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	13.33%	0.00%	86.67%	0.00%
	Return	2.67%	0.00%	0.00%	1.33%	96.00%
		Anticlockwise	Clockwise	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

トデータ, 残り 4 名の参加者のデータを訓練データとする leave-one-participant-out 交差検証を行った. その結果, 5 名の参加者による平均識別精度は 86.81% だった (表 4.3).

4.4.2 考察

表 4.2 および表 4.3 から, Anticlockwise および Swipe Left ならびに Clockwise および Swipe Right の 2 組の誤識別が多いことがわかる. 各センサデータを比較したところ, 一部の参加者においてこれらの 2 組の親指ジェスチャのセンサデータのグラフの形状が似ていることがわかった (図 4.7). これらのグラフを観察すると各センサの親指ジェスチャ開始部分の立下がりおよび親指ジェスチャ終了部分の立上がりが見えてくる. このことから, 各ジェスチャの特徴量が似ない工夫が必要だと考えた.

また, Anticlockwise および Clockwise においてジェスチャを行う時間が極端に短い場合, Swipe Left または Swipe Right に誤識別されることがわかった. 参加者が Anticlockwise を素早く行った場合, 親指が指輪型デバイスの上を通過する間, 親指の移動方向が Swipe Left と同じ方向になる可能性が考えられる. その場合, Anticlockwise および Swipe Left は, 指輪型デバイスの上を通過する間の親指の移動方向は右から左である. Clockwise についても同様に, 指輪型デバイスの上を通過する間の親指の移動方向が左から右となり, Swipe Right と同じ方向になる. よって, ユーザが Anticlockwise および Clockwise を Swipe Left または Swipe Right と比較して素早く行った場合, Anticlockwise および Clockwise を正しく識別することが難しい可能性がある.

また, 参加者から Anticlockwise および Clockwise が行いづらいという意見があった. これ

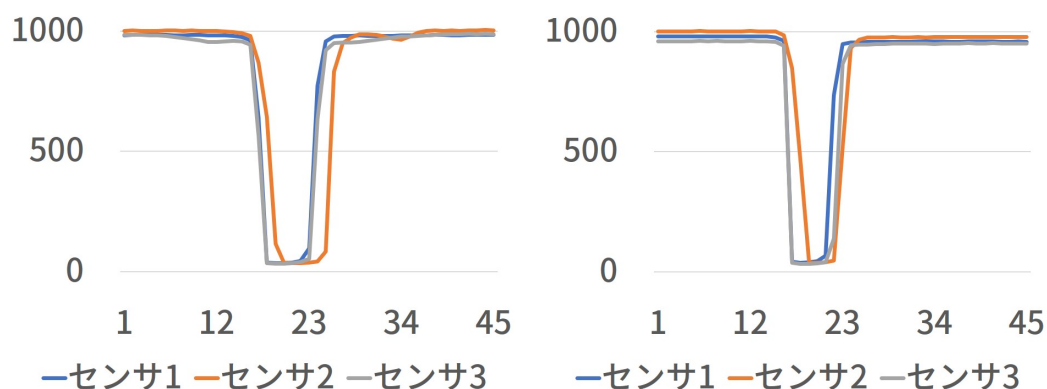


図 4.7: Anticlockwise (左) および Swipe Left (右) のセンサデータの例. 縦軸はセンサ値, 横軸はフレーム数を表す.

らのことから, センサデータ収集時に参加者が Anticlockwise および Clockwise を正しく実行できていなかった可能性が考えられる. そのため, 今後は実験の前に各ジェスチャの練習を行う時間を設ける. また, 親指ジェスチャによる識別をより堅牢にするために新たな特徴量を加えることを考えた. さらに, 今後は3つの測距センサの配置を変更することにより, 識別精度の向上を試みる.

4.5 新たな特徴量追加後の識別精度の検証

親指ジェスチャの識別を堅牢にするために新たな特徴量を加え, 識別精度の検証を行った.

まず, 評価実験 1 にて収集したセンサデータに対して, センサ値が閾値を下回った時間を基準として, 基準より前の 0.2 秒間 (20 特徴点) およびその時間以降の 0.6 秒間 (60 特徴点) を合わせた 0.8 秒間 (80 特徴点) に整形した. 次に, この高速フーリエ変換 (以降, FFT) を行い, その結果得られた周波数パワースペクトル (41 特徴点) を新たな特徴量として加えた. それにより, 全体として 121 特徴点を機械学習に用いた.

4.5.1 結果

SVM を用いて 15 分割交差検証を行った結果, 平均識別精度は 90.07% だった (表 4.4). また, 各参加者のデータをテストデータとする leave-one-participant-out 交差検証を行った結果, 平均識別精度は 87.33% だった (表 4.5).

4.5.2 考察

これらの結果より, 特徴量追加後に行った 15 分割交差検証および leave-one-participant-out 交差検証の識別精度の差は, 追加前と比べて 1% 以内に留まることがわかった. そのため, 時

表 4.4: 周波数パワースペクトルを特徴量に加えた試作システム 1 における 5 名の参加者による 15 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Anticlockwise	86.49%	0.00%	13.51%	0.00%	0.00%
	Clockwise	2.70%	85.14%	0.00%	9.46%	2.70%
	Swipe Left	4.05%	0.00%	91.89%	4.05%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	9.33%	0.00%	90.67%	0.00%
	Return	0.00%	1.33%	2.67%	0.00%	96.00%
		Anticlockwise	Clockwise	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 4.5: 周波数パワースペクトルを特徴量に加えた試作システム 1 における 5 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Anticlockwise	81.08%	0.00%	18.92%	0.00%	0.00%
	Clockwise	2.70%	82.43%	0.00%	12.16%	2.70%
	Swipe Left	5.41%	0.00%	91.89%	2.70%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	8.00%	0.00%	92.00%	0.00%
	Return	0.00%	5.33%	4.00%	1.33%	89.33%
		Anticlockwise	Clockwise	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

系列データの周波数パワースペクトルではなく、その他の特徴量を追加する必要があると考えた。また、指輪型デバイスの大きさおよび形状の問題や設計した親指ジェスチャの中に行いづらいジェスチャが含まれていたことから、それらの設計を見直す必要があると考えた。そのため、今後は指輪型デバイスの改良および親指ジェスチャの変更によって識別精度の向上を試みる。

第5章 試作システム2

本研究では，試作システム1を作製し，SVMを用いて5種類の親指ジェスチャの識別精度を検証した．試作システム1にて作製した機械学習モデルに新たな特徴量を加えて改良を図ったが，十分な識別精度には達しなかった．そのため，試作システム1を改良した試作システム2を作製することを考えた．本章では試作システム2の説明として，指輪型デバイスの改良，親指ジェスチャの設計の変更，および実験アプリケーションの導入を述べる．

5.1 指輪型デバイスの改良

試作システム1では，指輪型デバイスが指に対して大きく，行いづらい親指ジェスチャが存在する問題があった．そのため，デバイスを小型化するための改良を行った．回路を組みなおすことにより，小型化した指輪型デバイス（図 5.1）を作製した．試作システム2にて作製した指輪型デバイスの回路図を示す（図 5.2）．試作システム1にて作製したデバイスおよび今回作製したデバイスのユニバーサル基盤の大きさを比較すると，最初に作製したデバイスは縦 2.3 cm，横 2.7 cm だったのに対して今回作製したデバイスは縦 2.5 cm，横 1.5 cm である（図 5.3）．試作システム2にて作製したデバイスは試作システム1にて作製したデバイスとは異なり，3つの抵抗をユニバーサル基盤の裏面に配線し，測距センサの向きを 90 度回転させ，ユニバーサル基盤を指輪の幅に収まる大きさにすることにより小型化した．3つの測距センサの向きは変更したが，今回作製した指輪型デバイスは試作システム1と同様に三角形の配置を保っているため，識別精度に大きな影響はないと考えられる．

5.2 親指ジェスチャの設計2

試作システム1の評価実験にて，参加者から親指を回転させるジェスチャ（Anticlockwise および Clockwise）は行いづらいとの指摘があった．そのため，これらの2つのジェスチャを変更し，新たな5種類の親指ジェスチャセットを設計した（図 5.4）．今回用いる5種類の親指ジェスチャは以下の通りである．

- Swipe Up : 指輪の下から上にスワイプを行う．
- Swipe Down : 指輪の上から下にスワイプを行う．
- Swipe Left : 指輪の右から左にスワイプを行う．

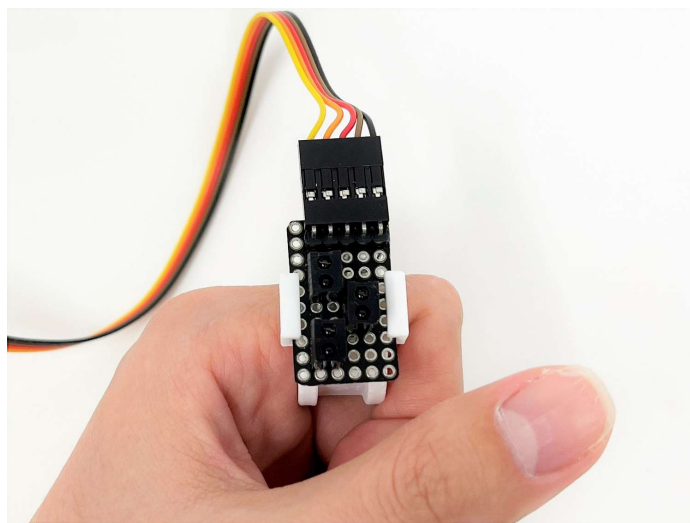


図 5.1: 試作システム 2 にて作製した指輪型デバイス.

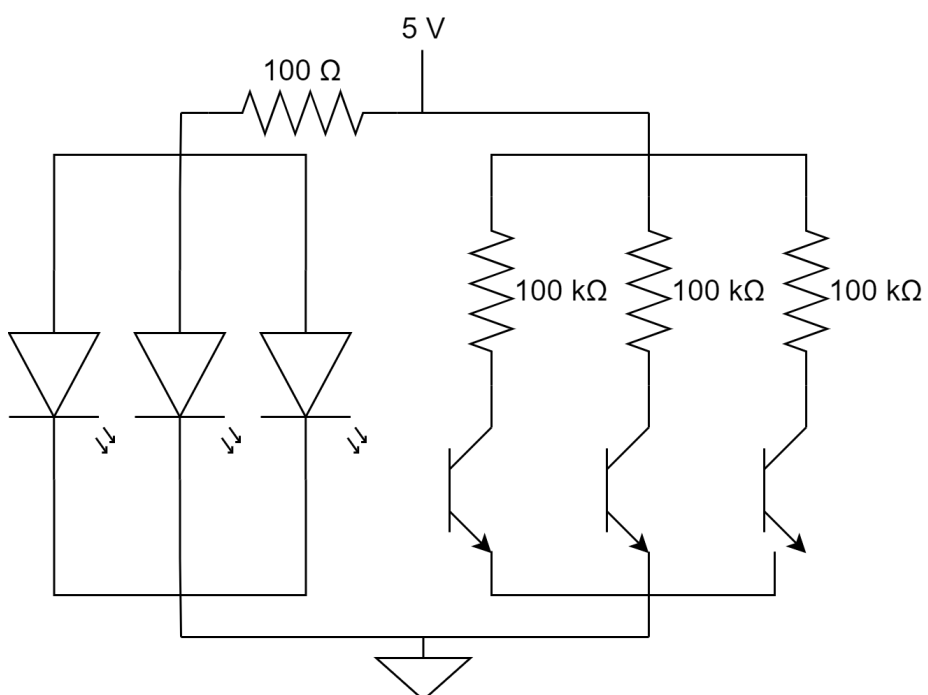


図 5.2: 試作システム 2 にて作製した指輪型デバイスの回路図.

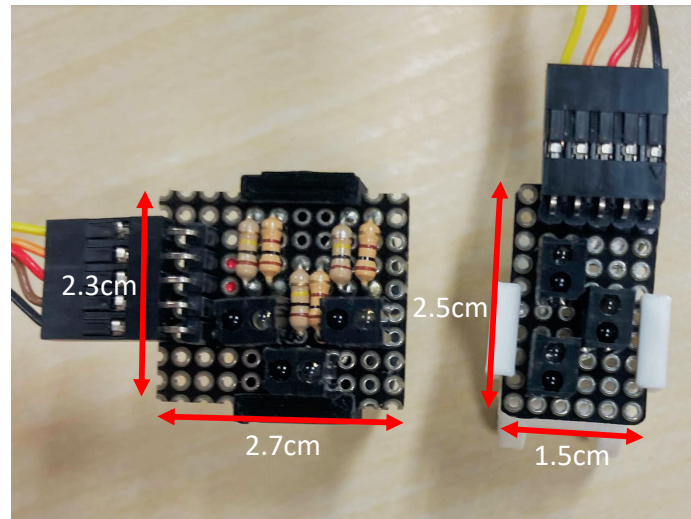


図 5.3: 試作システム 1 にて作製した指輪型デバイス（左）および試作システム 2 にて作製した指輪型デバイス（右）の大きさの比較.

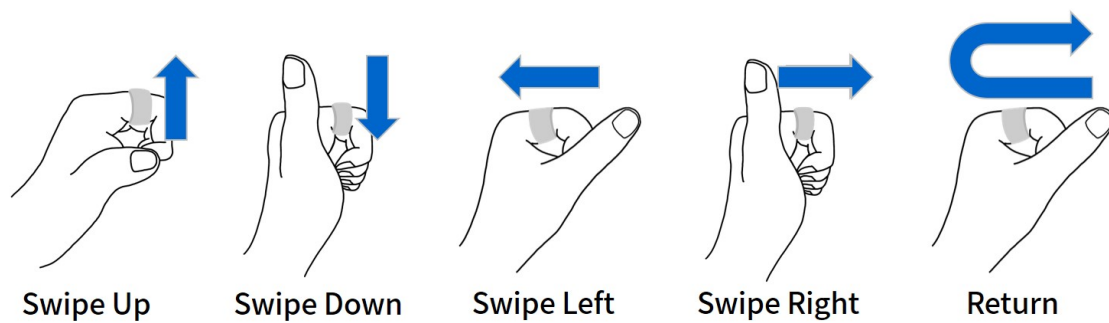


図 5.4: 試作システム 2 にて設計した 5 種類のジェスチャ. 手のポーズは開始位置を示す.

- **Swipe Right** : 指輪の左から右にスワイプを行う。
- **Return** : 指輪の右から左にスワイプを行い、その後すぐ左から右にスワイプを行う。

5.3 実験アプリケーション

これまで、スマートウォッチ向けの5種類の親指ジェスチャの検出精度を調べるために実験を行ったが、試作システム1の実験ではセンサデータを収集開始の合図を手動にて行っていたため、親指ジェスチャを行うタイミングが一樣ではなかった。そのため、収集した3秒間に親指ジェスチャのデータが収まらない場合があり、各ジェスチャの切り出し時に学習に用いるデータ数が足りなくなる問題が生じた。そこで、GUIにて親指ジェスチャを行うタイミングの誘導を行うことによって機械学習に用いることができないデータが発生しにくくなるのではないかと考えた。試作システム2の実験のため、GUIを用いた実験アプリケーションを作成した。また、これまでは測距センサのサンプリングレートが一定ではなく、親指ジェスチャを検出する際に問題があった。そのため、サンプリングレートを一定にする処理をセンサデータを収集するプログラムに追加した。

5.3.1 実験アプリケーションの作成

実験アプリケーションはPythonのTkinterモジュールを用いて作成した。参加者に親指ジェスチャを行う時間を明確に示すため、参加者にプログレスバーを提示する実装を行った。

試作システム1では参加者が3秒の間に親指ジェスチャを行う設計の実験を行っていたが、親指ジェスチャを行った後に待ち時間が1秒以上発生する問題が判明した。4章の実験にて、参加者が親指ジェスチャに費やす時間は最も長いReturnにおいて0.8秒を越えなかったため、参加者が親指ジェスチャを行い、センサデータを収集する時間は2秒間で十分だと判断した。そのため、参加者には2秒の間に親指ジェスチャを行ってもらい、100 Hzにて計200個のセンサデータを取得する設計に変更した。実験アプリケーションでは、参加者が時間を把握しやすいように1秒間に1つのプログレスバーの色を変化させる。また、参加者が実行する親指ジェスチャの開始位置および動作を表す画像を中央に表示した。このアプリケーションは参加者が自身のタイミングにて親指ジェスチャを行えるように、Enterキーを入力することによってセンサデータの収集が始まり、収集が終わった後、次にEnterキーを入力されるまで次のセンサデータの収集が始まらないように設計した。そのとき、フラグを作成してセンサデータ取得中にはEnterキーを入力できない仕様にした。また、ユーザが作成した実験アプリケーションを用いる様子を示す(図5.5)。

5.3.2 センサデータ収集時のサンプリングレートの変更

センサデータ取得時のサンプリングレートを一定にするためにPythonのsleep関数を用いて一定時間処理を止めることを考えた。今回はサンプリングレートを100 Hzに保つためにsleep

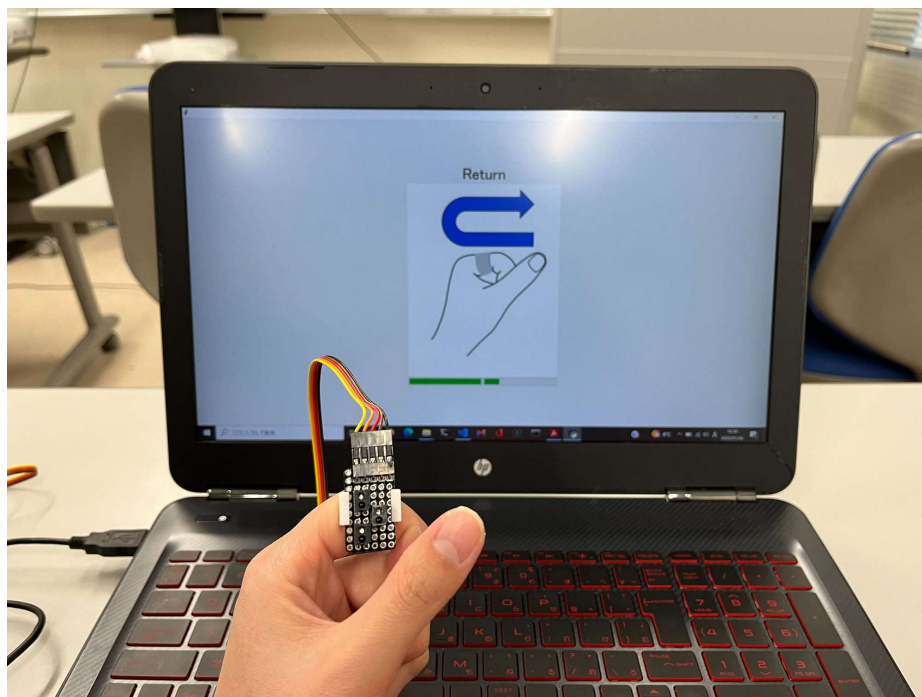


図 5.5: ユーザが実験アプリケーションを用いる様子.

関数を用いて 10 ms 処理を停止するプログラムを記述した. サンプルングレートを計算するためにセンサデータを 1 回取得する時間を計測したところ, 実際には 15 ms 停止していた. Windows のデフォルトのタイマ精度が 15.6 ms であるため⁽¹⁾, Python の sleep 関数を用いて 15 ms 以下の停止ができないことがわかった. そのため, Windows のタイマの精度を 10 ms に変更してプログラムを実行したところ, 10 ms に 1 回センサデータを取得できる場合もあったが, その時間を越える場合も多かった. また, 処理を停止するとセンサデータの値をリアルタイムに取得できないことがわかった. そこで, センサデータの取得を停止せずに 10 ms に 1 回センサデータを保存するプログラムに書き換えたところ, 10 ms に 1 回センサデータを収集でき, サンプルングレートを 100 Hz に保つことができた.

5.4 著者実験2

試作システム 1 から改良した指輪型デバイスおよび新たなジェスチャセットの識別精度を検証するため, 著者実験 (図 5.6) を行った. 実験は測距センサに対する太陽光の影響を無くすため, ブラインドを下ろした室内にて行った. 参加者は指輪型デバイスを左手に装着して椅子に座り, 上下左右のスワイプジェスチャ (Swipe Up, Swipe Down, Swipe Left, Swipe Right) および Return の 5 種類の親指ジェスチャを行った.

¹<https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows-hardware/drivers/wdf/using-timers>

表 5.1: 試作システム 2 における Swipe Up, Swipe Down, Swipe Left, Swipe Right および Return の 5 種類からなるジェスチャセットを用いた 10 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	70.00%	0.00%	30.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	15.00%	0.00%	80.00%	5.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	5.00%	95.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

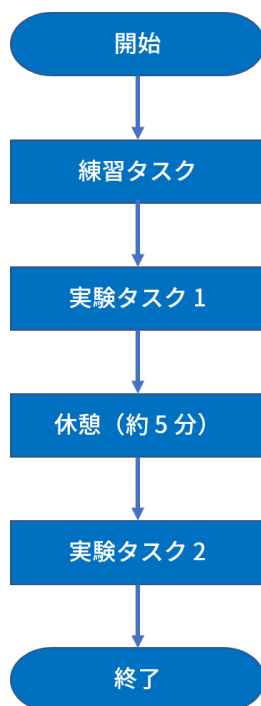


図 5.6: 著者実験 2 および 3 の流れを示すフローチャート.

参加者はまず、ジェスチャおよび実験アプリケーションの操作の練習のために実験アプリケーションにて無作為に表示される5種類の親指ジェスチャを各1回行うタスクを計2回行った。その後、1つ目の試行として参加者は実験アプリケーションにて無作為に表示される5種類の親指ジェスチャを各1回行うタスクを計10回行った。約5分間の休憩を挟んだ後、参加者は1つ目の試行と同様に5種類の親指ジェスチャを各1回ずつ行うタスクを計10回行った。実験の間、親指ジェスチャを1回行う試行において2秒間のセンサデータを取得した。このとき、センサデータはサンプリングレート 100 Hz にて収集された。全体として計 100 回 (5 種類のジェスチャ × 10 回の繰り返し × 2 試行) のセンサデータを収集した。

5.4.1 結果

収集した2秒間のセンサデータは試作システム1と同様に、3つのセンサの値が閾値を下回った時間を基準として親指ジェスチャ時のデータが切り出された。しかし、新たに追加した Swipe Up および Swipe Down において、親指が3つ全てのセンサの上を通らない場合があったため、従来の閾値を用いた場合、切り出しが行えないデータが存在することがわかった。参加者から収集した2秒間のセンサデータは、4章の実験とは異なり、3つの測距センサのどれか1つが閾値を下回った時間を基準として、基準より前の10特徴点およびそれ以降の90特徴点に整形された。その後、収集したセンサデータを用いて10分割交差検証を行い、識別精度を算出した結果、平均識別精度は89.00%だった。10分割の交差検証の混同行列を示す(表 5.1)。

5.4.2 考察

指輪型デバイスが小型化したため、試作システム1と比べると著者の主観的に各ジェスチャは行いやすくなったと考えた。その一方で、表 5.1 から、Swipe Down および Swipe Right の誤識別が多いことがわかる。これら2つのジェスチャは、ジェスチャの開始位置が同じである。そのため、Swipe Down および Swipe Right は他の親指ジェスチャと比べて親指が似通った方向に動きやすいと考えられる。また、Swipe Left および Return とは異なり、どちらもスワイプジェスチャであるため、ジェスチャに費やす時間はほとんど変わらないと考えられる。これらのことから、誤識別が起こる可能性が高いと考えた。しかし、それら以外の親指ジェスチャ (Swipe Up, Swipe Left, および Return) は95%以上の精度にて識別可能であることがわかる。

5.5 評価実験2

機械学習モデルの汎化性能の検証のため、10名の参加者を募り、評価実験を行った。本実験は研究室の10名(21-24歳, M=22.2歳, SD=0.98, 男性9名, 右利き9名)がボランティアとして実験に参加した。実験は測距センサに対する太陽光の影響を無くするため、ブラインド



図 5.7: 試作システム 2 を用いた実験の様子.

を下ろした室内にて行った. 参加者は, 指輪型デバイスを左手に装着して椅子に座り, Swipe Up, Swipe Down, Swipe Left, Swipe Right, および Return の 5 種類の親指ジェスチャを行った. 実験の様子を図 5.7 に示す.

評価実験 2 は, 著者実験 2 と同様の流れ (図 5.8) にて実験を行った. 参加者はまず, ジェスチャおよび実験アプリケーションの操作の練習のために実験アプリケーションにて無作為に表示される 5 種類の親指ジェスチャを各 1 回行うタスクを計 2 回行った. その後, 1 つ目の試行として参加者は実験アプリケーションにて無作為に表示される 5 種類の親指ジェスチャを各 1 回行うタスクを計 10 回行った. 約 5 分間の休憩を挟んだ後, 参加者は 1 つ目の試行と同様に 5 種類の親指ジェスチャを各 1 回ずつ行うタスクを計 10 回行った. 実験の間, ジェスチャを 1 回行う試行において 2 秒間のセンサデータを取得した. このとき, センサデータはサンプリングレート 100 Hz にて収集された. 全体として計 1000 回 (5 種類のジェスチャ $\times$ 10 回の繰り返し $\times$ 2 試行 $\times$ 10 名の参加者) のセンサデータを収集した (図 5.9). 参加者には実験終了後に付録 A.1 に示す実験後アンケートに回答してもらった.

5.5.1 結果

収集したセンサデータ全体の中の 63 個はデータに欠損があったため, 取り除いた. センサデータは, 著者実験 2 と同様に 3 つの測距センサのどれか 1 つが閾値を下回った時間を基準として, センサデータを基準より前の 10 特徴点およびそれ以降の 90 特徴点に整形した. その後,

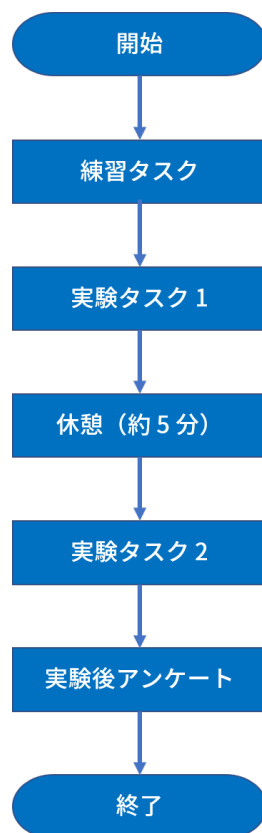


図 5.8: 評価実験 2 および 3 の流れを示すフローチャート.

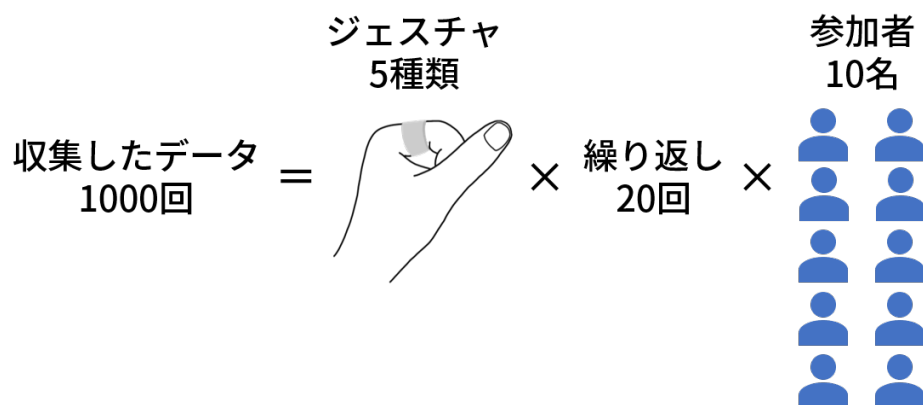


図 5.9: 評価実験 2 および 3 にて収集したジェスチャのデータ数.

表 5.2: 試作システム 2 における 10 名の参加者による 10 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	81.32%	0.55%	14.84%	1.10%	2.20%
	Swipe Down	0.00%	76.09%	0.00%	23.91%	0.00%
	Swipe Left	7.53%	0.00%	92.47%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	1.55%	18.13%	0.00%	79.79%	0.52%
	Return	3.12%	0.00%	3.65%	0.00%	93.23%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 5.3: 試作システム 2 における 10 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	72.53%	0.00%	21.98%	0.55%	4.95%
	Swipe Down	1.09%	64.13%	7.07%	27.72%	0.00%
	Swipe Left	17.74%	0.00%	80.65%	0.00%	1.61%
	Swipe Right	9.84%	31.61%	0.00%	58.03%	0.52%
	Return	9.38%	0.00%	11.98%	0.00%	78.65%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

計 937 個のセンサデータを用いて 10 分割の交差検証を行い、識別精度を算出した (表 5.2)。その結果、平均識別精度は 84.65% だった。また、10 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証を行ったところ、平均識別精度は 69.86% だった (表 5.3)。

5.5.2 考察

表 5.2 および表 5.3 から、Swipe Up および Swipe Left, Swipe Down および Swipe Right の誤識別が多いことがわかる。Swipe Down および Swipe Right は、開始位置が同じである。また、これら 4 つのジェスチャは全てスワイプジェスチャであるため、ジェスチャの動作に費やす時間は各組にてほとんど変わらないと考えられる。そのため、Swipe Up および Swipe Left, Swipe Down および Swipe Right は親指の移動方向が近くなると考えられる。実験後に参加者に回答してもらったアンケートでは、2 名の参加者から Swipe Up および Swipe Down が難しいという意見があった。また、1 名から Swipe Down が難しいという意見をもらった。このことから、参加者が Swipe Up および Swipe Down の 2 つのジェスチャを正確に行えなかった可能性がある。その場合、Swipe Up および Swipe Down を行う際に、Swipe Left および Swipe Right の軌道に近い動きを行ってしまうことが考えられる。それにより、Swipe Up および Swipe Left, Swipe Down および Swipe Right を行う際に親指が最初に上を通過するセンサおよび最後に通過するセンサが同じになったことにより、誤識別が起こった可能性がある。そのため、今後は Swipe Up および Swipe Down に変わる親指ジェスチャの設計を行い、識別精度を検証する。

第6章 試作システム3

6.1 親指ジェスチャの設計3

試作システム2の評価実験後のアンケートにて、参加者から Swipe Up および Swipe Down が行いづらいとの意見が多くあった。

そのため、それらのジェスチャを新たなジェスチャと入れ替えることを考えた。そこで、試作システム2に用いた上下左右のスワイプジェスチャを指輪に対して斜め方向に変更することによって親指が動かしやすくなるのではないかと考えたため、スワイプを行う方向を縦横方向から斜め方向に変更した。変更した新たな5種類の親指ジェスチャセットの開始位置および動作を示す(図6.1)。今回用いる5種類の親指ジェスチャは以下の通りである。

- Swipe Up : 指輪の左下から右上にスワイプを行う。
- Swipe Down : 指輪の右上から左下にスワイプを行う。
- Swipe Left : 指輪の右下から左上にスワイプを行う。
- Swipe Right : 指輪の左上から右下にスワイプを行う。
- Return : 指輪の右から左にスワイプを行い、その後すぐ左から右にスワイプを行う。

6.2 著者実験3

変更後のジェスチャセットの識別精度を検証するため、著者実験を行った(図5.6)。実験には、試作システム2にて作製した指輪型デバイスを用いた。また、実験は測距センサに対する太陽光の影響を無くすため、ブラインドを下ろした室内にて行った。参加者は指輪型デバイスを左手に装着して椅子に座り、変更後の上下左右のスワイプジェスチャ(Swipe Up, Swipe Down, Swipe Left, Swipe Right)およびReturnの5種類の親指ジェスチャを行った。

参加者はまず、ジェスチャおよび実験アプリケーションの操作の練習のために実験アプリケーションにて無作為に表示される5種類の親指ジェスチャを各1回行うタスクを計2回行った。その後、1つ目の試行として参加者は実験アプリケーションにて無作為に表示される5種類の親指ジェスチャを各1回行うタスクを計10回行った。約5分間の休憩を挟んだ後、参加者は1つ目の試行と同様に5種類の親指ジェスチャを各1回ずつ行うタスクを計10回行った。実験の間、ジェスチャを1回行う試行において2秒間のセンサデータを取得した。このとき、

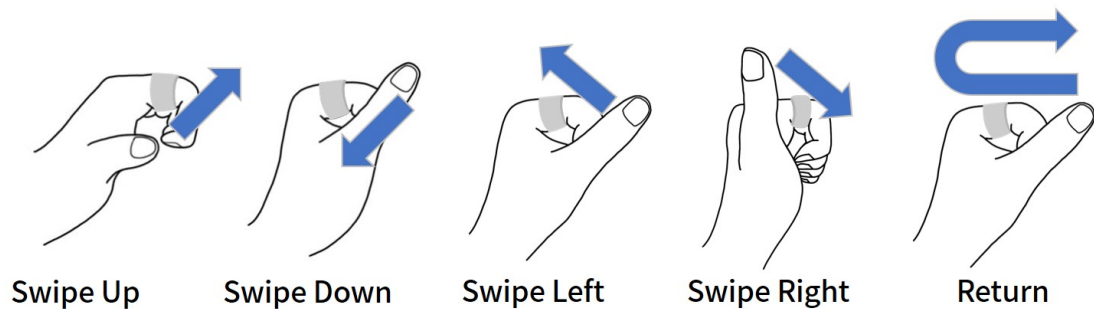


図 6.1: 試作システム 3 にて設計した 5 種類の親指ジェスチャ。手のポーズは開始位置を示す。

センサデータはサンプリングレート 100 Hz にて収集された。全体として計 100 回（5 種類の親指ジェスチャ × 10 回の繰り返し × 2 試行）のセンサデータを収集した。

6.2.1 結果

収集したセンサデータ全体の中の 1 個のデータに欠損があったため、取り除いた。参加者から収集した 2 秒間のセンサデータは、前回の実験と同様にどれか 1 つでも閾値を下回った時間を基準として、センサデータを基準より前の 10 特徴点およびそれ以降の 90 特徴点に整形した。その後、10 分割の交差検証を行い、識別精度を算出した結果、平均識別精度は 97.00% だった（表 6.1）。

6.2.2 考察

表 6.1 より全体的に高い精度にて親指ジェスチャを識別できることがわかる。これは、試作システム 2 の親指ジェスチャには Swipe Down および Swipe Right の軌道が似通っていることおよび最も早く親指が上を通過するセンサおよび最も遅く親指が上を通過するセンサが同じであったが、変更後はそのどちらかあるいは両方の課題を取り除くことができたため、このような結果になったと考えた。識別精度は変更前の上下左右のスワイプジェスチャと比較して高くなったが、各ジェスチャの行いやすさはユーザによって意見が分かれる可能性があるため、調査する必要があると考えた。変更後のスワイプジェスチャは、主観的には Swipe Up 以外の親指ジェスチャは行いやすいと考えた。今後は、変更後のスワイプジェスチャを含むジェスチャセットを用いて複数名の参加者による実験を行い、識別精度を検証する。

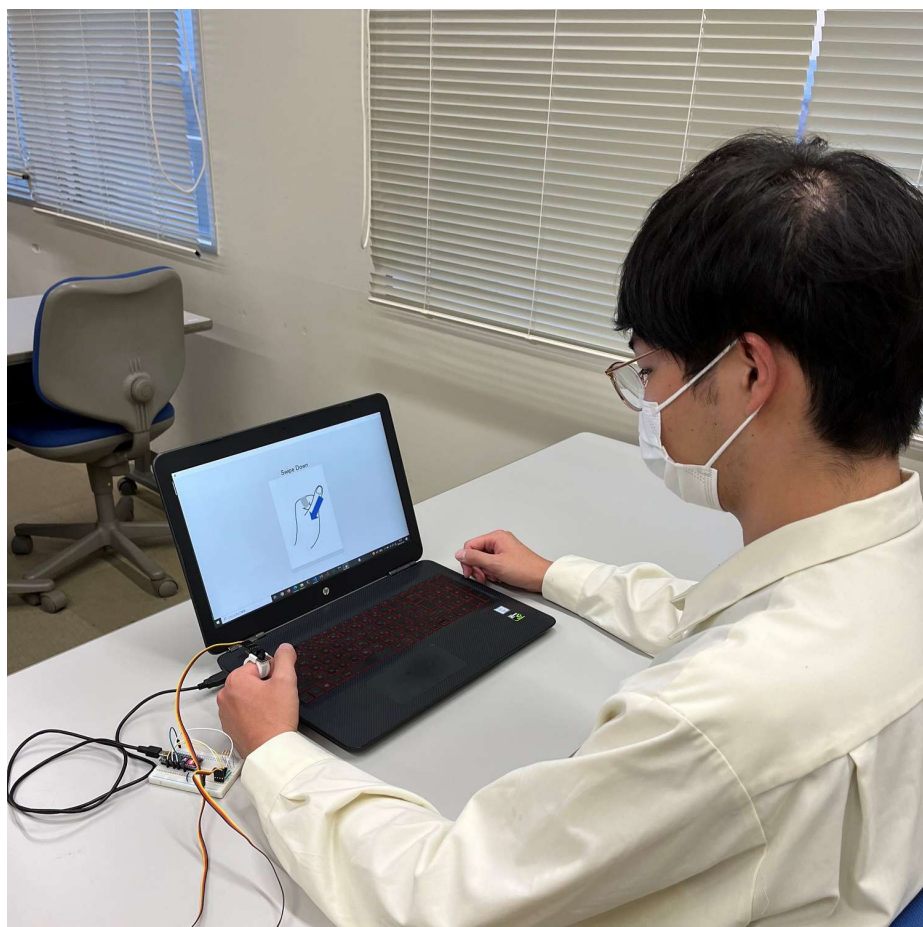


図 6.2: 試作システム 3 を用いた実験の様子.

表 6.1: 試作システム 3 における斜め方向の上下左右のスワイプジェスチャおよび Return の 5 種類からなるジェスチャセットを用いた 10 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	94.74%	0.00%	0.00%	5.26%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	95.00%	5.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	5.00%	95.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

6.3 評価実験 3

上下左右のスワイプジェスチャを縦方向および斜め方向に行った場合のそれぞれのジェスチャセットの識別精度を比較するため、評価実験 2 とは異なる 10 名の参加者を募集し、評価実験を行った。本実験は研究室内の大学生または大学院生 10 名（21–27 歳，M=23.2 歳，SD=1.54，男性 9 名，右利き 10 名）がボランティアとして実験に参加した。実験には、試作システム 2 にて作製した指輪型デバイスを用いた。また、実験は測距センサに対する太陽光の影響を無くすため、ブラインドを下ろした室内にて行った。参加者は指輪型デバイスを左手に装着して椅子に座り、斜め方向の上下左右のスワイプジェスチャ（Swipe Up, Swipe Down, Swipe Left, Swipe Right）および Return の 5 種類の親指ジェスチャを行った。実験の様子を図 6.2 に示す。

評価実験 3 は、著者実験 3 と同様の流れ（図 5.8）にて実験を行った。参加者はまず、ジェスチャおよび実験アプリケーションの操作の練習のために実験アプリケーションにて無作為に表示される 5 種類の親指ジェスチャを各 1 回行うタスクを計 2 回行った。その後、1 つ目の試行として参加者は実験アプリケーションにて無作為に表示される 5 種類の親指ジェスチャを各 1 回行うタスクを計 10 回行った。約 5 分間の休憩を挟んだ後、参加者は 1 つ目の試行と同様に 5 種類の親指ジェスチャを各 1 回ずつ行うタスクを計 10 回行った。実験の間、ジェスチャを 1 回行う試行において 2 秒間のセンサデータを取得した。このとき、センサデータはサンプリングレート 100 Hz にて収集された。全体として計 1000 回（5 種類の親指ジェスチャ × 10 回の繰り返し × 2 試行 × 10 名の参加者）のセンサデータを収集した（図 5.9）。参加者には実験終了後に付録 A.2 に示す実験後アンケート 2 に回答してもらった。

表 6.2: 試作システム 3 における 10 名の参加者による 10 分割交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	92.18%	0.00%	0.00%	6.70%	1.12%
	Swipe Down	1.19%	89.88%	7.14%	0.00%	1.79%
	Swipe Left	0.58%	4.05%	94.80%	0.00%	0.58%
	Swipe Right	3.24%	0.00%	0.00%	95.68%	1.08%
	Return	0.00%	0.56%	2.26%	5.08%	92.09%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

6.3.1 結果

収集したセンサデータ全体の中の 104 個のデータに欠損があったため、取り除いた。参加者から収集した 2 秒間のセンサデータは、著者実験 3 と同様に 3 つのセンサのどれか 1 つが閾値を下回った時間を基準として、センサデータを基準より前の 10 特徴点およびそれ以降の 90 特徴点に整形した。データの整形後、20 分割の交差検証を行い、識別精度を算出した。その結果、平均識別精度は 92.83% だった (表 6.2)。また、10 名の参加者の各参加者をテストデータとする leave-one-participant-out 交差検証を行った結果、平均識別精度は 87.20% だった (表 6.3)。

6.3.2 考察

表 6.2 および表 6.3 より、変更後の上下左右のSwipeジェスチャの方が識別精度が高いことがわかる。これらのことから、試作システム 2 にて作製した指輪型デバイスを用いた場合、縦横方向よりも斜め方向のSwipeジェスチャの方が総じて識別精度が高くなることがわかった。また、表 6.2 から Swipe Up および Swipe Right ならびに Swipe Down および Swipe Left が誤識別しやすいことがわかる。その原因の 1 つとして、Swipe Up および Swipe Right は左から右に行う動作、Swipe Down および Swipe Left は右から左に行う動作であるため、軌道が似通ってしまうことが考えられる。2 つ目に、参加者に記入してもらったアンケートにおいて、上下のSwipeが難しかった、慣れるまでに時間がかかったなどの意見が散見されたため、Swipe Up および Swipe Down に不慣れな参加者はこれらの 2 つのジェスチャを正しく行えなかった可能性があると考えた。参加者によるアンケートには、Swipe Left および Swipe

表 6.3: 試作システム 3 における 10 名の参加者による leave-one-participant-out 交差検証の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	91.06%	0.00%	0.00%	7.26%	1.68%
	Swipe Down	2.98%	83.93%	11.90%	0.00%	1.19%
	Swipe Left	1.16%	9.83%	87.28%	1.16%	0.58%
	Swipe Right	6.49%	0.00%	0.00%	93.51%	0.00%
	Return	0.56%	0.00%	8.47%	5.08%	85.88%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

Right は行いやすいという意見が多かった. 親指ジェスチャの難しさは親指の可動域と関連があるため, 親指が動かしやすい動きおよび動かしづらい動きを調査する必要があると考えた.

第7章 議論

本章では、指輪型デバイスを用いて親指ジェスチャを識別するシステムに関する議論および今後の課題を述べる。

7.1 親指ジェスチャを識別するシステムの改良

本論文では、本研究にて作製した指輪型デバイスを用いて親指ジェスチャを識別するシステムを示した。この章では、指輪型デバイス、親指ジェスチャの改良および機械学習モデルの変更に關して述べる。

7.1.1 指輪型デバイスの改良

指輪型デバイスは、主に 3D プリンタにて作製した指輪および測距センサを配線したユニバーサル基盤から構成される。指輪は 3D プリンタにて作製したため、指の太さが大幅に異なる参加者がいた場合、異なる大きさの指輪を用意する必要があった。どの参加者にも対応できるように、指輪には面ファスナを用いて指の太さに関わらずデバイスを装着可能にする必要がある。本研究では、ユニバーサル基盤から測距センサが突き出ているため、親指ジェスチャを行う際に親指が当たることがあった。これを改善するために2つの案を考えた。まず、小型の測距センサを用いることによって、指輪型デバイスの親指ジェスチャを行う面を現在よりも平らにできる。2つ目に、3D プリンタにて測距センサの周囲の溝を埋めるカバーを作製することを考えた。その他に、今後は、親指ジェスチャの識別精度を向上させるために、測距センサの配置を変えたデバイスを複数個作製し、識別精度が高くなる配置の調査を行う。

7.1.2 親指ジェスチャの改良

試作システム 3 において 10 分割交差検証の結果は 90% を越える識別精度だったが、実験参加者から、一部の親指ジェスチャ（Swipe Up および Swipe Down）に関して難しいとの意見があった。そのため、これらのジェスチャに変わる新たなジェスチャを設計する必要がある。参加者が行いやすいと考えるジェスチャを提案してもらい実験を行い、得られたユーザ定義型のジェスチャの識別精度を調査した後、識別精度が高いジェスチャを今後の実験に用いる。また、実行しやすい親指ジェスチャの追求のため、親指の可動域および親指ジェスチャの行いやすさの關係の調査を行う。

7.1.3 機械学習モデルの変更

本研究では，試作システム 1-3 において，SVM を用いて機械学習モデルを作成した．識別精度の向上のために，その他の機械学習アルゴリズムを用いて機械学習モデルを作成する必要があると考える．また，試作システム 1-3 において，機械学習に用いる特徴量として時系列データを用いていたが，追加可能な特徴量としてセンサデータの平均値，親指ジェスチャに費やす時間，および親指ジェスチャ実行時のセンサデータの傾きなどが考えられる．今後，これらの特徴量を追加して識別精度が向上するかを調査する．

7.2 今後実施すべき調査

本研究では，全ての参加者に左手にて親指ジェスチャを行ってもらったが，このことが親指ジェスチャの識別精度に影響を与えている可能性がある．そのため，参加者に右手にて親指ジェスチャを行ってもらい，収集したデータを用いて作成したシステムおよび本研究にて作成したシステムの比較を行うことにより，親指ジェスチャの識別精度への影響を調査する．本研究では，全ての実験を室内にて行っている．太陽光が光源となる屋外では赤外線を用いる測距センサは誤作動を起こしやすく，対象物との距離を正確に検出できない可能性がある．屋外にて親指ジェスチャを識別するためにセンサに直射日光や強い光が当たらないような仕組みの変更が必要だと考える．指輪型デバイスの変更点としては，測距センサに影がかかるように覆いを取り付けることが考えられる．その他の対策として，追加のセンサを用いることが考えられる．

第8章 おわりに

本論文では、スマートウォッチの操作領域を拡張し、片手操作を可能にするために、親指ジェスチャによる片手操作手法を示した。この操作を実現するため、指輪型デバイスを作製し、5種類の親指ジェスチャを設計した。本研究では、赤外線測距センサを取り付けた指輪型デバイスを用いて親指ジェスチャを識別するシステムを試作した。まず、SVMを用いて1つ目のジェスチャセットを識別する機械学習モデルを作製した。このモデルの識別精度の評価を行ったところ、15分割交差検証にて平均90.07%、leave-one-participant-out 交差検証にて平均87.33%であった。SVMを用いて2つ目のジェスチャセットを識別するモデルを作製し、識別精度の評価を行ったところ、10分割交差検証にて平均84.65%、leave-one-participant-out 交差検証にて平均69.86%であった。識別精度の向上のため、2つ目のジェスチャセットの上下左右のスワイプジェスチャを斜め方向のスワイプジェスチャに変更した3つ目のジェスチャセットを設計した。SVMを用いて3つ目のジェスチャセットを識別するモデルを作製し、識別精度の評価を行ったところ、10分割交差検証にて平均92.83%、leave-one-participant-out 交差検証にて平均87.20%であった。このことから、作製した指輪型デバイスに対して縦横方向よりも斜め方向の親指ジェスチャの識別精度が高いことが示された。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生、川口一画先生、Simona Vasilache 先生には多大なご意見とご指導をいただきました。心から感謝いたします。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、論文執筆、発表の方法といった研究に関することのみならず、日常生活における研究者の心構えなど多岐に渡るご指導をいただきました。先生の熱心なご指導のおかげで、研究成果の発表および本論文の執筆ができました。重ねてお礼申し上げます。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩、同輩、先輩方には研究生生活においてお力添えをいただきありがとうございました。特に WAVE チームの皆様には、チームゼミにおけるご意見や論文の添削といった研究に関する多くのご支援に加えて、研究室においても研究の進め方や研究生生活について多くのご助言をいただきました。中でも、研究生生活や論文の執筆に関して親身に教えてくださった富永浩暉さんには深く感謝いたします。また、私の研究のハードウェア面に関してご助言をいただいた清佑輔さん、高倉礼さん、日高拓真さん、野崎陽奈子さん、西川宜利さんには大変感謝しております。皆様のおかげで、充実した研究生生活を送ることができました。改めて感謝いたします。

最後にこれまで私を支えてくださった友人、そして家族に深く感謝いたします。これまで私が大学院での生活を何不自由なく送れたのは皆様のおかげです。ありがとうございました。

参考文献

- [ABO18] Hyelip Lee Andrea Bianchi, Seungwoo Je and Ian Oakley. Enhancing Spatial Input on the Body with a Smart-Ring. In *Proceedings of HCI Korea '18*, South Korea, 2018. HCI Korea Society. 4 pages.
- [ABW11] Daniel Ashbrook, Patrick Baudisch, and Sean White. Nanya: Subtle and Eyes-Free Mobile Input with a Magnetically-Tracked Finger Ring. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2043–2046, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [AST16] Shuhei Aoyama, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. ThumbSlide: An Interaction Technique for Smartwatches Using a Thumb Slide Movement. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2403–2409, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [BDM⁺18a] Roger Boldu, Alexandru Dancu, Denys J.C. Matthies, Thisum Buddhika, Shamane Siriwardhana, and Suranga Nanayakkara. FingerReader2.0: Designing and Evaluating a Wearable Finger-Worn Camera to Assist People with Visual Impairments While Shopping. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 2, No. 3, pp. 1–19, 2018.
- [BDM⁺18b] Roger Boldu, Alexandru Dancu, Denys J.C. Matthies, Pablo Gallego Cascón, Shanaka Ransir, and Suranga Nanayakkara. Thumb-In-Motion: Evaluating Thumb-to-Ring Microgestures for Athletic Activity. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '18, pp. 150–157, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [BJ17] Andrea Bianchi and Seungwoo Je. Disambiguating Touch with a Smart-Ring. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, pp. 1–5, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [CCH⁺15] Liwei Chan, Yi-Ling Chen, Chi-Hao Hsieh, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. CyclopsRing: Enabling Whole-Hand and Context-Aware Interactions Through a Fisheye Ring. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software*

& Technology, UIST '15, pp. 549–556, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.

- [CG19] Victor Cheung and Audrey Girouard. Tangible Around-Device Interaction Using Rotatory Gestures with a Magnetic Ring. In *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '19*, pp. 1–18, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [CIRH17] Ashley Colley, Virve Inget, Inka Rantala, and Jonna Häkkinä. Investigating Interaction with a Ring Form Factor. In *Proceedings of the 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM '17*, pp. 107–111, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [CLWP13] Ke-Yu Chen, Kent Lyons, Sean White, and Shwetak Patel. uTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13*, pp. 237–244, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [FT97] Masaaki Fukumoto and Yoshinobu Tonomura. “Body Coupled FingerRing” : Wireless Wearable Keyboard. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '97*, pp. 147–154, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [GJY⁺19] Aakar Gupta, Cheng Ji, Hui-Shyong Yeo, Aaron Quigley, and Daniel Vogel. Roto-Swyne: Word-Gesture Typing Using a Ring. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [GKC⁺16] Sarthak Ghosh, Hyeong Cheol Kim, Yang Cao, Arne Wessels, Simon T. Perrault, and Shengdong Zhao. Ringteraction: Coordinated Thumb-Index Interaction Using a Ring. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '16*, pp. 2640–2647, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [HFST15] Hiroyuki Hakoda, Yoshitomo Fukatsu, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Back-of-Device Interaction Based on the Range of Motion of the Index Finger. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction, OzCHI '15*, pp. 202–206, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [HH09] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Abracadabra: Wireless, High-Precision, and Unpowered Finger Input for Very Small Mobile Devices. In *Proceedings of the 22nd*

Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '09, pp. 121–124, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.

- [HHA⁺17] Teng Han, Qian Han, Michelle Annett, Fraser Anderson, Da-Yuan Huang, and Xing-Dong Yang. Frictio: Passive kinesthetic force feedback for smart ring output. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 131–142, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [HKCB17] Nur Al-huda Hamdan, Ravi Kanth Kosuru, Christian Corsten, and Jan Borchers. Run&Tap: Investigation of On-Body Tapping for Runners. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '17, pp. 280–286, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [HNY⁺13] Anuruddha Hettiarachchi, Suranga Nanayakkara, Kian Peen Yeo, Roy Shilkrot, and Pattie Maes. FingerDraw: More than a Digital Paintbrush. In *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, AH '13, pp. 1–4, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [HTKT12] Tatsuya Horie, Tsutomu Terada, Takuya Katayama, and Masahiko Tsukamoto. A Pointing Method Using Accelerometers for Graphical User Interfaces. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, AH '12, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [JCZ⁺13] Lei Jing, Zixue Cheng, Yinghui Zhou, Junbo Wang, and Tongjun Huang. Magic Ring: A Self-Contained Gesture Input Device on Finger. In *Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '13, pp. 1–4, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [KH14] Wolf Kienzle and Ken Hinckley. LightRing: Always-Available 2D Input on Any Surface. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 157–160, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [KO22] Jiwan Kim and Ian Oakley. SonarID: Using Sonar to Identify Fingers on a Smartwatch. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [KRY10] Hamed Ketabdar, Mehran Roshandel, and Kamer Ali Yüksel. Towards Using Embedded Magnetic Field Sensor for around Mobile Device 3D Interaction. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile*

Devices and Services, MobileHCI '10, pp. 153–156, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.

- [LCO⁺16] Hyunchul Lim, Jungmin Chung, Changhoon Oh, SoHyun Park, and Bongwon Suh. OctaRing: Examining Pressure-Sensitive Multi-Touch Input on a Finger Ring Device. In *Adjunct Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, pp. 223–224, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [LCO⁺18] Hyunchul Lim, Jungmin Chung, Changhoon Oh, SoHyun Park, Joonhwan Lee, and Bongwon Suh. Touch+finger: Extending touch-based user interface capabilities with "idle" finger gestures in the air. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 335–346, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [LLP⁺18] Yichen Li, Tianxing Li, Ruchir A. Patel, Xing-Dong Yang, and Xia Zhou. Self-Powered Gesture Recognition with Ambient Light. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 595–608, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [LXH16] Gierad Laput, Robert Xiao, and Chris Harrison. ViBand: High-Fidelity Bio-Acoustic Sensing Using Commodity Smartwatch Accelerometers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 321–333, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [MCT⁺13] Adiyen Mujibiya, Xiang Cao, Desney S. Tan, Dan Morris, Shwetak N. Patel, and Jun Rekimoto. The Sound of Touch: On-Body Touch and Gesture Sensing Based on Transdermal Ultrasound Propagation. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, pp. 189–198, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [NRMF⁺21] Ali Neshati, Bradley Rey, Ahmed Shariff Mohommed Faleel, Sandra Bardot, Celine Latulipe, and Pourang Irani. BezelGlide: Interacting with Graphs on Smartwatches with Minimal Screen Occlusion. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [OF14] Uran Oh and Leah Findlater. Design of and Subjective Response to On-Body Input for People with Visual Impairments. In *Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility*, ASSETS '14, pp. 115–122, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

- [OSOI12] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. iRing: Intelligent Ring Using Infrared Reflection. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 131–136, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [OT15] Yuya Okawa and Kentaro Takemura. Haptic-Enabled Active Bone-Conducted Sound Sensing. In *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15 Adjunct, pp. 87–88, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [PKHL20] Keunwoo Park, Daehwa Kim, Seongkook Heo, and Geehyuk Lee. MagTouch: Robust Finger Identification for a Smartwatch Using a Magnet Ring and a Built-in Magnetometer. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [PWS88] R. L. Potter, L. J. Weldon, and B. Shneiderman. Improving the Accuracy of Touch Screens: An Experimental Evaluation of Three Strategies. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '88, pp. 27–32, New York, NY, USA, 1988. Association for Computing Machinery.
- [RWJ⁺18] Gabriel Reyes, Jason Wu, Nikita Juneja, Maxim Goldshtein, W. Keith Edwards, Gregory D. Abowd, and Thad Starner. SynchroWatch: One-Handed Synchronous Smartwatch Gestures Using Correlation and Magnetic Sensing. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 4, pp. 1–26, 2018.
- [SRC05] Katie A. Siek, Yvonne Rogers, and Kay H. Connelly. Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs. In *Human-Computer Interaction - INTERACT 2005*, pp. 267–280, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer Berlin Heidelberg.
- [SV16] Stefan Schneegass and Alexandra Voit. GestureSleeve: Using Touch Sensitive Fabrics for Gestural Input on the Forearm for Controlling Smartwatches. In *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '16, pp. 108–115, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [THH⁺16] Hsin-Ruey Tsai, Min-Chieh Hsiu, Jui-Chun Hsiao, Lee-Ting Huang, Mike Chen, and Yi-Ping Hung. TouchRing: Subtle and Always-Available Input Using a Multi-Touch Ring. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct*, MobileHCI '16, pp. 891–898, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

- [WKTA15] Mathias Wilhelm, Daniel Krakowczyk, Frank Trollmann, and Sahin Albayrak. eRing: Multiple Finger Gesture Recognition with One Ring Using an Electric Field. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor-Based Activity Recognition and Interaction*, iWOAR '15, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [WLKA20] Mathias Wilhelm, Jan-Peter Lechler, Daniel Krakowczyk, and Sahin Albayrak. Ring-Based Finger Tracking Using Capacitive Sensors and Long Short-Term Memory. In *Proceedings of the 25th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '20, pp. 551–555, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [Wol13] Katrin Wolf. Ubiquitous Grasp Interfaces. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '13, pp. 377–378, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [WRRD16] Hongyi Wen, Julian Ramos Rojas, and Anind K. Dey. Serendipity: Finger Gesture Recognition Using an Off-the-Shelf Smartwatch. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 3847–3851, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [WS17] Martin Weigel and Jürgen Steimle. DeformWear: Deformation Input on Tiny Wearable Devices. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 2, pp. 1–23, 2017.
- [WSKR13] Katrin Wolf, Robert Schleicher, Sven Kratz, and Michael Rohs. Tickle: A Surface-Independent Interaction Technique for Grasp Interfaces. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '13, pp. 185–192, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [YGWF12] Xing-Dong Yang, Tovi Grossman, Daniel Wigdor, and George Fitzmaurice. Magic Finger: Always-Available Input through Finger Instrumentation. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 147–156, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [YLB⁺20] Hui-Shyong Yeo, Juyoung Lee, Andrea Bianchi, Alejandro Samboy, Hideki Koike, Woontack Woo, and Aaron Quigley. WristLens: Enabling Single-Handed Surface Gesture Interaction for Wrist-Worn Devices Using Optical Motion Sensor. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference*, AHs '20, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [YMI18] Wataru Yamada, Hiroyuki Manabe, and Daizo Ikeda. CamTrackPoint: Camera-Based Pointing Stick Using Transmitted Light through Finger. In *Proceedings of the 31st*

Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18, pp. 313–320, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

- [ZBR⁺16] Cheng Zhang, AbdelKareem Bedri, Gabriel Reyes, Bailey Bercik, Omer T. Inan, Thad E. Starner, and Gregory D. Abowd. TapSkin: Recognizing On-Skin Input for Smartwatches. In *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, pp. 13–22, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [ZLZ⁺19] Yuliang Zhao, Chao Lian, Xueliang Zhang, Xiaopeng Sha, Guangyi Shi, and Wen J. Li. Wireless IoT Motion-Recognition Rings and a Paper Keyboard. Vol. 7, pp. 44514–44524. IEEE Access, 2019.
- [ZWK⁺17] Cheng Zhang, Anandghan Waghmare, Pranav Kundra, Yiming Pu, Scott Gilliland, Thomas Ploetz, Thad E. Starner, Omer T. Inan, and Gregory D. Abowd. FingerSound: Recognizing Unistroke Thumb Gestures Using a Ring. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 3, pp. 1–19, 2017.
- [ZXW⁺18] Cheng Zhang, Qiuyue Xue, Anandghan Waghmare, Ruichen Meng, Sumeet Jain, Yizeng Han, Xinyu Li, Kenneth Cunefare, Thomas Ploetz, Thad Starner, Omer Inan, and Gregory D. Abowd. FingerPing: Recognizing Fine-Grained Hand Poses Using Active Acoustic On-Body Sensing. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

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. Harutoshi Kokubu, Koki Tominaga, Buntarou Shizuki. One-Handed Control for Smartwatches Using Thumb Gestures to Ring. The 6th Asian CHI Symposium (Asian CHI Symposium 2022), April 2022, pp. 30–32.

- 査読なし国内会議論文

1. 國分晴利, 富永浩暉, 志築文太郎. 指輪型デバイスに対する親指ジェスチャを用いたスマートウォッチ向け片手操作手法. 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 (WISS2021), 日本ソフトウェア科学会, 2021 年 12 月, 3 pages.
2. 國分晴利, 志築文太郎. 指輪型デバイスに対する親指スワイプジェスチャの識別. 第 30 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 (WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2022 年 12 月.

その他論文

- 査読あり国内会議論文

1. 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

1. 加藤進吾, 國分晴利, 志築文太郎. 人差し指のホバーを利用した仮名文字入力手法の提案. 第 30 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 (WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2022 年 12 月, 3 pages.

2. 小西智樹, 角田陸, 國分晴利, 久保勇貴, 志築文太郎. アクティブ音響センシングを用いた手指の関節角度推定. 情報処理学会研究報告, 第 2023-HCI-201 巻, 21 号, 情報処理学会, 2023 年 1 月, 5 pages.

付 録A 実験に用いたアンケート

本研究において実験に用いたアンケート用紙を示す。

A.1 評価実験2におけるアンケート

実験後アンケート

実験に関するご意見をお聞かせください。

*必須

1. 氏名 *

2. 性別 *

1つだけマークしてください。

- ☐ 男性
☐ 女性
☐ その他

3. 年齢 *

4. 利き手 *

1つだけマークしてください。

- ☐ 右利き
☐ 左利き
☐ 両利き

5. スマートウォッチの使用経験 *

1つだけマークしてください。

- ☐ 10年以上
- ☐ 5年以上
- ☐ 3年以上
- ☐ 1年以上
- ☐ 半年以上
- ☐ 1か月以上
- ☐ 使用したことがない

6. スマートウォッチの利用頻度 *

1つだけマークしてください。

- ☐ 毎日
- ☐ 2, 3日おき
- ☐ 1週間おき
- ☐ 1か月おき
- ☐ 1年に数回
- ☐ 利用したことがない

7. 感想, ご意見などがあればお願いします。 *

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

Google フォーム

A.2 評価実験3におけるアンケート

実験後アンケート2

実験に関するご意見をお聞かせください。

*必須

1。 氏名 *

2。 性別 *

1つだけマークしてください。

☐ 男性

☐ 女性

☐ その他

3。 年齢 *

4。 利き手 *

1つだけマークしてください。

☐ 右利き

☐ 左利き

☐ 両利き

5. スマートウォッチの使用経験 *

1つだけマークしてください。

- ☐ 10年以上
- ☐ 5年以上
- ☐ 3年以上
- ☐ 1年以上
- ☐ 半年以上
- ☐ 1か月以上
- ☐ 使用したことがない

6. スマートウォッチの利用頻度 *

1つだけマークしてください。

- ☐ 毎日
- ☐ 2, 3日おき
- ☐ 1週間おき
- ☐ 1か月おき
- ☐ 1年に数回
- ☐ 利用したことがない

7. 良かった点 *

8. 悪かった点 *

9. その他, ご意見があればお願いします。

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

Google フォーム

付 録 B 各参加者の識別精度を示す混同行列

評価実験 3 において得られた各参加者の識別精度を表す混同行列を付録として掲載する.

leave-one-participant-out 交差検証においては, 参加者から収集したデータを参加者毎の 10 個に分割した. 参加者 P1-P10 のそれぞれのデータを検証データに用いた際の混同行列を表 B.1-B.10 に示す.

表 B.1: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P1 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	90.00%	0.00%	0.00%	10.00%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	84.21%	10.53%	0.00%	5.26%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.2: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P2 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	94.74%	5.26%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	95.00%	0.00%	5.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	5.00%	0.00%	95.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.3: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P3 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	85.00%	0.00%	0.00%	15.00%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	45.00%	55.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	42.11%	5.26%	52.63%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.4: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P4 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	90.00%	0.00%	0.00%	10.00%	0.00%
	Swipe Down	5.26%	84.21%	10.53%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.5: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P5 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	66.67%	0.00%	0.00%	0.00%	33.33%
	Swipe Down	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	75.00%	25.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.6: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P6 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Down	10.00%	85.00%	0.00%	0.00%	5.00%
	Swipe Left	5.00%	70.00%	25.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	30.00%	0.00%	0.00%	70.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.7: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P7 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	90.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.00%
	Swipe Down	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	5.00%	95.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.8: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P8 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Down	12.50%	68.75%	18.75%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	5.26%	15.79%	78.95%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	30.00%	0.00%	0.00%	70.00%	0.00%
	Return	5.26%	0.00%	10.53%	0.00%	84.21%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.9: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P9 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	89.47%	0.00%	0.00%	10.53%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	94.44%	5.56%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				

表 B.10: 評価実験 3 における leave-one-participant-out 交差検証にて得られた, P10 のデータを検証データとした際の混同行列.

正 解 ラ ベ ル	Swipe Up	80.00%	0.00%	0.00%	20.00%	0.00%
	Swipe Down	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Swipe Left	0.00%	0.00%	85.71%	14.29%	0.00%
	Swipe Right	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
	Return	0.00%	0.00%	26.67%	26.67%	46.67%
		Swipe Up	Swipe Down	Swipe Left	Swipe Right	Return
		推論ラベル				