

親指の移動量推定に基づくスマートウォッチの片手操作手法

青山 周平 阿部 哲也 志築 文太郎 田中 二郎

本論文では、タッチパネルを使わずに片手にてスマートウォッチを操作する手法「ThumbSlide」を示す。ThumbSlide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次元の連続的な入力を可能とする手法である。本手法は、握り動作などによる決定操作を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。本手法の実装は親指動作に伴う手首の形状変化から親指の移動量を推定することにより行われる。また、決定操作は手が握られた際の手首形状を用いて認識する。本論文は、手首の形状変化を取得するためのデバイスの実装を述べるとともに、実際にデバイスを用いて測定した親指のスライド移動時の手首の形状変化の測定結果および親指移動量推定の精度を述べる。

We present ThumbSlide, which is one-handed thumb interaction technique for smartwatch. This technique realizes continuous manipulation by estimating the moving amount of the thumb. Combining with any determining operation (e.g., clench of the hand), our technique enables the user to select a target by only the hand that is wearing a smartwatch. Our system estimates the moving amount of the thumb by muscles' expansion caused by its movement. The muscle expansion is measured by a specially designed wrist-worn sensor device. Moreover, the device can recognize the clench of the hand as a change of the wrist's contour. In this paper, we show the implementation of ThumbSlide, the experimental data of muscles' expansion caused by movement of the thumb, and the estimation accuracy in the moving amount of the thumb.

1 はじめに

タッチパネルを備えたスマートウォッチを操作する際、ユーザはスマートウォッチを装着した側の腕を構え、装着側とは別側の手によりタッチ操作を行う。このような操作方法は、装着側とは別側の手が荷物を持っている状態などにおいて、ユーザがスマートウォッチを操作することを困難にする。また、小さな画面に対してタッチ操作を行う必要があることは、タッチの対象が指よりも小さい際に起こる Fat Finger 問題[20]を引き起こす。

そこで本研究では、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次元の連続的な入力を可能とするものである(図1)。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ことが可能となる。また、タッチパネル外にて操作

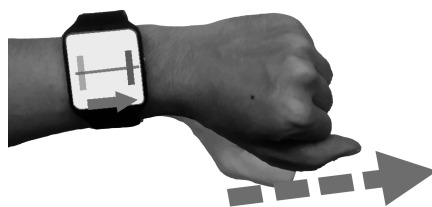


図1 ThumbSlide の操作イメージ

An Interaction Technique for Smartwatches based on Estimating the Moving Amount of the Thumb.

Shuhei Aoyama, Tetsuya Abe, Buntarou Shizuki and Jiro Tanaka, 筑波大学, University of Tsukuba.

コンピュータソフトウェア, Vol.34, No.2 (2017), pp.102-113.

[研究論文] 2016年5月30日受付.

を行うため、Fat Finger 問題を解消できる。

2 関連研究

本手法は、スマートウォッチを装着した側の親指の動きを認識することにより、スマートウォッチの操作領域を拡張する研究である。本節では、本研究と同様にウェアラブルデバイス向けに操作領域を拡張することを試みた研究を述べる。また、手や指の動きを認識することを試みた研究も述べる。

2.1 ウェアラブルデバイスの操作領域拡張

ウェアラブルデバイスの操作領域を拡張する手段として、デバイス周辺の皮膚や空中を利用する研究は数多くなされている。SenSkin [16] は、腕の皮膚表面に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タッチ入力を検出する。iSkin [21] 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タッチ入力を検出する。Skin Buttons [13] は、腕時計型デバイスからレーザープロジェクタを用いてボタンを腕に投影し、投影された場所に対する指の接触を赤外線近接センサにて認識することにより入力を検出する。Skinput [8] 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入力を検知する。zSense [22] 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ジェスチャを認識する。SkinWatch [15] はスマートウォッチの裏面にフォトリフレクタを複数設置することにより、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。Xiao ら [23] の研究は、スマートウォッチ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。

これらの研究はデバイスの操作領域を大きく広げることが可能であるものの、デバイスを装着した側の手とは別側の手にて操作を行う必要がある。一方、我々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。

2.2 手や指の動きの認識

手や指の動きを認識するためのセンシングデバイスとしてカメラを用いる手法が数多く研究されている。例えば、Digits [12] は赤外線カメラおよび赤外線プロジェクタからなる腕装着型デバイスを用いて、手の姿勢を認識する。また、DigiTap [18] は手首に装着した魚眼レンズカメラを用いて、親指とその他の指先とのタップを認識する。さらに、CyclopsRing [1] は指に魚眼レンズカメラを装着することにより、様々な手のジェスチャを認識する。

その他の、カメラを用いた手や指のジェスチャの認識方法として、小型の深度カメラを利用する手法も存在する。例えば、Air+Touch [2] はスマートフォンに装着された深度カメラを用いて、タッチスクリーン上のホバージェスチャを認識する。同様に、Transture [6] は腕に装着した深度カメラを用いてスマートウォッチ上のホバージェスチャを認識する。これらの手法に対して、本手法は、センシングデバイスをスマートウォッチのベルトの内側に収めるため、ベルトの外側に装着する必要があるカメラは用いない。

手や指の動きを認識するためにカメラ以外の小型のセンシングデバイスを用いる手法もある。Magic Ring [11] は加速度センサが組み込まれた指装着型デバイスを用いて指のジェスチャを認識する。Hasan ら [9] および Huang ら [10] の研究は筋電位センサを用いて手のジェスチャを認識する。Tomo [24] は電気インピーダンス・トモグラフィを用いて手のジェスチャを認識する。Abracadabra [7] は指に装着した磁石およびデバイスの磁力センサを用いて、指の動きを認識する。BackHand [14] は手の甲に取り付けたひずみセンサを用いて、手のジェスチャを認識する。これらの手法に対して、本手法は赤外線近接センサを用いる。

本手法と同様に、手首の形状変化から手や指の動きを認識する手法もすでに研究されている。Fukui らの研究 [4] および Ortega-Avila らの研究 [17] 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手首の形状変化を計測することにより、手のジェスチャを認識する。WristFlex [3] 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 [19] も同様に静電容量式の近接センサによりこれを行う。これらの手法は、手首の形状変化を、動きを伴わない静的なジェスチャを認識することに利用するのに対し、本手法は動的な親指の動きを推定することに利用する。また、手首に巻いたフォトリフレクタアレイにより手首の動きを認識し、スマートウォッチの片手操作を実現する手法として WristWhirl [5] もある。この手法に対し本手法では、手首ではなく親指の動きを認識することにより、スマートウォッチの片手操作を実現する。

3 ThumbSlide

ThumbSlide 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次元の連続的な入力を可能とする操作手法である。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ことが可能となる。本研究では、手首の形状変化を測定するベルト型センサデバイスを作製し、それを用いて ThumbSlide を実装する。本節においては、ベルト型センサデバイスにて親指の移動量を推定する方法を述べるとともに、その実装方法を述べる。

3.1 親指スライド動作

親指で人差し指側面をなぞる動作(親指スライド動作)には、以下に挙げる利点がある。まず、操作に用いられる親指が人差し指側面にて支えられるという利点がある。このため動作が安定すると考えられる。また、他の指を用いた入力と併用できるという利点もある。例えば、親指スライド動作を選択操作として用い、他の指を握りこむ動作を決定操作として用いるという組み合わせが可能である。さらに、動作を検出しやすいという利点もある。これは、親指の動作に関連する筋肉が手首において皮膚近くに位置するためである。図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、短母指伸筋は親指を外転させるための筋肉であり、親指スライド動作時に伸縮し手首の形状に変化を与える。これらの利点から、我々

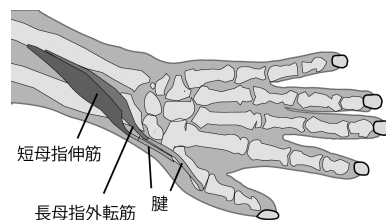


図2 親指動作に関連する筋肉および腱

は親指スライド動作を利用することにした。

3.2 実験用ベルト型センサデバイス

親指スライド動作に伴う手首の形状変化を調べるために、実験用ベルト型センサデバイスを作製した。このデバイスは Fukui らのデバイス [4] と同様に、手首表面とフォトリフレクタを取り付けたベルトの間に隙間を設け、この隙間の大きさをリアルタイムに測ることにより手首の形状変化を取得する。実験用ベルト型センサデバイスにおいては手首全体の形状変化を調べるため、我々はフォトリフレクタアレイが手首を覆うようにデバイスを設計した。

作製したデバイスを図3に示す。作製したデバイスはベルト部とブレッドボード部から成る。ベルト部の土台は 230mm × 21mm × 0.4mm のフレキシブル基板である。基板には 16 個のフォトリフレクタ^{†1}と 1つのマルチプレクサ^{†2}を取り付けた。また、フォトリフレクタと手首表面の間に隙間を設けるために、高さ 10mm のウレタンスポンジ製の枠をフォトリフレクタアレイを囲むように取り付けた。この枠の太さは 10mm であり、これを枠内の大きさが 140mm × 10mm となるように取り付けた。このベルトは取り付けられた面ファスナを用いて腕に装着される。ブレッドボード部はマイコン^{†3}および Bluetooth モジュール^{†4}から成り、フォトリフレクタにて取得した 0-1023 のセンサ値を Bluetooth を用いて PC に送信する。

†1 GENIXTEK 社製, TPR-105F

†2 Texas Instruments 社製, CD74HC4067

†3 Arduino Srl 社製, ArduinoNano

†4 Microchip 社製, RN-42

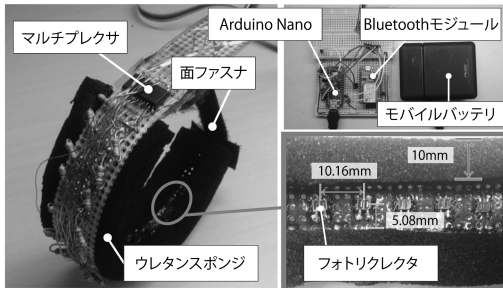


図3 実験用ベルト型センサデバイス

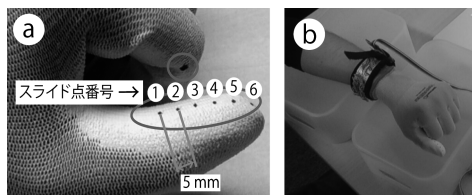


図4 a) 実験に使用したグローブ, b) 実験の様子

4 予備実験：親指スライド動作時における手首の形状変化の測定

親指スライド動作時の手首の形状変化を調べるため、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歳)を被験者として予備実験を行った。この実験の目的は次の2点である。

1. 親指スライド動作時におけるセンサ値の変化を観察し、長母指外転筋および短母指伸筋の伸縮により手首形状が変化することを示す。
2. 長母指外転筋および短母指伸筋の伸縮によるセンサ値の変化量が親指の移動量と線形関係にあることを示す。

本節においてはこの実験の内容および結果、その考察を述べる。

4.1 実験内容

我々はこの予備実験を実験用ベルト型センサデバイスを用いて行った。また、被験者間において親指の移動量を一致させるため、図4に示すグローブ^{†5}を使用した。このグローブは表面がポリウレタンにてコー

†5 ショークグローブ株式会社「ピットリ背抜き(Sサイズ)」 JAN コード: 4901792026109

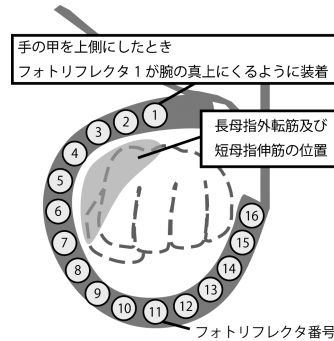


図5 実験用ベルト型センサデバイスと手の位置関係およびフォトリフレクタ番号

ティングされたナイロン製のものであり、その表面には、図4aのように人差し指の側面に1つの点と親指側面に5mm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)が描かれている。

被験者には、グローブを装着した左手および腕を図4b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、手を軽く握るように指示した。これらは、腕の位置や手首の角度、他の指の曲げ状態が実験結果に影響しないようにするためである。ベルトと手の位置関係およびフォトリフレクタ番号を図5に示す。

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。

4.2 結果および考察

4.2.1 手首形状の変化

図6は、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のセンサ値の変化量を表している。図6より、どの被験者においてもフォトリフレクタ

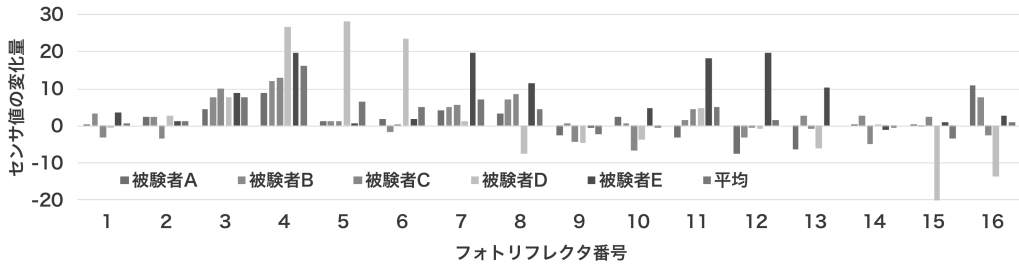


図 6 親指スライド動作時における各センサ値の変化量

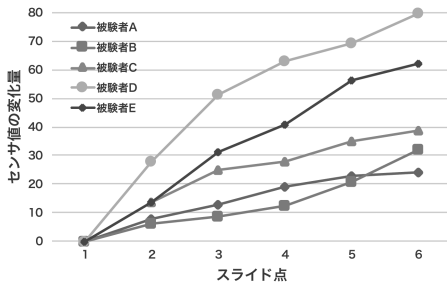


図 7 各スライド点におけるフォトフレクタ 3-8 のセンサ合計値の変化

3-8 のセンサ値の変化量が大きくなっていることが読み取れる。なお、このセンサ値の変化量は親指のスライド移動を奥から手前に行く（親指を曲げる）に伴って、どれだけセンサと皮膚の距離が近づいたかを表している。したがって、図 6 は親指のスライド移動に伴って、フォトフレクタ 3-8 が対応する位置の皮膚が膨らんだことを示している。このことと長母指外転筋および短母指伸筋が図 5 に示される位置にあることから、親指スライド動作時において、長母指外転筋および短母指伸筋の伸縮が手首形状に影響を与えることが示された。

4.2.2 センサ値の変化量と親指の移動量の関係

長母指外転筋および短母指伸筋の伸縮によるセンサ値の変化量と親指の移動量の関係を調べるための解析を行った。図 7 はフォトフレクタ 3-8 のセンサ値を合計した値の変化量を表すグラフである。この変化量はスライド点 1 における値を 0 とし、どれだけセンサ値が変化したかを表している。図 7 から、センサ値はいずれの被験者においても、線形に変

化していることがわかる。このことにより、長母指外転筋および短母指伸筋の伸縮に伴うセンサ値の変化量が親指の移動量と線形関係にあることが示された。

5 親指の移動量推定アルゴリズム

センサ値の変化量と親指の移動量が線形関係であることより、親指の移動量の推定は、現在のセンサ値がセンサ値の変化区間の最小値および最大値と比較してどの程度であるかを求めることにより可能である。つまり、センサ値の変化区間の最小値を min 、最大値を max 、現在のセンサ値を cur とすると、親指の移動量は

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

にて求められ、0 から 1 の値にて表される。ただし、この方法による親指の移動量推定は、事前に変化区間の最小値および最大値を設定する必要がある。これに対し、本研究においては、事前にキャリブレーションとして親指スライド動作を行うことにより、この最小値および最大値を設定する。予備実験における実際の親指の移動量と本アルゴリズムを用いて推定された親指移動量との誤差を図 8 に示す。図 8 より本アルゴリズムは誤差 6mm の範囲において親指の移動量が推定できていることが読み取れる。

ただし、この方法においては腕の位置を動かすたびにキャリブレーションを行う必要が生じる。なぜなら、手首の形状変化が手首の角度、腕の位置および角度にも影響を受けるためである。そのため、本研究では動的に最小値および最大値を設定する。まず事前にキャリブレーションとして変化区間の最小値 min_0 、

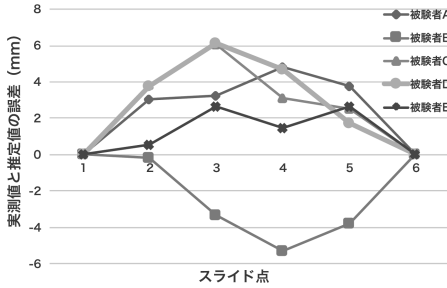


図 8 予備実験における、実際の親指の移動量とアルゴリズムによる推定値の誤差

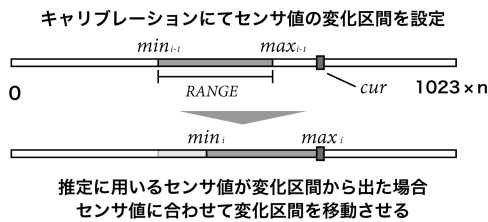


図 9 センサ値変化区間の移動

最大値 max_0 および幅 $RANGE$ (定数) を決める。以降、推定に用いるセンサ値が最小値 min_{i-1} もしくは最大値 max_{i-1} から外れるたびにセンサ値の変化区間を動かす(図9)。つまり、以下の式に基づいて新しく最小値 min_i および最大値 max_i を更新する。

$$min_i = \begin{cases} cur - RANGE & (cur > max_{i-1}) \\ cur & (cur < min_{i-1}) \end{cases}$$

$$max_i = \begin{cases} cur & (cur > max_{i-1}) \\ cur + RANGE & (cur < min_{i-1}) \end{cases}$$

6 小型ベルト型センサデバイス

スマートウォッチ上にてThumbSlideを利用するため、スマートウォッチベルトの内側に装着可能な小型ベルト型センサデバイスを作製した(図10)。実験用ベルト型センサデバイスと異なり、本デバイスにおいては、土台としてゴム布を用い、このゴム布にフレキシブル基板を分割して取り付けた。このように基板を分割することにより基板間に隙間が生じ、実験用ベルト型センサデバイスと比較してデバイスの柔軟性は

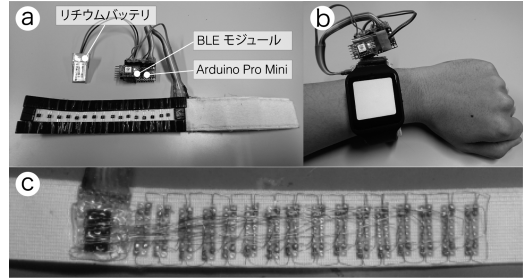


図 10 小型ベルト型センサデバイス：a) デバイス全体、b) デバイス装着時、c) デバイス内部回路

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ベルトの内側への装着を可能とした。また、ウレタンスポンジの枠の高さを3mm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レクタの検知距離が1mm-10mm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、面ファスナも噛み合わせ厚が1mmのものに変更した。そのほか、BluetoothモジュールをBLEモジュール^{†6}に変更し、マイコンもArduino Pro Mini^{†7}に変更した。なお、本デバイス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実験用ベルト型センサデバイスと同じである。

7 実験

親指スライド動作時における手首の形状変化に関して、より多くのデータを集めるため、研究室外から被験者を募り再度実験を行った。本実験の被験者は大学生および大学院生10名である。なお、このうち1名の被験者(被験者B)のデータに関しては実験終了後、実験プログラムの不備が発覚したため、解析には含めなかった。解析にデータを用いた9人(男性9名、年齢18-23歳)のうち、右利きは8名、左利きは1名であった。

†6 有限会社 浅草ギ研 BLESerial 2

†7 SparkFun Electronics 社製, Arduino Pro Mini

7.1 実験内容

実験の手順は予備実験と同様であるが、今回の実験においては小型ベルト型センサデバイスを用いて測定を行った。また、測定に際しては、被験者に腕を台座の上ではなく、直接机の上に乗せてもらった。これは、デバイスの改良に伴い回路がむき出しの状態ではなくなったため、直接机の上に触れても問題ないと判断したためである。なお、小型ベルト型センサデバイスは予備実験と同様に図5のような位置関係にて被験者の左腕に取り付けられた。また、実験終了後にデバイスを装着した箇所における手首の周囲の長さを測定した。

7.2 結果および考察

図11に、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のセンサ値の変化量を示す。また、図12に、スライド点とセンサ値の変化量の相関係数を示す。さらに、表1に、各被験者の手首の周囲の長さを示す。

7.2.1 手首の形状変化

図11から、いずれの被験者においても手首親指側側面にあたるフォトリフレクタ1-10の一部の位置において皮膚が膨らんでいることが確認される。また、図11および図12から、おおよその被験者において、皮膚の膨らんでいる位置と相関係数が高い位置が一致していることが確認される。これらから、長母指外転筋および短母指伸筋の伸縮が手首形状に影響を与え、かつその膨らみ方が親指の移動量と線形関係にあると言える。また、これら相関係数の高い位置のセンサ値を親指の移動量推定アルゴリズムに与えることにより、親指の移動量推定が可能であることが窺える。

ただし、一部の被験者(被験者E, F)において皮膚の膨らみが大きい位置と相関係数の高い位置が一致していない。特に被験者Eにおいてはフォトリフレクタ3の位置におけるセンサ値の変化量が大きいものの、相関係数は0.686と高くない。しかし、被験者Eの皮膚がへこむ位置に関しては、相関係数と一致している。そのため、皮膚の膨らむ位置だけではなく、へこむ位置のセンサ値も利用することにより、より安定したシステムを構築できると考えられる。

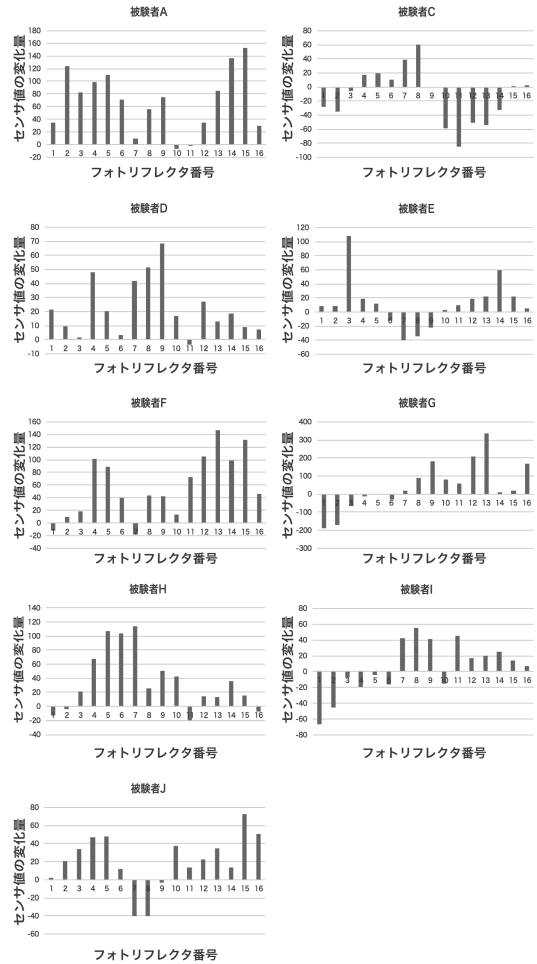


図11 親指スライド動作時における各センサ値の変化量

なお、手首の周囲の長さや皮膚の膨らむ位置や膨らみの大きさとの関係は特に見られない。

一部の被験者(被験者A, F, G, J)においては、手首親指側側面にあたるフォトリフレクタ1-10よりも、手首下部にあたるフォトリフレクタ11-16の方がセンサ値の変化量が大きい。これは腕を直に机に置いた状態にて計測を行ったため、ベルト型センサデバイスが机に押し付けられてセンサ値に影響を与えてしまった可能性がある。しかし、このような手首下部のセンサ値の変化は、予備実験における被験者Eにおいても観察されている。この点に関しては、今回の実験のデータからは主となる要因がわからないため、今後改めて詳細な調査を行う必要がある。

フォトフレクタ番号

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
被験者A	0.936	0.981	0.978	0.982	0.980	0.983	0.234	0.890	0.903	-0.276	-0.433	0.828	0.925	0.932	0.930	0.926
被験者C	-0.986	-0.961	-0.311	0.880	0.928	0.633	0.966	0.940	0.407	-0.704	-0.987	-0.966	-0.904	-0.882	0.665	0.645
被験者D	0.470	0.186	0.095	0.916	0.627	0.167	0.922	0.872	0.884	0.933	-0.421	0.580	0.284	0.381	0.047	0.111
被験者E	0.356	0.383	0.686	0.967	0.525	-0.367	-0.888	-0.938	-0.987	0.283	0.230	0.332	0.390	0.534	0.336	0.339
被験者F	-0.898	0.602	0.871	0.966	0.970	0.986	-0.890	0.799	0.792	0.324	0.903	0.905	0.878	0.820	0.837	0.878
被験者G	-0.771	-0.814	-0.748	-0.279	-0.363	-0.923	0.996	0.789	0.829	0.875	0.291	0.812	0.917	0.973	0.872	0.975
被験者H	-0.895	0.040	0.925	0.967	0.859	0.787	0.734	0.813	0.655	0.670	-0.951	0.224	0.015	0.262	0.421	-0.800
被験者I	-0.834	-0.869	-0.816	-0.731	-0.735	-0.831	0.855	0.858	0.928	-0.874	0.770	0.282	0.279	0.681	0.485	0.676
被験者J	0.684	0.980	0.984	0.973	0.993	0.917	-0.990	-0.965	-0.321	0.865	0.805	0.806	0.947	0.839	0.890	0.887

図 12 スライド点とセンサ値の変化量の相関係数

表 1 被験者ごとの手首の周囲の長さ

	被験者 A	被験者 C	被験者 D	被験者 E	被験者 F	被験者 G	被験者 H	被験者 I	被験者 J
長さ (cm)	15.9	14.9	15.0	18.0	14.8	14.3	15.5	16.4	17.7

7.2.2 親指移動量推定の精度検証

実験にて得られたセンサ値をもとに、推定に用いるセンサ数と移動量推定アルゴリズムの精度の関係を検証した。なお、予備実験とは異なり本実験においては被験者間の個人差が大きかったため、本検証においては、被験者毎に 16 個のセンサから相関係数の絶対値が大きい上位 n 個のセンサの値の合計を用いて推定を行うこととした。なお、相関係数の絶対値を用いる理由は負の相関が大きいセンサも推定に含めるためである (負の相関関係にあるセンサ値に関してはセンサ値の絶対値を推定に用いた)。

推定に用いるセンサ数 n ごとの各スライド点における誤差の絶対値の平均を図 13 に示す。図 13 より、推定に用いるセンサ数が少なくなるほど誤差も小さくなるのがわかる。全てのセンサを推定に用いた場合の移動量の推定の誤差が最大 12mm であるのに対し、相関係数の高い 2 個のセンサを移動量の推定に用いることにより誤差が 3mm 未満になる。ただし、例外的にスライド点 3, 4, 5 において、センサ数が 1 個の場合が 2 個, 3 個の場合よりも誤差が大きくなっている。これは、相関係数が大きい上位 2, 3 つのセンサ値を合計した時の相関係数がセンサ 1 個の場合の相関係数よりも大きくなったためである。このことは全センサの組み合わせに対してセンサ値合計の相関係数を求めることにより、最適なセンサの組み合わせを見つげられることを示唆している。

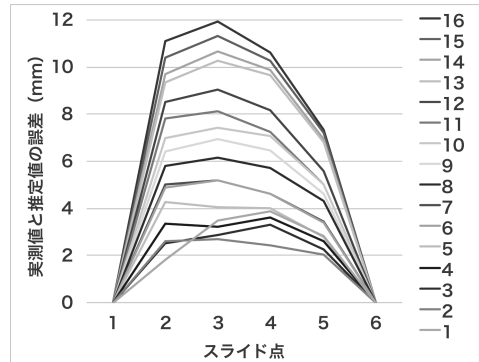


図 13 推定に用いるセンサ数ごとの各スライド点における誤差の絶対値の平均

8 アプリケーション例

ThumbSlide の有用性を示すために、本手法に適する UI を組み込んだアプリケーションを作成した。なお、アプリケーションの実装において、画面の出力には Sony SmartWatch 3 を、センサ値の処理に Sony Xperia Z3 Compact を使用した。

8.1 シューティングゲームアプリケーション

本手法はスマートウォッチにおいて連続的な入力を可能とする操作手法である。また、スマートウォッチ操作におけるオクルージョンの問題を解決する。そのため、本手法はシューティングゲームのような連続的な入力を必要とし、かつ、常に画面の状況を把握する必要があるアプリケーションに対して有用である。図 14a に作成したシューティングゲームアプリケーション

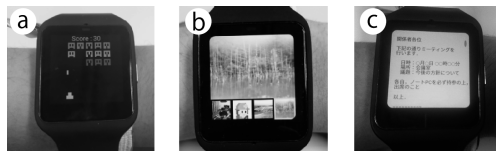


図 14 アプリケーション例： a) シューティングゲームアプリケーション， b) イメージギャラリーアプリケーション， c) メールアプリケーション

ンを示す。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ようにし、ユーザは自機の左右移動のみ本手法によって操作を行うものとした。

8.2 イメージギャラリーアプリケーション

本手法は決定操作と組み合わせることにより、メニュー選択を有するアプリケーションに利用できる。図 14b にこのメニュー選択を組み込んだイメージギャラリーアプリケーションを示す。ユーザは、画面下部に横並び表示されたサムネイル画像から本手法および握り動作を用いて画像を選択決定することによって、選択された画像を画面上部に表示する。なお、本手法を用いる際の UI としては、このアプリケーションに示されるように全てのウィジェットを横並びに配置することが望ましいと考えられる。これは親指の動きと画面内の動きを一致させるためである。

今回、本アプリケーションにおける決定操作として親指以外の手を握る動作を用いた。手が握られた際には、手首形状が大きく変化する。そのため、システムはこの変化を検出することによって決定操作を認識できる。本アプリケーションにおいては手を握った際の手首形状を Support Vector Machine(SVM) を用いた機械学習により認識している。なお、手を握った際の手首の形状変化は親指の移動量推定にも影響を及ぼす。しかし、決定操作の認識は移動量推定が影響を受ける前に行われるため、選択操作を行う際には問題とならない。

8.3 メールアプリケーション

本手法は 1 次元の入力を提供する。そのため、メールを確認する場合などのスクロール操作に有用であると考えられる。タッチパネルを用いてスクロール操作をする場合、ユーザはスマートウォッチを装着していない

側の手を用いる必要がある。これは、スマートウォッチ装着側とタッチパネルを操作する側の両腕を構えることを必要とする。しかし、本手法を用いればスマートウォッチ装着側のみにてメールを確認することが可能となる。図 14c に我々が作成したメールアプリケーションを示す。なお、本アプリケーションにおいては、親指の移動量をスクロールの速度として利用した。

9 議論と今後の課題

9.1 決定操作の改良

決定操作には様々な動作が利用可能であると考えている。現在、イメージギャラリーアプリケーションにおいて述べた握り動作による決定操作に加え、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ている。これは指鉤 [25] 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と考えられる。

9.2 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つけているデバイスであるため、本手法を用いる状態(入力状態)とそうでない状態(非入力状態)を区別する必要がある。特に、本手法が親指の移動量推定に用いる手首形状の変化は、腕の回転や手の姿勢変化と比べて小さいため、日常の多くの動作に影響を受けると考えられる。しかし、スマートウォッチを利用する際にユーザは腕を構えるため、本手法が利用される姿勢は一意に定まる。このため、腕の姿勢とその他の指の姿勢を固定した状態(手を握るなど)、すなわち親指動作以外の手首形状に影響を与える要素を固定した状態をシステムの起動姿勢とすることにより、シームレスに入力状態と非入力状態を区別できると考える。なお、[4] が示すように手首の形状は腕の回転角度と手の姿勢情報を

持っているため、手首の形状から特定の腕の姿勢及び手の姿勢を識別可能である。また、親指を動かした際の手首の形状変化は腕の回転や手の握り動作から起こる手首の形状変化と比べて小さいため、これらの識別に影響を与えないと考えられる。ただしこのような識別方法が日常生活において実際に使用できるのかを今後調査する予定である。

9.3 スライド方向以外の方向への親指の動作

本システムは親指を外転させる筋肉の伸縮を利用しているため、親指スライド動作だけではなく、人差し指から離す動作なども親指の移動量推定に影響を与える。今後はこの影響をなくすため、親指と人差し指側面が接していることを認識するシステムを作成する必要がある。

9.4 アプリケーションの使用感

本手法を用いたアプリケーションの使用感を調査するために、9人の学生に対しシューティングゲームアプリケーションを使用してもらった。その結果、8人の学生が本手法を用いてゲームを遊ぶことができ「思い通りの方向に操作が行える」というコメントが得られた。しかし「指の移動に対するの反応が大きすぎるため制御が難しい」というコメントも多く得られた。これは、ユーザによっては十分に親指の移動が行われていない状態でキャリブレーションが終了したことによると考えている。この原因は現在のキャリブレーションにおいてはユーザは一定時間内（現実装では50サンプル）に親指スライド動作を行う必要があるためである。実際、そのようなユーザに対して再度キャリブレーションを行って貰ったところ、うまく操作できるようになった。したがって、今後はキャリブレーションの終了タイミングをセンサ値の変化量が一定の閾値を超えた場合にするなどの工夫を行う。もしくは、細かな制御を必要としないUIの設計をする必要があると考える。また「親指を動かそうとして別の場所に力が入り意図しない動きをしてしまう」といったコメントも得られた。これは、親指スライド動作が日常的に行われる動作ではないため、親指のみを動かすことが難しいためであると考え、今後、

この問題が慣れにより改善できるかを調べる必要がある。親指スライド動作に不慣れであるという問題に関連して、親指と一緒に人差し指が動いてしまい適切に推定が行えないという問題もある。今回の使用感調査においても1名の学生にこの問題が発生し「人差し指を伸ばした方が操作がしやすい」というコメントが得られた。これは、人差し指を伸ばすことにより、指がより固定しやすくなったためであると考え、したがって、今後は人差し指を伸ばして操作を行うことも検討していく。

また、別の6人の学生にイメージギャラリーアプリケーションおよびメールアプリケーションを使用してもらった。イメージギャラリーアプリケーションに対しては「握っているつもりなのに認識されない」というコメントが多く得られた。このようにコメントしたユーザの使用している状況を観察したところ、手を強く握りこまないと決定操作が認識されていなかった。この問題は、ユーザがどの程度握れば決定操作とみなされるかがわからないため、本人は握りこんでいるつもりでも実際には握りこみが足りていないという状況が発生していることによるものと思われる。したがって今後は手の握り具合をユーザに提示するようにUIを改良する。また、メールアプリケーションに対しては「指移動の加速度をスクロールの加速度に反映してほしい」というコメントが得られた。今後は指の移動量だけではなく指移動の加速度を使うことも検討する。

9.5 手法の適用範囲について

前節に述べた使用感調査において、1人の学生(女性)は本手法を用いたアプリケーションを使用することができなかった。これは、親指スライド動作から生じるセンサ値の変化が十分得られなかったためである。この原因としては筋肉量の違いが考えられる。本手法において推定に用いるセンサ値の変化量は非常に小さいため、親指を動かした際の筋肉の動きが小さすぎると現在のセンサでは観察できない可能性がある。このような問題は今回実験の対象となった20代男性よりも筋肉量が少ない女性や子どもなどにも発生し得る。この問題に関しては、今後女性や子どもなどに

対しても実験を行い、親指を動かした際の筋肉の動きを観察していくことによってこの問題の解決法を探っていく。

10 まとめ

本論文では、親指のスライド移動によるスマートウォッチ操作手法、および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製し、親指のスライド移動時におけるセンサ値の変化区間の最小値および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、親指の移動量の推定を行った。本研究では、被験者実験により親指のスライド移動時における手首の形状変化を観察した。結果、親指スライド動作において親指の移動量とセンサ値の変化に相関があるセンサを適切に選択することにより、親指の移動量を推定することができることがわかった。さらに、実験データを用いて、推定に用いるセンサ数と移動量推定アルゴリズムの精度を検証した。その結果、全てのセンサを推定に用いた場合の移動量の推定の誤差が最大 12mm である一方、相関係数の高い 2 個のセンサを移動量の推定に用いることにより誤差が 3mm 未満になることがわかった。

参考文献

- [1] Chan, L., Chen, Y.-L., Hsieh, C.-H., Liang, R.-H. and Chen, B.-Y.: CyclopsRing: Enabling Whole-Hand and Context-Aware Interactions Through a Fisheye Ring, in *Proc. UIST'15*, pp. 549–556.
- [2] Chen, X. A., Schwarz, J., Harrison, C., Mankoff, J. and Hudson, S. E.: Air+Touch: Interweaving Touch & In-air Gestures, in *Proc. UIST'14*, pp. 519–525.
- [3] Dementyev, A. and Paradiso, J. A.: WristFlex: Low-power Gesture Input with Wrist-worn Pressure Sensors, in *Proc. UIST'14*, pp. 161–166.
- [4] Fukui, R., Watanabe, M., Shimosaka, M. and Sato, T.: Hand Shape Classification in Various Pronation Angles using a Wearable Wrist Contour Sensor, *Advanced Robotics*, Vol. 29, No.1(2015), pp. 3–11.
- [5] Gong, J., Yang, X.-D. and Irani, P.: WristWhirl: One-handed Continuous Smartwatch Input Using Wrist Gestures, in *Proc. UIST'16*, pp. 861–872.
- [6] Han, J., Ahn, S. and Lee, G.: Transture: Continuing a Touch Gesture on a Small Screen into the Air, in *Proc. CHI EA'15*, pp. 1295–1300.
- [7] Harrison, C. and Hudson, S. E.: Abracadabra: Wireless, High-precision, and Unpowered Finger Input for Very Small Mobile Devices, in *Proc. UIST'09*, pp. 121–124.
- [8] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skinput: Appropriating the Body As an Input Surface, in *Proc. CHI'10*, pp. 453–462.
- [9] Hasan, M. M., Rahaman, A., Shuvo, M. F., Ovi, M. A. S. and Rahman, M. M.: Human Hand Gesture Detection based on EMG Signal using ANN, in *Proc. ICIEV'14*, pp. 1–5.
- [10] Huang, D., Zhang, X., Saponas, T. S., Fogarty, J. and Gollakota, S.: Leveraging Dual-Observable Input for Fine-Grained Thumb Interaction Using Forearm EMG, in *Proc. UIST'15*, pp. 523–528.
- [11] Jing, L., Cheng, Z., Zhou, Y., Wang, J. and Huang, T.: Magic Ring: A Self-contained Gesture Input Device on Finger, in *Proc. MUM'13*, pp. 39:1–39:4.
- [12] Kim, D., Hilliges, O., Izadi, S., Butler, A. D., Chen, J., Oikonomidis, I. and Olivier, P.: Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-worn Gloveless Sensor, in *Proc. UIST'12*, pp. 167–176.
- [13] Laput, G., Xiao, R., Chen, X. A., Hudson, S. E. and Harrison, C.: Skin Buttons: Cheap, Small, Low-powered and Clickable Fixed-icon Laser Projectors, in *Proc. UIST'14*, pp. 389–394.
- [14] Lin, J.-W., Wang, C., Huang, Y. Y., Chou, K.-T., Chen, H.-Y., Tseng, W.-L. and Chen, M. Y.: BackHand: Sensing Hand Gestures via Back of the Hand, in *Proc. UIST'15*, pp. 557–564.
- [15] Ogata, M. and Imai, M.: SkinWatch: Skin Gesture Interaction for Smart Watch, in *Proc. AH'15*, pp. 21–24.
- [16] Ogata, M., Sugiura, Y., Makino, Y., Inami, M. and Imai, M.: SenSkin: Adapting Skin as a Soft Interface, in *Proc. UIST'13*, pp. 539–544.
- [17] Ortega-Avila, S., Rakova, B., Sadi, S. and Mistry, P.: Non-invasive Optical Detection of Hand Gestures, in *Proc. AH'15*, pp. 179–180.
- [18] Prätorius, M., Valkov, D., Burgbacher, U. and Hinrichs, K.: DigiTap: An Eyes-free VR/AR Symbolic Input Device, in *Proc. VRST'14*, pp. 9–18.
- [19] Rekimoto, J.: GestureWrist and GesturePad: Unobtrusive Wearable Interaction Devices, in *Proc. ISWC'01*, pp. 21–27.
- [20] Siek, K. A., Rogers, Y. and Connelly, K. H.: Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs, in *Proc. INTERACT'05*, pp. 267–280.
- [21] Weigel, M., Lu, T., Bailly, G., Oulasvirta, A., Majidi, C. and Steimle, J.: iSkin: Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing, in *Proc. CHI'15*, pp. 2991–3000.
- [22] Withana, A., Peiris, R., Samarasekara, N. and Nanayakkara, S.: zSense: Enabling Shallow Depth Gesture Recognition for Greater Input Expressiv-

ity on Smart Wearables, in *Proc. CHI'15*, pp.3661–3670.

- [23] Xiao, R., Laput, G. and Harrison, C.: Expanding the Input Expressivity of Smartwatches with Mechanical Pan, Twist, Tilt and Click, in *Proc. CHI'14*, pp.193–196.
- [24] Zhang, Y. and Harrison, C.: Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition, in *Proc. UIST'15*, pp.167–173.
- [25] 福本雅朗, 外村佳伸: 指鉤: 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(1999), pp.389–398.



青山周平

2016年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒。同大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。ACM, 情報処理学会各会員。



阿部哲也

2015年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒。同大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。ACM, 情報処理学会各会員。



志築文太郎

1994年東京工業大学理学部情報学科卒業。2000年同大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学。博士(理学)。現在、筑波大学大学院システム情報系准教授。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。日本ソフトウェア科学会, ACM, IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。



田中二郎

1975年東京大学理学部卒業。1977年同大学大学院理学系研究科修士課程修了。1984年米国ユタ大学大学院計算機科学科博士課程修了。ユタ大学では関数型プログラミング言語の並列実装に関する研究に従事。Ph.D. in Computer Science。1985年から1988年に(財)新世代コンピュータ技術開発機構にて並列論理型プログラミング言語の研究開発に従事。1993年から2016年まで筑波大学に勤務。2016年から早稲田大学情報生産システム研究科教授。ヒューマンインタフェース全般, プログラミング言語の設計や実装, 未来の情報環境の構築に興味を持つ。ACM, IEEE, 情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。