



# 衣服の変形を利用したインタラクション技術の確立に関する研究

上田, 健太郎

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2020-03-25

(Date of Publication)

2021-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7764号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007764>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 博士論文

## 衣服の変形を利用した インタラクション技術の確立に関する研究

令和2年1月

神戸大学大学院工学研究科

上田 健太郎



## 内容梗概

ユーザがコンピュータを身につけて生活するウェアラブルコンピューティングはその特徴から、人々が日々身につけている衣服との相性が良く、Smart clothing や E-textile と呼ばれるコンピューティングの機能を有する衣服の研究領域がウェアラブルコンピューティングの分野で確立されている。衣服にコンピューティングに必要な機能を搭載することにより、ユーザは衣服を着用するだけで必要な機能を使うことができ、ユーザは他のデバイスを追加で身につけ、持ち運ぶ必要がない高い装着性を実現する。また、回路や配線、電子部品などを衣服内に隠すことができるため、着用によってユーザの外見への影響が小さいので社会受容性が高い。さらに、操作時にポケットや鞆からデバイスを取り出す必要がないため、これまでのコンピューティングスタイルよりも情報へのアクセスがしやすく、さらに、布の柔軟性による布特有のインタラクションをコンピューティングに利用できる。このような特徴をもつ Smart clothing では、従来のマウスやキーボードに代わる入力インタフェースとして衣服を利用したテキスタイルインタフェースやセンサを統合した衣服によるユーザのデータの常時測定や状況認識手法などが研究されている。

これまでに提案されているテキスタイルインタフェースは布の柔軟性を生かした変形させるインタラクションにより触覚刺激のある操作が可能であるが、入力面から情報を得ることができず、ユーザが入力するためにはディスプレイなどの情報提示デバイスが必要になる。そのため、歩行中などのディスプレイの注視が困難な状況、また会議中などの入力操作を秘匿したい状況などでは情報提示デバイスからの情報を取得できず、操作ができない。一方、動的に変形する衣服が提案され、衣服の変形による情報出力機能の可能性を示唆されており、衣服の変形によりユーザに情報を提示することで入力面からの情報を取得して操作ができる。また、状況認識手法では、ユーザの動作による衣服の変形を利用する手法が提案されている。ユーザがほぼ一日中常に身につけている衣服によってユーザの情報、特に生体情報の常時計測が容易となる。生体情報からより高度なユーザの精神的、生理的状态を認識することができれば、より高度なサービスを提供できる。このように、衣服の変形は入力、出力、状況認識などの機能に対して非常に有用であり、衣服の変形の実用性を検討することで新たな衣服を利用したコンピューティングスタイルの礎となる。そこで、本論文では、衣服の変

形を利用したインタラクション技術の確立を目指し、コンピューティングにおいて重要な入力、出力、状況認識機能の3点の機能に着目し、それぞれに衣服の変形を使用したシステムの構築を目的とした研究テーマについて研究を行う。

本論文は6章から構成され、その内容は下記の通りである。まず、第1章では、序論として研究の背景と目的について述べる。

第2章では、衣服のシワを用いた入力インタフェースの研究について述べる。提案インタフェースはアプリケーションの入力要求時に選択肢のシワを衣服上に生成し、ユーザはその生成された複数のシワから1本を選び、入力を行う。入力を要求しているアプリケーション毎に異なるシワの生成パターンで選択肢の数に対応した本数のシワを生成することで、ユーザはシワに触れてアプリケーションとその入力の選択肢の数がわかり、正しい選択肢を出力画面を見ることなく選ぶことができることがこのインタフェースの特徴である。本研究では、衣服に生成したシワによる入出力機能を実現し、その性能を評価した。この研究を通して、衣服の変形のインタフェースへの応用の可能性を検討する。

第3章では、衣服シワを用いた入力方法の評価研究について述べる。この研究では、衣服のシワを用いた入力インタフェースでの操作を前提とし、3つのタッチ入力方法と1つのピンチ入力方法を設計し、これらの入力方法の学習可能性、シワの有無による操作性への影響、様々な操作環境と操作位置での操作性を調査した。この研究を通して、衣服のシワを用いた入力方法の特性の違い、特にタッチ入力とピンチ入力の特性の違いを明らかにし、今後のテキスタイルインタフェースへの応用に寄与する。

第4章では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法の研究について述べる。衣服に取り付けた複数の形状記憶合金と圧縮バネからなるアクチュエータの収縮によって衣服を変形させて触覚刺激を生成し、フィードバックを行う手法である。提案手法では、4つのアクチュエータを長袖のTシャツの前腕、上腕、肩の部分に沿って装着し、プロトタイプシステムを実装し、提案手法のフィードバック性能と前腕、上腕、肩での刺激知覚能力の違いを評価した。この研究を通して、衣服の変形によるフィードバック機能の実現可能性を検討するとともに人の様々な身体部位における触覚刺激の知覚能力を明らかにする。

第5章では、胸部と腹部の周径変化から呼吸数を計測するウェアラブルシステムの研究について述べる。本研究では、伸縮によって静電容量が変化するひずみセンサを用いて、ユーザの身体に装着するバンド型デバイスと呼吸認識アルゴリズムを実装し

た．シート状のひずみセンサは薄く柔軟であるため，提案システムは衣服への統合が可能である．さらに，提案システムの性能を評価するために，市販のウェアラブルデバイスとの呼吸数認識性能を比較した．この研究を通して，衣服の変形の状況認識技術への応用の可能性について検討する．

第6章では，本論文の成果を要約したのち，今後の研究課題について述べ，本論文のまとめとする．

# 目次

<b>1</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.1.1	ウェアラブルコンピューティング	1
1.1.2	Smart clothing	2
1.2	研究目的と内容	4
1.3	本論文の構成	6
<b>2</b>	<b>衣服のシワを用いた入力インタフェース</b>	<b>9</b>
2.1	まえがき	9
2.2	関連研究	11
2.2.1	ウェアラブルコンピューティング環境で使用される入力インタフェース	11
2.2.2	テキスタイルインタフェース	12
2.2.3	変形する衣服による出力インタフェース	13
2.3	システム設計	13
2.3.1	インタフェース構成	14
2.4	実装	18
2.5	評価実験	20
2.5.1	社会受容性を満たす操作位置	20
2.5.2	シワの生成パターンの認識	22
2.5.3	シワへの入力性能	24
2.5.4	入力操作の習熟	26
2.6	むすび	30
<b>3</b>	<b>衣服上のシワを用いた入力評価</b>	<b>32</b>
3.1	まえがき	32
3.2	関連研究	32
3.2.1	テキスタイルインタフェース	32
3.2.2	入力評価	34

3.3	入力方法 . . . . .	35
3.3.1	タッチ入力方法 . . . . .	35
3.3.2	ピンチ入力方法 . . . . .	35
3.3.3	実装 . . . . .	36
3.4	評価実験 . . . . .	37
3.4.1	シワを用いた入力操作の習熟 . . . . .	37
3.4.2	シワの存在の影響 . . . . .	40
3.4.3	様々な操作環境と身体上の操作位置での操作性 . . . . .	42
3.5	考察 . . . . .	48
3.6	むすび . . . . .	50
<b>4</b>	<b>衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法</b>	<b>52</b>
4.1	まえがき . . . . .	52
4.2	関連研究 . . . . .	53
4.2.1	触覚フィードバック . . . . .	53
4.2.2	衣服の変形 . . . . .	55
4.3	提案手法 . . . . .	55
4.4	実装 . . . . .	56
4.5	評価 . . . . .	58
4.5.1	圧力測定 . . . . .	58
4.5.2	絶対閾測定 . . . . .	61
4.5.3	収縮パターン認識評価 . . . . .	64
4.5.4	抽出した収縮パターン認識評価 . . . . .	66
4.6	議論 . . . . .	69
4.6.1	圧力 . . . . .	69
4.6.2	フィードバック位置 . . . . .	69
4.6.3	粒度 . . . . .	70
4.6.4	使用例 . . . . .	71
4.7	むすび . . . . .	72
<b>5</b>	<b>シート型ストレッチひずみセンサを用いた呼吸計測手法</b>	<b>74</b>
5.1	まえがき . . . . .	74

5.2	関連研究 . . . . .	75
5.2.1	設置型の呼吸計測手法 . . . . .	75
5.2.2	装着型の呼吸計測手法 . . . . .	75
5.2.3	衣服を用いた状況認識手法 . . . . .	77
5.3	提案手法 . . . . .	78
5.3.1	バンド型デバイス . . . . .	78
5.3.2	認識アルゴリズム . . . . .	78
5.4	評価実験 . . . . .	79
5.5	むすび . . . . .	84
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>86</b>
6.1	各章のまとめ . . . . .	86
6.2	本論文の結論 . . . . .	88
6.3	検討課題 . . . . .	89
	謝辞	92
	参考文献	94



# 1 序章

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 ウェアラブルコンピューティング

マイクロエレクトロニクス技術の発展によるコンピュータの小型化、高性能化、軽量化に伴い、コンピュータの利用形態はデスクトップからモバイル、ユビキタスを経て、ウェアラブルへと変化してきた。モバイルコンピューティングでは、ユーザはコンピュータを持ち運んで利用し、ユビキタスコンピューティングでは、身の回りのあらゆる場所にあるコンピュータが相互に連携してサービスを提供する。そして、ウェアラブルコンピューティングでは、ユーザはコンピュータを身に着けて生活する。Steve Mann が1980年代にカメラ、頭部装着型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display), 各種センサを身に着けたウェアラブルシステムを開発し [1], 今日のウェアラブルコンピューティングの原型ができて以降, 様々なウェアラブルコンピューティングシステムが提案されている。ウェアラブルコンピューティングは, ユーザがセンサやコンピュータを身に着けるために従来のコンピュータの利用形態と比較して次の3つの特徴を持つ [2].

- ハンズフリー  
コンピュータを身体に装着しているため両手を使用せずに情報を参照できる。
- 常時電源 ON  
コンピュータは常に電源が入っており, 使いたいときにすぐ使える。
- 個人適用  
センサなどの利用によりユーザの詳細情報を得て, きめ細やかなサービスが提供できる。

このような従来のコンピュータの利用形態とは異なるウェアラブルコンピューティングの特徴から, これまでのキーボードやマウスとは異なる入出力方法やウェアラブルセンサによる状況認識システムなどが提案されている。ウェアラブルコンピューティングシステムは, コンピュータを身に着けて使用するため, 人々が日々身に着けている衣服との相性が良く, Smart clothing や E-textile と呼ばれるコンピューティングに

必要な機能を有する衣服の研究領域がウェアラブルコンピューティングの分野で確立されている。

### 1.1.2 Smart clothing

Smart clothing とはセンサやアクチュエータなどの電子機器が組み込まれた布や衣服の総称であり、E-textile とも呼ばれている。Smart clothing は、1996 年に Steve Mann が提唱しているが [1]、このときの Smart clothing はプライバシーを考慮したウェアラブルカメラやセンサを備えたウェアラブルシステムの総称であり、衣服は配線や回路を隠すために使われていた。その時から、センサやコンピュータの小型化や軽量化、導電性糸などの柔軟性のある電子部品の登場、さらには衣服に縫い付けて利用するマイコンである LilyPad[3] の登場により、衣服と電子機器の組合せは容易になり、衣服上にコンピューティング機能の実装が可能となった。Smart clothing には次のような特徴がある。

- 装着性

衣服にコンピューティングに必要な機能を搭載することにより、ユーザは衣服を着用するだけで必要な機能を使うことができ、ユーザは他のデバイスを追加で身に付け、持ち運ぶ必要がない。さらに、衣服上の様々な位置での機能を利用でき、ユーザに合わせて位置を調節できる。

- 社会受容性

衣服によって回路や配線、電子部品などを隠すことができるため、着用によってユーザの外見への影響が小さい。そのため、ウェアラブルコンピューティングの使用への抵抗が低減される。これはウェアラブルコンピューティングの普及においてとても重要な要素である。

- アクセシビリティ

操作時にポケットや鞆からデバイスを取り出す必要がないため、これまでのコンピューティングスタイルよりも情報へのアクセスが容易である。また、布の触覚によるアイフリーでの機能の利用が可能である。

- インタラクション

布の柔軟性を利用することによって、これまでのインタフェースにはなかった布

特有の伸ばす、つまむ、折り畳むといったインタラクションをコンピューティングに利用できる。

このような特徴をもつ Smart clothing は、主に入力インタフェース [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] や着用者の状況認識 [18, 19, 20, 21, 22] などの利用方法が提案されている。

これまでに提案されているインタフェースは、布をつまむ、握るといった布の柔軟性を生かした変形させるインタラクションにより、従来のタッチなどよりも触覚刺激のある操作を実現している。しかし、インタフェース自体から情報を得ることができず、ユーザは HMD やスマートウォッチのような腕時計型ディスプレイ、振動モータなどの情報提示デバイスを装着する必要がある。そのため、歩行中などのディスプレイの注視が困難な状況、また会議中などのコンピュータの操作を秘匿したい状況などでは情報提示デバイスからの情報を取得できず、操作ができない。一方、動的に変形する衣服が提案されており、衣服の変形による出力機能の可能性を示唆されている [39, 40]。衣服の変形は視覚的、触覚的に情報を出力することができ、衣服の変形によりユーザに情報を提示することで入力面からの情報を取得して操作ができる。状況認識手法では、ユーザの行動による身体部位の動きを衣服の変形を利用して認識する状況認識手法が提案されている [18]。日常生活において、ほぼ一日ユーザの身体の大部分を常に覆っている衣服は、ユーザの行動だけでなく生体情報の常時計測などを容易にする。ユーザの生体情報から従来の状況認識手法よりも高度な認識対象であるユーザの精神的、生理的状态を認識することができれば、病気の早期発見やストレス状態の管理などより高度なサービスを提供できる。このように、衣服の変形は入力、出力、状況認識などの機能に対して非常に有用であり、従来のインタフェース、状況認識システムの機能を拡張させる可能性がある。そこで、本論文では、衣服の変形を利用したインタラクション技術の確立を目指し、ウェアラブルコンピューティングにおいて重要な入力、出力、状況認識の3点の機能に着目し、それぞれに衣服の変形を使用したシステムの構築を目的とした研究テーマについて研究を行う。

それぞれの課題を以下にあげる。

- 入力機能

現在の入力インタフェースは入力面から情報を得ることができず、ユーザが入力するためにはディスプレイなどの情報提示デバイスが必要になる。そのため、ディスプレイの注視が困難な状況やコンピュータの操作を秘匿したい状況では情報提

示デバイスからの情報を取得できず、操作ができない。衣服の変形によって情報提示を行うことができれば、ユーザは触覚を通じて情報を取得できる。さらに、その変形に入力機能を付与すれば、ユーザは布に触れることで情報を取得し、そのまま入力操作を行することができるため、衣服の変形を利用したインタフェースを構築すべきである。

- **出力機能**

布の変形によってユーザには多様な触覚を提示できるため、触覚フィードバックとして機能する。現在利用されている触覚フィードバックとして振動刺激があるが、常に刺激を提示し続けるとユーザの意識が刺激に集まり、作業の中断などを引き起こしてしまう。また、アクセサリ型のフィードバックデバイスは、主に指や手首などに身に着けるが、指や手首などは日常生活の中でよく使う非常に重要な身体部位である。そのため、衣服上にフィードバック機能を実装することで、ユーザの様々な身体部位への情報提示が可能となるため、衣服上での触覚フィードバック手法を検討すべきである。

- **状況認識機能**

ユーザの行動によって、身体部位の形状が変わることで衣服が変形するため、衣服の変形からユーザの行動を認識できる。さらに、常にユーザが着用する衣服は日常生活での常時測定を負担なく可能にするため、生体情報の常時計測などに役立つ。生体情報からユーザの精神的、生理的な状況を取得でき、様々なサービスを可能にするため、衣服の変形からユーザの生体情報を常時計測する状況認識システムを構築すべきである。

## 1.2 研究目的と内容

本論文では、衣服の変形のコンピューティング機能への応用を実現するための4つの研究テーマについて研究を行う。衣服の変形を利用した入力機能、出力機能、状況認識機能の実現にむけて以下の4つのテーマに取り組み、その実現可能性を示した上で、ウェアラブルコンピューティングの普及に向けた衣服の変形を利用した Smart clothing の実現可能性を議論する。

- **入力インタフェース**

現在の入力インタフェースは入力面から情報を得ることができず、ユーザが入力

するためにはディスプレイなどの情報提示デバイスが必要になるため、情報提示デバイスからの情報を取得するのが困難な状況では操作ができない。そこで本研究では、衣服上にシワを生成するインタフェースを提案し、提案インタフェースの操作性を調査する。提案インタフェースは衣服上にシワを生成してユーザに入力に関する情報を提示し、ユーザはシワに触れてタッチ入力操作を行う。

- **入力方法**

テキストスタイルインタフェースでは、布とのインタラクションとして布に触れるタッチジェスチャと布をつまむピンチジェスチャを利用したものが多く提案されている。また、ウェアラブルコンピューティング環境での入力方法には操作環境や操作位置などの様々な要因が操作性に影響するため、様々な状況での操作性の評価が行われている。しかし、これまでにタッチ入力とピンチ入力を同じインタフェースを用いて評価し、比較した研究は筆者の知る限り存在しない。衣服のシワを用いる入力インタフェースの操作を前提とし、シワに触る、つまむ動作は自然な動作であるため、シワを用いる入力インタフェースの操作に適すと考え、本研究では、衣服の変形によって生じたシワを用いたタッチ入力方法とピンチ入力方法の操作性に影響する要因を調査する。

- **触覚フィードバック**

布の変形によってユーザには多様な触覚を提示できるため、布の変形は触覚フィードバックとして機能する。人の皮膚は振動や圧力、熱などの様々な刺激を知覚でき、近年、ウェアラブルデバイスによる圧力フィードバック手法が多く提案されており、その多くは腕輪や指輪型のアクセサリ型のデバイスによってユーザの手首や指の周囲に圧力を提示する。この手法を衣服上に適用することで、手首や指だけでなくユーザの様々な身体部位でフィードバックを行うことができる。そこで、本研究では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法を提案し、提案フィードバック手法の有用性とユーザの様々な身体部位での圧力刺激の知覚特性を調査する。

- **呼吸計測**

ユーザの行動による身体部位の形状変化を衣服の変化を介して検出でき、ユーザの行動を認識でき、ユーザが常に着用する衣服によって生体情報を日常生活での常時測定を負担なく行える。生体情報の中でも呼吸情報を計測することで、病気

の予測やユーザのストレス状態、疲労度などを認識することができる。そこで、本研究では、呼吸による胸部や腹部の周径変化を測定する呼吸計測手法を提案する。シート状の柔軟性に富むひずみセンサを用いることで、衣服への統合が容易なシステムを構築し、提案システムの呼吸認識性能を調査する。

### 1.3 本論文の構成

本論文は6章から構成され、その内容は下記の通りである。まず、第1章では、序論として研究の背景と目的について述べる。

第2章では、衣服のシワを用いた入力インタフェースの研究について述べる。提案インタフェースはアプリケーションの入力要求時に選択肢のシワを衣服上に生成し、ユーザはその生成された複数のシワから1本を選び、入力を行う。入力を要求しているアプリケーション毎に異なるシワの生成パターンで選択肢の数に対応した本数のシワを生成することで、ユーザはシワの触覚からアプリケーションとその入力の選択肢の数がわかり、正しい選択肢を出力画面を見ることなく選ぶことができることがこのインタフェースの特徴である。本研究では、衣服に生成したシワによる入出力機能を実現し、その性能を評価した。この研究を通して、衣服の変形のインタフェースへの応用の可能性を検討する。

第3章では、衣服シワを用いた入力方法の評価研究について述べる。この研究では、衣服のシワを用いた入力インタフェースでの操作を前提とし、3つのタッチ入力方法と1つのピンチ入力方法を設計し、これらの入力方法の学習可能性、シワの有無による操作性への影響、様々な操作環境と操作位置での操作性を調査した。この研究を通して、衣服のシワを用いた入力方法の特性の違い、特にタッチ入力とピンチ入力の特性の違いを明らかにし、今後のテキストイルインタフェースへの応用に寄与する。

第4章では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法の研究について述べる。衣服に取り付けた複数の形状記憶合金と圧縮バネからなるアクチュエータの収縮によって衣服を変形させ、ユーザに触覚刺激を提示するフィードバック手法である。提案手法では、4つのアクチュエータを長袖のTシャツの前腕、上腕、肩の部分に沿って装着し、プロトタイプシステムを実装し、提案手法のフィードバック性能と前腕、上腕、肩での刺激知覚能力の違いを評価した。この研究を通して、衣服の変形によるフィードバック機能の実現可能性を検討するとともにユーザの様々な身体部位における触覚刺激の知覚能力を明らかにする。

第5章では、胸部と腹部の周径変化から呼吸数を計測するウェアラブルシステムの研究について述べる。本研究では、伸縮によって静電容量が変化するひずみセンサを用いて、ユーザの身体に装着するバンド型デバイスと呼吸認識アルゴリズムを実装した。シート状のひずみセンサは薄く柔軟であるため、提案システムは衣服への統合が可能である。さらに、提案システムの性能を評価するために、市販のウェアラブルデバイスとの呼吸数認識性能を比較した。この研究を通して、衣服の変形の状況認識技術への応用の可能性について検討する。

第6章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

なお、第2章は、文献 [86, 87, 88, 89, 90, 91] で公表した結果に基づき論述する。第3章は、文献 [92, 93, 94, 95, 96, 97] で公表した結果に基づき論述する。第4章は、文献 [98, 99, 100] で公表した結果に基づき論述する。



## 2 衣服のシワを用いた入力インタフェース

### 2.1 まえがき

ウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザはいつでもどこでもコンピュータを操作でき、このコンピューティングスタイルの変化により、コンピュータを操作する入力インタフェースにも変化が求められる。マウスやトラックボールなどの従来の入力インターフェイスでは、ユーザはデバイスを把持する必要があり、手が塞がっているときには操作できない。ユーザがデバイスを把持する必要のない入力方法としてジェスチャ入力提案されている [23, 24, 25, 26, 27]。ジェスチャ入力では、誤認識を避けるために日常生活では行われないう珍しい動きを操作に利用するため、公共の場でのジェスチャ入力は周囲の人には奇妙に見えてしまう。また、片手キーボードなどの装着性の観点から小型化された入力デバイスも提案されている [28]。しかし、ユーザは普段身に着けないデバイスを身体に取り付ける必要があり、ユーザの外観は大幅に変化させてしまう。

人々は毎日着用する衣服に入力インターフェイスが統合されている場合、ユーザはデバイスを把持する必要なく、布を触る、つまむ、折り畳む、伸ばすなどの自然な動きを利用して入力できる。さらに、ユーザが衣服に触れた際の触覚を利用してアイフリーの操作も実現できる。触覚を変化させることで入力コマンドの選択肢の数などの情報も提示できる。ウェアラブルコンピューティング環境での衣服を利用した入力インターフェイスが提案されている。しかし、これらのインタフェースは衣服の触覚を情報提示には利用しておらず、ユーザに入力に関する情報を提示するために HMD や腕時計型ディスプレイ、振動モータなどの追加のデバイスを必要とする。一方、変形する衣服が提案されており、ユーザは布に触れてその布の形状を知覚できるため、布の変形を利用して情報出力機能を実現できる。本研究では、衣服のしわを利用した新しい入力インターフェイスを提案する。ユーザは布を触ることでシワの形状を認識できるため、シワの触覚によりユーザに情報を提示する。また、シワは日常的に使用する衣類に自然に形成されるため、ユーザーの外観を大きく変化させない。提案インタフェースはアプリケーションの入力要求に応じて、衣服にいくつかのシワを生成する。ユーザは生成されたシワの内 1 本のシワに触れることでコマンドを入力し、入力操作が完了するとシワは消失する。ユーザはシワの生成パターンからアプリケー

ションの現在の状態に関する情報を受け取ることができ、この点がこれまでに提案されている衣服を利用したインターフェイスとは異なる。

以降、2.2節で関連研究を紹介し、2.3節でシステム設計を述べ、2.4節でプロトタイプの実装について述べる。および2.5節で評価実験とその結果を述べ、最後に2.6節で本章をまとめる。

## 2.2 関連研究

本節では、ウェアラブルコンピューティング環境で使用される入力インタフェース、衣服に統合されたインタフェースであるテキストイルインタフェース、そして変形する衣服に関する研究について述べる。

### 2.2.1 ウェアラブルコンピューティング環境で使用される入力インタフェース

従来のウェアラブルコンピューティング環境では、マウスやトラックボール、ジョイスティックなどが入力インタフェースとして使用されていた。Twiddler は片手で使用できるモバイルコードキーボードであり、ウェアラブルコンピューティング環境で使用できる [29]。キーパッドの配置は携帯電話の配置と似ており、携帯電話でのテキスト入力に替わる可能性がある。しかし、これらのデバイスは、ユーザが操作中にデバイスを把持する必要がある。両手が他のタスクで塞がっている場合や混雑した電車などの利用可能な空間が限られている場合操作することができない。ユーザがデバイスを把持する必要のない入力インタフェースも提案されている。Xangle は加速度センサを装着した指先などの身体部位の動きを検出し、画面上の 2 直線を操作してその交点でポインティング操作を行うインタフェースである [23]。WearTrack はユーザの頭部に 3 個のマイクを装着し、超音波を用いた三角測量により指先の位置を検出し、ポインティング操作を行うインタフェースである [24]。Finger-Mount では、ユーザは超音波センサと 2 つのボタンを指先に装着してポインティング操作を行う [25]。DigiTrack では、ユーザは光学式マウスのセンサを装着した指先で衣服や机などの任意の表面をパッドとして用いてポインティング操作を行う [26]。Hand Mouse はユーザの頭に装着したカメラによって得られた映像からユーザの手を追跡してポインティング操作を行うインタフェースである [27]。これらのインタフェースはデバイスを把持する必要がないが、操作時には常に出力画面を注視する必要があり、歩行時などの画面を注視することが困難な場合は操作できない。また、ユーザは指先などの日常生活において重要な部位にデバイスを装着する必要があるため、日常生活での常時利用に向かない。

一方、ポインティング操作とは異なる操作を行う入力インタフェースも提案されている。片手キーボードは既存のキー配列をそのままに保ちながらキーボードを左右に分割したハーフサイズのキーボードである [28]。ユーザは分割した一方のキーボードを身体に装着して片手でテキストを入力できる。Kuzue らは呼気と歯の接触音を使用する入力インタフェースを実装した [30]。ユーザはピエゾフィルムセンサアレイを含む

デバイスを口の前に取り付けて操作する。EarPut はユーザの耳に取り付けられるタッチインタフェースである [31]。ユーザはデバイスが取り付けられた耳を触れて操作する。OmniTouch は深度センサを用いたウェアラブルプロジェクションシステムである [32]。ユーザは深度カメラとピコプロジェクタから構成されるデバイスを肩に装着し、手、腕、足そして周辺の物体の表面をタッチ入力可能なインタラクティブサーフェイスとして利用できる。Imaginary Phone では、深度カメラを用いてユーザの手を入力デバイスとして利用できる [33]。ユーザは自身の手をタップ、スライドして操作する。これらの入力インタフェースは、ユーザがキーボードなどの特殊なデバイスを身体に装着する必要がある、デバイスの装着によりユーザの外見を奇異にしてしまう。

デバイスの小型化が進み、指先の微妙なジェスチャを利用した入力方法も提案されている。FingerSound は親指のストロークジェスチャを認識する指輪型入力インタフェースである [34]。ユーザはコンタクトマイクとジャイロセンサを内蔵した指輪を親指に装着して親指のジェスチャによって入力を行う。Pyro は熱赤外焦電センサを用いて指からの熱赤外線を検出し、親指先のジェスチャを認識する入力インタフェースである [35]。ユーザは親指と人差指を使ったジェスチャによって入力を行う。しかし、これらのインタフェースも指先にデバイスを装着する必要がある。

### 2.2.2 テキスタイルインタフェース

衣服上で入力を行うテキスタイルインタフェースが提案されている。テキスタイルインタフェースの発展には LilyPad の貢献が大きい [3]。衣服に縫い付けて利用するマイコンである LilyPad により、衣服と電子機器を組み合わせることが容易になった。Komor らは導電性糸の刺繍と静電容量認識回路を用いて、刺繍を入力ボタンとして利用するテキスタイルインタフェースを実装した [4]。Holleis らは静電容量センサをヘルメット、手袋、エプロンなどに取り付けていくつもの入力デバイスを実装した [5]。Gilliland らは導電性糸の刺繍と指の間の電気抵抗と静電容量を測定することで刺繍へのタッチを検出する 3 つの入力デバイスを実装した [6]。FabriTouch は ESD 保護シートの層、細かいメッシュの布 (チュール)、導電性糸で区精される柔軟なタッチを検出できる布である [7]。SwitchBack は導電性と非導電性の布地の階層構造を備えた入力インタフェースである [8]。最小限のキャリブレーションでタッピングと双方向のスワイプを認識できる。Argot はキーボードとして利用できる導電性布のパッチが縫い付けられた手袋型の入力インタフェースである [9]。Pinstripe は導電性糸が平行に縫い付けられた衣服を用

いた入力インタフェースである [10]. ユーザは服を指先でつまみ転がすことで連続値を入力できる. Grabrics は 30 個の六角形の導電性パッドを備え, パッド間の接触によってユーザのつまんだ際の角度を検出するテキスタイルセンサである [11]. ユーザは特定の角度で Grabrics の生地をつまむことでメニュー選択操作ができる. Textile++ は 2 枚の導電性布と 1 枚のメッシュの生地で構成されるタッチを検出できるテキスタイルセンサであり, タッチの 2 次元座標と圧力を検出できる [12]. これらのインタフェースは衣服の内側に実装され, ユーザは外見への影響が少なくインタフェースが組み込まれた衣服を着用して使用できる. さらに, 布に触れた際の触覚により, アイフリー操作を可能にする. しかし, これらのインタフェースからユーザがアプリケーションの現在の状態や選択肢の数などの入力に関する情報を得ることはできない.

### 2.2.3 変形する衣服による出力インタフェース

アクチュエータが布に組み込まれた変形する衣服が提案されている. Berzowska と Joanna は形状記憶合金の Nitinol が組み込まれたドレスを実装し, ドレスの使用方法を提案した [39]. この研究では, 布の変形がインタラクティブシステムの出力デバイスとして機能する可能性を示唆している. Moere と Hoinkis は形状記憶合金を用いてウェアラブルディスプレイとして使用する変形する布を実装した [40]. 布の変形により, ユーザが利用できる選択肢の数など入力に関する情報を出力できる. これらの方法と衣服に統合された入力インタフェースを組み合わせることで, ユーザは情報提示デバイスがない状況でも情報を取得し, コマンドを入力できる.

## 2.3 システム設計

本研究では, 衣服のシワを用いた入力インタフェースを提案する. 提案インタフェースの重要な考えは, 衣服のシワを入出力機能として利用することである. ウェアラブルコンピュータを使用する状況には, ユーザがデバイスの把持, ディスプレイの注視が困難な場合がある. また, デバイスを衣服に取り付けた場合, ユーザの外見を大きく変化させてしまい, 奇異にしてしまう. 一方, 衣服に統合されたインタフェースはタッチやピンチなどの衣服とのインタラクションを利用してデバイスの把持, 装着を必要としない操作を実現する. さらに, シワは衣服に自然に生成されるため, ユーザの外見への影響が小さく, シワによる触覚からユーザはシワの形と数を認識でき, アイフリーの操作を実現する. したがって, 衣服のシワはウェアラブルコンピューティン

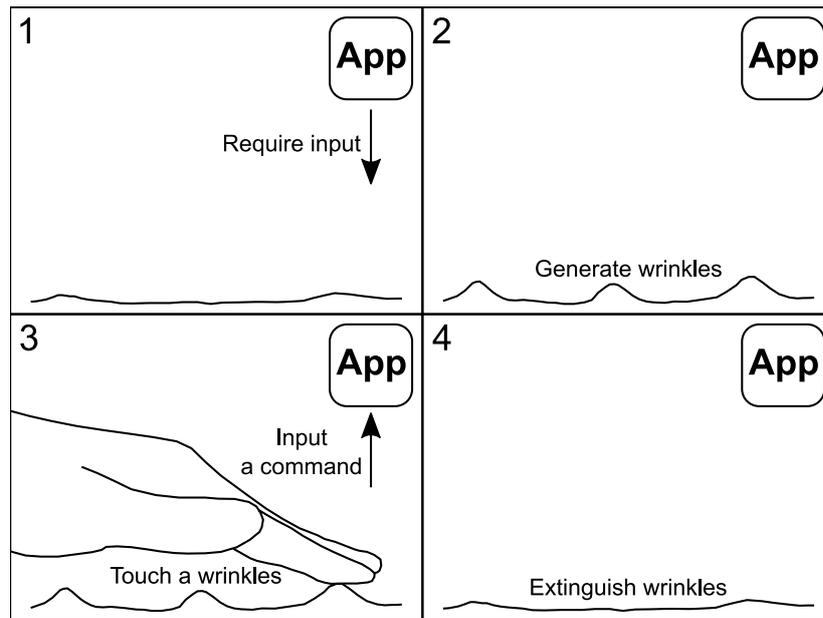


図 1: 操作方法

グのインタフェースに適している。提案インタフェースは情報提示とコマンド入力  
の両機能にシワを利用する。図 1 に提案インタフェースの操作方法の概要を示す。提案  
インタフェースはアプリケーションの入力要求に応じて衣服にシワを生成する。ユー  
ザは生成されたシワに触れて任意の 1 本のシワを選択してコマンドを入力する。入力  
操作が完了すると、衣服上からシワが消失する。ユーザは生成されたシワの数と生成  
パターンから入力の選択肢数と入力を求めているアプリケーションの入力に関する情  
報を得ることができ、シワの消失により入力操作の完了も認識できる。このシワの生  
成から消失までの出力シーケンスが触覚フィードバックとして機能し、ユーザはアイ  
フリー操作ができ、シワは衣服に自然に発生するものなので、周囲の人に目立たない  
操作を実現できる。

### 2.3.1 インタフェース構成

提案インタフェースはシワ生成機構とタッチ検出機構から構成される。

#### シワ生成機構

シワを生成するためにステッピングモータ、モーターフェーダ、形状記憶合金を用い  
た 3 種類のシワ生成手法を検討した。

### ステッピングモータを用いたシワ生成手法

ステッピングモータを用いた手法は、布のシワ生成部分の両側に縫い付けた2本の糸をモータで巻き取ることでシワを生成する。ステッピングモータを1個使用する手法と2個使用する手法を検討した。

**モータ1個:** 一方の糸を直接モータで巻き取り、もう一方はプーリーを經由して同じモータで巻き取り、シワを生成する。

**モータ2個:** それぞれの糸を別々のモータで巻き取り、シワを生成する。

ステッピングモータを用いたシワ生成手法は1本のシワの生成に1個または2個のモータが必要となるため、複数本のシワ生成するために多くのモータが必要になる。さらに、シワを消失するために布を本の状態に引き延ばす必要があるが、モータを糸の巻取り方向と逆方向へ回転させるだけではシワを消失させられなかった。ステッピングモータを用いた手法は複数のモータを必要とし、モータは柔軟性がないため衣服の機能性と快適性を損ねてしまう。

### モーターフェーダを用いたシワ生成手法

モーターフェーダはDCモータとフェーダから構成される。フェーダを布に取り付け、モータによりフェーダを動かすことでシワを生成する。モーターフェーダを用いたシワ生成手法はフェーダの移動距離が大きく、移動速度も速いので大きなシワを速く安定して生成できた。また、フェーダをシワ生成の方向とは逆方向に動かすことでシワの消失もできた。しかし、モーターフェーダはステッピングモータよりも大型で柔軟性のないアクチュエータのため、複数個衣服に装着するとステッピングモータと同様に衣服の機能性と快適性を損ねてしまう。

### 形状記憶合金を用いたシワ生成手法

電流を流すことで収縮する形状記憶合金を布に取り付け、形状記憶合金の伸縮によってシワを生成する。形状記憶合金は小型、軽量、柔軟なアクチュエータであり、布の機能性を阻害しにくいため衣服の変形に利用されている。形状記憶合金としてトキコーポレーション社のバイオメタル・ファイバー (BMF: Bio Metal Fiber)[36] とバイオメタル・ヘリックス (BMX: Bio Metal heliX)[37] をそれぞれ使用した手法を検討した。

**BMFを用いた手法:** BMFは伸縮する形状記憶合金の繊維である。電流を流すと収縮し、電流を止めると元の長さに伸長する。しかし、BMFの伸長率が全長の4%と小さいため、BMFの距離を稼ぐためにBMFを布のシワ生成部分の両側に取り付け、BMFがくの字になるように中央をBMFが張った状態で布に取り付け、BMFの収縮させて

シワを生成する。BMFは振動や音が発生せずにシワを生成でき、BMFは自身で伸長するためシワを消失させることができた。しかし、生成できるシワが小さく、触覚を得るには不十分な大きさであった。

**BMXを用いた手法:** BMXはコイル状の形状記憶合金である。BMXは伸縮率が伸長時の長さの50%と大きく、電流を流すとBMFより大きく収縮するが、電流を止めても元の長さに伸長しない。そのため、BMXを圧縮バネに通してバネの復元力を利用してBMXを元の長さに伸長させる。バネとBMXの両端を固定し、その両端を布のシワ生成部分の両側に取り付けてBMXを収縮させてシワを生成する。BMXを用いたシワ生成手法は、振動や音も発生せずに触覚を得られる大きなシワを生成できた。以上のことから、本研究では、触覚を得られる大きさのシワを安定して生成でき、衣服に統合しやすいアクチュエータを用いるBMXを用いたシワ生成手法を用いてシワ生成機構を実装する。

次に、BMXを用いたシワ生成によってシワを生成しやすい布の縫製について調査する。シワ生成部分の両側を縫う縫製、生成部分に布を重ねる縫製、生成部分の両側に布を重ねる縫製の3つを検討した。

**シワ生成部分の両側を縫う縫製:** 布のシワ生成部分の両側をミシンで縫った布にシワを生成する。しかし、生成したシワは何も施していない布に生成したシワと大きさはあまり変わらなかった。

**シワ生成部分に布を重ねる縫製:** 布のシワ生成部分の裏面に布を重ねた布にシワを生成する。しかし、シワ生成部分に布を重ねたために生成したシワは何も施していない布に生成したシワより小さくなってしまった。

**シワ生成部分の両側に布を重ねる縫製:** 布のシワ生成部分の裏面の両側に布を重ねた布にシワを生成する。シワ生成部分が薄く、その両側が厚くなり、両側の布を引き寄せることでシワ生成部分の布が盛り上がりやすくなったため、生成したシワは何も施していない布に生成したシワよりも大きくなった。この結果から本研究では、BMXとバネを組み合わせたシワ生成器を用いてシワを生成する布には、シワ生成部分の両側に布を重ねて縫い付ける縫製を施す。

シワ生成手法の検討の結果より、BMXと圧縮バネを用いてシワ生成器を実装する。図2にシワ生成器を示す。シワ生成器によりシワを生成しやすい布の縫製を調査した結果、シワ生成器を取り付ける布には、シワ生成部分の両側に布を重ねる。BMXを圧縮バネの中に通し、その両端を固定したシワ生成器の両端をシワ生成部分の両側に取

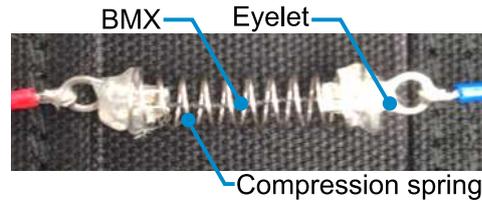


図 2: シワ生成器

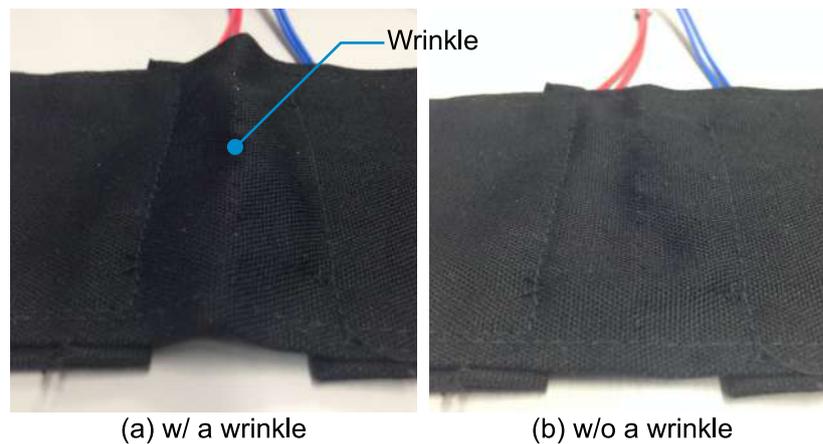


図 3: シワを生成した布

り付ける。BMXに電流を流して収縮させることで両側の布を引き寄せ、中央の布を盛り上げてシワを生成し、電流を止めてバネの復元力により布を元の状態に戻してシワを消失させる(図3)。

### タッチ検出機構

タッチ検出機構は導電性糸と静電容量タッチセンサコントローラから構成される。静電容量タッチセンサコントローラによって導電性糸の静電容量の変化を測定することで指と糸との接触を検出する。

コマンドの選択と入力の際にどちらもシワを触るため、選択と入力のシワへのタッチジェスチャを区別する必要がある。選択と入力を区別する入力方法の構築のためにユーザが生成された複数のシワから1本のシワの決定するための選択方法を2つ想定した。一つ目の選択方法は、ユーザが生成されたシワを1本ずつ触れて、それぞれのシワの位置を確認して選択する。もう一方の選択方法は、ユーザがすべてのシワに同時に触れて一度にすべてのシワの位置を確認して選択する。それぞれの選択方法に対応する2つのタッチ入力方法(Long press touch と Narrowing-down selection)を提案

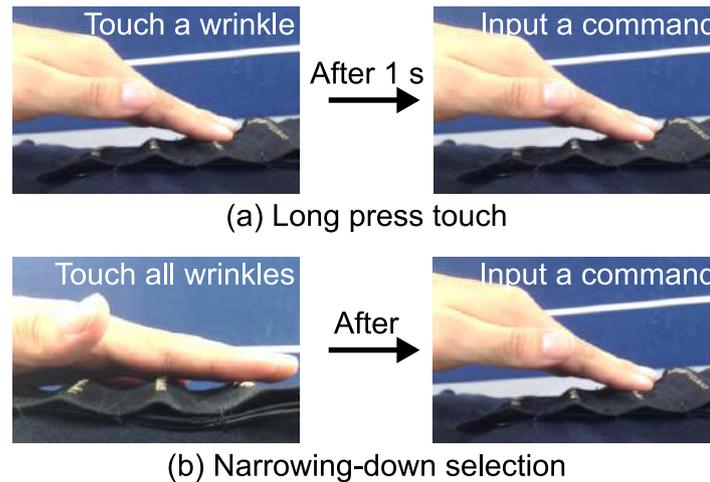


図 4: 入力方法

する。それぞれの入力方法を図4に示す。Long press touchは前者の選択方法を利用した入力方法であり、生成されたシワの導電性糸に約1秒触れているとタッチ入力と認識する。Narrowing-down selectionは後者の選択方法を利用し、生成されたすべてのシワに同時に触れた後に1本のシワの導電性糸に触れるとタッチ入力と認識する。

## 2.4 実装

??節のシステム設計に基づいて、シワ生成機構とタッチ検出機構を用いて提案インタフェースのプロトタイプデバイスを実装した。図5に実装した提案インタフェースのプロトタイプを示す。シワを生成する布の大きさは $27 \times 10$  cmとし、最大5本のシワを平行に生成する。各シワの間隔は1cmとし、シワを生成しやすくするためにシワの間に幅1 cmの帯状の布を縫い付け、布の両端は折り返して縫い付けた。シワ生成器に用いるBMXは直径が最も大きいBMX150を使用した。BMXは収縮時の長さが1.5 cmになるように切り取り、3 cmに伸ばして線径0.3 mm、外径5 mmの圧縮バネの中に通した。BMXの両端に金属製のハトメを取り付け、ハトメをバネの両側にホットボンドで固定し、ハトメに回路に接続する導線をはんだ付けした。シワ生成器の長さは伸長時に4.2 cm、収縮時に約3.5 cmである。1本のシワを2個のシワ生成器を用いて生成するために、布には合計10個のシワ生成器を取り付けた。シワ生成器の着脱を容易にするためにシワ生成器を布に取り付けにフックを利用した。各シワの両側に2個ずつフックを縫い付け、フックにハトメを引っ掛けてシワ生成器を布に取り付けた。マイコンからトランジスタを介してシワ生成器へ供給する電力を制御した。シワ生成器

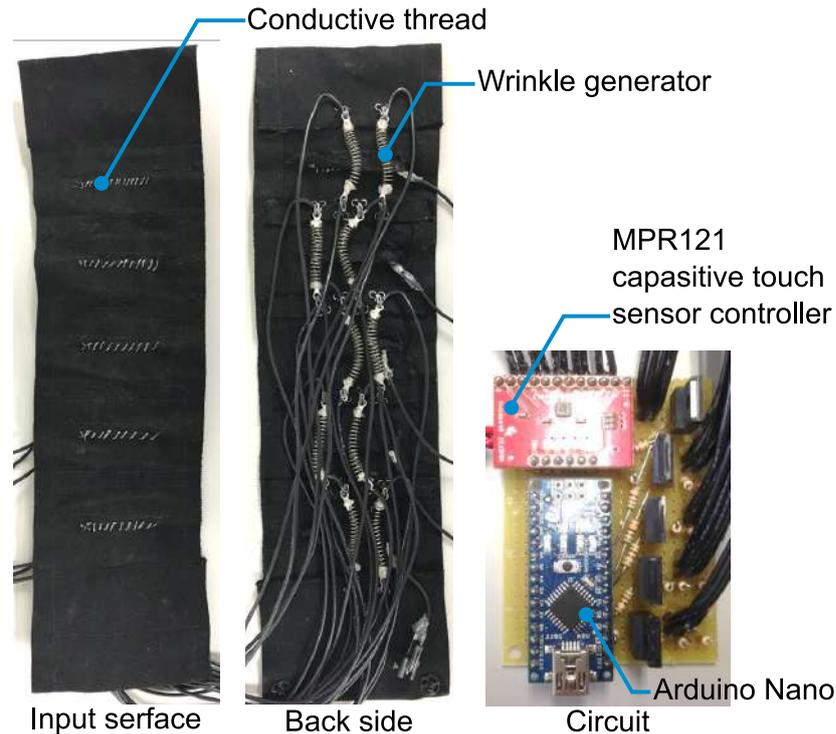


図 5: プロトタイプデバイス

の電気抵抗は  $7.5 \Omega$  である。BMX の収縮には  $200 \sim 300 \text{ mA}$  の電流が必要であり、約  $200 \text{ mA}$  の電流をシワ生成器に流すように回路を設計した。収縮時のシワ生成器に印加される電圧は約  $1.5 \text{ V}$  であり、1本のシワの生成に約  $0.6 \text{ W}$  (シワ生成器 1 個あたり  $0.3 \text{ W}$ ) の電力を消費する。シワの生成と消失にかかる時間を確認するために、シワ生成器の伸縮に必要な最小の電流の出力時間と停止時間を調査した。電流の出力時間を 2, 3, 4 秒とし、停止時間を 5, 6, 7, 8, 9, 10 秒として電流の出力時間と停止時間のすべての組合せでシワ生成器の伸縮を 10 回繰り返した。その結果、シワ生成器の伸縮を繰り返すために収縮に 3 秒以上、伸長に 6 秒以上の時間が必要である。

シワと指の接触を検出するために、各シワの頂点に沿って導電性糸を縫い付け、導電性糸と MPR121 静電容量タッチセンサコントローラとを接続した。糸とセンサコントローラを接続する導線の片端に金属製のハトメを取り付け、ハトメを導電性糸の片端で縫い付けた。マイクロコンピュータとして Arduino Nano を使用し、シワ生成器の制御と静電容量タッチセンサコントローラのセンサ値の収集を行い、XBee を用いて無線通信によって PC にセンサ値を送信する。

洗濯と装着位置の変更のためにプロトタイプデバイスを衣服から着脱可能に設計した。衣服へのデバイスの装着、回路と導線の収納のために布製のアタッチメントを作

製した。アタッチメントの大きさは30 × 11.5 cm であり，回路とバッテリーを収納するためのポケットがある。衣服とアタッチメント，アタッチメントとデバイスはそれぞれスナップボタンを用いて装着する。

## 2.5 評価実験

本研究では，提案インタフェースを用いた操作を評価するために4つの評価実験を行った。

### 2.5.1 社会受容性を満たす操作位置

ウェアラブルコンピューティングに用いる入力インタフェースは着用して操作するため，操作時の周囲の人に違和な印象や嫌悪感を抱かれない社会受容性を満たす必要がある。そのため，ユーザが提案インタフェースで行う操作動作が社会受容性を満たす身体上のインタフェースの操作位置を調査した。操作位置の候補は，Wagnerらによって18の身体部位に配置したターゲットをタッチする際の配置場所による精度や時間を評価した研究を参考に決定した[38]。この研究によると，膝下のターゲットへのタッチは速度が遅く，社会受容性が低い。また，利き手上のターゲットへのタッチは他の身体部位より精度が低い。この結果から，提案インタフェースのデバイス位置は直立時にも着席時にも姿勢を変えずに触れることができる身体部位とする。また，提案インタフェースの操作は利き手を使うことを想定し，利き手で触れられない，または触れるのが困難な部位は除く。さらに社会的に触れることで周囲の人に不快感を与える身体部位も除く。よって，肩，上腕，前腕，脇，腹部，脇腹，太腿の前面と側面の8つの身体部位をインタフェースの操作位置の候補に選んだ。肩，上腕，前腕は非利き手側，脇腹と太腿は利き手側とした。

### 実験方法

被験者は18歳から26歳の20名(女性2名)である。被験者はまず，立っている男性がインタフェースを装着していないが，各身体部位をタッチ入力と同じ動作で触っている8本の動画をランダムに見た。その後，各身体部位での動作の自然さを5段階リッカート尺度(1: 不自然 - 5: 自然)によって評価した。図6に被験者に見せた8本の動画のスナップショットを示す。

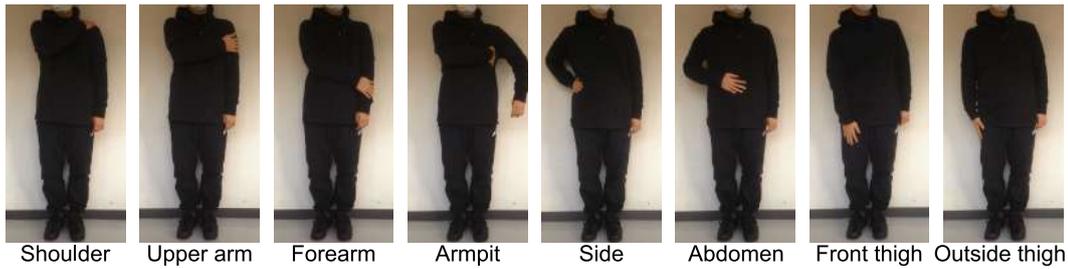


図 6: 操作位置の候補

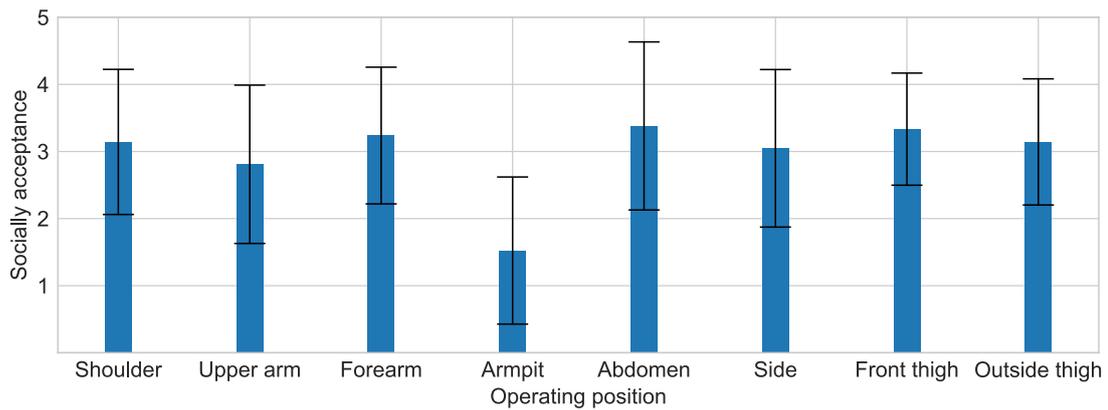


図 7: 各操作位置の社会受容性

## 実験結果

図 7 に評価結果を示す。図 7 中の棒グラフは各操作位置での入力動作の全被験者の評価結果の平均点を示し、エラーバーは評価結果の標準偏差を示す。脇を除くすべての身体部位での動作の評価は平均約 3 点であった。これは、脇以外の身体部位は提案インタフェースのデバイス位置として中程度の社会受容性を有していることを示している。脇での操作動作は 15 人の被験者が 1 点と評価し、対照的に太腿前面での操作動作は 3 人の被験者が 2 点と評価し、1 点と評価した被験者はいなかった。独立変数を操作位置、従属変数を被験者の評価結果として 1 要因分散分析を行った結果、有意差があった ( $F_{(7,133)} = 5.90, p < .01$ )。Fisher の最小有意差法を用いた多重比較の結果、脇での操作動作がすべての操作位置の中で最低の評価であった。本研究では、社会受容性を中程度満たしており、不自然と評価した被験者が少ない太腿前面を操作位置と決め、評価を進める。図 8 に実装したプロトタイプデバイスを太腿前面に装着したズボンを示す。

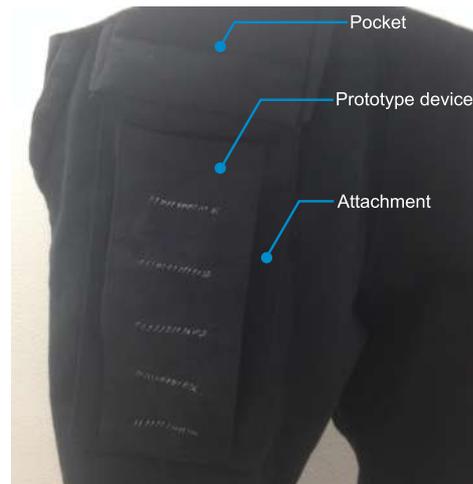


図 8: プロトタイプデバイスを装着したズボン

### 2.5.2 シワの生成パターンの認識

提案インターフェースはシワの生成パターンによってユーザに情報を提示する。ユーザがシワに触れたときにシワの生成位置と数を認識できるか確認するために、生成されたシワのパターンの認識を評価した。

#### 実験方法

被験者は 11 人の右利きの男性である。ユーザのシワに触れた際の触覚のみによって認識できるかを評価するために、本実験では導電性糸を縫い付けていないデバイスを使用した。被験者はデバイスを右太腿の前面に取り付けたズボンを着用し、PC を置いた机の前の椅子に座って実験を行った。実験は学習フェーズとテストフェーズから構成され、被験者はテストフェーズの前に学習フェーズを行った。学習フェーズとテストフェーズでは、被験者は同じ内容の評価タスクを行った。評価タスクでは、まず、デバイス上にシワが生成され、シワの生成が完了すると PC 画面上にデバイスを触る指示を PC 表示した。被験者はその指示を見て、デバイスを見ずに触り、PC のトラックパッドを用いて PC 画面上のシワ生成パターンを表しているアイコンの中からデバイス上のシワ生成パターンに対応したアイコンを選択した。アイコン選択後、PC 上の指示とデバイス上のシワが消失し、完全にシワが消失した後に新たなパターンを形成するシワが生成され、PC 画面上に指示が再び表示された。プロトタイプデバイスでは、最大 5 本のシワが生成でき、すべてのシワが生成されないパターンを除いて 31 パターンのシワ生成パターンを形成できる。図 9 に評価した 31 パターンのシワ生成パターン

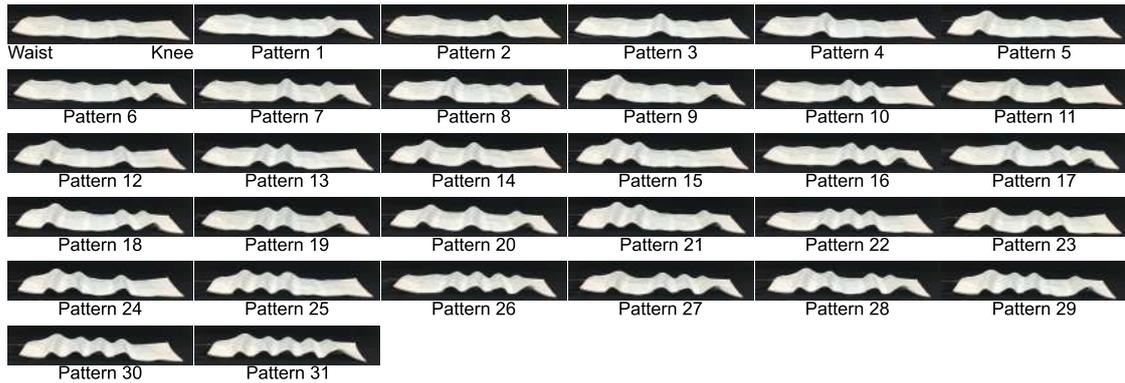


図 9: シワの生成パターン

を示す。学習フェーズとテストフェーズでは、各シワ生成パターンがランダムに1回ずつ生成された。学習フェーズでは、シワ生成パターンの学習のために、アイコン選択時にデバイス上のシワ生成パターンに対応した正しいアイコンの選択と間違ったアイコンの選択に対してそれぞれ異なる音声フィードバックを行った。テストフェーズでは音声フィードバックは行わなかった。

## 実験結果

実験の結果、全参加者のシワ生成パターンの認識精度は平均89.4%、標準偏差11.8%、アイコン選択時間は平均約17秒、標準偏差6.46秒であった。各被験者のテストフェーズでデバイス上のシワ生成パターンに対応したアイコンを選択した回数から各被験者の認識精度を算出し、各被験者の認識精度から平均認識精度を算出した。平均アイコン選択時間は各被験者のシワの生成完了からPC画面上のアイコンを選択するまでの平均時間から算出した。なお、実験の様子を動画撮影して、動画を観察するとデバイスに触れてからPC上のパターン選択に要する時間は全被験者で平均約5秒を要した。この結果から、被験者はシワの触覚からシワの生成パターンを認識できることを示している。

図10に被験者が各シワ生成パターンを認識した回数を示す混合行列を示す。被験者は大腿上部の3本のシワの存在を触覚から認識しづらい傾向がある。パターン13, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31において誤認識が見られた。また、3本以上のシワを生成した場合にも誤認識が起こる傾向が見られた。デバイスを触る様子を観察すると、全被験者が大腿の下から上に向かってシワを1本ずつ触っており、すべてのシワを同時に触ることはなかった。デバイスの構造上、大腿の上部のシワになるほど、シワ生成



表 1: 入力精度

Accuracy [%]					
Participant	A	B	C	D	E
	With visual feedback				
Long-press touch	98.3	98.3	96.6	100	100
Narrowing-down selection	100	96.7	98.3	100	96.7
	Without visual feedback				
Long-press touch	65.0	76.7	76.6	91.6	68.8
Narrowing-down selection	60.0	98.3	95.0	83.3	-

本のシワが生成され、実験が終了するまでシワは消失されなかった。評価アプリケーションは PC 画面に入力方法と入力対象のシワを示す入力指示を提示し、被験者はデバイスを見ずに PC 画面上の指示に従って入力する。被験者が入力が完了したと感じたタイミングでキーボードのキーを押し、その後、PC 画面上に次の入力指示が提示された。被験者が行う入力試行は 20 回の入力 (シワ 5 本 × 入力 4 回) を 1 試行とした。1 試行中の入力対象のシワの順序はランダムであった。被験者は最初に Long press touch を用いて入力試行を行い、1 試行ごとに入力方法を切り替え、各入力手法ごとに 3 試行ずつ計 6 試行行った。実験はフィードバックがある場合とない場合で行った。フィードバックがある場合では、被験者がシワに触れた際に触れたシワがわかるように、PC 画面上の入力面のアイコン上の被験者の触れたシワに対応した位置の色を変えた。被験者はまず、フィードバックある状態で 6 試行を行い、その後、フィードバックなしの状態でも 6 試行行った。

## 実験結果

表 1 に各被験者の 3 試行の入力試行から得られた入力精度を示す。各入力方法の入力精度は 60 回の入力のうちの入力対象のシワへの入力の成功回数から算出した。

シワに触れた際の視覚フィードバックがある場合、全被験者の平均入力精度は Long press touch と Narrowing-down selection の両入力方法とも約 98% であった。入力ミスの多くはどのシワにも入力がない状態であった。これはインタフェースがシワへのタッチ入力を認識する前に被験者がキーを押したために発生したと考えられる。また、被験者が 1 本の指の指先で導電性糸に触れた際に、静電容量タッチセンサコントローラが糸と指の接触を検出しないこともあり、このセンサの挙動もシワへの入力がない状

態の原因となった。この結果から、視覚フィードバックがある場合、ユーザはデバイスを見ずに提案インタフェースの操作を行うことができる。

シワに触れた際の視覚フィードバックがない場合、全被験者の平均入力精度は Long press touch では約 75%、Narrowing-down selection では約 84%であった。被験者 E の入力試行では、インタフェースが 1 本のシワが常に入力されていると認識し続けたため、Long press touch では正常な残りの 4 本のシワへの入力から平均精度を算出した。しかし、Narrowing-down selection では、被験者の入力がすべて誤認識を起こしているシワへの入力になってしまうため、実験を行うことができず入力精度を算出できなかった。どのシワにも入力がない状態は、視覚フィードバックがある場合よりも増加した。Narrowing-down selection の入力精度は Long press touch よりも高く、これは Long press touch と Narrowing-down selection のシワの選択方法の違いの影響によると考えている。Narrowing-down selection では、被験者はすべてのシワを手のひらで同時に触り、各シワの位置を確認しており、すべてのシワを同時に触る選択方法が効率的なシワ選択方法であると考えられる。

さらに、視覚フィードバックがない場合に高い入力精度を達成した被験者の入力動作には独自の動作が観察できた。被験者 B は Narrowing-down selection での入力時に手のひらを素早く動かし、シワに何度も触れていた。被験者 C はシワに縫い付けられている導電性糸の縫目を確認するために、シワに沿って指をスライドさせ、太腿上部の 2 本のシワには親指を用いてタッチ入力を行っていた。被験者 D は指を上げて手の付け根で太腿上部のシワに触れていた。このような入力動作は提案インタフェースを用いた入力に効果的である。

#### 2.5.4 入力操作の習熟

提案インタフェースは情報提示デバイスがなくても操作できることを想定している。しかし、2.5.3 節の実験結果の視覚フィードバックがない場合の入力精度では、不十分である。そのため、各入力方法の習熟による入力精度と入力時間の長期的な変化を評価した。

#### 実験方法

2.5.3 節の実験にて発生したシステムエラーを解決するために、導電性糸と静電容量タッチセンサコントローラを接続する導線をシールド線に変更し、静電容量タッチセ

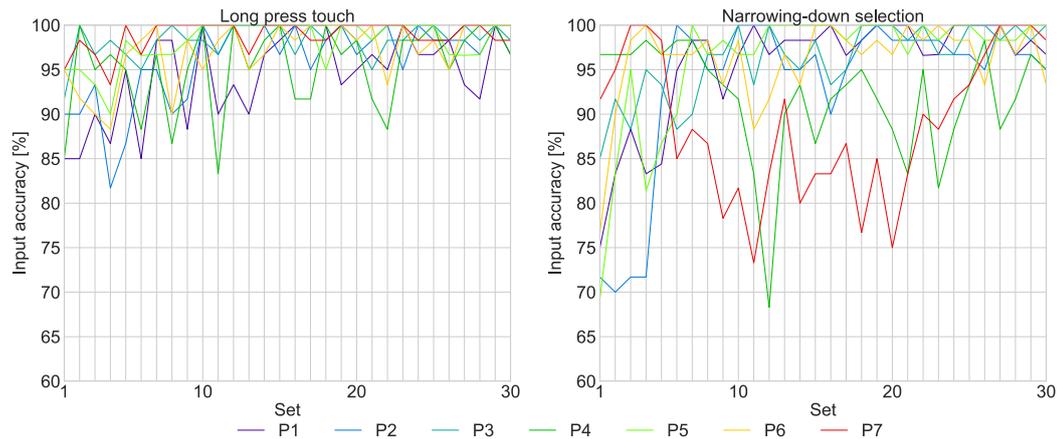


図 11: 入力精度の推移

ンサコントローラの指の接触と離脱の検出のための閾値を調整した。2.5.3節の実験の被験者とは異なる7人の右利きの男性を被験者である。被験者は右太腿部の前面にプロトタイプデバイスを取り付けたズボンを着用し、PCの置かれた机の前の椅子に座って実験を行った。被験者に各入力方法を説明し、デバイスを見ずにPC画面に提示された入力方法と入力対象のシワの指示に従って入力するように伝えた。入力試行の開始から終了までデバイス上には5本のシワが生成され続けた。入力試行中、被験者の入力操作の習熟のためにシワへの入力完了時に入力対象のシワへの入力の成否に応じて異なる音声によるフィードバックを行った。被験者は1日5回の入力試行を行った。入力試行は各入力方法60回(シワ5本×入力12回)の試行を1試行とし、60回の入力後に入力方法が切り替わった。被験者は6日間計30回の入力試行を行い、学習曲線の効果を確認した。被験者P1からP4はLong press touch, Narrowing-down selectionの順に入力試行を行い、P5からP7は逆順で入力試行を行った。

## 実験結果

図 11 に各被験者の30回の入力試行の間に入力精度の推移を示し、図 12 に各入力に要する平均入力時間の推移を示す。入力精度は各入力方法の1入力試行における入力対象のシワへの入力の成功回数から算出し、平均入力時間は1入力試行における入力指示の表示から入力完了までの平均時間である。実験最終日の5試行の平均入力精度とその分散はLong press touchでは98%と2.06、Narrowing-down selectionでは98%と2.74に達した。最終日5試行の平均入力時間とその分散はLong press touchでは1.96秒と0.19、Narrowing-down selectionでは2.14秒と0.54に達した。Long press touch

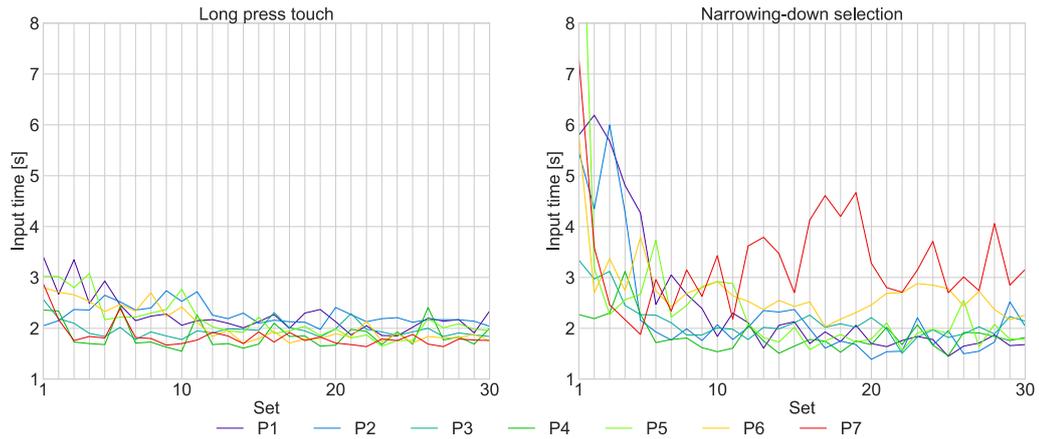


図 12: 入力時間の推移

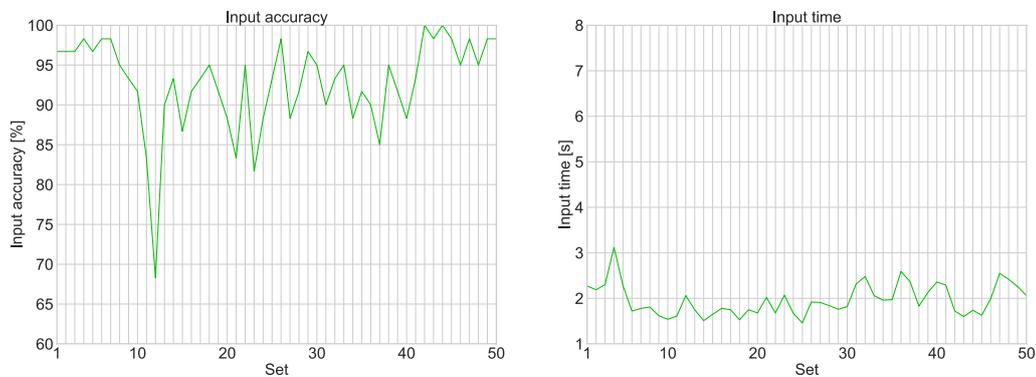


図 13: P4 の入力精度と入力時間の推移

は、6日間の入力試行の反復によって全被験者の入力精度が向上していった。しかし、Narrowing-down selection では、P4 と P7 の入力精度は実験の中盤で一度落ち、その後入力試行を繰り返すにつれて向上していった。また、P7 の Narrowing-down selection の入力時間は平均3秒で分散も大きく、他の被験者より約1秒遅い。この結果から、Long press touch の入力操作はほとんどのユーザが6日間の入力試行の反復によって習得できる。しかし、Narrowing-down selection では、P4 の入力精度は全被験者の中で最低の94%と3.59の最大の分散を記録し、P4 は6日間の入力試行の反復では十分な入力操作スキルを習得できなかったと考えられる。この実験での被験者の入力ミスのはほとんどは入力対象のシワと隣接するシワへの誤入力と太腿下部のシワと指先の誤接触による誤入力であり、システムエラーは確認されなかった。

Narrowing-down selection の入力精度が他の被験者より低い P4 の入力操作スキルの向上のために、さらに20試行(4日間 × 5試行)の入力試行をさらに続けた。図13に

P4 の 50 試行の入力試行における入力精度と入力時間の推移を示す。50 試行の入力試行の末、最終日の 5 試行における P4 の平均入力精度と分散は 97%と 1.62 に向上したが、平均入力時間とその分散は 2.26 秒と 0.21 と遅くなった。

## 2.6 むすび

本章では、アプリケーションの入力要求時にアプリケーションや入力コマンドの数に応じて衣服にシワを生成する入力インタフェースを提案した。シワを生成する手法を検討し、コイル状の形状記憶合金である BMX と圧縮バネからなるシワ生成器とシワの選択と入力のタッチを区別する2つのタッチ入力方法を設計し、プロトタイプインタフェースを実装した。社会受容性を満たすインタフェースの操作位置を調査し、脇を除く7つ身体部位は中程度の社会受容性を有していることを確認し、その中から本研究では太腿前面にデバイスを装着することを決めた。太腿前面にデバイスを装着したズボンを用いて、触覚のみによるシワの生成パターンの認識を評価し、31のシワ生成パターンを平均89.4%の認識率で認識できたが、認識までに12秒の時間を要した。さらに、プロトタイプインタフェースを用いた入力操作の精度を評価した結果、視覚フィードバックがある場合の Long press touch と Narrowing-down selection の入力精度はどちらも98%であったが、視覚フィードバックがない場合は平均約75%と84%であった。視覚フィードバックがない場合の入力精度の向上を図るために、入力操作の習熟を評価した。その結果、提案インタフェースの操作方法の学習後は Long press touch と Narrowing-down selection の両入力方法とも90%を超える入力精度となり、入力時間は約2秒となった。現在のプロトタイプインタフェースでは、シワの生成から入力の完了までに17秒以上の時間を要する。

提案インタフェースの入力操作性能を向上させるために、まずはインタフェースの構造を変更する。現在のプロトタイプデバイスでは、1枚の布に5本のシワを生成するが、シワの生成しづらい位置がある。1本のシワを生成する布を複数枚組み合わせることで、この問題を解決する。さらに、様々なテクスチャの布を組み合わせることで、シワの触覚に変化をつけ、シワの認識速度を向上できると考えている。シワが生成されたことをユーザに提示する通知方法を検討し、実装する予定である。また、提案インタフェースを用いてアプリケーションの検討および実装も行う予定である。



## 3 衣服上のシワを用いた入力評価

### 3.1 まえがき

ウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザはコンピュータをいつでもどこでも操作でき、このコンピューティングスタイルの変化に伴い新しいインタフェースが提案されている。その中でも、センサの小型化、導電性糸やLilyPadなどの登場により、布を用いて入力を行うテキスタイルインタフェースが多く提案されている。テキスタイルインタフェースは、ユーザの衣服に機能が組み込まれているため、ユーザのデバイスの持ち運びや把持を必要とせず、触る、つまむ、折り畳む、伸ばすなど布とのインタラクションを操作に利用できる。中でも布に触れるタッチジェスチャと布をつまむピンチジェスチャが多くのテキスタイルインタフェースで利用されている。テキスタイルインタフェースはユーザが着用している衣服に統合されているため、ユーザの姿勢、環境、操作位置などが操作の精度や速度に影響する。そのため、テキスタイルインタフェースを用いたタッチ入力およびピンチ入力の様々な操作状況における入力性能を評価した研究がある。しかし、同じインタフェースを用いてタッチとピンチの両入力を評価比較した研究は筆者らが知る限りない。

本研究では、シワを用いた入力方法を再考し、3つのタッチ入力方法と1つのピンチ入力方法の計の4つの入力方法の入力性能を評価する。この4つの入力方法はシワを用いたインタフェースでの利用を前提として設計され、複数のシワから1本のシワを選択して入力を行う。実装した入力デバイスを用いて、入力方法の習熟、シワの有無の影響、動作環境とデバイス位置における入力性能の評価を行った。

本論文の構成を以下に述べる。3.2節で関連研究を紹介し、3.3節では入力方法の設計と入力デバイスの実装について述べる。3.4節で評価実験とその結果について述べ、3.5節で評価結果の考察を行い、最後に3.6節でまとめを述べる。

### 3.2 関連研究

#### 3.2.1 テキスタイルインタフェース

布上で入力機能を実現するテキスタイルインタフェースは、衣服に機能が組み込まれているため、ユーザのデバイスの持ち運びや把持を必要とせず、回路や配線などが

衣服によって隠されることでユーザの外見への影響が少なく、従来のインタフェースより日常生活での使用に抵抗を感じにくい。布の柔軟性は布を折り畳む、つかむ、伸ばすといったこれまでの入力インタフェースとは異なる新たなインタラクションを入力操作に利用でき、その中でも布や糸に触れるタッチと布をつまむピンチジェスチャが多くのテキスタイルインタフェースで入力に使われている。

テキスタイルインタフェース上のタッチジェスチャは、タッチディスプレイ上でのジェスチャとは異なり、布や糸の触覚に富み、ボタンとして機能する導電性の糸や布の位置に触れている面を見ずに把握できるためアイフリーの操作ができる。Holleisらはグローブやエプロンを用いたタッチ入力インタフェースを実装した。Textile++は2つの導電性布とメッシュ生地から構成されるタッチジェスチャの座標と強さを検出するテキスタイルインタフェースである [12]。GestureSleeve はタッチジェスチャを検出するテキスタイルインタフェースであり、ストロークやタップなどのジェスチャを認識して入力を行う [14]。FabricID は袖に組み込まれたテキスタイルセンサによってユーザの手を識別するシステムである [15]。ユーザが袖に手を置いたときの圧力からユーザの手を検出する。Gillilandらが開発した rocker switch, menu は導電性糸の刺繍へのタッチジェスチャを検出するテキスタイルインタフェースである [6]。これらのインタフェースは布へのタッチジェスチャを入力方法として利用している。

布をつまむピンチジェスチャは布を用いたテキスタイルインタフェース特有のインタラクションであり、布をつまむだけでなく布をひねる、転がすなどのインタラクションを組み合わせることで連続値の入力などが実現できる。Gillilandらが開発した electronic pleat はデバイス上の指をトラッキングでき、2本の指をトラッキングすることでピンチジェスチャを認識できる [6]。Pinstripe は導電性糸が並列に縫い付けられたテキスタイルインタフェースである [10]。ユーザは布をつまみ、指の間で転がすことで連続値を入力できる。Grabrics は 30 個の六角形の導電性パッドを布上に配置したテキスタイルセンサであり、パッド間の接触からピンチジェスチャの角度を推定する [11]。ユーザは特定の角度で布をつまむことで操作をする。

タッチジェスチャとピンチジェスチャをどちらも入力に利用するテキスタイルインタフェースもある。Komorらは4つの刺繍のボタンを配置したマルチタッチのできるテキスタイルインタフェースを開発した [4]。ユーザはこのボタンへのタッチジェスチャとボタンを接触させるピンチ入力を行える。SmartSleeve は手や指のタッチなどのジェスチャに加えてひねるなどの布を変形させるジェスチャを認識できるテキスタイルセンサ

である [16]. PocketThumb はズボンのフロントポケットに組み込まれたインタフェースである [17]. ユーザは親指をポケットの内側に入れて、ポケットの内側の面をスライドさせてカーソルを動かし、同時に外側の他の指を使い親指とのピンチジェスチャのようにタップやスワイプなどのジェスチャ操作を行える.

### 3.2.2 入力評価

ウェアラブルコンピューティング環境での入力インタフェースはユーザが身に付けて身体上で操作するため、デバイスの操作位置やユーザの姿勢、社会受容性など様々な要因が操作に影響する. そのため、ウェアラブルインタフェースの操作に影響する要因を調査している研究がある. Thomas らはウェアラブルコンピューティングの使用シーンとして大型の機械のメンテナンスを想定し、様々なタッチパッドの装着位置と姿勢での入力を評価した [41]. 4つの姿勢と7カ所の装着位置の組合せにおけるタッチパッド操作の入力精度と時間を評価し、その結果、太腿の前面は着座、膝立ち、直立の姿勢ではタッチパッドの最適な装着位置であり、伏臥位の姿勢では前腕が最適な装着位置ということ確認した. Wagner らはユーザの身体と複数のサーフェイスのインタラクションの体系し、ガイドラインを作成した [38]. Wagner らの研究では、身体上のターゲットへのタッチジェスチャを検討し、被験者が直立姿勢で18カ所の身体部位のターゲットをタッチする実験を行った. 実験の結果、膝下へのターゲットへのタッチジェスチャは遅く、社会受容性が低く、また利き腕上に配置したターゲットへのタッチジェスチャは失敗しやすく、遅くなることを確認した. Pinstripe の評価では、ユーザが操作しやすい身体部位を調査するために、3つの姿勢と16カ所の身体上の操作位置の組合せで Pinstripe を操作し、操作の便利さと好まれる操作位置を評価するアンケート調査を行った [10]. 調査の結果、膝下は操作時に身体を曲げる必要があるため操作が不便であり、太腿と腰は人前で触れることに不快感を抱くと回答された. また、上腕、前腕、胸骨での操作が好まれた. このように、様々な姿勢と身体部位上でのタッチおよびピンチ入力はそれぞれ評価されているが、タッチ入力とピンチ入力を同じ条件で評価した研究は筆者の知る限りない. 本研究では、ユーザの操作環境と身体上の操作位置におけるシワを用いたタッチ入力とピンチ入力を評価し、タッチ入力とピンチ入力の違いを明確にする.

### 3.3 入力方法

本章では、実装した入力方法について述べる。本研究では、衣服のシワを用いた入力インタフェースでの入力を想定し、3つのタッチ入力と1つのピンチ入力を設計した。

#### 3.3.1 タッチ入力方法

導電性糸と静電容量タッチセンサコントローラを用いてタッチ入力を認識する。導電性糸と指との接触によって生じる静電容量の変化静電容量タッチセンサコントローラによって測定することで糸へのタッチジェスチャを検出する。

衣服のシワを用いた入力インタフェースの操作を想定し、ユーザは複数のシワから1本のシワを選択して入力を行う。シワの選択と入力をシワに触れて行うため、タッチ入力方法はシワの選択と入力を区別する必要がある。シワの選択方法として1本ずつシワに触れて位置を確認する選択方法とすべてのシワに同時に触れて位置を確認する選択方法を想定し、この選択方法を利用する3つのタッチ入力方法を設計した。Long press touch はシワの選択と入力をシワに触れている時間で区別する。ユーザがシワに約1秒触れているとタッチ入力と認識する。Double touch はシワの選択と入力をシワに触れた回数で区別する。ユーザが0.2秒以内に2回連続して同じシワに触れるとタッチ入力と認識する。この2つの入力方法のシワに1本ずつ触れる前者の選択方法を想定して設計した。Narrowing-down selection はシワの選択フェーズと入力フェーズが分離しており、入力面にあるすべてのシワに同時に触れ、その後1本のシワに触れたときにタッチ入力と認識する。この入力方法はすべてのシワに同時に触れる後者の選択方法をもとに設計した。

#### 3.3.2 ピンチ入力方法

導電性糸とマイコンを用いてピンチ入力を認識する。2本の導電性糸とマイコンを接続し、一方の糸に抵抗を介して電圧を印加し、もう一方の糸は接地する。電圧を印加している糸の電圧を測定して2本の糸の接触からピンチジェスチャを検出する。ピンチ入力方法では、ユーザのシワ選択動作と入力動作が異なり、この入力動作のみを検出する。ピンチ入力方法は2本の導電性糸が誤認識を防ぐために0.5秒間接触し続けるとピンチ入力と認識する。

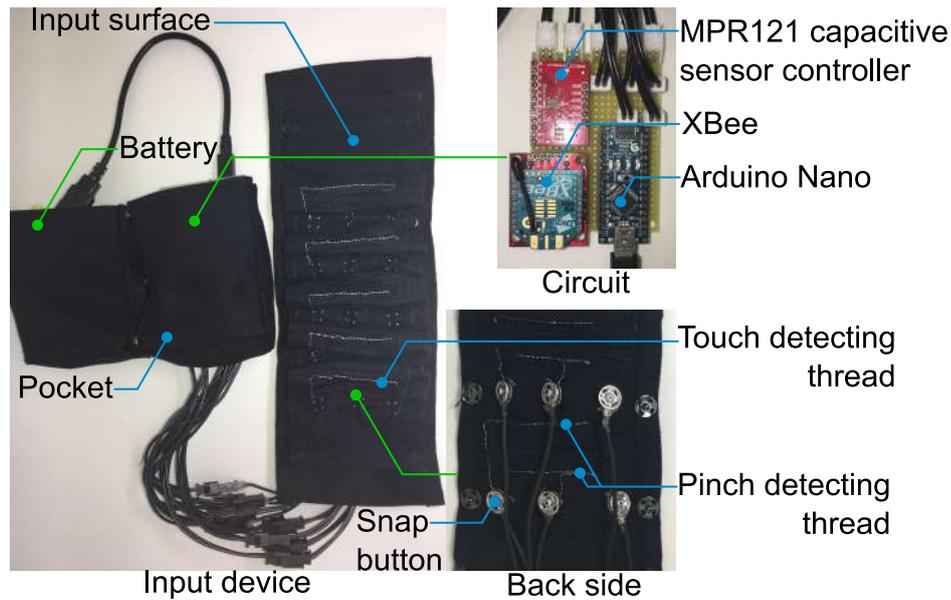


図 14: 入力デバイス

### 3.3.3 実装

図 14 に本研究の評価のために実装した入力デバイスを示す。入力デバイスの入力面となる布のサイズは入力面をできるだけ大きくするためにシワを生成した際に成人男性の手で覆うことができる  $27 \times 7.5$  cm とした。布に 5 本のシワを折り畳んで生成し、各シワに平行に 3 本の導電性糸をミシン JANOME Monaze E2000 を使用し、上糸を導電性糸、下糸を通常のポリエステル糸として縫い付けた。導電性糸の縫目をジグザグにすることで、布上の糸の表面積を大きくして接触する面積を大きくしようと試みたが、糸が布から浮き上がってしまった。そのため、導電性糸は直線状に縫い付けた。タッチ検出用の中央の糸はシワの頂点部分に沿って縫い付け、ピンチ検出用の両側の糸は布の裏側のシワ部分の中心から約 0.7 cm の距離で縫い付けた。タッチ検出とピンチ検出用の糸が布の裏側で接触するのを防ぐために、タッチ検出用の糸を覆うように布の裏側に幅 1 程度の帯状の布をシワに沿って縫い付けた。布と回路の接続とデバイスの取り付けにはスナップボタンを使用した。回路との接続のために、各導電性糸の一端に金属製のスナップボタンを縫い付け、そのペアのボタンを回路に接続する導線の一端にはんだ付けした。シワの間に導線と接続するための金属製のスナップボタンを配置し、シワの間隔はスナップボタンを縫い付けるために約 1 cm とした。タッチの誤認識を防ぐため、タッチ検出用の糸と回路をつなぐ導線にはシールド線を使用した。

デバイスの装着位置の変更を容易にするために布製のアタッチメントと回路とバッ

テリーと挿入するポケットを作製した。アタッチメントのサイズは  $25 \times 9$  cm とし、入力面の布にシワを固定した状態でアタッチメントに装着するため四隅に 4 個のボタンと両側の長辺に 12 個のボタンを 3cm 間隔で縫い付け、布製のアタッチメントに取り付け、アタッチメントには入力デバイスに縫い付けられたボタンとペアのボタンを縫い付けた。アタッチメントに縫い付けたシワ固定用のボタンの間隔は 2 cm とし、入力面のシワの高さは約 1 cm であった。アタッチメントとポケットの衣服への装着にもスナップボタンを使用した。

制御回路はマイコン、静電容量タッチセンサーコントローラー、および無線通信モジュールで構成された。マイコンとして Arduino Nano を使用し、MPR121 静電容量タッチセンサーコントローラーの制御とピンチ検出用の導電性糸の電圧を内部抵抗を介して測定した。Arduino Nano が各入力の認識に必要なセンサデータを収集し、無線通信モジュールとして使用した XBee によってセンサデータを PC に送信し、PC で各入力方法の入力を認識した。

### 3.4 評価実験

本節では、布上のシワを用いた入力操作への影響を評価するために行った実験について述べる。本研究では、シワを用いた入力操作の効率を評価するために 3 種類の実験を行い、シワを用いた入力操作の習熟、シワの存在の影響、様々な操作環境と身体上の操作位置での操作性を評価した。

#### 3.4.1 シワを用いた入力操作の習熟

ユーザはインタフェースの操作に慣れることで、その入力操作性能を向上させることができる。そのため、本実験では入力デバイスをズボンの右太腿の前面に取り付け、習熟による各入力操作の入力精度と入力時間の推移を確認する。

#### 実験方法

本実験の被験者は右利きの 9 名の被験者 (男性 7 名, 女性 2 名) であった。被験者は入力デバイスが取り付けられたズボンを着用し、PC が置かれている机の前の椅子に座り、実験を行った。まず、被験者に 4 つの入力方法について説明し、入力デバイスを見ずに PC 画面に表示される入力方法と入力対象のシワの入力指示に従って入力するよう

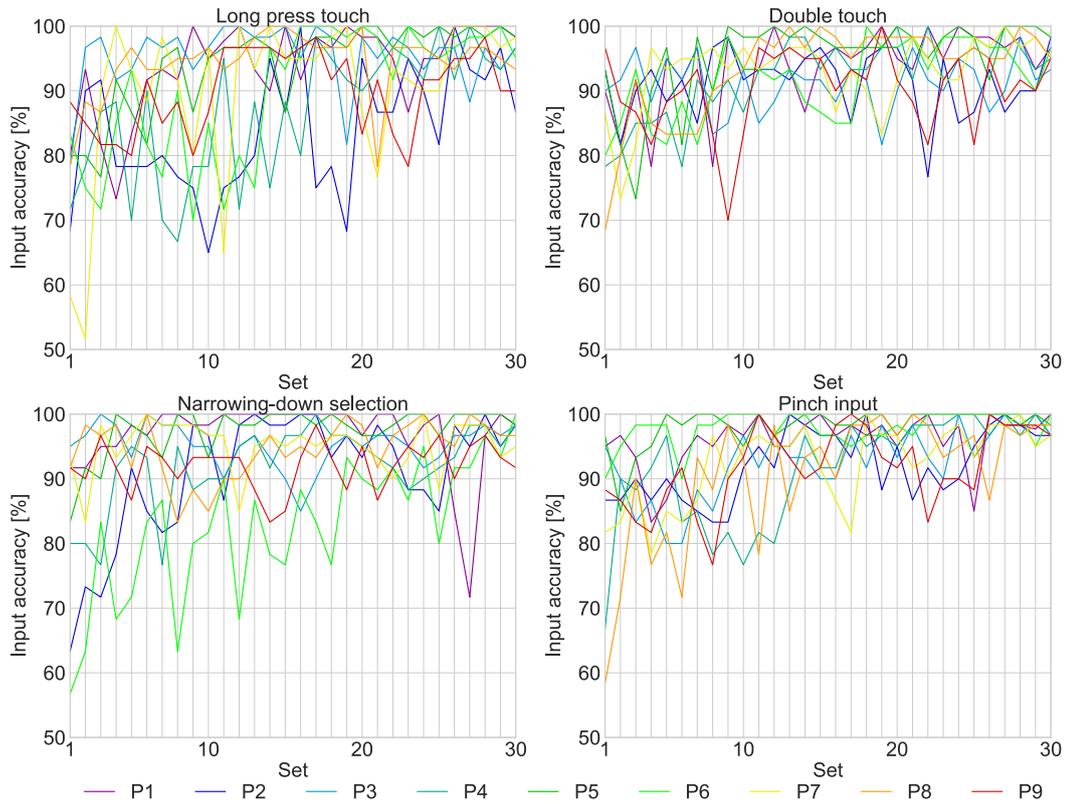


図 15: 各入力方法の入力精度の推移

に指示した。被験者が入力を完了すると、評価アプリケーションは入力したシワが対象のシワと一致している場合としていない場合に異なる音声フィードバックをユーザに提示し、PC画面に次の入力指示を表示した。各被験者は1日5回の入力試行を行った。入力試行は入力方法ごとに60回の入力(シワ5本 × 入力12回)で構成され、計240回の入力を(入力方法4つ × シワ5本 × 入力12回)を1試行とした。1試行中に60回の入力を終わると入力方法が切り替わり、1試行中の入力方法の順序はランダムとした。また、各入力方法の60回の入力における入力対象のシワの順序もランダムとした。学習曲線効果を確認するために6日間実験を行い、各参加者は合計30回の入力試行を行った。

## 実験結果

図 15 に 6 日間の入力精度の推移を示している。各入力方法の精度は、1 試行中の各入力方法を用いた 60 回の入力における被験者が入力対象のシワへの入力の成功回数から算出した。Long press touch の最終日の 5 試行の全被験者の平均入力精度は 96% に

達した。被験者 P2, P3, および P4 の入力精度は向上したが比較的分散が大きい。他の被験者は最終日には入力精度が 95%以上となり、分散も小さかった。Double touch の最終日の平均入力精度は 95%に達し、精度の分散は他のタッチ入力方法よりも小さかった。実験初日の平均精度が 4 入力方法の中で最も高く 87%であった。被験者 P2 と P3 の分散は大きかったが、最終日に高い平均精度に達した。これは、Double touch がタッチサーフェイス上の入力にも利用されている操作に似ているためと考えられる。Narrowing-down selection では、被験者 P1 の 26 試行目と 27 試行目の入力精度は、P1 の 5 日目の入力精度と最終日の他の被験者の入力精度を大きく下回っているため、外れ値と判断した。P1 の外れ値と判断した 2 試行の入力精度を除いて、最終日の平均入力精度は平均 97%となった。この 2 試行の P1 の低い入力精度は、最終日の 1 試行目と 2 試行目で発生したため、P1 はこの 2 回の入力試行で正しい入力を確認したと考えた。この 2 回の入力試行以降、P1 は入力操作を修正して精度を上げた。初日の入力試行における平均入力精度は 4 つの入力方法の中で最も低かったが、6 日間の入力試行の反復によって最終日には入力精度が向上した。すべてのシワに同時に触れた後に入力するシワに触れる入力動作に被験者が慣れていないために、初日の入力精度は低かったと考えられる。Pinch input は最終日の平均入力精度は平均 98%に達し、4 入力方法の中で最高の精度となった。シワの選択と入力の異なる動作によって高精度の操作精度となったと考えられる。

図 16 に 6 日間の入力時間の推移を示す。各入力方法の入力時間は、1 試行中の各入力方法を用いた 60 回の入力における PC 画面に入力方法と入力対象のシワを表示してからシワへの入力が完了するまでの平均時間である。Long press touch の最終日の 5 試行の全被験者の平均入力時間は 2.46 秒に達した。ただし、被験者 P8 の 26 試行目の入力時間は、最終日の他の入力時間を大きく上回っているため外れ値と判断し、平均入力時間の算出から除外した。Long press touch には入力に時間の制約があり、被験者は入力完了までに少なくとも約 2 秒の時間を要した。P8 は 21 試行目、24 試行目、26 試行目での入力時間が 5 秒以上であった。P8 はシワに触れていたが、指先の乾燥が原因でセンサが糸と指の接触を認識しづらく、入力完了までに時間を要したと考えられる。Double touch の最終日の平均入力時間は 2.02 秒に達し、4 つの入力方法の中で分散が最も小さかった。Narrowing-down selection の最終日の平均入力時間は 1.87 秒に達し、4 つの入力方法の中で最も速い入力時間であった。Narrowing-down selection の入力動作は他の入力方法の動作に比べて複雑なため、タッチ入力方法の中で分散が最

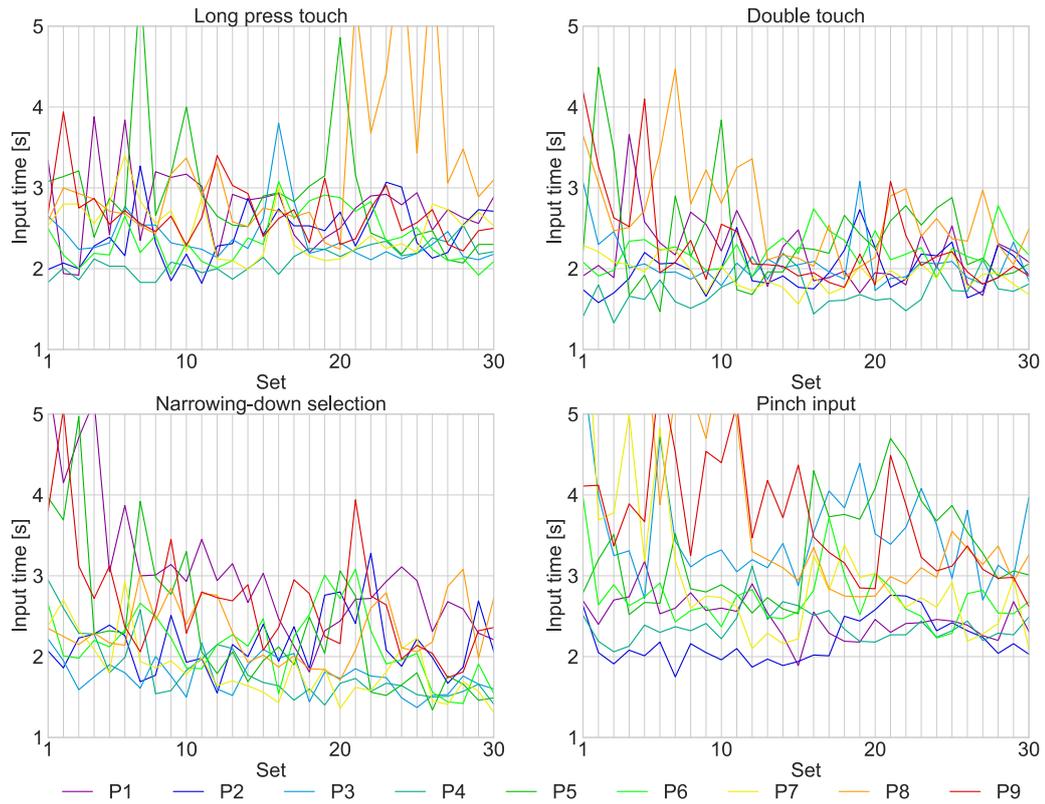


図 16: 各入力方法の入力時間の推移

大となった。Pinch input の最終日の平均入力時間は 2.74 秒に達し、4つの入力方法の中で最も遅い入力時間となった。Pinch input は選択動作と入力動作が異なり、選択時にはシワに触れて入力時にシワをつまむ。この動作の切替あるため入力時間が他の入力方法より遅くなったと考えられる。また、シワに沿って縫い付けられている裏布によって厚さが増し、シワをつまみにくくなったことも原因と考えている。

### 3.4.2 シワの存在の影響

シワは数や形状などの触覚によってユーザに情報を提示でき、ユーザの入力操作入力に役立つと考えている。シワの存在の入力操作への影響を確認するために、布の入力面にシワがある場合とない場合の入力精度と時間を比較した。

#### 実験方法

被験者は 3.4.1 節の実験を終えた 8 人の被験者 (男性 6 名, 女性 2 名) であった。3.4.1 節の実験で使用した入力面の布のシワをアイロンで伸ばしてズボンの右太腿の前面に

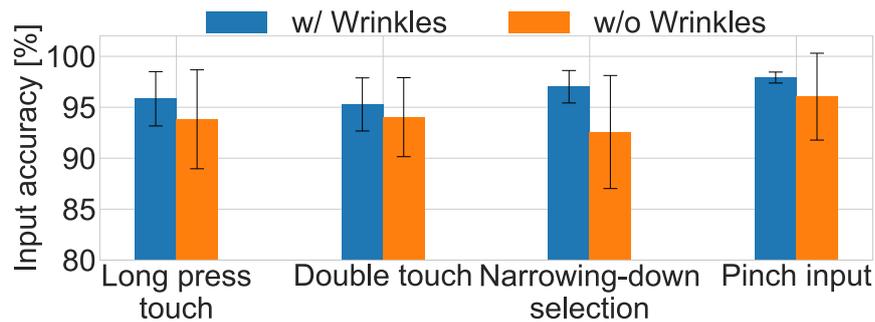


図 17: シワの有無による入力精度の比較

取り付けた。被験者はデバイスを取り付けたズボンを着用して椅子に座り、入力面を見ずに PC 画面の入力方法と入力対象のシワの指示に従って入力を行った。3.4.1 節と同じ評価アプリケーションを使用し、被験者は同様の入力試行を 3 回行った。

### 実験結果

図 17 にシワがある場合とない場合の入力精度の結果を示す。図 17 中の棒グラフは 3 回の入力試行における各入力方法の全被験者の平均精度を示し、エラーバーは全被験者の入力精度の標準偏差を示す。各被験者の入力精度は 3 試行中の各入力方法を用いた 180 回の入力における入力対象のシワへの合計成功回数から算出した。シワがある場合の入力結果は同じ被験者の 3.4.1 節の実験の最後 3 試行の入力試行の結果を用いた。すべての入力方法において、シワがある場合の入力はない場合に比べ、精度が高く、分散が小さくなった。特に、Narrowing-down selection の入力精度は平均 4% 上昇した。

図 18 に図 18 にシワがある場合とない場合の入力時間の結果を示す。図 18 中の棒グラフは 3 回の入力試行における各入力方法の全被験者の平均入力時間を示し、エラーバーは全被験者の入力時間の標準偏差を示す。各被験者の入力時間は 3 試行中の各入力方法を用いた 180 回の入力における PC 画面に入力指示を表示してから入力が完了するまでの平均時間である。入力面にシワがある場合、すべての入力方法がシワがない場合よりも速い入力時間となり、Long press touch を除く入力方法は入力時間の分散も小さくなった。3.4.1 節の被験者 P8 の入力時間はシワがある場合の方が遅くなった。これは、指先の乾燥が原因であると考えられる。シワがある場合の Pinch input の入力時間はシワがない場合よりも 1.5 秒速くなり、入力時間の分散は小さくなり、4 つの入力方法の中でシワの有無による変化が最も大きかった。

独立変数を入力方法とシワの有無、従属変数を入力精度と入力時間としてそれぞれ 2 要

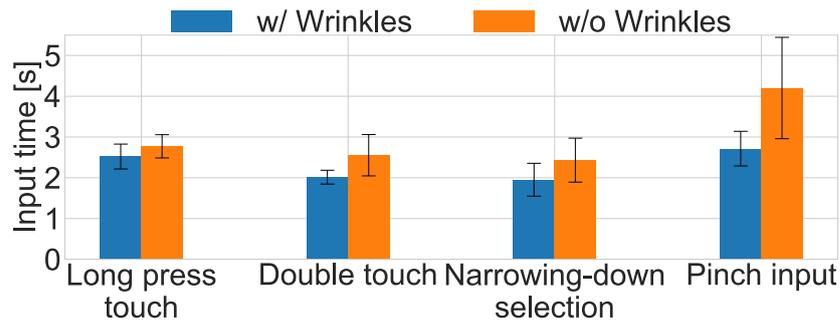


図 18: シワの有無による入力時間の比較

因分散分析を行った。分散分析の結果、入力精度では、シワの有無の主効果に有意差を確認した ( $F_{(1,21)} = 4.75, p < .10$ )。入力時間では、入力方法とシワの有無の交互作用に有意差を確認し ( $F_{(3,21)} = 10.48, p < .01$ )、交互作用の分析の結果、シワがある場合の入力方法の主効果 ( $F_{(3,21)}, p < .01$ ) とシワがない場合の入力方法の主効果 ( $F_{(3,21)} = 14.40, p < .01$ ) に有意差を確認した。Fisher の最小有意差法を用いた多重比較の結果、シワがある場合は Double touch, Narrowing-down selection は Long press touch, Pinch input よりも入力時間が速く、シワがない場合は Pinch input の入力時間が最も遅いことを確認した。さらに、入力時間のシワの有無の主効果は Double touch ( $F_{(1,21)} = 6.87, p < .05$ ), Narrowing-down selection ( $F_{(1,21)} = 5.31, p < .10$ ), Pinch input ( $F_{(1,21)} = 16.84, p < .01$ ) で有意差を確認した。

### 3.4.3 様々な操作環境と身体上の操作位置での操作性

ウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザはインタフェースを身に着けて操作するため、様々な操作環境、身体上の操作位置が想定され、操作性に優れた入力方法は操作環境や操作位置によって異なると考えられる。そのため、様々な操作環境と身体上の操作位置における入力操作の精度と時間を評価した。本研究の入力方法は衣服のシワを用いた入力インタフェースの操作を前提としており、このインターフェイスは歩行などの情報提示デバイスの注視が困難な状況、会議中など周囲の人から入力動作を秘匿したい状況でもユーザが操作できると想定している。また、ユーザは、電車の中など動作できる空間が制限されている場所や揺れている場所でも操作する。そのため、評価環境は着席、直立、歩行、電車乗車中の4種類とした。身体上の操作位置は、Wagner らの身体位置に配置したターゲットに触れる時間と精度を調査した研究を参考に決定した [38]。この研究によると、下肢のターゲットへのタッチジェスチャは遅



図 19: 操作位置

く、周囲に人がいる状況では触れたくない位置である。また、利き腕上のターゲットへのタッチジェスチャは失敗しやすい。この結果に基づいて、入力操作位置は、ユーザが立っていても座っていても腰を曲げるなど姿勢を変えずに触れることができる身体部位を選択した。この中から社会規範に従って触れることで周囲の人に不快感を与える身体部位は除き、操作位置として7カ所(前腕、上腕、肩、腹部、脇腹、太腿前面および側面)の身体部位を選んだ。図 19 に各操作位置に入力デバイスを装着した様子を示す。前腕、上腕、肩は利き手での操作を想定して非利き手側とし、脇腹と太腿は利き手からの距離を近くするために利き手側とした。

#### 実験方法

参加者は 3.4.1 節の実験を終了した右利きの男性 4 名であった。被験者は入力デバイスが取り付けられた衣服を着用して実験を行った。実験は着席、直立、歩行、電車乗車中の順に行った。着席実験では、被験者は PC が置かれている机の前の椅子に座り、3.4.1 節の実験と同様のアプリケーションによる PC 画面上の入力方法と入力対象のシワの指示に従って入力を行った。各操作位置で 3.4.1 節と同様の入力試行を 3 回行い、その後操作位置を変更した。着席状態で 7 カ所すべての操作位置での入力試行を終えると、次は直立実験へ移行した。直立実験では、被験者は PC が置かれている机の前に立ち、着席実験と同様に PC 画面上の指示に従い、各操作位置で 3 回入力試行を行った。直立実験終了後に歩行実験へ移行した。歩行実験では、評価アプリケーションは音声によって入力方法と入力対象のシワの指示を提示し、被験者はトレッドミルを用いて歩行速度 4 km/h で歩行しながら音声指示に従って各操作位置で 3 回入力試行を行った。歩行実験終了後、最後に電車乗車実験を行った。電車乗車実験のために、無線通信モジュールを XBee から BLE Nano に変更し、スマートフォン用の評価アプリケーションを実装した。電車乗車実験で使用するシステムは、デバイス側の Arduino Nano がセンサデータを収集して各入力方法の入力を認識し、その認識結果を BLE Nano を

介して iPod touch に送信した。iPod touch 上の評価アプリケーションは入力方法と入力対象のシワの入力指示を音声で提示した。被験者は左手で吊り手を握り、イヤホンをつけて入力指示を聞き、その指示に従って各操作位置で入力試行を3回行った。各操作環境での操作位置の順序、1入力試行中の入力方法の順序、1入力方法を用いた入力中の入力対象のシワの順序はすべてランダムとした。

## 実験結果

図 20 に操作環境と操作位置のすべての組合せにおける各入力方法の平均入力精度を示す。各被験者が3試行中の各入力方法を用いた入力対象のシワへの入力の合計成功数から入力精度を算出した。Long press touch は操作環境と位置のすべての組合せで90%以上の平均精度となった。上腕と肩での入力は歩行や電車乗車の操作環境でも入力面があまり動かず安定しているため、全環境で95%以上の高い平均精度となった。着席状態の脇腹での入力がLong press touch の中で平均精度91.1%と最も低く、標準偏差8.67と最も大きかった。Double touch は前腕、上腕、肩、腹部での入力が全操作環境で平均90%以上の精度であった。太腿での入力は歩行状態を除いて90%以上の平均精度となった。太腿での入力は歩行による太腿の動きによって精度が低下し、歩行状態の太腿前面と側面での入力は平均精度がそれぞれ85.7%と84.3%であった。1名の被験者の腹部での入力性能が71.1%と低く、着席状態での腹部での入力はDouble touch の中で最も大きい11.6の標準偏差となった。Narrowing-down selection は脇腹以外での入力がすべての操作環境で平均精度が90%以上となった。脇腹での入力は電車乗車を除く環境では精度が低く、歩行状態の平均精度がNarrowing-down selection の中で最も低い87.5%であった。歩行状態の前腕での入力は入力精度が77.2%と低い被験者が1名いたので標準偏差が最も高い8.66となった。Pinch input は操作環境と操作位置のすべての組合せで90%以上の平均精度となった。上腕、肩、腹部、および太腿での入力はすべての環境で95%以上の高い平均精度となった。前腕の入力は歩行状態を除いて標準偏差が6程度と高かった。

上記の結果から、上腕と肩は操作環境による影響が小さく、すべての操作環境ですべての入力方法の入力精度を高く維持できることを確認した。右脇腹の上部を右手で触ることは特に着席時や歩行時は難しいため、脇腹での入力はすべての入力方法で精度が低かった。太腿の入力面は歩行時に動き、利き腕からの距離が一定でないため太腿での入力は歩行状態での入力精度が低く、特にDouble touch と Narrowing-down selection

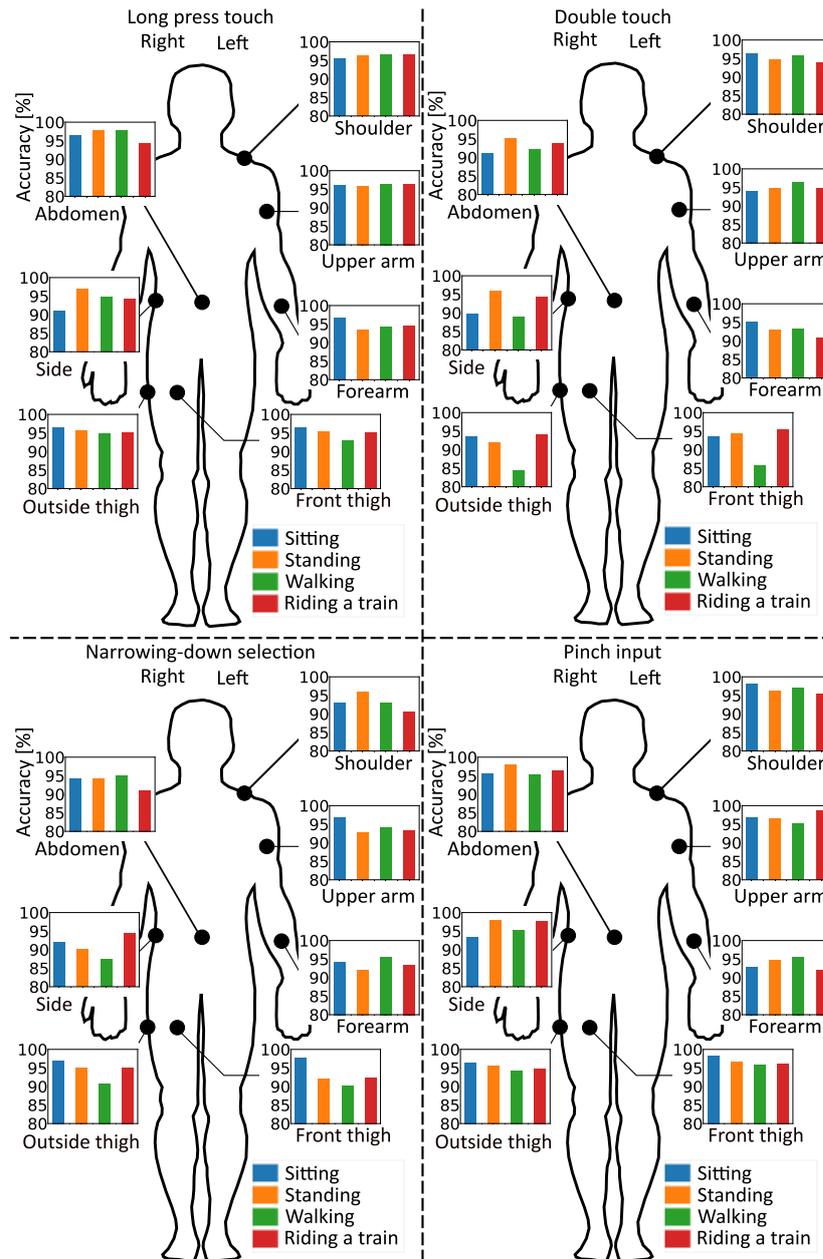


図 20: 操作環境と操作位置のすべての組合せにおける各入力方法の入力精度

は入力面から一度手を浮かす入力動作なので精度が大幅に低下した。操作環境，操作位置，入力方法を独立変数とする 3 要因分散分析の結果，入力方法の主効果に有意差を確認した ( $F_{(3,9)} = 8.33, p < .01$ )。Fisher の最小有意差法を用いた多重比較の結果，Long press touch は Double touch，Narrowing-down selection よりも高い精度であることを確認した。

図 21 に操作環境と操作位置のすべての組合せにおける各入力方法の平均入力時間

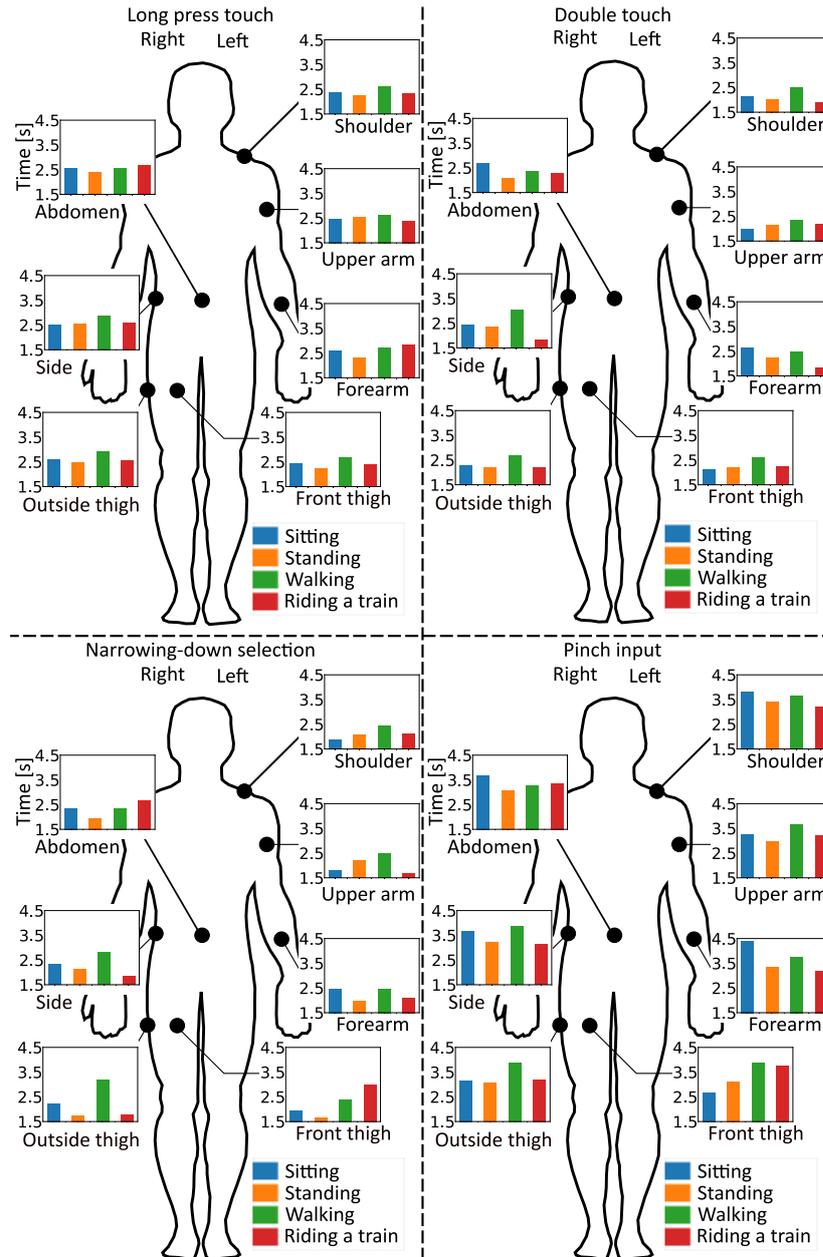


図 21: 操作環境と操作位置のすべての組合せにおける各入力方法の入力時間

を示す。各被験者の入力時間は3試行における入力指示の提示から入力完了までの平均時間である。Long press touch は操作環境と位置のすべての組合せで約 2.5 秒の平均時間となった。着席、直立、電車乗車の操作環境での肩での平均入力時間はそれぞれ 2.35 秒、2.23 秒、2.31 秒と各操作環境において最速となった。前腕での入力時間は Long press touch の中で標準偏差が最大の 0.57 となった。Double touch の各操作環境での最速の平均入力時間は、着席では太腿前面の 1.99 秒、直立では肩の 2.01 秒、歩行

では腹部の 2.34 秒，電車乗車では前腕の 1.82 秒となった．歩行実験での脇腹の平均入力時間は，歩行による身体のねじれが入力面を変形させたため，Double touch の入力結果の中で最長の 3.03 秒となった．Narrowing-down selection の各環境の最速平均入力時間は，着席では上腕の 1.76 秒，直立では前腿の 1.68 秒，歩行では腹部の 2.34 秒，電車乗車では上腕の 1.69 秒となった．Narrowing-down selection は各動作環境においてすべての入力方法の中で最速の入力時間を記録した．さらに，着席と直立実験では，Narrowing-down selection はすべての入力方法の中ですべての操作位置において最速の入力時間を記録した．しかし，電車乗車実験では，腹部と太腿部の入力時間の標準偏差が大きく，それぞれ 1.55 と 2.01 となった．1 名の被験者は腹部での入力が 1 入力あたり平均 5.3 秒，太腿での入力が平均 6.3 秒かかった．実験後，この被験者はすべてのシワに触れているかを知ることが難しいと報告し，すべてのシワに触れたことを知らせるフィードバックが必要である．Pinch input は着席では太腿前面の 2.66 秒，直立では上腕の 2.98 秒，歩行では腹部の 3.25 秒，電車乗車では脇腹の 3.14 秒が最速の平均入力時間となった．Pinch input は操作環境と位置のすべての組合せにおいてタッチ入力方法よりも入力時間を要した．

上記の結果から，Narrowing-down selection はすべての入力方法の中で最も速い入力であり，Pinch input は最も遅い入力である．Narrowing-down selection の入力には時間の制約がなく，一度にすべてのシワの位置を確認できる選択方法なので速い入力ができる．Pinch input は選択動作と入力動作が異なり，またピンチ検出用の導電性糸が直線状に縫われているため接触面積が狭いためシワをつまんでも糸の接触が起こらないことがあり，入力が最も遅くなった．すべての入力方法において，ほとんどの操作位置での入力は直立時の入力が速く，これは身体部位を触りやすくなるためだと考えられる．一方，歩行中の入力は入力面の動きのために入力が遅くなった．電車の揺れによって Narrowing-down selection の入力時にすべてのシワに触れているかどうかを知覚することが難しいと感じる被験者もいた．操作環境，操作位置，入力方法を独立変数とする 3 要因分散分析の結果，入力方法と操作環境，操作位置の相互作用に有意差を確認した ( $F_{(54,162)} = 1.44, p < .05$ )．そのため，装着位置を固定して各装着位置での 2 要因分散分析を行った．その結果，前腕，上腕，肩，脇腹および太腿前面での入力に入力方法の主効果に有意差を確認した (それぞれ  $F_{(3,9)} = 6.51, 4.53, 6.68, 4.29, 4.12$ , すべて  $p < .05$ )．Fisher の最小有意差法を用いた多重比較の結果，上記の操作位置での Pinch input がすべての入力方法の中で最も遅い入力であることを確認した．

### 3.5 考察

入力方法の習熟により、4つの入力方法の入力精度は平均97%を超え、特に Pinch input の入力精度は4つの入力方法の中で最高の98%に達した。Pinch input は選択動作と入力動作がわかれているため、高い入力精度が得られた。タッチサーフェイス上のタッチ操作と似ている Double touch は、実験初日から入力精度が85%を超え、精度の分散も小さかった。Narrowing-down selection は、実験最終日に1.64秒という最速の入力時間に達した。しかし、すべてのシワに同時に触れる選択方法は、他の入力方法よりも長期間の習熟が必要である。Long press touch には時間の制約があり、Long press touch は他のタッチ入力方法より入力時間を要した。シワの選択と決定を区別するシワに触れている時間には、精度を維持する最適な時間があると考えており、今後調査する必要がある。本研究にて評価に用いた入力デバイス上のシワは指で挟み込みにくい構造となっており、そのため Pinch input は3つのタッチ入力方法よりも入力時間を要した。Pinch input の入力時間の削減のために、つまみやすいシワの条件として適切なシワの厚さと間隔、シワの側面に縫い付けた2本の導電性糸の間隔などを改善する必要がある。また、入力面上のシワによって、すべての入力方法は入力時間が速くなり、特に Pinch input が最もその影響が大きかった。

操作環境と操作位置の評価結果から、Long press touch と Pinch input は操作環境と位置のすべての組合せにおいて90%以上の高い精度を維持した。この2つの入力方法では、ユーザは入力面から手を離さずに入力を行うことができるため、操作環境や位置によらない高精度の入力を実現する。しかし、Pinch input は選択動作と入力動作の分離とつまみにくいシワの構造により入力完了までに時間を要した。Double touch と Narrowing-down selection では、ユーザは選択から入力の過程の間に入力面から手を一度浮かせる。そのため、歩行時の大腿での入力の精度が低下する。ただし、Narrowing-down selection のすべてのシワに同時に触れる選択方法は、ユーザがすべてのシワの位置を一度に確認できるため、高速な入力操作ができる。すべての入力方法において上腕と肩での入力は、操作環境によらず高い入力精度を維持した。操作環境の上腕と肩での入力への影響は、他の操作位置での入力に比べて小さい。脇腹での入力では、右脇腹の上部を右手で触れるのは難しいため、着席時、歩行時の脇腹での入力の入力性能は低下する。

これらの評価実験の結果から得られた各入力方法の特性を以下にまとめる。入力面からユーザが手を浮かせる必要のない Long press touch と Pinch input は操作環境と操

作位置によらず高い入力精度の入力操作が実現する。また、Pinch input の選択動作と入力動作の分離は、精度の高い入力に役立つ。一方、Double touch と Narrowing-down selection は、入力速度の速い入力操作を実現する。特に、Narrowing-down selection のすべてのシワを同時に触れる選択方法は、入力対象のシワを位置を速く見つけることができる。ただし、この選択方法は操作環境の影響を受けやすく、ユーザはこの選択方法を習得するために他の入力方法より長い学習期間が必要となる。すべての入力方法において、上腕と肩は操作環境の影響を受けにくい操作位置である。

### 3.6 むすび

本研究では、衣服のシワを用いた3つのタッチ入力方法とピンチ入力方法を設計し、その入力精度と入力時間を評価する3つの実験を行った。まず、習熟による入力方法の精度と時間の推移を調査し、その結果、すべての入力方法の入力精度は平均精度95%以上に達し、Pinch input が最も精度が高く98%となった。入力時間はNarrowing-down selection が最も速く実験最終日には平均1.87秒となった。次にシワの有無による入力の差を評価し、すべての入力方法、特にPinch input ではシワによって入力速度を速くなることを確認した。最後に4つの操作環境と7カ所の身体上の操作位置の組合せにおいて、入力性能を評価した結果、Long press touch とPinch input は操作環境と位置のすべての組合せで90%以上の高精度に達することを確認した。Double touch とNarrowing-down selection は太腿での入力が歩行時に精度と時間が大幅に悪化した。上腕と肩は操作環境が変化しても各入力方法の操作性がほとんど変化しない操作位置であった。



## 4 衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法

### 4.1 まえがき

人々が日々身に着けている衣服は、コンピュータを身に着けて使用するウェアラブルコンピューティングにおいて注目されている。Smart clothing や E-textile と呼ばれる小型化したセンサやアクチュエータを統合した衣服の研究領域がウェアラブルコンピューティングの分野で確立されている。Smart clothing のひとつとして、布を変形させ視覚的、触覚的な刺激を着用者に提供する Deformable cloth が研究されており、布の変形による情報出力機能が示唆されている [39, 40]。着用者は布の変形により圧力や接触面積などの肌への触覚刺激の変化を知覚できる。人の皮膚は、振動や圧力、熱など様々な刺激を知覚する。これらの刺激の中でも、振動はモバイル、ウェアラブルデバイスの触覚フィードバックに利用されている [42, 43, 44, 45]。しかし、振動フィードバックは刺激が瞬間的でユーザの意識が振動刺激に移るので、ユーザはフィードバックを逃すことがあり、長時間の振動フィードバックに苛立ってしまう [46]。一方、圧力フィードバックは微妙な刺激から力強い刺激まで幅広い刺激を提示でき、即時的なフィードバックだけでなくバックグラウンドで刺激を提示し続ける持続的なフィードバックもできる。圧力フィードバックを行うリストバンド型や指輪型のデバイスが提案され、手首や指の刺激の知覚能力を調査している [47, 48, 49, 50, 51]。

本論文では、衣服の変形を利用したフィードバック手法を提案する。形状記憶合金と圧縮バネからなるアクチュエータを使用し、衣服を変形させ、着用者の皮膚に触覚刺激を提示する。形状記憶合金は小型、軽量、柔軟なので衣服への統合が容易であるためアクチュエータに利用した。リストバンド型のフィードバックデバイスである HapticClench は、手首に沿って巻かれた 1 本の形状記憶合金のアクチュエータを用いて、皮膚にかける圧力の強さに応じた触覚刺激を提示する [51]。圧力の強さ以外にユーザが区別できる複数の刺激を生成する方法が考えられる。例えば、複数のアクチュエータによる収縮パターンによってもユーザが区別できる刺激を生成できる。提案手法では、複数のアクチュエータの収縮パターンによって刺激を変化させるために 4 つのアクチュエータを長袖の T シャツの前腕、上腕、肩の部分に沿って装着し、プロトタイプシステムを実装した。プロトタイプシステムはパルス変調 (PWM: Pulse Width Modulation) 方式によって各アクチュエータの伸縮を制御して布を変形させる。実装したシステムを

用い、提案手法のフィードバック性能の評価と前腕、上腕、肩での刺激知覚能力の違いの比較のために4つの評価実験を行った。まず、提案システムの提示する圧力刺激を観察するためにアクチュエータが皮膚に与える圧力を測定し、次に、各フィードバック位置での絶対閾を測定した。そして、4つのアクチュエータの収縮パターンによる袖布の変形の認識評価を行い、最後にアクチュエータの収縮パターンの認識評価結果から抽出した収縮パターンを用いてさらなる認識評価を行った。

本論文は以下のように構成される。4.2章では、関連研究について述べ、4.3章で提案システムの設計について述べる。4.4章でプロトタイプの実装について述べ、??章で評価実験と考察を行う。4.6章で提案手法のフィードバック性能について議論を行い、最後に4.7章でまとめを行う。

## 4.2 関連研究

### 4.2.1 触覚フィードバック

触覚刺激の中でも、振動は多くのモバイル、ウェアラブルデバイスで通知を行うために利用されている。振動はユーザがディスプレイを見ず、周囲の人に気付かれない目立たないフィードバックができ、触覚フィードバックとして様々な情報を伝えるための方法が提案されている。BuzzWearでは、3つのアクチュエータを三角形の頂点部分に配置した手首装着型デバイスを開発し、刺激知覚感度とデュアルタスクのパフォーマンスを評価した [42]。Cauchardらは、1から10の値に対応する振動触覚のパターンを設計し、その情報伝達性能を評価した [43]。EdgeVibは、 $2 \times 2$ に配置した振動アクチュエータによってストロークの振動パターンを提示し、英数字情報を伝達する触覚フィードバックシステムである [44]。Hongらは、振動モータの構成と振動するモータの個数を比較し、手首に提示する振動刺激による手首の誘導性能を評価した [45]。その結果、4個の振動モータの構成での単一のモータの振動が最も手首の誘導性能が高いことを示した。振動刺激を利用したマルチモーダルフィードバックも提案されている。Shimらは、風と振動を組み合わせた刺激を提示する触覚ディスプレイを提案し、ファンとモータで構成されるデバイスを実装してユーザとのインタラクションを分類した [52]。しかし、ユーザの座位姿勢を正すための3つのフィードバック方法を比較したHallerらの研究によると、振動フィードバックはユーザの作業を阻害してしまう [46]。

そのため、他の刺激を利用したフィードバック手法が提案されており、その1手法が熱刺激を用いる熱フィードバックである。Tewellらは、前腕の皮膚に熱刺激を提示す

るペルチェ素子で構成される3つのデバイスを実装し、2Dの迷路のナビゲーションをする評価を行った [53]。Peirisらは、手首の周径に沿って配置した複数の熱モジュールによる熱フィードバックの性能を評価し、4つと6つの熱モジュールの構成による冷却刺激の知覚精度が高いことを明らかにした [54]。加えて、手首での6つの熱モジュールと6つの振動アクチュエータによるフィードバック方法を比較し、熱フィードバックは振動フィードバックよりも刺激の知覚精度が高いことも明らかにした。Songらは、腕時計型デバイスを用いて、振動、圧力、熱刺激によるフィードバック性能を比較した [55]。その結果は、Peirisらの評価結果とは対照的に、熱フィードバックで刺激パターンの誤認識が最も多かったことを示した。熱刺激以外にも、新たな皮膚への触覚刺激もフィードバック方法に利用されている。Skin Drag Displayは、モータと回転ダイヤフラムを用いて、振動刺激と皮膚を伸ばすストレッチ刺激を提示する触覚ディスプレイである [56]。Chinelloらは、手首の回転と動きを誘導する4つのモータと4つの半円形の滑車で構成されるフィードバックデバイスを開発した [57]。このデバイスは、ゴムで覆われた滑車によって皮膚に摩擦刺激を提示する。BrushTouchは、6つのモータのシャフトに取り付けた柔らかい発泡材によって皮膚をこするブラッシング刺激を提示するリストバンドデバイスである [58]。

触覚フィードバックを提示するウェアラブルデバイスの中でも、手首や指を圧迫する刺激を提示する圧力フィードバックが最近注目されている。Songらの評価結果によると、圧迫感を提示する圧力刺激は振動刺激と同程度の刺激識別率を記録した [55]。PokeRingは、指の周囲を8カ所をリニアアクチュエータによって突くリング型デバイスであり、突く位置の移動パターンによって様々な情報を伝える [47]。Moveletは、ユーザの前腕に沿って移動するブレスレット型デバイスであり、そのデバイスの移動と位置によってフィードバックを行う [48]。Pohlらは、圧縮フィードバック手法である Squeezeback を提案し、手首に圧力を与える空気圧式膨張バンドデバイスを実装した [49]。Chernyshovらは、形状記憶合金ワイヤを用いた圧力フィードバック手法を提案し、形状記憶合金を搭載したリング型デバイスを実装した [50]。Guptaらは、形状記憶合金を用いた圧迫フィードバック手法である HapticClench を提案し、形状記憶合金を搭載したブレスレット型デバイスを実装した [51]。このように、ウェアラブルコンピューティング環境において圧力フィードバックは振動フィードバックの代替として利用できる。これまでに提案されたデバイスは手首や指に装着するアクセサリ型デバイスであり、衣服を使用したフィードバック手法はまだ提案されていない。さらに、手首と指での圧力フィー

ドバックの性能は調査されてきたが、他の身体部位での性能はまだ評価されていない。衣服は人の身体のほとんどを覆っているため、衣服を用いることで身体の様々な位置にフィードバック刺激を提示できる。本論文では、腕に焦点を当て、衣服の変形に対する触覚刺激の知覚感度を評価し、触覚フィードバックを行う身体上の領域を広げる。

#### 4.2.2 衣服の変形

アクチュエータを統合し、変形する布の利用方法が提案されている。Holschuhらは、ウェアラブル圧縮服のためにNi-Tiのコイルアクチュエータを設計し、止血帯システムのプロトタイプを実装した[59]。BerzowskaとCoelhoは、形状記憶合金を統合した変形するドレスを実装し、その利用方法を提案した[39]。この研究では、布の変形には、インタラクティブシステムの出力デバイスとしての機能があることが示唆されている。Moereとhoinkisは、ウェアラブルディスプレイとして利用する形状記憶合金を用いた折りたたまれるように変形する布を実装した[40]。本研究では、衣服の一部を変形させ、ユーザの皮膚に触覚刺激を提示し、フィードバックを行う。

### 4.3 提案手法

本論文では、衣服の変形を用いたフィードバック手法を提案する。関連研究では、腕や指に密着するリストバンド型や指輪型のデバイスを用いて手首や指の周径に沿って圧力刺激を提示する[47, 48, 49, 50, 51]。衣服上からの同様のアクチュエーションによって、手首や以外の他の身体部位でも同じ刺激を提示できる。衣服を利用することで、リストバンド型デバイスを用いたフィードバック手法よりも触覚刺激を提示する身体上の領域が広がり、ユーザは刺激提示位置を変更できる。提案手法は、衣服を変形により身体と衣服の接触面積や密着度を変化させてユーザに情報を伝達する。衣服の機能性と快適性は非常に重要であるため、衣服にアクチュエータを装着する際に衣服の締め付けをきつくしないことが重要である。提案手法では、衣服の変形のためのアクチュエータとして形状記憶合金を使用する。形状記憶合金は小型、軽量、柔軟なため、衣服に統合しやすい。本論文では、TOKI Corporation製のコイル状のTi-Ni形状記憶合金であるBio Metal heliX (BMX)を用いて[37]、その中でも皮膚に刺激を伝えやすくするために直径と生成する力が最大のBMX150を使用する。BMX150の線材直径は0.15 mm、標準コイル径は0.62 mmで最大40 gfの力を生成できる。BMXは電流を流すと収縮するが、電流を止めても元の長さに伸長しないため、圧縮バネを用いてBMXを

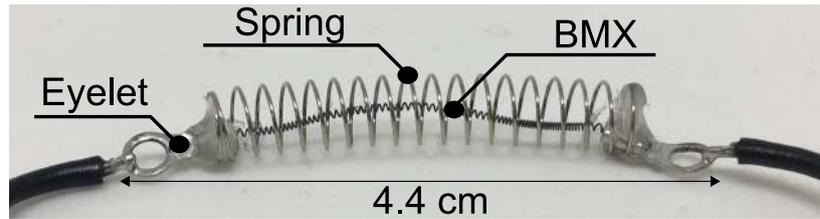


図 22: アクチュエータ



図 23: アクチュエーターバンド

元の長さに伸長させる。BMX を圧縮バネの中に通し、BMX とバネで構成されるアクチュエータを実装する。Squeezeback と HapticClench では、アクチュエータを手首の周径に沿って装着し、人に身体を掴まれる感覚に似た刺激を提示する圧迫フィードバックを行う [49, 51]。提案手法も同様のフィードバックを行えると想定し、腕と肩の周径に沿ってアクチュエータを装着する。また、HapticClench では、1本の形状記憶合金ワイヤを用いて、皮膚に与える圧力の強さに応じた触覚刺激を提示する [51]。異なる位置と数のアクチュエータの収縮パターンもユーザが区別できる様々な刺激を提示できると考え、Tシャツの袖の周囲に複数のアクチュエータを装着する。

#### 4.4 実装

提案手法の実現のためにプロトタイプシステムを実装した。図 22 に BMX150 と圧縮バネで構成されるアクチュエータを示す。1.5 cm に切り取った収縮している BMX150 を 3.0 cm に伸ばし、線径 0.3 mm、外径 5.0 mm の圧縮バネに通し、BMX の両端に金属製のハトメを取り付け、バネとハトメを接着してアクチュエータを実装した。導線をハトメにはんだ付けして回路とアクチュエータをつないだ。次に、4つのアクチュエータを幅 1 cm、長さ 24 cm の布の帯に取り付けて、アクチュエーターバンドを実装した(図 23)。帯には 4つのアクチュエータを取り付けるための 8つのフックを縫い付けた。アクチュエータを取り付ける 2つのフックの間隔は約 4 cm、両端の 2つのフックは帯の端から 1 cm 離して縫い付けた。隣接するアクチュエータの間隔は約 1.5 cm となった。

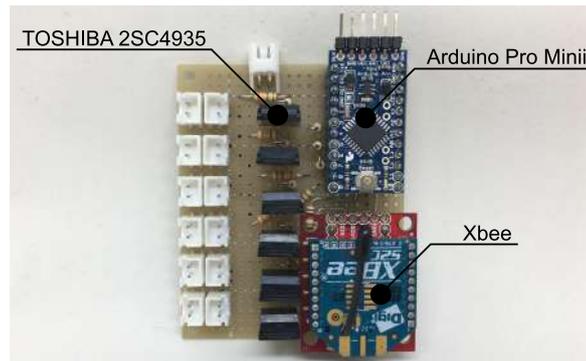


図 24: 制御回路

制御回路はマイコンと無線通信モジュールで構成される (図 24)。マイコンとして Arduino Pro Mini を用いて、PWM によって TOSHIBA 2SC4935 トランジスタを介してアクチュエータに電力を供給する。PWM はパルス波のデューティ比を変更することで変調する方式であり、この回路では各アクチュエータに印加する電圧を PWM の値を 0 から 255 の範囲で設定して制御する。PWM によって電力損失を減らし、アクチュエータの収縮時間と収縮量を調整する。無線通信モジュールとして Xbee を用いて、PC と通信する。この制御回路では、PWM 値が最大値 255 のときに  $7.6 \Omega$  の抵抗値のアクチュエータに 2.3 V の電圧を印加する。アクチュエータの収縮の消費電力は、1 個のアクチュエータにつき最大約 0.7 W である。

アクチュエータバンドを長袖の T シャツに装着した。T シャツの素材は綿、サイズは身丈 65 cm, 肩幅 45 cm, 身幅 50 cm, 袖丈 56 cm である。スナップボタンを用いてバンドを装着した。バンドのフックを縫い付けた面の裏面に 8 つのスナップボタンを縫い付け、T シャツに対応するスナップボタンを縫い付けた。バンドがユーザの動きを妨げないように、関節を避けて装着し、前腕と上腕の装着位置は肘関節から約 5 cm, 肩の装着位置は肩関節から約 5 cm 離れた。図 25 に各装着位置にアクチュエータバンドを装着した長袖の T シャツを示す。アクチュエータバンドの装着位置はすべて利き手側とした。被験者に合わせてバンドの位置を調整するために、前腕と上腕には 64 個 (8 個  $\times$  8 列), 肩には 56 個 (8 個  $\times$  7 列) のボタンを縫い付けた。

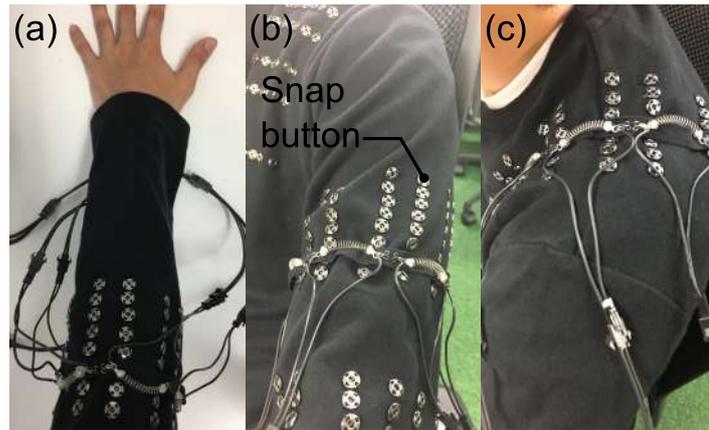


図 25: アクチュエーターバンドを装着した長袖の T シャツ (a) 前腕, (b) 上腕, (c) 肩

## 4.5 評価

実装したプロトタイプシステムを用いて、3つの評価実験を行った。最初にアクチュエーターバンドが皮膚に与える圧力を測定し、次に各装着位置での刺激の絶対閾を測定し、最後にアクチュエータの収縮パターンの認識評価と認識評価の結果から抽出したアクチュエータの収縮パターンを用いて着席と歩行時の認識評価を行った。

### 4.5.1 圧力測定

各アクチュエータが皮膚に与える圧力負荷を測定した。提案手法はアクチュエータの収縮によってユーザの皮膚に圧力を与える。実装したプロトタイプシステムが提示する刺激量を調べるために、アクチュエータの収縮量に応じた圧力を測定した。

#### 実験内容

被験者は右利きの男性1名であった。被験者はTシャツの上から長袖のTシャツを着用し、前腕と上腕の長さとおくチュエーターバンド装着位置の周径、肩幅を測定した。図26にアクチュエーターバンドの各装着位置での4つの各アクチュエータの位置を示す。前腕と上腕では、手の甲を上め向け肘を伸ばした状態で、桡骨側から反時計回りに各アクチュエータの位置を位置1から4とした。肩では、胸側から背中側にかけて位置1から4とした。測定する圧力は各バンド装着位置の位置1～4にある1個のアクチュエータの収縮によって生じる圧力である。位置1～4を各アクチュエータの刺激提示位置として圧力センサを配置した。被験者は圧力センサ FSR406 をアクチュエー

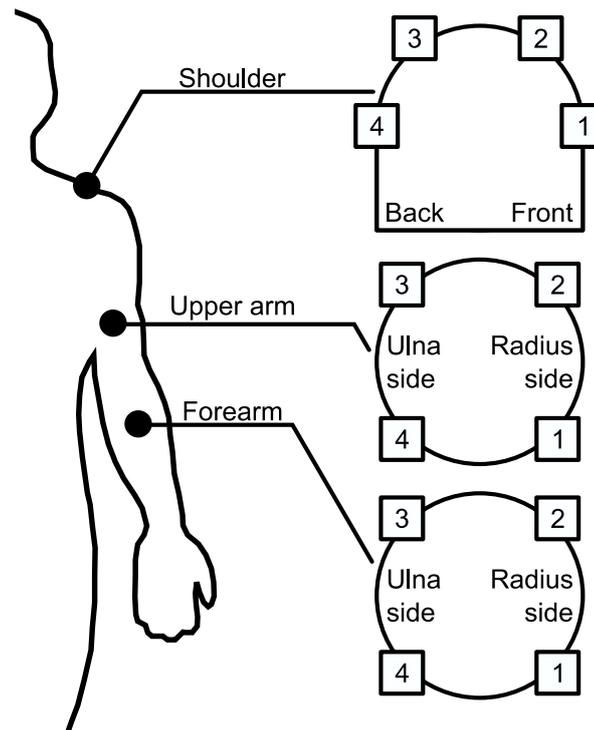


図 26: 各装着位置でのアクチュエータ位置

タの下の皮膚に不織布のサージカルテープで貼り付けられ、PCが置かれた机の前の椅子に座り、腕を伸ばして左手を机に置いた状態で実験を行った。圧力測定は、BMXに電力が供給されないPWMの値を0から開始し、アクチュエータを5秒間収縮させ、その後10秒間伸長させた。収縮後にPWM値を5%ずつ上昇させ、255になるまで続けた。1カ所の刺激提示位置につき3回連続して圧力を測定した後に、圧力センサを次の圧力を測定する刺激提示位置に移して測定を行った。アクチュエーターバンド装着位置は4カ所の刺激提示位置での圧力測定が完了した後に変更した。加えて、前腕では、アクチュエータと皮膚の位置関係の影響を観察するために3つの状態で圧力を測定した。図27に示すように、アクチュエータの位置を腕を回転させてシフトさせた。机の上に手のひらをおいた状態を肘のロール角 $0^\circ$ (位置2と3が前腕の上面)とし、腕を伸ばしたまま肘を約 $90^\circ$ 左右に回転させた状態をそれぞれ肘のロール角 $+90^\circ$ (位置1と2が上面)と $-90^\circ$ (位置3と4が上面)とした。

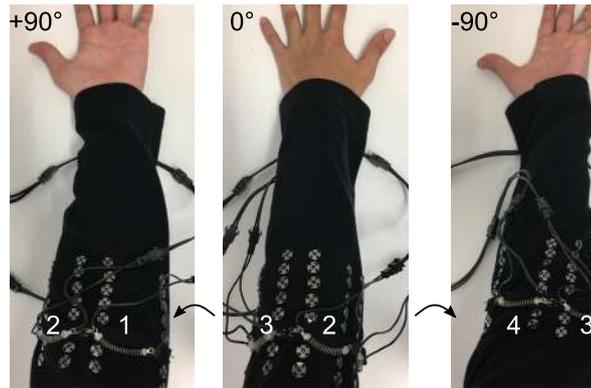


図 27: 圧力測定時の前腕

## 結果

図 28 に各バンド装着位置での 4 カ所の刺激提示位置で測定した圧力センサデータを示している。各位置の 3 つのグラフは 3 回の圧力測定でそれぞれ得られたデータで、グラフの線の色はアクチュエータに電力供給する際の PWM の値に従って変化している。前腕の上面に位置するアクチュエータは PWM 値の増加とともに加える圧力が大きくなった。このことから、PWM によってアクチュエータに供給する電力を制御することで、PWM 値に応じてアクチュエータの収縮量を制御し、アクチュエータの収縮に応じた強さの圧力を発生したことがわかる。腕の上面では、袖布が皮膚に接触していたため、圧力を容易に検出できた。対照的に、腕の下面では、袖布と皮膚の上下が逆になり、袖布が皮膚から離れているため、圧力センサ値はわずかな変化しかしなかった。上腕では、前腕と同様に上面の位置のセンサは下面のセンサよりも大きい圧力を測定した。前腕と上腕を比較すると、上腕の下面の位置での圧力は前腕の同じ位置の圧力よりも大きかった。これは、被験者の上腕と前腕の周径がそれぞれ 24.6 cm と 23.3 cm であり、上腕は前腕よりも太く、袖布との接触が容易であったためと考えられる。肘関節の広がりも上腕と前腕の袖布との接触に影響をした可能性がある。肩では、肩の頂点付近の位置 3 で測定された圧力が最大であり、位置 1 では圧力がほとんど検出されなかった。位置 1 は鎖骨下に位置し、鎖骨によって布と皮膚が離れていたためだと考えられる。

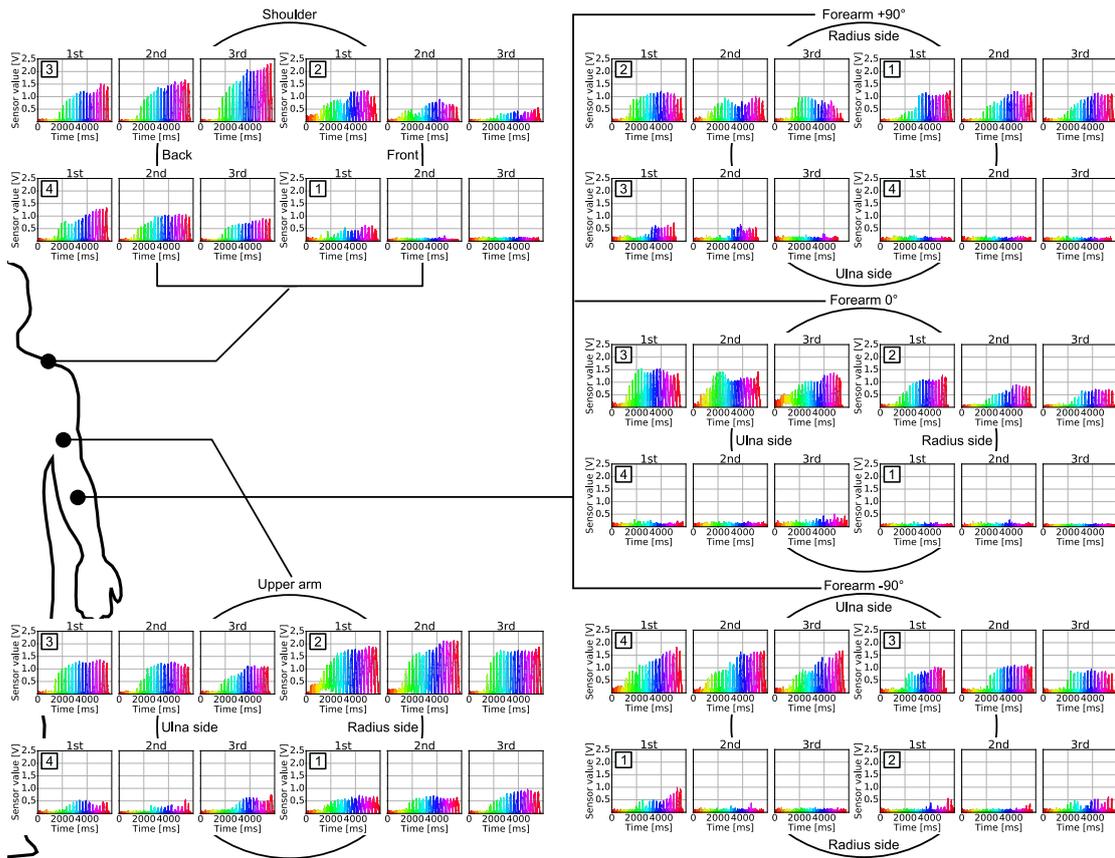


図 28: アクチュエータの収縮が皮膚に与える圧力グラフ

#### 4.5.2 絶対閾測定

提案手法では、各アクチュエータの収縮量に応じて刺激量を制御できる。この評価では、ユーザが知覚できる刺激の閾値を調査する。心理物理学では、生物が検出できる最低レベルの刺激を絶対閾と定義している。関連研究では、提案システムが手首に与える圧力の絶対閾を調査していた [49, 51]。本論文では、Squeezeback の評価方法を参考にし、プロトタイプシステムが与える刺激の絶対閾を調査する [49]。

#### 実験内容

まず、被験者に提案手法と実験内容について説明した。被験者は T シャツの上から長袖の T シャツを着用した。各被験者の腕の長さやアクチュエーターバンドの装着位置の周径、肩幅を測定し、アクチュエーターバンドの位置を調整した。図 29 (a) に実験の様子を示す。被験者は PC がある机の前の椅子に座り、肘を伸ばして左手を机の上に置き、実験を行った。Processing で作成した評価アプリケーションによって、各アク

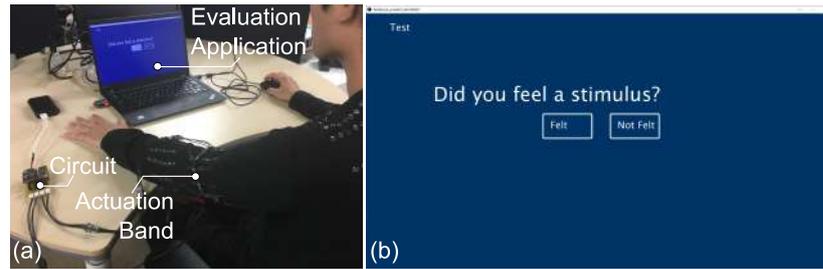


図 29: 絶対閾測定の様子 (a) 実験環境, (b)PC 画面上の Felt ボタンと Not Felt ボタン

チュエータの伸縮は制御され、アクチュエータの収縮開始から 4 秒後に図 29 (b) に示すように PC 画面に Felt と Not Felt の 2 つのボタンを表示した。図 28 から、アクチュエータの収縮完了まで約 2 秒かかるため、被験者に収縮完了から 2 秒間刺激を提示した。被験者は右手でマウスを使用し、バンドを見ずに 2 つのボタンの内、刺激を知覚できたときは Felt ボタンを、知覚できなかったときは Not Felt ボタンを選択した。ボタン選択後、アクチュエータは 10 秒間伸長し、再び収縮した。実験は PWM 値 178(255 の 70%) から開始し、参加者が Felt ボタンを 2 回連続して選択したとき PWM 値は前回の値の 0.7 倍となり、Not Felt ボタンを 2 回連続選択したときは前回の値の 1.25 倍となった。4.5.1 節の測定結果から、圧力が位置 1 ~ 4 の刺激提示位置によって異なるが、前腕の位置 1 と 4 ではほとんど変化がないため、すべての刺激提示位置で PWM 値は固定の倍率で変化させた。Felt ボタンと Not Felt ボタンの選択の切替が 7 回起こった場合、もしくは Not Felt ボタンを 4 回連続選択した場合に実験が終了した。アクチュエーターバンドの装着位置と刺激提示位置の実験順はランダムに行った。

被験者は 22 から 28 歳の右利きの男性 10 名である。アクチュエーターバンドの装着位置の前腕と上腕の周径はそれぞれ平均 23.1 cm (標準偏差 2.05 cm) と 23.1 cm (標準偏差 1.74 cm) であった。

## 結果

図 30 に各被験者が知覚できた最後 5 回の刺激の PWM 値のヒストグラムを示している。実験終了までの Felt ボタンの選択が 5 回未満の場合は、欠損値を PWM の最大値 255 で補完し、絶対閾として全被験者の知覚した最後 5 回刺激の PWM 値から平均 PWM 値を計算し、図 30 中の赤線で示している。各装着位置での絶対閾を表 2 に、刺激の知覚回数が 5 回未満の被験者数を表 3 に示している。前腕と上腕は似た結果とな

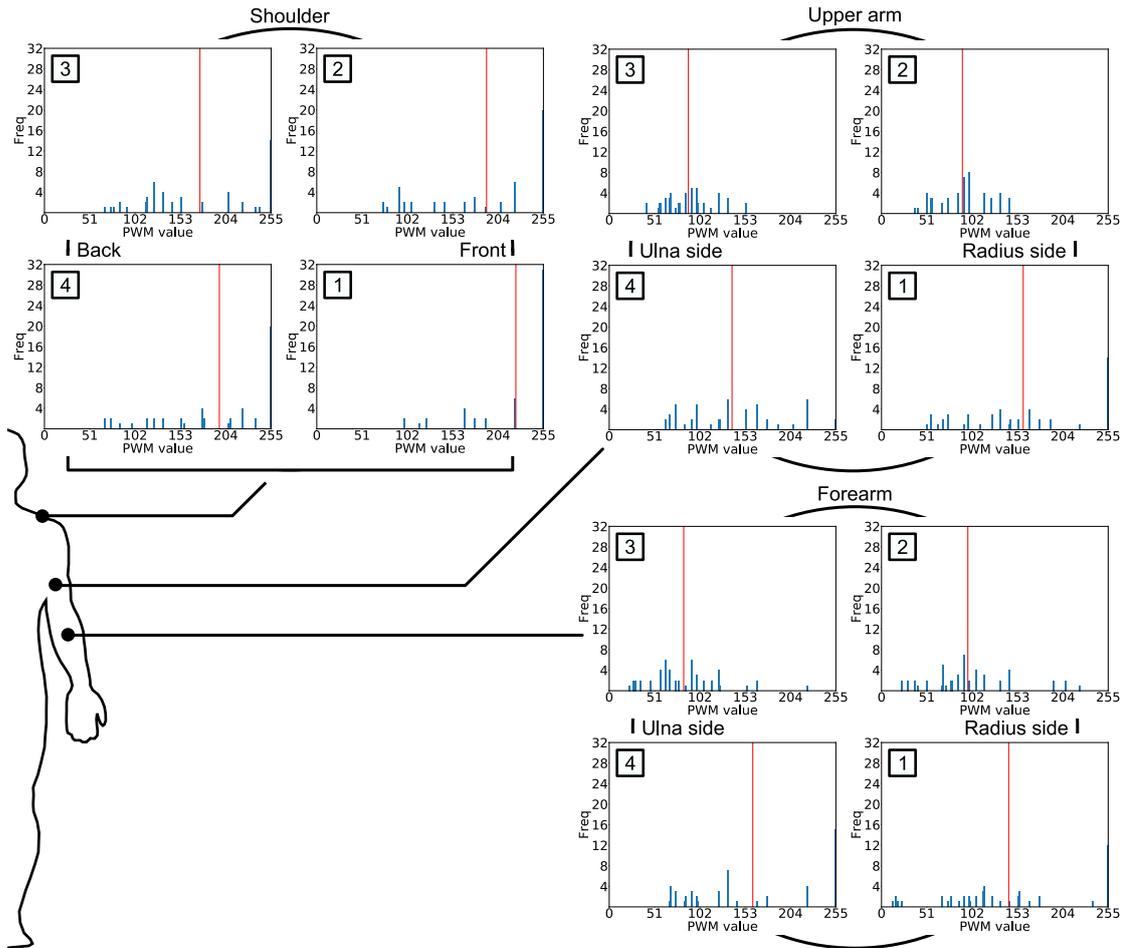


図 30: 被験者が知覚できた最後 5 回の刺激の PWM 値ヒストグラム

表 2: 各位置の刺激を知覚できた平均 PWM 値

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
肩	224	191	174	197
上腕	159	91	89	138
前腕	143	97	83	162

り、前腕と上腕の下面 (位置 1 と 4) よりも上面 (位置 2 と 3) では絶対閾が小さい。4.5.1 章の圧力測定結果とともに、圧力の増加を検出できた上面の位置では絶対閾が小さく、全被験者が刺激を 5 回以上知覚できた。しかし、被験者の中には前腕と上腕の下面の位置でも低い PWM 値の刺激を検出できた人もいた。肩では、すべての刺激提示位置で前腕と上腕よりも絶対閾が大きい。刺激知覚が 5 回未満の被験者は、肩のすべての刺激提示位置で確認でき、位置 1 で最も多く、特に 2 人の被験者は肩では全く刺激を知覚できなかった。肩頂点部付近の位置 3 での絶対閾が肩の中では最も低い。

表 3: 各位置の刺激知覚回数が5回未満の被験者数

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
肩	7	4	3	4
上腕	3	0	0	1
前腕	2	0	0	3

アクチュエーターバンドの装着位置と刺激提示位置を独立変数とした2要因分散分析の結果、バンド装着位置と刺激提示位置の間の相互作用が有意であった ( $F_{(6,54)} = 5.66, p < .01$ )。Fisherの最小有意差法による多重比較の結果、被験者が低いPWM値で刺激を知覚できる刺激提示位置の順は、前腕と肩では位置3 < 位置2 < 位置1 = 位置4、上腕では位置2 = 位置3 < 位置1 = 位置4となった。また各刺激提示位置で低いPWM値で刺激を知覚できたアクチュエーターバンドの装着位置の順は、位置1では前腕 < 上腕 < 肩、位置2, 3, 4では前腕 = 上腕 < 肩となった。

#### 4.5.3 収縮パターン認識評価

フィードバックシステムには、ユーザに様々な情報を伝えるために、ユーザが区別できる刺激の粒度が求められる。形状記憶合金を用いた触覚フィードバックシステムでは、ユーザの皮膚に与える圧力の強さによって刺激の粒度を確保している [50, 51]。本論文で使用するBMXはHapticClenchで使われている形状記憶合金よりもはるかに短く、生成する圧力も弱い [51]。提案手法では、複数のアクチュエータを用いることで収縮するアクチュエータの数と位置を制御して様々な収縮パターンの刺激を提示できるため、アクチュエータの収縮パターンによって刺激の粒度を得る。ユーザが知覚できる刺激数を明らかにするために、プロトタイプシステムによる収縮パターンの認識評価を行う。

#### 実験内容

被験者はTシャツの上から長袖のTシャツを着用し、PCがある机の前の椅子に座った。各被験者の腕の長さ、アクチュエーターバンドの装着位置の周径、肩幅を測定し、アクチュエーターバンドの位置を調整した。被験者は実験内容についての説明を受け、左手を伸ばして手のひらを机の上に置いて実験を開始した。まず、アクチュエータが収縮し、収縮パターンを生成した。収縮開始と同時に、PC画面上に各収縮パターンを表すアイコンを表示した。収縮開始から4秒後にPC画面にアイコンを選択する指示を

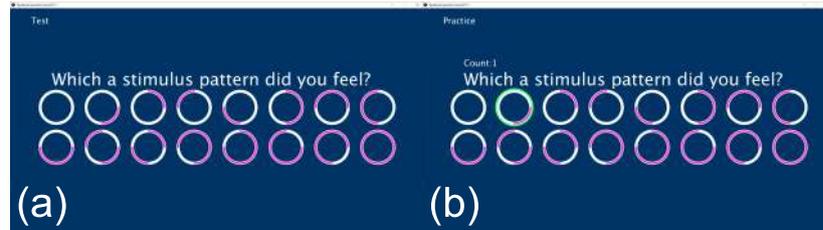


図 31: 収縮パターンアイコン (a) 実験中 (b) 練習中

表示し、被験者は指示を確認すると、右手のマウスを用いて知覚した収縮パターンに対応するアイコンを選択した。アイコン選択後、アクチュエータは 10 秒間伸長し、次の収縮パターンを生成するために収縮を開始した。4.5.2 節の実験結果から、肩の絶対閾を考慮して 229 の PWM 値 (255 の 90%) でアクチュエータを収縮させた。4 つのアクチュエータの収縮パターンは、すべてのアクチュエータが伸長している場合を除いて 15 パターンあり、各バンド装着位置につき 15 パターンの収縮パターンは 3 回ずつランダムに生成し、被験者は計 135 回刺激を提示された。図 31 (a) に PC 画面上に表示されるアイコンを示す。アイコンは、全アクチュエータが収縮していない刺激を提示しないパターンを含めて 16 個のアイコンで構成された。白とピンクは、それぞれアクチュエータの伸張と収縮を表していた。各アクチュエータバンド装着位置での実験の前に、収縮パターンと評価手順に慣れるために練習を行った。練習では、各収縮パターンがランダムに 1 回ずつ提示され、アイコン選択指示は収縮開始から 5 秒後に PC 画面に表示された。練習中は生成された収縮パターンに対応するアイコンを視覚的に明示した (図 31 (b))。

被験者は 23 から 28 歳の右利きの男性 7 名である。前腕と上腕のバンド装着位置の周径の平均値はそれぞれ 23.58 cm (標準偏差 2.31 cm) と 23.88 cm (標準偏差 1.76 cm) であった。全被験者が 4.5.2 章の実験を終えていた。

## 結果

図 32 にアクチュエータが生成した各収縮パターンを参加者が認識した回数を示す混合行列を示している。全被験者が提示された収縮パターンに対応した正しいアイコンの合計選択回数から認識率を計算した。アクチュエータバンド装着位置の中で、前腕での認識率が最も高いが、約 28.6% と低かった。被験者が正しく認識した回数が最も多い収縮パターンはパターン 1, 3, 4 であった。被験者の中には、パターン 1, 2, 3,

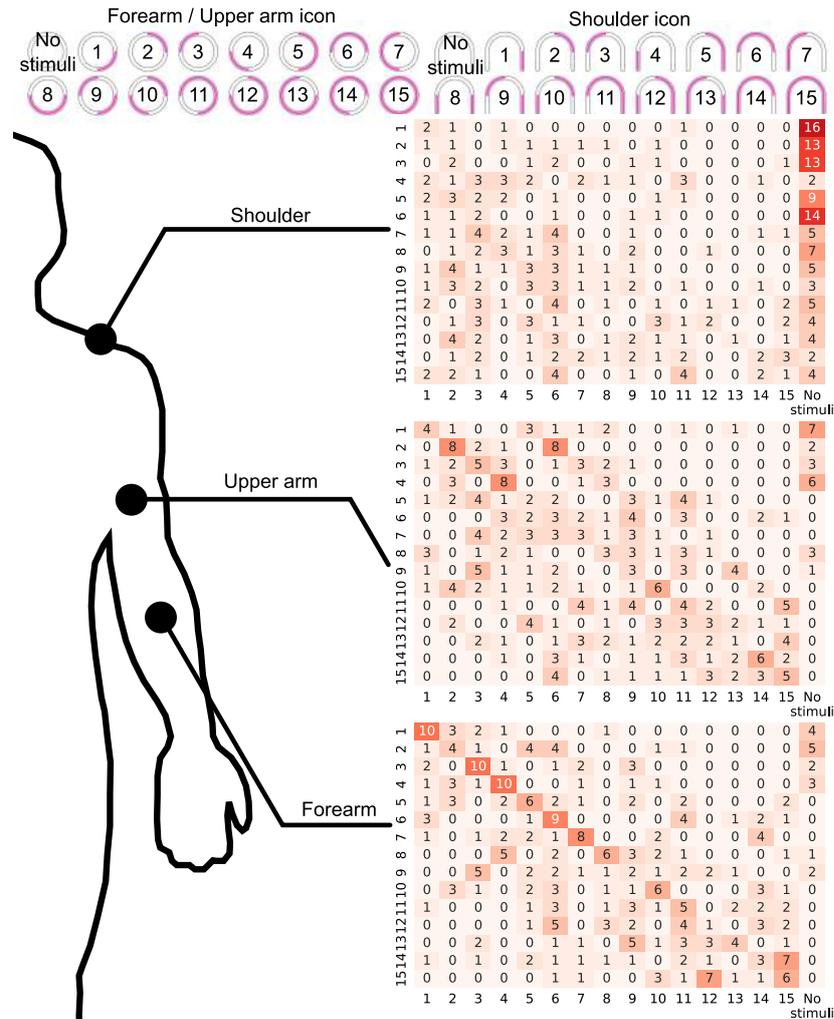


図 32: 収縮パターンの認識混合行列

4, 8, 9を刺激なしと認識した人もいた。パターン1～8はパターン1～10, パターン15はパターン10～14として認識される傾向があり, パターン9～14の誤認識は広範囲の収縮パターンで起こった。位置3と4のアクチュエータの収縮を含むパターンは, 位置1と2のアクチュエータの収縮を含むパターンよりも高い認識率であった。上腕は前腕よりも低い20.3%の認識率であった。パターン2と4は最も正しく認識された回数が多かった。パターン1～4はパターン1～8, パターン15はパターン5～14と誤認識される傾向があり, パターン5～10は他の収縮パターンよりも誤認識の範囲が広がった。肩はバンド装着位置の中で4.44%の最低精度であった。収縮パターンが刺激なしと認識された回数が他の装着位置よりも多く, 特にパターン1, 2, 3, 6が刺激なしと誤認されることが多かった。これらのことから, 15の収縮パターンは刺激提示に実

用的ではないと考えられる。

#### 4.5.4 抽出した収縮パターン認識評価

4.5.3 節の結果から、正しい認識回数が多く、連続的な増減を示せるパターン 3, 6, 11, 15 の 4 パターンを提示刺激セットとして抽出し、提案手法の利用シーンを想定して、着席と歩行の 2 つの刺激提示環境での 4 パターンの収縮パターンの認識評価を行う。歩行実験のために、iPad 上で実行する評価アプリケーションを Swift を用いて実装し、回路の無線通信モジュールを BLE Nano に変更した。

#### 実験内容

4.5.3 節と同様に被験者は T シャツの上から長袖の T シャツを着用して実験を行う。各被験者の腕の長さとアクチュエーターバンドの装着位置の周径、肩幅を測定し、アクチュエーターバンドの位置を調整した。バンド装着位置は 4.5.3 節の装着位置と同じである。被験者に実験内容について説明し、着席と歩行の姿勢について指示をして実験を開始した。着席時は左手を伸ばして手のひらを机の上に置き、歩行時はトレッドミルを用いて歩行速度 4 km/h で歩行して実験を行った。実験は着席状態での各装着位置でのパターン認識実験から始め、その後、歩行状態での認識実験を行った。認識実験では、まず、アクチュエータが収縮し、収縮パターンを生成した。収縮開始と同時に各収縮パターンを表すアイコン、収縮開始の 4 秒後に指示を iPad 画面上に表示した。被験者は指示を確認すると、知覚した収縮パターンに対応するアイコンを右手で選択し、選択後にアクチュエータは 10 秒間伸長し、次の収縮パターンを生成するために収縮を開始した。刺激を知覚しやすくするために、PWM 値は 255 としてアクチュエータを収縮させた。各バンド装着位置につき各収縮パターンは 5 回ずつランダムに生成され、被験者は計 60 回刺激を提示された。iPad 上のアイコンは、全アクチュエータが収縮していない刺激を提示しないパターンを含めて 5 個のアイコンが表示された。各装着位置での実験の前に、収縮パターンと評価手順に慣れるために練習を行った。練習では、各収縮パターンがランダムに 3 回ずつ提示され、アイコン選択指示は収縮開始から 5 秒後に表示された。練習中は生成された収縮パターンに対応するアイコンを視覚的に明示した。被験者は 4.5.3 節の実験を終えた 28 歳の男性 1 名であった。

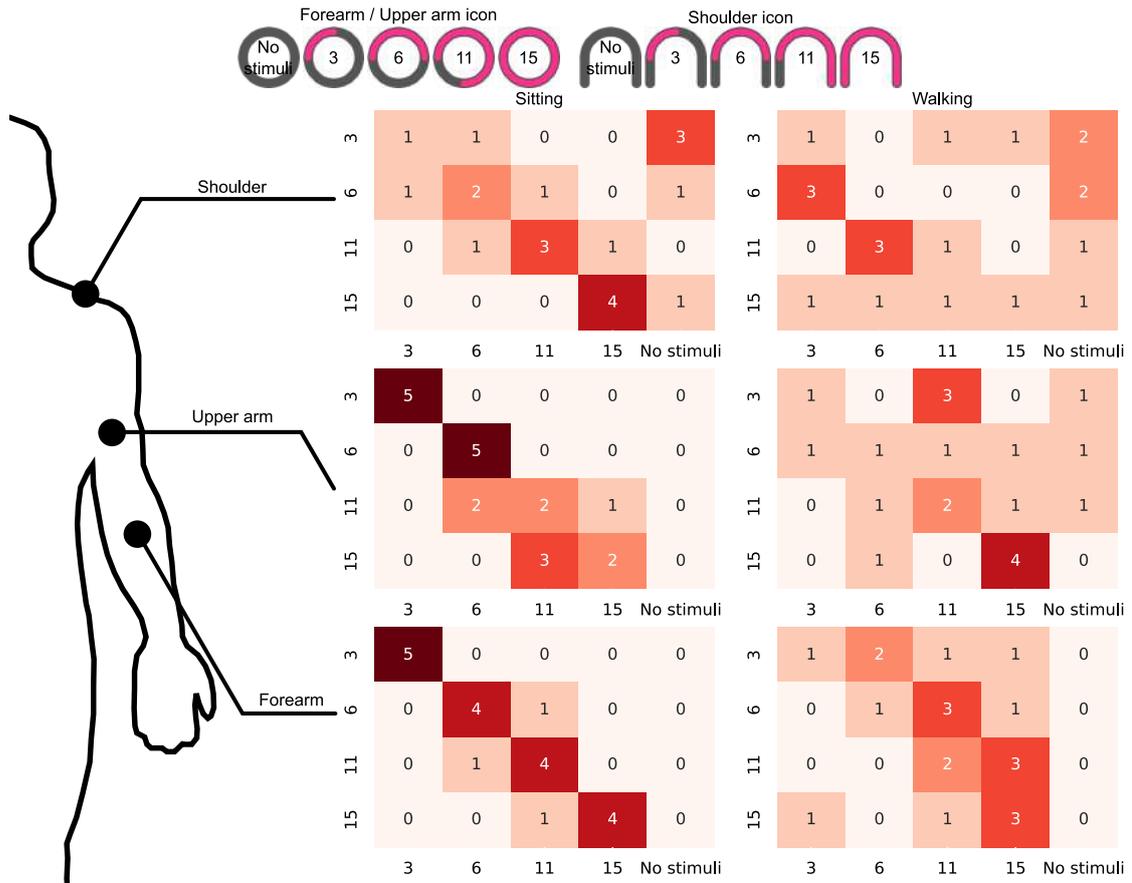


図 33: 収縮するアクチュエータ数に応じた収縮グループの認識混合行列

表 4: 着席時と歩行時の収縮パターンの認識精度

Recognition rate [%]		
Actuator band position	Sitting	Walking
Shoulder	50	15
Upper arm	70	40
Forearm	85	35

## 結果

図 33 に各収縮パターンの認識結果の混合行列を示す。被験者が正しい収縮パターンを認識した回数から認識率を計算し、各装着位置での着席時と歩行時の認識率を表 4 に示す。4.5.3 節の結果と同様に、前腕での認識率が最も高く、肩での認識率が最も低かった。さらに 4.5.3 節の結果より、着席時の 4 収縮パターンの認識率は向上し、特に前腕では 85% の認識率となった。15 パターンの刺激は識別が困難であったが、刺激を 4 パ

ターンに絞ることで精度を向上できた。しかし、歩行時では、最も高い認識率が上腕の40%と低かった。歩行による振動や被験者の腕の振りによって袖布と皮膚との接触が断続的に変化して刺激を知覚しづらいと考えられる。歩行時の前腕での収縮パターンの認識では、収縮しているアクチュエータ数が1個多い収縮パターンと誤認識する傾向が見られた。一方、歩行時の肩では、パターン6と11をそれぞれ収縮しているアクチュエータ数が1個少ないパターン3と6と誤認識する回数が多かった。

## 4.6 議論

### 4.6.1 圧力

提案手法は布が皮膚に接触している位置では、皮膚に圧力を与えることができるが、布が皮膚に接触していない位置では圧力を与えることが困難である。4.5.1節と4.5.2節の評価結果と比較すると、被験者が低いPWM値で刺激を知覚できた位置と圧力センサが大きな圧力を測定した位置とが一致した。皮膚にかかる圧力はフィードバックシステムが提示する刺激の知覚に重要であると考えられる。前腕の位置1と4では、圧力センサ値の変化が小さかったが、被験者はパターン1と4の収縮パターンを正しく認識できた。このことから、皮膚と布の間に圧力以外の他の力、例えば布と皮膚の間に滑り摩擦が働き、アクチュエータの収縮の知覚に役立つと考えられる。

皮膚にかかる圧力は袖の中のユーザの腕のサイズとロール角度に応じて変化する。腕のロール角に応じて変化する圧力量は、ユーザが腕を回転させ連続的な刺激を知覚する別のフィードバック方法の可能性を示している。ユーザは、通知として収縮による刺激を受けてとると、腕を回転させ、て変化する圧力刺激から情報を取得する。回転方向はアプリケーションによって異なり、回転量はユーザに提示する情報量に比例する。1回の通知で同時に2つのアプリケーションの情報を伝えることができると考えられる。

### 4.6.2 フィードバック位置

前腕では、絶対閾が最小であり、15パターンの収縮パターンの認識率が最高であり、収縮アクチュエータ数が1つのパターン1, 3, 4の認識率は他の収縮パターンよりも高い。上腕では、前腕と同等の絶対閾であったが、認識率は前腕よりも低い。肩は前腕と上腕とは異なる結果となり、絶対閾と収縮パターン認識率がバンド装着位置の中

でも最も低い。収縮パターンを4パターンに絞ると、アクチュエーターバンドの各装着位置における着席時と歩行時の認識率は、前腕ではそれぞれ85%と35%、上腕では70%と40%、肩では50%と15%となった。

これらの結果から、前腕と上腕は同程度の刺激知覚能力を有しており、評価した3つの身体部位の中では提案フィードバック手法を提示位置として適する。肩は刺激の知覚性能が最も低く、現在のフィードバック手法には適していない。しかし、肩は腕とは異なり、ユーザの行動によってアクチュエータの身体に対する位置が移動しづらいと考えられるが、歩行時の収縮パターンの認識性能は腕よりも低い。

### 4.6.3 粒度

アクチュエータに使用されたBMXの長さは3.0 cmと短く、ユーザが識別できる圧力の差を生成できないと考え、識別できる刺激を生成するために圧力の強さではなく、アクチュエーターバンドの収縮パターンを利用する。4つのアクチュエータによって15個の収縮パターンを生成できるが、ユーザの認識率は前腕でも30%以下である。そのため、識別可能な刺激を生成するために15個の収縮パターンからユーザの認識率が高い収縮パターン3, 6, 11, 15の4パターンを抽出して、着席と歩行の2つの刺激提示環境で認識評価を行った。その結果、着席時の前腕での認識率が85%まで向上した。しかし、歩行時の認識精度は40%以下となった。歩行時でも知覚できる刺激を提示するために、現在のプロトタイプシステムより大きく布を変形させる必要がある。そのため、バンド上のアクチュエータの数を減らし、アクチュエータの変動幅を大きくすることが考えている。また、バンド上のアクチュエータの数を減らすことでシステムがユーザに識別可能な様々な強さの圧力を生成の可能性もある。

また、収縮するアクチュエータの数と位置による刺激の認識は精度が低いいため、時間的に変化する刺激の検討も行う。複数のアクチュエータによる刺激提示を行うフィードバックシステムでは、時間的に変化する刺激のパターンをフィードバックに利用している。PokeRingとThermalBraceletでは、指や手首の周囲を移動する刺激の移動開始位置や移動方向、刺激数などの認識を評価している[47, 54]。提案手法も4つのアクチュエータによる刺激の移動を提示できるため、時間的に変化する刺激をフィードバックに利用できる。しかし、先行研究と異なり、デバイスが皮膚に密着していないので、ユーザの行動によってアクチュエータの腕に対する位置が移動するため、刺激の移動開始位置などの認識は困難だと想定している。しかし、刺激の移動方向や刺激数など

はアクチュエータの位置が移動しても認識できると考えている。

最後に、圧力の強さによる識別可能な刺激の提示方法も考慮する必要がある。バンド上のアクチュエータの数を減らし、BMXの長さを伸ばすことでシステムがユーザに識別可能な様々な強さの圧力を生成できると考えている。上記の手法を実現するためのデバイスを実装し、圧力の強さによるフィードバック方法の性能を評価し、収縮パターンと比較する必要がある。

#### 4.6.4 使用例

提案手法を用いた通知の例を紹介する。まず、着信電話または電子メールメッセージの通知について説明する。電話や電子メールを受信すると、提案されたシステムは応答の緊急度に応じてた収縮パターンによって衣服を変形させる。ユーザは通知を受け取り、早急な返信の必要性を認識できる。さらに、複数のアクチュエーターバンドを用いることで、緊急度だけでなく、現在の未応答メッセージ数を伝える。

次の通知例は目的地へのナビゲーションである。ユーザが地図アプリケーションを使用して目的地に行くとき、提案手法によって、目的地に近づくにつれて収縮するアクチュエータ数を増加させて目的地までの距離を伝える。ユーザは目的地までの距離が認識でき、周囲を検索したり、地図アプリケーションを見直す手間を省ける。さらに、目的地だけでなくユーザが待ち合わせをしている人物との距離に応じて同じフィードバックを行い、待ち合わせ支援にもなる。また、パターン5, 6, 7, 8の収縮パターンを使用して方向を示すことで、目的地までのユーザの進行方向を提示することもできる。

最後は、予定管理である。提案手法によって、次の予定までの時間に応じた布の変形によって、ユーザに残り時間を通知する。次の予定までの時間の減少に伴い、収縮するアクチュエータ数が増え、ユーザへ提示される刺激量が増える。ユーザに十分な時間が残っている場合は、提案手法が提示する刺激は微弱であり、ユーザの作業を中断しない。次の予定の時間が迫ってくると、刺激が力強くなり、ユーザは作業を中断して次の予定に向かう。会議やプレゼンテーション中では、ユーザに終了時間を同様の方法で伝えることができる。

## 4.7 むすび

本論文では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法を提案した。形状記憶合金と圧縮バネで構成されたアクチュエータを用いて、その収縮により衣服を変形させ、着用者の皮膚に触覚刺激を提示する。プロトタイプシステムを実装し、4つの評価実験を実施した。1つ目の評価実験では、各アクチュエータバンドの装着位置の4つアクチュエータ位置のアクチュエータの収縮によって皮膚にかかる圧力を測定した。アクチュエータの収縮量を制御しているPWMの値に応じて圧力が増加することがわかった。しかし、前腕の下面に位置するアクチュエータの収縮では、皮膚にかかる圧力はほとんど変化しなかった。2つ目の評価実験では、各アクチュエータの収縮による刺激の絶対閾を評価し、前腕と上腕の上面では、絶対閾のPWM値は約90であった。3つ目の評価実験では、4つのアクチュエータの15パターンの収縮パターンの認識を評価した。評価の結果、15パターンの認識では、前腕での認識率が最も高かったが28%と低かった。そのため、この評価結果から認識しやすい4つの収縮パターンを抽出し、4つ目の評価実験を行った。4つ目の評価実験では、着席と歩行の2つのフィードバック利用シーンを想定して、それぞれの環境において4パターンの収縮パターンの認識を評価した。その結果、着席時では、前腕の認識率が最も高く80%まで向上したが、歩行時での最高の認識率は上腕の40%であった。



## 5 シート型ストレッチひずみセンサを用いた呼吸計測手法

### 5.1 まえがき

ウェアラブル技術の発達により日常生活でさまざまなデータを継続的に監視することができる。特に心拍数、血圧、体温などの重要なデータを継続的に監視することは、個人の健康管理や病気の早期発見に役立つ。これらの生体信号の中で呼吸は病気の予測因子、ストレスの強さの指標、アスリートのトレーニング中の重要な測定として使用されている。Fieselmann らの研究によると、毎分 27 回以上の呼吸の呼吸数が患者の心肺停止を予測できると報告されている [60]。Cretikos らは呼吸数が集中治療室への入院などの深刻な状況を予測する可能性を示唆し、呼吸数を記録しなければならないことを説明した [61]。呼吸とストレスの関係から、Tipton らはストレス要因が激しくなると呼吸数が増加することを発見した [62]。アスリートのトレーニングでは、Nicolo らが筋肉疲労、グリコーゲン枯渇、熱暴露、低酸素症と呼吸数との関係を報告し、呼吸数のウェアラブルモニタリングの重要性を示唆した [63]。このように呼吸モニタリングは私たちの健康管理に役立ち、必要とされている。測定要件とユーザーのニーズに応じて特にウェアラブルセンサを用いて、さまざまなセンシング技術による多くの呼吸測定方法が提案されている。

本論文では、シート状の伸縮性のあるひずみセンサを用いた呼吸計測手法を提案する。提案手法は伸縮に応じて静電容量が変化するひずみセンサで構成されるバンド型デバイスを用いて、呼吸による胸部容積の変化から呼吸を測定する。さらに本論文の貢献は、提案デバイスの性能評価のために、市販のウェアラブルデバイスと様々な歩行速度での歩行時呼吸数の認識性能を比較したことである。直立時と 2 km/h, 4 km/h, および 6 km/h の歩行速度での歩行中の提案システムと市販のウェアラブルデバイスで同時に呼吸を測定して認識性能を比較した。本章の構成を以下に述べる。5.2 節で関連研究を紹介し、5.3 節で提案手法について述べる。5.4 節で評価実験について述べ、最後に 5.5 節で本章をまとめる。

## 5.2 関連研究

本節では設置型の呼吸計測に関する研究および装着型の呼吸計測に関する研究、衣服を利用した状況認識手法に関する研究について述べる。

### 5.2.1 設置型の呼吸計測手法

呼吸計測にはさまざまな手法が提案されており、センサーが身体に接触しない呼吸の非接触測定法が提案されている。加藤らは、呼吸運動時の胸部と腹部の皮膚挙動特性について調査した [65]。このシステムでは、被験者の身体にマーカを装着し、赤外線カメラを 8 台用いることで、呼吸運動時の皮膚挙動特性は呼吸時の胸郭の生理的運動を反映させることがわかった。設置型の呼吸計測機器は主に、睡眠時無呼吸症候群 (Sleep Apnea Syndrome) や乳幼児突然死症候群 (Sudden Infant Death Syndrome) といった睡眠障害のモニタリングを目的としているものが多い。中井らは、動画像処理による呼吸モニタリングシステムを提案している [66]。このシステムは被験者の就寝時の映像を動画像処理することで、無拘束に計測できるとともに、就寝状態を自動判定できるシステムとなっている。青木らは、近赤外輝点マトリックス照影による非接触・無拘束修新車呼吸監視システムを提案している [67]。このシステムは、ベッドの上部に FG 輝点投影器および CCD カメラを設置し、輝点をカメラで追跡することで被験者の体動を計測できるシステムである。これにより、呼吸によるわずかな寝具の変動を正しく捉えることができ、就寝者の種民の実態が把握できる。Patwari らは、無線ネットワークの受信信号強度 (RSS) の変化によって呼吸数の推定システムを実装した [68]。このシステムは無線通信デバイスを結ぶ直線付近に立っている人の吸入と呼気による RSS の変化を検出して、呼吸測定を行う。Al-Naji らは、超音波レーダを用いた呼吸モニタリングシステムを実装した [69]。このシステムは超音波パルスの送受信の時間間隔から呼吸リズムによる胸部の動きをトラッキングする。これらの方法はユーザの体にデバイスを取り付けないため、ユーザの動作を制限しない。しかし、使用環境が制限され、例えば屋外での活動中に呼吸を測定することは困難である。

### 5.2.2 装着型の呼吸計測手法

身体に装着されたウェアラブルセンサーによっていつでもどこでも呼吸を測定できる。スマートウォッチが普及し、スマートウォッチの加速度とジャイロデータを使用し

た呼吸モニタリングの方法が提案されている。Haescherらは、加速度計によって得られた心電データから心拍数、呼吸数、および筋肉の微振動を追跡する SeismoTracker を提案し、このシステムを2つのスマートウォッチに実装した [70]。Haoらは、瞑想中のリアルタイムの呼吸センシングのためのスマートウォッチベースシステムである MindfulWatch を提案し、呼吸と姿勢の両方の変化を計測する新しい自己適応モデルを開発した [71]。このシステムは加速度と角速度センサを用いて呼吸によって引き起こされる手首の微妙な回転を検出し、呼吸を推定する。Liaqatらは、機械学習と畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を用いて、スマートウォッチの加速度とジャイロデータから呼吸数を計測する2段階システムを提案した [72]。このシステムは不正確な呼吸数となるデータを排除するフィルターとしてランダムフォレストモデルを使用し、データから呼吸数を抽出するために CNN モデルを使用しする。

センサーが組み込まれた衣服や他のウェアラブルデバイスを使用した呼吸モニタリングの方法も提案されている。MagIC System は、胸部の2つの電極が編み込まれたベストを用いて、胸部容積の変化から呼吸数を測定するシステムである [74]。野添らは、体幹前屈姿勢が肺気量位と呼吸運動に与える影響を調査した [73]。このシステムでは、呼気ガス分析器により肺気量位を計測している。CoRSA は、スポーツ活動における心肺の評価システムである [75]。このシステムは、空気圧センサーを内蔵したマスク装置を用いて肺活量を計測する。TIARA は、閉塞性睡眠時無呼吸を検出するために脳波、血中酸素飽和度、心拍数、皮膚温度および頭の動きを記録するウェアラブルデバイスである [76]。Hernandezらは、Google Glass の加速度とジャイロスセンサ、カメラを用いて脈波と呼吸波を抽出する方法を提案した [77]。小玉らは、鼻腔内に温度センサを挿入し、呼気と吸気による温度データの変化から呼吸を認識する手法を提案した [78]。小玉らは温度センサを装着を容易にするために、眼鏡のブリッジ部分から温度センサを配線したデバイスを実装した。玉木らは、コイルを挿入したエラスティックバンドを胸部と腹部に巻き、胸部・腹部の拡張および縮小に伴う電気抵抗の差から呼吸による換気量を計測するシステムを提案した [79]。小室らは、胸部と腹部に水銀ストレインゲージを装着し、周径の変化から呼吸数と換気量の関係性について調査した [80]。Gullapalli は、心電図と胸部バンドデバイスで測定された呼吸信号から薬物による渴望と幸福感の程度と薬物探索行動を予測するシステムを実装した [81]。Xinらは、ポリフッ化ビニリデンフィルムで製造された圧力センサーの電圧または電荷出力をフィルムをマルチ

アーチ構造にすることにより改善する方法を開発し、呼吸計測用のベルトシステムを実装した [82].

Carlo らの研究では、呼吸測定方法を記録対象に応じて、呼吸気流、音、気温、湿度、空気成分、胸壁の動き、心臓活動の変調の 7 手法に分類している [83]. この研究によると、胸部の動きによる呼吸計測手法には大きく 3 つの手法に分類され、その中のひとつがひずみセンサを用いた手法である。しかし、センサの伸縮により静電容量が変化するひずみセンサを用いた手法は提案されていない。さらに、胸部の動きを捉えるベルト装置を使用する方法は他の方法よりも使用制限が少ないことが示唆されている。

### 5.2.3 衣服を用いた状況認識手法

センサを統合した衣服によって、呼吸の計測だけでなく、他の生体データやユーザの行動データを計測し、ユーザの行動や状況を認識する手法も提案されている。1998 年には、ユーザの行動データを取得するセンサを統合した衣服が登場している。Marri と Picard は、指揮者の動作の音楽的表現特性を解析するために、指揮者の動作を取得するジャケットを開発した [19]. ジャケットは演奏中の指揮者の動きを妨げないよう、動きの制約や不快感を与えないために設計され、ジャケットには筋電センサ、心拍センサ、加速度角速度センサが搭載されていた。SimpleSkin は、静電容量センサ、抵抗センサ、バイオインピーダンスセンサが統合されたシャツである [20]. 心拍データのモニタリングと心拍データからストレスを計測することができる。Daddy らは衣服に統合された心拍モニタリングシステムを開発した [21]. Daddy らの開発したシステムは伸縮性のある測定モジュールからなり、衣服上に防水シートに覆われて統合されることで洗濯にも耐えることができる。Jeon らは、胎動を認識する衣服を開発した [22]. 腹部に圧力センサを配し、LED のインジケータによって胎動を表示することで母親だけでなく父親にも胎動を視覚的に伝えることができる。椿らは、ユーザの行動による腕や腹部などの身体部の周径変化を導電性布の伸縮を介して計測し、ユーザの行動を認識するシステムを提案した [?]. 椿らは、導電性布は収縮と伸長に応じて電気抵抗を変化させる導電性布を衣服に縫いつけてデバイスを実装した。人の身体の大部分を常に覆っている衣服によって、ユーザの動作を制限せず、不快感を与えずにユーザのデータの常時測定ができ、ユーザの行動に加えて体内の情報も取得することができる。

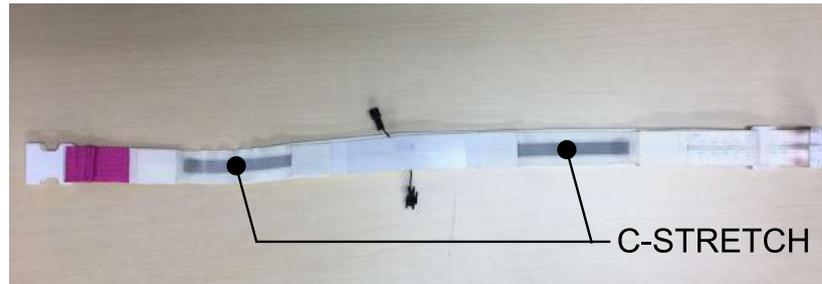


図 34: バンド型デバイス

### 5.3 提案手法

本研究では、伸縮によって静電容量が変化するひずみセンサから構成されるバンド型デバイスを用いた呼吸計測手法を提案する。

#### 5.3.1 バンド型デバイス

図 34 にバンド型デバイスを示す。バンド型デバイスには、バンドー化学株式会社製の C-STRETCH をひずみセンサとして使用する [84]。C-STRETCH は 3 枚のエラストマシートが 2 枚のカーボンナノチューブ膜を挟み込んだ構造のひずみセンサである [85]。カーボンナノチューブが電極となり、2 枚のカーボンナノチューブが平行平板電極を形成してセンサの伸縮に応じて静電容量が変化する。C-STRETCH は 0 ～ 5 V の範囲の電圧を出力し、出力電圧は伸長するにつれて増加し、収縮すると減少する。バンド型デバイスは 2 つのひずみセンサで構成され、ユーザごとにデバイスの長さを調整するための伸縮性のないベルト部分がある。胸部または腹部にデバイスを装着し、ひずみセンサは体の側面に配置する。

#### 5.3.2 認識アルゴリズム

図 35 に認識フローを示す最初に、認識システムは現在と以前のセンサ値の差分を計算し、差分値の正負を判断する。差分値が正の場合、認識システムは呼吸状態を吸気として認識し、逆に負の場合は呼気として認識する。吸気を認識すると、認識システムは差分値が負に反転するまで呼気の認識結果を維持する。差分値が負に反転すると、認識システムは一定間隔 (時定数) 内の符号反転時のセンサ値よりも大きいセンサ値を探索し、より大きなセンサ値を検出した場合は再び差分値の符号が反転するまで呼吸状態を吸気として維持する。検出できなかった場合は、認識システムは呼吸状態の認

識結果を吸気から呼気に変更する。呼気の認識時も認識システムは吸気の認識時とほぼ同じフローを実行する。違いは差分値の符号反転時のセンサ値よりも小さいセンサ値を探索することである。

最後の  $n$  サイクル ( $n = 3$ ) から平均呼吸サイクルを計算し、平均サイクルの半分を時定数として使用する。時定数は認識された呼吸状態が呼気と吸気の間で反転するたびに更新される。時定数の初期値は 1 秒、上限値と下限値をそれぞれ 0.7 秒と 1.3 秒とした。

通常の呼吸の場合、システムは上記の手順で呼吸数を測定できるが、呼吸には一時的な無呼吸などの呼吸停止も発生する場合がある。呼吸停止中の呼吸の誤認識を防ぐためにセンサデータの極大値と極小値にしきい値を設定する。認識システムは時定数間隔内のセンサーデータから極値を暫定的に計算し、呼吸状態を認識し、極大値がしきい値を超えるか、極小値がしきい値を下回ると呼吸状態の認識結果を維持し、そうでない場合は反転させる。極値の各しきい値は最後の  $n$  個のセンサーデータの平均振幅に  $p$  倍したものであり ( $n = 3$ ,  $p = 0.4$ )、時定数と同じように更新する。

## 5.4 評価実験

本研究では、提案システムの認識性能を評価し、呼吸測定を行う市販のウェアラブルデバイスの性能と比較する。被験者はベルト型デバイスとその他のウェアラブルデバイスを着用して同時に使用し、呼吸数を測定した。

### 装置

表 5 に比較した市販のウェアラブルデバイスを示す。これらのデバイスは呼吸を計測でき、呼吸計測技術は Carlo らによる研究に基づいて分類した。HEXOSKIN は、Carre Technology 社が製造する衣服型のデバイスで、心臓の活動、呼吸、および歩行活動を測定する。胸部と腹部の呼吸測定用のセンサを内蔵し、呼吸数と換気量を測定できる。37 Degree Bracelet は、Shanghai 37 Degree Technology 社が製造する手首装着型デバイスで、血圧や心拍数などの生体信号を測定する。Jawbone UP3 も手首装着型デバイスで、Aliphcom DBA Jawbone 社が製造した。加速度、体温、心拍数などを測定するセンサを搭載し、ユーザーの運動活動と睡眠状態をトラッキングする。Spire は、Spire Health 社の呼吸モニタリング用のデバイスである。ユーザはベルトやズボンの腰にデバイスを取り付け、加速度データから呼吸を測定する。

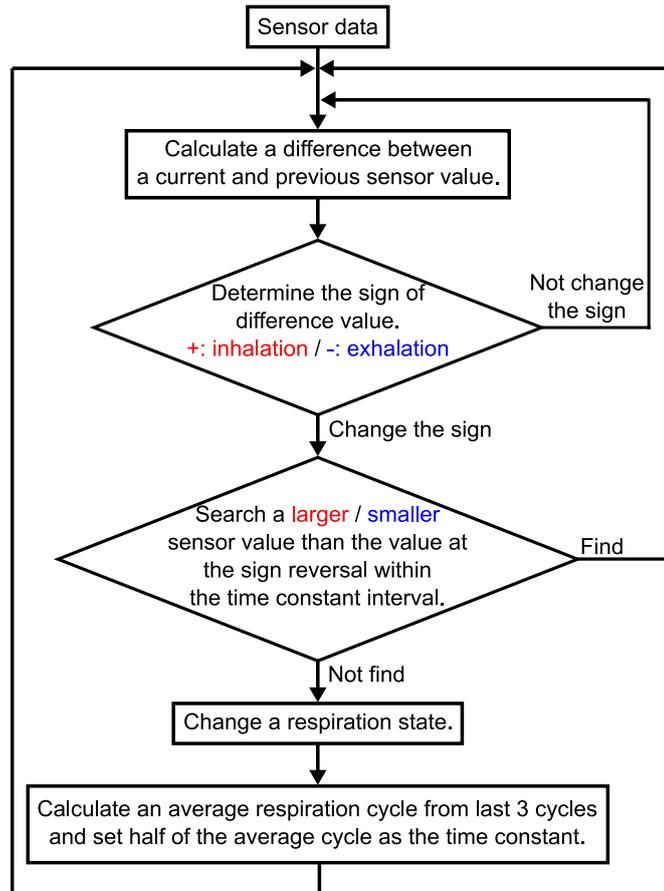


図 35: 呼吸状態認識フロー

表 5: 比較対象のウェアラブル呼吸計測デバイス

デバイス名	装着位置	計測手法
HEXOSKIN	胴	胸郭の動き
37 Degree Bracelet	手首	心拍の変調
Jawbone UP3	手首	心拍の変調
Spire	腰	胸郭の動き

流量計は精度、感度、周波数応答が信頼できるため医療検査で呼吸活動を測定するために使用される。そのため、呼吸気流データを正確な呼吸データとする。本研究では、正確な呼吸データを MINATO Medical Science 製の流量センサの Aeromonitor AE-310 を使用して取得した。また、ADInstruments が製造した AD コンバータの Power Lab 16/35 を使用して 2 つのひずみセンサと流量センサデータを取得し、他のウェアラブルデバイスは各専用 iOS アプリケーションを用いてデータを取得した。提案手法に用いるひずみセンサと流量センサのサンプリング周波数は 100 Hz とした。

## 実験方法

図 36 にすべてのデバイスを装着した被験者を示す。被験者は HEXOSKIN を T シャツの上から着用し、37 Degree Bracelet と JawboneUP3 を左手首に身に付け、Spire をズボンの腰部分に装着した。HEXOSKIN の上から 2 つの提案バンド型デバイスを身に付け、胸部のデバイスは第 4 肋骨付近に、腹部はは第 10 肋骨付近に装着した。また、流量センサが接続されたマスクを着用して正解呼吸データを取得した。各バンド型デバイスの 2 つのひずみセンサを胴体の左右の側面にそれぞれ配置し、装着位置の収縮と伸長を測定し、提案システムは胴体の左右で測定された 2 つのひずみセンサデータを合算し、呼吸数を認識した。GE Healthcare 社の T-2100 トレッドミルを用いて被験者は歩き、歩行中の呼吸数を測定した。歩行速度を 0 km/h(直立), 2 km/h, 4 km/h, 6 km/h としてランダムな順序で実験を行った。各センサデータから 1 分間の呼吸数を取得し、式 1 を使用して認識率を計算した。ここで F は流量センサデータに基づく呼吸数、X は各ウェアラブルセンサデータに基づく呼吸数である。

$$Accuracy = 1 - \frac{|F - X|}{F} \quad (1)$$

## 実験結果

胸部と腹部の各バンド型デバイス、HEXOSKIN、および 37 Degree Bracelet では呼吸数を測定できたが、Spire と Jawbone UP3 では呼吸数を測定できなかった。Spire は加速度データを使用して呼吸を測定したため、歩行による加速度が原因で測定できなかった。Jawbone UP3 は睡眠状態分析のために呼吸を測定するため、睡眠中以外の状況では呼吸数を測定できなかった。

式 1 を用いて呼吸数を測定できた 4 つのデバイスの認識率を算出し、図 37 に各歩行速度でのすべての被験者の平均認識率を示す。図 37 のエラーバーは、各デバイスの測定結果の標準偏差を表している。胸部のバンド型デバイスを用いたシステムの各歩行速度での平均認識率は 0 km/h で 1.00, 2km/h で 0.98, 4 km/h で 0.99, 6 km/h で 0.97 のであった。腹部のバンド型デバイスでは、0 km/h で 1.00, 2 km/h で 0.99, 4 km/h で 1.00, 6 km/h で 0.95 であった。各歩行速度での HEXOSKIN と 37 Degree Bracelet の各歩行速度での平均認識率はそれぞれ、0 km/h で 0.80 と 0.77, 2 km/h で 0.84 と 0.73, 4 km/h で 0.86 と 0.71, 6 km/h で 0.83 と 0.61 であった。提案認識システムは胸

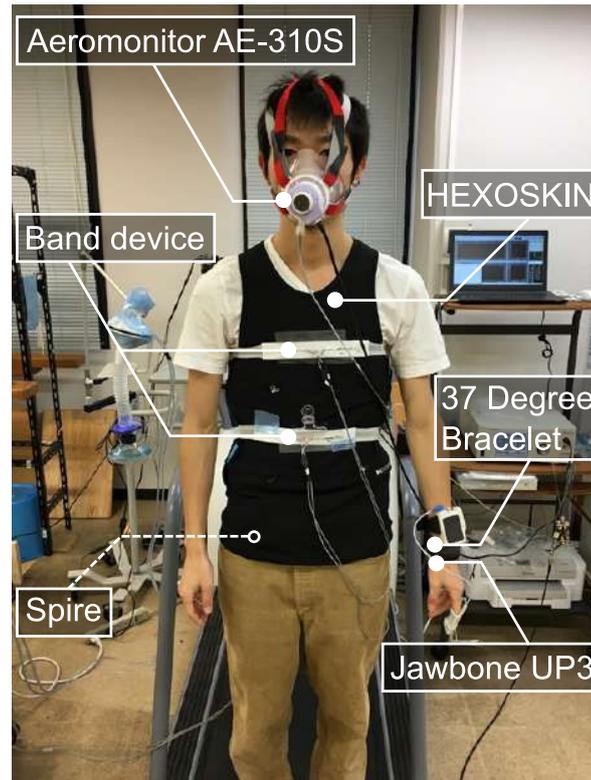


図 36: 実験中の被験者

部および腹部のバンド型デバイスによって、すべての歩行速度で市販デバイスよりも認識率が高く、標準偏差が小さかった。認識アルゴリズムと装着位置の調整によって、呼吸数の高い認識率を実現したと考えている。37 Degree Bracelet は歩行速度が上がると認識精度が低下した。手首にあるセンサによって測定した心拍データから呼吸数を測定する方法は多くの手首装着デバイスで使用されているが、呼吸とは無関係の動きに敏感であり、37 Degree Bracelet はこの方法によって呼吸を計測していると考えられる。Jawbone UP3 もこの方法を用いており、ユーザの行動による誤認識を避けるために睡眠中にのみ呼吸を測定すると考えられる。提案システムも歩行速度が速くなると認識率が低下しているが、低下率はるかに小さい。これは、認識アルゴリズムが外乱や非周期的な呼吸によって引き起こされる誤認識を防ぐように設計したため、歩行による胴体の周径変化による影響が小さかったためであると考えられる。HEXOSKIN と比較して、提案システムのバンド型デバイスはユーザに応じてセンサの位置を調整できる。HEXOSKIN のセンサの位置はセンサが衣服に組み込まれているため、ユーザの体の形やサイズによって異なる。被験者は自分の肋骨の位置にバンド型デバイスを到着し、そのため、被験者ごとの呼吸数認識に効果的な位置にデバイスを着用するこ

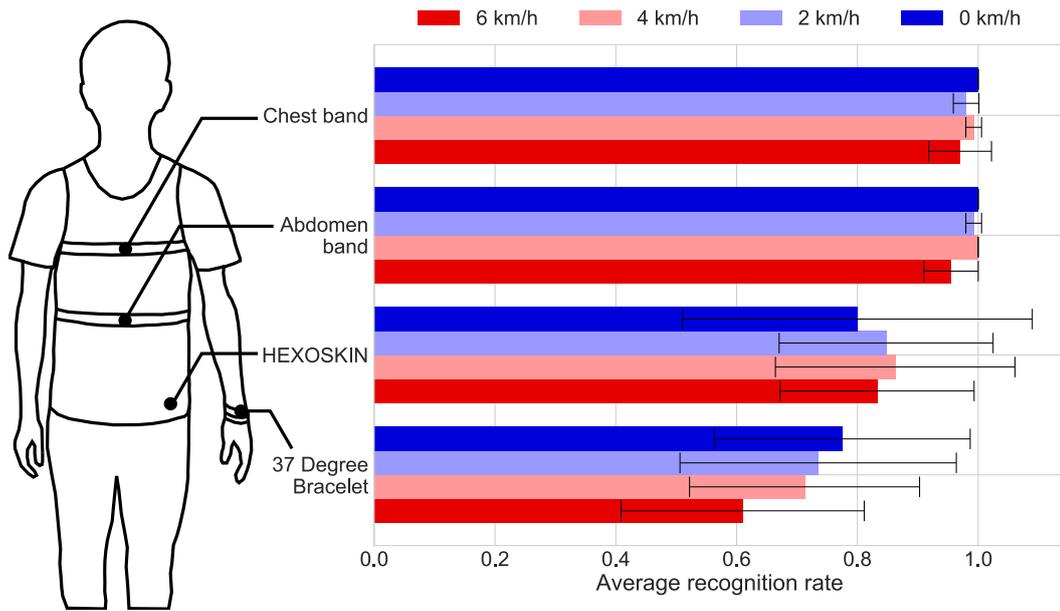


図 37: 各呼吸計測システムの呼吸数認識率

とができたと考えられる。胸部と腹部のバンド型デバイスを比較するが、性能の差は小さかった。また、歩行速度が増加すると認識率が低下する傾向があることもわかった。胴体周囲の変化は呼吸以外の歩行によっても発生し、そのため、呼吸数の認識率が低下した。

## 5.5 むすび

本研究では、伸縮に応じて静電容量が変化するシート状のひずみセンサを用いた呼吸計測手法を提案した。提案手法はひずみセンサで構成されるバンド型デバイスを用いて、呼吸による胸部容積の変化から呼吸を測定する。さらに、提案デバイスの性能評価のために、市販のウェアラブルデバイスと様々な歩行速度での歩行時呼吸数の認識性能を比較した。評価の結果、提案システムが平均 99%の精度で呼吸数を認識し、その精度は他のデバイスよりも高かった。



## 6 結論

### 6.1 各章のまとめ

本論文では、衣服の変形を利用したインタラクション技術の確立を目指して、衣服の変形をウェアラブルコンピューティングにおいて重要な入力、出力、状況認識の機能にそれぞれ利用したシステムの構築を目的とした4つの研究テーマに取り組み、テーマごとに実現可能性を示した。その上で、これからの Smart clothing におけるインタラクション技術への衣服の変形の利用の方向性について議論する。

まず、第1章では、Smart clothing の現在提案されている入力インタフェース、状況認識技術の現状の問題点、衣服の変形の応用の可能性を説明し、それらを踏まえたこれからの Smart clothing の利用方法として、ウェアラブルコンピューティングにおいて重要な入力、出力、状況認識の3点の機能に着目し、それぞれに衣服の変形を利用したシステムの構築を目指し、その実現可能性を議論するという本論文の目的を明らかにした。

第2章では、アプリケーションの入力要求時にアプリケーションや入力コマンドの数に応じて衣服にシワを生成する入力インタフェースを提案した。シワを生成する手法を検討し、コイル状の形状記憶合金である BMX と圧縮バネからなるシワ生成器とシワの選択と入力のタッチを区別する2つのタッチ入力方法を設計し、プロトタイプインタフェースを実装した。社会受容性を満たすインタフェースの操作位置を調査し、脇を除く7つ身体部位は中程度の社会受容性を有していることを確認し、その中から本研究では太腿前面にデバイスを装着することを決めた。太腿前面にデバイスを装着したズボンを用いて、触覚のみによるシワ生成パターンの認識を評価し、31のシワ生成パターンを平均89.4%の認識率で認識できたが、認識までに12秒の時間を要した。さらに、プロトタイプインタフェースを用いた入力操作の精度を評価した結果、視覚フィードバックがある場合の Long press touch と Narrowing-down selection の入力精度はどちらも98%であったが、視覚フィードバックがない場合は平均約75%と84%であった。視覚フィードバックがない場合の入力精度の向上を図るために、入力操作の習熟を評価した。その結果、提案インタフェースの操作方法の学習後は Long press touch と Narrowing-down selection の両入力方法とも90%を超える入力精度となり、入力時間は約2秒となった。現在のプロトタイプインタフェースでは、シワの生成から入力

の完了までに17秒以上の時間を要してしまい、入力に時間がかかってしまうが、入力機能と出力機能の精度は高く、衣服の変形の入力への応用の実現可能性を示せた。

第3章では、衣服のシワを用いた入力方法の操作性をより詳細に評価するために、多くのテキストスタイルインタフェースに入力として利用されるタッチ入力とピンチ入力をシワを用いたインタフェースに適用し、シワを用いた3つのタッチ入力と1つのピンチ入力を設計し、その操作性を習熟可能性、シワの有無の影響、操作環境と位置の影響の3点を評価した。まず、習熟による入力方法の精度と時間の推移を調査し、その結果、すべての入力方法の入力精度は平均精度95%以上に達し、Pinch inputが最も精度が高く98%となった。入力時間はNarrowing-down selectionが最も速く実験最終日には平均1.87秒となった。次にシワの有無による入力性能の差を評価し、すべての入力方法、特にPinch inputではシワによって入力速度を速くなることを確認した。最後に4つのユーザの操作環境と7カ所の身体上の操作位置の組合せにおいて、入力を評価した結果、Long press touchとPinch inputは操作環境と位置のすべての組合せで90%以上の高精度に達することを確認した。Double touchとNarrowing-down selectionは太腿での入力が歩行時に精度と時間が大幅に悪化した。上腕と肩は操作環境が変化しても各入力方法の操作性がほとんど変化しない操作位置であった。これらの評価によって各入力方法の特性についての知見を得ることができ、今後のテキストスタイルインタフェースへの応用の可能性を示せた。

第4章では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法を提案した。提案フィードバックシステムは形状記憶合金と圧縮バネで構成されたアクチュエータを用いて、その収縮により衣服を変形させてユーザの皮膚に触覚刺激を提示する。プロトタイプシステムを実装し、4つの評価実験を実施した。最初の評価実験では、各アクチュエータバンドの装着位置の4カ所の刺激提示位置のアクチュエータの収縮によって皮膚にかかる圧力を測定した。その結果、アクチュエータの収縮量を制御しているPWMの値に応じて圧力が増加することがわかった。しかし、前腕の下面に位置するアクチュエータの収縮では、皮膚にかかる圧力はほとんど変化しなかった。次の評価実験では、各アクチュエータの収縮による刺激の絶対閾を評価し、前腕と上腕の上面では、絶対閾のPWM値は約90であった。さらに次の評価実験では、4つのアクチュエータの収縮パターンの認識を評価した。評価の結果、15パターンの認識では、前腕での認識率が最も高かったが28%と低かった。最後の評価では、15パターンの収縮パターンの認識結果から認識率の高い4つのパターンを抽出し、着席と歩行の2つの環境におけるパ

ターンの認識を評価した。着席時では、15パターンの認識結果に比べて認識率が向上し、前腕の認識率が最も高く85%となった。しかし、歩行時では、最も高い認識率は上腕の40%となった。ユーザの刺激の識別率は低いが、フィードバックに利用できる刺激の抽出および刺激提示に適さない身体部位などの衣服の変形を利用するフィードバック手法の指針は示せた。

第5章では、伸縮に応じて静電容量が変化するシート状のひずみセンサを用いた呼吸計測手法を提案した。提案手法はひずみセンサで構成されるバンド型デバイスを用いて、呼吸による胸部容積の変化から呼吸を測定した。提案デバイスの性能評価のために、市販のウェアラブルデバイスと様々な歩行速度での歩行時呼吸数の認識性能を比較した。評価の結果、提案システムが平均99%の精度で呼吸数を認識し、その精度は他のデバイスよりも高かった。提案システムに用いたひずみセンサは薄く、柔軟性に富んでいるので衣服への統合が容易であり、提案手法による高い呼吸計測性能から衣服の変形によるユーザのより深層的な状況認識の可能性を示せた。

## 6.2 本論文の結論

序章では、テキストスタイルインタフェースの現状の問題点を述べ、入力、出力と状況認識のウェアラブルコンピューティングにおける重要な機能への衣服の変形の応用可能性を示唆した。

2章では、衣服のシワを用いた入力インタフェースを提案し、シワを生成する衣服の変形の入力機能と出力機能の妥当性を示した。

3章では、衣服のシワを用いた入力方法を評価し、シワを用いた3つのタッチ入力方法と1つのピンチ入力方法の特性についての知見を示し、今後のテキストスタイルインタフェースへの応用の可能性を示した。

4章では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法を提案した。ユーザの刺激の識別率は低いが、フィードバックに利用できる刺激の抽出および刺激提示に適さない身体部位などの衣服の変形を利用するフィードバック手法の指針は示した。

5章では、伸縮に応じて静電容量が変化するシート状のひずみセンサを用いた呼吸計測手法を提案した。ひずみセンサは薄く、柔軟性に富んでいるので衣服への統合が容易であり、提案手法による高い呼吸計測性能から衣服の変形によるユーザのより深層的な状況認識の可能性を示した。

序章で述べた通り、衣服の変形は入力、出力、状況認識などの機能に対して非常に

有用であり、従来のインタフェース、状況認識システムの機能を拡張させる可能性があるが、本論文を通して、検討すべき課題はあるものが衣服の変形による入力、出力、状況認識機能の拡張の実現可能であることを示した。よって、今後ウェアラブルコンピューティング環境が整えば、さらに高機能なテキスタイルインタフェースや状況認識技術の登場が期待できる。

### 6.3 検討課題

本研究では、衣服の変形による入力、出力、状況認識機能の拡張の実現可能であることを検討した。

一方で、現状のテキスタイルインタフェース、フィードバックシステム、状況認識システムには多くの課題が残されている。本節では、今後検討予定である技術課題について述べる。

**操作時間の短縮:** 第2章および第3章では、シワを用いたテキスタイルインタフェースとその入力方法を提案した。しかし、現状のプロトタイプインタフェースでは、現在のプロトタイプデバイスでは、シワの生成から入力の完了までに17秒以上の時間を要する。現状では、1枚の布に5本のシワを生成するが、シワの生成しづらい位置がある。1本のシワを生成する布を複数枚組み合わせることで、この問題を解決すると同時に、様々なテクスチャの布を組み合わせることで、シワの触覚に変化をつけ、シワの認識速度を向上できると考えている。

**アクチュエータの検討:** 第2章および第4章では、形状記憶合金と圧縮バネを組み合わせたアクチュエータを利用し、衣服を変形させた。しかし、圧縮バネの厚さ、固さ、また形状記憶合金からの放熱によって衣服の機能性、快適性を損なってしまっている。また、形状記憶合金の消費電力も大きさも課題である。より小型で反応性に富むアクチュエータの選定が必要である。

**フィードバック機能の改善:** 第4章では、衣服の変形によるフィードバックシステムを提案した。着席時の4つのアクチュエータによる15パターンの収縮パターンの認識では、最大の認識率が前腕の28%であったが、4つのパターンを抽出した場合は最大の認識率が85%に向上した。しかし、歩行時には4パターンの認識率は最大でも上腕の40%と低い。パターンの抽出は認識率の向上に効果があったが、未だ実用性の低い性能である。時間的に変化する刺激などの提示刺激の調査、またアクチュエータの数の削

減や形状記憶合金の伸長など圧力刺激の量を増加させる方法など，ユーザが識別できるために刺激の提示方法を検討する必要がある．

状況認識手法の衣服へのお都合: 第5章では，伸縮に応じて静電容量が変化するシート状のひずみセンサを用いた呼吸計測手法を提案した．現状のシステムで用いたひずみセンサを衣服に統合し，認識した呼吸情報からユーザのストレスなどの心理的，生理的情報を認識するシステムの構築を検討すべきである．



## 謝辞

本研究全般に関して、懇切なる御指導と惜しめない御助言を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 寺田努教授に謹んで御礼申し上げます。本研究を推進するにあたり、直接の御指導、御助言、御討論を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本昌彦教授に衷心より感謝申し上げます。本論文をまとめるにあたり、多くの御指導と御助言を賜りました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 沼昌宏教授、増田澄男教授に心より感謝申し上げます。

日頃より多くの御指導、御激励を頂きました奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 磯山直也助教、北海道大学大学院情報科学研究院 渡邊拓貴助教に心より感謝申し上げます。進路や研究について、多くの御助言、御激励を頂きました m plus plus 株式会社 藤本実氏、柳沢豊氏、中田眞城子氏に深く感謝申し上げます。

神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻に在学中、御教示、御激励頂いた神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の諸先生方に感謝すると共に、諸職員の方々に感謝いたします。本研究を進めるにあたり、多くの御協力、御討論、御激励を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻塚本・寺田研究室の諸氏に心より感謝申し上げます。

最後に、研究生活を送る上で、暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた両親と友らに心からの感謝と御礼を申し上げます。



## 参考文献

- [1] S. Mann: “Smart clothing”: wearable multimedia computing and “personal imaging” to restore the technological balance between people and their environments, *Proc. of the 4th ACM international conference on Multimedia (Multimedia 1996)*, pp. 163–174 (Nov. 1996).
- [2] 塚本昌彦: モバイルコンピューティング, 岩波新書 (Dec. 2000).
- [3] L. Buechley, M. Eisenberg, J. Catchen, and A. Crockett: The LilyPad Arduino: Using Computational Textiles to Investigate Engagement, Aesthetics, and Diversity in Computer Science Education, *Proc. of the 26th ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System (CHI 2008)*, pp. 423–432 (Apr. 2008).
- [4] N. Komor, S. Gilliland, J. Clawson, M. Bhardwai, M. Carg, C. Zeagler, and T. Starner: Is It Gropable?-Assensing the Impact of Mobility on Textile Interfaces, *Proc. of the 13th ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2009)*, pp. 71–74 (Jan. 2009).
- [5] P. Holleis, S. Paasovaara, and J. Häkkinen: Evaluating Capacitive Touch Input on Clothes, *Proc. of the 10th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI 2008)*, pp. 81–90 (Sep. 2008).
- [6] S. Gilliland, N. Komor, T. Starner, and C. Zeagler: The Textile Interfaces Swatchbook: Creating Graphical User Interface-like Widgets with Conductive Embroidery, *Proc. of the 14th ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2010)*, pp. 1–8 (Oct. 2010).
- [7] F. Heller, S. Ivanov, C. Wachramanotham, and J. Borhcers: FabriTouch: Exploring Flexible Touch Input on Textiles, *Proc. of the 18th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2014)*, pp. 59–62 (Sep. 2014).

- [8] D. Hughes, H. Profita and N. Correll: SwitchBack: An On-Body RF-based Gesture Input Device, *Proc. of the 18th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2014)*, pp. 63–66 (Sep. 2014).
- [9] A. Peshock, J. Duvall, and L. E. Dunne: Argot: A Wearable One-Handed Keyboard Glove, *Proc. of the 18th ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2014)*, pp. 87–92 (Sep. 2014).
- [10] T. Karrer, M. Wittenhagen, L. Lichtschlag, F. Heller, and J. Borchers: Pinstripe: Eye-free Continuous Input on Interactive Clothing, *Proc. of the 29th ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2011)*, pp. 1313–1322 (May 2011).
- [11] N. A. Hamdan, J. Thar, F. Heller, J. Borchers, and C. Wacharamanotham: Grabrics: A Foldable Two-Dimensional Textile Input Controller, *Proc. of the 34th SIGCHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing System (CHI EA 2016)*, pp. 2497–2503 (Sep. 2016).
- [12] K. Ono, S. Iwamura, A. Ogie, and T. Baba: Textile++: low Cost Textile Interface Using the Principle of Resistive Touch Sensing, *Proc. of the 44th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2017)*, Article No. 8 (Jul. 2017).
- [13] N. Komor, S. Gilliland, J. Clawson, M. Bhardwai, M. Carg, C. Zeagler, and T. Starner: Is It Gropable?- Assessing the Impact of Mobility on Textile Interfaces, *Proc. of the 13th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2009)*, pp. 71–74 (Jan. 2009).
- [14] S. Schneegass and A. Voit: GestureSleeve: Using Touch Sensitive Fabrics for Gestural Input on the Forearm for Controlling Smart Watches, *Proc. of the 20th ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2016)*, pp. 108–115 (Sep. 2016).
- [15] A. Voit and S. Schneegass: FabricID: Using Smart Textiles to Access Wearable Devices, *Proc. of the 16th ACM International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM 2017)*, pp. 379–385 (Nov. 2017).

- [16] P. Parzer, A. Sharma, A. Vogl, J. Steimle, A. Olwal, and M. Haller: SmartSleeve: Real-time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, using hybrid Gesture Detection Pipeline, *Proc. of the 30th ACM User interface Software and technology Symposium (UIST 2017)*, pp. 565–577 (Oct. 2017).
- [17] D. Dobbelstein, C. Winkler, G. Haas, and E. Rukzio: PocketThumb: a Wearable Dual-Sided Touch Interface for Cursor based Control of Smart-Eyewear, *Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 2, Article 9 (June 2017).
- [18] K. Tsubaki, T. Terada, and M. Tsukamoto: An Activity Recognition Method by Measuring Circumference of Body Parts, *Proc. of the 7th Augmented Human International Conference (AH 2016)*, Article No. 13 (Feb. 2016).
- [19] T. Marrin and R. Picard: The “Conductor’s Jacket”: A Device For Recording Expressive Musical Gestures, *Proc. of the International Computer Music Conference (ICMC 1998)* pp. 1–5 (Oct. 1998).
- [20] S. Schneegass, M. Hassib, B. Zhou, J. Cheng, F. Seoane, O. Amft, P. Lukowicz, A. Schmidt: SimpleSkin: towards multipurpose smart garments, *Proc. of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2015)*, pp. 241–244 (Sep. 2015).
- [21] N. Daddy, A. Aleksov, E. Lewallen, S. Oster, R. Fygenon, B. Lathrop, M. Bynum, M. Samady, S. Klein, and S. Girouard: A scalable process for manufacturing integrated, washable smart garments applied to heart rate monitoring, *Proc. of the 2017 International Symposium on Wearable Computing (ISWC 2017)*, pp. 38–41 (Sep. 2017).
- [22] B. Jeon, J. H. Ryu, J. Cho, B.-C. Bae, J.-D. Cho: Smart maternity clothes for visualizing fetal movement data, *Proc. of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2015)*, pp. 189–192, (Sep. 2015).

- [23] 堀江達矢, 所 洋平, 片山拓也, 寺田 努, 塚本昌彦: Xangle: ウェアラブルコンピューティングのための加速度センサを用いたポインティング手法, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 443–456 (Nov. 2013).
- [24] E. Foxin and M. Harrington: WearTrack: A Self-Referenced Head and Tracker for Wearable Computers and Portable VR, *Proc. of the 4th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2000)*, pp. 155–162 (Oct. 2000).
- [25] 亀山研一, 吉田充伸: Finger-Mount デバイスを用いた装着型システム, 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会報告, Vol. 1999-HI-99, No. 9, pp. 13–15 (Feb. 1999).
- [26] 峰 健三, 大淵竜太郎: 携帯情報機器のための入力デバイス DigiTrack, 日本ソフトウェア科学会第9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 2008) 予稿集, pp. 125–130 (Nov. 2001).
- [27] T. Kurata, T. Okuma, M. Kouroggi, and K Sakaue: the Hand Mouse: GMM Hand-Color Classification and Mean Shift Tracking, *Proc. of Recognition, Analysis, and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time System 2001*, pp. 119–124 (2001).
- [28] 片山拓也, 村尾和哉, 寺田 努, 塚本昌彦: 片手用キーボードによる打鍵間隔を活用した文字入力手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1667–1676 (Apr. 2013).
- [29] K. Lyons, T. Starner, D. Plaisted, J. Fusia, A. Lyons, A. Drew, and E. W. Looney: Twiddler Typing: One-Handed Chording Text Entry for Mobile Phones, *Proc. of the 22nd SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System (CHI 2004)*, pp. 671–678 (Apr. 2004).
- [30] K. Kuzume: Input Devices for Disable Persons Using Expiration and Tooth-Touch Sound Signals, *Proc. of the 25th ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2010)*, pp. 441–450 (Nov. 2011).
- [31] R. Lissermann, J. Huder, A. Hadjakos, and M. Mühlaäuser: EarPut: Augmenting Behind-the-Ear Devices for Ear-Hand Interaction, *Proc. of the 31st ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing (CHI 2013)*, pp. 1323–1328 (Apr. 2013).

- [32] C. Harrison, H. Benko, and A. D. Willson: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere, *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2011)*, pp. 441–450 (Nov. 2011).
- [33] S. Gustafson, C. Holz, and P. Baudisch: Imaginary Phone : Learning Imaginary Interfaces by Transferring Spatial Memory from a Familiar Device, *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2011)*, pp. 283–292 (Nov. 2011).
- [34] C. Zhang, A. Waghmare, P. Kundra, Y. Pu, S. Gilliland, T. Ploetz, T. E. Starner, O. T. Inan, G. D. Abowd: FingerSound: Recognizing unistroke thumb gestures using a ring, *Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, Iss. 3 (Sep. 2017).
- [35] J. Gong, Y. Zhang, X. Zhou, and X.-D. yang: Pyro: Thumb-Tip Gesture Recognition Using Pyroelectric Infrared Sensing, *Proc. of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2017)*, pp. 553–563 (Oct. 2017).
- [36] バイオメタル・ファイバー, <https://www.toki.co.jp/biometal/products/bmf/bmf.php>
- [37] バイオメタル・ヘリックス, <https://www.toki.co.jp/biometal/products/bmx/bmx.php>
- [38] J. Wagner, M. Nancel, S. Gustafson, S. Huot, and W. E. Mackay: Body-centric Design Space for Multi-surface Interaction, *Proc. of the 31st ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing (CHI 2013)*, pp. 1299–1308 (Apr. 2013)
- [39] J. Berzowska and M. Coelho: Kukkia and Vilkas: Kinetic Electronic Garments, *Proc. of the 9th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2005)*, pp. 82–85 (Oct. 2005).
- [40] A. V. Moere and M. Hoinkis: A Wearable Folding Display for Self-Expression, *Proc. of the 18th Australian Conference on Human-Computer Interaction (OZCHI 2006)*, pp. 301–304 (Nov. 2006).

- [41] B. Thomas, K. Grimmer, J. Zucco, and S. Milanese: Where Does the Mouse Go? An Investigation into the Placement of a Body-Attached TouchPad Mouse for Wearable Computers, *Journal of Personal and ubiquitous Computing*, Vol. 6, Issue 2, pp. 97–112 (Apr. 2002).
- [42] S. C. Lee and T. Starner: BuzzWear: Alert Perception in Wearable Tactile Displays on the Wrist, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System (CHI 2010)*, pp. 433–442 (Apr. 2010).
- [43] J. R. Cauchard, J. Cheng, T. Pietrzak, and J. A. Landay: ActiVibe: Design and Evaluation of Vibrations for Progress Monitoring, *Proc. of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2016)*, pp. 3261–3271 (May 2016).
- [44] Y. C. Liao, Y. L. Chen, J. Y. Lo, R. H. Liang, L. Chan, and B. Y. Chen: EdgeVib: Effective Alphanumeric Character Output Using a Wrist-Worn Tactile Display, *Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2016)*, pp. 595–601 (Oct. 2016).
- [45] J. Hong, A. Pradhan, J. E. Froehlich, and L. Findlater: Evaluating Wrist-Based Haptic Feedback for Non-Visual Target Finding and Path Tracing on a 2D Surface, *Proc. of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS 2017)*, pp. 210–219 (Nov. 2017).
- [46] M. Haller, C. Richter, P. Brandl, S. Gross, G. Schosleitner, A. Schrempf, H. Nii, M. Sugimoto, and M. Inami: Finding the right way for interrupting people improving their sitting posture, *Proc of the 13th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT 2011)*, pp. 1–17 (Sep. 2011).
- [47] S. Je, M. Lee, Y. Kim, L. Chan, X. Yang, and Andrea Bianchi: PokeRing: Notifications by Poking Around the Finger, *Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2018)*, No. 542 (Apr. 2018).
- [48] D. Dobbelstein, E. Stemasov, D. Besserer, I. Stenske, and E. Rukzio: Movelet: a Self-Actuated Movable Bracelet for Positional Haptic Feedback on the User’s

- Forearm, *Proc. of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2018)*, pp. 33–39 (Oct. 2018).
- [49] H. Pohl, P. Brandes, H. N. Quang, and M. Rohs: Squeezeback: Pneumatic Compression for Notifications, *Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2017)*, pp. 5318–5330 (May 2017).
- [50] G. Chernyshov, B. Tag, C. Caremel, F. Cao, G. Liu, and K. Kunze: Shape Memory Alloy Wire Actuators for Soft, Wearable Haptic Devices, *Proc. of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2018)*, pp. 112–119 (Oct. 2018).
- [51] A. Gupta, A. A. R. Irudayaraj, and R. Balakrishnan: HapticClench: Investigating Squeeze Sensations using Memory Alloys, *Proc. of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2017)*, pp. 109–117 (Oct. 2017).
- [52] Y. A. Shim, J. Lee, and G. Lee: Exploring Multimodal Watch-back Tactile Display using Wind and Vibration, *Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2018)*, No. 132 (Apr. 2018).
- [53] J. Tewell, J. Bird, and G. R. Buchanan: Heat-Nav: Using Temperature Changes as Navigational Cues, *Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2017)*, pp. 1131–1135 (May 2017).
- [54] R. L. Peiris, Y. L. Feng, L. Chan, and K. Minamizawa: ThermalBracelet: Exploring Thermal Haptic Feedback Around the Wrist, *Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2019)*, No. 170 (May 2019).
- [55] S. Song, G. Noh, J. Yoo, I. Oakley, J. Cho, and A. Bianchi: Hot & Tight: Exploring Thermo and Squeeze Cues Recognition on Wrist Wearables, *Proc. of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2015)*, pp. 39–42 (Sep. 2015).
- [56] A. Ion, E. Wang, and P. Baudisch: Skin Drag Display: Dragging a Physical Tactile across the User’s Skin Produces a Stronger Tactile Stimulus than Vibrotactile,

- Proc. of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2015)*, pp. 2501–2504 (Apr. 2015).
- [57] F. Chinello, C. Pacchierotti, N. G. Tsagarakis, and D. Prattichizzo: Design of a Wearable Skin Stretch Cutaneous Device for the Upper Limb, *Proc. of the IEEE Haptic Symposium 2016 (HAPTICS 2016)*, pp. 14–20 (Apr. 2016)
- [58] E. Strasnick, J. Cauchard, and J. Landay: BrushTouch: Exploring an Alternative Tactile Method for Wearable Haptics, *Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2017)*, pp. 3120–3125 (May 2017).
- [59] B. Holschuh, E. Obropta, and D. Newman: Low Spring Index NiTi Coil Actuators for Use in Active Compression Garments, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 20, Issue 3, (June 2015).
- [60] J. F. Fieselmann, M. S. Hendryx, C. M. Helms, D. S. Wakefield: Respiratory rate Predict Cardiopulmonary Arrest for Internal Medicine Inpatients, *Journal of General Medicine*, Vol. 8, Iss. 7, pp. 354–360 (July 1993).
- [61] M. A. Cretikos, R. Bellomo, K. Hillman, J. Chen, S. Finfer, and A. Flabouris: Respiratory rate: the neglected vital sign, *The Medical Journal of Australia* Vol. 188, Iss. 11, pp. 657–659 (June 2008).
- [62] M. J. Tipton, A. Harper, J. F. R. Paton, and J. T. Costello: The human ventilatory response to stress: rate or depth?, *The Journal of Physiology*, Vol. 595, Iss. 17, pp. 5729–5752 (Sep. 2017).
- [63] A. Nicolò, C. Massaroni, and L. Passfield: Respiratory Frequency during Exercise: The Neglected Physiological Measure, *Frontiers in Physiology* Vol. 8, Art. 922 (Dec. 2017).
- [64] H. Nakamoto, H. Ootaka, M. Tada, I. Hirata, F. Kobayashi: Stretchable Strain Sensor Based on Areal Change of Carbon Nanotube Electrode, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, Iss. 4, pp. 2212–2218 (Apr. 2015).
- [65] 加藤太郎, 福井勉: 呼吸運動時の胸部と腹部の皮膚挙動特性, *理学療法科学*, 28 卷, 2 号, pp. 279–283 (Apr. 2013).

- [66] 中井宏章, 渡邊睦, 三宅啓夫, 高田敬輔, 山下馨, 新盛英世, 石原謙: 動画像処理による呼吸モニタリングシステム, 電子情報通信学会論文誌, pp. 280–288 (Jan. 2000).
- [67] 青木広宙, 青木廣市, 中島真人: 近赤外輝点マトリックス照影による非接触・無拘束就寝者呼吸監視システム, 電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌, pp. 1251–1258 (Jun. 2004).
- [68] N. Patwari, J. Wilson, S. Ananthanarayanan, S. K. Kasera, D. Westenskow: Monitoring Breathing via Signal Strength in Wireless Networks, *IEEE Transaction on Mobile Computing*, Vol. 13, Iss. 8 (Aug. 2014).
- [69] A. Al-Naji, A. J. Al-Askery, S. K. Gharghan, and J. Chahl: A System for Monitoring Breathing Activity Using an Ultrasonic Radar Detection with Low Power Consumption, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 8, Iss. 2, Art. 32 (May 2019).
- [70] M. Haescher, D. J. C. Matthies, J. Trimpop, and B. Urban: SeismoTracker: Upgrade any Smart Wearable to enable a Sensing of Heart Rate, Respiration Rate, and Microvibrations, *Proc. of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA 2016)*, pp. 2209–2216 (May 2016).
- [71] T. Hao, C. Bi, G. Xing, R. Chan, and L. Tu: MindfulWatch: A Smartwatch-Based System For Real-Time Respiration Monitoring During Meditation, *Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, Iss. 3, Art. 57 (Sep. 2017).
- [72] D. Liaqat, M. Abdalla, P. Abed-Esfahani, M. Gabel, T. Son, R. Wu, A. Gershon, F. Rudzicz, and E. D. Lara: WeaeBreathing: Real World Respiratory Rate Monitoring Using Smartwatches, *Proc. of the ACM on Interactive, Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, Iss. 2, Art. 56 (June 2019).
- [73] 野添匡史, 間瀬教史, 杉浦みどり, 岡前暁生, 山本健太, 立栄智恵, 眞淵敏, 傳秋光: 体幹前傾姿勢が肺気量位と呼吸運動に与える影響, 理学療法学, 34 巻, 6 号, pp. 254–259 (Oct. 2007).

- [74] M. D. Rienzo, F. Rizzo, G. Parati, G. Brambilla, M. Ferratini, and P. Castiglioni: MagIC System: a New Textile-Based Wearable Device for Biological Signal Monitoring. Applicability in Daily Life and Clinical Setting, *Proc. of the 2005 Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2005)*, pp. 7167–7169 (Aug. 2005).
- [75] B. Zhou, A. B. Costa, and P. Lukowicz: CoRSA: a cardio-respiratory monitor in sport activities, *Proc. of the 23rd International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2019)*, pp. 254–256 (Sep. 2019).
- [76] A. R. M. Forkan, F. Salim, R. Conduit, P. Beckett, and S. R. Robinson: TIARA: technology integrated apnea respiration analyser, *Proc. of the 23rd International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2019)*, pp. 169–171 (Sep. 2019).
- [77] J. Hernandez, Y. Li, J. M. Rehg, and P. W. Picard: Cardiac and Respiratory Parameter Estimation Using Head-mounted Motion-sensitive Sensors, *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*, Vol. 1, Iss. 1, Art. e2 (May 2015).
- [78] R. Kodama, T. Terada, and M. Tsukamoto: Evaluation on a Context Recognition Method Using Temperature Sensors in the Nostrils, *Sensors*, Vol. 19, No. 7, pp.1528–1539 (Mar. 2019).
- [79] 玉木彰, 松尾善美, 阿部利夫: Parkinson 病患者の呼吸機能に与える胸部および腹部運動の影響について, *理学療法学*, 27 卷, 7 号, pp. 217–222 (Nov. 2000).
- [80] 小室透, 間瀬教史, 居村茂幸, 藤原誠, 辻田純三, 稲森義雄, 大西秀明: 運動時における健常者の呼吸パターン (呼吸数と一回換気量の関係) および呼吸運動の変化, *理学療法学*, 21 卷, 8 号, pp. 549–552 (Dec. 1994).
- [81] B. Gullapalli, A. Natarajan, G. A. Angarita, R. T. Malison, D. Ganesan, and T. Rahman: On-body Sensing of Cocaine Craving, Euphoria and Drug-Seeking Behavior Using Cardiac and Respiratory Signals, *Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, Iss. 2, Art. 46 (June 2019).

- [82] Y. Xin, T. Liu, Y. Xu, J. Zhu, T. Lin, and X. Zhou: Development of respiratory monitoring and actions recognition based on a pressure sensor with multi-arch structures, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 296, pp. 357-366 (Sep. 2019).
- [83] C. Massaroni, A. Nicolò, D. L. Presti, M. Sacchetti, S. Silvestri, and E. Schena: Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate, *Sensors*, Vol. 19, Iss. 4, Art. 908 (Feb. 2019).
- [84] C-STRETCH, [https://marketing.bandogrp.com/C-STRETCH\\_LP.html](https://marketing.bandogrp.com/C-STRETCH_LP.html)
- [85] H. Nakamoto, H. Ootaka, M. Tada, I. Hirata, F. Kobayashi, and F. Kojima: Stretchable Strain Sensor Based on Areal Change of Carbon Nanotube Electrode, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, Iss. 4, pp. 2212–2218 (Apr. 2015).
- [86] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを利用した入力インタフェース実現のためのシワ生成手法, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2013(UWW 2013) 論文集, p. 30 (Dec. 2013).
- [87] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェース, 日本ソフトウェア科学会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 2014) 予稿集, pp. 73–78 (Nov. 2014).
- [88] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースの評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2014(UWW 2014) 論文集, p. 18 (Dec. 2014).
- [89] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースの装着位置および習熟度の評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2015(UWW 2015) 論文集, p. 23 (Dec. 2015).
- [90] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Input Interface Using Wrinkles on Clothes, *Proc. of the 20th ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2016)*, pp. 56–57 (Sep. 2016).
- [91] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Input Interface Using Wrinkles on Clothes for Wearable Computing, *Journal of Information Processing (JIP)*, Vol. 27, pp. 96–105 (Feb. 2019).

- [92] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いたタッチ入力とピンチ入力の評価に向けて, ユビキタスウェアラブルワークショップ2016(UWW 2016) 論文集, p. 30 (Dec. 2016).
- [93] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースの性能評価, 情報処理学会 UBI 研究会報告, Vol. 2017-UBI-54, No. 14, pp. 1-7 (May 2017).
- [94] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 装着位置および姿勢における衣服のシワを用いた入力方法の性能評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ2017(UWW 2017) 論文集, p. 15 (Dec. 2017).
- [95] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Evaluation of Input using Wrinkles on Clothes, *Proc. of The 16th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2018)*, pp. 66-75 (Nov. 2018).
- [96] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースにおける装着位置や周辺環境の影響評価, 情報処理学会 UBI 研究会報告, Vol. 2018-HCI-180/2018-UBI-60, No. 16, p. 1-8 (Dec. 2018).
- [97] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Evaluation of Input/Output Interface using Wrinkles on Clothes, *Journal of Data Intelligence (JDI)*, Vo. 1, No. 11, pp. 36-54 (Apr. 2018).
- [98] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服の変形による触覚フィードバック手法の提案, ユビキタスウェアラブルワークショップ2018(UWW 2018) 論文集, p. 27 (Dec. 2018).
- [99] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Haptic Feedback Method using Deformation of Clothing, *Proc. of The 17th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2019)*, pp. 84-93 (Dec. 2019).
- [100] 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服の変形を用いた触覚フィードバック手法の歩行中の性能評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ2019(UWW 2019) 論文集, p. 53 (Dec. 2019).

## 関連発表論文

### 学会論文誌発表論文

1. K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Input Interface Using Wrinkles on Clothes for Wearable Computing, *Journal of Information processing (JIP)*, Vol. 27, pp. 96–105 (Feb. 2019).
2. K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Evaluation of Input/Output Interface using Wrinkles on Clothes, *Journal of Data Intelligence (JDI)*, Vol. 1, No. 11, pp. 36–54 (Apr. 2018).

### 国際会議等発表論文

1. K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Input Interface Using Wrinkles on Clothes, *Proc. of the 20th ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2016)*, pp. 56–57 (Sep. 2016).
2. K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Evaluation of Input using Wrinkles on Clothes, *Proc. of The 16th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2018)*, pp. 66–75 (Nov. 2018).
3. K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Haptic Feedback Method using Deformation of Clothing, *Proc. of The 17th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2019)*, pp. 84–93 (Dec. 2019).

### 研究会等発表論文 (査読付)

1. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェース, 日本ソフトウェア科学会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 2014) 予稿集, pp. 73–78 (Nov. 2014).
2. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服の変形による触覚フィードバック手法, インタラクション 2020 予稿集 *to appear*.

## その他の研究会発表論文

1. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを利用した入力インタフェース実現のためのシワ生成手法, ユビキタスウェアラブルワークショップ2013(UWW 2013) 論文集, p. 30 (Dec. 2013).
2. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースの評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ2014(UWW 2014) 論文集, p. 18 (Dec. 2014).
3. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースの装着位置および習熟度の評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ2015(UWW 2015) 論文集, p. 23 (Dec. 2015).
4. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いたタッチ入力とピンチ入力の評価に向けて, ユビキタスウェアラブルワークショップ2016(UWW 2016) 論文集, p. 30 (Dec. 2016).
5. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースの性能評価, 情報処理学会 UBI 研究会報告, Vol. 2017-UBI-54, No. 14, No. 14, pp. 1–7 (May 2017).
6. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 装着位置および姿勢における衣服のシワを用いた入力方法の性能評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ2017(UWW 2017) 論文集, p. 15 (Dec. 2017).
7. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服のシワを用いた入力インタフェースに

おける装着位置や周辺環境の影響評価, 情報処理学会 UBI 研究会報告, Vol. 2018-HCI-180/2018-UBI-60, No. 16, p. 1-8 (Dec. 2018).

8. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服の変形による触覚フィードバック手法の提案, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2018(UWW 2018) 論文集, p. 27 (Dec. 2018).
9. 上田健太郎, 寺田 努, 塚本昌彦: 衣服の変形を用いた触覚フィードバック手法の歩行中の性能評価, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2019(UWW 2019) 論文集, p. 53 (Dec. 2019).

以上



神戸大学博士論文「衣服の変形を利用したインタラクション技術の確立に関する研究」  
全 119 頁

提出日 2020 年 1 月 24 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 上田 健太郎

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。