筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

親指スライド動作を用いた
手首装着型端末への入力手法

青山 周平

指導教員　志築 文太郎　田中 二郎

2016年1月

概要

本論文では，タッチパネルを使わずに片手にて手首装着型端末（以降，スマートウォッチ）を操作する手法を示す．本手法は，スマートウォッチを装着した手の親指を人差し指の側面にてスライドさせる動作（親指スライド動作）により，一次元の連続的な操作を可能とする手法である．例えば，ユーザが親指を伸ばすように指をスライド移動させると，スマートウォッチの画面上に表示されたバーも同じ方向に移動する．本手法は握り動作などによる決定操作と組み合わせることによって，ユーザが片手にてスマートウォッチを操作し，画面をタッチすることなくターゲットを選択することを可能にする．本研究においては，親指のスライド動作に伴う筋肉の膨らみから指の移動量推定を行い，専用のデバイスにてこの膨らみを計測する．本論文は，親指スライド動作における指の移動量推定方法を主題とし，その実装方法を述べるとともに本手法を用いたアプリケーションを示す．

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　スマートウォッチにおけるタッチパネルによる入力の問題点 1
1.2　目的 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　小さな画面に適したタッチジェスチャを開発する研究 3
2.2　手または指の動きを入力に用いる研究 4
2.2.1　カメラを用いる研究 4
2.2.2　手や指に装着したデバイスを用いる研究 4
2.2.3　手首に装着した加速度センサを用いる研究 4
2.2.4　筋電位計を用いる研究 5
2.2.5　筋肉および腱の動きに伴う手首の形状変化を利用する研究 5
2.3　スマートウォッチの入力領域を拡張する研究 5

第 3 章　ThumbSlide **7**
3.1　筋肉の膨らみを利用した親指スライド動作の認識 8
3.2　ハードウェア 9
3.3　予備実験：親指スライド動作に伴う手首形状変化の測定 15
3.3.1　実験内容および準備 15
3.3.2　結果および考察 18
3.4　親指の移動量推定アルゴリズム 18
3.5　キャリブレーション 23

第 4 章　決定操作の実装 **24**
4.1　小指の握り込み動作による決定操作 25
4.2　手全体の握り込み動作による決定操作 25

第 5 章　アプリケーション **27**
5.1　インベーダゲーム 27
5.2　イメージギャラリー 28
5.3　メール通知時におけるスクロール操作 29

第 6 章　議論と今後の課題 **30**
6.1　膨張量として利用するフォトリフレクタの数 30
6.2　入力状態と非入力状態の区別 31
6.3　タップ動作による決定操作 31
6.4　腕の移動や回転への対応 31
6.5　キャリブレーション 32
6.5.1　ThumbSlide を使用しながらキャリブレーションを行うシステムの設計 32
6.5.2　キャリブレーションを必要としないシステムの設計 32
6.6　静的ジェスチャを用いた操作の拡張 34
6.7　手首の太さの違いによる影響 35

第 7 章　まとめ **36**

謝辞 **37**

参考文献 **38**

図目次

3.1 ThumbSlide の操作イメージ 7
3.2 親指動作に関連する筋肉および腱 8
3.3 作成したハードウェア 9
3.4 回路図 10
3.5 フォトリフレクタを用いて筋肉の膨らみを取得する仕組み 11
3.6 試作機 1 12
3.7 試作機 2 13
3.8 試作機 2 の内部 13
3.9 試作機 3 14
3.10 試作機 3 の内部 14
3.11 実験に用いたグローブ 16
3.12 実験の様子 17
3.13 ベルトと手の位置関係およびグラフと対応するフォトリフレクタ番号 17
3.14 親指スライドジェスチャ時における各センサ値の変化量（被験者 A – C） . . 19
3.15 親指スライドジェスチャ時における各センサ値の変化量（被験者 D，E および 平均） 20
3.16 各スライド点におけるフォトリフレクタ 3 – 5 のセンサ合計値（膨張量）の変化 21
3.17 各膨張量設定におけるセンサ合計値（膨張量）の推移 22

4.1 センサ値可視化アプリケーション 24
4.2 親指スライド動作時と小指の握り込み動作時のセンサ値変化の比較 A）親指スライド動作時のセンサ値の変化，B）小指押し込み時のセンサ値の変化 . . 26

5.1 ベルト型センサデバイス（試作機 3）をスマートウォッチの内側に着用した時の様子 27
5.2 アプリケーション：インベーダゲーム 28
5.3 アプリケーション：イメージギャラリー 28

6.1 4 つのみのフォトリフレクタを持つベルト型センサデバイス 31
6.2 ThumbSlide を使用しながらキャリブレーションを行うシステムの設計 33
6.3 キャリブレーションを必要としないシステムの設計 33

6.4　ジェスチャ認識　A）手を「グー」の形にした時，B）手を「チョキ」の形にした時，C）手を「パー」の形にした時 34

第1章　はじめに

近年，腕時計に様々な機能を付加した手首装着型端末（以降，スマートウォッチ）が市場に出回り，一般的になりつつある．これらスマートウォッチの多くは携帯情報端末（以降，スマートフォン）と連携することにより，ユーザがスマートフォンを取り出すことなくメールの通知を確認したり，オーディオプレイヤを遠隔操作することを可能にする．ユーザはこれらの機能を使用する際，主としてタッチパネルを用いて入力を行う．本研究では，このタッチパネルにかわる入力手法を提案し，実装する．本章では，まず，スマートウォッチにおけるタッチパネルによる入力手法の問題点を述べ，その後本研究の目的，貢献および構成を述べる．

1.1　スマートウォッチにおけるタッチパネルによる入力の問題点

近年，タッチパネルを備えたスマートフォンが普及したことにより，タッチパネルによる入力は多くのユーザにとって馴染み深いものとなっている．しかし，スマートウォッチはスマートフォンとは異なる特徴を持つため，タッチパネルを用いたスマートウォッチへの入力にはいくつかの問題点がある．その 1 つは，ユーザがスマートウォッチを装着した側の手のみによる操作（以降，片手操作）を行うことができない点である．スマートフォンにおいては，ユーザがデバイスを把持した状態にて親指をタッチパネル上にて動かすことが可能であるが，手首に装着するスマートウォッチにおいては，ユーザはこのようなことを行うことができないためである．また，スマートウォッチのタッチパネルはスマートフォンよりもさらに小さいため、タッチの対象が指よりも小さいために対象が指で隠れる Fat Finger 問題 [SRC05] の影響を大きくうける．

1.2　目的

本研究では, スマートウォッチのタッチパネル外に操作領域を拡張し，かつスマートウォッチの片手操作を可能とするスマートウォッチ操作手法「ThumbSlide」を示す. 本手法はスマートウォッチを装着した側の手において，親指を人差し指の側面にてスライドさせた際の親指の移動量を推定することにより，１次元の連続的な操作を可能とするものである．本手法と握り動作などによる決定操作を組み合わせることにより, ユーザは片手にて選択決定を行う操作をすることが可能となる. また, タッチパネル外にて操作を行うため，Fat Finger 問題を解消できる．

1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- タッチパネル外に操作領域を拡張し，かつ片手操作を可能とするスマートウォッチ操作手法「ThumbSlide」の提案および実装.
- 筋肉の膨らみを利用した，機械学習を用いず計算が簡単な親指のスライド移動量推定方法の実装.
- ThumbSlide を利用するアプリケーションの作成.

1.4 本論文の構成

第 1 章以降の本論文の構成は次のとおりである．第 2 章では，関連研究を紹介することにより，本研究の位置づけを述べる．第 3 章では，本研究の提案手法の原理およびそれを実現するために作成したハードウェアを示す．また，このハードウェアを用いた実験に基づく，親指の移動量推定アルゴリズムを示す．第 4 章では，提案手法と併用して用いることができる決定操作の実装を示す．第 5 章では，提案手法向けとして作成したアプリケーションおよび応用案を示す．第 6 章では，提案手法の改善点および発展案を議論し，今後の課題を示す．第 7 章では，本研究の結論を述べる．

第2章　関連研究

本研究は，スマートウォッチを装着した手の親指の移動量を推定することにより，スマートウォッチの入力領域を拡張し，片手操作を可能とする研究である．本章では，関連する研究として，スマートウォッチの操作性の向上を目的とした小さな画面に適したタッチジェスチャを開発する研究を述べるとともに，本研究と同様に手または指の動きを入力に用いる研究，スマートウォッチの入力領域を拡張する研究を述べる．本章において，静的ジェスチャとは手を握った状態や人差し指だけを立てた状態のような手の姿勢に意味を持つジェスチャのことを指し，動的ジェスチャとは親指と人差し指を離すピンチ動作のような手の動きに意味を持つジェスチャのことを指す．また，ウェアラブルデバイスとは指輪やメガネなど身につけて使用するものにコンピュータを組み込んだ装置全般のことを指す（スマートウォッチも含む）．

2.1　小さな画面に適したタッチジェスチャを開発する研究

スマートウォッチの操作性を向上させるために，小さな画面に適したタッチジェスチャを開発するという手段が試みられている．その例として，スマートウォッチに対する文字入力手法の研究が挙げられる．Swipeboard[CGF14] は，QWERTY キーボードを 9 つのグループに分割することにより、タップ（画面を指先で 1 回叩く操作）または，スワイプ（画面に触れた状態で指を滑らせる操作）にてキーボード入力を行う手法である．ユーザは 1 度目のタップまたは 8 方向のスワイプにて 9 つのグループから 1 つのグループを選択し，2 度目のタップまたはスワイプにてグループ内にある目的の文字を選択する．SplitBoard[HHIL15] は，QWERTY キーボードを 3 つのグループに分割することにより，キーボードを大きく表示することを可能にする入力手法である．この手法において，QWERTY キーボードは 6x3 のキーを持った 2 つのグループに分割される．また，エンターキーや数字は 3 つ目のグループに割り当てられる。ユーザはこれらグループをフリック（画面上にて指を弾く操作）にて切り替えて，キーボード入力を行う．ZoomBoard[OHOW13] は，QWERTY キーボード上のタッチされた箇所が拡大表示される入力手法である．この手法において，ユーザがキーボードをタッチすると，その箇所を中心にキーボードが拡大表示される．ユーザは拡大表示されたキーボードから目的のキーをタッチし入力を行う．下岡ら [下岡 15] はスマートウォッチにおける日本語入力において，タップとフリックを用いた文字入力手法を示した．この手法は指 1 本のタップとフリックにより「あ」–「な」行の選択，指 2 本のタップとフリックにより「は」–「わ」行の選択を行うことを可能とする．金井らの研究 [金井 14] はスマートウォッチにおける日本語入力において，文字をストロークに分割して認識することにより，スマートウォッチにおける漢

字の入力を可能とする．これらの研究では，スマートウォッチのタッチパネルを用いて操作を行うが，本研究では，片手操作を実現することにより操作性を向上させる．

2.2 手または指の動きを入力に用いる研究

手または指の動きを入力に用いる研究には，カメラを用いるもの [LT13]，手または指に装着したデバイスを用いるもの [塚田 02, WKTA15, OSOI12, JCZ+13, JCZ+13, JBSK09, LWH+15]，手首に装着した加速度センサを用いるもの [XPM15, 福本 99]，筋電位計を用いるもの [HRS+14, HZS+15]，筋肉および腱の動きに伴う手首の形状変化を利用するもの [FWSS15, OARSM15, DP14, Rek01, ZH15] がある．

2.2.1 カメラを用いる研究

Finger Controller[LT13] は，Kinect の深度センサから得た深度情報を用いて空中へのドローイングおよび動的ジェスチャを認識する．このようなカメラを用いる手法は画像の処理に大きな電力を消費してしまいウェアラブルデバイスには適さない．そのため，本研究は計算の少ない処理にて親指の動きを認識する方法を示す.

2.2.2 手や指に装着したデバイスを用いる研究

手や指に装着したデバイスを用いて腕や指の動きを認識する研究がある．Ubi-Finger[塚田 02] は，ライト，TV などの機器を「指差す」ことにて対象を特定し，指曲げや手首の回転などの動的ジェスチャを用いて対象の操作を行う研究である．動的ジェスチャの認識においては，赤外線センサ，加速度センサ，曲げセンサおよびスイッチを持つデバイスを人差し指に装着することにて認識する．eRing[WKTA15] は，指に取り付けられた指輪の静電容量を計測することにより，静的ジェスチャおよび動的ジェスチャを認識する．iRing[OSOI12] は，指輪型デバイスに取り付けられた赤外線近接センサを用いて，指の曲げや回転から起こる皮膚への指輪の食い込みを測ることによりこれらの動きを認識する．Magic Ring[JCZ+13] は，人差し指に取り付けた指輪型デバイスから取得した指の加速度に基づいて動的ジェスチャを認識する．また，Perng らの研究 [JBSK09] は，各指先および手の甲に加速度センサを備えたグローブを用いて静的ジェスチャを認識する．BackHand[LWH+15] は，手の甲に取り付けたひずみセンサアレイを用いて静的ジェスチャおよび動的ジェスチャを認識する．これらの研究ではデバイスの装着位置が手や指に及ぶが，本研究では手首に装着したデバイスのみによる指の動きの認識を行うため，デバイスをコンパクトにできる．

2.2.3 手首に装着した加速度センサを用いる研究

手首に装着した加速度センサを用いて腕や指の動きを認識する研究には次のものがある．Finger-writing with Smartwatch[XPM15] は，スマートウォッチに内蔵された加速度センサおよ

びジャイロセンサにより腕および指の動きを認識する．この研究において，ユーザは画面を見ながらの操作が行えない一方，本研究においては，ユーザは画面を見ながらスマートウォッチの操作を行うことができる．指釦 [福本 99] は手首に装着した加速度センサを用いて，センサを装着した手の任意の指先で行った机や腕を指先で叩く動作（打指）を検出し，手首装着型ウェアラブルデバイスの片手操作を実現する．検出できる入力は打指された瞬間のみであるため，この打指のリズムパターンにより 10 – 30 種類のコマンド入力を行う．また，打指だけではなく，親指と他の指の指先同士を軽く接触させる「指パチ」入力により支持物体がない場合でも入力が可能である．この研究は，コマンド入力による単一的な操作を可能とするが，本研究は連続的な操作を可能とする．

2.2.4 筋電位計を用いる研究

腕に装着したデバイスを用いて指の動きを認識する手法として，筋電位計を用いる研究がある．Hasan らの研究 [HRS+14] は，手首および腕に取り付けた筋電位計を用いて手の静的ジェスチャを取得する．Huang らの研究 [HZS+15] は，前腕に取り付けた筋電位計により親指の動きを認識する．これら筋電位計を用いた認識方法は，筋が大きい部分の方が筋電位の測定がしやすいため，筋電位計の装着位置が腕に及ぶ．そのため，本研究では筋電位計は用いず，手首に巻きつけたフォトリフレクタアレイを用いて指の動作に伴う手首部分の筋肉および腱の動きを認識し，親指の移動量を推定する．

2.2.5 筋肉および腱の動きに伴う手首の形状変化を利用する研究

本研究と同様に，筋肉および腱の動きに伴う手首の形状変化を利用して手の動きを認識する研究には次のものがある．Fukui らの研究 [FWSS15] および Ortega-Avila らの研究 [OARSM15] は，腕にフォトリフレクタアレイを巻き，指の動作に伴う腱や筋肉の動きから生じる腕の凹凸変化を計測することにより，手の静的ジェスチャを認識する．WristFlex[DP14] は腕に感圧センサアレイを巻きつけることにより同様のことを行う．GestureWrist and GesturePad[Rek01] も同様に静電容量式の近接センサによりこれを行う．Tomo[ZH15] は手首に装着した 8 つの電極にて電気インピーダンス（物質の電流の流しにくさ）の変化を測定することにより，手の静的ジェスチャを検出する．ただし，これらの研究はいずれも取得したデータを機械学習を用いて学習させることにてジェスチャの認識を行っているが，本研究は認識を親指の動きに絞ることにより機械学習を行うことなく親指の動きを認識することを可能とする．

2.3 スマートウォッチの入力領域を拡張する研究

スマートウォッチ周辺を入力領域として拡張する研究には次のものがある．SenSkin[OSM+13] は，腕に 2 本のフォトリフレクタアレイを取り付け，アレイ間の皮膚に対する入力を検出する．iSkin[WLB+15] は，薄く柔軟なタッチセンサを皮膚に取り付けることによって入力を検

出する．Skin Buttons[LXC+14] は，腕時計型デバイスからレーザプロジェクタを用いてアイコンを腕に投影し，赤外線近接センサを用いて投影されたアイコンに対する指の接触を認識する．Skinput[HTM10] はピコプロジェクタを用いて腕または手にボタンを投影し，そのボタンに対するタップ入力を検知する．皮膚に対してタップされた位置は，生体音響センサを腕に取り付けることにより推定される．Knibbe らの研究 [KMPB+14] はスマートウォッチの側面に取り付けた赤外線センサを用いて手の甲への押し込みおよびつまみ動作などの入力を認識する．zSense[WPSN15] はスマートウォッチなどのウェアラブルデバイスに赤外線近接センサを取り付けることにより，ウェアラブルデバイス周辺の空中における動的ジェスチャを認識する．これらの研究はスマートウォッチを装着した側とは別の手にて操作を行う必要がある一方，本研究の提案手法はスマートウォッチを装着した側の手のみを使う操作手法である．

またスマートウォッチの縁を用いて画面外に操作領域を拡張する研究がある，SkinWatch[OI15] は，スマートウォッチの画面の裏面に取り付けたフォトリフレクタアレイにより，スマートウォッチの縁に対する押し込みやスマートウォッチを回転させる動きを認識する．これは縁に対する押し込み動作などにより生じた皮膚とセンサ間の距離が変化することを利用している．Xiao らの研究 [XLH14] は，スマートウォッチの画面にホール効果ジョイスティックセンサを取り付けることにより，画面に対するパン，ツイスト，チルト，クリックの動作を認識する．これらの研究においても，ユーザはスマートウォッチを装着した側とは別の手にて操作を行う必要がある一方，本研究の提案手法においては，ユーザはスマートウォッチを装着した側の手のみにて操作を行うことができる．

第3章　ThumbSlide

ThumbSlide は，スマートウォッチを装着した手の親指を人差し指の側面にてスライドさせる動作（親指スライド動作）により，連続的な操作を可能とする手法である．例えば，ユーザが親指を伸ばすように指をスライド移動させると，スマートウォッチ上に表示されたバーも同じ方向に移動する（図 3.1）．本手法は握り動作などによる決定操作と組み合わせることにより，ユーザが片手にてスマートウォッチを操作し，画面をタッチすることなくターゲットを選択することを可能にする．本研究においては，スマートウォッチのベルトの内側に装着することができるベルト型センサデバイスを作成し，これを用いて ThumbSlide を実装する．本章においては，ベルト型センサデバイスを用いて，親指スライド動作における指の移動量推定を行う方法を述べるとともに，その実装を述べる．

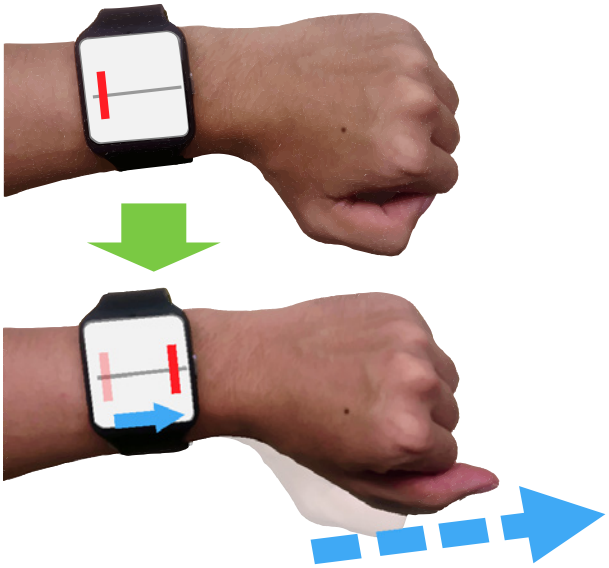


図 3.1: ThumbSlide の操作イメージ

3.1　筋肉の膨らみを利用した親指スライド動作の認識

親指スライド動作の認識にあたり，本研究では親指の動作に伴う筋肉の膨らみを利用する．図 3.2 に親指の動作に関連する筋肉および腱を示す．長母指外転筋および短母指伸筋は親指を外転[1] させるための筋肉である. 親指スライド動作時において, これらの筋肉は皮膚方向に膨張し，手首表面に筋肉の膨らみとして現れる. この膨らみは，長母指外転筋と短母指伸筋およびこれらの筋肉につながった腱が手首の位置において皮膚近くに位置するため検知されやすい．本研究においては, この膨らみの大きさを測定することにより, 親指の移動量を推定する.

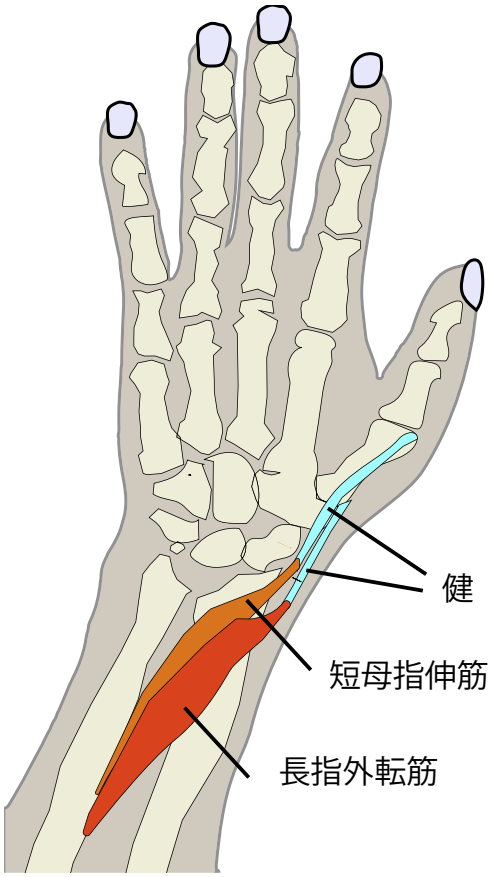


図 3.2: 親指動作に関連する筋肉および腱

[1]関節から先の部分が，体の基準となる線から遠くなる向きに動くこと．親指においては，指が開くような方向に動くことを指す.

3.2　ハードウェア

親指スライド動作に伴う筋肉の膨らみを取得するにあたり，手首装着型のデバイスを含むハードウェアを作成した．図 3.3 に作成したハードウェアを示す．また，図 3.4 にこの回路図を示す．本ハードウェアはベルト型センサデバイス，マイコン [2]，Bluetooth モジュール [3]，モバイルバッテリからなる．このハードウェアは Fukui らの研究 [FWSS15] と同様に，ベルト型センサデバイスに取り付けられたフォトリフレクタアレイにより筋肉の膨らみを取得する．Fukui らの研究および本研究において，フォトリフレクタアレイは皮膚との間に隙間を作るように取り付けられている．隙間を作ることにより，図 3.5 のように，筋肉の膨らみなどにより生じた手首表面の凹凸形状に応じて各フォトリフレクタと皮膚間の隙間の大きさが変化する．システムはこの皮膚間の隙間の距離を尺度として筋肉の膨らみを取得する．

本ハードウェアは，それぞれのフォトリフレクタを用いて隙間の大きさを 0 – 1023 のセンサ値として取得する．また，マイコンはそのセンサ値を Bluetooth を用いてスマートウォッチとペアリングされたスマートフォンに送信する．なお，本ハードウェアは長母指外転筋および短母指伸筋の膨らみだけではなく手首全体の形状変化を利用することも想定し，フォトリフレクタアレイが手首を覆うように設計されている．

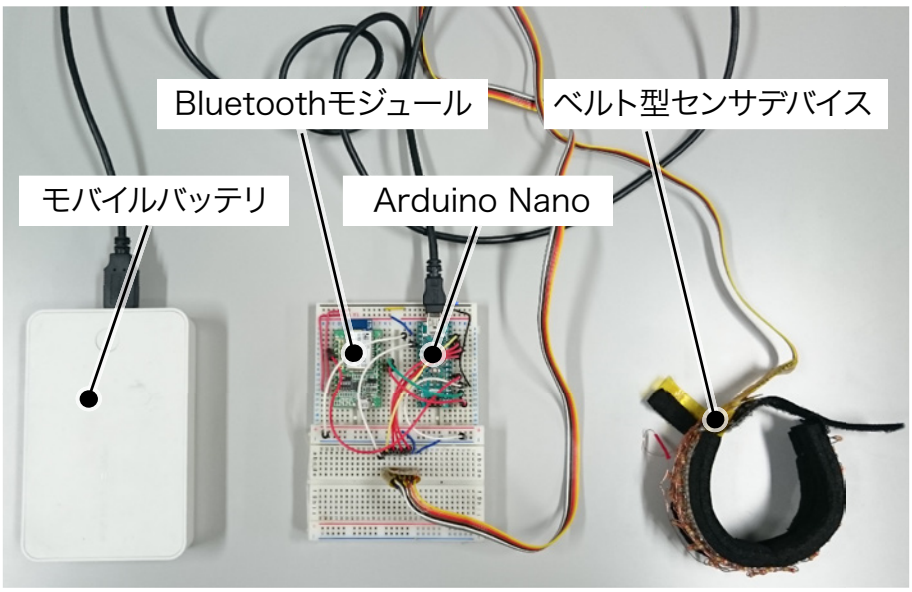


図 3.3: 作成したハードウェア

[2]Arduino Srl 社製，ArduinoNano
[3]Microchip 社製，RN-42

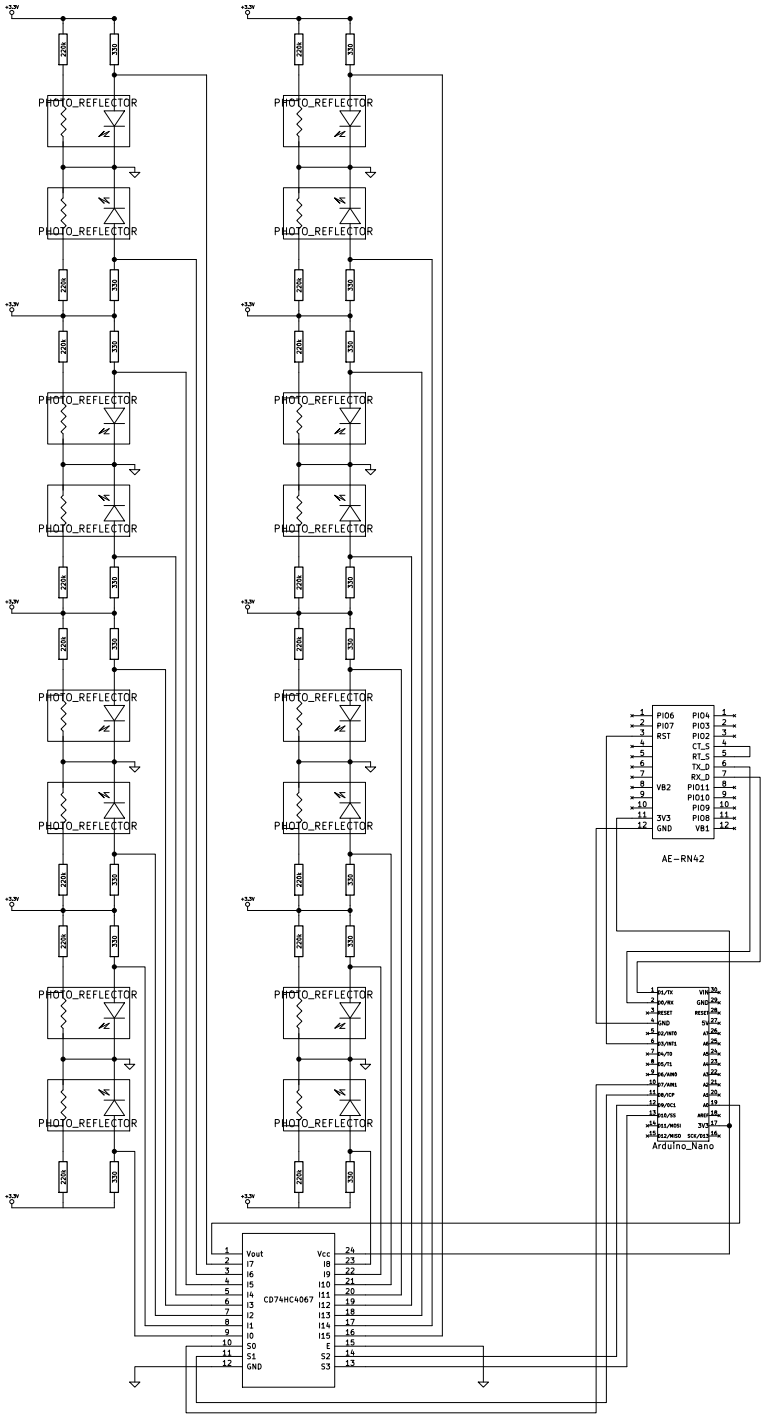

PHOTO_REFLECTOR
220k
330
CD74HC4067
Vout
Vcc
GND
AE-RN42
Arduino_Nano

図 3.4: 回路図

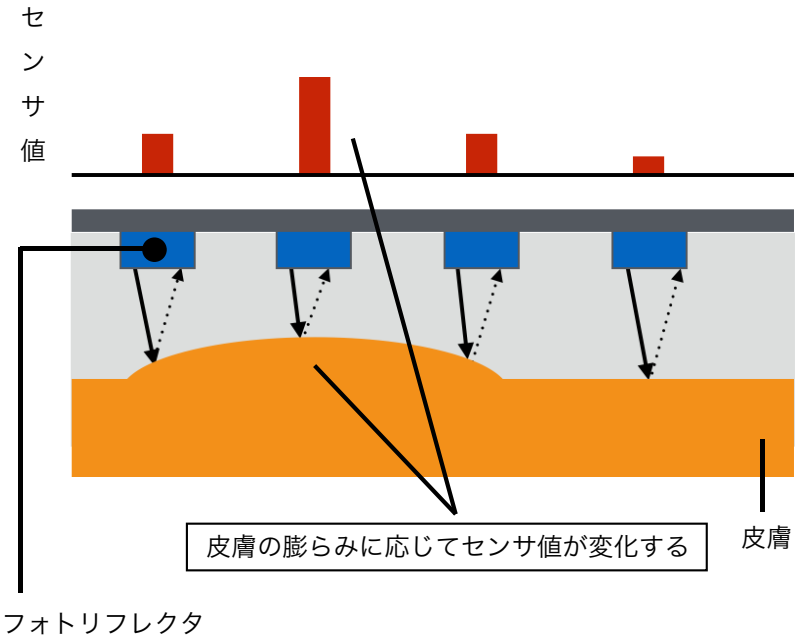


図 3.5: フォトリフレクタを用いて筋肉の膨らみを取得する仕組み

ベルト型センサデバイス

ベルト型センサデバイスはアナログマルチプレクサと 16 個のフォトリフレクタを持つ手首に装着するデバイスである．本デバイスはブレットボード上に構築された回路にコネクタ部を差し込むことによって動作するように設計され，同一の回路設計を持つ他のベルト型センサデバイスに取り替えても動作するように作られた．

本節においては，試作機として作成した 3 つのベルト型センサデバイスの設計および特徴を述べる．

試作機 1

図 3.6 にベルト型センサデバイスとして初めに作成された試作機 1 を示す．本試作機は 230 mm × 21 mm × 0.4 mm のフレキシブル基板を土台として作成されている．基板には 1 つのマルチプレクサ [4] と 10.16 mm 間隔にて 16 個のフォトリフレクタ [5] が取り付けられている．また，フォトリフレクタと手首表面の間に隙間を作るための高さ 10 mm のウレタンスポンジがフォトリフレクタアレイを囲むように取り付けられている．このウレタンスポンジにて作成された枠の太さは 10 mm であり，これを枠内の大きさが 140 mm × 10 mm となるように取り付けた．このベルト型センサデバイスは取り付けられたマジックテープを用いて手首に装着される．

本試作機は，親指を動かした際の手首の形状変化の観察に利用された．しかし，本試作機は，フレキシブル基板に対して配線やはんだを施したことによりフレキシブル基板の柔軟性が失われてしまい，かろうじて手首に巻きつけることができる程度の柔軟性しかない問題があった．また，施した配線がむき出しになってしまっていることもスマートウォッチの内側に装着することができないという問題を引き起こした．このスマートウォッチの内側に装着することができないという問題は研究において大きな支障をもたらしたため，次に示す試作機 2 を作成するに至った．

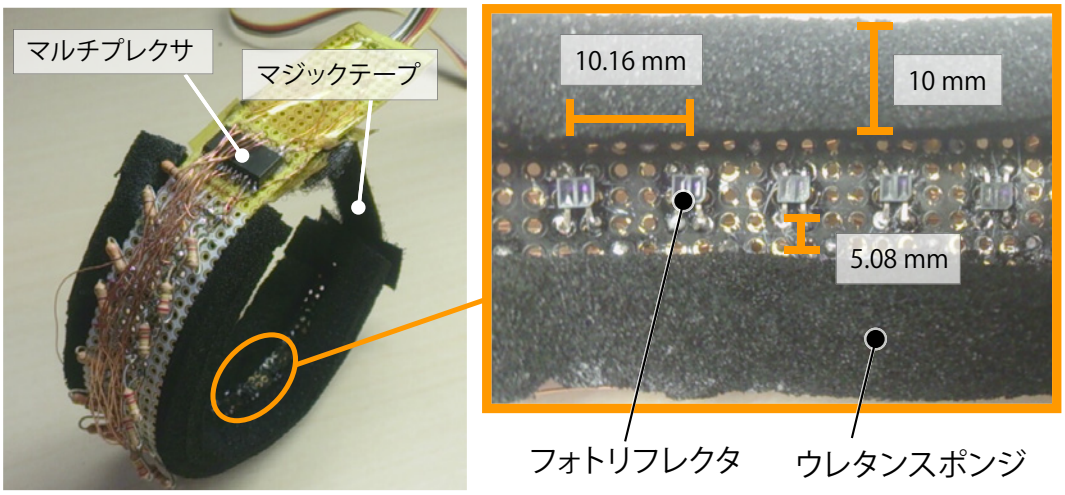


図 3.6: 試作機 1

[4]Texas Instruments 社製， CD74HC4067
[5]GENIXTEK 社製，TPR-105F

試作機 2

図 3.8 に，試作機 1 における「かろうじて手首に巻きつけられるほどの柔軟性しかない」「回路がむき出しになっているためスマートウォッチの内側に装着することができない」という問題を解決するために作成された試作機 2 を示す．これらの問題を解決するため，本試作機は土台としてゴム布を用い，フレキシブル基板を分割してとりつけるという方法にて作成された．基板を分割することにより，基板間に隙間が生じ，デバイスの柔軟性は大きく向上した．また，回路上に取り付けられていた抵抗をチップ抵抗にすることによりデバイスの厚みを減らし，回路をゴム布にて覆うことによりスマートウォッチの内側への装着を可能とした．本試作機においてもフォトリフレクタの取り付け間隔，ウレタンスポンジによる枠の大きさは試作機 1 と同じである．このように，本試作機は試作機 1 にて発生した問題が改善されたものの，分割されたフレキシブル基板間をつなぐ導線が短かったため，曲げられた際に導線の長さの余裕がなくなり断線が発生した．また，マルチプレクサと導線の接続部も衝撃に弱くたびたび断線が発生した．そのため，次に示す試作機 3 を作成するに至った．

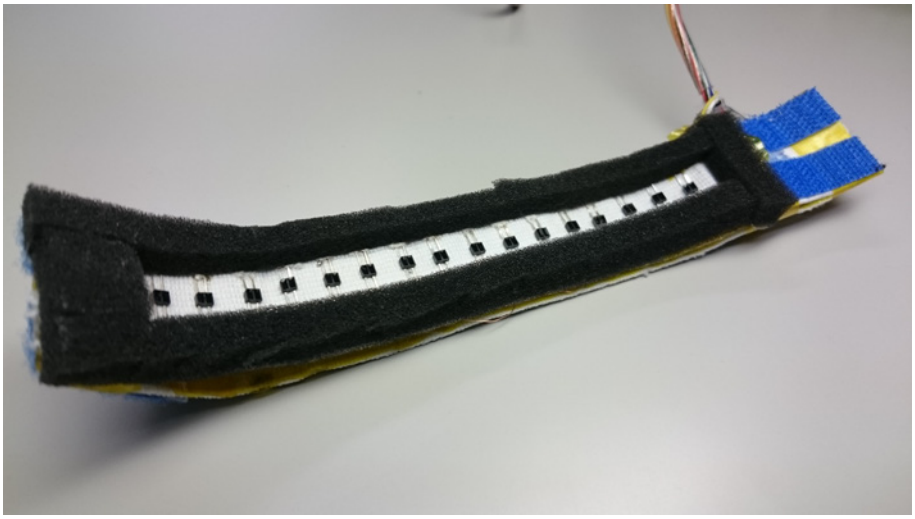


図 3.7: 試作機 2

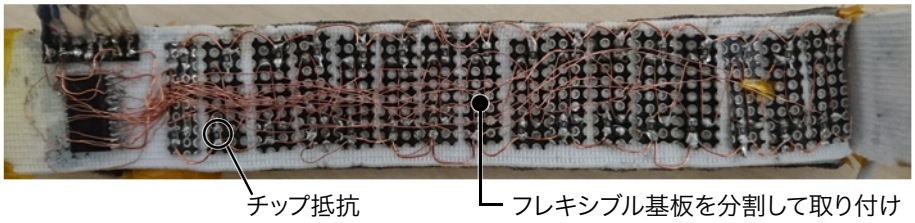


図 3.8: 試作機 2 の内部

試作機 3

図 3.9 に試作機 2 において発生した「断線によるデバイスの故障」を減らすことを目的に作成された試作機 3 を示す．本試作機は，断線による故障を減らすため，フレキシブル基板間をつなぐ導線の長さをより長くし，強く曲げられた際にも断線が起こりにくくなるようにした．さらに，マルチプレクサおよびマルチプレクサと導線の接続部をグルーを用いて固めることにより，接続部における断線も起こりにくくした．また，ウレタンスポンジの枠の高さを 3 mm に変更し，手首装着時のデバイスの厚みを減らした．これは，使用しているフォトリフクレクタの検知距離が 1 mm–10 mm であり，皮膚とフォトリフレクタ間の距離を減らしても問題ないと判断したためである．また，マジックテープも噛み合わせ厚 1 mm のものに変更した．本試作機においてもフォトリフレクタの取り付け間隔，ウレタンスポンジによる枠内の大きさは試作機 1，2 と同じである．

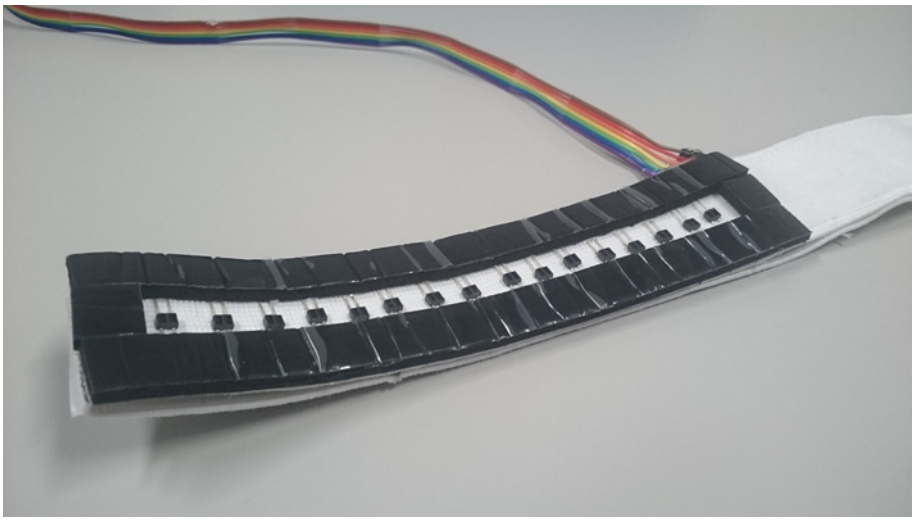


図 3.9: 試作機 3

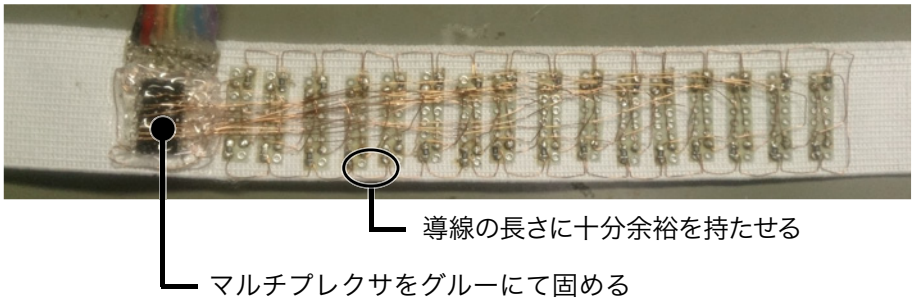


図 3.10: 試作機 3 の内部

3.3　予備実験：親指スライド動作に伴う手首形状変化の測定

本研究における親指の移動量推定は，手首方向への親指スライド動作（親指を曲げる動作）に伴って長母指外転筋および短母指伸筋が線形に膨らむという仮定に基づいている．もしこの仮定が正しければ，システムはこの膨らみ具合から親指の移動量を推定することができる．そのため，本研究はこの仮定が正しいことを示すために予備実験を行った．

なお，本研究は，長母指外転筋および短母指伸筋の直上およびその周辺に位置するフォトリフレクタのセンサ値を合計した値を膨張量と定義する．この膨張量を長母指外転筋および短母指伸筋の膨らみ具合の尺度として扱う．なお，膨張量の測定に用いるフォトリフレクタは，ベルト型センサデバイス上の 16 個のフォトリフレクタのうち，これら筋肉周辺にあると思われるフォトリフレクタから任意に設定される．本実験においては，ベルト型センサデバイスの装着角度を統一し，この膨張量設定（膨張量の測定に用いるフォトリフレクタ）を統一した．また，膨張量の測定においては，手首の角度，腕の位置および角度，その他の指は固定された状態にあるものとする．これは，手首の形状変化がこれらの要素からも影響をうけるためであり，これらを固定することにより親指スライド動作に関連する形状変化情報のみを取得する．

3.3.1　実験内容および準備

被験者

実験は，著者を含めた研究室内の大学生および大学院生 5 名（男性 5 名，年齢 21 – 23）を被験者として行われた．

使用ハードウェア

実験は，ベルト型センサデバイスの試作機 1 を用いて行われた．また，被験者間において指の移動量を一致させるため，表面がポリウレタンにてコーティングされたナイロン製のグローブ [6] を使用した．このグローブには，図 3.11 のように人差し指の側面に 1 つの点が，親指側面に 5 mm 間隔に 6 つの点（以降，親指の付け根側からスライド点 1 – 6 と呼ぶ）が打たれている．

条件・環境

被験者には，試作機 1 およびグローブを装着した左手および腕を図 3.12 のように台座の上に置いた状態にて実験タスクを行ってもらった．またその際，手は軽く握ってもらった．これらは，腕の位置や手首の角度，他の指の曲げ状態が手首の形状に影響しないようにするた

[6] ショーワグローブ株式会社 「ピッタリ背抜き（S サイズ）」 JAN コード: 4901792026109

めである．ベルト型センサデバイスと手の位置関係およびグラフに対応するフォトリフレクタ番号を図 3.13 に示す．

タスク

実験タスクを説明する．被験者はまず親指側面のスライド点 1 と人差し指側面の点を重ねた状態にて待機する．次に被験者は指示に従い，次のスライド点と人差し指側面の点が重なるように親指をスライドさせる．これをスライド点 6 に到達するまで繰り返す．この過程を 1 試行とし，被験者にはこれを 5 試行行ってもらった．

センサ値の記録

センサ値の記録においては，各スライド点と人差し指側面の点が重なり静止した状態のものを記録した．また実験結果の考察には，5 試行分の平均を取った値を用いた．

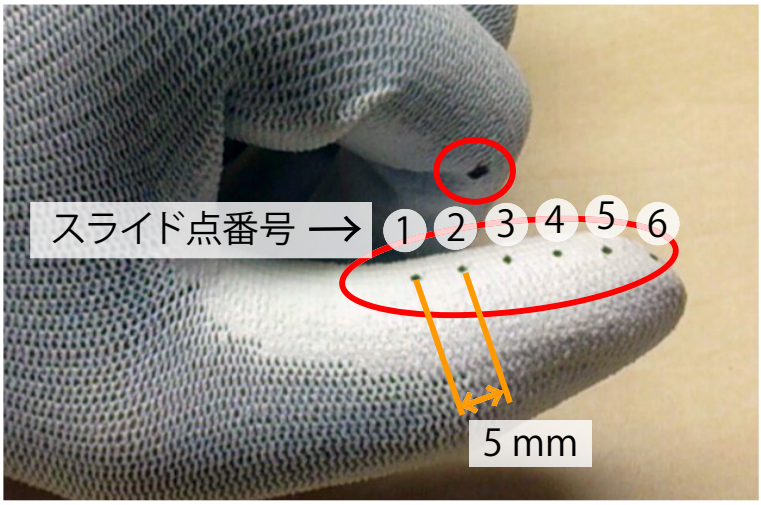


図 3.11: 実験に用いたグローブ

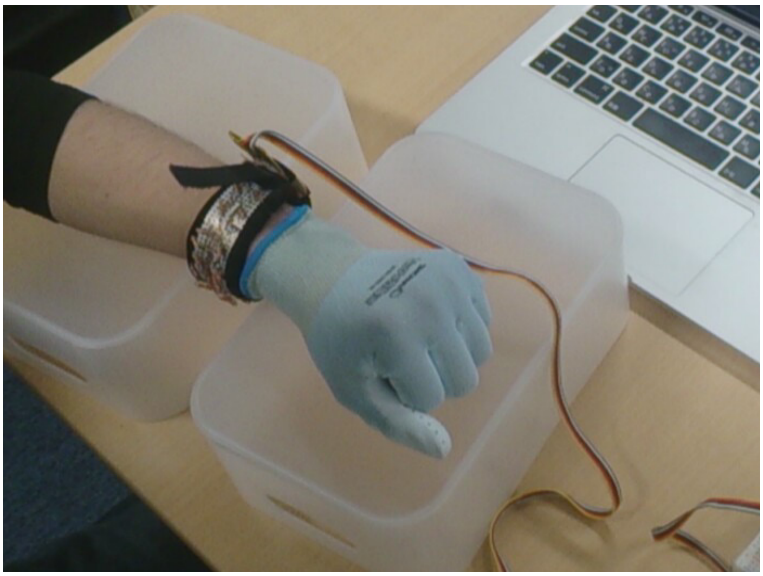


図 3.12: 実験の様子

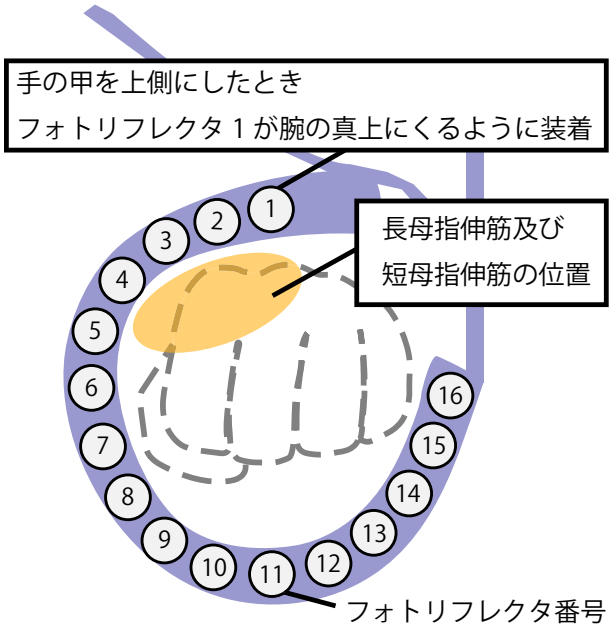


図 3.13: ベルトと手の位置関係およびグラフと対応するフォトリフレクタ番号

3.3.2　結果および考察

長母指外転筋および短母指伸筋の膨らみによる手首形状の変化

親指スライド動作に伴い手首形状がどのように変化しているかを調べるにあたり，各フォトリフレクタにおけるスライド点 1 からスライド点 6 へ親指をスライドした際のセンサ値の変化量を観察した．これを図 3.14，3.15 に示す．なお，この変化量はスライド点 6 におけるセンサ値からスライド点 1 におけるセンサ値を引いて得た差分である．これらのグラフは，手首方向へ親指スライド動作を行う（親指を曲げる）に伴い，フォトリフレクタ 4 に対応する位置を中心に手首表面が盛り上がることを表している．おおよそ，長母指外転筋および短母指伸筋は図 3.13 に示される位置にあることから，手首方向への親指スライド動作時において，これらの筋肉が膨らむことが確認された．

膨張量の変化量と親指の移動量の関係

膨張量の変化量と親指の移動量の関係を調べるにあたり，フォトリフレクタ 3 – 5 のセンサ値を合計した値を膨張量として設定しグラフを作成した．結果を図 3.16 に示す．グラフから，被験者ごとに膨張量の最小値から最大値までの値の変化している区間（変化域）は異なっているものの，いずれの被験者においてもおよそ 30 の幅を持った変化域において，膨張量がほぼ線形に変化していることがわかる．このことより，長母指外転筋および短母指伸筋の膨張に伴うセンサ値の変化量が指の移動量と線形関係にあることが示された．

膨張量の測定に用いるフォトリフレクタの数

膨張量の測定に用いるフォトリフレクタの数の影響を調べるため，膨張量設定を変えて解析を行った．膨張量の設定には，親指スライド動作からの影響が最も大きかったフォトリフレクタ 4 を中心に行った．

結果を図 3.17 に示す．図 3.17 はそれぞれの膨張量設定ごとのセンサ合計値の推移を表している．また，グラフの作成においては，被験者 5 人のデータの平均値を用いている．このグラフから，膨張量の測定に用いるセンサ数を増やしても，膨張量と指の移動量の線形関係はほぼ変化がないことがわかった．

3.4　親指の移動量推定アルゴリズム

実験結果から，手首方向への親指スライド動作に伴って長母指外転筋および短母指伸筋がほぼ線形に膨らむという仮定が正しいということが示された．このことを利用すると，親指の移動量推定は指の位置ごとの膨張量が最小値，最大値と比較してどの程度であるかを求め

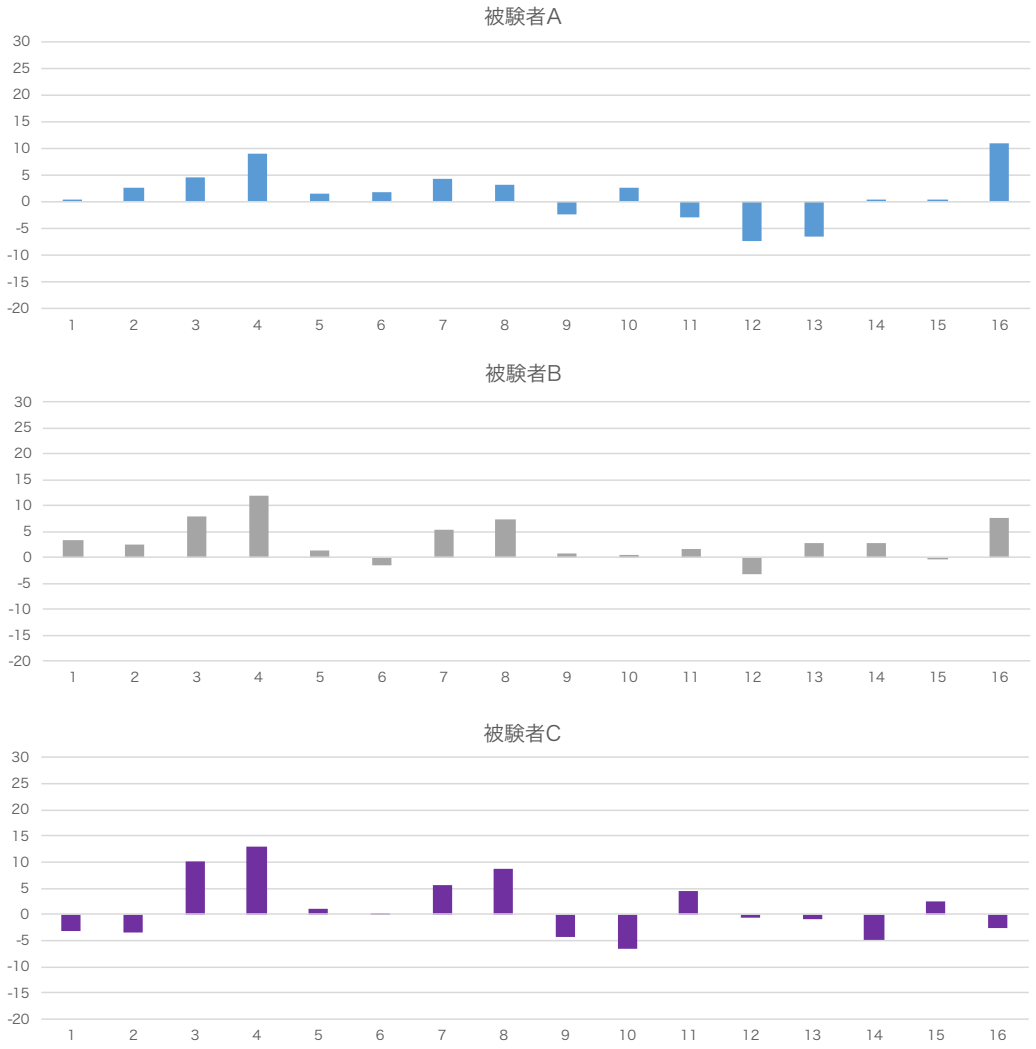


図 3.14: 親指スライドジェスチャ時における各センサ値の変化量（被験者 A – C）

図 3.15: 親指スライドジェスチャ時における各センサ値の変化量（被験者 D，E および 平均）

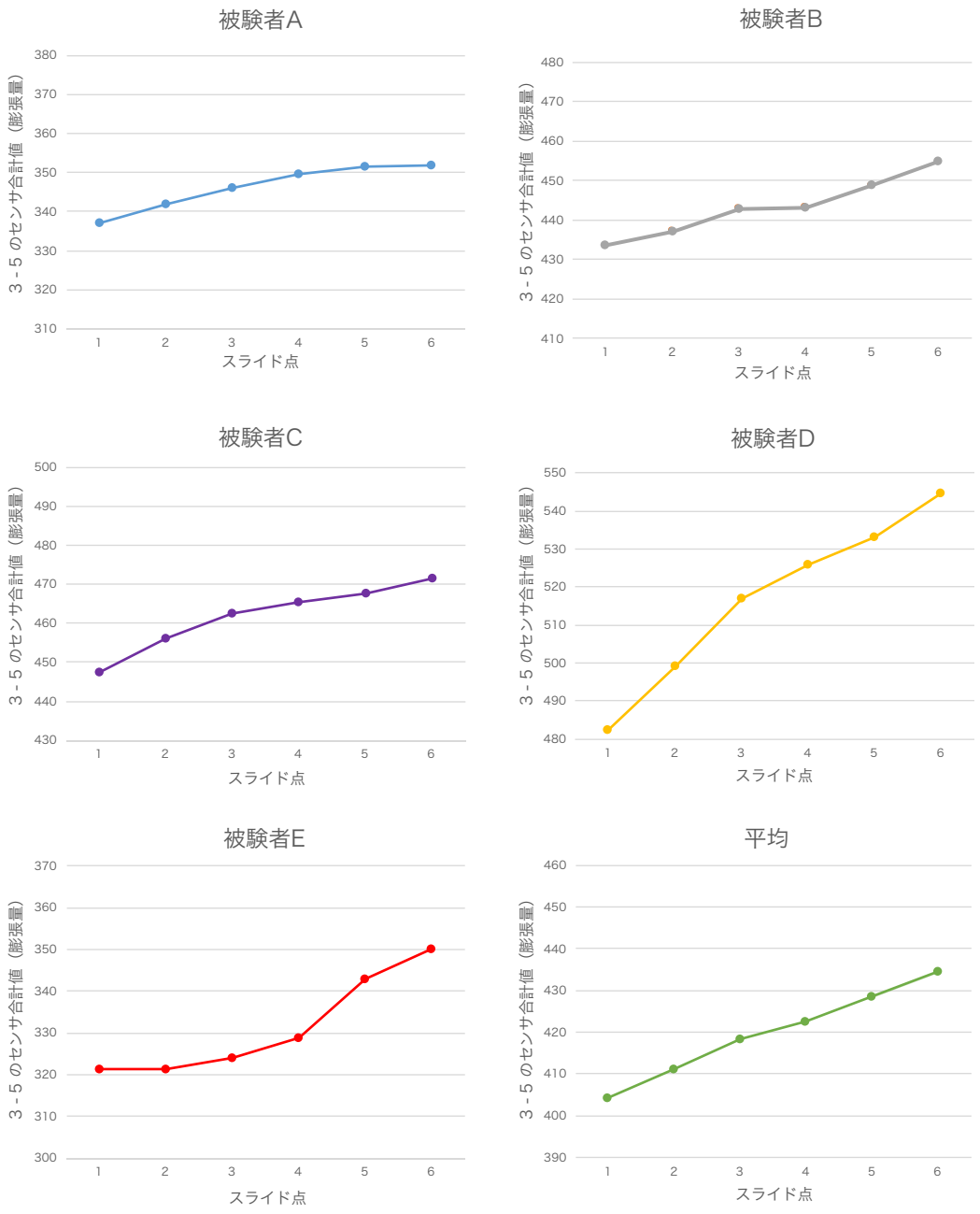


図 3.16: 各スライド点におけるフォトリフレクタ 3–5 のセンサ合計値（膨張量）の変化

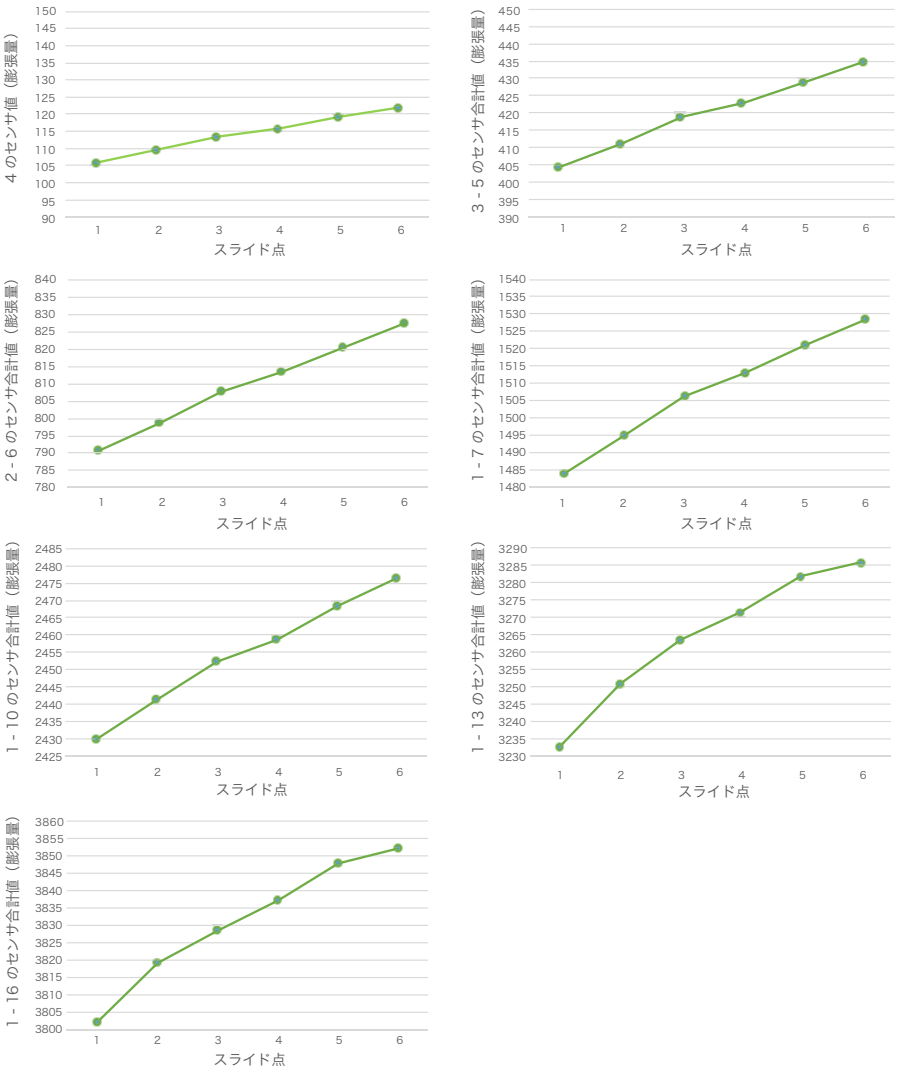


図 3.17: 各膨張量設定におけるセンサ合計値（膨張量）の推移

るという計算の少ない処理にて行うことができる．つまり，膨張量の最小値を min，最大値を max，現在の指位置における膨張量を cur とすると，親指の位置は

$$\frac{cur - min}{max - min} \tag{3.1}$$

にて求められ，0 から 1 の値にて表される．本研究はこのアルゴリズムを用いて，親指の移動量推定を行うシステムを作成した．以降，このシステムを ThumbSlide システムと呼ぶ．

3.5 キャリブレーション

本研究において作成された ThumbSlide システムは，膨張量の最大値および最小値をキャリブレーションにより取得する．キャリブレーションにおいて，ユーザは親指の動く範囲において一度だけ親指スライド動作を行う．ThumbSlide システムはこのキャリブレーション中のセンサ値の変化を観察し，その最小値および最大値を記録する．なお，この際に観察されるセンサ値はあらかじめ膨張量として用いると設定されたフォトリフレクタのセンサ合計値である．

第4章　決定操作の実装

ThumbSlide は決定操作と組み合わせることにより，スマートウォッチの基本的な操作であるターゲットの選択決定を片手にて行うことを可能とする．この決定操作の実装方法を模索するにあたり，様々な手の動きにおけるセンサ値の変化を観察するためのアプリケーションを作成した（図 4.1）．本アプリケーションは現在のセンサ値をバーの高さにより表し，バーの色の濃淡を用いて直前からのセンサ値の変化量を表す．

本節においては，このアプリケーションによる観察を基に実装を行った 2 種類の決定操作を示す．本節のアプリケーションにおける観察にはベルト型センサデバイスの試作機 1 を図 3.13 のように取り付けて行った．

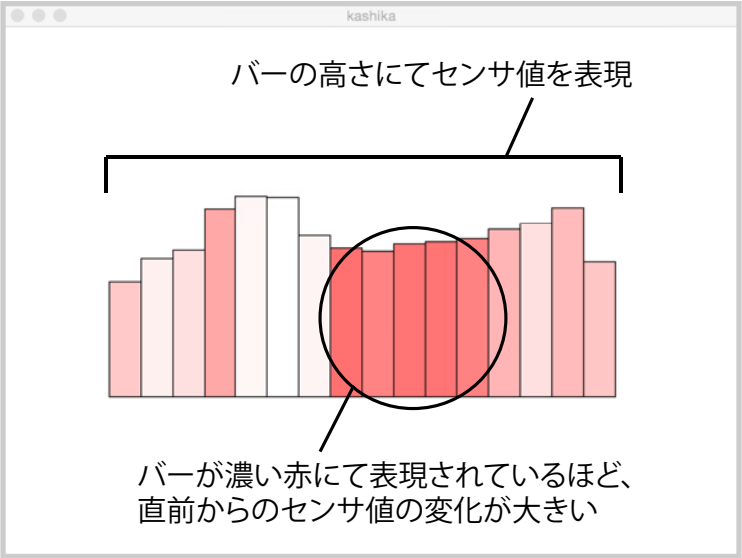


図 4.1: センサ値可視化アプリケーション

4.1　小指の握り込み動作による決定操作

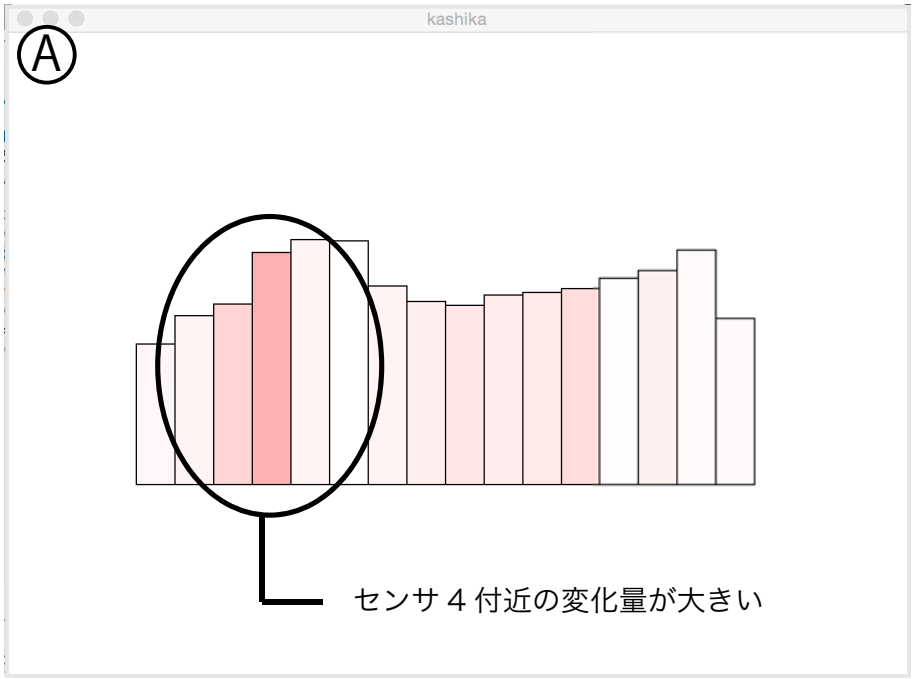
アプリケーションを用いて，小指の握り込み動作（小指を手のひらに押し込む動作）および親指スライド動作時におけるセンサ値の変化を観察した．図 4.2 にそれぞれの動作時におけるセンサ値の変化を示す．図 4.2A は親指スライド動作時におけるセンサ値の変化を表し，図からフォトリフレクタ 4 付近の変化が大きいことがわかる．また，図 4.2B は小指握り込み動作におけるセンサ値の変化を表し，図からフォトリフレクタ 4 付近の変化は小さいのに対しフォトリフレクタ 14 付近のセンサ値の変化は大きいことがわかる．これらより，小指押し込み動作は親指スライド動作と競合しない決定操作であると考えられる．

実際に小指押し込み動作を決定操作として実装を行った結果を示す．実装は，フォトリフレクタ 10 – 14 の直前からのセンサ値の変化量の和が閾値を越えると決定操作とみなすものとして実装した．結果は，小指握り込み動作時に多少親指の移動量推定に影響がでるものの，十分決定操作として使えることがわかった．ただし，この方法においては，センサの取り付け位置を限定する必要があり，腕の太さなどにセンサ位置が影響を受けてしまうことも考えられる．また，閾値についても装着の仕方によって決定検知の感度が変わってしまうため，今後自動的に閾値を決めるなどの工夫の必要がある．

4.2　手全体の握り込み動作による決定操作

センサの取り付け位置によらない決定操作の実装方法として手全体の握り込み動作を用いる方法を示す．この方法は 16 個全てのセンサの直前からのセンサ値の変化量の和が閾値を越えた時に決定操作とみなす．

実際に実装を行った結果としては，決定操作を行うたびに親指の移動量推定が大きく影響を受けるという欠点があることがわかった．しかし，決定検知は親指の移動量推定が影響を受けるよりも先に行われるため，ターゲットの選択決定のみの利用においては問題ないと考えられる．ただし，この方法においても装着の仕方によって決定検知の感度が変わってしまうため，今後自動的に閾値を決めるなどの工夫をする必要がある．



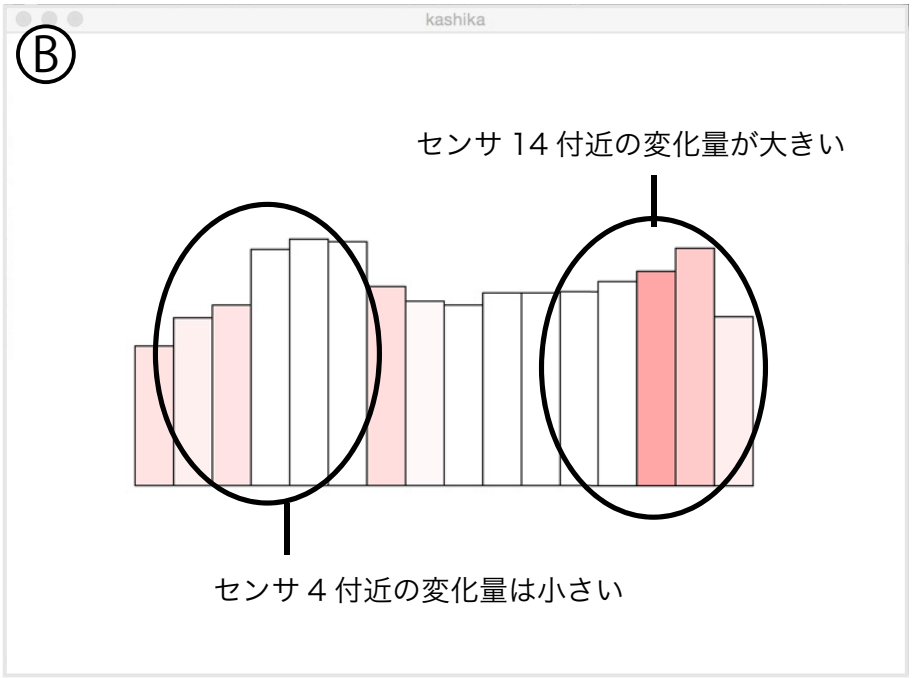


図 4.2: 親指スライド動作時と小指の握り込み動作時のセンサ値変化の比較　A）親指スライド動作時のセンサ値の変化，B）小指押し込み時のセンサ値の変化

第5章　アプリケーション

本章においては，ThumbSlide 向けアプリケーションとして作成したインベーダゲーム，イメージギャラリーおよび利用例として ThumbSlide をスクロール操作に応用する案を示す．アプリケーションにおいては，画面の出力に Sony SmartWatch 3 SWR50（端末サイズ：高さ 51 mm × 幅 36 mm × 厚さ 10 mm，画面サイズ：1.6 インチ，解像度：320 px × 320 px，Android Wear 1.3.0）および，センサ値の処理に Sony Xperia Z3 Compact SO-02G（Android 4.4.4）を使用した．また，ベルト型センサデバイスの試作機 3 を図 5.1 のようにスマートウォッチの内側に装着して使用した．

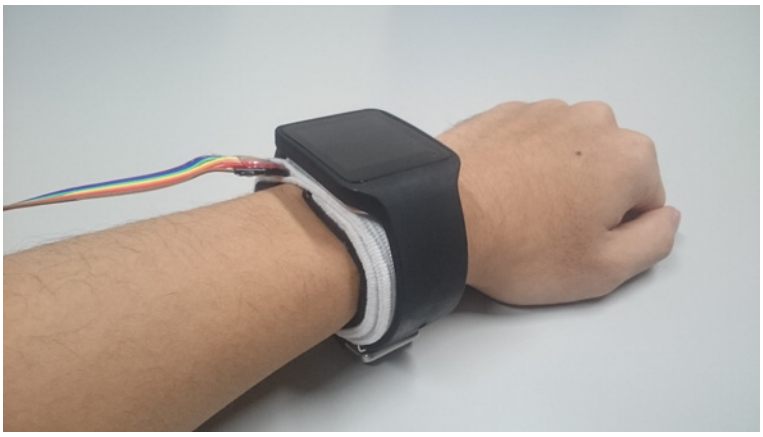


図 5.1: ベルト型センサデバイス（試作機 3）をスマートウォッチの内側に着用した時の様子

5.1　インベーダゲーム

ThumbSlide を用いて片手にて遊べるインベーダゲームを作成した（図 5.2）．本アプリケーションにおいては，弾は自動的に射出されるものとなっており，ユーザは自機の左右移動のみ操作を行う．本アプリケーションの特徴は，ThumbSlide を使用することにより，片手にて遊べる点に加え，指が画面を遮ることなくゲームが楽しめる点である．

図 5.2: アプリケーション：インベーダゲーム

5.2　イメージギャラリー

ThumbSlide によるターゲットの選択と手全体の握り込み動作による決定を用いて，イメージギャラリーを作成した（図 5.3）．本アプリケーションは，画面下部に表示されたサムネイル画像から ThumbSlide および握り動作を用いて画像を選択決定させ，選択された画像を画面上部に表示する．本アプリケーションの特徴はスマートウォッチの基本的な操作であるターゲットの選択決定を片手のみを用いた操作にて行うことができる点である．

図 5.3: アプリケーション：イメージギャラリー

5.3 メール通知時におけるスクロール操作

ThumbSlide の連続操作を生かした利用例として，ThumbSlide をスクロール操作に応用する案を示す．既存のスマートウォッチの多くはスマートフォンと連携することにより，スマートフォンに届いたメールをスマートウォッチに通知し，ユーザがスマートフォンを取り出すことなくメールの内容を確認することを可能にする．この際，スマートウォッチの小さな画面に収まらないメールの内容はユーザがスクロール操作をすることによって表示する．既存のスマートウォッチにおいては，このスクロール操作をタッチパネルへのドラッグにて認識するが，これを ThumbSlide にて行うことにより，ユーザは片手にてメールの全文を確認することが可能となる．従来のタッチパネルによる操作はメールの全文を確認するために，スマートウォッチを装着していない手を用いて操作する必要があるが，これは腕時計における，腕を振り上げるのみにて時間を確認することができるという利便性を損なっている．しかし，ThumbSlide を用いたスクロール操作は腕の振り上げと少しの親指の動きにてメールの全文を確認することができるため，ユーザは腕時計と近い形にて時間以外の情報を得ることが可能となる．

第6章　議論と今後の課題

本章においては，ThumbSlide，握り動作による決定の改善点および発展案を議論し，今後の課題を示す．

6.1　膨張量として利用するフォトリフレクタの数

3.3.2 節にて述べたように，ThumbSlide システムは膨張量として用いるフォトリフレクタの数に関係なく使用することができることがわかった．ベルト型センサデバイスを小型化することを考えた場合，使用するフォトリフレクタの数は少ない方がよいと考えられる．この考えに基づいて作成したベルト型センサデバイスを図 6.1 に示す．本デバイスは 3.2 節にて示した試作機と比べてフォトリフレクタ数を 4 分の 1 の 4 つにしたことにより，枠を含むフォトリフレクタアレイ部の大きさを 25 mm × 50 mm に小型化することができた．

しかしながら，16 個のセンサ全てを用いる利点も多く存在する．そのひとつはベルト型センサデバイスの装着時において，取り付け角度の制限がなくなることである．図 6.1 のデバイスにおいては，使用時にデバイスのセンサ部分が長母指外転筋および短母指伸筋の上に来るように角度を意識して装着する必要がある．また，使用時にデバイスがずれた場合センサ部がこれらの筋肉からはずれ，ThumbSlide を継続して使用できなくなるおそれもある．しかしながら，16 個のセンサ全てを用いる場合においては，膨張量の決定に用いられるセンサ部が手首全体を覆っているため，これらの問題が発生しなくなる．

また，別の利点として認識の分解能があがるという面もある．図 3.17 より，1 個のセンサのみ用いた場合のセンサ値の変化域の幅は 15 程度であるのに対し，16 個全てのセンサを用いた場合は変化域の幅が 50 程度となっていることがわかる．これは，使用するセンサ数を増やすことにより，より細かな推定を行えるようになることを示している．

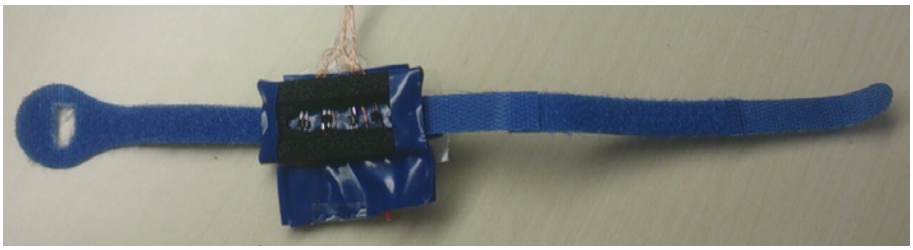


図 6.1: 4 つのみのフォトリフレクタを持つベルト型センサデバイス

6.2 入力状態と非入力状態の区別

スマートウォッチは常に身に着けているデバイスであるため，本手法を用いる入力状態と非入力状態を区別する必要がある．状態の切り替えにおいては，スマートウォッチが顔の前に腕が構えられた場合にのみ入力を受けつけるようにすることを考えている．既存のスマートウォッチは顔の前に腕が構えられると自動で画面のバックライトが点灯する仕組みがあり，このような方法により自然に非入力状態から入力状態へ切り替えられると考えている．また，より誤作動を減らすために，ある程度手を握っている場合にのみ入力を受け付けるという方法も考えている．

6.3 親指タップ動作による決定操作

4 章にて述べた手の握り動作による決定操作の実装に加え，親指を人差し指の側面にぶつける動作（親指タップ動作）により決定を行うという方法も考えられる．これは指釦 [福本 99] と同様に加速度センサを用いて親指タップ動作の衝撃を検知することにより行う．この方法による実装の利点は，実装においてスマートウォッチ内蔵の加速度センサを用いることができるため，追加のセンサを必要としない点である．また，先の握り動作との併用をすることもできるため，握り動作をキャンセル動作に，親指タップ動作を決定に割り当てるなど，より豊かなスマートウォッチへの入力が可能になる．

6.4 腕の移動や回転への対応

手首の形状は，指の動作だけではなく腕の位置や回転動作にも影響をうける．そのため，3.4 節にて述べた方法において，親指の移動量を推定するには ThumbSlide の使用時に腕が固定されていることを前提とし，固定された状態にてキャリブレーションを行うことを必要とする．また，腕が移動または回転した場合，手首の形状が変化し以前のキャリブレーションデータが使用できなくなる．

これに対応するため，5 章にて述べたアプリケーションの実装においては，腕の移動または回転が検知されると，再び腕の姿勢が固定されるまでアプリケーションを停止するものと

した．この実装には，SmartWatch 3 の傾きセンサを用いて腕の移動または回転を検知し，膨張量の最大，最小値のデータを初期化するものとした．また，キャリブレーションはアプリケーション再開時に行うこととした．

6.5 キャリブレーション

ThumbSlide システムによる親指の移動量推定には 3.5 節にて述べた手順を必要とする．しかし，ThumbSlide を使用するたびにこのような手順を踏むことは，ThumbSlide の使用において煩わしさを生んでしまうと考えられる．これらの煩わしさをなくすため，本節では，ThumbSlide を使用しながらキャリブレーションを行うシステムの設計方法，およびキャリブレーションを必要としないシステムの設計方法を提示する．

6.5.1 ThumbSlide を使用しながらキャリブレーションを行うシステムの設計

図 6.2 は，ThumbSlide システムの起動時のセンサ値を起点に，センサ値が動くたびに膨張量の最大値および最小値を更新するというキャリブレーション方法を示している．この方法は，システムの起動時においては最小値，最大値の設定および現在のセンサ値が一致している．しかし，現在のセンサ値が変化し，最小値（最大値）の設定よりも値が小さく（大きく）なると，最小値（最大値）の設定が更新されるようになっている．この方法を用いることにより，ユーザはキャリブレーションを意識せずに ThumbSlide を用いることができるようになるため，6.4 節に示したような方法により，キャリブレーションデータが初期化されても，すぐに ThumbSlide の使用を再開することができる．

6.5.2 キャリブレーションを必要としないシステムの設計

本論文にて示した ThumbSlide システムは，使用前のキャリブレーションにより親指スライド動作時における膨張量の最小値および最大値を取得することによって，親指スライド動作におけるセンサ値の変化域を得る必要があった．しかし，この方法においては，図 6.4 にて述べたように腕の回転により手首の形状が変化し，変化域がずれる．しかしながら，変化域の幅（変化幅）を手動にて設定することにより変化域を自動でずらすことが可能である．これは，図 6.3 のように，推定に用いるセンサ値が変化域から外れていた場合，その値に合わせるように変化域（最小値，最大値の設定）を移動させることによる．変化幅に関しては，3.3.2 節にて述べたようにユーザ間の違いが大きくないと考えられるため，最適な変化幅を設定することにより手動による設定をなくすことが可能であると考える．今後はこの変化幅の個人差の調査も含めて実験を行う．

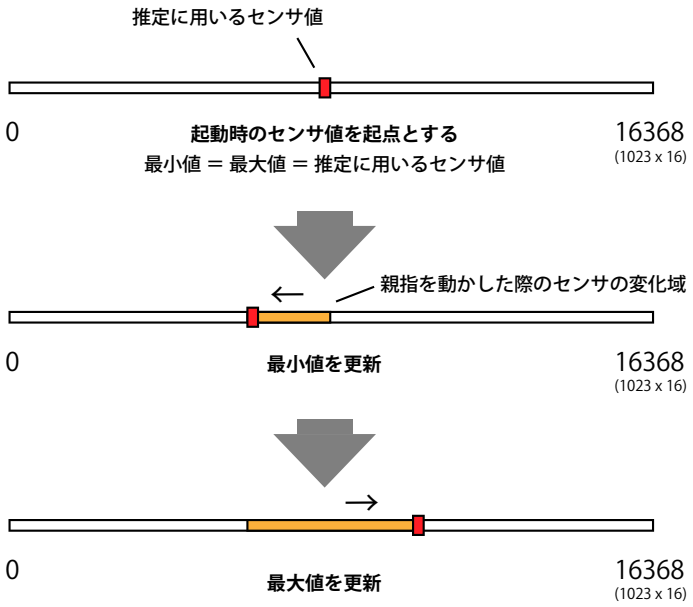


図 6.2: ThumbSlide を使用しながらキャリブレーションを行うシステムの設計

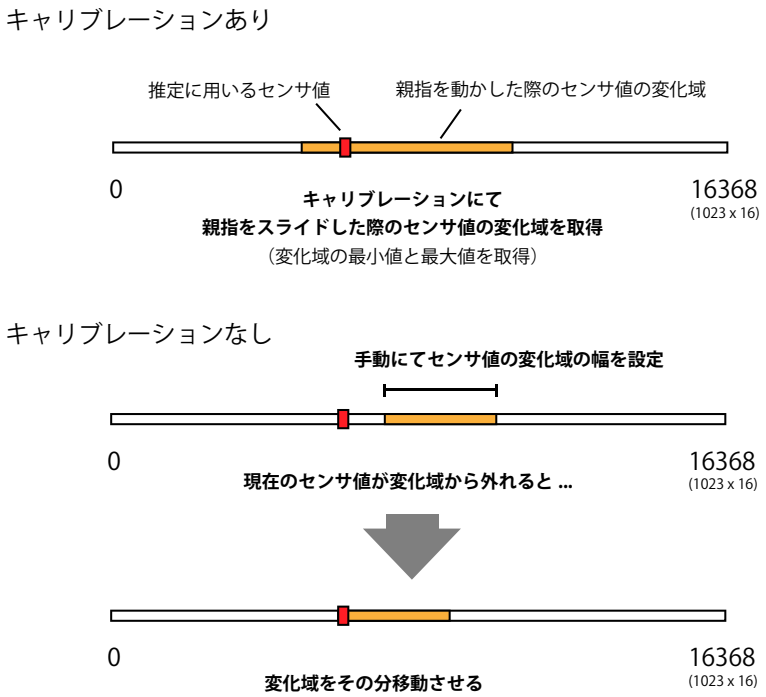


図 6.3: キャリブレーションを必要としないシステムの設計

6.6　静的ジェスチャを用いた操作の拡張

本研究におけるベルト型センサデバイスにおいても，Fukui らの研究 [FWSS15] と同様の静的ジェスチャの認識を行うことが可能である．実際にジェスチャ認識を行った様子を図 6.4 に示す．このジェスチャ認識においては，機械学習のオープンライブラリである LIBSVM[CL11] を用いたアプリケーションを作成し，使用した．このアプリケーションは，ベルト型センサデバイスから得られたジェスチャごとのセンサ値を学習し，それをもとにジェスチャの認識を行う．このように機械学習を用いることによりジェスチャの認識は行えるものの，親指以外の動きも伴うジェスチャは親指の移動量推定に用いる手首の形状に影響を与えるため，ThumbSlide と同時に使用することは難しい．しかしながら,「取り消し操作」「メニューの表示」といった選択を伴わない操作には適用することはできると考えられるため，ThumbSlide とこれらのジェスチャ入力を組みあわせることにより，より豊かな入力が可能になると考えられる．

また，片手操作を実現するという本研究の趣旨とは異なっているものの，本デバイスは SkinWatch[OI15] のようなスマートウォッチの縁に対する押し込みやデバイス周囲の皮膚に対する入力も検出することが可能となるため，ThumbSlide との併用によりより豊かな入力が可能になると考えられる．

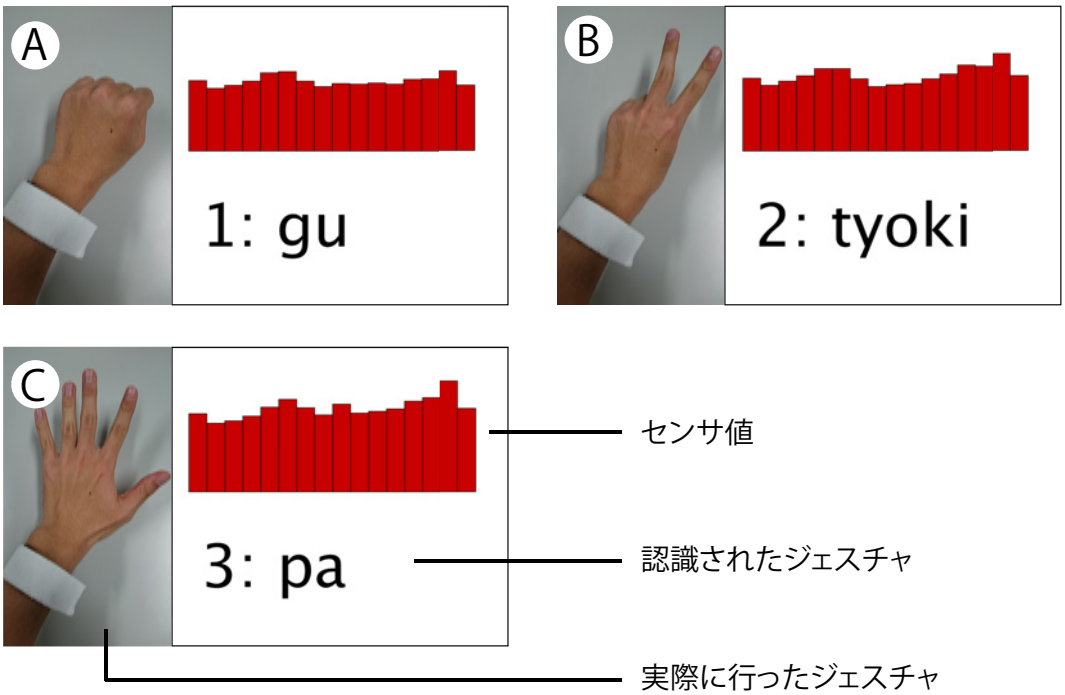


図 6.4: ジェスチャ認識　A）手を「グー」の形にした時，B）手を「チョキ」の形にした時，C）手を「パー」の形にした時

6.7　手首の太さの違いによる影響

本論文にて行った実験は同年代の男性に対して行われたため，腕の太さなどの条件が似たものとなっている．したがって，今後は，子供や手首の細い女性も対象にした実験を行い，本手法がどの程度腕の太さなどに影響を受けるかを調べる予定である．

第7章　まとめ

本論文では，親指スライド動作による手首装着型端末（スマートウォッチ）の操作手法を提案し，その実装方法を示した．実装においてはフォトリフレクタを用いたベルト型センサデバイスを作成し，親指スライド動作時におけるセンサ値の最小値，最大値と指の位置ごとのセンサ値を比較することにより，指の移動量の推定を行った．これは，指の移動量とセンサ値の変化量が線形の関係にあることに基づいており，実験を通してこのことを確認した．また，ベルト型センサデバイスを小型化することにより，スマートウォッチの内側に本デバイスを装着できるようにし，それを利用したアプリケーション例を示した．

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，田中二郎先生，高橋伸先生には多くのご意見とご指導を頂きました．心からお礼申し上げます．特に，志築文太郎先生には，研究の進め方から論文執筆など研究者としての基礎を細かにご指導頂きました．さらに，研究に関して相談に乗っていただき，多くのご助言を頂きました．深く感謝致します．また，インタラクティブプログラミング研究室の同期，先輩の方々には多方面においてお世話になりました．特に，WAVE チームの阿部哲也氏，高田崚介氏には電子工作の知識など本研究において欠かせない知識を授けてくださり，彼らがいなければ本研究を進めることはできなかったと感じております．また，論文執筆に際して，WAVE チームの同期，先輩の方々には丁寧にご指導を頂きました．このような恵まれた環境にて研究を行えたことは大変幸せであったと感じております．最後に，私を育て，精神面および金銭面において大学生活を支えてくださった両親に深く感謝致します．

参考文献

[CGF14] Xiang 'Anthony' Chen, Tovi Grossman, and George Fitzmaurice. Swipeboard: A Text Entry Technique for Ultra-small Interfaces That Supports Novice to Expert Transitions. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 615–620, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[CL11] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. Libsvm: A library for support vector machines. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, Vol. 2, No. 3, pp. 1–27, 2011.

[DP14] Artem Dementyev and Joseph A. Paradiso. WristFlex: Low-power Gesture Input with Wrist-worn Pressure Sensors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 161–166, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[FWSS15] Rui Fukui, Masahiko Watanabe, Masamichi Shimosaka, and Tomomasa Sato. Hand Shape Classification in Various Pronation Angles using a Wearable Wrist Contour Sensor. *Advanced Robotics*, Vol. 29, No. 1, pp. 3–11, 2015.

[HHIL15] Jonggi Hong, Seongkook Heo, Poika Isokoski, and Geehyuk Lee. SplitBoard: A Simple Split Soft Keyboard for Wristwatch-sized Touch Screens. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1233–1236, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[HRS+14] Md. Mehedi Hasan, Arifur. Rahaman, Md. Faisal Shuvo, Md. Abu Saleh Ovi, and Md. Mostafizur Rahman. Human Hand Gesture Detection based on EMG Signal using ANN. In *Informatics, Electronics Vision (ICIEV), 2014 International Conference on*, pp. 1–5, 2014.

[HTM10] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: Appropriating the Body As an Input Surface. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 453–462, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[HZS+15] Donny Huang, Xiaoyi Zhang, T. Scott Saponas, James Fogarty, and Shyamnath Gollakota. Leveraging Dual-Observable Input for Fine-Grained Thumb Interaction Using

Forearm EMG. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 523–528, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[JBSK09] Perng John, KAngchun, Fisher Brian, Hollar Seth, and Pister Kristofer, S. J. Acceleration sensing glove. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '09, pp. 178–180, 2009.

[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*, pp. 39:1–39:4, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[KMPB+14] Jarrod Knibbe, Diego Martinez Plasencia, Christopher Bainbridge, Chee-Kin Chan, Jiawei Wu, Thomas Cable, Hassan Munir, and David Coyle. Extending Interaction for Smart Watches: Enabling Bimanual Around Device Control. In *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, pp. 1891–1896, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[LT13] Unseok Lee and Jiro Tanaka. Finger Controller: Natural User Interaction using Finger Gestures. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction: Interaction Modalities and Techniques - Volume Part IV*, pp. 281–290, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer-Verlag.

[LWH+15] Jhe-Wei Lin, Chiuan Wang, Yi Yao Huang, Kuan-Ting Chou, Hsuan-Yu Chen, Wei-Luan Tseng, and Mike Y. Chen. BackHand: Sensing Hand Gestures via Back of the Hand. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 557–564, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[LXC+14] Gierad Laput, Robert Xiao, Xiang 'Anthony' Chen, Scott E. Hudson, and Chris Harrison. Skin Buttons: Cheap, Small, Low-powered and Clickable Fixed-icon Laser Projectors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 389–394, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[OARSM15] Santiago Ortega-Avila, Bogdana Rakova, Sajid Sadi, and Pranav Mistry. Non-invasive Optical Detection of Hand Gestures. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, pp. 179–180, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[OHOW13] Stephen Oney, Chris Harrison, Amy Ogan, and Jason Wiese. ZoomBoard: A Diminutive Qwerty Soft Keyboard using Iterative Zooming for Ultra-small Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2799–2802, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[OI15] Masa Ogata and Michita Imai. SkinWatch: Skin Gesture Interaction for Smart Watch. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, pp. 21–24, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[OSM+13] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Michita Imai. SenSkin: Adapting Skin as a Soft Interface. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 539–544, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[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. ACM.

[Rek01] Jun Rekimoto. GestureWrist and GesturePad: Unobtrusive Wearable Interaction Devices. In *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '01, pp. 21–27, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.

[SRC05] Katie A. Siek, Yvonne Rogers, and Kay H. Connelly. Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs. In *Proceedings of the 2005 IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT'05, pp. 267–280, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer-Verlag.

[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*, pp. 7:1–7:6, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[WLB+15] Martin Weigel, Tong Lu, Gilles Bailly, Antti Oulasvirta, Carmel Majidi, and Jürgen Steimle. iSkin: Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2991–3000, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[WPSN15] Anusha Withana, Roshan Peiris, Nipuna Samarasekara, and Suranga Nanayakkara. zSense: Enabling Shallow Depth Gesture Recognition for Greater Input Expressivity on Smart Wearables. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 3661–3670, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[XLH14] Robert Xiao, Gierad Laput, and Chris Harrison. Expanding the Input Expressivity of Smartwatches with Mechanical Pan, Twist, Tilt and Click. In *Proceedings of the*

SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 193–196, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[XPM15] Chao Xu, Parth H. Pathak, and Prasant Mohapatra. Finger-writing with Smartwatch: A Case for Finger and Hand Gesture Recognition using Smartwatch. In *Proceedings of the 16th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 9–14, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[ZH15] Yang Zhang and Chris Harrison. Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 167–173, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[下岡 15] 下岡純也, 浅井洋樹, 山名早人. スマートウォッチにおけるアイズフリー日本語入力手法. 第 23 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS '15, pp. 211–212, 2015.

[金井 14] 金井達巳, 宮下芳明. 極小タッチデバイスにおける文字の分割入力手法. 第 22 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS '14, pp. 145–146, 2014.

[塚田 02] 塚田浩二, 安村通晃. Ubi-finger：モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3675–3684, 2002.

[福本 99] 福本雅朗, 外村佳伸. 指釦：手首装着型コマンド入力機構. 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 389–398, 1999.