

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

スマートフォン背面における人差し指を用いた
入力拡張手法

清 佑輔

指導教員 志築 文太郎

2020年2月

概要

タッチスクリーンを備えたモバイル端末であるスマートフォンは、タッチジェスチャを用いて操作される。しかしながら、片手使用時には複数本の指を用いたタッチジェスチャが難しく、両手使用時に比べてタッチ入力の種類が少なくなる。また、スマートフォンへの入力は主にタッチスクリーン上にて行われるタッチ入力であるため、手および指によって画面が遮られる可能性がある。本研究では、スマートフォンを持つ手の人差し指がスマートフォンを持ったまま動かせる点に着目し、スマートフォン背面における人差し指の向きおよび動作を用いた入力拡張手法を検討する。本手法では、人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャの組み合わせを入力に用いることにより、片手使用時におけるタッチ入力を拡張する。また、人差し指のスマートフォン背面へのタッチおよび曲げ伸ばしジェスチャを入力に用いることにより、スマートフォン背面への入力領域の拡張を行う。本研究では、入力拡張手法の実現のために、指輪型デバイスおよびスマートフォンを用いた試作システムの実装を行った。背面に対するタッチの認識精度を計測する実験にて、この試作システムは平均 94.3%の精度にて背面タッチを認識可能であることが分かった。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	1
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	スマートフォンへの入力拡張手法	3
2.1.1	タッチ入力を拡張する手法	3
2.1.2	背面インタラクション手法	4
2.2	ジェスチャ認識のための手指トラッキング手法	4
2.3	スマートフォンの把持姿勢の認識手法	5
第3章	手法	6
3.1	手法1：人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャを組み合わせる手法	6
3.1.1	人差し指の向きを用いたタッチ入力拡張	6
3.1.2	人差し指の動作を用いたタッチ入力拡張	6
3.2	手法2：人差し指の向きおよび動作から認識したジェスチャを入力に用いる手法	8
3.2.1	スマートフォン背面へのタッチによる入力	9
3.2.2	スマートフォン背面上の曲げ伸ばしジェスチャによる入力	9
第4章	応用例	10
4.1	手法1の応用例	10
4.1.1	ズームイン・ズームアウト	10
4.1.2	ボリュームの操作	10
4.2	手法2の応用例	12
4.2.1	ランチャメニューの操作	12
4.2.2	メディアプレイヤーの操作	12
第5章	試作システム1	14
5.1	ハードウェア設計	14
5.2	片手使用の認識方法	14

5.3	片手タッチ入力拡張方法	17
5.4	課題	17
5.4.1	センサに関する課題	17
5.4.2	デモンストレーション発表をした際に得た課題	17
第 6 章	試作システム 2	19
6.1	ハードウェア設計	19
6.2	人差し指ジェスチャの認識方法	21
6.3	パイロットスタディ	22
6.3.1	設計	22
	実験条件 1	23
	実験条件 2	24
6.3.2	結果	24
	実験条件 1	24
	実験条件 2	25
6.3.3	考察	25
第 7 章	議論および今後の課題	26
7.1	試作システムの改善	26
7.2	ジェスチャ認識精度	26
7.3	ユーザテスト	27
7.4	さらなる入力拡張	27
第 8 章	おわりに	28
	謝辞	29
	参考文献	30
	著者論文リスト	35
付 録 A	指輪型デバイスの指輪モデル設計図	36
A.1	試作システム 1 に用いた指輪の三面図	37
A.2	試作システム 2 に用いた指輪の三面図	38

目 次

3.1	手法1の概観. 本手法では, 人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャを組み合わせる. a) 親指を用いたタッチジェスチャ. b) 親指を用いたタッチジェスチャと組み合わせる人差し指の向き. c) 親指を用いたタッチジェスチャと組み合わせる人差し指の動作.	7
3.2	手法2の概観. 本手法は, スマートフォンの a) ポートレートモードにおける片手持持時および b) ランドスケープモードにおける両手持持時に人差し指ジェスチャ入力を可能にする. 本手法では, 人差し指によるスマートフォン背面に対するタッチおよび曲げ伸ばし動作をジェスチャとして利用する.	8
4.1	地図アプリケーションにおける, スワイプジェスチャを拡張したズームイン操作. ユーザは人差し指を伸ばした状態における親指によるスワイプダウンジェスチャによって, 地図をズームインすることができる.	11
4.2	ロングタップジェスチャを拡張したボリュームの操作による音量の調整. ユーザは親指のロングタップ時に, 人差し指の曲げ伸ばし動作によって, 連続的な値を入力することができる.	11
4.3	オブジェクトの色を選択するランチャメニュー. ユーザは, a) スマートフォン背面をタッチしてメニューを表示し, b) 人差し指の曲げ伸ばし動作によりコンテンツをスクロールし, c) スマートフォンを動かしてしてコンテンツを選択する.	12
4.4	メディアプレイヤーにおける手法2を用いた操作. a) スマートフォン背面へのタッチし, さらに離すことにより, 再生および一時停止の操作を行う. b) 左手人差し指にてスマートフォン背面をタッチしながら, 右手人差し指にて背面タッチを実行することにより, 次のビデオに移動する. c) 右手人差し指にてスマートフォン背面をタッチしながら, 左手人差し指にて背面タッチを実行することにより, 巻き戻しの操作を行う.	13
5.1	試作システム1の概要.	15
5.2	試作システム1において使用する指輪型デバイス. a) 3Dプリントした指輪. b) 人差し指に指輪型デバイスが装着された様子.	15
5.3	端末の向きと人差し指の向きを表すベクトル. a) 人差し指の甲における単位法線ベクトル \mathbf{V}_1 . b) スマートフォンの画面に対する単位法線ベクトル \mathbf{V}_2 . c) 人差し指とスマートフォン間の角度 θ	16

5.4	片手使用状態を認識する様子.	16
6.1	試作システム2の概要.	20
6.2	試作システム2において作製した指輪型デバイス. a) 3D プリントした指輪. b) 人差し指に指輪型デバイスが装着された様子.	20
6.3	パイロットスタディにおけるスマートフォン背面タッチタスクの様子.	22
6.4	パイロットスタディにて, 真値を得るためにスマートフォン背面に装着した静電容量式のタッチセンサ.	23

表 目 次

6.1	実験条件 1 における右手人差し指によるタッチ認識精度の混同行列.	24
6.2	実験条件 1 における左手人差し指によるタッチ認識精度の混同行列.	24
6.3	実験条件 2 のタスク 1 におけるタッチ認識精度の混同行列.	25
6.4	実験条件 2 のタスク 2 におけるタッチ認識精度の混同行列.	25
6.5	実験条件 2 のタスク 3 におけるタッチ認識精度の混同行列.	25
6.6	実験条件 2 のタスク 4 におけるタッチ認識精度の混同行列.	25

第1章 序論

本論文は，スマートフォン背面における人差し指を用いて，スマートフォンへの入力を拡張する手法を示す．本章においては，まず背景としてスマートフォンへの入力における課題を示す．次に本研究の目的とアプローチを示す．その後，本研究の貢献を示し，最後に本論文の構成を示す．

1.1 背景

タッチスクリーンを備えたモバイル端末であるスマートフォンは，タップやスワイプなどのタッチジェスチャを用いて操作される．さらに，複数本の指によるタッチを検知できるマルチタッチスクリーンを搭載することにより，ユーザは複数本の指を用いたマルチタッチジェスチャによるタッチ入力を実行できる．ただし，マルチタッチジェスチャには両手を必要とするという課題がある [BLC⁺12]．そのため，スマートフォンを片手にて使用する際には，マルチタッチジェスチャの実行が難しい．よって，スマートフォン片手使用時は，両手使用時に比べてタッチ入力の種類は少なくなる．また，スマートフォンへの入力は主にタッチスクリーン上にて行われるタッチ入力であるため，タッチする指および手によって画面が遮られるという課題がある [YMI18, YWV⁺19]．この課題を解決するために，入力領域の拡張が求められている．以上のことから，スマートフォンへの入力の拡張が必要である．

1.2 目的とアプローチ

本研究の目的は，スマートフォンへの入力を拡張する，つまり，入力の種類を増やすことである．そこで，スマートフォンを持って使用する際に，スマートフォンを持ったまま，スマートフォン背面において人差し指が動かせる点に着目した．例えば，人差し指をスマートフォンから遠ざける動作やスマートフォン背面をタップする動作などが可能である．本研究にて検討する手法は，指輪型デバイスおよびスマートフォンを用いて取得した人差し指の向きおよび動作を利用する．本研究では，人差し指の向きおよび動作を親指のタッチジェスチャに組み合わせるシステム，および人差し指の向きおよび動作から認識したジェスチャを入力に用いるシステムを作製し，スマートフォンへの入力の拡張を試みた．

1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである。

- スマートフォン背面における人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャを組み合わせる手法の考案
- スマートフォン背面における人差し指の向きおよび動作から認識したジェスチャを入力に用いる手法の考案
- 2種類の手法の利用例の提示
- 2種類の手法を実現するための試作システムの実装および評価の結果

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第1章においては、本研究の背景、目的とアプローチ、および貢献を示す。第2章においては、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章においては、本研究にて検討する2種類の手法とそれぞれの入力方法について述べる。第4章においては、2種類の手法によって拡張された入力の応用例を示す。第5章においては、手法を実現するために作製した試作システムの実装と課題を示す。第6章においては、改良した試作システムの実装とシステムの性能に関する実験を示す。また、試作システムを用いたジェスチャ認識精度に関する実験を述べる。第7章においては、試作システムの改善点とジェスチャ認識について議論し、今後の課題を述べる。第8章においては、本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

本研究は，スマートフォンの背面およびその上部における人差し指の向きおよび動作を用いて，スマートフォンへの入力を拡張する研究である．本研究におけるシステムは，人差し指のトラッキングにより人差し指のジェスチャを認識する．また，スマートフォン片手使用時に入力を拡張するために，スマートフォンの持ち方（以降，把持姿勢）を認識する．本章では，スマートフォンへの入力拡張手法，ジェスチャ認識のための手指トラッキング手法，およびスマートフォンの把持姿勢の認識手法に関する研究と本研究との位置づけを述べる．

2.1 スマートフォンへの入力拡張手法

スマートフォンへの入力をより豊かにする入力拡張手法が提案されてきた．本節では，本研究に関連の深い，タッチ入力を拡張する手法および背面インタラクション手法を述べる．

2.1.1 タッチ入力を拡張する手法

The Fat Thumb [BLC⁺12] は，タッチスクリーン上の親指の接触面積を利用する手法である．この手法では，親指を用いたタッチ入力時に，接触面積に応じて入力モードを切り替える．Heo ら [HGL14] は，ダブルタップを拡張した入力手法である Ta-tap を提案した．ユーザは，1度目のタップ地点から離れた地点にて2度目のタップを行うことにより，マルチタッチジェスチャに代わる入力を実行できる．Hakka ら [HIST19] は，スワイプ入力を拡張したタッチジェスチャである Bounded Swipe を提案した．Roth と Turner [RT09] は，ベゼルからのスワイプジェスチャである Bezel Swipe を提案した．また，Roudaut ら [RLG09] が提案した MicroRolls は，指をタッチスクリーン上にて転がすようなタッチジェスチャである．池松 ら [池松 18] は，スマートフォンを指に向けて動かす動作を用いたタッチ入力拡張手法を示した．Le ら [LKB⁺18] は，指によるタッチと手の平によるタッチの差異を認識することにより，手の平によるタッチを新しい入力として用いる手法を示した．また，Hinckley と Song [HS11] は，スマートフォンの傾きおよび動作をタッチジェスチャに組み合わせるインタラクション手法を提案した．

これらの手法は，タッチジェスチャに使用する手指およびスマートフォンの特徴を利用する．一方で，本研究においては，スマートフォンの把持に使用される人差し指のジェスチャの実行可能性に注目した．本研究にて検討する手法は，タッチ入力を拡張するために，スマートフォン背面およびその上部における人差し指の向きおよび動作を利用する．

2.1.2 背面インタラクション手法

CamTrackPoint [YMI18] は、3D プリントされたリングをスマートフォンのカメラのベゼルに取り付けたインタフェースである。このインタフェースへの入力、カメラを用いたセンシングにより認識された、リングに対する人差し指の動作に基づく。Hakoda ら [HFST15] は、スマートフォンの背面にフォトフレクタを埋め込んだ穴を配置し、人差し指にてその穴を覆うインタラクションを可能にした。LensGesture [XHW13] はスマートフォンのカメラを覆う操作を認識する。このアプローチを用いて、システムはカメラ上における人差し指によるスワイプジェスチャも認識可能である。Back-Mirror [WFZ16] はスマートフォンのカメラと反射鏡を用いて、スマートフォン背面における指のジェスチャを認識する。ジェスチャの認識は、スマートフォン背面に取り付けた視覚的パターンに基づく。LucidTouch [WFB⁺07] は前面スクリーンから背面側を見ることができるモバイル端末である。この端末は、背面におけるタッチジェスチャにより操作可能である。ユーザは、前面スクリーンから背面インタラクションを見通すことができる。Seipp と Devlin [SD14] は、人差し指、中指、および親指を用いてスマートフォン背面および側面を叩く操作を認識する手法を示した。叩く操作の認識には、スマートフォンに内蔵されたマイクとジャイロセンサを用いる。

これらのインタラクションは、端末背面の2次元領域にて行われる。一方で、本研究における手法は、人差し指の向きおよび動作を認識するために、端末背面上の3次元領域を利用する。

2.2 ジェスチャ認識のための手指トラッキング手法

ジェスチャを認識するために手指の姿勢および動作をトラッキングする手法が提案されてきた。既存の手法の例として、カメラを用いるもの [KHI⁺12, CSH⁺14, SSP⁺14, YWV⁺19] やスマートウォッチ内のセンサを用いるもの [WKH⁺16, WRRD16]、慣性計測装置を用いるもの [NB15, GYB18, LCO⁺18, GJY⁺19, GYL⁺19] が挙げられる。これらの中で本研究における手法に最も関連する手法は、Touch+Finger [LCO⁺18] である。この手法では、ジェスチャ認識のために指のトラッキングを利用する。この認識されたジェスチャとタッチ入力を組み合わせることにより、タブレット端末におけるタッチ入力の拡張を可能にする。ユーザは、指のトラッキングのために、慣性計測装置を取り付けた指輪型デバイスを装着する。ジェスチャは、タブレット端末に対する人差し指のタッチ入力時に、残りの指にて実行される。

本研究では、Touch+Finger [LCO⁺18] と同様に慣性計測装置を取り付けた指輪型デバイスを使用する。ただし、Touch+Finger [LCO⁺18] にてトラッキングされる指は親指および中指である一方で、本研究ではスマートフォン背面に位置する人差し指をトラッキングの対象とする。

2.3 スマートフォンの把持姿勢の認識手法

インタラクションのコンテキストとして使用するため，スマートフォンの把持姿勢を認識する手法が提案されてきた．GripSense [GWP12] は，スマートフォンの把持姿勢の認識およびタッチの圧力の検知を可能にしたシステムである．このシステムは把持姿勢の認識に，スマートフォンのタッチスクリーン，内蔵センサ，および振動モータを用いる．iRotateGrasp [CLW⁺13] は，背面および側面に 44 個の静電容量式センサを取り付けた端末を用いるシステムである．このシステムでは，端末に触れる手の位置を認識することにより把持姿勢を識別する．Hand-See [YWV⁺19] は，直角プリズムミラーを取り付けたフロントカメラを用いるセンシング技術である．この技術は，スマートフォンを把持するユーザの手を撮影することにより，把持姿勢および把持に用いられる指の位置および種類の認識を可能にした．WhichHand [LAC⁺16] は，スマートフォンとスマートウォッチのセンサから得た，それぞれの向きを使用してスマートフォンを把持する手を認識するシステムである．このシステムは，認識された手に合わせてインタフェースを提供する．

本研究では，スマートフォンの片手使用を認識するために，WhichHand [LAC⁺16] に近い手法を用いる．WhichHand [LAC⁺16] がスマートフォンとスマートウォッチの向きを用いる一方で，本研究では，スマートフォンと人差し指の向きを用いる．

第3章 手法

本研究においては，スマートフォンへの入力を拡張するため，次の2つの手法を検討する．

手法1

人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャを組み合わせる手法

手法2

人差し指の向きおよび動作から認識したジェスチャを入力に用いる手法

本章ではこれらの手法を述べる．

3.1 手法1：人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャを組み合わせる手法

スマートフォンの片手使用時に用いられるタッチジェスチャとして，タップ，スワイプ，およびロングタップが挙げられる．手法1として，タッチスクリーンに対して行われるこれらのタッチジェスチャと，スマートフォン背面における人差し指の向きおよび動作を組み合わせる手法を検討する（図3.1）．この手法により，スマートフォン片手使用時に実行可能な親指タッチジェスチャに，複数の入力または連続値の入力を割り当てることができる．以下に組み合わせによるタッチ入力拡張を述べる．

3.1.1 人差し指の向きを用いたタッチ入力拡張

手法1は親指によるタッチジェスチャ（図3.1a）と人差し指の向き（図3.1b）を組み合わせる．本手法によって，ユーザは人差し指の向きを切り替えることにより，同じタッチジェスチャから複数の入力を選択できる．例えば，人差し指がスマートフォンに触れている状態ならば通常の入力，人差し指がスマートフォンから離れている状態ならば拡張された入力ができる．

3.1.2 人差し指の動作を用いたタッチ入力拡張

手法1は親指によるタッチジェスチャ（図3.1a）と人差し指の動作（図3.1c）を組み合わせる．本手法によって，ユーザはスマートフォン背面における人差し指の曲げ伸ばし動作によ

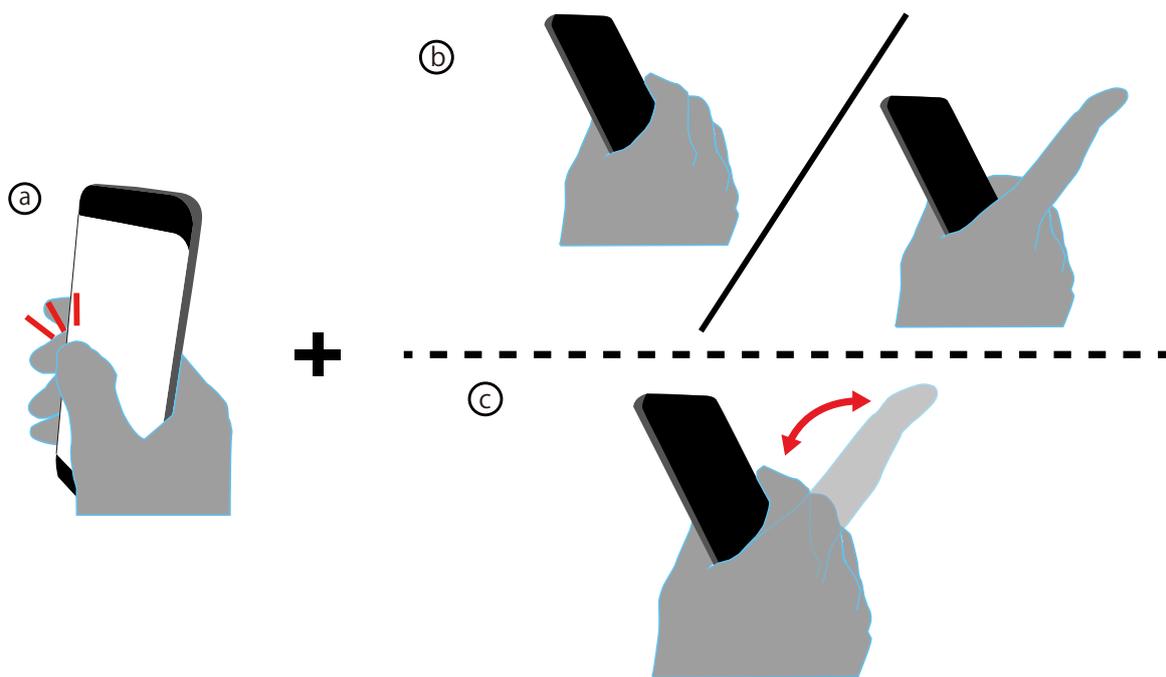


図 3.1: 手法1の概観. 本手法では, 人差し指の向きおよび動作と親指によるタッチジェスチャを組み合わせる. a) 親指を用いたタッチジェスチャ. b) 親指を用いたタッチジェスチャと組み合わせる人差し指の向き. c) 親指を用いたタッチジェスチャと組み合わせる人差し指の動作.

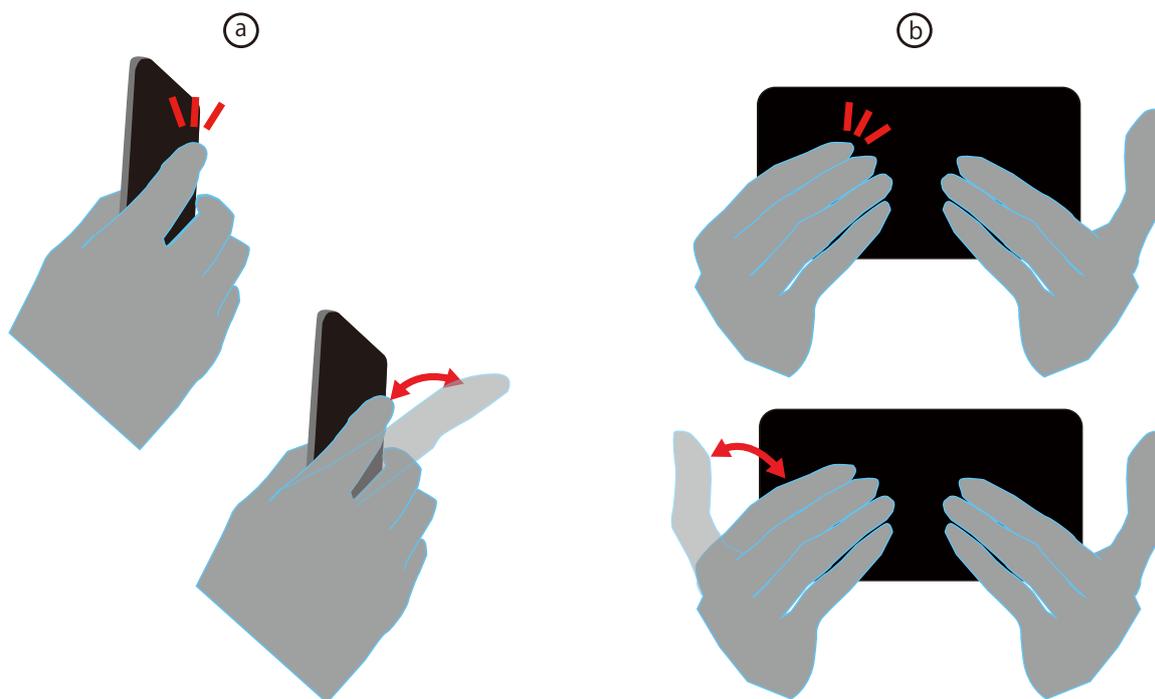


図 3.2: 手法 2 の概観. 本手法は, スマートフォンの a) ポートレートモードにおける片手持持時および b) ランドスケープモードにおける両手持持時に人差し指ジェスチャ入力を可能にする. 本手法では, 人差し指によるスマートフォン背面に対するタッチおよび曲げ伸ばし動作をジェスチャとして利用する.

り, 連続値の入力が可能である. 例えば, ユーザインタフェース (User Interface, 以降, UI) 部品のボタンへのロングタップ中に人差し指の曲げ伸ばし動作を行うことにより, スライドに代わる連続値の入力ができる.

3.2 手法 2: 人差し指の向きおよび動作から認識したジェスチャを入力に用いる手法

スマートフォンを持って使用する時, ユーザは片手もしくは両手にてスマートフォンを把持する. 本研究では, スマートフォン背面に位置する人差し指によるジェスチャの実行可能性に注目し, 手法 2 として, スマートフォン背面へのタッチおよびスマートフォン背面上の曲げ伸ばし動作を入力に用いる手法を検討する (図 3.2). 手法 1 は親指によるタッチジェスチャを必要とする一方で, 本手法ではスマートフォン背面における人差し指のジェスチャのみの入力であるため, 画面を遮ることなくスマートフォンを使用することができる. また, 本手法により, スマートフォンのポートレートモードにおける片手持持時 (図 3.2a), およびランドスケープモードにおける両手持持時 (図 3.2b) に入力の拡張が可能である. 以下にス

スマートフォン背面へのタッチによる入力およびスマートフォン背面上の曲げ伸ばしジェスチャによる入力を述べる。

3.2.1 スマートフォン背面へのタッチによる入力

手法2は、入力に用いるジェスチャとして、スマートフォン背面へのタッチを利用する。人差し指によるタッチは、人差し指およびスマートフォンの向きの内積に基づいて認識する。背面へのタッチによる入力は、UI部品を必要としない操作に用いられる。

3.2.2 スマートフォン背面上の曲げ伸ばしジェスチャによる入力

手法2は、入力に用いるジェスチャとして、スマートフォン背面上の曲げ伸ばしジェスチャを利用する。人差し指の曲げ伸ばしジェスチャは、人差し指とスマートフォン間の角度の変化に基づいて認識する。手法1においては、曲げ伸ばし動作による入力の開始および終了が親指によるスクリーンへのタッチジェスチャに依存していた。本手法における曲げ伸ばしジェスチャによる入力は、スマートフォン背面へのタッチをトリガとして開始される。また、ユーザがスマートフォンを素早く動かすこと（例えば、振ることや傾けること）によって、このジェスチャ入力は完了される。よって、人差し指のジェスチャのみで連続値の入力を可能にする。

第4章 応用例

本章では手法1および手法2を用いた応用例を示す。

4.1 手法1の応用例

手法1は、スマートフォンの片手使用において、人差し指の向きおよび動作によるタッチ入力の拡張を行う。手法1の応用例として、ズームイン・ズームアウトおよびボリュームの操作を挙げる。

4.1.1 ズームイン・ズームアウト

親指によるスワイプジェスチャに本手法を適用することにより、通常ならばピンチジェスチャに割り当てられる入力がスワイプジェスチャにより実行可能になる(図4.1)。地図アプリケーションにおいて、ユーザは人差し指を伸ばした状態にて、スワイプジェスチャを実行することにより地図をズームインまたはズームアウトすることができる。また、人差し指を曲げた状態にて、スワイプジェスチャを実行することにより、通常の操作である地図のスクロールができる。

片手使用時にピンチ入力を実行するためには、人差し指をスマートフォンの背面から前面に移動させる把持姿勢の変更が必要となる。この入力拡張により、ユーザは把持姿勢を大きく変えることなく、スマートフォンの片手使用時にズームインまたはズームアウトの操作を行うことができる。

4.1.2 ボリュームの操作

親指によるロングタップジェスチャに本手法を適用することにより、ユーザは人差し指の曲げ伸ばし動作による連続的な値の入力ができる。この入力拡張は、音量や画面の輝度などを調整する際のボリュームの操作を可能にする(図4.2)。

既存のボリュームの操作は、占有する画面領域が大きいUI部品である1次元のスライダを利用する。その一方で、この入力拡張は、比較的小さいUI部品から同等の入力を可能にする。

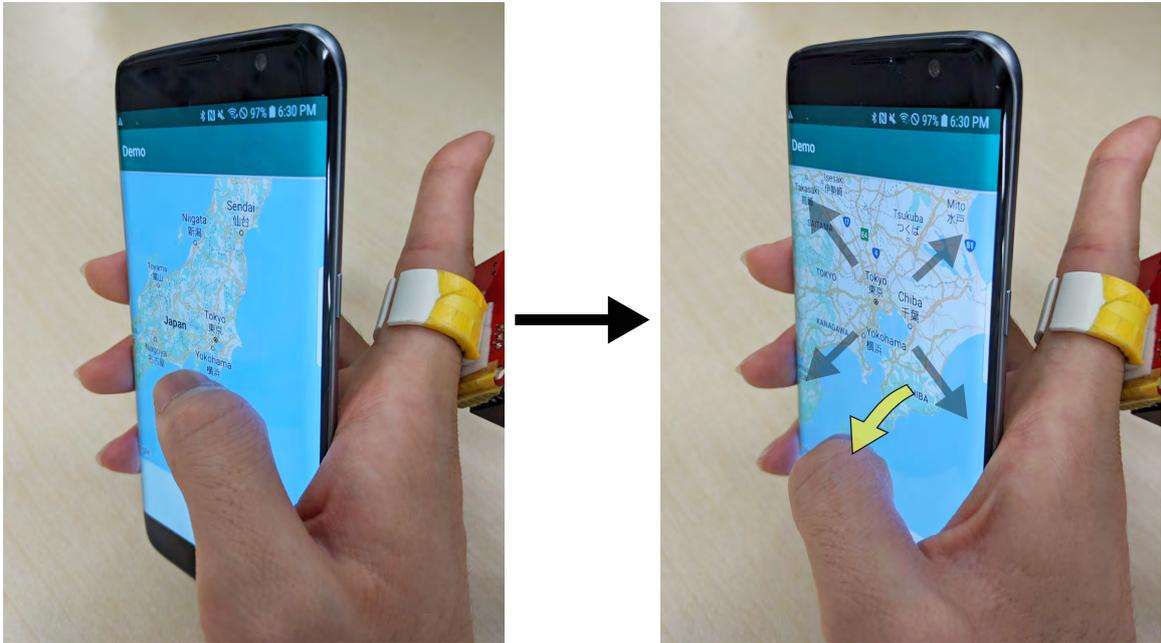


図 4.1: 地図アプリケーションにおける、スワイプジェスチャを拡張したズームイン操作. ユーザは人差し指を伸ばした状態における親指によるスワイプダウンジェスチャによって、地図をズームインすることができる.

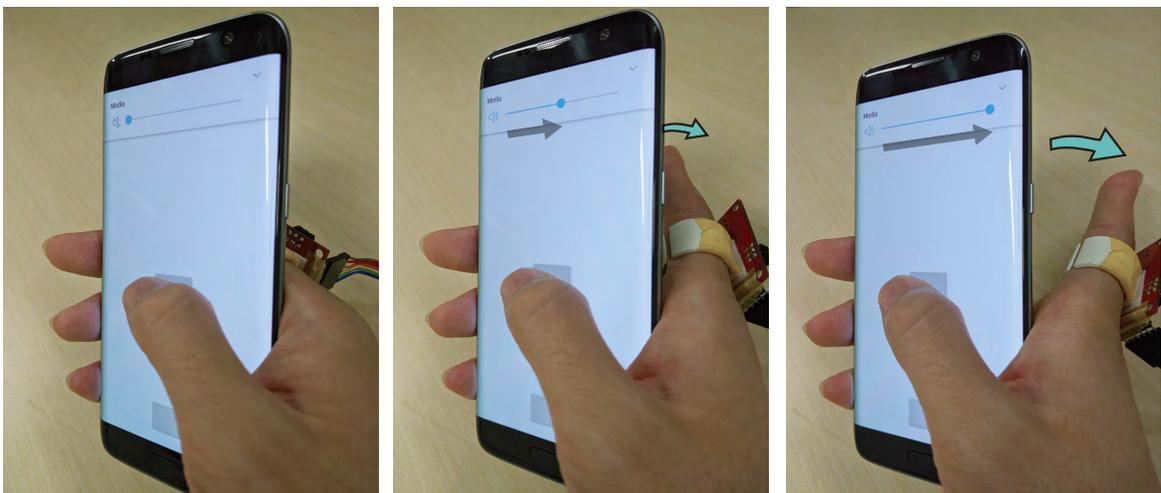


図 4.2: ロングタップジェスチャを拡張したボリュームの操作による音量の調整. ユーザは親指のロングタップ時に、人差し指の曲げ伸ばし動作によって、連続的な値を入力することができる.

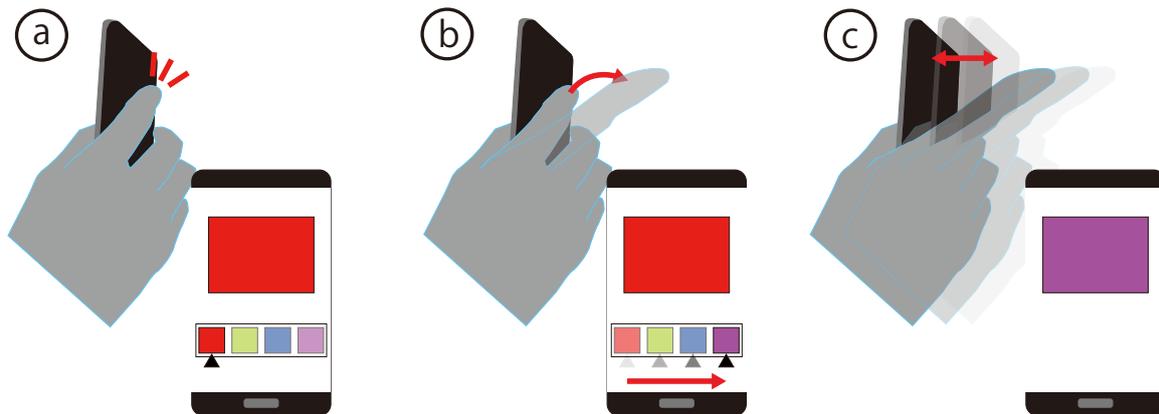


図 4.3: オブジェクトの色を選択するランチャメニュー. ユーザは, a) スマートフォン背面をタッチしてメニューを表示し, b) 人差し指の曲げ伸ばし動作によりコンテンツをスクロールし, c) スマートフォンを動かしてしてコンテンツを選択する.

4.2 手法2の応用例

手法2は, スマートフォン背面における, 人差し指の向きおよび動作から認識されたジェスチャを用いて入力を拡張する. 手法2の応用例として, ランチャメニューの操作およびメディアプレイヤーの操作を挙げる.

4.2.1 ランチャメニューの操作

本手法の応用例として, ランチャメニューの操作 (図 4.3) が挙げられる. ユーザは, スマートフォン背面へのタッチによりメニューを表示し, 人差し指の曲げ伸ばしジェスチャによりメニュー内のコンテンツをスクロールできる. コンテンツの選択は, スマートフォンを動かすことにより実行される. このメニューは常に表示される必要はなく, ユーザの任意のタイミングにて表示される. さらに, メニューの表示からコンテンツの選択までの間タッチスクリーンに対するタッチ入力を必要としないため, メニューを画面の任意のスペースに配置できる.

4.2.2 メディアプレイヤーの操作

ランドスケープモードにてコンテンツを再生するメディアプレイヤーの操作に, 本手法における背面タッチを利用することができる (図 4.4). 例えば, 動画を再生する場合, ユーザはスマートフォン背面へタッチし, さらに離すことにより, 再生および一時停止の操作を行うことができる. また, 左手人差し指にてスマートフォン背面をタッチしながら, 右手人差し指にて背面タッチを実行することにより, 次の動画に移動することができる. これらに加えて, 右手人差し指にてスマートフォン背面をタッチしながら, 左手人差し指にて背面タッチ

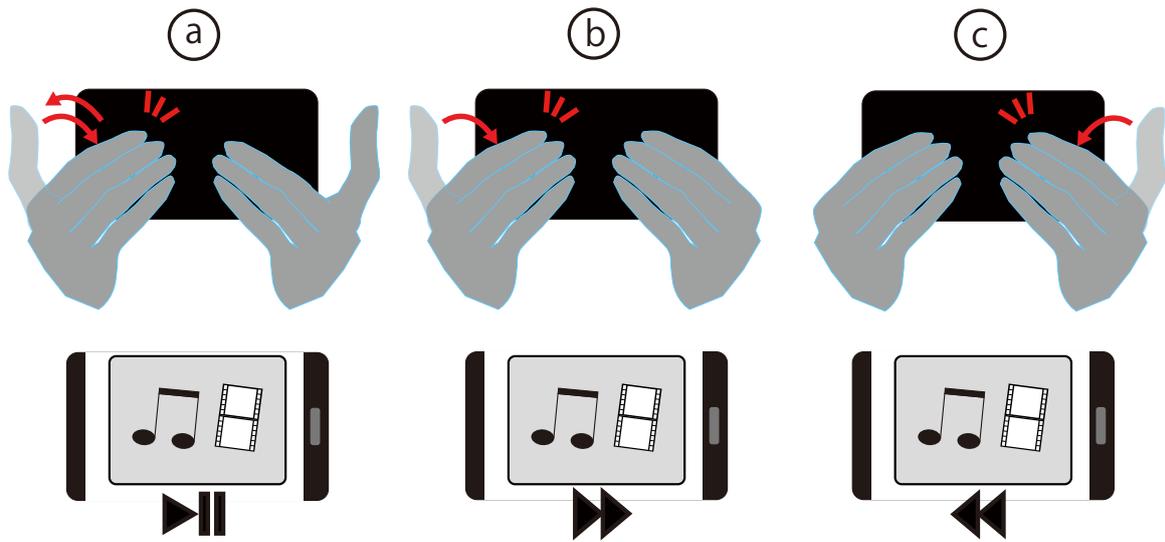


図 4.4: メディアプレイヤーにおける手法 2 を用いた操作. a) スマートフォン背面へのタッチし、さらに離すことにより、再生および一時停止の操作を行う. b) 左手人差し指にてスマートフォン背面をタッチしながら、右手人差し指にて背面タッチを実行することにより、次のビデオに移動する. c) 右手人差し指にてスマートフォン背面をタッチしながら、左手人差し指にて背面タッチを実行することにより、巻き戻しの操作を行う.

を実行した際には、動画は巻き戻される。本手法を用いた各種操作は、スマートフォンの背面にて実行されるジェスチャにて行われる。そのため、ユーザは、タッチ入力に使用する指によってコンテンツが表示されている画面を遮ることなく、操作が可能である。

第5章 試作システム1

手法1の実現のために、人差し指の向きおよび動作を認識し、タッチ入力と組み合わせるシステムを実装した。本システムを改良した試作システムとの区別のため、以降、本システムを試作システム1と呼称する。試作システム1の概要を図5.1に示す。本章では、試作システム1におけるハードウェア設計、片手使用の認識方法、タッチ入力拡張方法を述べる。また、本システムの課題について述べる。

5.1 ハードウェア設計

試作システム1においては、スマートフォンとして Samsung Galaxy S7 edge を用いた。本システムは、このスマートフォンに内蔵されたセンサを用いて、スマートフォンの3軸加速度および3軸磁束密度を取得する。さらに、これらのセンサ値に基づき、スマートフォンの回転角（ヨー角、ピッチ角およびロール角）が算出される。センサ値および回転角は Bluetooth を介して PC に送信される。

本システムでは、指輪型デバイスを使用する（図5.2）。指輪型デバイスは3Dプリントされた指輪（付録A.1）および慣性計測ユニット（Inertial Measurement Unit, 以降、IMU）センサボードから構成される。このIMUセンサボードは、両面テープを用いて指輪に固定される。ユーザは、IMUセンサボードが指の背面側に位置するように、指輪型デバイスを人差し指の付け根に装着する。本システムでは、IMUセンサボードとして SparkFun SEN-10736 を用いた。このIMUセンサボードは3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、3軸磁気センサおよびマイクロコンピュータ（Atmel ATmega328）を内蔵しており、マイクロコンピュータによる各センサ値の取得およびその処理が可能である。

本システムでは、IMUセンサボード上のセンサを用いて、3軸加速度および3軸磁束密度を取得し、指輪型デバイスの回転角（ヨー角、ピッチ角およびロール角）を算出する。これらのセンサ値および回転角は、USBシリアル通信にて20ミリ秒ごとにPCに送信される。

5.2 片手使用の認識方法

手法1は片手使用時におけるタッチ入力を対象としている。そのため、本システムでは、ユーザがスマートフォンを片手にて使用しているかを認識する。本システムは、スマートフォンの片手使用の認識に、スマートフォンに対する人差し指の向きを利用する。スマートフォンを片手にて使用する際、操作する手の人差し指はスマートフォンの背面に位置する。この

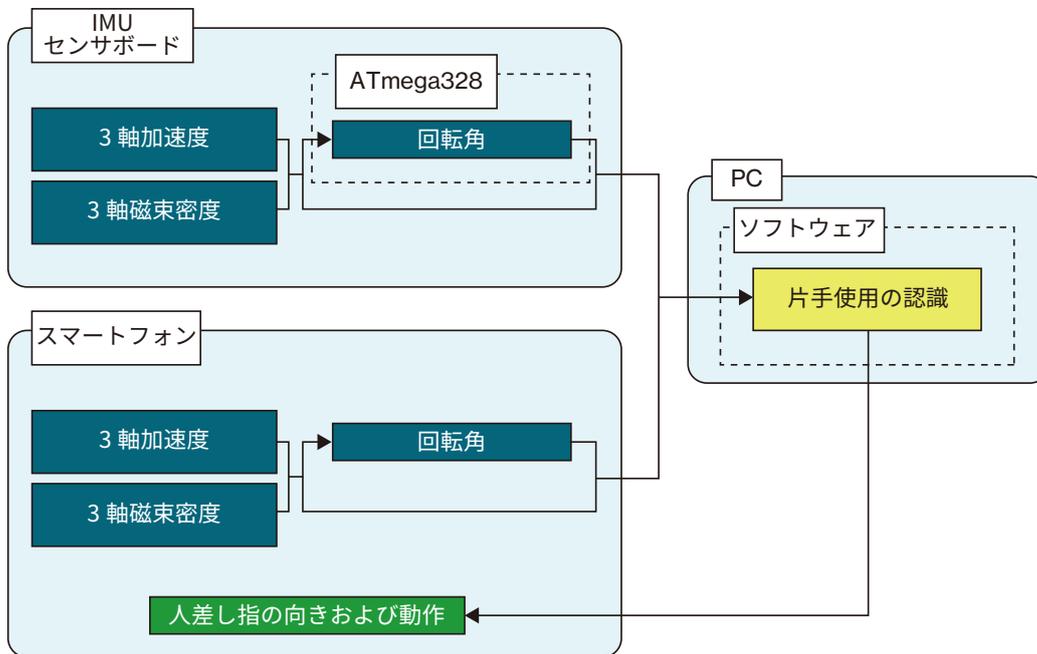


図 5.1: 試作システム 1 の概要.

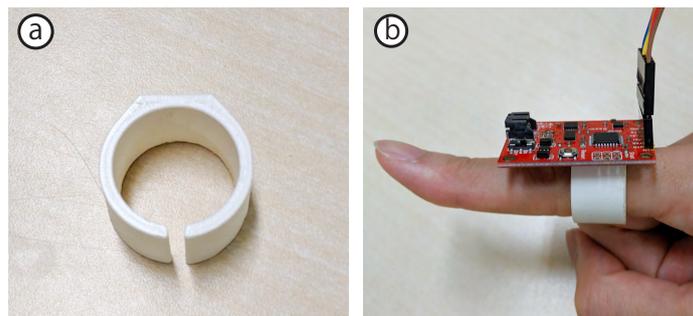


図 5.2: 試作システム 1 において使用する指輪型デバイス. a) 3D プリントした指輪. b) 人差し指に指輪型デバイスが装着された様子.

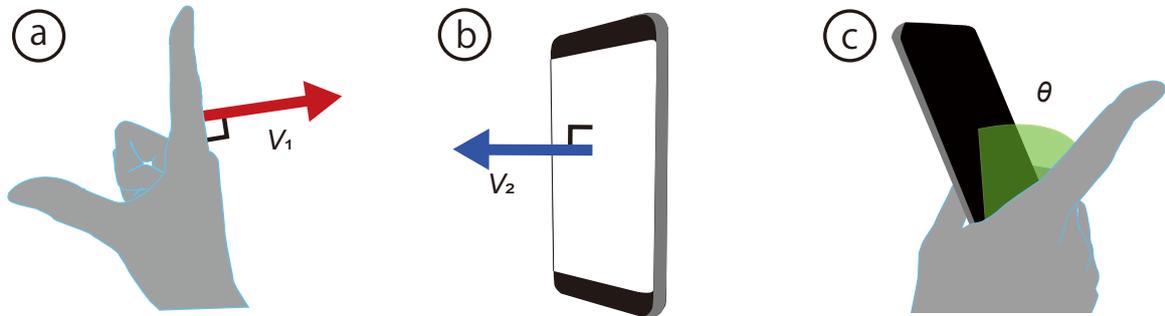


図 5.3: 端末の向きと人差し指の向きを表すベクトル. a) 人差し指の甲における単位法線ベクトル V_1 . b) スマートフォンの画面に対する単位法線ベクトル V_2 . c) 人差し指とスマートフォン間の角度 θ .

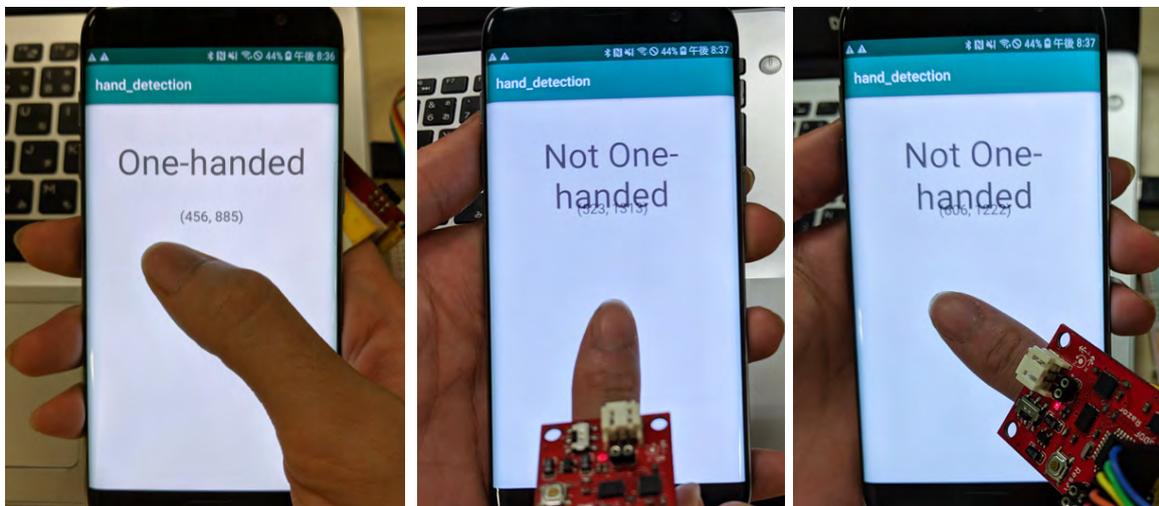


図 5.4: 片手使用状態を認識する様子.

とき、人差し指の甲における単位法線ベクトル V_1 (図 5.3a) の向きとスマートフォンの画面に対する単位法線ベクトル V_2 (図 5.3b) の向きは、スマートフォンの画面を基準に反対方向となる。そこで、指輪型デバイスおよびスマートフォンのそれぞれの回転角を基に V_1 および V_2 を算出し、それらのなす角により片手使用を認識するソフトウェアを作成した (図 5.4)。本ソフトウェアは、 V_1 と V_2 のなす角が 90 度以上ならば片手使用と判定する。

5.3 片手タッチ入力拡張方法

本システムにおける、片手タッチ入力の拡張は次の通りに行われる。まず、スマートフォン上のタッチスクリーンがタッチ入力を検知した際、片手使用を認識するソフトウェアが動作する。片手使用と認識された場合、プロトタイプシステムは、 V_1 と V_2 の内積値から人差し指の向き、 V_1 と V_2 の内積値の変化から人差し指の動作を認識する。認識された人差し指の向きおよび動作に基づき、拡張されたタッチ入力が提供される。また、片手使用と認識されなかった場合は、通常のタッチ入力として処理される。

5.4 課題

本システムを実装し、利用した際にいくつかの課題が得られた。本節では、本システムにて使用したセンサに関する課題、および、国内および国際学会にてデモンストレーション発表をした際に得た課題について述べる。

5.4.1 センサに関する課題

本システムにおいて、人差し指のヨー角を得るために IMU センサボード上の磁気センサを用いている。しかし、人差し指がスマートフォンの背面に近づく際、スマートフォン内部のスピーカに用いられる永久磁石の影響により、IMU センサボード上の磁気センサは正確な値を出力できない場合がある。また、人差し指およびスマートフォンのピッチ角およびロール角は、それぞれの加速度のみを用いて算出される。そのため、ユーザが人差し指およびスマートフォンを素早く動かした際やタップジェスチャを行った際にノイズが発生し、回転角が正しく取得できない場合がある。これらの課題を解決するために、回転角を補正する必要がある。

5.4.2 デモンストレーション発表をした際に得た課題

国内のワークショップである WISS2019 および国際学会である OzCHI2019 にて、試作システム 1 を用いたタッチ入力拡張手法のデモンストレーション発表を行った [清 19, SFS19]。多くの参加者が本システムを使用した際、ユーザの人差し指の長さまたは太さが使用感に影響する可能性があることがわかった。次の 2 つがその要因として考えられる。

- 人差し指の動作範囲がユーザの手の大きさに依存する
- 指輪の装着感がユーザの人差し指の太さに依存する

実際にシステムを使用したユーザの中でも、手が小さいユーザは、人差し指を大きく動かす必要があるため、安定した使用が困難であった。また、一部のユーザは、「指輪が合わないため、人差し指が動かしにくい」とコメントした。これらの問題を解決するために、ユーザごとに調整可能な指輪を設計する必要がある。

第6章 試作システム2

手法2の実現のために、人差し指の向きおよび動作から認識されたジェスチャを入力として用いるシステムを実装した。本システムは試作システム1を改良したものであり、以降、試作システム2と呼称する。本システムの概要を図6.1に示す。本章では、試作システム2におけるハードウェア設計、人差し指ジェスチャの認識方法を述べる。さらに、本システムを用いたスマートフォン背面タッチの認識精度調査として行った、パイロットスタディを述べる。

6.1 ハードウェア設計

試作システム2の実装において、試作システム1と同様に、スマートフォンとして Samsung Galaxy S7 edge を用いた。本システムでは、このスマートフォンに内蔵されたセンサを用いて、スマートフォンの3軸加速度、3軸角速度、および3軸磁束密度を取得する。これらのセンサ値は、ノイズ除去のため1€フィルタ [CRV12] を用いてフィルタリングされる。さらに、これらのセンサ値に基づき、スマートフォンの回転角（ヨー角、ピッチ角およびロール角）が算出される。試作システム1においては、加速度のみを用いてピッチ角およびロール角を算出するために、正しく取得できない場合があるという課題があった。本システムではこの課題に対処するために、スマートフォンの回転角導出を次の通りに行う。

1. 加速度センサを用いてスマートフォンの動作を検出する。
2. スマートフォンの動作が検出された場合、次の通りに回転角を導出する。
 - ピッチ角・ロール角
ジャイロセンサから得た角速度を回転角の時間変化量に変換し、積分することにより算出する。
 - ヨー角
磁気センサから得た地磁気の向きに基づき算出する。
3. スマートフォンの動作が検出されなかった場合、次の通りに回転角を導出する。
 - ピッチ角・ロール角
加速度センサから得た重力の向きに基づき算出する。
 - ヨー角
磁気センサから得た地磁気の向きに基づき算出する。

本システムに用いる指輪型デバイスを図6.2に示す。試作システム1における指輪型デバイスには、指輪の径が変更できないという課題があった。試作システム2にて新しく作製し

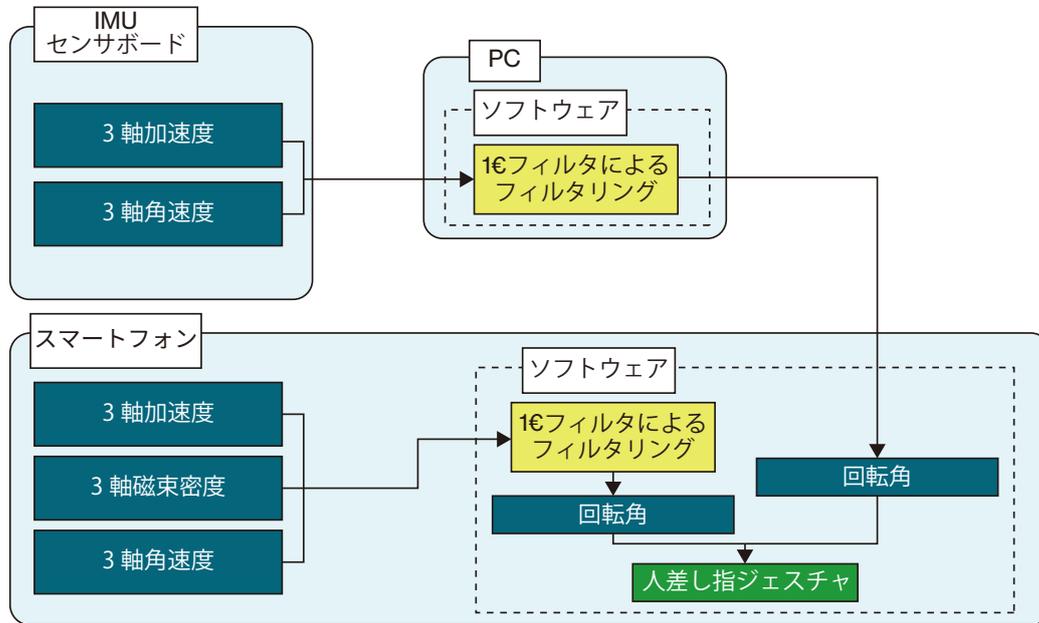


図 6.1: 試作システム 2 の概要.

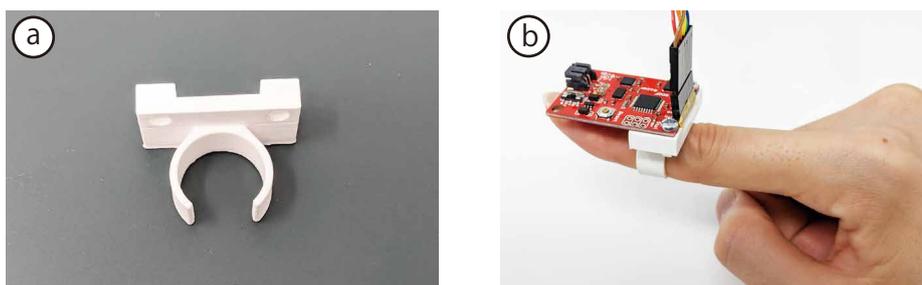


図 6.2: 試作システム 2 において作製した指輪型デバイス. a) 3D プリントした指輪. b) 人差し指に指輪型デバイスが装着された様子.

た指輪（付録 A.2）には、ネジを用いて IMU センサボードが固定される。この指輪型デバイスにおいては、IMU センサボードの取り付けおよび取り外しが容易であるため、複数のサイズの指輪を用意することにより、ユーザの指に合わせることが可能である。ユーザは、IMU センサボードが指の背面側に位置するように、指輪型デバイスを人差し指の中節に装着する。本システムに用いる IMU センサボードは、試作システム 1 と同様に SparkFun SEN-10736 である。

本システムでは、IMU センサボード上のセンサを用いて、3 軸加速度および 3 軸角速度を取得し、USB シリアル通信にて 20 ミリ秒ごとに PC に送信する。これらのセンサ値は PC 上のソフトウェアにて、1€ フィルタ [CRV12] を用いてフィルタリングされた後、Bluetooth シリアル通信にてスマートフォンに送信される。

さらに、スマートフォンにて、受信したセンサ値に基づき人差し指の回転角（ヨー角、ピッチ角およびロール角）が算出される。スマートフォンの回転角同様に、試作システム 1 においては、回転角が加速度に大きく依存するために、正しく算出できない場合があるという課題があった。さらに、スマートフォン内部のスピーカに用いられる永久磁石の影響により、IMU センサボード上の磁気センサは正確な値を出力できない場合がある。本システムではこの課題に対処するために、スマートフォンの回転角導出を次の通りを行う。

1. 加速度センサを用いて人差し指の動作を検出する。
2. 人差し指の動作が検出された場合、ヨー角、ピッチ角およびロール角は、ジャイロセンサから得た角速度を回転角の時間変化量に変換し、積分することにより算出する。
3. 人差し指の動作が検出されなかった場合、次の通りに回転角を導出する。

ピッチ角・ロール角

加速度から得た重力向きから算出する。

ヨー角

ジャイロセンサから得た角速度を回転角に変換し、以前のヨー角に加算する。

この回転角導出処理を行うためには、ヨー角の初期値を求める必要がある。本システムでは、キャリブレーションデータとして、ユーザがスマートフォン背面をタッチして静止している状態における各種センサ値を利用する。ここで、ヨー角の初期値は、キャリブレーションを行った際に、スマートフォンのスクリーン方向に対して、IMU センサボードの上面が逆方向を向くように設定される。

6.2 人差し指ジェスチャの認識方法

本システムでは、人差し指のジェスチャを認識するために、人差し指の甲における単位法線ベクトル V_1 （図 5.3a）、スマートフォンの画面に対する単位法線ベクトル V_2 （図 5.3b）、および人差し指とスマートフォン間の角度 θ （図 5.3c）を用いる。 V_1 および V_2 は、人差し

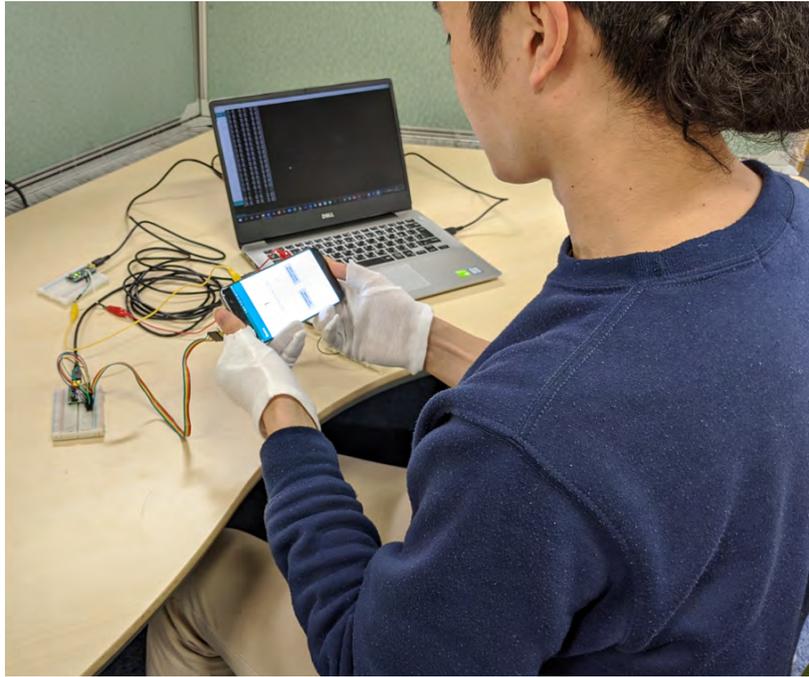


図 6.3: パイロットスタディにおけるスマートフォン背面タッチタスクの様子.

指およびスマートフォンの回転角に基づいて算出される。また、 θ は人差し指の角速度の積分値として算出される。スマートフォン背面に対するタッチは、 \mathbf{V}_1 および \mathbf{V}_2 の向きおよび内積値から認識される。人差し指の曲げ伸ばしジェスチャは、 θ の大きさの時間変化量から認識される。本システムにおいて、ユーザがスマートフォンを素早く動かした際に、ジェスチャ入力は完了となる。よって、回転角の算出時にスマートフォンの加速度の大きさと重力加速度を比較することにより、スマートフォンの動作が検出された場合、人差し指ジェスチャの認識は行われない。

6.3 パイロットスタディ

試作システム 2 を用いて、スマートフォン背面に対するタッチ認識精度を計測するパイロットスタディを行った。本章では、パイロットスタディの設計、結果、および考察について述べる。

6.3.1 設計

本実験における実験参加者は著者（右利き）1 名である。実験参加者は、指定された手の人差し指にてスマートフォン背面にタッチするタスクを行った。1 回の背面タッチタスクは 50 秒間継続される。その間、実験参加者は約 5 秒間のスマートフォン背面へのタッチを 5 回実行

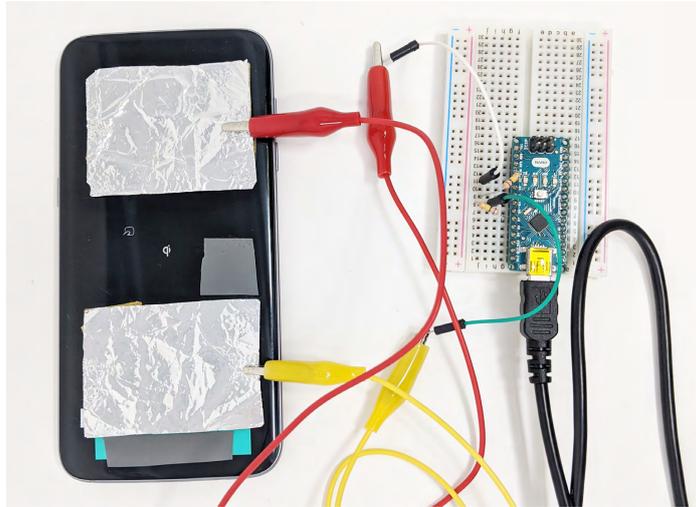


図 6.4: パイロットスタディにて、真値を得るためにスマートフォン背面に装着した静電容量式のタッチセンサ。

し、残りの時間はタッチしなかった。本実験ではタッチ認識の結果が 20 ミリ秒ごとに取得されるため、すべてのタスクで合計 2500 個のサンプルが収集される。また、実験参加者は、それぞれのタスクを開始する前に、背面にタッチして静止している状態にてキャリブレーションを実行した。

実験参加者は指輪型デバイスを両手の人差し指に装着し、椅子に座った状態にて、スマートフォンを把持しやすい状態から動かさないようにしながら、複数のスマートフォン背面タッチタスクを行った (図 6.3)。スマートフォン背面へのタッチの真値を得るために、は、スマートフォン背面に静電容量式のタッチセンサを装着した (図 6.4)。また、タッチセンサに対する手の誤接触を回避するために、実験参加者は人差し指および親指以外を覆う手袋を装着した。本実験では以下の 2 種類の条件にてタスクを実行した。

実験条件 1: ポートレートモードにおける片手把持時

実験条件 2: ランドスケープモードにおける両手把持時

実験条件 1 および実験条件 2 の詳細を以下に述べる。

実験条件 1

ポートレートモードにおける片手把持時のタッチ認識精度を計測するため、右手または左手の人差し指によるタッチ認識に関するデータを収集した。実験参加者は、ポートレートモードにしたスマートフォンを片手にて把持し、把持した手によってスマートフォン背面タッチタスクを実行する。

表 6.1: 実験条件 1 における右手人差し指によるタッチ認識精度の混同行列.

		認識精度：98.8%	
		認識結果	
		非タッチ	タッチ
真値	非タッチ	1337	12
	タッチ	17	1134

表 6.2: 実験条件 1 における左手人差し指によるタッチ認識精度の混同行列.

		認識精度：96.5%	
		認識結果	
		非タッチ	タッチ
真値	非タッチ	1277	15
	タッチ	72	1136

実験条件 2

ランドスケープモードにおける両手持持時のタッチ認識精度を計測するため、右手または左手の人差し指によるタッチ認識に関するデータを収集した。実験参加者は、ランドスケープモードにしたスマートフォンを両手にて把持し、次の 4 つのタスクを実行する。

タスク 1

左手人差し指にて背面をタッチした状態にて、右手人差し指による背面タッチタスクを実行

タスク 2

右手人差し指にて背面をタッチした状態にて、左手人差し指による背面タッチタスクを実行

タスク 3

左手人差し指にて背面をタッチしない状態にて、右手人差し指による背面タッチタスクを実行

タスク 4

右手人差し指にて背面をタッチしない状態にて、左手人差し指による背面タッチタスクを実行

4 つのタスクにおけるタッチ認識精度の計測は、背面タッチタスクを実行する手の人差し指によるタッチを対象とする。つまり、背面タッチタスクを実行しない手の人差し指におけるタッチの誤認識は考えないものとする。

6.3.2 結果

実験条件 1

表 6.1 および表 6.2 に、実験条件 1 におけるタッチタスクを行った際のタッチ認識精度を混同行列として示す。右手人差し指のタッチ認識精度は 98.8%，左手人差し指のタッチ認識精度は 96.5% であった。本システムは、片手使用時に平均 97.7% の精度にてタッチ認識が可能であることが分かった。

表 6.3: 実験条件 2 のタスク 1 におけるタッチ認識精度の混同行列.

		認識結果	
		非タッチ	タッチ
真値	非タッチ	1274	6
	タッチ	58	1162

表 6.5: 実験条件 2 のタスク 3 におけるタッチ認識精度の混同行列.

		認識結果	
		非タッチ	タッチ
真値	非タッチ	1274	6
	タッチ	189	1031

表 6.4: 実験条件 2 のタスク 2 におけるタッチ認識精度の混同行列.

		認識結果	
		非タッチ	タッチ
真値	非タッチ	1243	7
	タッチ	132	1118

表 6.6: 実験条件 2 のタスク 4 におけるタッチ認識精度の混同行列.

		認識結果	
		非タッチ	タッチ
真値	非タッチ	1168	22
	タッチ	320	990

実験条件 2

表 6.3 – 表 6.6 に、実験条件 2 におけるタッチタスクを行った際のタッチ認識精度を混同行列として示す。タスク 1 におけるタッチ認識精度は 97.4%，タスク 2 におけるタッチ認識精度は 94.4%，タスク 3 におけるタッチ認識精度は 92.2%，タスク 4 におけるタッチ認識精度は 86.3%であった。両手使用時において、本システムは平均 92.7%の精度にてタッチ認識が可能であることが示された。

6.3.3 考察

実験条件 1 と実験条件 2 のタスクにおいて、本システムは平均 94.3%の精度にてタッチ認識が可能であることが示された。一方で、真値として背面をタッチした状態が得られた時に、本システムが非タッチと誤認識したサンプルが全体的に多く見られる。この傾向は、左手にて背面タッチタスクを行った際に顕著である。また、実験条件 1 に比べて実験条件 2 にて、同様な誤認識が多く見られる。このことから、本システムにおけるジェスチャ認識精度は、把持に用いられる手および姿勢による影響を受ける可能性が考えられる。

第7章 議論および今後の課題

本章では、試作システムに関する議論および今後の課題を述べる。

7.1 試作システムの改善

本研究にて作製した試作システムでは、人差し指の向きおよび動作の認識のために指輪型デバイスを用いた。しかし、ユーザは、本システムを用いるために指輪型デバイスを指に取り付けることに対して、煩わしさを感じる可能性がある。これは、本システムの使用にあたり、ユーザビリティに影響を与える可能性がある。また、指輪型デバイスの装着位置について、試作システム1において人差し指の付け根であった一方、試作システム2において人差し指の中節であった。しかし、いずれの装着位置においても、ユーザの装着感およびユーザビリティは調査していない。今後、試作システム2を用いてユーザテストを行い、指輪モデルの装着感のユーザビリティへの影響および最適な指輪の装着位置について、調査していく。また、現実装における指輪型デバイスには、IMU センサボードを使用するため市販の指輪と比べて非常に大きいという課題がある。この課題を解決するために、Bluetooth モジュールを用いた無線化および各種センサの再選定により、指輪型デバイスの小型化を検討する。

本研究では、パイロットスタディにより、試作システム2の背面タッチ認識精度を示した。一方で、背面タッチの認識の即応性については未調査である。即時に背面タッチが認識可能ならば、タップのような瞬間的なタッチジェスチャの実装が可能である。今後は、背面タッチの認識の即応性を調査する。さらに、IMU センサボードからのデータ送信頻度の最適化および回転角の算出アルゴリズムの軽量化により、即応性の向上を試みる。

7.2 ジェスチャ認識精度

本論文にて、試作システム2を用いて、スマートフォンの背面へのタッチ認識の精度を調査した結果を示した。背面へのタッチは平均 94.3%の精度にて認識可能であることがわかったが、この実験における条件は実際にスマートフォンが使用される環境を考慮していない。スマートフォンを使用する際、ユーザは様々な姿勢をとることが想定されるため、今後は、スマートフォンの向きを変えることによる認識精度への影響を調査していく。また、今回のパイロットスタディにおける認識の対象は背面へのタッチのみであったため、曲げ伸ばしジェスチャについても認識精度の調査を行う。

7.3 ユーザテスト

本研究では、2種類の入力拡張手法の検討のために、試作システムの実装とパイロットスタディによる試作システムの評価を行った。しかし、現状では、2種類の手法のユーザビリティの評価が不十分である。今後、2種類の手法を利用するユーザテストにより、それぞれの手法のユーザビリティを調査する。また、ユーザテストから、2種類の手法を用いて拡張した入力に対して、どのような操作を割り当てると妥当であるか検討する。

7.4 さらなる入力拡張

本論文にて、手法1および手法2を用いた入力拡張を示した。手法1において2種類、手法2において2種類の入力拡張を実現したが、それぞれの手法においてさらに入力拡張の余地があると考えられる。例えば、スマートフォン背面に対するジェスチャとして、タップおよびスクロールが実行可能である。これらのジェスチャが、指輪型デバイスにて最適なセンサ値を利用することにより、認識可能であるか検討していく。

第8章 おわりに

本論文にて，人差し指の向きおよび動作を用いたスマートフォン入力拡張手法として，親指によるタッチジェスチャと組み合わせる手法およびジェスチャを認識し入力に用いる手法を示した．それぞれの手法を実現するために，試作システム1および試作システム2を実装し，試作システム2を用いてタッチ認識精度を計測した．その結果，本システムは，ポートレートモードにおける片手把持時およびランドスケープモードにおける両手把持時に，平均94.3%の精度にて背面タッチを認識可能であることが分かった．今後は，システムの改善を行い，ユーザビリティの調査およびジェスチャの認識精度の計測を行う．また，本手法にて利用可能なジェスチャを検討し，実装を行う．

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生には多大な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，研究の進め方，論文執筆をはじめとした研究の基礎をご指導いただきました。さらに，研究の相談や研究生活に関して多くのご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には研究生活においてお世話になりました。また，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支援だけでなく，研究室においても多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。特に，船越南斗氏には研究方針や論文執筆など本研究における重要な部分において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました。多大なご協力に心からお礼申し上げます。

最後に，学生生活においてお世話になった皆様，そして，私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [BLC⁺12] Sebastian Boring, David Ledo, Xiang ‘Anthony’ Chen, Nicolai Marquardt, Anthony Tang, and Saul Greenberg. The Fat Thumb: Using the Thumb’s Contact Size for Single-handed Mobile Interaction. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI ’12, pp. 39–48, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [CLW⁺13] Lung-Pan Cheng, Meng Han Lee, Che-Yang Wu, Fang-I Hsiao, Yen-Ting Liu, Hsiang-Sheng Liang, Yi-Ching Chiu, Ming-Sui Lee, and Mike Y. Chen. iRotateGrasp: Automatic Screen Rotation Based on Grasp of Mobile Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’13, pp. 3051–3054, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [CRV12] Géry Casiez, Nicolas Roussel, and Daniel Vogel. 1€ Filter: A Simple Speed-Based Low-Pass Filter for Noisy Input in Interactive Systems. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’12, p. 2527–2530, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [CSH⁺14] Xiang ‘Anthony’ Chen, Julia Schwarz, Chris Harrison, Jennifer Mankoff, and Scott E. Hudson. Air+Touch: Interweaving Touch & In-air Gestures. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’14, pp. 519–525, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [GJY⁺19] Aakar Gupta, Cheng Ji, Hui-Shyong Yeo, Aaron Quigley, and Daniel Vogel. RotoSwipe: Word-Gesture Typing Using a Ring. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [GWP12] Mayank Goel, Jacob Wobbrock, and Shwetak Patel. GripSense: Using Built-in Sensors to Detect Hand Posture and Pressure on Commodity Mobile Phones. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’12, p. 545–554, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [GYB18] Aakar Gupta, Jiushan Yang, and Ravin Balakrishnan. Asterisk and Obelisk: Motion Codes for Passive Tagging. In *Proceedings of the 31st Annual ACM*

- Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 725–736, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [GYL⁺19] Yizheng Gu, Chun Yu, Zhipeng Li, Weiqi Li, Shuchang Xu, Xiaoying Wei, and Yuanchun Shi. Accurate and Low-Latency Sensing of Touch Contact on Any Surface with Finger-Worn IMU Sensor. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 1059–1070, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [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. ACM.
- [HGL14] Seongkook Heo, Jiseong Gu, and Geehyuk Lee. Expanding Touch Input Vocabulary by Using Consecutive Distant Taps. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2597–2606, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [HIST19] Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Bounded Swipe: Swipe Gesture Inside a Target. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction*, OZCHI '19, p. 312–316, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [HS11] Ken Hinckley and Hyunyoung Song. Sensor Synaesthesia: Touch in Motion, and Motion in Touch. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 801–810, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [KHI⁺12] David Kim, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Alex D. Butler, Jiawen Chen, Iason Oikonomidis, and Patrick Olivier. Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-worn Gloveless Sensor. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 167–176, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LAC⁺16] Hyunchul Lim, Gwangseok An, Yoonkyong Cho, Kyogu Lee, and Bongwon Suh. WhichHand: Automatic Recognition of a Smartphone's Position in the Hand Using a Smartwatch. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct*, MobileHCI '16, pp. 675–681, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [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. ACM.
- [LKB⁺18] Huy Viet Le, Thomas Kosch, Patrick Bader, Sven Mayer, and Niels Henze. PalmTouch: Using the Palm As an Additional Input Modality on Commodity Smartphones. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’18, pp. 360:1–360:13, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [NB15] Anh Nguyen and Amy Banic. 3DTouch: A Wearable 3D Input Device for 3D Applications. In *Proceedings of the 2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 373–373. IEEE, 2015.
- [RLG09] Anne Roudaut, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. MicroRolls: Expanding Touch-Screen Input Vocabulary by Distinguishing Rolls vs. Slides of the Thumb. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’09, p. 927–936, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [RT09] Volker Roth and Thea Turner. Bezel Swipe: Conflict-Free Scrolling and Multiple Selection on Mobile Touch Screen Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’09, p. 1523–1526, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [SD14] Karsten Seipp and Kate Devlin. BackPat: One-Handed off-Screen Patting Gestures. In *Proceedings of the 16th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices & Services*, MobileHCI ’14, p. 77–80, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [SFS19] Yusuke Sei, Minto Funakoshi, and Buntarou Shizuki. Expanding One-Handed Touch Input Vocabulary Using Index Finger on and Above Back-of-Device. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction*, OZCHI ’19, p. 585–589, New York, NY, USA, 2019. 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.

- [WFB⁺07] Daniel Wigdor, Clifton Forlines, Patrick Baudisch, John Barnwell, and Chia Shen. LucidTouch: A See-through Mobile Device. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '07, p. 269–278, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [WFZ16] Pui Chung Wong, Hongbo Fu, and Kening Zhu. Back-Mirror: Back-of-Device One-Handed Interaction on Smartphones. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Mobile Graphics and Interactive Applications*, SA '16, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [WKH⁺16] Gerard Wilkinson, Ahmed Kharrufa, Jonathan Hook, Bradley Pursglove, Gavin Wood, Hendrik Haeuser, Nils Y. Hammerla, Steve Hodges, and Patrick Olivier. Expressy: Using a Wrist-worn Inertial Measurement Unit to Add Expressiveness to Touch-based Interactions. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 2832–2844, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [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. ACM.
- [XHW13] Xiang Xiao, Teng Han, and Jingtao Wang. LensGesture: Augmenting Mobile Interactions with Back-of-Device Finger Gestures. In *Proceedings of the 15th ACM on International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '13, p. 287–294, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [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. ACM.
- [YWV⁺19] Chun Yu, Xiaoying Wei, Shubh Vachher, Yue Qin, Chen Liang, Yueting Weng, Yizheng Gu, and Yuanchun Shi. HandSee: Enabling Full Hand Interaction on Smartphone with Front Camera-based Stereo Vision. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 705:1–705:13, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [清 19] 清佑輔, 船越南斗, 志築文太郎. 片手操作時の端末背面における人差し指を用いたタッチ入力拡張手法の提案. 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 (WISS2019) 論文集. 日本ソフトウェア科学会, 2019.

- [池松 18] 池松香, 山中祥太, 坪内孝太, 椎尾一郎. Copernican-Touch: タッチサーフェスを指へ向けて接触させる動作を用いたタッチ入力拡張手法. 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 (WISS2018) 論文集. 日本ソフトウェア科学会, 2018.

著者論文リスト

参考論文

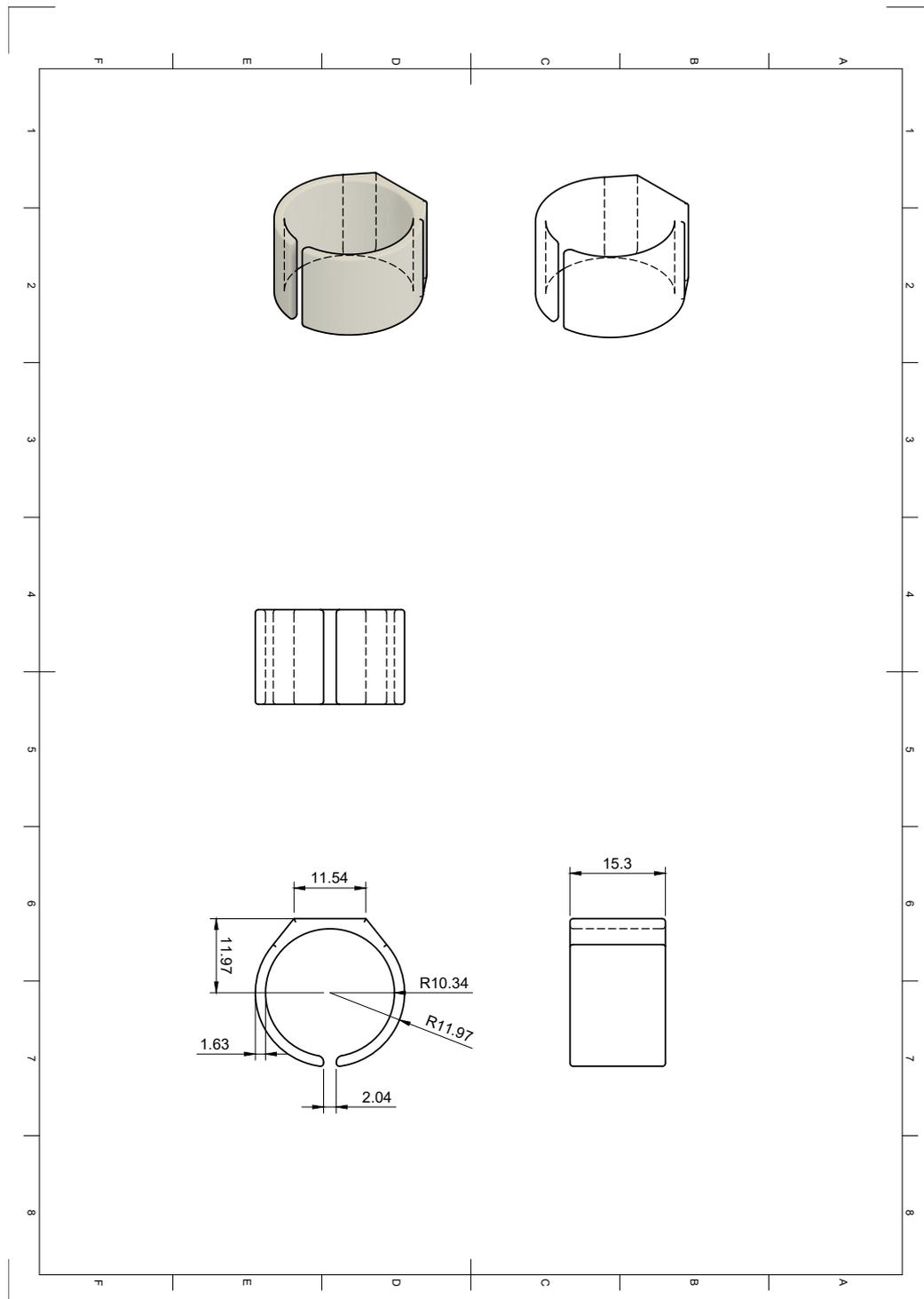
本論文の主な内容は，下記にて公表済みである．

- 公表済み論文
 1. 清佑輔，舩越南斗，志築文太郎．片手操作時の端末背面における人差し指を用いたタッチ入力拡張手法の提案．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（WISS2019），デモ・ポスター，日本ソフトウェア科学会，2019年9月．
 2. Yusuke Sei, Minto Funakoshi and Buntarou Shizuki. Expanding One-Handed Touch Input Vocabulary Using Index Finger on and Above Back-of-Device. In Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction (OzCHI '19), ACM, December 2019, pp. 585–589.

付 録 A 指輪型デバイスの指輪モデル設計図

本付録にて，試作システム 1 および試作システム 2 に用いた指輪の三面図を示す．

A.1 試作システム1に用いた指輪の三面図



A.2 試作システム2に用いた指輪の三面図

