

# 前腕の表面筋電を用いたジェスチャ認識の実験的検討

御手洗 彰<sup>†1</sup> 棟方 渚<sup>†1</sup> 吉田 彩乃<sup>†2</sup> 櫻沢 繁<sup>†2</sup> 小野 哲雄<sup>†1</sup>

概要：表面筋電を用いたジェスチャ認識に関して、様々な手法が提案されている。一方で、自然な環境の中でユーザはカバンや傘など物を把持しており、手がふさがっているような状況は少なくない。表面筋電を用いたジェスチャ入力の前腕から手の動きを取得することが可能であることから、物を把持した状態でのジェスチャ入力の可能性が期待される。しかし、物を把持した状態でのジェスチャ入力に関して未だに十分な調査はされていない。そこで本研究では、物を把持した状態でのジェスチャ入力について実現可能性を調査するべく、様々な物を把持した状態でジェスチャを4種類入力し、それぞれのジェスチャの認識精度を測定する実験を実施した。その結果から物を把持した状態でのジェスチャ入力の実現可能性や問題点、解決方法について検討を行った。

SHO MITARAI<sup>†1</sup> NAGISA MUNEKATA<sup>†1</sup> AYANO YOSHIDA<sup>†2</sup> SHIGERU SAKURAZAWA<sup>†2</sup> TETSUO ONO<sup>†1</sup>

## 1. はじめに

表面筋電を利用したインタフェース、システムに関する研究は盛んに行われている。筋電の代表的な活用事例として、筋電義手のような筋電の福祉的利用がある。筋電義手は表面筋電を用いて、義手の操作を行い、腕や手としての機能を支援することができる。そのような事例の発展的な応用として、山海ら [12] が開発した HAL がある。HAL は、人間の両足に装着する外骨格型ロボットスーツである。装着者の筋電を取得し、その情報から歩行する、重量のある物を持つ、など力を発揮しなければならない行動を制御し、装着者の身体的な負担を軽減することができる。人間の基本的な動作を支援できることから、介護支援 [13] やリハビリテーション、脳性麻痺患者への歩行支援 [14] などといった場面で活用されている。これらの研究事例は人の身体の機能的側面に関する支援することができる。

一方、ユーザインタフェースとして機能的・心理的側面を支援する研究に筋電を活用する試みもある。新村ら [11] は、導電衣服を用いて、表面筋電を高精度に測定するウェアラブルシステムを開発している。松久ら [9] は布地に導電性インクをプリントし、着用するだけで表面筋電を測定できるセンサを作製した。これらの技術の応用例として、

筋電を用いたミュージック・インタフェースが提案されている [15]。上述した研究のように長期的な筋電の測定により継続的な支援を行うことを目指す試みがある。継続的な支援を行うことができれば様々な分野に応用することができる。

そのような日常的支援の応用分野の1つとして、筋電を用いたジェスチャ認識インタフェースに関する研究が挙げられる。この研究背景として、近年スマートフォンやウェアラブルデバイスといった、小型の高性能コンピュータの普及に伴って、従来のキーボードやボタンなどの物理的な入力手段とは異なった、新しい入力手段が求められている。Huang ら [6] は表面筋電位から親指の動きをジェスチャとして認識するシステムを開発した。従来の手法では事前に訓練データをユーザから取得する必要があったが、提案手法ではユーザの日常的な動作（彼らの手法ではタッチパネルのジェスチャ入力）から訓練データの取得を行うことにより、キャリブレーションを行うことなく、ジェスチャ認識を可能としている。Zhiyuan ら [8] は筋電センサと加速度センサを組み合わせたベルト状のデバイスを開発した。このデバイスは少ないチャンネル数（4ch）の筋電を用いており、容易に装着することができる。少ないチャンネル数で実現できるジェスチャの種類は限られているが、筋電を用いた入力と加速度センサを用いた入力でのジェスチャ入力のバリエーションを確保している。彼らは音楽プレイヤーをジェスチャ動作によって操作するという実験を行った。その結果、彼らのシステムでは初めて使用するユーザ

<sup>†1</sup> 現在、北海道大学  
Presently with Hokkaido University

<sup>†2</sup> 現在、公立はこだて未来大学  
Presently with Future University Hakodate

であっても簡単に操作を習得することができた。

しかし、このような研究は未だに実用化には至っていない。一方で日常生活の利用に即した研究も行われている。Saponas ら [7] は前腕から 6ch で筋電を取得し、それを用いてジェスチャ認識を行った。この研究の特長としてジェスチャ入力の際に被験者に物を把持させながら実施した点が挙げられる。彼らの実験では、被験者にステンレス製のタンブラーとラップトップバッグの 2 種類についてそれぞれ把持させた状態でジェスチャ認識を行った。しかし、彼らの研究では対象となる物を特定の把持の仕方ですシステムに学習させており、提案手法の有用性は限定的であった。

そこで本研究では、何も把持していない状態のジェスチャと 3 種類の異なる形状をもつ物(傘, バッグ, ダンボール箱)をそれぞれ把持した状態のジェスチャ認識率をそれぞれ比較することによって、物の形状や把持の仕方の違いがジェスチャ認識にもたらす影響を調査する。得られた結果から新たな手法を提案し、その評価を行う。

## 2. 実験

把持する物の形状や把持の仕方がジェスチャ認識にどのような影響を与えるのかを調査する実験を行った。物を把持していない条件と物を把持している条件(3 種)の、計 4 条件において 4 種類のハンドジェスチャを識別した。その結果をそれぞれ比較することにより、物を把持していない条件と把持している条件、または把持している物の形状や特性の違いが筋電を用いたジェスチャ認識にどのような影響を与えるかを考察した。以下から実験設定や手順、結果、考察について述べていく。

### 2.1 被験者

実験は 5 名(男性 4 名, 女性 1 名)の被験者が参加した。被験者の年齢は 21 ~ 23 歳であり、平均年齢は 22 歳であった。全ての被験者は情報系の大学、または大学院に所属している学生であり、日常的にコンピュータを使用している。実験の所用時間は約 2 時間程であった。

### 2.2 計測システムと計測準備

本研究のシステムを構成するハードウェアとして自作の筋電計, Raspberry Pi 2 Model B[3](以後 Raspberry Pi とする), パーソナルコンピュータ(以後 PC とする)を用いた。筋電計で取得した信号は約 159Hz のハイパスフィルタにかけられ, 1.65V を基準として, 0V ~ 3.3V の範囲で 1010 倍に増幅される。この信号を A/D 変換器を通してサンプリング周波数 2kHz, 量子化ビット数 12[bit] で, Raspberry Pi はサンプリングする。Raspberry Pi で取得した信号は 30[ms] で積分され PC へと送られる。PC では取得した信号を元にジェスチャの識別を行っている。システムの概要を図 1 に示す。本実験で用いたジェスチャについては [8]

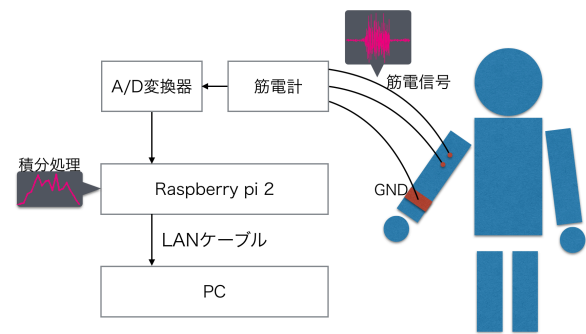


図 1 システム模式図

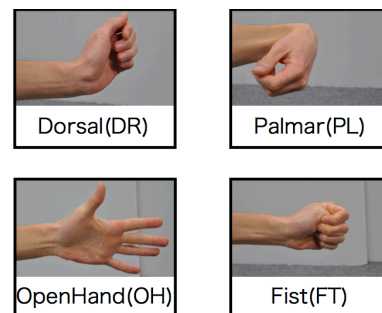


図 2 ジェスチャの種類

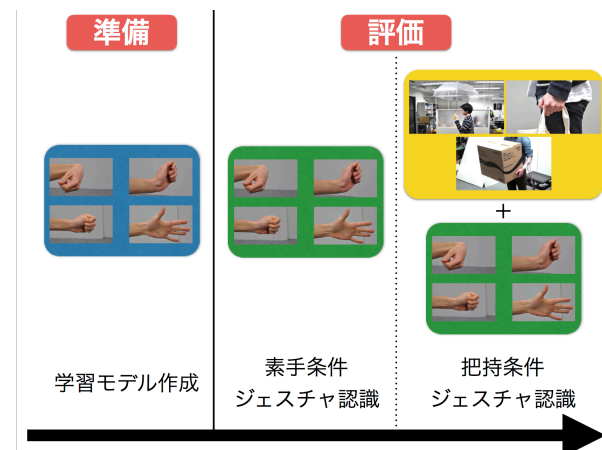


図 3 実験手順

を参考にして、図 2 のような 4 つのハンドジェスチャを定義した。また、ジェスチャの識別は SVM(Support Vector Machine) を用いた機械学習で行った。特徴量の定義は PC に取得した 4ch 分の信号のそれぞれ 150[ms] 間の平均とした。

筋電の計測準備として、被験者の左前腕 4 箇所に電極を貼った。電極は長橈側手根伸筋、橈側手根屈筋、長母指屈筋、尺側手根屈筋の 4 箇所の位置を目標としてそれぞれ配置した。測定方法は双極誘導法で測定し, 1ch(チャンネル)につき 2 つ電極を貼り 2 つの電位差を表面筋電位とした。またアースを左前腕の手首付近で取った。

### 2.3 実験手順

実験は図 3 のように 3 つのパートに分けて実施した。1

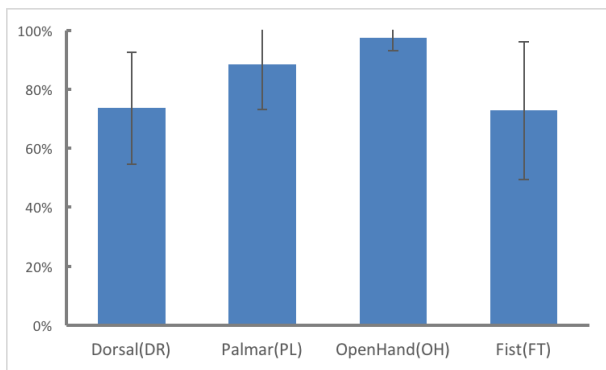


図 4 素手条件におけるジェスチャ認識率

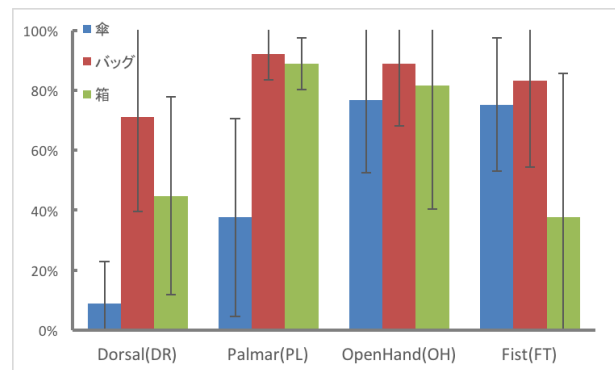


図 5 把持条件におけるジェスチャ認識率

つ目がジェスチャの分類に用いる訓練データの取得，2つ目が物を把持していない状態（素手条件）でのジェスチャ認識率の評価，3つ目が物を把持した状態（把持条件）でのジェスチャ認識率の評価とした。また全てのパートにおいて被験者は起立し，静止した状態で行った。

訓練データの取得は被験者が4種類のジェスチャをそれぞれ15秒間維持し，その間得られた筋電から特徴量を抽出するという方法で行った。また，全ての訓練データは，素手条件の筋電信号のみで取得され，物を把持している状態でのジェスチャにおいても，素手条件の識別器を用いて認識を行った。実験で用いた識別器は，それぞれの被験者ごとに訓練データを取得して作成したものとした。

認識率の測定は，素手条件は50回，把持条件ではそれぞれ25回，同じジェスチャによる入力を繰り返す，という手順で実施した。物を把持しながらジェスチャを行うことの身体的な負担を軽減するため，素手条件に比べて把持条件のジェスチャを行う回数を少なく設定した。また把持条件でのジェスチャの方法に関して，実験者より，素手条件のジェスチャを再現するよう被験者に指示を与えた。評価実験を始める前に，指示されたジェスチャをスムーズに実現できるように，それぞれの被験者が練習を行った。把持条件では，重心が不安定な物，重量のある物，手首の形状が固定される物として，それぞれ「傘」，「バッグ」，「ダンボール箱」を準備し，これら3種類の物を把持しながらジェスチャを行うことで，認識率を測定した。

## 2.4 結果と考察

5人の被験者が素手条件，把持条件でジェスチャを行った際の認識率の平均を図4，図5に示す。エラーバーは標準偏差を示している。

素手条件と把持条件を比較すると，一部を除いて，物を把持することによる著しい認識率の減少はみられなかった。このことから本実験の環境下では物を把持している状態であっても，何も把持していない状態のジェスチャを再現することが可能であるとわかる。

一方で，傘や箱を把持した際のジェスチャにおいては著

しい認識率の減少が見受けられた。まず，箱を把持した際に「DR」，「FT」において素手条件と比べて，認識率の減少が見受けられた。これについては，箱を把持した際に，手の形状がある程度固定されてしまったことでジェスチャの再現が難しかった可能性が考えられる。特に，「DR」のような手首を手の甲側に反らせるようなジェスチャや，「FT」のような握り込むジェスチャを行うことは難しい。このことから箱を把持している状態を維持しながら，素手条件のジェスチャ動作を再現することが難しかったことが，認識率の減少の原因となったと考えられる。

次に，傘を把持している条件では，ジェスチャ動作を再現することはできていた。しかし，「DR」，「PL」において，素手条件と比べて著しく認識率の減少が見受けられた。この原因として，2つ考えられる。1つ目は，傘の重心のバランスが崩れてしまうことによる，システムが意図しない筋電の発生である。実験の観察から，「DR」，「PL」のような手首を動かすジェスチャの動作中において，把持した傘の重心のバランスが崩れてしまう現象が得られた。これによって，崩れた重心のバランスを元に戻そうとする力が無意識的に発生し，それが誤認識の原因になったと考えられる。2つ目は，腕の姿勢の変化による，ジェスチャ動作時に用いる筋肉部位の変化である。素手条件と比較して傘を把持している条件においては，前腕が上に上がっている。この違いから，「DR」や「PL」ジェスチャを行った際に，素手条件では使用することがなかった，回外筋が収縮することによって，素手の条件とは異なった筋電が発生しており，前述の問題と同様にこれが誤認識の原因の一つになったと考えられる。

## 2.5 実験から得られた課題

結果をまとめると，物を把持している条件であっても素手条件と同程度の認識率でジェスチャを識別することができた。しかし，認識率が著しく減少してしまう例もあり，それは素手条件と同じ動作を再現するのが難しいことや，ユーザにとっては同じようにジェスチャ動作を行っているつもりでも，素手条件とは異なった筋肉を使ってしまっ

いるということが原因の1つとして考えられる。特に後者の原因は、ユーザがジェスチャを行えると認識できている、システムが誤認識してしまうことから、解決すべき課題であるといえる。実験環境下ではこれらの問題は傘を把持している条件において顕著に見受けられたが、日常生活での利用を考えた際、他条件でも同様の問題が起こりうる可能性は十分に考えることができる。例えば、風などの外部の影響によって把持している物の重心のバランスが崩れることによる誤入力の可能性や歩行中にジェスチャ入力を行った際に、静止している場合とは異なった筋電が発生することによる誤認識の可能性などが考えられる。また、物を把持していなくても腕の姿勢によっては正しくジェスチャを認識できない可能性も十分考えられる。

このような数多くの問題の原因の一つとして、ジェスチャ認識システムの対応力の弱さが挙げられる。前章の実験では素手条件のみの訓練データを用いた学習で識別を行っていたため、腕の姿勢や物を把持した時に入力される筋電の信号が異なっていたら、ユーザが素手条件と同様の入力を行おうとしていたとしても、素手条件とは異なった入力がなされてしまう可能性は十分考えられる。しかし、Saponasら [7] のように、物を把持しながらのジェスチャ入力も学習として取り入れてしまうことは日常生活の利用に適切ではないと考えられる。なぜなら、実環境で人が把持する物は形状、把持の仕方、その他の様々な要素が異なった物であり、特定の物だけを把持すると限定することは現実的ではない。例えば、同じカバンであっても中の物を出し入れするだけでも重量は変わってしまう。

そこで、我々は現実にある膨大な種類の物全てに対して、ジェスチャ認識システムが対応するためには、訓練データなどの事前知識を用いた手法は適切ではないと考えた。従って、事前知識を用いることなくジェスチャ認識を行う手法を提案する。

### 3. 提案手法

本章では、前章の結果から得られた課題を解決できるようなジェスチャ認識手法を提案する。提案手法の実装方法を記し、日常生活の利用を想定した状況で提案手法が有用であるか評価を行った結果について述べる。

#### 3.1 システム実装方法

提案手法においては、システムは事前知識を持たないため、入力されたジェスチャの種類を識別することができない。そこで、提案手法では3つのジェスチャの組み合わせ(ジェスチャセット)を用いることによって、ジェスチャによる操作の分類を行う。

システムは、入力された3つのジェスチャがそれぞれ同じジェスチャであるか、異なるジェスチャであるかを判断する。例えば、図2のジェスチャが「DR・PL・DR」とい

表 1 操作の種類

1 番目の入力	2 番目の入力	3 番目の入力	操作
X	X	X	A
		Y	B
	Y	X	C
		Y	D
		Z	E

う順番でジェスチャセットとしてシステムに入力されたとする。この場合、システムは1番目の入力(DR)と3番目の入力(DR)が同じであると判断する。この時、1, 3番目の入力(DR)をX, 2番目の入力(PL)をYとすると、システムは「X, Y, X」という入力がされたと判断する。同様に、「PL・DR・PL」という順番でジェスチャセットがシステムに入力されたとすると、システムは「X, Y, X」という入力がされる。つまり、システムにとって、ジェスチャの種類は関係なく、ジェスチャがどの順番で入力されたかによって、システムは操作を識別する。この手法で識別することができる操作の種類は表1の通りである。

システムへのジェスチャの入力は、1つのチャンネルがある一定の筋電値を超えた際に行われる。その時の4ch分の筋電値を、ジェスチャの特徴量とした。また入力されたジェスチャが同一であるか、異なるかのシステムの判断は、筋電値のマンハッタン距離：

$$Manhattan(a, b) = \sum_{k=1}^4 |a_k - b_k| \quad (1)$$

を用いて行っている。ここでa, bは入力されたジェスチャの特徴量であり、筋電の4ch分の値からなる4次元ベクトルである。すなわち、システムは式(1)の値が閾値より下回った場合に2つのジェスチャは同一であるとみなし、超えた場合には異なるるとみなす。

#### 3.2 システムの評価

この提案手法が有用であるかを評価するため、日常生活における1つの状況として歩行中に、物を把持した状態でジェスチャ入力を行った。把持する物として、前章の実験で認識率の高かったバッグ、認識率の低かった傘とした。表1から2種類以上のジェスチャが含まれているジェスチャセット(B, C, D, E)をそれぞれ把持しながら行った。被験者は1名とし、電極は先に実施した実験と同様の位置に装着した。前章の実験で用いたジェスチャ(図2)を3つ組み合わせたジェスチャセット(表2)を入力タスクとした。各操作においてそれぞれ3種類のジェスチャセットを10回ずつ、計30回行い、その認識率を測定した。その結果、ジェスチャセットによる操作の認識率の平均を図6に示す。



表 2 評価に用いたジェスチャセット

操作	B	C	D	E
ジェスチャセット	DR・PL・DR	DR・DR・PL	PL・DR・DR	DR・OH・PL
	PL・OH・PL	PL・PL・OH	OH・PL・PL	PL・DR・OH
	OH・DR・OH	OH・OH・DR	DR・OH・OH	OH・DR・PL

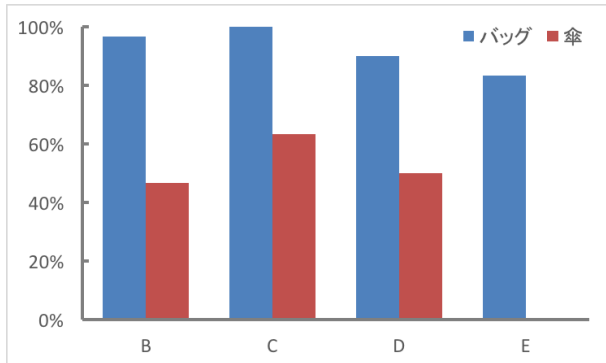


図 6 歩行中における操作の平均認識率

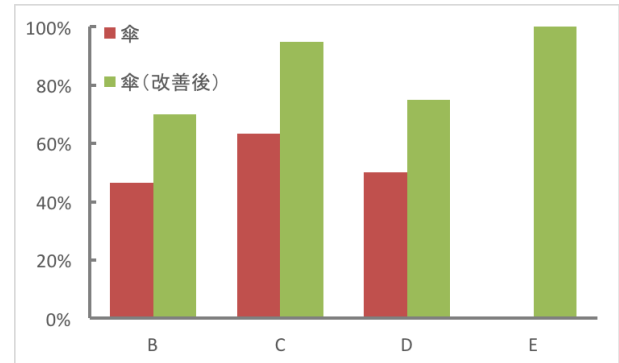


図 7 傘を把持した際の認識率（改善後との比較）

### 3.3 結果と考察

把持条件の結果から、歩行中のジェスチャ入力であっても高い認識率で操作を行っていたことがわかる。このことから、前章の実験で用いたジェスチャ認識手法と比較して認識率と操作の種類を減少させることなく、歩行中のジェスチャ認識を行うことができていることがわかる。

傘の結果から、バッグと比較して認識率が著しく低いことがわかる。この原因としては、全ての操作において「DR」と「OH」を区別することができなかつたため、3種類の内、1つのジェスチャセットの認識率が0%となつてしまったことが挙げられる。そのため、操作Eに関しては、全てのジェスチャセットに「DR」と「OH」が含まれていることから0%の認識率となつてしまった。この結果から、操作B, C, Dは「DR」と「OH」が同じセットに含まれているジェスチャセットを取り除き、操作Eはジェスチャ「FT」を新たに加えた「PL・DR・FT」と「OH・FT・PL」という2つのジェスチャセットで認識率を測定した結果を「改善後」とし、これを図7に示す。この図から区別することが難しいジェスチャの組み合わせが存在した場合であっても、その組み合わせを回避することで、同様の操作を高い精度で行うことができるとわかる。

## 4. おわりに

本研究では、日常生活の利用に即した筋電によるジェスチャ認識インタフェースの実現を目標として、何も把持していない状態のジェスチャと異なる形状をもつ物(3種)をそれぞれ把持した状態のジェスチャ認識率をそれぞれ比較することによって、物の形状や把持の仕方の違いがジェスチャ認識にもたらす影響を調査した。その結果、物を把持した状態での、筋電を用いたジェスチャ認識手法の課題を発見した。さらに、その課題を解決することが期待でき

る手法を提案し、その手法の有用性を評価した。その結果、提案手法の有用性を一部示すことができた。

しかし、そもそもジェスチャ認識手法において、筋電を用いた手法は主流ではない。研究分野において、様々な手法でジェスチャ認識を行う研究がされている[4, 5, 10]。その中でも、Kinect[1]やLeap Motion[2]といった、赤外線カメラを用いた手法は一般社会においても広く普及しており、主流な手法であると言えるだろう。この手法はユーザの指を1本ずつ識別できるほど精度が高く、そのためジェスチャの種類も豊富に考えることができる。しかし、これらの手法では解決できない問題として、カメラとユーザの間に何らかの障害物が入った場合に起きる閉塞がある。例えばハンドジェスチャを認識する際、ユーザ自身の指が他の指と重なることで赤外線カメラから隠れてしまったり、物を把持している場合にユーザの手を認識することができなくなるといったことが起きる。

一方、筋電によるジェスチャ認識手法は、ユーザの指を1本ずつ識別することができるほどの精度は難しいが、前腕から手の動きを取得することができるため、閉塞が起きることはない。従って、ある状況においては赤外線カメラを用いたジェスチャ認識手法より優れていると言える。その1つとして、物を把持しているという状況が挙げられる。このような状況は日常生活の中で多く考えられ、この状況下でジェスチャ認識を行うことができることは、ジェスチャ認識の可能性を広げることができると考えられる。

### 4.1 今後の課題と展望

今後の課題として提案手法において、異なった動作であるにも関わらず区別することができなかつたジェスチャの組み合わせがあった。提案手法では、2つのジェスチャが同一のものが異なるものかを区別するために、4ch分の筋

電値のマンハッタン距離を用いて区別したが、その閾値については主観的に設定された値であり、客観性に欠ける。閾値などの我々が設定しなければいけない部分について、客観的な指標を持って設定をする必要がある。また、ジェスチャの区別を行うアルゴリズムについても他のアルゴリズムと比較するなどの検証が必要である。また、システムの評価は被験者1名に対してのみであったため、今後被験者を増やして評価を行った場合にも同様の結果が得ることができるかを確認する必要がある、これらについて今後の課題としていきたい。

最後に、今後の展望として、日常生活の利用に即した筋電によるジェスチャ認識インタフェースを実現するためには、歩行中だけでなく様々な状況でシステムが有用であるかどうか検証する必要がある。また、実際にアプリケーションを使用した際に、意図した操作ができるか、または操作性に問題はないか、といった実際の使用感についての調査も重要な課題の1つであると考えている。

## 参考文献

- [1] Kinect : <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>
- [2] Leap Motion : <https://www.leapmotion.com/?lang=jp>
- [3] Raspberry Pi 2 Model B : <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [4] David Kim, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Alex Butler, Jiawen Chen, Iason Oikonomidis, Patrick Olivier : “*Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-Worn Gloveless Sensor*”, UIST '12 Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology Pages 167-176
- [5] Artem Dementyev, Joseph A. Paradiso : “*WristFlex: Low-Power Gesture Input with Wrist-Worn Pressure Sensors*”, UIST '14 Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology Pages 161-166
- [6] Donny Huang ,Xiaoyi Zhang ,T.Scott Saponas ,James-Fogarty ,Shyamnath Gollakota : “*Leveraging Dual-Observable Input for Fine-Grained Thumb Interaction Using Forearm EMG*” UIST '15 Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Pages 523-528
- [7] T. Scott Saponas, Desney S. Tan, Dan Morris, Ravin Balakrishnan, Jim Turner, James A. Landay : “*Enabling Always-Available Input with Muscle-Computer Interfaces*”, UIST '09 Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology Pages 167-176
- [8] Zhiyuan Lu, Xiang Chen , Zhangyan Zhao, Kongqiao Wang : “*A Prototype of Gesture-based Interface*”, MobileHCI '11 Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services Pages 33-36
- [9] Matsuhisa, N., Kaltenbrunner, M., Yokota, T., Jinno, H., Kuribara, K., Sekitani, T. and Someya, T. : “*Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications*”, Nature Communications, Vol. 6 (2015), Paper No. 7461.
- [10] 塚田浩二, 安村通晃 : “*Ubi-finger: モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究.*”, 情報処理学会論文誌 43.12 (2002): 3675-3684.
- [11] 新村達, 秋田純一, 櫻沢繁, 戸田真志 : “*導電性衣服のシールド効果と電源供給機能を用いた高精度 多点表面筋電位測定システム*”, 情報処理学会論文誌 48(12), 3784-3792, 2007-12-15.
- [12] 山海嘉之, 川村祐一郎, 岡村純平, 李秀雄 : “*筋電位を用いた歩行支援のための外骨格パワーアシストシステム HAL - 1 に関する研究*”, 茨城講演会講演論文集 : Ibaraki district conference 2000, 269-270, 2000-09-08
- [13] 佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之 : “*ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援*”, 日本機械学会論文集. C 編 76(762), 227-235, 2010-02-25
- [14] 武富卓三, 山海嘉之 : “*ロボットスーツ HAL による脳性麻痺患者の歩行支援に関する研究*”, 生体医工学 Vol. 50 (2012) No. 1 p. 105-110
- [15] 石川圭佑, 戸田真志, 櫻沢繁, 秋田純一, 近藤一晃, 中村裕一 : “*表面筋電位信号を用いたウェアラブル型ミュージック・インタフェース*”, 研究報告エンタテインメントコンピュータエン지니어リング (EC), 2011(2), 1-6.