

能動的音響計測に基づくマイクロハンドジェスチャ認識

久保 勇貴^{1,a)} 安藤 宗孝^{1,b)} 志築 文太郎^{2,c)} 高橋 伸^{2,d)}

概要：能動的音響計測に基づくマイクロハンドジェスチャ認識手法を示す。本手法は、手の甲に貼付けられた一組のスピーカとマイクによって、手指の細やかな動作であるマイクロハンドジェスチャを認識する。また、本研究において設計したマイクロハンドジェスチャはテンキーやジョイスティックなどが持つメタファに基づくため、ユーザはジェスチャを想起しやすい。

1. はじめに

情報機器の操作手段としての手の状態を利用した操作（ハンドジェスチャ）の中でも細やかな動作のものはマイクロハンドジェスチャと呼ばれ、ジェスチャに伴う手指の動作がわずかであるために、屋外において人の注目を集めにくい、ジェスチャを行うことに伴う疲労が少ない、という特徴を有する。これまでも、親指をわずかに動かす、それぞれの指同士を合わせる [16] 等が試みられている。

また、マイクロハンドジェスチャの認識手法もこれまでにいくつか提案されている（例：カメラ [2] を用いた手法、電波 [16] を用いた手法）。しかし、これらの手法では多くのマイクロハンドジェスチャを認識することが困難であった。これらの研究に対して、本研究では多くのマイクロハンドジェスチャを認識するための新たな認識手法を試みる。

本稿において、能動的音響計測に基づくマイクロハンドジェスチャ認識手法を示す。本手法は、一組のスピーカとマイクとして機能する2つの piezo 素子をユーザの手の甲に貼付け（図 1）、手の甲の振動応答を取得する。この取得した振動応答より特徴量を生成し、これを入力とした機械学習によりマイクロハンドジェスチャを認識する。なお本手法が認識に用いるセンサは手の甲に貼付けられた piezo 素子のみであるため、手指の動作を阻害しない。また、本研究において設計したマイクロハンドジェスチャはテンキーおよびジョイスティックなどが持つメタファに基づく

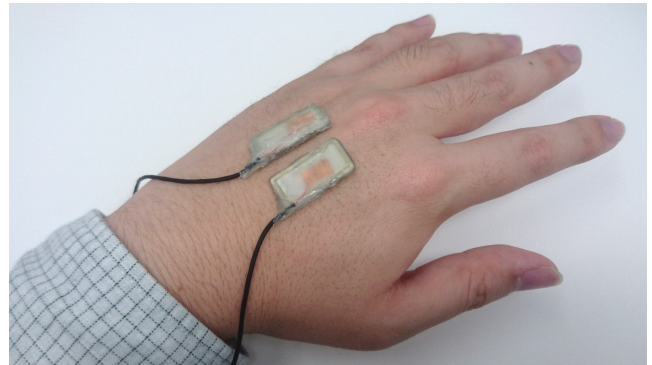


図 1 手の甲における能動的音響計測。

ため、ユーザはジェスチャを想起しやすい。

我々は提案手法のプロトタイプシステムを実装したので本稿において報告する。また提案手法のジェスチャ認識精度評価実験、および piezo 素子の貼付け部位による認識精度への影響調査実験の2つの実験を行ったため、これらの結果を述べる。

2. 関連研究

これまでにハンドジェスチャ認識の手法・システムが多く研究開発されている。本節ではこれらを示す、なお、これらの中でも提案手法と特に関連が強い音響計測に基づくものを別に議論する。

2.1 ハンドジェスチャ認識

ハンドジェスチャ認識の研究に関して、システムの設置形態により環境設置型と身体装着型に分け、それぞれ述べる。

2.1.1 環境設置型

カメラを用いた手法・システム LeapMotion [14] は手に赤外線 LED を照射し、その変化を赤外線カメラを用いて計測することによりハンドジェスチャを認識する。Taylor

¹ 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan
² 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University
of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan
a) kubo@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
b) ando@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
c) shizuki@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
d) shin@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

et al. [25] は複数台のカメラを用いて高いフレームレートにて高精度に手形状を認識する手法を示した。Song et al. [23] はスマートフォン、スマートウォッチ、およびラップトップPCに搭載されているRGBカメラを用いて、ユーザおよび照明の変化に対しロバストに手形状を認識する手法を示した。これらは正確に手形状を認識できる一方、他方の手および物によって認識対象が隠れるというオクルージョンの問題を持つ。この問題に対して、能動的音響計測に基づく提案手法はオクルージョンの問題を持たない。

カメラ以外を用いた手法 電波および静電容量、距離の変化を用いてジェスチャ認識を行う手法が示されている。WiFinger [15] はWi-Fiを使用するデバイスの近くにおいてジェスチャを行った際のチャンネル状態情報の変化を取得することにより、どのようなジェスチャを行ったかを認識する。Touché [21] は導電物体を人が触れた際の静電容量の変化を取得し、導電物体に対するジェスチャを認識する。Soli [16] はミリ波電波を使用したレーダセンサであり、ジェスチャ認識に使用することができる。Interaction with Soli [27] は前述したSoliを用いた際のジェスチャ認識に関して、豊富なジェスチャを認識でき、高いジェスチャ認識率となるアルゴリズムを示している。Pyro [5] は焦電形赤外線センサを用いることにより細やかな親指の動きを用いたジェスチャを認識する。これらの研究は高精度にハンドジェスチャを認識でき、マイクロハンドジェスチャの認識も可能である。我々の手法は、これらの研究と同様に細やかなジェスチャの認識を身体装着型システムを想定して行う。

2.1.2 身体装着型システム

身体装着型システムを用いてハンドジェスチャを認識する手法が研究開発されている。

カメラを用いた手法・システム Digits [11] は手首装着型のカメラを用いて指の動作を認識する手法である。CyclopsRing [2] は指装着型システムであり、指の間に魚眼カメラを設置し、手形状および指同士の接触を認識する。これらは環境設置型システムと同じくオクルージョンの問題を持つ。一方、能動的音響計測に基づく提案手法はオクルージョンの問題を持たない。また、手指に装着したカメラを用いて指を撮影するにはカメラを手指の近くに設置する必要があるため、カメラによって手指の動作が妨げられる。提案手法においては、センサは手の甲に設置されるため、手指の動作は妨げられにくい。

距離センサを用いた手法・システム ThumbSlide [22] はスマートウォッチのベルト内側に取り付けた赤外線距離センサを用いて親指を動かした際の手首表面の起伏の変化を取得し、親指の動きを認識するシステムである。SensIR [19] はブレスレットの内側に取り付けられた赤外線距離センサアレイを用いてハンドジェスチャの認識を行うシステムである。手首を透過する赤外線および手首表面

にて反射される赤外線の両方を取得することにより、高い認識率にてハンドジェスチャを認識できる。これらの赤外線距離センサを用いたシステムは、太陽光による影響が大きく屋外にて使いにくい。これに対して、我々の手法は、太陽光の影響を受けにくく、屋外における可用性が高い。

加速度センサを用いた手法・システム Serendipity [29] は既存のスマートウォッチに組み込まれている加速度センサを用いて細かい指のジェスチャを認識する研究である。ViBand [13] はスマートウォッチの加速度センサを高い周波数にて駆動させることにより加速度の変化を詳細に取得し、ハンドジェスチャを認識する。これらの加速度センサを用いた研究は加速度を用いるため、静止した手指の状態といった加速度が変化しない場合に認識を行うことができない。提案手法は能動的音響計測を用いるため、静止した手指の状態といった加速度が変化しない場合においても認識が可能である。

電位変化を用いた手法・システム GestureWrist [10] は複数電極間の静電容量値を用いてハンドジェスチャの認識を行っている。同様に、Tomo [32] は手首に複数の電極を巻き付けることにより、手首の電氣的抵抗の変化からハンドジェスチャを認識するデバイスである。MYO [26] は9軸IMUおよび表面筋電位センサを用いて手の握り及び手首の傾けを認識することができる。これらの電位変化を用いた手法はハンドジェスチャの認識精度向上のために多数の電極を手に取り付ける必要があるが、提案手法においてはピエゾ素子2つのみを用いてハンドジェスチャの認識を行うことができる。

本手法と特に関連する研究として、手の甲を利用したハンドジェスチャ認識に関する研究 [17], [31] がある。特に、BackHand [17] は、手の甲を利用したハンドジェスチャ認識手法を最初に提案した研究である。BackHandは複数のひずみセンサアレイから成るシート状のセンサを手の甲に貼付け、ジェスチャ認識を行う。これに対して、我々の提案手法は、BackHandにおいて提案されているハンドジェスチャ以外に、各指の末節、中節、および基節と親指によるピンチジェスチャ、親指の空中および押下時における左右位置、他方の手による手のひらへのタッチ等のマイクロハンドジェスチャの認識を行う。

2.2 音響計測

音響計測を用いてハンドジェスチャを認識する研究が行われている。Touch&Activate [18] は能動的音響計測を使用することにより、既存物体に対するタッチジェスチャを認識することができる手法である。Hambone [4] は2つのピエゾ素子を手首に装着し、ユーザが手を動かした際に発する音をピエゾ素子を用いて電圧変化に変換し、得られた電圧変化の値を隠れマルコフモデルを用いて識別することによりハンドジェスチャを認識するシステムである。

Skinput [8] はユーザが腕をタッチした際に腕の内部を伝わる振動をマイクを用いて取得し、取得した振動の違いから腕に対する指のタッチ位置を認識するシステムである。Acoustruments [12] はスマートフォンに内蔵されたスピーカとマイクをつなぐチューブを作製し、スピーカから発した音がチューブの変形に伴って変化することを利用することにより、チューブに対するジェスチャを認識する手法である。SoundCraft [7] はスマートウォッチの下にマイクロフォンアレイを配置し、音響情報から他方の手によるスマートウォッチ上方におけるハンドジェスチャおよび手同士の接触を伴うハンドジェスチャを認識するシステムである。また、ハンドジェスチャが行われた位置も認識できる。Takemura et al. [24] は骨伝導マイクを用いて肘の角度および指を用いてタップした腕の位置の測定を行った。Braun et al. [1] は机に対し能動的音響計測を行い、机に対してのタッチ、手の甲によるノックおよび手指を用いたスワイプを認識する手法を示している。Okawa et al. [20] は振動アクチュエータおよび接触マイクロフォンを同じ手の異なる指に取り付けることにより、振動の伝わり方の変化から異なる2本の指のなす角度を推定する手法を示した。Watanabe et al. [28] は超音波を用いた能動的音響計測により、21種類の身体動作(例:座っている, 書いている)の認識を行った。Kato et al. [9] は手首に振動アクチュエータおよび接触マイクロフォンを装着し、取得した音を機械学習によって分類することによりハンドジェスチャを認識する手法を示した。Yokota et al. [30] は手首に装着したリストバンドに配置されたスピーカおよびマイクを用いてハンドジェスチャの認識を行う手法を示している。また、他方の手の指先にさらにマイクを取り付けることにより、腕に対するタッチの位置を認識する。

このように音響計測を用いてジェスチャを認識する研究は多数行われてきている。我々の手法はこれらの研究に対して、能動的音響計測を利用しより多くのジェスチャかつより細やかなジェスチャの認識を試みる。

3. ジェスチャ認識システム

マイクロハンドジェスチャを認識するため、能動的音響計測を用いたシステムを実装した。実装したシステムの構成を図2に示す。実装したシステムは、 piezo素子部およびオーディオインターフェース (Steinberg UR22), PC (MacBook Pro 2017, High Sierra 10.13.3) から成る。piezo素子部は2つのpiezo素子から構成され、piezo素子はそれぞれオーディオインターフェースのスピーカ端子およびマイクロフォン端子に接続されている。能動的音響計測においては、一方のpiezo素子よりスイープ信号を発信させ貼り付けた物体を振動させ、もう一方のpiezo素子を用いてこのときの振動応答を取得する。提案手法においては、piezo素子を手の甲に貼付け、手の甲における振動応答を

取得した。取得した振動応答はオーディオインターフェースを介して音声データとしてPCに取り込まれる。この取り込まれたデータをFast Fourier Transform (FFT) により周波数成分に変換し、機械学習を用いて分類する事によりマイクロハンドジェスチャを認識する。今回は機械学習のアルゴリズムとしてSupport Vector Machine (SVM) を用いた。

発信される信号は20msの間に20kHzから40kHzまでスイープする信号である。これをサンプリングレートを96kHzに設定したオーディオインターフェースを介して発信させ、もう一方のpiezo素子より取得する。得られた振動応答は96kHzの音声データとしてオーディオインターフェースを介してにて取得され、この音声データが8192サンプル取得されるごとにFFTを行う。また、FFTを行う前に窓関数としてハニング窓を適用した。FFTを用いて0Hzから48kHzの周波数特性4096データを取得する。これに対してダウンサンプリングを行い、4096データの内の20kHzから40kHzの範囲内のデータより400データを抽出した。この抽出したデータを特徴量とし、LIBSVM [3] によりジェスチャの分類を行う。LIBSVMはSVM-typeをC-SVC, kernelタイプをrbfカーネルとし、その他のパラメータはデフォルトとした。

4. ジェスチャセット

本研究において設計したマイクロハンドジェスチャはテンキーおよびジョイスティックなどが持つメタファに基づくため、ユーザはジェスチャを想起しやすい。これらのジェスチャおよびその組み合わせであるジェスチャセットに関して述べる。

4.1 各指の節と親指によるピンチジェスチャセット

指同士を合わせることを決定動作として用いるジェスチャが提案されている [16]。これを基に、図3に示すジェ



図2 システム構成図.

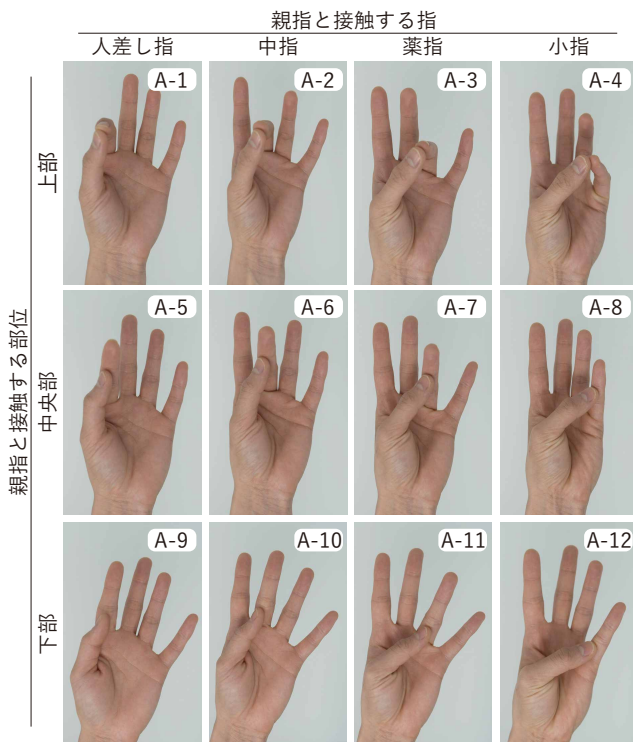


図 3 各指の節へのピンチジェスチャセット.

スタセセットは、携帯電話のテンキーのように指の節によって区切られた部位へ親指を合わせることを決定動作として使用するものである。このジェスチャセットは各指の先端同士のタッチだけではなく、指の節によって区切られた部位へのタッチを識別する。よって、ユーザは 12 個の選択肢より行う動作を選ぶことができる。また、本ジェスチャセットは、シースルー型のヘッドマウントディスプレイと併用することによって、各部位へのタッチにより実行される機能を事前にユーザに提示することも可能である。

4.2 親指の左右動作および人差し指へのタッチジェスチャセット

図 4 に示すジェスチャセットは、ジョイスティックのように親指を動かすことを選択動作とし、親指を人差し指へタッチすることを決定動作とするジェスチャセットである。図 4 に示すようにこのジェスチャセットでは左、中央、および右の 3 段階の親指の位置を認識する。加えて、人差し指への押下（左、中央、および右）も認識する。

4.3 手のひらへのタッチジェスチャセット

図 5 に示すジェスチャセットは、ゲームコントローラの十字キーを基に、手のひらを上部、左部、中央部、右部、下部に 5 分割し、各部位へのタッチを認識するジェスチャセットである。

5. ジェスチャ認識精度評価実験

提案したジェスチャセットの認識精度を評価するため、

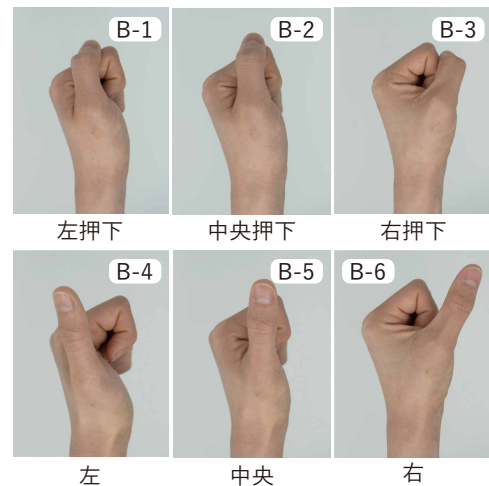


図 4 親指の左右動作および人差し指へのタッチジェスチャセット.

男性 4 名を実験協力者とした実験を行った。実験においては、図 3-図 5 の各ジェスチャセットごとの認識精度および全ジェスチャセットを使用した際の認識精度を調査した。

5.1 実験手順

実験協力者の手の甲に piezo 素子を手の甲の中央の筋肉による筋を中心として piezo 素子の間隔が 10 mm となるよう医療用両面テープを用いて貼付けた。実験協力者には、まず実験の説明を口頭にて行い、その後目の前にあるディスプレイに提示される指示に従い、指定されたジェスチャを行ってもらった。このとき、提示されるジェスチャの順序はランダムとした。実験では、ジェスチャを行っている間の音響特性を 5 秒間に 20 データ取得した。図 3-図 5 の計 24 個のジェスチャを 1 度ずつ行ってもらうことを 1 セッションとし、これを 5 セッション行ってもらった。よって、この実験において取得したデータ数は計 9600 データとなった (4 人 × 5 セッション × 24 ジェスチャ × 20 データ)。

5.2 実験結果

Leave one-session out cross-validation により Weka Took Kit [6] を用いて各実験協力者毎におけるジェスチャ認識精度を求めた。このときの機械学習アルゴリズムとして SVM を用いる。SVM は全てのパラメータをデフォルト値として使用した。評価に用いたジェスチャセットは、図 3-図 5 の各ジェスチャセットおよび全ジェスチャセットとした。図 3 および図 4 のジェスチャセットは、図 5 の「なし」ジェスチャを加え評価に使用した。すなわち、図 3 および図 4、図 5、図 3-図 5 の 13 および 7、6、24 個のジェスチャをそれぞれジェスチャセットとしその認識精度を求めた。結果、図 3-図 5 の各ジェスチャセットの認識精度がそれぞれ 89.2% (SD = 8.4) および 65.1% (SD = 14.4), 83.2% (SD = 20.8) であった。また、図 3-図 5 を 1 つのジェスチャセットとした場合の認識精度は 77.1%

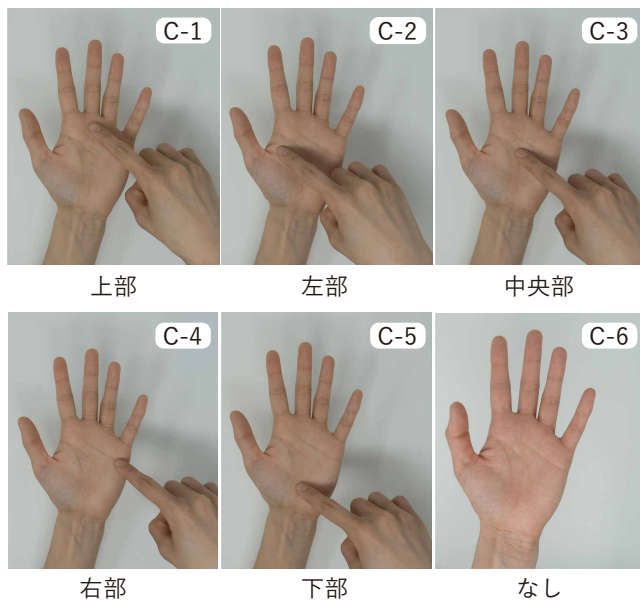


図 5 手のひらへのタッチジェスチャセット。

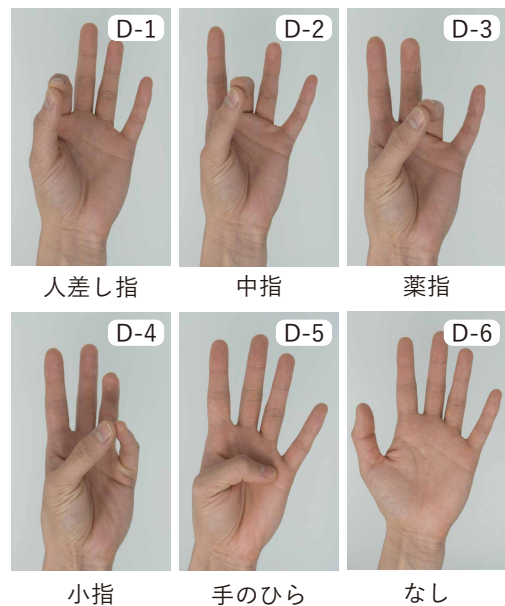


図 6 親指による各指および手のひらへのピンチジェスチャセット。

(SD = 10.9) であった。この混同行列を表 1 に示す。

5.3 考察

実験結果の解析結果より、最初のセッションにおいて取得したデータをテストデータとした際の精度が他のセッションのデータをテストデータとした場合と比べ、精度が低いことが見受けられた。これは、行ってもらったジェスチャが 24 個と多く、実験協力が提示されたジェスチャについて把握する事が難しかったため、ジェスチャを再現する事に気を取られた結果、力んでしまうなど自然体とは異なる状態にてジェスチャを行ってしまった可能性がある。このため、最初のセッションとその後の慣れが生じたセッションにおいて取得したデータに差違が発生したと考えられる。今後の実験においては、実験協力が自然体にてジェスチャを行う事ができるよう、練習セッションを行うまたはジェスチャを確認する時間を取るなどの手順を含める必要がある。

ジェスチャの認識に使用している振動応答は、ジェスチャ以外にも、ほかの指の曲げ具合および手首の回転具合に応じて変化する。そのため、各ジェスチャのデータを取得する際にピエゾ素子を貼り付けている手の指の曲げ具合および手首の回転具合が異なる場合、これらの影響によってジェスチャ認識精度が低下する可能性が高い。このため、ジェスチャを行っている指の曲げ具合および手首の回転具合をセッション毎にそろえる事ができればジェスチャの認識精度が高くなると考えられる。しかし、実際の使用を想定した場合、指の曲げ具合および手首の回転具合をそろえることは難しいため、学習回数を増やした上で少しづつ他の指および手首を動かしたデータを学習し、これらの影響を受けにくい学習データを作製する必要がある。

このような学習データは様々な姿勢が想定される日常生活における使用を考える上においても重要である。

図 4 に示す親指を用いたジェスチャセットの認識精度が他のジェスチャセット比で約 20% 低い結果となった。これは、親指を上げているもしくは下げているジェスチャの区別を実験時に実験協力が行えなかったことが原因だと考えられる。この原因として、ジェスチャの提示を 1 枚の画像によって行ったために、親指の立て具合を実験協力が教示できなかったと考えられる。

6. 貼付け部位の認識精度への影響評価実験

次に、ピエゾ素子を貼付ける部位がジェスチャ認識精度へ影響を与えるかどうか調査するため、ピエゾ素子を貼り付ける部位を手首または手の甲とした実験を行った。

6.1 実験手順

実験協力はジェスチャ認識精度評価実験と同じ 4 人とした。また、本実験は提案手法の基本性能を調査することが目的であるため、6 個のジェスチャから成る小規模なジェスチャセットを使用した。使用したジェスチャセットを図 6 に示す。本実験では、ジェスチャ認識精度評価実験と異なり、ピエゾ素子を貼付ける部位を条件とし、各条件において実験を行った。貼付け部位の条件として、手首および手の甲を割り当てた。また、ジェスチャ認識精度評価実験と異なる手順として、実験協力を無作為に 2 つのグループに分け、先にどちらの貼付け部位を用いて実験を行うかをグループごとに異なるものとした。これによって、2 つの条件の順序効果による影響をなくした。また、手首にピエゾ素子を貼付ける際には、橈骨茎状突起にピエゾ素子の先端を合わせ、ピエゾ素子間の間隔が 10 mm となる

表 1 24 個のジェスチャ認識精度の混同行列.
認識されたジェスチャ

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	A-11	A-12	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
A-1	72.5	5.0	0.3	8.3	9.8	0	0	0.3	0	0.3	0	0	0	1.8	0	0	0	2.0	0	0	0	0	0	0
A-2	6.0	83.8	0	0.3	5.0	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-3	0	0	88.3	6.5	0.3	0	0	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-4	0	0	7.5	81.0	0	0	0.3	10.8	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-5	5.0	0	0	5.0	69.5	5.3	0	0	5.0	0	0	0	0	0	0	5.0	0	5.0	0	0	0.3	0	0	0
A-6	0	5.3	0	0	0	94.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-7	1.5	0.3	0	6.5	3.3	0	87.3	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0
A-8	0.3	0	0	6.8	0	0	0.3	82.5	0	5.3	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-9	0	0	0	0	7.5	0	0	0	92.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-10	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	99.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-11	0	0	0	0	0	0	0	3.8	0	0	91.3	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-12	0	0	0	0	0	0	4.3	6.8	0	0	5.8	83.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B-1	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34.0	24.5	0	15.8	10.3	1.3	0.5	4.0	0	0	0	4.8
B-2	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.0	75.8	1.5	0	0	1.3	0	0	0	1.5	0	0
B-3	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	7.5	79.0	0	5.0	2.5	5.0	0	0	0	0	0
B-4	0.8	0	0	0	6.0	2.5	0	0	0.3	0	0	0	19.0	0	0.5	52.8	8.0	5.0	0	0	0.3	5.0	0	0
B-5	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.8	5.0	2.8	25.3	50.5	0.8	0	0	0	0	0	4.5
B-6	2.5	3.3	0	0	9.5	0	0	0	0	1.3	0	0	0	14.8	5.0	0	13.8	48.3	0.3	1.5	0	0	0	0
C-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.0	0	0	0	0	0	83.3	0	0	5.0	3.8	5.0
C-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.3	0	0	0	0	0	5.0	89.8	0	0	0	0
C-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.0	0	1.3	0.3	90.0	3.5	0	0	0
C-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	5.0	0	0	0	0	8.0	0	4.3	72.0	0.3	9.8
C-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.0	0	0	0	0	0	12.0	0	0	0	78.0	5.0
C-6	0	1.8	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	4.8	1.0	0	0	0	10.8	0	0	5.3	4.8	71.5

ように貼付けた。

この実験において取得したデータ数は計 4800 データとなった (2 条件×4 人×5 セッション×6 ジェスチャ×20 データ)。

6.2 実験結果

Leave one-session out cross-validation により Weka Took Kit [6] を用いて各実験協力者毎におけるジェスチャ認識精度を求めた。このときの機械学習アルゴリズムとして SVM を用いる。SVM は全てのパラメータをデフォルト値とし、使用した。結果、貼付け部位を手首とした場合の認識精度が 82.4% (SD = 15.6), 手の甲とした場合の認識精度が 93.1% (SD = 10.5) であった。手首および手の甲の貼付け部位の条件に対して、対応のある t 検定を行い、両条件間におけるジェスチャ認識精度の比較を行った。結果、条件間に有意な差があり ($p = .003 < .05$), 貼付け部位を手の甲にした場合の方が、貼付け部位を手首にした場合と比べて、有意にジェスチャ認識精度が高いことが示された。

6.3 考察

貼付け部位を手首とした場合、図 6 のジェスチャ認識精度は 82.4% となった。この結果より、貼付け部位を手首とした場合、図 3 のジェスチャセットをを認識することは困難だと考えられる。

実験結果より、図 6 のジェスチャ認識精度が貼付け部位を手の甲とする場合に比べ、手首にする場合のジェスチャ

認識精度が低くなる結果が示された。そのため、手指の細やかな状態を認識する場合、手首よりも手の甲を利用することが適していることが示唆された。

7. 議論および今後の課題

提案手法に関する議論および今後の課題を述べる。

7.1 再現性

今回行った実験において、実験中ピエゾ素子は手の甲から 1 度も剥がさずデータを取得した。そのため、ピエゾ素子を 1 度剥がし再度同じ部位に貼付けた際にジェスチャの再現性があるか不明である。今後、評価実験を行い、本手法に再現性があるかどうか検証する。

7.2 手の甲の使用に伴う使用感の問題

本手法はジェスチャを認識するために手の甲を用いる。そのため、手の甲を用いる場合の使用感も検討する必要がある。本手法の 1 つの方向性として、ユーザが手の甲にセンサを貼り付けていることを意識しないよう、絆創膏およびタトゥーシールのようにセンサを常時皮膚に貼り付けられるようにシート状のものを用いることが考えられる。本手法に使用しているピエゾ素子は非常に薄く、シート状にすることは可能である。

7.3 モバイルおよびウェアラブル化

今回の実装では、提案手法の性能評価が目的であったため、実装を PC とピエゾ素子部を有線にて接続するものと

した。今後、Bluetoothなどの無線通信を用いて素子部とPCを直接接続せずとも動作するシステムも製作する。

8. まとめ

能動的音響計測に基づくマイクロハンドジェスチャ認識手法を示した。本手法は、手の甲に貼付けられた一組のスピーカとマイクによって、手指の細やかな動作であるマイクロハンドジェスチャを認識する。また、本研究において設計したマイクロハンドジェスチャはテンキーやジョイスティックなどが持つメタファに基づくため、ユーザはジェスチャを想起しやすい。本手法に関する実験を行い、実験の結果、各指の節へのジェスチャに関して実験協力者ごとに求めた平均認識精度が89.2%を示した。また、手首および手の甲を貼付け部位とした場合の認識精度も6個のジェスチャを用いて調査した。結果、貼付け部位が手首の場合、82.4%、手の甲の場合93.1%の認識精度を示した。今後、提案手法の再現性を調査するための実験を行う。

謝辞 本研究は、JST ACT-I JPMJPR16UAの支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Braun, A., Krepp, S. and Kuijper, A.: Acoustic Tracking of Hand Activities on Surfaces, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction*, WOAR '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 9:1–9:5 (online), DOI: 10.1145/2790044.2790052 (2015).
- [2] Chan, L., Chen, Y.-L., Hsieh, C.-H., Liang, R.-H. and Chen, B.-Y.: CyclopsRing: Enabling Whole-Hand and Context-aware Interactions through a Fisheye Ring, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 549–556 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807450 (2015).
- [3] Chang, C.-C. and Lin, C.-J.: LIBSVM: A Library for Support Vector Machines, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 27:1–27:27 (online), DOI: 10.1145/1961189.1961199 (2011).
- [4] Deyle, T., Palinko, S., Poole, E. S. and Starner, T.: Hambone: A Bio-Acoustic Gesture Interface, *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, IEEE, pp. 3–10 (2007).
- [5] Gong, J., Zhang, Y., Zhou, X. and Yang, X.-D.: Pyro: Thumb-Tip Gesture Recognition Using Pyroelectric Infrared Sensing, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 553–563 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126615 (2017).
- [6] Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P. and Witten, I. H.: The WEKA Data Mining Software: An Update, *SIGKDD Explorations Newsletter*, Vol. 11, No. 1, pp. 10–18 (online), DOI: 10.1145/1656274.1656278 (2009).
- [7] Han, T., Hasan, K., Nakamura, K., Gomez, R. and Irani, P.: SoundCraft: Enabling Spatial Interactions on Smartwatches Using Hand Generated Acoustics, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 579–591 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126612 (2017).
- [8] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface, *Proceedings of the 29th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 453–462 (online), DOI: 10.1145/1753326.1753394 (2010).
- [9] Hiroyuki, K. and Kentaro, T.: Hand Pose Estimation Based on Active Bone-Conducted Sound Sensing, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, UbiComp '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 109–112 (online), DOI: 10.1145/2968219.2971403 (2016).
- [10] Jun, R.: GestureWrist and GesturePad: Unobtrusive Wearable Interaction Devices, *Proceedings of the International Symposium on Wearable Computers*, ISWC'01.
- [11] Kim, D., Hilliges, O., Izadi, S., Butler, A. D., Chen, J., Oikonomidis, I. and Olivier, P.: Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-worn Gloveless Sensor, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, New York, NY, USA, ACM, pp. 167–176 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380139 (2012).
- [12] Laput, G., Brockmeyer, E., Hudson, S. E. and Harrison, C.: Acoustruments: Passive, Acoustically-Driven, Interactive Controls for Handheld Devices, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 2161–2170 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702414 (2015).
- [13] Laput, G., Xiao, R. and Harrison, C.: ViBand: High-Fidelity Bio-Acoustic Sensing Using Commodity Smartwatch Accelerometers, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 321–333 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984582 (2016).
- [14] LEAP MOTION, INC.: LEAP MOTION, <https://www.leapmotion.com>. Last accessed: 2.22.2018.
- [15] Li, H., Yang, W., Wang, J., Xu, Y. and Huang, L.: WiFinger: Talk to Your Smart Devices with Finger-grained Gesture, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 250–261 (online), DOI: 10.1145/2971648.2971738 (2016).
- [16] Lien, J., Gillian, N., Karagozler, M. E., Amihoud, P., Schwesig, C., Olson, E., Raja, H. and Poupyrev, I.: Soli: Ubiquitous Gesture Sensing with Millimeter Wave Radar, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4, pp. 142:1–142:19 (online), DOI: 10.1145/2897824.2925953 (2016).
- [17] Lin, J.-W., Wang, C., Huang, Y. Y., Chou, K.-T., Chen, H.-Y., Tseng, W.-L. and Chen, M. Y.: Back-Hand: Sensing Hand Gestures via Back of the Hand, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 557–564 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807462 (2015).
- [18] Makoto, O., Buntarou, S. and Jiro, T.: 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, New York, NY, USA, ACM, pp.

- 31–40 (online), DOI: 10.1145/2501988.2501989 (2013).
- [19] McIntosh, J., Marzo, A., Fraser, M. and Phillips, C.: EchoFlex: Hand Gesture Recognition Using Ultrasound Imaging, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 1923–1934 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025807 (2017).
- [20] Okawa, Y. and Takemura, K.: Haptic-enabled Active Bone-Conducted Sound Sensing, *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15 Adjunct, New York, NY, USA, ACM, pp. 87–88 (online), DOI: 10.1145/2815585.2815732 (2015).
- [21] Sato, M., Poupyrev, I. and Harrison, C.: Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, New York, NY, USA, ACM, pp. 483–492 (online), DOI: 10.1145/2207676.2207743 (2012).
- [22] Shuhei, A., Buntarou, S. and Jiro, T.: ThumbSlide: An Interaction Technique for Smartwatches Using a Thumb Slide Movement, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 2403–2409 (online), DOI: 10.1145/2851581.2892435 (2016).
- [23] Song, J., Sörös, G., Pece, F., Fanello, S. R., Izadi, S., Keskin, C. and Hilliges, O.: In-Air Gestures Around Unmodified Mobile Devices, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 319–329 (online), DOI: 10.1145/2642918.2647373 (2014).
- [24] 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, New York, NY, USA, ACM, pp. 53–54 (online), DOI: 10.1145/2046396.2046419 (2011).
- [25] Taylor, J., Tankovich, V., Tang, D., Keskin, C., Kim, D., Davidson, P., Kowdle, A. and Izadi, S.: Articulated Distance Fields for Ultra-fast Tracking of Hands Interacting, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 6, pp. 244:1–244:12 (online), DOI: 10.1145/3130800.3130853 (2017).
- [26] Thalmic Labs Inc.: Myo, <https://www.myo.com>. Last accessed: 2.22.2018.
- [27] Wang, S., Song, J., Lien, J., Poupyrev, I. and Hilliges, O.: Interacting with Soli: Exploring Fine-Grained Dynamic Gesture Recognition in the Radio-Frequency Spectrum, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 851–860 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984565 (2016).
- [28] Watanabe, H., Terada, T. and Tsukamoto, M.: Gesture Recognition Method utilizing Ultrasonic Active Acoustic Sensing, *Journal of Information Processing*, Vol. 25, pp. 331–340 (online), DOI: 10.2197/ipsjip.25.331 (2017).
- [29] Wen, H., Ramos Rojas, J. and Dey, A. K.: Serendipity: Finger Gesture Recognition Using an Off-The-Shelf Smartwatch, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 3847–3851 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858466 (2016).
- [30] Yokota, T. and Hashida, T.: Hand Gesture and On-body Touch Recognition by Active Acoustic Sensing Throughout the Human Body, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, New York, NY, USA, ACM, pp. 113–115 (online), DOI: 10.1145/2984751.2985721 (2016).
- [31] Yuta, S., Fumihiko, N., Wataru, K., Takashi, K. and Maki, S.: Behind the palm: Hand gesture recognition through measuring skin deformation on back of hand by Using optical sensors, *56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, SICE '17, pp. 1082–1087 (online), DOI: 10.23919/SICE.2017.8105457 (2017).
- [32] Zhang, Y. and Harrison, C.: Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 167–173 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807480 (2015).