

ハンドジェスチャの記憶性に与える電氣的筋肉刺激の効果

西川 宜利^{1,a)} 志築 文太郎^{2,b)}

概要：ハンドジェスチャは、指文字での会話およびコンピュータへの入力など、多様な場面で利用されている。ハンドジェスチャの学習には一般的に画像および映像が使用されている。本研究では、ハンドジェスチャの学習を補助する方法として Electrical Muscle Stimulation（以降、EMS）に着目している。EMS は筋収縮を誘発できる技術であり、ユーザは動かされた筋収縮を知覚できるため、EMS は運動学習を補助する研究に利用されている。本研究では、EMS を用いたハンドジェスチャ学習を行うために、ハンドジェスチャの映像とそれに連動した電気刺激をユーザに提示できるシステムを構築した。我々は、本システムを利用してハンドジェスチャを学習する手法（以降、提案手法）と、ハンドジェスチャ映像のみで学習した手法（以降、既存手法）を比較調査した。結果としては提案手法を用いた方が身体的要求が高いことが分かった。また、学習中および学習後の誤答数において有意な差は示されなかった。しかし、NASA-TLX の結果およびアンケート結果より、EMS による不快感には個人差があることが示された。今後は、実験計画およびシステムを改良して、不快感の大きいグループおよび不快感の小さいグループに分けて、再度調査する予定である。

1. はじめに

指文字のようなハンドジェスチャを独学で習得するには、画像および映像を見て学習する方法があるが、複数の指を使用するハンドジェスチャを学習する場合、どのタイミングでどの指を動かすべきかを正確に把握することは難しい。また、指導者によるフィードバックもないため、間違っ

て覚えてしまう可能性もある。そこで、フィードバックを用いてハンドジェスチャの一つである American Sign Language（以降、ASL）の学習を補助する研究 [1] がある。また、指文字を深層学習を用いて識別する研究 [2] も行われている。これらの研究では、指文字を深層学習を用いて識別することにより、指文字による会話を補助したり、識別した指文字が正しいかどうかを判断し、間違っていた場合、視覚フィードバックを行うことにより学習を補助している。このように、ユーザが行ったハンドジェスチャに対して視覚フィードバックを用いて、学習を補助する研究はあるが、実際に指文字を学習する際にユーザに触覚フィードバックを与えて学習を補助する研究は行われていない。

本研究ではハンドジェスチャ学習を触覚フィードバックを用いて補助する方法として Electrical Muscle Stimu-

lation（以降、EMS）に着目している。EMS は、皮膚に取り付けられた電極から筋肉に直接電気刺激を与えることにより、筋収縮を引き起こす技術である。主にリハビリテーション、運動トレーニングおよび筋力向上などの目的で使用されている。EMS は機械的なアクチュエータと比較してデバイスが小さいため、Extended Reality における力学フィードバック [3] または触覚アクチュエーション [4] のための有望な技術として近年注目されている。また、一般的に、人間は指を伸ばしている、腕を曲げているといった体の状態を知覚することが出来る。このため、EMS によって動かされた体の状態も知覚できる。この特性を利用することにより、EMS は運動学習の補助として役立つことが明らかになっている [5-7]。そのため、EMS を用いて楽器の演奏のような新しい技術の習得 [7]、初めて使う道具の操作方法の学習 [8]、および歩行者の進路方向の誘導を行う研究 [6] がある。

そこで、我々は、ハンドジェスチャ学習を行う際に動かす指を、EMS を用いて電気刺激を提示することにより、ハンドジェスチャ学習の補助になると考える。ハンドジェスチャを独学で勉強する場合、間違っているかどうかのフィードバックがないため、間違っ

¹ 筑波大学 情報理工学学位プログラム

² 筑波大学 システム情報系

^{a)} nishikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

^{b)} shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

ると考えられる。さらに、EMS によって指および手首が動かされることにより、ハンドジェスチャの記憶のしやすさ、および、記憶の保持のしやすさ（以降、記憶性）が高まると考えられる。

本研究では、ハンドジェスチャの記憶性に与える EMS の効果（以降、EMS の効果）を調査するために、我々はハンドジェスチャの映像とそれに合わせた電気刺激をユーザに提示できるシステムを構築した。その上で、本システムを利用してハンドジェスチャを学習する手法（以降、提案手法）と、ハンドジェスチャ映像のみで学習した手法（以降、既存手法）を比較調査した。本稿ではその結果を示す。

2. 関連研究

本研究は主に触覚、特に EMS を用いた研究分野ならびに学習に関する研究分野に基づいている。本節では EMS を用いた研究および学習に関する研究を述べる。

2.1 電氣的筋肉刺激

EMS は 1960 年代に医療リハビリテーションとして開発された技術である [9]。EMS は、高い抵抗を持つ皮膚を超えて、その下にある筋肉に電気刺激を与えるため、連続した高い電圧のパルス波形の電気刺激を提供する。これにより、ユーザの意図しない筋収縮が起こり、腕または指などの意図しない動きを誘発できる。近年、EMS は、モータを用いた機械的なデバイスと比較してデバイスの大きさが小さいため、力覚フィードバックおよび触覚アクチュエーションのための有望な技術として注目されている [5–8, 10]。

2.1.1 電氣的筋肉刺激の手指の制御に関する研究

EMS を用いて VR および AR における力覚フィードバック [3, 4]、および運動を補助する研究 [3, 7, 8] などが行われている。これらの研究では前腕部に貼った電極を用いて電気刺激をユーザに与えている。前腕部は、指を屈曲させるための筋肉が密集しているため、電気刺激を与えた場合、特定の指のみを動かすといったことが難しい [11]。そのため、EMS を用いてそれぞれの手指を独立して制御の研究がなされている [10–12]。Takahashi ら [10] は電気刺激を与える電極を手の甲に貼ることによって、手指の付け根の関節を独立して動かせることを示した。また、Watanabe ら [13] は指屈筋および指伸筋に対して電気刺激を与え、指を目的の角度において停止させるために、フィードバック制御を行った。しかし、指を停止させる際に指が振動してしまうという問題があった。Romain ら [12] は機械的なストッパおよび Watanabe らの研究の手法を組み合わせることによって、それぞれの手指の独立性を向上させた。

本研究ではそれぞれの手指および手首を動かすために、電気刺激を与える電極を手の甲に貼る方法 [10] および電極を前腕部に貼る手法 [11] と組み合わせる。これにより、手指の独立した制御および手首の屈曲および伸展動作が可能

である。

2.1.2 電氣的筋肉刺激を用いた運動学習の補助に関する研究

EMS を用いて人間の動作を補助する研究が行われている [6–8, 14]。Pfeiffer ら [6] は足に提示した電気刺激により歩行者の進路方向の誘導を行っている。また、EMS を用いてユーザの指を動かすことによりピアノ演奏を補助する研究がある [14, 15]。Kilian ら [15] はピアノ経験者およびピアノ初学者の使う筋肉を調査し、ピアノ初学者がうまく使えていない筋肉を EMS により動かすことにより、ピアノ学習を補助している。また Niishima ら [14] はピアノの弾く際に必要な複数の筋肉の相乗効果を EMS を用いて向上させた。さらに、Lopes ら [8] はユーザが初めて使う道具の操作方法を EMS を用いて提示した。また、Chen ら [16] は教師側が提示したハンドジェスチャを学習者側に EMS を用いて提示した。

これらの研究では、EMS を用いて学習した場合の記憶性について調査されていない。そこで、本研究では提案手法および既存手法を用いてハンドジェスチャを覚えた際の記憶性について調査する。

2.2 学習に関する研究

学習に関する研究として、人間の忘却に関する研究およびハンドジェスチャ学習に関する研究を述べる。

2.2.1 人間の忘却に関する研究

人間の記憶に関する研究は昔から行われている。例えば、Ebbinghaus は実験において実験参加者に「子音・母音・子音」から成り立つ無意味な音節を記憶させ、その再生率を調べ、そこから忘却曲線を導いた [17]。忘却曲線では 1 時間後の忘却率は 56%、1 日後には 74%、さらに 1 週間後には 77%、1 カ月後には 79%であることを示している。この忘却曲線から 7 日後以降の忘却率の変化は少ないことが分かる。そのため、本実験では、提案手法を用いた場合および既存手法においてハンドジェスチャを記憶した場合の 1 時間後、1 日後および 7 日後の定着度を評価する。また、記憶の定着度に関する研究として、触覚が言語学習に及ぼす影響を検討している研究がある [18]。

2.2.2 ハンドジェスチャ学習

ハンドジェスチャの学習に関連する研究として、記憶の定着度を向上させるジェスチャセットを考案している研究 [19]、およびハンドジェスチャの一つである ASL を Mixed Reality 環境において、学習を補助する研究 [1] などがある。これらの研究では視覚フィードバックを行って学習を補助したり、初めから学習しやすいハンドジェスチャセットを提案しているが、触覚フィードバックは行っていない。本研究では、EMS を用いてハンドジェスチャに必要な指および手首に触覚フィードバックを行う。

次に、ハンドジェスチャの一つとして指文字がある。指

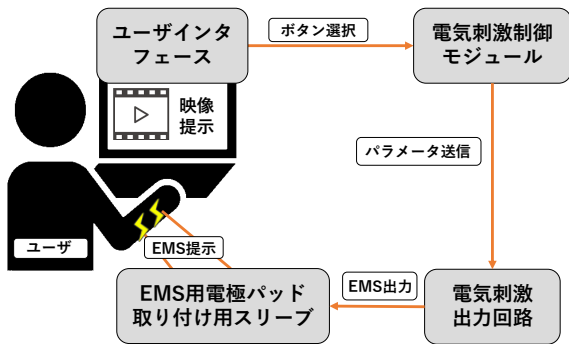


図 1 システム構成.

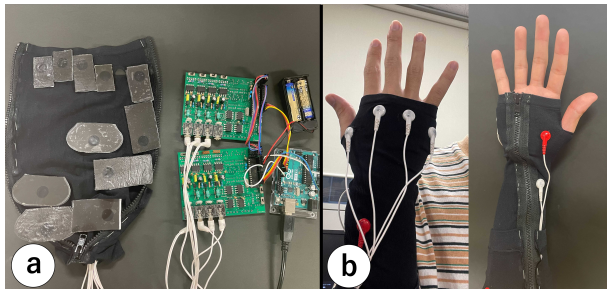


図 2 電気刺激出力用デバイス. (a) 電極パッド取り付け用スリーブおよび電気刺激出力回路. (b) 電極パッド取り付け用スリーブを着用している様子.

文字を独学で勉強する場合、テレビ番組の映像または書籍のような2次元の画像を見ながら学習する方法がある [20]. 本研究において、ハンドジェスチャ学習の既存手法は映像を見ながら学習する方法とする.

3. ハンドジェスチャ学習を補助するシステムの構築

本節では、EMS を用いてハンドジェスチャ学習を補助するシステムの設計および実装について述べる. まず、システム全体の構成を説明し、次にユーザインタフェースの設計を述べる. さらに、電気刺激出力回路、電気刺激適応箇所、および電気刺激のパラメータ設定を述べる. 最後に、システムのキャリブレーション方法を述べる.

3.1 システムの構成

本研究において提案するシステムは、ユーザがハンドジェスチャを正確に学習できるように、EMS を用いて学習を補助する. 図 1 にシステム構成図を示す. またシステムの構成を以下に示す.

- 電気刺激出力回路: 電気刺激制御モジュールから与えられた信号通りに電気刺激を出力する回路.
- 電極パッド取り付け用スリーブ: 特定の場所に電極パッドを取り付け、固定できるように、あらかじめ配線が施されたスリーブ (以降、電極パッド固定スリーブ).
- ユーザインタフェース: ユーザが学習したいハンド

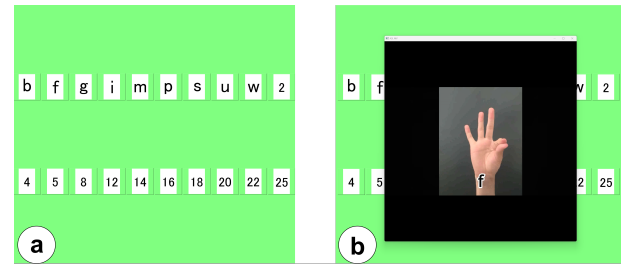


図 3 システムのユーザインタフェース. (a) 初期状態. (b) ボタンを押した状態.

ジェスチャを出力できるように、ハンドジェスチャごとにボタンが配置されたユーザインタフェース (以降、UI).

- 電気刺激制御モジュール: 指定されたハンドジェスチャに合わせて電気刺激のパラメータの情報を持った信号を生成し、電気刺激出力回路に送信するモジュール.

システムは、ユーザが学習したいハンドジェスチャを選択すると、そのハンドジェスチャの映像および、それに連動した電気刺激を出力して、適切な筋収縮を引き起こすことにより、ユーザがハンドジェスチャを習得できるように支援する.

3.2 ユーザインタフェース

UI (図 3) はユーザが円滑にハンドジェスチャを学習できるように設計されている. 以下に UI の含まれている要素を示す.

- 20 個のハンドジェスチャ用のボタンを表示し、ユーザが学習したいハンドジェスチャを任意に選べる (図 3a).
- 選択したハンドジェスチャ用のボタンを押すと、対応したハンドジェスチャ映像が再生される (図 3b).
- 選択したハンドジェスチャ用のボタンを押すと、映像と同期した EMS が出力される.
- 再生される映像はユーザが止めるまで、ループで再生される.

上記の内容により、UI はユーザがハンドジェスチャを学習する際に画面を操作する回数を少なくなるように工夫されている.

3.3 電気刺激出力回路、電気刺激適応箇所、および電気刺激のパラメータ設定

電極パッド固定スリーブおよび電気刺激出力回路を図 2 に示す. 電極パッド固定スリーブの内側には、手の甲側に 4 つ、手のひら側に 1 つ、ならびに手首の内側および外側にそれぞれ 1 つの電極端子が固定されており、合計 7 個の電極端子が固定されている. さらに、前腕部には、手の平側および手の甲側にそれぞれ 2 つの電極が固定されている. これを用いることにより、本システムは計 11 枚の電

極パッドからの電気刺激を利用して、5本の指の屈曲ならびに、手首の屈曲および伸展の合計7つの筋収縮を引き起こすことができる。

電極パッド固定スリーブ装着時には湿式の電極パッド(HV-LLPAD, オムロンヘルスケア株式会社) [21] を電気刺激適応箇所貼りつける。次に電極パッド固定スリーブを腕に取り付け、配線の先の電極端子と湿式の電極パッドを接続する。

また、電気刺激出力回路および電気刺激のパラメータを制御するために、Kono ら [22] が提供している回路およびプログラムを使用する。このプログラムは電気刺激のパルス幅、周波数、電圧、および出力時間を調整できる。本研究では、著者実験を行い、大きく手指および手首が動いた、パルス幅 300ms、周波数 70Hz に値を固定して使用する。また、電気刺激の出力時間は 100ms~1500ms の間で、それぞれのハンドジェスチャに適当な値を用いる。また、各電極に与える電圧は、システムを使用する前にキャリブレーションを行い、ユーザごとに決定する。

3.4 キャリブレーション方法

我々は、ユーザにシステムを安全に使用してもらうために、ユーザに対してキャリブレーションを行う。キャリブレーション手順を以下に示す。

- 電気刺激適応箇所に電極パッドを貼り付ける。
- 約 0~100V の間で 30 分割された電圧を小さい順に少しずつ上昇させる。
- 電圧上昇は電気刺激によって指の屈曲が必要十分になるまで行う。
- 筋収縮が引き起こされない場合は電極の位置をずらして調整する。

上記の作業を片手の5本指および手首、全てに対して行う。また、ユーザが痛みおよび不快感を示した場合は、即座に中止する。

4. 実験

EMS の効果について既存の学習手法との比較を行うための実験を行った。本節では実験の参加者および内容、実験に用いたハンドジェスチャ、および評価方法を述べる。

4.1 実験参加者

実験参加者は、研究室内の学生 8 名(女性 1 名)であった。また、実験参加者は、22-28 歳(平均 24.5 歳)であった。実験参加者の内 2 名が EMS 用いた機器を使用した経験があったが、いずれも日常的には使用していなかった。

4.2 学習手法

本実験で用いた学習手法を以下に示す。

- 既存手法：ハンドジェスチャの映像の視聴のみによ

て学習する手法。

- 提案手法：ハンドジェスチャの映像の視聴に加えて EMS を用いた電気刺激を与えながら学習する手法。

4.3 ハンドジェスチャのセット

提案手法および既存手法を学習するためにハンドジェスチャのセットを2種類用意した。ジェスチャセットは ASL における 1 から 30 および a から z の中から同じ難易度になるようそれぞれ 20 種類のハンドジェスチャを抜粋した。以下に示す。

- set1: a, d, h, l, n, q, t, v, y, 1, 3, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23
- set2: b, f, g, i, m, p, s, u, w, 2, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25

2 つハンドジェスチャのセットはそれぞれ単一の動作からなるハンドジェスチャが 13 種類、複数の動作からなるハンドジェスチャが 7 種類により構成されている。

4.4 実験内容

実験参加者は提案手法および既存手法を用いて ASL の 20 個のハンドジェスチャを記憶する実験参加者内実験を行った。以下に実験参加者が行った実験タスクの流れを示す。

(1) キャリブレーション (提案手法の場合のみ)

各電極に与える電気刺激の電圧を決定するためにキャリブレーションを行う。

(2) EMS 知覚テスト (提案手法の場合のみ)

各指および手首に与えた電気刺激がどの箇所に与えられたのかを知覚できるかチェックするために、1: 知覚しやすい, 2: 中間, 3: 知覚しにくい, として3段階のリッカート尺度を用いて電気刺激を知覚できるか回答する。

(3) ハンドジェスチャ学習 (両手法)

まず、5 分間ハンドジェスチャを学習する。その後、ハンドジェスチャをどれくらい覚えているか確認するためにテストを行う。テストの結果、正答率が 9 割以上だった場合、学習を終了とする。正答率が 9 割未満の場合は、再度 3 分間学習してもらい、テストを行う。これを正答率が 9 割以上になるまで行う。

(4) ハンドジェスチャ学習後テスト (両手法)

ハンドジェスチャ学習が終了した瞬間から、1 時間後、1 日後、および 1 週間後にハンドジェスチャをどれくらい覚えているかのテストを行う。

実験参加者は 2 つのジェスチャセットをそれぞれ提案手法および既存手法を用いて学習した。各学習手法およびジェスチャセットの組み合わせならびに実験順は、ラテン方格に従い実験参加者ごとに決定した。

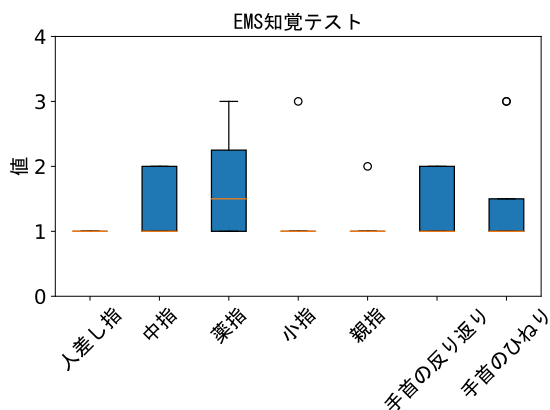


図 4 EMS の知覚テストの結果.

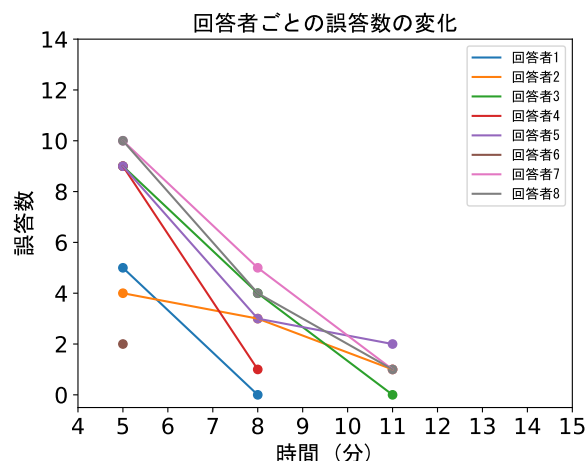


図 6 既存手法を用いて学習した場合の学習中の誤答数の変化.

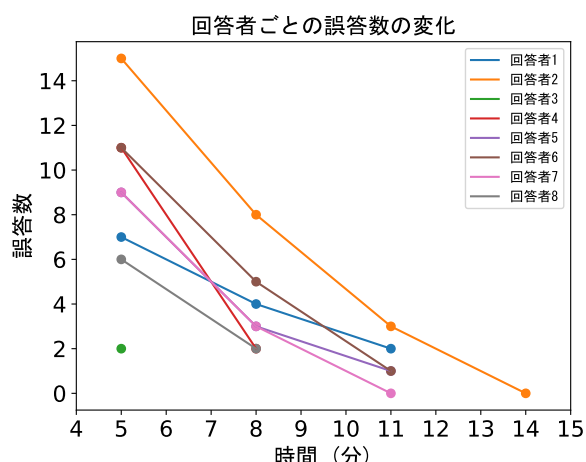


図 5 提案手法を用いて学習した場合の学習中の誤答数の変化.

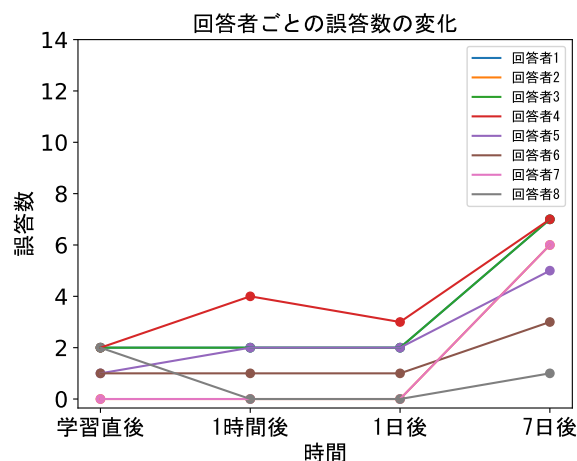


図 7 提案手法を用いて学習した場合の学習後の誤答数の変化.

4.5 評価方法

評価方法として、学習時間、学習時のテストの際の誤答数、学習後（1 時間後、1 日後および、1 週間後）の誤答数、NASA-TLX、および実験後のアンケートから評価する。

5. 実験結果

本節では実験における EMS 知覚テスト、学習時間、学習時のテストの際の誤答数、学習後（1 時間後、1 日後および、1 週間後）の誤答数、NASA-TLX、および実験後のアンケート結果を述べる。

5.1 EMS 知覚テスト

EMS の知覚テストの結果を図 4 に示す。図 4 より、各指に EMS を与えた場合、人差し指、小指、および親指は区別することが可能であったが、薬指、中指および手首の動作は他の動作との区別が少し難しい結果となった。

5.2 学習時間および誤答数

学習時間は提案手法では平均 10.25 分 (SD : 2.49)、既存手法では平均 9.86 分 (SD : 1.45) となった。また、各手

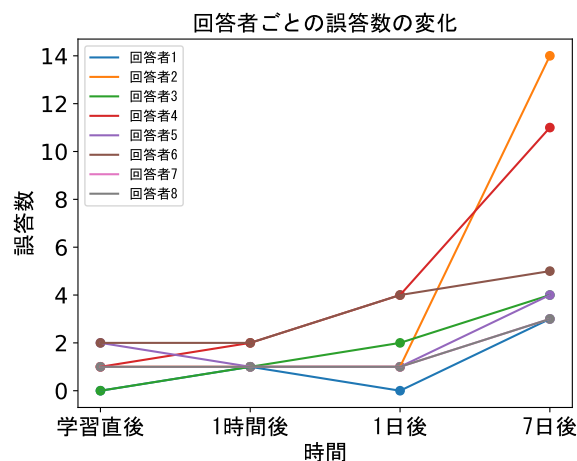


図 8 既存手法を用いて学習した場合の学習後の誤答数の変化.

法における学習中の誤答数の変化を図 5, 6 に示す。また、各手法における学習後の誤答数の変化を図 7, 8 に示す。また、各手法における学習時間ならびに学習中および学習後の誤答数の結果をシャピロウィルク検定に通した所、正規性はなかったため、Mann-Whitney U test を用いて解析し

項目	p 値
学習中の誤答数	0.5976
学習後の誤答数	0.3969
学習時間	0.3205

表 1 学習時間ならびに学習中および学習後の誤答数の Mann-Whitney U test の結果.

項目	p 値
1 時間後	1.0000
1 日後	0.6259
1 週間後	0.6821

表 2 学習後の各経過時間ごとの誤答数の Mann-Whitney U test の結果.

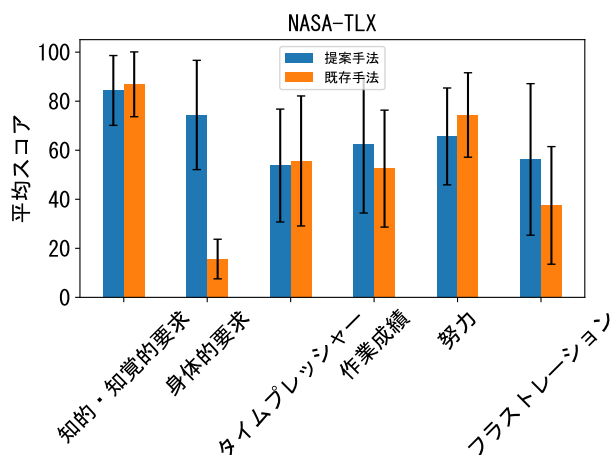


図 9 NASA-TLX の結果.

項目	p 値
知的・知覚的要求	0.5595
身体的要求	0.0023
タイムプレッシャー	1.0000
作業成績	0.7101
努力	0.3413
フラストレーション	0.1144

表 3 NASA-TLX 評価の Mann-Whitney U test の結果.

た. 結果を表 1 に示す. 表 1 に示す通り, p 値が 0.05 以上であるため学習中および学習後の誤答数ならびに学習時間において有意な差は見られなかった. また, 学習後の誤答数の結果について, 1 時間後, 1 日後, および 1 週間後についてそれぞれ Mann-Whitney U test を用いて解析した. 結果を表 2 に示す. 表 2 に示す通り, p 値がすべて 0.05 以上であるため 1 時間後, 1 日後, および 1 週間後の誤答数において有意な差はなかった.

5.3 NASA-TLX

NASA-TLX の結果を図 9 に示す. また, NASA-TLX の各項目の結果をシャピロウィルク検定に通した所, 正規性はなかったため, Mann-Whitney U test を用いて解析し

回答番号	内容
1	文字の形と手の形を対応付けることによって, 共通点を探しながら覚えた
2	一つ一つ覚えてから次に行って, しばらくしたら振り返って忘れていたらまた戻るようにした
3	手が動かされた最後の形を頭で覚えるようにした
4	手の動きとジェスチャの対応を覚えるようにした
5	なるべくジェスチャの意味を考えながら記憶した
6	ジェスチャの規則性ごと覚えるために, 先にアルファベットの ASL を記憶した後に, 数字の ASL を記憶した
7	ひとつひとつのジェスチャを順番に覚えていき, 実験中に定期的に振り返るように意識した

表 4 学習するにあたって気を付けたこと.

回答番号	内容
1	電気刺激によるサポートのおかげで, 目・音・形に追加して触覚による記憶ができるようになった
2	想像より指が動いて驚いた. 手首が連続して動くものは動きが分かりにくかった
3	16 の時と w の時に手が動かされた記憶が蘇ってきた
4	手が痛いときがあった
5	最後の形までに誘導される動きは自然に覚えることができた気がする
6	動画の様子と EMS が流れるタイミングに少し差があるように感じた
7	電気刺激によって, 手が痛くなる刺激を与えられる動画は再生する気が失せた
8	電気刺激と UI の連動性や速度を調整できれば, 覚える作業の効率化ができると感じた
9	筋電の誘導が強い一部のジェスチャは印象に残り覚えやすかった

表 5 実験の感想.

た. 結果を表 3 に示す. 表 3 は提案手法および既存手法の NASA-TLX スコアを比較した Mann-Whitney U test の U 統計量と p 値を示しており, 身体的要求の p 値 = 0.0023 < 0.05 以下であるため有意な差があった. これは, 提案手法において, EMS の影響による身体的負荷が大きいことを示している. それ以外の項目は p 値が 0.05 以上であるため有意な差がなかった.

5.4 アンケート結果

ハンドジェスチャの記憶の仕方および, 実験の感想を自由記述形式によりアンケートを実施した. 結果を表 4, 5 に示す.

6. 実験結果についての議論およびハンドジェスチャ学習システムに関する改良点

本節にて, 実験結果についての議論およびハンドジェスチャ学習システムに関する改良点を述べる.

6.1 実験結果についての議論

図4に示される通り、中指、薬指および手首の動作は他の動作と区別することが少し難しいという結果が得られた。したがって、中指、薬指、および手首の動作を含まないハンドジェスチャを用いて比較実験を行うことにより、EMSの効果効果を正確に調査することができると考えられる。

次に図9および表3より、提案手法における身体的要求が高いことがわかった。これは、EMSによる不快感および痛みにより、実験中の身体的負荷が高まったためだと考えられる。実際に、表5のコメントより、実際にEMSによる不快感および痛みを感じたというコメントがあった。また、NASA-TLXのフラストレーションのスコアの標準偏差が61.88と高いことから、EMSによる不快感は個人差があることが示された。さらに、アンケート結果からもEMSによってハンドジェスチャの印象が残り、学習に効果を感じたという回答およびEMSによる痛みが原因で学習意欲が減退するという回答が混在しており、EMSによる不快感に個人差があることを示している。今回の実験では、学習中および学習後のハンドジェスチャの誤答数を比較した所、有意差が出ない結果となった。しかし、実験参加者を増やして再度実験を行い、電気刺激による不快感の少ないグループと不快感の高いグループに分けて評価することにより、不快感の少ないグループでは、有意差が出ることが期待できる。

さらに、アンケートの結果(表4)から、ハンドジェスチャの覚え方には個人差があることが分かった。このことから、今回の実験結果には、EMSの効果に加えて、この個人差の影響が含まれていると考えられる。したがって、今後は、実験参加者間のハンドジェスチャの覚え方に差をなくすために、学習時間に制限を設ける等のハンドジェスチャの覚え方による影響を減らす方法を探る必要がある。

最後に、アンケート結果(表5)より、EMSによる誘導の強さが大きいハンドジェスチャとそうでないハンドジェスチャが存在したという回答があった(回答番号9)。このことから、EMSによる誘導の強いハンドジェスチャだけを用いて再度実験を行うことが考えられる。

6.2 ハンドジェスチャ学習システムに関する改良点

表5のアンケート結果より、電気刺激およびUIの連動性ならびに速度の調整ができれば、ハンドジェスチャを覚えやすくなるといったコメントがあった。また、動画および電気刺激にずれを感じたといったコメントもあった。そのため、システムを改良する必要があると考えられる。今回構築したシステムは、ハンドジェスチャの映像に合わせて電気刺激を出力する。しかし、電気刺激のタイミングは著者が映像に合わせて手動で設定したため、ずれが生じたと考えられる。そのため、ハンドジェスチャの映像から、画像認識技術を利用して指および手首の動きを認識し、その

結果から電気刺激を与えることにより、ハンドジェスチャ映像および電気刺激のずれを解消できると考えられる。

また、現在のシステムは予め設定されたハンドジェスチャしか学習できない。新しいハンドジェスチャを学習できるようにするために、新しいハンドジェスチャの映像をシステムに取り込み、画像認識技術を利用して手の動きを認識する。これにより、簡単に新しいハンドジェスチャを追加できるシステムが実現できると考えられる。

さらに、現在のシステムはハンドジェスチャを学習している間、常にユーザに電気刺激を提示するため、EMSによる不快感が大きい。ハンドジェスチャ学習を行っているユーザが提示したハンドジェスチャを画像認識し、提示されたハンドジェスチャが間違っていた場合のみ、正解に近づくように電気刺激を提示するようにすることにより、不快感の少ないシステムを構築できると考えられる。

7. 結論

本研究において我々は、ハンドジェスチャの映像とそれに連動した電気刺激をユーザに提示できるシステムを構築した。また、提案手法と既存手法を用いて、ハンドジェスチャ学習における記憶性について比較調査した。結果としては提案手法を用いた方が身体的要求が高いことが分かった。また、学習中および学習後の誤答数において有意な差は示されなかった。しかし、EMSによる不快感は個人差が大きいため、実験参加人数を増やし、EMSによる不快感の少ないグループと不快感の高いグループに分けて調査することが考えられる。また、今回、EMSによって刺激した7つの箇所内、手首の屈曲および薬指の屈曲させるEMSは知覚しにくいといった結果になった。今後は、手首の屈曲および薬指の屈曲を含むハンドジェスチャを除いて実験を行うことが考えられる。また、今回の実験では、EMSによる複数指の誘導およびタイミング提示を行ったが、提示を行ったことによる学習への効果についてはさらに詳しく調査する必要がある。

最後に今回構築したハンドジェスチャ学習補助システムは、電気刺激と映像の連動性が悪く、新たに学習したいハンドジェスチャをシステムに組み込むことができない。さらに、学習中のユーザが提示したハンドジェスチャに対してのフィードバックを行っていない。今後は、システムおよび実験計画を改良し、EMSによるハンドジェスチャ学習の効果効果を正確に調査できるように実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP21H03472の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Shao, Q., Sniffen, A., Blanchet, J., Hillis, M. E., Shi, X., Haris, T. K., Liu, J., Lamberton, J., Malzkuhn, M., Quandt, L. C., Mahoney, J., Kraemer, D. J. M., Zhou, X. and Balkcom, D.: Teaching American Sign Language in Mixed Reality, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, IMWUT '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 152:1–157:27 (2020).
- [2] Oyedotun, O. K. and Khashman, A.: Deep learning in vision-based static hand gesture recognition, *Neural Computing and Applications*, Springer, Vol. 28, No. 12, pp. 3941–3951 (2017).
- [3] Lopes, P., You, S., Cheng, L.-P., Marwecki, S. and Baudisch, P.: Providing Haptics to Walls & Heavy Objects in Virtual Reality by Means of Electrical Muscle Stimulation, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1471–1482 (2017).
- [4] Lopes, P., You, S., Ion, A. and Baudisch, P.: Adding Force Feedback to Mixed Reality Experiences and Games Using Electrical Muscle Stimulation, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–13 (2018).
- [5] Lopes, P., Ion, A., Mueller, W., Hoffmann, D., Jonell, P. and Baudisch, P.: Proprioceptive Interaction, *Proceedings of the 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 939–948 (2015).
- [6] Pfeiffer, M., Dunte, T., Schneegass, S., Alt, F. and Rohs, M.: Cruise Control for Pedestrians: Controlling Walking Direction Using Electrical Muscle Stimulation, *Proceedings of the 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2505–2514 (2015).
- [7] Ebisu, A., Hashizume, S., Suzuki, K., Ishii, A., Sakashita, M. and Ochiai, Y.: Stimulated Percussions: Techniques for Controlling Human as Percussive Musical Instrument by Using Electrical Muscle Stimulation, *SIGGRAPH ASIA 2016 Posters*, SA '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 37:1–37:2 (2016).
- [8] Lopes, P., Jonell, P. and Baudisch, P.: Affordance++: Allowing Objects to Communicate Dynamic Use, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2515–2524 (2015).
- [9] Knapp, M. E.: Practical Physical Medicine and Rehabilitation, *Postgraduate Medicine*, Taylor & Francis, Vol. 41, No. 3, pp. A–113–A–116 (1967).
- [10] Takahashi, A., Brooks, J., Kajimoto, H. and Lopes, P.: Increasing Electrical Muscle Stimulation's Dexterity by Means of Back of the Hand Actuation, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 216:1–216:12 (2021).
- [11] Tamaki, E., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Possessed-Hand: Techniques for Controlling Human Hands Using Electrical Muscles Stimuli, *Proceedings of the 2011 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 543–552 (2011).
- [12] Nith, R., Teng, S.-Y., Li, P., Tao, Y. and Lopes, P.: DextrEMS: Increasing Dexterity in Electrical Muscle Stimulation by Combining it with Brakes, *Proceedings of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2021).
- [13] Watanabe, K., Oka, M. and Mori, H.: Feedback Control to Target Joints Angle in Middle Finger PIP and MP Joint Using Functional Electrical Stimulation, *Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems*, Cham, Springer International Publishing, pp. 440–454 (2019).
- [14] Nijijima, A., Takeda, T., Aoki, R. and Miyahara, S.: Muscle Synergies Learning with Electrical Muscle Stimulation for Playing the Piano, *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 54:1–54:10 (2022).
- [15] Kilian, A., Karolus, J., Kosch, T., Schmidt, A. and Woźniak, P. W.: EMPiano: Electromyographic Pitch Control on the Piano Keyboard, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 196:1–196:4 (2021).
- [16] Chen, K., Zhang, B. and Zhang, D.: Master-Slave Gesture Learning System Based on Functional Electrical Stimulation, *Intelligent Robotics and Applications*, ICIRA '14, Cham, Springer International Publishing, pp. 214–223 (2014).
- [17] Ebbinghaus, H.: Memory: A contribution to experimental psychology, Oxford, England: Dover (1885).
- [18] 丸山裕也, 中沢実: 触感覚が言語学習に及ぼす影響についての検討・評価, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-DPS-165, No. 1, pp. 1–4 (2015).
- [19] Takayama, Y., Ichikawa, Y., Shizuki, B., Kawaguchi, I. and Takahashi, S.: A User-Based Mid-Air Hand Gesture Set for Spreadsheets, *Asian CHI Symposium 2021*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 122–128 (2021).
- [20] 社会福祉法人聴力障害者情報文化センター: 手話を学びたい人々へ, <http://www.jyoubun-center.or.jp/slit/howto/>. 最終参照日: 2023年4月26日.
- [21] オムロンヘルスケア株式会社: 低周波治療器 エレパルス用 ロングライフパッド HV-LLPAD, https://store.healthcare.omron.co.jp/item/HV_LLPAD.html. 最終参照日: 2023年4月26日.
- [22] Kono, M., Ishiguro, Y., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Design and Study of a Multi-Channel Electrical Muscle Stimulation Toolkit for Human Augmentation, *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, AH '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 11:1–11:8 (2018).