

アクティブ音響センシングを用いた ズボンのポケットに対するジェスチャ認識

折居 篤^{1,a)} 小西 智樹^{1,b)} 関口 将護^{1,c)} 永山 晃誠^{1,d)} 雨坂 宇宙^{2,4} 志築 文太郎³

概要：アクティブ音響センシングにおいて利用するセンサは着脱可能であるため、既存の衣服の表面を容易に入力インタフェースとして拡張することができる。本研究はアクティブ音響センシングを用いたジェスチャ認識技術を用いてズボンのポケットを入力インタフェースとして拡張する。本研究は先行研究と比較して倍以上のジェスチャのユーザビリティおよび認識精度の調査を行うことによって、ユーザにとって使いやすく、かつ認識しやすいズボンのポケットに対するジェスチャを模索する。

1. はじめに

スマートウォッチおよびスマートグラスなどのウェアラブルデバイスが、日常生活に普及している。しかし、ユーザはこれらのデバイス进行操作するためにデバイス自体に触れる必要があるため、操作性が制限されるという問題がある。この問題を解決するために、手のジェスチャおよび皮膚へのジェスチャのように身体を利用した、デバイスの操作性を拡張する手法の開発が行われている。例えば、筋電図センサを使用する手法 [1]、およびスピーカとマイクの役割を果たす 1 対の圧電素子を使用する手法 [2], [3] がある。しかし、これらの手法は、ユーザがセンシングデバイスを肌に直接取り付け必要があるため、ユーザは不快感を感じる可能性がある [4]。この問題を解決するために、様々なセンサを組み込んだ衣服であるスマートウェアが将来のウェアラブルセンシングデバイスとして注目されている。スマートウェアは、ジェスチャ、姿勢、および生体データなどの豊富なユーザ情報を、日常生活に統合された手法にて計測できる [5]。また、日常生活においてほとんどのユーザは衣服を着用しているため、衣服の表面をタッチインタフェースとして利用できる。衣服の表面をインタフェースとして利用することができれば、デバイスを肌に直接貼り付ける手法に比べて不快感を軽減することができる。スマートウェアの研究では、導電性繊維を使用して、ジェス

チャを認識するものが多い [6], [7], [8], [9]。しかし、導電性繊維を使用するには、衣服への刺繍の埋め込みが必要である。体のサイズ、環境および流行の変化により、人々は着用する衣服を変える。そのため、導電性繊維を用いたスマートウェアにて常にジェスチャ入力機能を使用するには、多くのコストがかかる。

そのため、本研究では音響センシングを用いた手法によりジェスチャ認識を行う。音響センシングを用いた手法は、衣服に圧電素子を 1 対取り付けただけでよい。通常の衣服にてジェスチャ認識に使用でき、デバイスを再取り付けするだけで、他の衣服へのインタフェースを簡単に再構成できる。

先行研究では、前腕の袖部分、シャツのボタン部分、およびズボンのポケットに対するジェスチャについてジェスチャ認識を行った [10]。しかし、この先行研究では、ユーザビリティ調査を行っておらず、提案された 5 つのジェスチャがユーザにとって使いやすいものであるとは限らない。そのため、本研究は特にズボンのポケットに対するジェスチャについて、発展的な調査を行う。ポケットに着目した理由は、ユーザが片手で触りやすく、ポケットの表面および裏面の両方をインタフェースとして拡張することができるためである。

先行研究におけるポケットへのジェスチャの認識は 5 種類しか行われておらず、参加者も 5 人と少ない [10]。そのため、本研究では、12 種類のポケットに対するジェスチャについて、ユーザビリティ調査を行い、ユーザにとって使いやすいジェスチャを模索する。また、12 人の実験参加者から収集したデータを用いたジェスチャ認識精度も調査する。

¹ 筑波大学 情報理工学位プログラム

² 日本学術振興会

³ 筑波大学 システム情報系

⁴ 慶應義塾大学 理工学部

a) orii@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) konishi@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

c) sekiguchi@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

d) nagayama@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

本研究の貢献を以下に示す。

- ズボンのポケットに対する 12 種類のジェスチャを調査した。
- ズボンのポケットの表面、および裏面に対しジェスチャを行いその対称性について評価する。
- 「押す」「ダブルタップ」「スワイプ下」のようなポケットの表面を用いたジェスチャが好まれることが示された。
- ユーザごとの分類器の評価結果では、12 ジェスチャに対して f 値 44.1 %, ユーザが好む 5 ジェスチャに対して f 値 47.1% にて分類できることが示された。

2. 関連研究

本研究は、12 種類のズボンのポケットに対するジェスチャについて、ユーザビリティ調査を行い、ユーザにとって使いやすいジェスチャを模索する。また、12 人の実験参加者から収集したデータを用いたジェスチャ認識精度についても調査する。本章では、スマートウェア、衣服に取り付けるデバイス、およびアクティブ音響センシングの 3 つの主要分野における関連研究における我々の研究の位置づけを示す。

2.1 スマートウェア

スマートウェアに関する研究に、高性能な埋め込み手法を実現するための基礎研究、および実用化に向けた研究がある [6], [7], [8], [9], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]。

繊維埋め込み手法の研究において、RESi [6] および Project Jacquard [7] では、それぞれ糸ベースの抵抗圧力センシングおよび静電容量タッチ機能を可能にするセンシング手法を提案した。TexYZ [8] は、市販の刺繍機を使用して、テキスタイル相互静電容量センサを迅速かつ簡単な製造を提案した。Wu ら [9] は、センサの底面の上部での相互作用を認識できる両面織りタッチセンサを提案した。

実用的なアプリケーションに関する研究では、ジェスチャ認識 [19], [20], [21], [22], [23], [24], 姿勢推定 [25], [26], [27], [28], [29], およびバイタルサインセンシング [30], [31], [32], [33] が行われている。タッチジェスチャの研究である SmartSleeve [23] では、導電性部品のグリッドを備えたスリーブ型デバイスを使用して、くるくる、ねじる、折りたたむ、押す、および伸ばすなど 9 種類のジェスチャを 89.5% の精度にて認識した。タッチレスジェスチャの研究である Fabriccio [24] では、導電性繊維を埋め込んだドップラーモーションセンシングを利用して、こする、スワイプする、および親指をスライドさせるなどの 12 種類のジェスチャを 92.8% のクロスバリデーション精度と 85.2% の Leave-One-Session-Out 精度にて認識した。

導電性繊維を使用したこれらの研究では、専用の衣服または各衣服に埋め込まれる刺繍が必要である。したがっ

て、ユーザはシナリオごとに専用の衣服と刺繍の埋め込みを準備する必要がある。我々の研究では、簡単に取り付けたり取り外したりできる一対の圧電デバイスで構成されているため、通常の衣服のジェスチャを認識でき、デバイスを再取り付けするだけでインタフェースを他の衣服や場所に再構成することができる。

2.2 衣服に取り付けるデバイス

ジェスチャ認識のために衣服に取り付けたり取り外したりできるデバイスが提案されている。Whack Gestures [34] では、ユーザのポケットに取り付けた視線フリーの加速度センサにてタップジェスチャを認識した。Zippro [35] では、赤外線 (IR) センサ、静電容量センサ、および指紋センサを備えたジッパー型のデバイスにてジェスチャを認識した。SensorSnaps [36] では、9 軸慣性計測装置 (IMU) を備えたボタン型のデバイスにて、タップ、タッチ、および回転ジェスチャを認識した。

我々の研究と同様に、これらの研究の特徴は、デバイスを通常の衣服から簡単かつ迅速に再取り付けできることである。我々は、通常の衣服の表面をインタフェースとして利用した際の、タッチおよび動作ジェスチャの認識に焦点を当てた。

2.3 アクティブ音響センシング

アクティブ音響センシングは、スピーカを使用して測定信号を送信し、伝播または反射した信号をマイクで受信するセンシング技術である。そして、受信した信号を分析することにより対象の状態を認識する。Watanabe ら [2], および Kubo ら [37] は、身体を伝播する音響信号を利用し、ジェスチャを認識した。Sound of Touch [3] は、皮膚表面を伝播する音響信号を利用して皮膚へのタッチ、およびハンドジェスチャを認識した。Takemura ら [38] は、骨伝導音を利用し、肘の角度や叩く指の位置を計測した。これらの研究は、音を当てることで人体の動きや形状を認識することに焦点を当てている。また、既存の物体をタッチインタフェースや認識センサとして利用することに焦点を当てた研究もある。Touch & Activate [39] は、既存の物体を掴むことを含む豊富なタッチコンテキストを認識する音響タッチセンシング技術を提案した。SenseSurface [40] は、アクリル平板上の物体、およびその位置を認識できるセンシングシステムを提案した。

我々の研究では、ジェスチャインタフェースとして衣服に焦点を当てた。衣服は音響信号が伝わりにくく、その形状は以前の研究にて使用された物体 [39], [41] ほど安定していない。この問題を解決するために、我々はアクティブ音響センシングを利用し、音響信号の伝播が難しい衣服などの物体においても、ジェスチャを認識した。

3. 実装

本研究は、音響センシングを用いた手法によるズボンのポケットに対して行うジェスチャの認識精度およびジェスチャのユーザビリティを調査することを目的とする。そのため、音響センシングを用いてジェスチャを行った際の周波数特性を計測するハードウェアおよび計測した周波数特性からジェスチャの分類を行うためのソフトウェアを実装した。

3.1 ハードウェア

システムのハードウェアは一对の圧電素子（村田製作所圧電ブザー リード線 7BB-20-6L0）で構成されている。スピーカ側の圧電素子は、非可聴域のチャープ信号を送信する。一方の圧電素子は、実験参加者がジェスチャを行った時の周波数特性を計測するためのマイクとして利用する。効率的な音声の送信と計測には、圧電素子が布に密着する必要がある。そのため、圧電素子をポケットの両側から磁石によって固定した。圧電素子は2芯シールド（モガミ電線 超極細フレキシブル 2芯シールド AWG36）を通してラインプラグ（Pro Audition AS-106）と接続され、オーディオインタフェース（Steinberg UR24C）を通してコンピュータ（MacBook Pro, チップ：Apple M1, メモリ：16GB）に接続された。

3.2 ソフトウェア

ソフトウェアはアクティブ音響センシングの先行研究と同じく、チャープ信号生成部分、フーリエ変換部分、前処理および特徴量抽出部分、ならびに機械学習部分の4つから構成されている。

3.2.1 チャープ信号生成

チャープ信号生成部分においては20k-48kHzの正弦波線形チャープ信号を生成し、出力している。チャープ信号は約43msの周期において単調増加している。これは、一度のフーリエ変換に対して2回分のチャープ信号が含まれる周期である。信号のサンプリングレートは96kHzである。

3.2.2 フーリエ変換

マイクから得られた音響信号を周波数データに変換するために高速フーリエ変換（FFT）を行う。FFTは、96kHzにてサンプリングされた音響信号に対し、8192点毎に行う。FFT窓は50%オーバーラップさせており、約86ms毎に周波数データを取得する。

3.2.3 スペクトログラム画像化

得られた周波数データをPythonのmatplotlibを用いて224×224のスペクトログラムに変換した。スペクトログラムの色は周波数特性の値に対応している。値から色への変換にはmatplotlibの標準カラーマップであるviridisを

用いた。得られた画像を機械学習モデルへの入力とする。

3.2.4 機械学習

PythonのKerasを用いて、サポートベクターマシン（SVM）を作成し、Nクラス分類を行った。また、分類には線形カーネルを使用した。

4. ユーザビリティ調査

提案した12種類のジェスチャ（図1）について、ユーザビリティの調査を行った。ユーザビリティ調査は、ジェスチャ認識用のデータ収集が完了したのち行われた。参加者は研究室の学生12人（男性10名、女性2名、平均年齢23.8歳、 $SD = 0.94$, ID=P1-P12）であった。

4.1 デザイン

ジェスチャは12種類のデータについて、身体的快適性、再現性、覚えやすさ、および社会的受容性の4つの指標について調査した。

身体的快適性の指標は、ジェスチャがどの程度身体的に快適であるかを評価した。再現性の指標は、ジェスチャを再現することの容易さを評価した。社会的受容性の指標は、人前でジェスチャを行うときの精神的快適性を評価した。覚えやすさの指標は、ジェスチャの暗記の容易さを評価した。参加者は各ジェスチャについて、1-5の5段階で評価するアンケートに回答した（高い方がよい）。その後、12種類のジェスチャについて、上位6種類のジェスチャの順位付けを行い、順位について回答した。参加者はアンケートに回答したのち、半構造化インタビューに回答した。

4.2 ユーザビリティ調査結果

身体的快適性、再現性、覚えやすさ、社会的受容性の4つの指標、ユーザの好み、および半構造化インタビューの結果を以下に述べる。

4.2.1 身体的快適性

身体的快適性についてもっとも良い平均値のジェスチャは「押す（平均値 = 4.92, $SD = 0.29$ ）」であり、続いて「ダブルタップ（平均値 = 4.67, $SD = 0.49$ ）」「スワイプ下（平均値 = 4.58, $SD = 0.51$ ）」と値が高かった。身体的快適性について最も低い平均値となったジェスチャは同率で「時計回り（裏）（平均値 = 1.66, $SD = 0.89$ ）」および「反時計回り（裏）（平均値 = 1.66, $SD = 0.89$ ）」であった、続いて反時計回り（平均値 = 2.67, $SD = 1.07$ ）」が評価が低かった。本実験では、ポケットの表および裏で対称的なジェスチャを行った。表で行ったジェスチャと裏で行ったジェスチャについて、シャピロ・ウィルク検定を行った結果、正規性が棄却されなかった。そのため対応のあるt検定を行い、有意に表で行ったジェスチャが良い値であった（ $t = 5.71, p < .01$ ）。

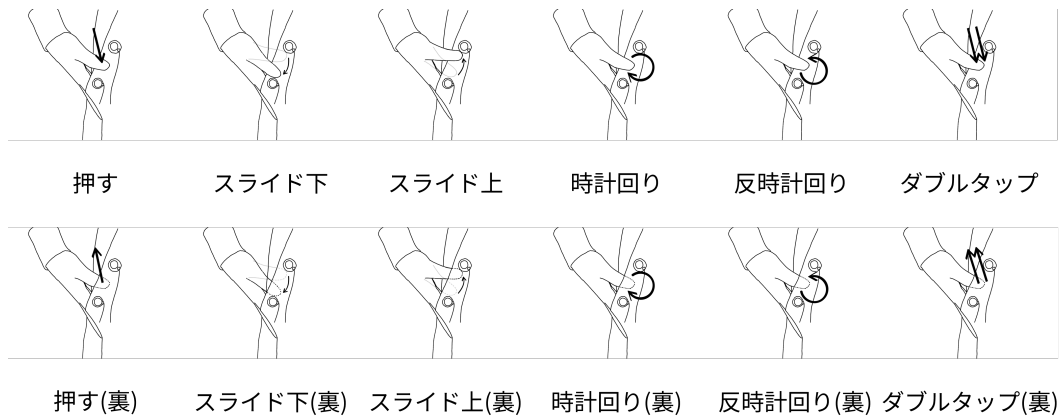


図 1: 提案したズボンのポケットに対する 12 種類のジェスチャ.

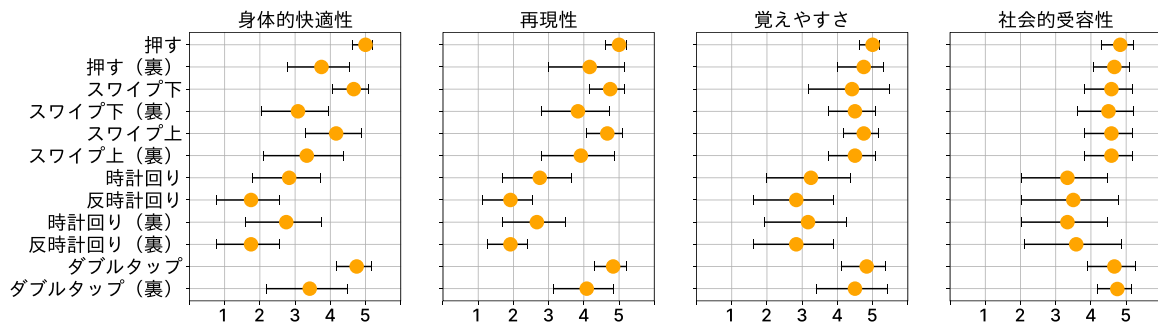


図 2: 各ジェスチャにおける身体的快適性, 再現性, 覚えやすさ, および社会的受容性の平均. スコアが高いほどユーザにとって良い.

4.2.2 再現性

再現性についてもっとも良い平均値のジェスチャは同率で「押す (平均値=4.89, $SD = 0.29$)」および「ダブルタップ (平均値=4.89, $SD = 0.45$)」であり, 続いて「スワイプ下 (平均値=4.67, $SD = 0.49$)」と値が高かった. 再現性について最も低い平均値となったジェスチャは同率で「時計回り (裏) (平均値=1.83, $SD = 0.72$)」および「反時計回り (裏) (平均値=1.83, $SD = 0.58$)」であり, 続いて「反時計回り (平均値=2.58, $SD = 0.90$)」が評価が低かった. 表で行ったジェスチャと裏で行ったジェスチャについて, シャピロ・ウィルク検定を行った結果, 正規性が棄却された. そのためノンパラメトリックな Mann-Whitney U 検定を行い, 有意に表で行ったジェスチャが良い値であった ($u = 3493, p < .01$).

4.2.3 覚えやすさ

覚えやすさについてもっとも良い平均値のジェスチャは同率で「押す (平均値 = 4.92, $SD = 0.29$)」および「ダブルタップ (平均値 = 4.75, $SD = 0.62$)」であり, 続いて同率で「スワイプ下 (平均値 = 4.41, $SD = 1.15$)」および「ス

ワイプ上 (平均値 = 4.41, $SD = 0.49$)」と値が高かった. 覚えやすさについて最も低い平均値となったジェスチャは同率で「時計回り (裏) (平均値 = 2.75, $SD = 1.14$)」および「反時計回り (裏) (平均値 = 2.75, $SD = 1.14$)」であった, 続いて「反時計回り (平均値 = 3.08, $SD = 1.19$)」が評価が低かった. 表で行ったジェスチャおよび裏で行ったジェスチャについて, シャピロ・ウィルク検定を行った結果, 正規性が棄却された. そのためノンパラメトリックな Mann-Whitney U 検定を行った結果, 表と裏の値に有意な差はなかった ($u = 2933, p = 0.15$).

4.2.4 社会的受容性

社会的受容性についてもっとも良い平均値のジェスチャは同率で「押す (平均値 = 4.75, $SD = 0.45$)」であり, 続いて「ダブルタップ (裏) (平均値 = 4.67, $SD = 0.49$)」, 同率で「ダブルタップ (平均値 = 4.67, $SD = 0.49$)」および「押す (裏) (平均値 = 4.58, $SD = 0.51$)」であった. 社会的受容性について最も低い平均値となったジェスチャは同率で「時計回り (平均値 = 3.25, $SD = 1.22$)」および「反時計回り (平均値 = 3.25, $SD = 1.22$)」であった, 続

いて「時計回り（裏）（平均値 = 3.41, $SD = 1.38$ ）が評価が低かった。表で行ったジェスチャおよび裏で行ったジェスチャ比較について、シャピロ・ウィルク検定を行った結果、正規性が棄却された。そのためノンパラメトリックな Mann-Whitney U 検定を行った結果、表と裏の値に有意な差はなかった ($u = 2541, p = 0.83$)。

4.2.5 ユーザの好み

ユーザの好みについて順位付けを行ったアンケート結果を図3に示す。1位を6点、2位を5点、...6位を1点とする点数に変換し、合計を求めた。

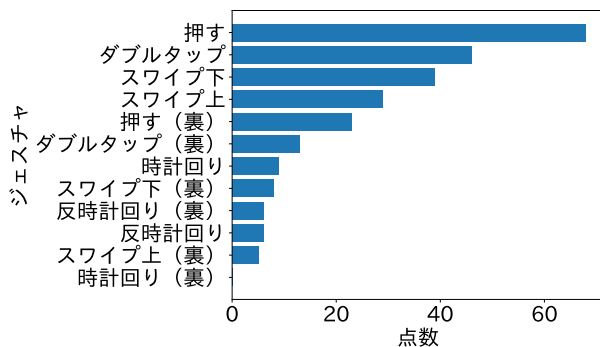


図 3: ユーザの好みについて順位付けを行ったアンケート結果のグラフ。1位を6点、2位を5点、...6位を1点とする点数に変換し、合計した。

4.2.6 半構造化インタビュー

多くの参加者は裏で行うジェスチャより表で行うジェスチャを好んだ (P4, P5, P8, P9, P11)。この理由として、「裏からだど窮屈で速い動作が行えない (P4)」「外側方向への動きに慣れていない (P2)」のように動作の不自由さが挙げられる。また、時計回り、反時計回り、時計回り（裏）、反時計回り（裏）のジェスチャについて難しいという意見が多くあった (P4, P5, P6, P7)。これは円を描くジェスチャの難しい (P7, P8) ことが理由である。また、ジェスチャ間の使いやすさの比較について、「ダブルタップ、スワイプ上は表裏でそこまで変わらなかったが、スワイプ下は裏の方がやりづらい (P8)」「押す、スワイプ上、ダブルタップは裏でジェスチャを行うことによる影響がなかったが、スワイプ下、回転はやりづらかった。(P10)」のように、一概に裏で行うジェスチャが難しいとは言えない。またポケットで行うジェスチャについて、「手がふさがっているときに使用できそう (P1)」「ジェスチャに斬新さを感じた (P5)」といった意見があった一方で、「人差し指が疲れた (P1, P3, P8, P9)」という意見もあった。

5. ジェスチャ認識精度調査

本研究におけるズボンのポケットに対する 12 種類のジェスチャについて、音響センシングを用いたジェスチャの認

識精度、およびユーザビリティを評価するために実験を行った。実験参加者はユーザビリティ調査の参加者と同一である (男性 10 名、女性 2 名、平均年齢 23.8 歳、 $SD=0.94$, ID=P1-P12)。

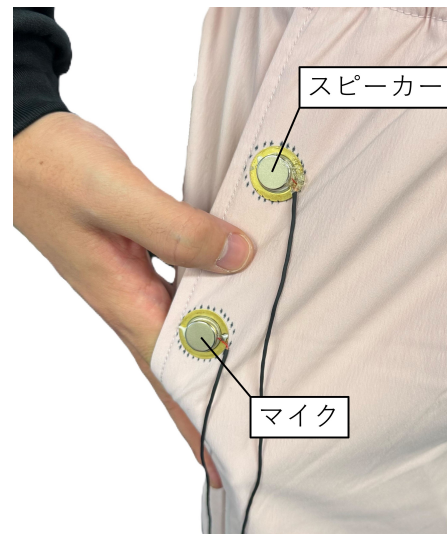


図 4: 圧電素子をポケットの指定された部分に貼付した様子。圧電素子の間隔は先行研究と同じ 7cm である。

5.1 実験手順

実験参加者は、事前アンケートに回答したのち、実験についての説明を受けた。その後、実験に用いるズボン（ナイロン 96%、ポリウレタン 4%）を着用し、圧電素子をポケットの指定された部分に貼付した（図 4）。

圧電素子をポケットに貼付したのち、実験参加者は事前に撮影されたジェスチャの動画をもとにジェスチャの練習を行った。練習後、実験実施者は実験参加者が全てのジェスチャについて再現できることを確認したのち、実験を開始した。実験時、実験参加者は立位でジェスチャを行った。実験は 12 セッション行い、1 セッションでは 12 種類のジェスチャ（図 1）を行った。ジェスチャを行う順番は参加者ごとにランダムで決定された。実験参加者がセッション内にてジェスチャを行う時、次に行うジェスチャは実験実施者によって指示される。ジェスチャの計測開始の合図は実験実施者によって口頭で発せられる。その後の 3 秒間圧電素子を通じて周波数特性が計測される。セッション内で 12 種類ジェスチャを全て行くと 1 セッションが完了する。実験参加者は 1 セッションごとに、センサ位置を規定の位置に戻すように求められた。6 回目のセッションと 7 回目のセッションの間に最大 5 分間の休憩時間を設けた。実験参加者は 6 回目のセッション終了時にセンサをズボンから外し、7 回目のセッション開始時にセンサをズボンに貼付した。12 回のセッションが終了したのち、実験参加者は半構造化インタビューに回答した。その後、実験後アン

ケートに回答した。

この実験を通じて、1728 点 (=12 試行 × 12 セッション × 12 人) のデータを収集した。

5.2 結果

本システムの性能を評価するために、12 人の実験参加者から取得したデータを用いて SVM モデルを作成した。トレーニングデータおよびテストデータの比は 8:2 である (トレーニングデータ: テストデータ=1382:346)。結果を図 5 に示す。平均正答率は 43.5%，平均 F 値は 41.6%であった。

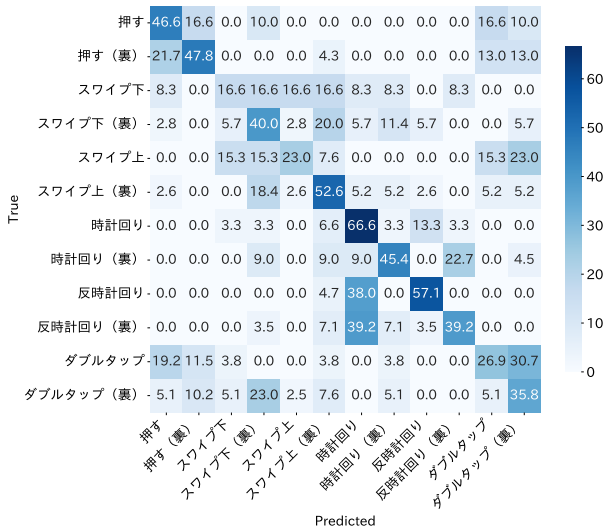


図 5: 各ジェスチャの認識精度。

また、すべてのジェスチャを高い精度にて認識することが難しかったため、ジェスチャの総数を削減した。具体的に、図 3 を参考に、ユーザが好むジェスチャのうち上位 5 位までを抽出し、認識した。トレーニングデータおよびテストデータの比は 8:2 である (トレーニングデータ: テストデータ=441:111)。結果を図 6 に示す。平均正答率は 51.5%，平均 F 値は 49.1%であった。

6. 議論

本節では、4 節および 5 節にて得られた結果に対する議論を述べる。

6.1 ユーザスタディ調査

身体的快適性、再現性、覚えやすさ、および社会的受容性の 4 つの指標においてタップ、およびダブルタップが良い評価を受けている。また、時計回り (裏)、反時計回り (裏) が悪い評価を受けた。この結果は、半構造化インタビューからジェスチャへの慣れ、およびジェスチャの難易度によるものであると考えられる。表で行ったジェスチャと裏で行ったジェスチャについて 4 つの指標を比較した

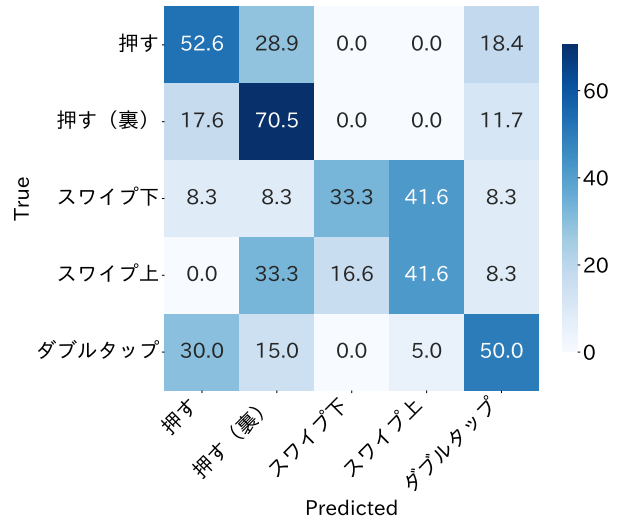


図 6: ユーザが好むジェスチャのうち、上位 5 位までを抽出し認識した結果。

時、身体的快適性、再現性について、表のジェスチャが裏のジェスチャより有意に良い値であった。一方で覚えやすさ、および社会的受容性については、表のジェスチャと裏のジェスチャの値に有意な差はなかった。これは、裏で行うジェスチャは行うのは難しいが、他者にジェスチャを見られないため、社会的受容性が低いことを示す。

また、ユーザの好みおよび半構造化インタビューの結果から、ダブルタップ、スワイプ上のようなジェスチャはポケットの表裏どちらで行っても負荷が変わらないと回答するユーザが何名かいた。この例のように、必ずしも裏で行うジェスチャが難しいわけではない。また、ポケットで行うジェスチャについて、手がふさがっているときなどの利用がユーザによって想定された。一方でユーザは、人差し指を用いてポケットの生地を伸ばす動作は疲労が溜まったと報告しているため、ジェスチャを行う手の動きは改善する必要がある。

6.2 各ジェスチャの認識精度

図 5 ジェスチャ間の認識精度に差があることが示された。最も精度が高かったジェスチャは、時計回り (正答率 66.6%) であった。最も精度が低かったジェスチャは、スワイプ下 (正答率 16.6%) であった。表裏のジェスチャはいずれも互いに混同される傾向にあった。さらに、対照的なジェスチャも互いに混同される傾向にあり、スワイプ (下/上)、および時計回り/反時計回りが誤認された。また、押す/押す (裏) およびダブルタップ/ダブルタップ (裏) の混同もあった。これらのジェスチャは共通の動作があるため、得られる特徴が類似し、誤認識が発生した可能性がある。そこで、センサの位置、貼付手法、画像化手法ならびに学習モデルを改善することによって、類似のジェスチャにおける異なる特徴の認識を試みる。

7. おわりに

アクティブ音響センシングを使用した通常の衣服のジェスチャ認識手法を提案した。本研究では、取り外し可能なデバイスのペアを使用して、通常の衣服でのさまざまなジェスチャを認識する。ユーザビリティ調査によって、ユーザが好むジェスチャは、押す、ダブルタップ、およびスワイプ下であることが示された。また、ポケットの表および裏のジェスチャを比較した際、ポケットの表面で行うジェスチャは有意に身体的快適性および再現性の値が高かった。ユーザごとの分類器の評価結果では、12のジェスチャに対してf値が44.1%であった。また、ユーザが好む5つのジェスチャに対してf値が47.1%であった。

今後は、ユーザビリティおよび認識精度の両方が高いジェスチャを調査する。また、認識精度を向上させるため、計測手法および学習手法の改善を実施する。

参考文献

- [1] Huang, D., Zhang, X., Saponas, T. S., Fogarty, J. and Gollakota, S.: Leveraging Dual-Observable Input for Fine-Grained Thumb Interaction Using Forearm EMG, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, Association for Computing Machinery, pp. 523–528 (2015).
- [2] Watanabe, H., Terada, T. and Tsukamoto, M.: Gesture Recognition Method Utilizing Ultrasonic Active Acoustic Sensing, *Journal of Information Processing*, Vol. 25 (2017).
- [3] Mujibiya, A., Cao, X., Tan, D. S., Morris, D., Patel, S. N. and Rekimoto, J.: The Sound of Touch: On-body Touch and Gesture Sensing Based on Transdermal Ultrasound Propagation, *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, Association for Computing Machinery, pp. 189–198 (2013).
- [4] Knight, J. and Baber, C.: A Tool to Assess the Comfort of Wearable Computers, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 47, No. 1 (2005).
- [5] Hanuska, A., Chandramohan, B., Bellamy, L., Burke, P., Ramanathan, R. and Balakrishnan, V.: Smart clothing market analysis, Technical report, University of California, Berkeley (2016).
- [6] Parzer, P., Perteneder, F., Probst, K., Rendl, C., Leong, J., Schuetz, S., Vogl, A., Schwoedlauer, R., Kaltenbrunner, M., Bauer, S. and Haller, M.: RESi: A Highly Flexible, Pressure-Sensitive, Imperceptible Textile Interface Based on Resistive Yarns, *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, Association for Computing Machinery, pp. 745–756 (2018).
- [7] Poupyrev, I., Gong, N.-W., Fukuhara, S., Karagozler, M. E., Schwesig, C. and Robinson, K. E.: Project Jacquard: Interactive Digital Textiles at Scale, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, Association for Computing Machinery, p. 4216–4227 (2016).
- [8] Aigner, R., Pointner, A., Preindl, T., Danner, R. and Haller, M.: TexYZ: Embroidering Enameled Wires for Three Degree-of-Freedom Mutual Capacitive Sensing, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, Association for Computing Machinery (2021).
- [9] Wu, T., Fukuhara, S., Gillian, N., Sundara-Rajan, K. and Poupyrev, I.: ZebraSense: A Double-Sided Textile Touch Sensor for Smart Clothing, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, Association for Computing Machinery, p. 662–674 (2020).
- [10] Amesaka, T., Watanabe, H., Sugimoto, M. and Shizuki, B.: Gesture Recognition Method Using Acoustic Sensing on Usual Garment, Vol. 6, No. 2 (2022).
- [11] Orth, M., Post, R. and Cooper, E.: Fabric Computing Interfaces, *Proceedings of the 1998 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, Association for Computing Machinery, p. 331–332 (1998).
- [12] Molla, M. T. I., Compton, C. and Dunne, L. E.: Launderability of Surface-Insulated Cut and Sew E-Textiles, *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '18, Association for Computing Machinery, p. 104–111 (2018).
- [13] Ozbek, S., Molla, M. T. I., Compton, C. and Holschuh, B.: Novel Manufacturing of Advanced Smart Garments: Knitting with Spatially-Varying, Multi-Material Monofilament, *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '18, Association for Computing Machinery, pp. 120–127 (2018).
- [14] Hamdan, N. A.-h., Voelker, S. and Borchers, J.: Sketch&Stitch: Interactive Embroidery for E-Textiles, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (2018).
- [15] Buechley, L., Eisenberg, M., Catchen, J. and Crockett, A.: The LilyPad Arduino: Using Computational Textiles to Investigate Engagement, Aesthetics, and Diversity in Computer Science Education, *Proceedings of the 2008 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, Association for Computing Machinery, p. 423–432 (2008).
- [16] Post, E. R., Orth, M., Russo, P. R. and Gershensfeld, N. A.: E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing, *IBM Systems Journal*, Vol. 39, No. 3&4 (2000).
- [17] Olwal, A., Moeller, J., Priest-Dorman, G., Starner, T. and Carroll, B.: I/O Braid: Scalable Touch-Sensitive Lighted Cords Using Spiraling, Repeating Sensing Textiles and Fiber Optics, *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings*, UIST '18 Adjunct, Association for Computing Machinery, p. 203–207 (2018).
- [18] Luo, Y., Wu, K., Palacios, T. and Matusik, W.: KnitUI: Fabricating Interactive and Sensing Textiles with Machine Knitting, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, Association for Computing Machinery (2021).
- [19] Schneegass, S. and Voit, A.: GestureSleeve: using touch sensitive fabrics for gestural input on the forearm for controlling smartwatches, *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '16, Association for Computing Machinery, pp. 108–115 (2016).
- [20] Karrer, T., Wittenhagen, M., Lichtschlag, L., Heller, F. and Borchers, J.: Pinstripe: Eyes-Free Continuous Input on Interactive Clothing, *Proceedings of the 2011*

- CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, Association for Computing Machinery, p. 1313–1322 (2011).
- [21] Heller, F., Ivanov, S., Wacharamanotham, C. and Borchers, J.: FabriTouch: Exploring Flexible Touch Input on Textiles, *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, Association for Computing Machinery, p. 59–62 (2014).
 - [22] Ueda, K., Terada, T. and Tsukamoto, M.: Evaluation of Input/Output Interface Using Wrinkles on Clothes, *Journal of Data Intelligence*, Vol. 1, No. 1 (2018).
 - [23] Parzer, P., Sharma, A., Vogl, A., Steimle, J., Olwal, A. and Haller, M.: SmartSleeve: Real-time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, Using a Hybrid Gesture Detection Pipeline, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 565–577 (2017).
 - [24] Wu, T.-Y., Qi, S., Chen, J., Shang, M., Gong, J., Seyed, T. and Yang, X.-D.: Fabriccio: Touchless Gestural Input on Interactive Fabrics, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, Association for Computing Machinery, p. 1–14 (2020).
 - [25] Lorussi, F., Rocchia, W., Scilingo, E., Tognetti, A. and de rossi, D.: Wearable, Redundant Fabric-Based Sensor Arrays for Reconstruction of Body Segment Posture, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 4, No. 6 (2004).
 - [26] Gioberto, G.: Garment-Integrated Wearable Sensing for Knee Joint Monitoring, *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program*, ISWC '14 Adjunct, Association for Computing Machinery, p. 113–118 (2014).
 - [27] Gioberto, G., Coughlin, J., Bibeau, K. and Dunne, L. E.: Detecting Bends and Fabric Folds Using Stitched Sensors, *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '13, Association for Computing Machinery, p. 53–56 (2013).
 - [28] Mattmann, C., Amft, O., Harms, H., Troster, G. and Clemens, F.: Recognizing Upper Body Postures using Textile Strain Sensors, *Proceedings of the 2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '07, Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 29–36 (2007).
 - [29] Liu, R., Shao, Q., Wang, S., Ru, C., Balkcom, D. and Zhou, X.: Reconstructing Human Joint Motion with Computational Fabrics, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, No. 1, pp. 19:1–19:26 (2019).
 - [30] Sardini, E., Serpelloni, M. and Pasqui, V.: Wireless Wearable T-Shirt for Posture Monitoring During Rehabilitation Exercises, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 2 (2015).
 - [31] Kiaghadi, A., Baima, M., Gummeson, J., Andrew, T. and Ganesan, D.: Fabric as a Sensor: Towards Unobtrusive Sensing of Human Behavior with Triboelectric Textiles, *SenSys '18*, Association for Computing Machinery, pp. 199–210 (2018).
 - [32] Kiaghadi, A., Homayounfar, S. Z., Gummeson, J., Andrew, T. and Ganesan, D.: Phyjama: Physiological Sensing via Fiber-Enhanced Pyjamas, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, No. 3 (2019).
 - [33] Jia, J., Xu, C., Pan, S., Xia, S., Wei, P., Noh, H., Zhang, P. and Jiang, X.: Conductive Thread-Based Textile Sensor for Continuous Perspiration Level Monitoring, *Sensors*, Vol. 18, No. 11 (2018).
 - [34] Hudson, S. E., Harrison, C., Harrison, B. L. and LaMarca, A.: Whack Gestures: Inexact and Inattentive Interaction with Mobile Devices, *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, Association for Computing Machinery, pp. 109–112 (2010).
 - [35] Ku, P.-S., Gong, J., Wu, T.-Y., Wei, Y., Tang, Y., Ens, B. and Yang, X.-D.: Zippro: The Design and Implementation of An Interactive Zipper, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, Association for Computing Machinery, pp. 1–13 (2020).
 - [36] Dementyev, A., Vega Gálvez, T. and Olwal, A.: SensorSnaps: Integrating Wireless Sensor Nodes into Fabric Snap Fasteners for Textile Interfaces, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, Association for Computing Machinery, pp. 17–28 (2019).
 - [37] Kubo, Y., Koguchi, Y., Shizuki, B., Takahashi, S. and Hilliges, O.: AudioTouch: Minimally Invasive Sensing of Micro-Gestures via Active Bio-Acoustic Sensing, *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '19, Association for Computing Machinery, pp. 1–13 (2019).
 - [38] Takemura, K., Ito, A., Takamatsu, J. and Ogasawara, T.: Active Bone-conducted Sound Sensing for Wearable Interfaces, *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology*, UIST '11 Adjunct, Association for Computing Machinery, pp. 53–54 (2011).
 - [39] Ono, M., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects Using Active Acoustic Sensing, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, Association for Computing Machinery, pp. 31–40 (2013).
 - [40] Iwase, D., Itoh, Y., Shin, H. and Onoyoe, T.: SenseSurface: Using Active Acoustic Sensing to Detect What is Where, *Journal of Information Processing*, Vol. 60, No. 10 (2019).
 - [41] Xu, X., Shi, H., Yi, X., Liu, W., Yan, Y., Shi, Y., Mariakakis, A., Mankoff, J. and Dey, A. K.: EarBuddy: Enabling On-Face Interaction via Wireless Earbuds, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, Association for Computing Machinery, pp. 1–14 (2020).