

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学院
システム情報工学研究群修士論文

映像と電氣的筋肉刺激を組み合わせた
ハンドジェスチャ学習の効果

西川宜利
修士（工学）
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2024年3月

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、多様な場面において利用されている。一般的にハンドジェスチャの学習には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の支援を行うために、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。評価実験 1 では American Sign Language を両手法を用いて学習し、7 日間の学習効果を比較した。その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。また、評価実験 2 では、システムを改良し、より短期的な期間における単純なジェスチャを対象に両手法を用いて学習効果を比較調査した。その結果、提案手法を用いた方がハンドジェスチャの提示する際の間違が増加することが示された。また、評価実験 1 および評価実験 2 の結果から EMS を用いたハンドジェスチャ学習支援システムの新しいデザインを考案した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	フィードバックを用いてハンドジェスチャ学習を支援する方法	1
1.2	目的とアプローチ	1
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	電氣的筋肉刺激	4
2.1.1	電氣的筋肉刺激の手指の制御に関する研究	4
2.1.2	EMSの安全性に関する研究	5
2.1.3	EMSを用いて刺激する手の筋肉および動く関節	5
2.2	機械的アクチュエータを用いた力覚フィードバック	7
2.3	学習支援に関する研究	7
2.3.1	電氣的筋肉刺激を用いた運動学習の支援に関する研究	7
2.3.2	EMSを用いた場合のユーザの主体性への影響および人間の学習に関する研究	8
2.3.3	振動刺激を用いた運動学習支援の研究	8
2.3.4	ハンドジェスチャ学習支援	8
2.3.5	人間の記憶に関する研究	9
第3章	予備実験	10
3.1	アプローチ	10
3.2	予備実験にて使用したデバイス	10
3.3	実験内容	10
3.4	実験結果	11
3.5	実験結果から得られた問題点	11
第4章	映像とEMSを組み合わせるハンドジェスチャ学習を支援するシステムの構築	12
4.1	システムの構成	12
4.2	ユーザインタフェース	12
4.3	EMS出力回路	14
4.4	EMS適応箇所、およびEMSのパラメータ設定	18

4.5	キャリブレーション方法	19
4.6	デバイスの安全性	19
第 5 章	評価実験 1	20
5.1	評価実験 1：実験参加者	20
5.2	評価実験 1：学習手法	20
5.3	評価実験 1：ハンドジェスチャのセット	20
5.4	評価実験 1：実験内容	21
5.5	評価実験 1：評価方法	21
5.6	評価実験 1：実験結果	21
5.6.1	評価実験 1：EMS 知覚テスト	22
5.6.2	評価実験 1：学習時間および誤答数	22
5.6.3	評価実験 1：NASA-TLX	23
5.6.4	評価実験 1：アンケート結果	24
5.7	評価実験 1：考察	24
5.7.1	評価実験 1：議論	25
5.7.2	評価実験 1：ハンドジェスチャ学習システムに関する改良点	27
第 6 章	映像と EMS を組み合わせてハンドジェスチャ学習を補助するシステムの改良	30
6.1	システムの構成	30
6.2	EMS 信号生成器, EMS 適応箇所, および EMS のパラメータ設定	30
6.3	キャリブレーション方法	33
第 7 章	評価実験 2	34
7.1	評価実験 2：実験参加者	34
7.2	評価実験 2：学習手法	34
7.3	評価実験 2：ハンドジェスチャのセット	34
7.4	評価実験 2：実験内容	35
7.5	評価実験 2：評価方法	36
7.6	評価実験 2：実験結果	37
7.6.1	評価実験 2：誤答数	37
7.6.2	評価実験 2：チェックボックスにて回答した内容と実験参加者が提示したハンドジェスチャの違い	37
7.6.3	評価実験 2：NASA-TLX	40
7.6.4	評価実験 2：アンケート結果	40
7.7	評価実験 2 の結果から得られた考察	42
7.7.1	評価実験 2：提案手法におけるのミスの増加の理由	42
7.7.2	評価実験 2：2 本指のハンドジェスチャのミスが多い理由	44

7.7.3 評価実験2：1本指のハンドジェスチャにおいて，両手法に差がなかった理由	44
第8章 全体の議論	45
8.1 制限	45
8.2 EMSを用いた新しいハンドジェスチャ学習支援システムのデザイン	45
第9章 おわりに	47
謝辞	49
参考文献	50
付録A 評価実験1にて用いた各種書類	58
A.1 評価実験1にて用いた事前アンケート	59
A.2 評価実験1にて用いた事後アンケート	61
A.3 評価実験2にて用いた事前アンケート	62
A.4 評価実験2にて用いた事後アンケート	64
A.5 評価実験1および2にて用いたNASA-TLXアンケート	67

図目次

2.1	手指における DIP 関節, PIP 関節, および MP 関節.	5
2.2	手指における母指内転筋, 短母指屈筋, および母指対立筋 [小田].	6
2.3	手指における虫様筋および背側骨間筋 [小田].	6
3.1	予備実験にて用いたデバイス.	11
4.1	システム構成.	13
4.2	EMS 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 EMS 出力回路. (b) 電極パッド取り付け用スリーブを装着している様子.	13
4.3	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.	14
4.4	実装した EMS 回路の全体を示した簡略図.	15
4.5	電圧調整用回路 (デジタル)	15
4.6	チョッパブースト回路. 電源電圧 (3V) を 30~100V まで昇圧する.	16
4.7	電圧調整用パルスのガルバニック絶縁回路. Arduino Uno 電源の回路および VCC 電源の回路を絶縁する.	16
4.8	EMS パルスのガルバニック絶縁回路. Arduino Uno 電源の回路および VCC 電源の回路を絶縁する.	17
5.1	EMS の知覚テストの結果.	22
5.2	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.	23
5.3	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.	24
5.4	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.	25
5.5	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.	26
5.6	NASA-TLX の結果.	28
6.1	改良したシステム構成.	31
6.2	改良したハンドジェスチャ学習システム. (a) システムを使用している様子. (b) EMS 出力装置.	31
6.3	デバイスを取り付けた様子. (a) 各指を動かすための電極位置と対応を色で表す様子. (b) 電極固定用スリーブを装着している様子.	32
6.4	EMS 出力装置の回路.	32
7.1	実験タスク.	35

7.2	実験の様子. (a) 電気刺激を提示されながら, 電気刺激に連動したハンドジェスチャ映像を見てハンドジェスチャを学習している様子. (b) 学習したハンドジェスチャ動作にて, 折れ曲がった指をチェックボックスへ入力している様子. (c) カメラに向かって学習したハンドジェスチャを提示している様子.	36
7.3	提案手法および既存手法における誤答数.	37
7.4	指の種類ごとの誤答の割合.	38
7.5	指の本数ごとの誤答の割合.	38
7.6	チェックボックスを用いた回答および実際に提示したハンドジェスチャの不一致数.	39
7.7	NASA-TLX の結果.	40
7.8	実験参加者が感じた実験タスクの難易度.	41
A.1	評価実験 1 にて用いた事前アンケート-Part1.	59
A.2	評価実験 1 にて用いた事前アンケート-Part2.	60
A.3	評価実験 1 にて用いた事後アンケート.	61
A.4	評価実験 2 にて用いた事前アンケート-Part1.	62
A.5	評価実験 2 にて用いた事前アンケート-Part2.	63
A.6	評価実験 2 にて用いた事後アンケート-Part1.	64
A.7	評価実験 2 にて用いた事後アンケート-Part2.	65
A.8	評価実験 2 にて用いた事後アンケート-Part3.	66
A.9	タスクアンケート-Part1. 6つの指標に対する回答を行う.	67
A.10	タスクアンケート-Part2. Part1 に示した6つの指標のうち, ランダムに選ばれた2つの名前が表示され, 重要な要因だと思う方を選択する. これを, 全通りに対して行う. 例として, 「身体的要求」および「タイムプレッシャー」が選ばれた場合の画面を示す.	68

表 目 次

5.1	学習中および学習後の誤答数ならびに学習時間のマン・ホイットニー U 検定の結果.	22
5.2	学習後の各経過時間ごとの誤答数のマン・ホイットニー U 検定の結果.	27
5.3	NASA-TLX 評価のマン・ホイットニー U 検定の結果.	27
5.4	学習するにあたって気を付けたこと.	28
5.5	実験の感想.	29
7.1	評価実験 2：誤答数におけるそれぞれの検定の結果.	39
7.2	NASA-TLX の項目ごとの検定の結果.	41
7.3	実験参加者の記憶方法.	42
7.4	実験参加者の感想とコメント.	43

第1章 はじめに

ハンドジェスチャは様々な場面において使用されている。例えば、コンピュータへの入力 [TIS⁺21], および手話などがある。これらのハンドジェスチャを学習する場合、指導者から教えてもらう、または独学で習得する必要がある。指導者から教えてもらう場合は、指導者を用意する必要があるため、気軽に学習することが難しい。そのため、多くの学習者は本または映像を使って独学でハンドジェスチャを習得する。指文字のようなハンドジェスチャを独学で習得場合は、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、間違えて覚えてしまう可能性もある。そのため、フィードバックを用いてハンドジェスチャの学習を支援する方法が求められている。

本章ではまず、フィードバックを用いたハンドジェスチャ支援方法を説明する。次に、本研究の目的、アプローチ、および貢献について述べ、最後に論文の構成を述べる。

1.1 フィードバックを用いてハンドジェスチャ学習を支援する方法

深層学習を用いて指文字を識別し [OK17], ユーザの提示した指文字を認識する研究がある。また、識別した情報を用いて、ハンドジェスチャの一種である American Sign Language (以降, ASL) 学習を支援する研究 [SSB⁺20] がある。この研究では、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支援したり、識別した指文字が正しいかどうかを判断し、間違っていた場合に、視覚フィードバックを行うことにより学習を支援している。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、学習を支援する研究はあるが、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支援する研究は行われていない。また、実際にハンドジェスチャを学習する際に触覚フィードバックを用いて支援することの有用性の調査はされていない。

1.2 目的とアプローチ

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支援する方法として Electrical Muscle Stimulation (以降, EMS) に着目した。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 [LYC⁺17] または触覚アクチュエーション [LYIB18] 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、指を伸ばしている、腕を曲げているといった体の状態を人間は知覚することが出来る。そのため、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 は運動学習支援として役立つことが明らかになっている [LIM⁺15, PDS⁺15, EHS⁺16]。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 [EHS⁺16]、初めて使う道具の操作方法の学習 [LJB15]、および歩行者の進路方向の誘導を行う研究 [PDS⁺15] が行われてきた。

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支援になると考えた。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、間違えてしまう可能性ある。EMS を用いて指および手首を適切なタイミングで動かすことにより、違う指を動かしてしまう可能性が減少すると考えられる。また、指を動かすタイミングを提示することにより、正確にハンドジェスチャの動きを学習できると考えられる。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および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映像および EMS を組み合わせてハンドジェスチャを学習する手法（以降、提案手法）ならびに、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。

1.3 貢献

この論文の貢献は以下の通りである：

- ハンドジェスチャ映像に合わせて EMS を同期させたハンドジェスチャ支援システムを開発した。
- 本システムを用いて American Sign Language（以降、ASL）を学習する実験を行い、7 日間にわたる学習効果を調査した。
- 実験結果からは、電気刺激に対する不快感に個人差があることが示され、学習効果にも差があることが示唆された。また、一部の電気刺激位置は区別しにくいことが分かった。
- システムを用いて 5 本指の折れ曲がりだけを組み合わせた単純なハンドジェスチャセットを学習する実験を行い、短期的な学習における学習効果を調査した。
- 実験結果より、既存手法の方が提案手法より間違いが有意に少ないことが分かった。さらに、電気刺激がユーザの主体性を下げた可能性があることを示唆した。

- 2つの実験結果から、新しいEMSを用いたハンドジェスチャ支援システムのデザインを考案した。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第1章においては、本研究の背景、目的とアプローチ、および貢献を示す。第2章においては、本研究に関連する研究を述べ、本研究の位置付けを示す。第3章においては、先行研究にて行った予備実験の内容および結果を述べる。第4章においては、ハンドジェスチャ映像に合わせてEMSを同期させたハンドジェスチャ支援システムの実装を述べる。第5章においては、評価実験1の内容、結果、および考察を述べる。第6章においては、評価実験1の結果より示されたハンドジェスチャ支援システムの改良の実装を述べる。第7章においては、評価実験2の内容、結果、および考察を述べる。第8章においては評価実験1および2を合わせた全体の議論を述べる。第9章においては、本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

本研究は、触覚刺激である EMS を用いた研究分野および運動学習支援に関する研究分野に基づいている。本章では EMS を用いた研究、機械的アクチュエータを用いた力覚フィードバックの研究、および学習支援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 [Kna67]。EMS は、高い抵抗を持つ皮膚を超えて、その下にある筋肉に直接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を引き起こし、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 [PDR16,HLK⁺23,PSA13,APS19,HPS⁺17,PR17]。

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 [LYC⁺17,LYIB18]、ならびに運動を支援する研究 [LJB15,EHS⁺16,LYC⁺17] 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ユーザに電気刺激を与えている。前腕部は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ことは難しい [TMR11]。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 [TMR11,TBKL21,NTL⁺21]。Takahashi ら [TBKL21] 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 [WOM19] は指屈筋および指伸筋に対して電気刺激を与え、指を目的の角度で停止させるために、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 [NTL⁺21] 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を独立して動かすために、電気刺激を与える電極を手の甲に貼る方法 [TBKL21] を使用する。これにより、手指の独立した制御が可能である。

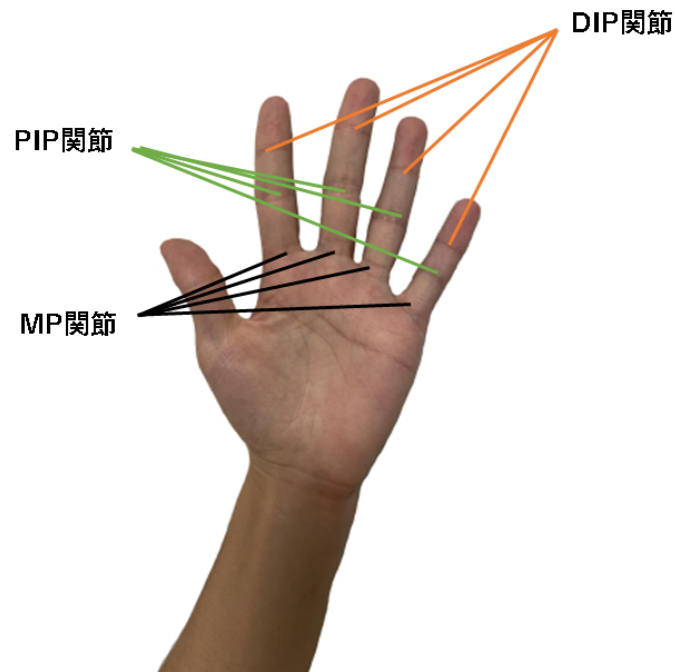


図 2.1: 手指における DIP 関節, PIP 関節, および MP 関節.

2.1.2 EMS の安全性に関する研究

EMS は医療リハビリテーションとして開発された技術である [Kna67]. そのため, EMS を使用する際には安全性に注意を払う必要がある. また, 吉本ら [吉元 20] は, 周波数範囲 15~100Hz の交流電流が左手から, 左足にかけて通過する電流経路に対しての影響をまとめている. また, HCI の分野において EM を応用する際の注意点をまとめている論文もある [KTN⁺18, RBRPV⁺22]. また, より安全に EMS を使用できるようにツールキットを提供している研究もある [KIMR18, PDR16].

EMS を安全に使用するために, 本研究の評価実験 1 では Kono ら [KIMR18] のツールキットを使用している. また, 評価実験 2 では, Pfeiffer ら [PDR16] のツールキット同様に, EMS の電気刺激の生成を市販のデバイスを使用することによって安全性を向上させている. また, 実験を行う際には, 参加者ごとにキャリブレーションを行い安全に EMS を使用している.

2.1.3 EMS を用いて刺激する手の筋肉および動く関節

本研究では手指に関する筋肉を EMS によって刺激し, 指を屈曲させている. そのため, 手指の関節の定義および, 本研究において EMS を与えている手の筋肉について述べる. 手指の関節は図 2.1 に示すように指の先から順に DIP 関節, PIP 関節, MP 関節となっている. 本研究は人差し指, 中指, 薬指, および小指の 4 本の指を屈曲させるため, Takahashi らの提案手法である手の甲に電極を貼る方法を用いている. これにより, MP 関節のみが屈曲し, PIP 関

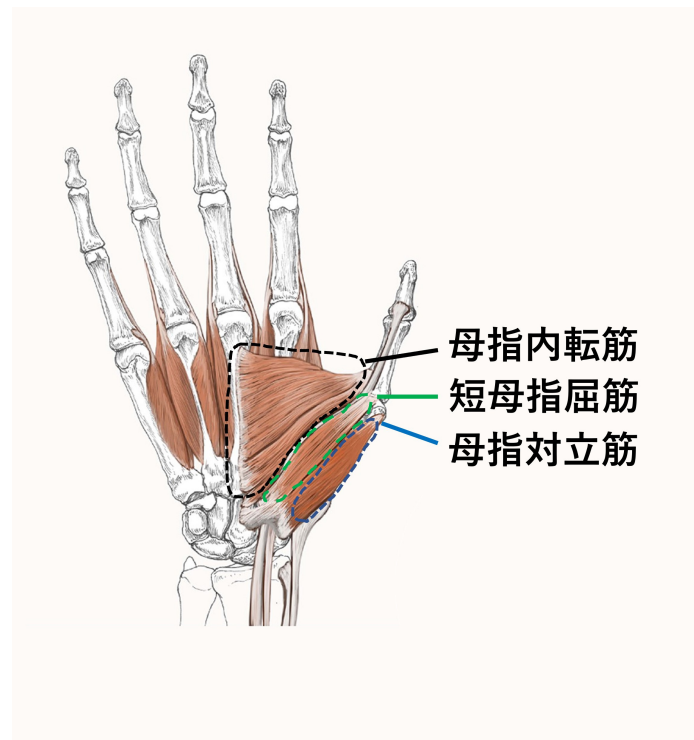


図 2.2: 手指における母指内転筋，短母指屈筋，および母指対立筋 [小田].

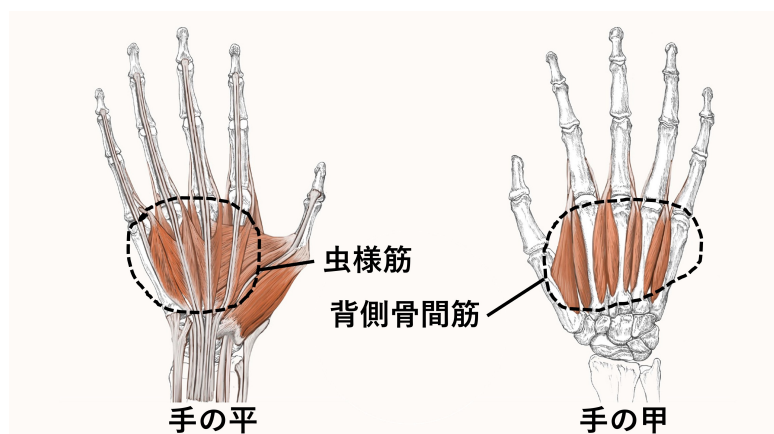


図 2.3: 手指における虫様筋および背側骨間筋 [小田].

節は伸展している。これは指の MP 関節を屈曲させ、DIP 関節および PIP 関節を伸展させる筋肉である虫様筋および背側骨間筋 [小田] の筋肉運動を EMS によって誘発するためである。また、本研究では親指を屈曲させるために親指の付け根にも電極を貼りつけている。これは親指を屈曲させる筋肉である母指内転筋、短母指屈筋、および母指対立筋 [小田] の筋肉運動を EMS によって誘発するためである。また、本研究では、手首を回転させるために前腕部内側と外側に電極を配置している。これは手首の回転動作を行う前腕橈側屈筋と手のひらを伸ばす橈側手根伸筋を刺激している。

2.2 機械的アクチュエータを用いた力覚フィードバック

一般にユーザの指を動かすことにより力覚フィードバックを提供する方法として、モータを用いたグローブ型デバイスの研究がなされてきた。モータを用いたグローブ型デバイスはすべての指の MP 関節および PIP 関節にモータを取り付けることによりユーザの指を器用に動かすことを可能にしている。例えば、Haptic Workstation [Wor] は機械的な触覚デバイスである。他にも、モータを用いた触覚デバイスとして、Cyber Grasp [Cyba], Exoskeleton [SGJVHA⁺16], および Dexmo [Cybb] などがある。本研究では、力覚フィードバックを提供する方法として、機械的なモータを用いず、EMS のみを用いている。

2.3 学習支援に関する研究

運動学習を支援する研究は多く行われている。本節では、EMS を用いた運動学習に関する研究、およびハンドジェスチャ学習支援に関する研究を述べる。

2.3.1 電氣的筋肉刺激を用いた運動学習の支援に関する研究

EMS を用いて人間の動作を支援する研究が行われている [LJB15,EHS⁺16,NTAM22,PDS⁺15,KGTL23,NK23]。Pfeiffer ら [PDS⁺15] 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支援する研究がある [NTAM22,KKK⁺21]。Kilian ら [KKK⁺21] 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、ピアノ学習を支援している。また Niishima ら [NTAM22] 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 [LJB15] 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 [CZZ14] は教師側が提示したハンドジェスチャを EMS を用いて学習者側に提示した。運動機能の向上および運動の安全性の向上に EMS を使用する研究もある [NK23,KGTL23]。Nishima ら [NK23] はユーザがうまく使えていない筋肉を EMS を用いて刺激することにより手の把持の強さを向上させようとした。Ravi ら [KGTL23] は物を持ち上げる際に腰に負荷がかからないように EMS を用いて動作を支援した。これらの研究では、EMS を用いたハンドジェスチャ学習の効果について調査

されていない。そこで、本研究ではEMSを用いてハンドジェスチャを覚えた際の学習の効果について調査する。

2.3.2 EMSを用いた場合のユーザの主体性への影響および人間の学習に関する研究

EMSの使用がユーザの主体性を損なう、不快感を引き起こすなどといったことが報告されている [TNLK22,NTAM22]。また、主体性を失わずに運動を支援する研究として、EMSを用いてユーザの主体的な動作に合わせて、ユーザが意識していない筋肉を付随的に動かすことにより、ユーザの運動を支援する研究が行われている [NA22,KTN⁺21,KKK⁺21,NTAM22]。また、神経科学の研究 [Deh20] では、能動的な学習への関与は学習の柱であると主張している。本研究の提案手法において、我々はユーザに対し能動的に指を動かして学習することを指示している。これにより、能動的な学習へ関与を下げずに学習を支援する。

2.3.3 振動刺激を用いた運動学習支援の研究

山菅らは [山口 15]、EMSではなく、体性感覚電気刺激（以降、SES）とよばれる人間の感覚器に電気刺激を与える手法を用いて、運動学習を支援し、学習が促進されることを示した。また、振動刺激を用いてピアノ学習を促進させる研究が行われている [HDS08,HSD⁺10,野崎 23]。Kevin ら [HDS08,HSD⁺10] は振動刺激を用いて、受動的に学習する場合の効果を調査している。野崎ら [野崎 23] は視覚刺激、聴覚刺激、および振動刺激の組み合わせによる学習効果の違いを調査した。本研究では、触覚刺激としてEMSを用いた場合の運動学習の効果を調査している。

2.3.4 ハンドジェスチャ学習支援

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 [TIS⁺21]、および Mixed Reality 環境においてハンドジェスチャの一つである ASL の学習を支援する研究 [SSB⁺20] 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の支援、または学習しやすいハンドジェスチャセットの提案をしているが、触覚フィードバックを用いた学習の支援は行っていない。本研究では、EMSを用いてハンドジェスチャに必要な指に触覚フィードバックを行う。また、EMSを用いてユーザにハンドジェスチャを提示する研究 [PGD20,CZZ14] 行われている。しかし、これらの研究では、EMSを用いてハンドジェスチャを出力することに焦点を当てており、EMSを用いた場合の学習効果は調査していない。また、ハンドジェスチャの1つとして指文字がある。指文字を独学で勉強する場合、実際に提示している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 [IC]。本研究では、実験において使用する既存手法として、映像を見ながら学習する方法を使用する。

2.3.5 人間の記憶に関する研究

人間の記憶に関する研究は昔から行われてきている。例えば、エビングハウス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 [Ebb85]。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1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、本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時間後および1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、触感覚が言語学習に及ぼす影響を検討している研究がある [丸山 15]。他にも、ハンドジェスチャ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 [TIS⁺21]、ハンドジェスチャの一つである American Sign Language (以降, ASL) を MR 環境において、ハンドジェスチャを1人称視点および、3人称視点で表示することにより、学習を支援する研究 [SSB⁺20]、およびハンドジェスチャ学習において、教師が提示したハンドジェスチャを教示側の筋電情報を元に EMS を用いて生徒側にも同じハンドジェスチャを提示するといった研究 [CZZ14] などがある。本研究の評価実験1では、エビングハウスの実験を参考に、1週間後までのハンドジェスチャの学習効果を調査する。

第3章 予備実験

以前の著者らの研究 [西川 21] では、EMS を用いたハンドジェスチャ学習の効果について調査した。具体的には、記憶のしやすさと記憶の保持度（以降、記憶性）を、既存の学習手法と比較して評価するための予備実験を行った。本章では、予備実験におけるアプローチ、使用したデバイス、実験内容、実験結果の概要、実験結果から得られた問題について簡潔に述べる。

3.1 アプローチ

先行研究 [西川 21] では、ハンドジェスチャ学習における記憶性について既存の学習手法との比較を行うため、ハンドジェスチャ学習支援システムを構築した。また、画像と EMS を組み合わせてハンドジェスチャを学習する手法を提案手法、画像のみを用いてハンドジェスチャを学習する手法を既存手法とした。また、実際に、提案手法と既存手法を比較するために、ASL のハンドジェスチャを学習する実験を行った。

3.2 予備実験にて使用したデバイス

予備実験にて用いたデバイスを図 3.1 に示す。予備実験時において用いたデバイスは手の甲に 4 枚、手の平に 1 枚および、手首に 2 枚の計 7 枚の電極を配置し、それらを通して 5 箇所電気刺激を与えることにより、5 本の手指の屈曲を行うことができた。

3.3 実験内容

ハンドジェスチャ学習における EMS を用いた場合の記憶性の効果について既存の学習手法との比較を行うために、実験参加者にはハンドジェスチャを記憶してもらう被験者間実験を行った。実験に用いるハンドジェスチャとして、ASL における 1～10 のハンドジェスチャを選択した。ASL を記憶する方法としては、既存の学習手法である 2 次元画像によって ASL を確認し学習する場合（既存手法）および、2 次元画像を見ることに加えて EMS を与えながら学習する場合（提案手法）を比較する。評価方法としては、1 時間、および 1 日経過後のミス数ハンドジェスチャの学習時間、ならびに System Usability Scale（以降、SUS [Bro96]）を用いた。また、実験後にハンドジェスチャ学習に関するアンケートを行った。



図 3.1: 予備実験にて用いたデバイス.

3.4 実験結果

実験結果として、提案手法による学習時間は既存手法と比べて長いことがわかった。また、学習後において提示したハンドジェスチャにおいて、誤ったハンドジェスチャを提示した回数も提案手法は既存手法よりも多いことが分かった。また、両手法ともに誤ったハンドジェスチャの提示回数は少なかった。

3.5 実験結果から得られた問題点

実験結果より、我々は提案手法の学習時間が既存手法よりも長いのは、提案手法の方がEMSを与える分、一つのハンドジェスチャを覚えるために多くの操作を必要としたためだと考えた。これは、実験アプリケーションを改良し、学習の流れを統一することによって、学習時間が長くなることを改善できる。また、ミス数が少ないのはハンドジェスチャに含まれる動作が容易さ、および記憶するハンドジェスチャの数が少なさが原因であると考えた。これは、デバイスを改良し、EMSにより補助できるハンドジェスチャの数を増やすことにより改善できる。

第4章 映像とEMSを組み合わせてハンドジェスチャ学習を支援するシステムの構築

先行研究にて問題となった，補助できるハンドジェスチャの種類の少なさを解決するために，ハンドジェスチャ学習を支援するシステムを改良した．本章では，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，EMS 出力回路，EMS 適応箇所，および EMS 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．

4.1 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 を用いて学習を支援する．図 4.1 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．

- EMS 出力回路：EMS 制御モジュールから与えられた信号通りに EMS 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）．
- EMS 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 EMS のパラメータの情報を持った信号を生成し，EMS 出力回路に送信するモジュール．

本システムは，ユーザが学習したいハンドジェスチャを選択した際に，そのハンドジェスチャの映像および，それに連動した EMS 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．

4.2 ユーザインタフェース

UI（図 4.3）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 に含まれている要素を示す．

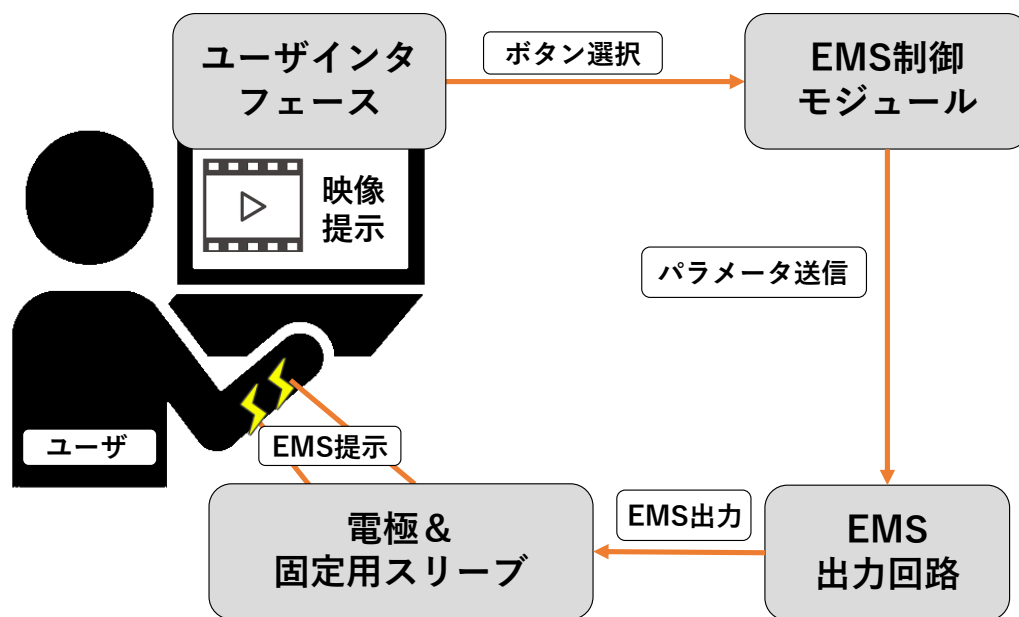


図 4.1: システム構成.

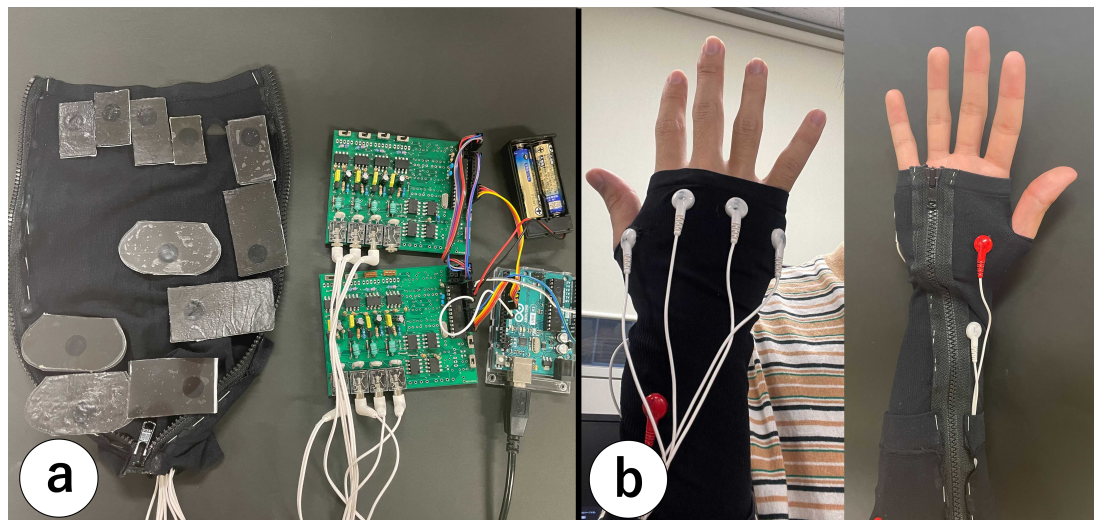


図 4.2: EMS 出力用デバイス. (a) 電極パッド取り付け用スリーブおよび EMS 出力回路. (b) 電極パッド取り付け用スリーブを装着している様子.

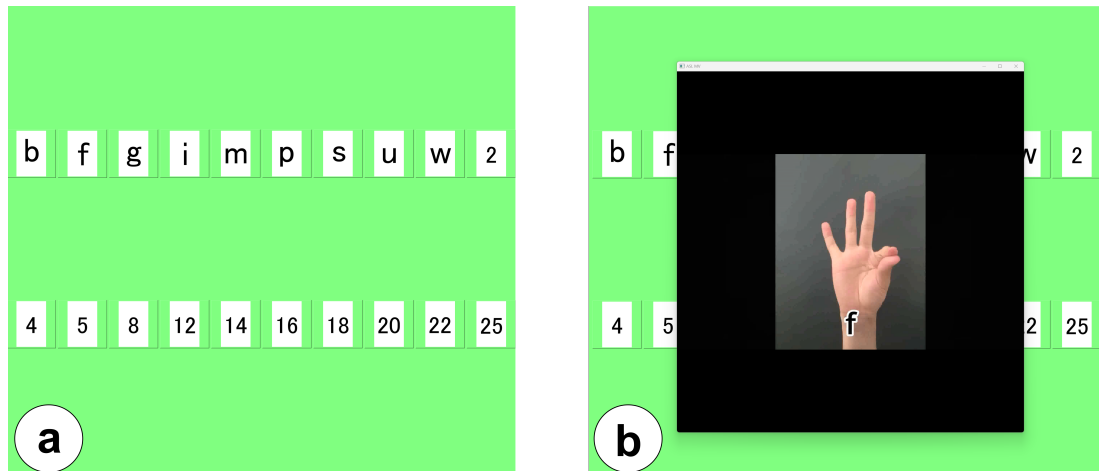


図 4.3: システムのユーザインタフェース. (a) 初期状態. (b) ボタンを押した状態.

- 20 個のハンドジェスチャ用のボタンが表示され、ユーザは学習したいハンドジェスチャを任意に選べる (図 4.3a).
- 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 4.3b).
- 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するように工夫されている.

4.3 EMS 出力回路

EMS 出力回路の実装に用いた環境を以下に示す.

- ハードウェア
 - Arduino UNO
 - PC (CPU: Intel Core i7-10750H CPU and NVIDIA GeForce GTX 1650)

我々のデバイスには、Kono ら [KIMR18] が提供している EMS を与える回路 (以降、EMS 回路) が用いられている. EMS を人体に与えるためには、Arduino Uno によって制御された EMS のパラメータが反映されたパルス波 (以降、EMS 制御パルス) を約 30 V–100 V に昇圧する必要がある. また、EMS 回路の電源には 3 V 乾電池を用いる. 3 V 乾電池の電圧を昇圧

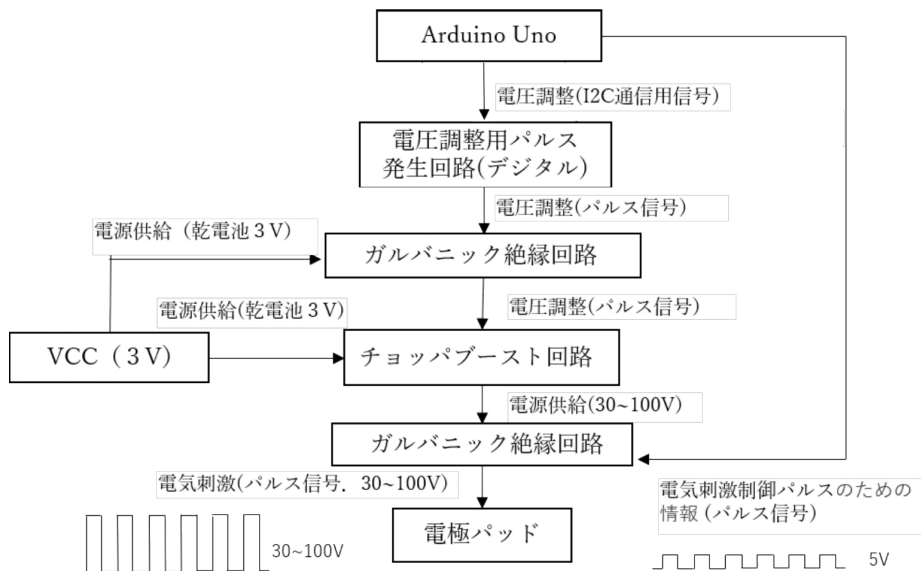


図 4.4: 実装した EMS 回路の全体を示した簡略図.

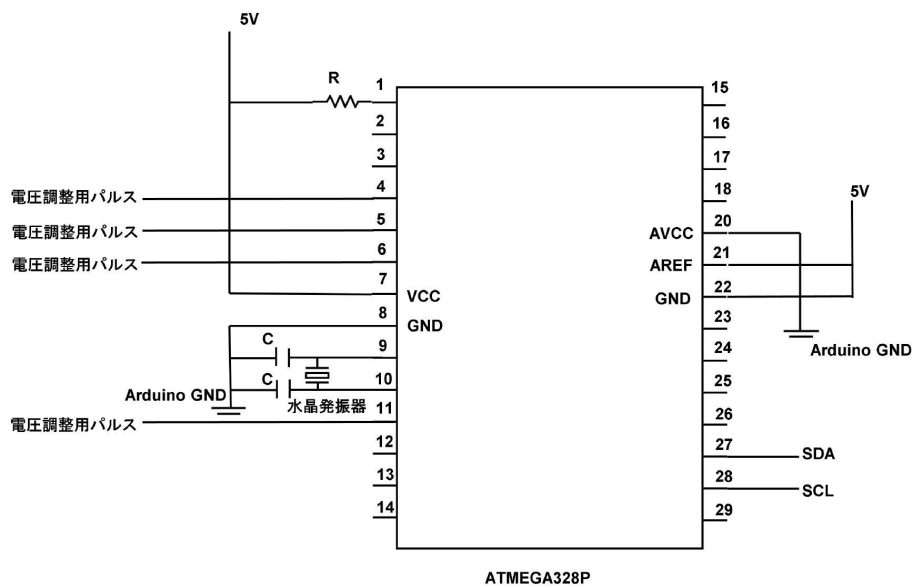


図 4.5: 電圧調整用回路（デジタル）.

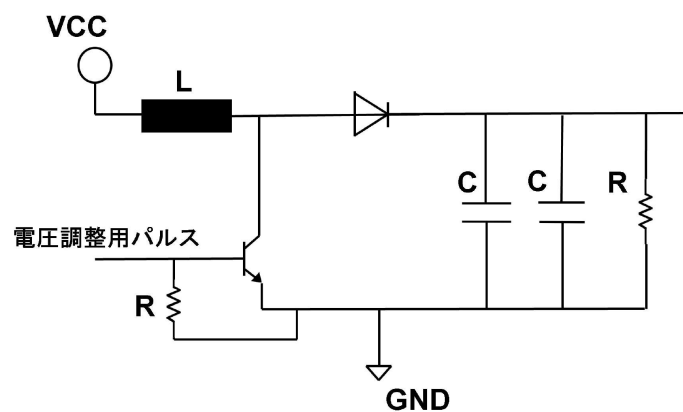


図 4.6: チョップパブースト回路. 電源電圧 (3V) を 30~100V まで昇圧する.

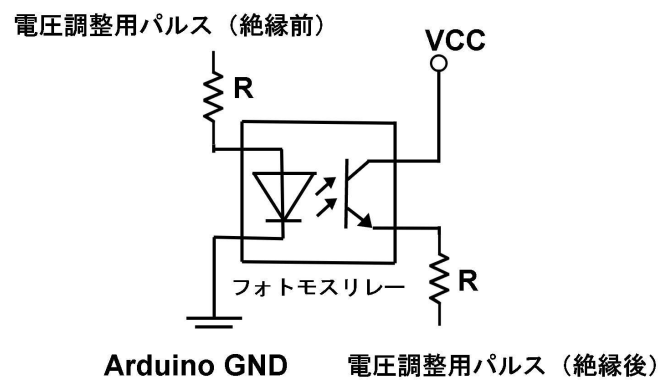


図 4.7: 電圧調整用パルスのガルバニック絶縁回路. Arduino Uno 電源の回路および VCC 電源の回路を絶縁する.

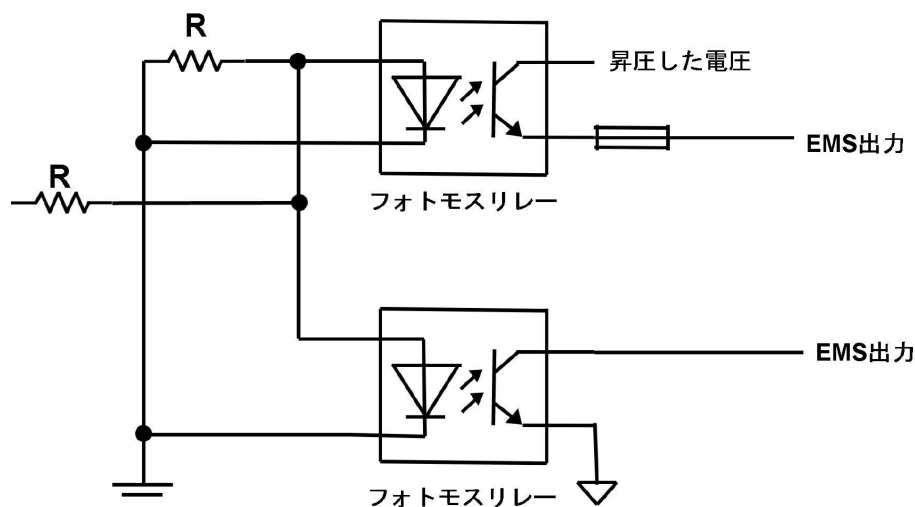


図 4.8: EMS パルスのガルバニック絶縁回路. Arduino Uno 電源の回路および VCC 電源の回路を絶縁する.

するために、昇圧回路であるチョップパースト回路を用いる。その昇圧回路を制御するために、ソフトウェア（以下、デジタル制御とする）を用いた制御手法を用いる。また、Arduino Uno からの電圧を電源として用いた回路部分から 3V 乾電池を電源として用いた回路部分を絶縁するためにガルバニック絶縁回路を用いる。また、ガルバニック絶縁回路を用いることにより、出力される EMS の GND は分離される。これらの役割をまとめた EMS 回路の全体簡略図を図 4.4 に示す。また、回路を主な役割ごとに分けて説明する。

- 電圧調整用パルス幅発生回路（デジタル制御）

作成した電圧調整用パルス幅発生回路（デジタル制御）を図 4.5 に示す。今回作成した EMS 回路はマイクロコンピュータである ATMEGA328 を回路上にも配置しており、Arduino UNO をマスタ、回路上の ATMEGA328 をスレーブとして I2C 通信と呼ばれるシリアル通信手法の一つを用いた通信を行っている。スレーブ側からは PC 上で操作したパルス幅のパルス信号を出力することが可能である。出力パルスは図 4.6 に示すチョップパースト回路の入力信号である。

- チョップパースト回路

作成したチョップパースト回路を図 4.6 に示す。この回路では直列に繋げた 2 本の単三乾電池（3 V）を電源（VCC）としており、この電源の電圧を昇圧する。また、昇圧された電圧は図 4.6 にある BV1 の端子から出力される。電圧を昇圧する際、昇圧する電圧量

を制御するために、PULSE_V_1 より入力されたパルス信号の幅を用いる。電圧は約 30 ～100 V まで昇圧される。

- ガルバニック絶縁回路

作成したガルバニック絶縁部分の回路を図 4.7 および図 4.8 に示す。ガルバニック絶縁回路は追実装した回路にて 2 種類存在する。1 つ目は、電圧調整用パルス（図 4.5 に示す回路から出力されたパルス）を Arduino Uno の電源から絶縁するための回路（図 4.7）であり、2 つ目は Arduino から出力された EMS 制御パルスを Arduino Uno の電源から絶縁する回路（図 4.8）である。また、ガルバニック絶縁回路により、1 つの EMS に対して、GND が分かれて存在する。そのため、与えたい箇所に他の GND を気にせず EMS を与えることが可能である。

これらの回路は絶縁するためにフォトモスリレーを用いる。図 4.8 に示す回路は、チョップパブースト回路によって昇圧した電圧を電源として用いている。また、Arduino Uno から出力された EMS 制御パルスを入力信号として用いている。これにより、チョップパブースト回路から出力された電源の電圧と同じ電圧にまで EMS 制御パルスを昇圧することができる。その後、昇圧した EMS 制御パルスを電極パッドから出力する。

4.4 EMS 適応箇所、および EMS のパラメータ設定

電極パッド固定スリーブおよび EMS 出力回路を図 4.2 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。これにより、本システムは合計 11 枚の電極パッドからの EMS 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計 7 つの筋収縮を引き起こすことが可能である。

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）[OHC] を EMS 適応箇所に貼りつける。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および湿式の電極パッドを接続する。

また、EMS 出力回路および EMS のパラメータを制御するために、Kono ら [KIMR18] 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 EMS 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、EMS の出力時間は 100ms～1500ms の間において、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。また、電極パッドは湿式のため、定期的に交換または洗浄が必要である。

4.5 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。

- EMS 適応箇所にて電極パッドを貼り付ける。
- 約 0～100V の間で電圧を小さい順に 30 段階に分けて少しずつ上昇させる。
- 電圧上昇は EMS 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。また、これらのキャリブレーションは Kono ら [KTN⁺18] の研究におけるガイドラインに沿って行った。

4.6 デバイスの安全性

今回用いている EMS 回路の電源には、アルカリ乾電池 2 本を使用している。家庭用電源ではなく乾電池を用いることによって、供給される電流の量を制限し、安全性を確保するためである。さらに、出力部にはヒューズを用いており、出力される電流の量を制限している [KIMR18]。

第5章 評価実験 1

予備実験にて得たフィードバックを基に改善したデバイスおよび実験計画を使用し、EMS の効果を既存の学習手法と比較するための実験を行った。本章では実験の参加者、内容、実験に用いたハンドジェスチャ、評価方法、実験結果、および実験結果の考察を述べる。

5.1 評価実験 1：実験参加者

参加者は研究室内の学生 8 名（うち女性 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。実験参加者のうち 2 名は以前に EMS 機器を使用した経験があったが、日常的には使用していなかった。

5.2 評価実験 1：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って学習する手法。
- 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。

5.3 評価実験 1：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 つの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。

5.4 評価実験1：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う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の程度覚えているか確認するためのテストを行う。そのテストの結果、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、再テストを行う。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の程度覚えているかのテストを行う。

実験参加者は、それぞれの手法を使用して異なるジェスチャセットを学習した。各参加者は、2つの手法を使い、2種類のジェスチャセットをそれぞれ学習した。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、カウンターバランスをとり実験参加者ごとに決定した。

5.5 評価実験1：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 Task Load Index (NASA-TLX [HS88]) アンケート、および実験後のアンケートから評価する。

5.6 評価実験1：実験結果

本章では実験における 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。

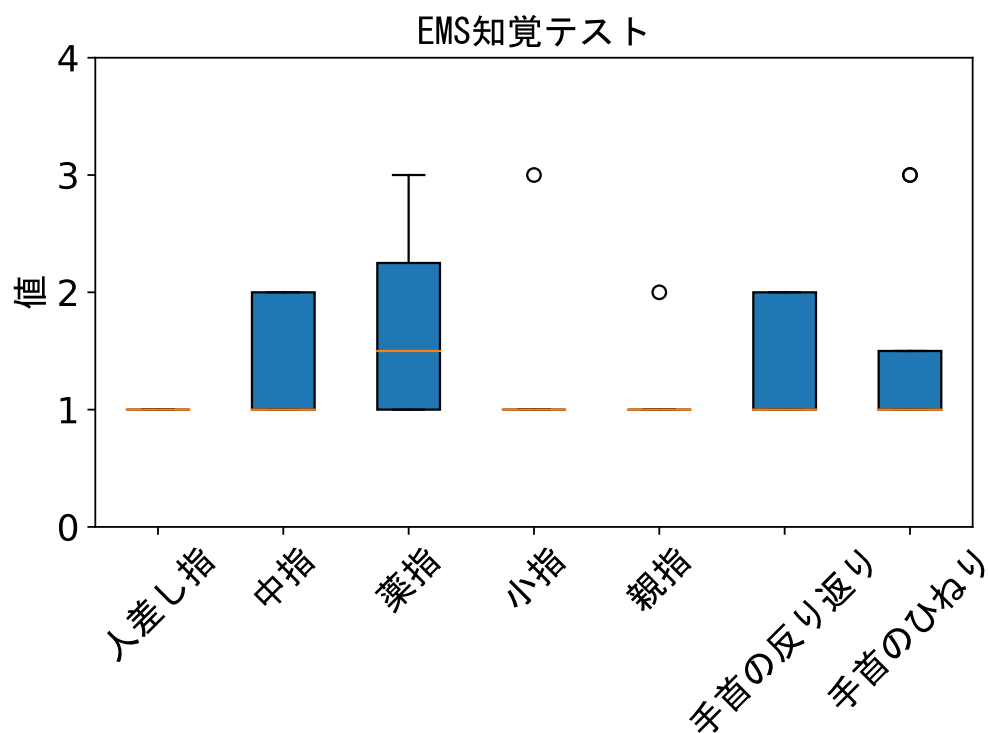


図 5.1: EMS の知覚テストの結果.

5.6.1 評価実験 1：EMS 知覚テスト

EMS の知覚テストの結果を図 5.1 に示す. 図 5.1 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.

5.6.2 評価実験 1：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, 各手法における学習中の誤答数の変化を図 5.2 および図 5.3 に示す. また, 各

項目	p 値
学習中の誤答数	0.60
学習後の誤答数	0.40
学習時間	0.32

表 5.1: 学習中および学習後の誤答数ならびに学習時間のマン・ホイットニー U 検定の結果.

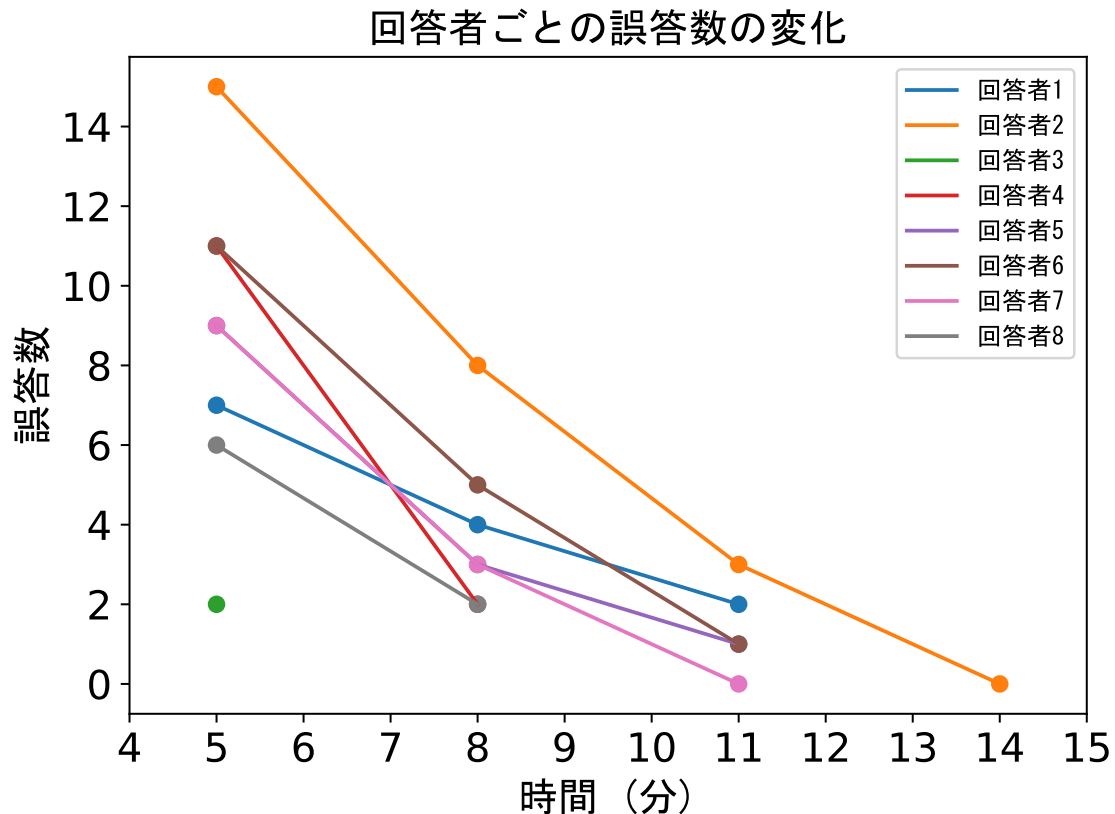


図 5.2: 提案手法を用いて学習した場合の学習中の誤答数の変化.

手法における学習後の誤答数の変化を図 5.4 および図 5.5 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, マン・ホイットニー U 検定を用いて解析した. 結果を表 5.1 に示す. 表 5.1 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マン・ホイットニー U 検定を用いて解析した. 結果を表 5.2 に示す. 表 5.2 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.

5.6.3 評価実験 1 : NASA-TLX

NASA-TLX の結果を図 5.6 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ところ, 正規性はなかったため, マン・ホイットニー U 検定を用いて解析した. 結果を表 5.3 に示す. 表 5.3 は提案手法および既存手法の NASA-TLX スコアを比較したマン・ホイットニー U 検定の 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

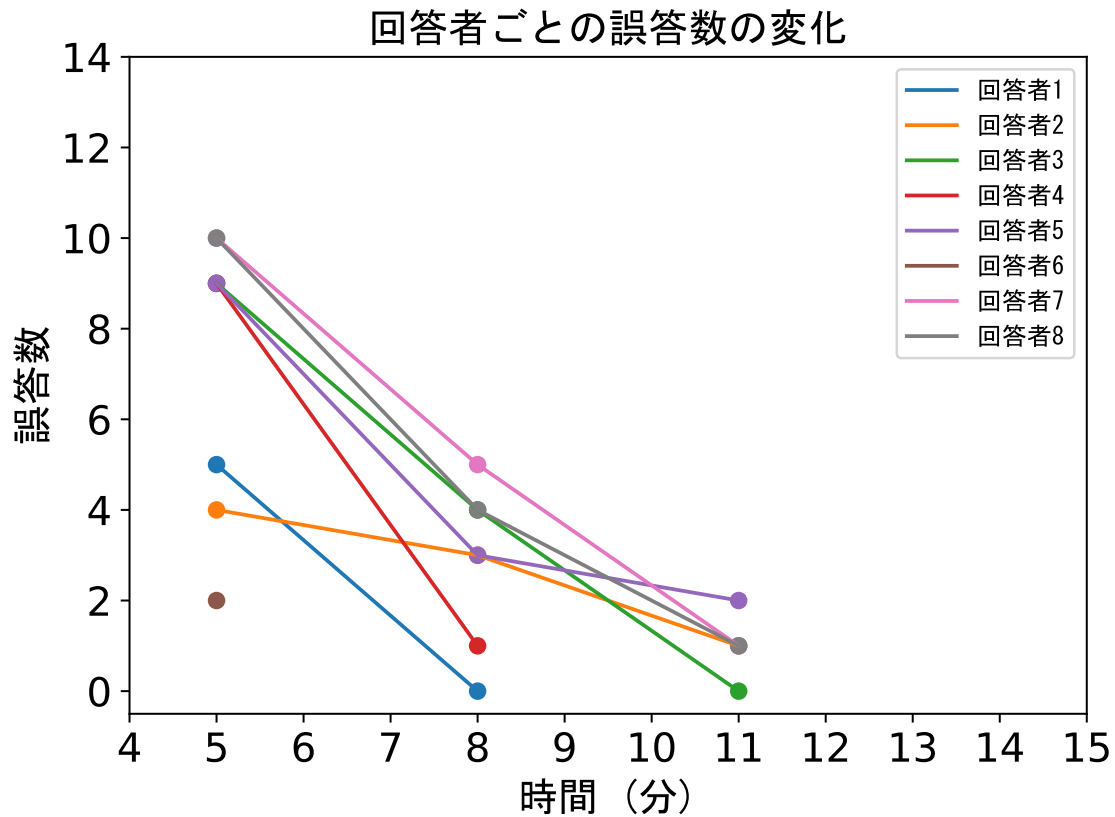


図 5.3: 既存手法を用いて学習した場合の学習中の誤答数の変化.

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。

5.6.4 評価実験 1：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 5.4、および図 5.5 に示す。

5.7 評価実験 1：考察

本節では、実験結果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。

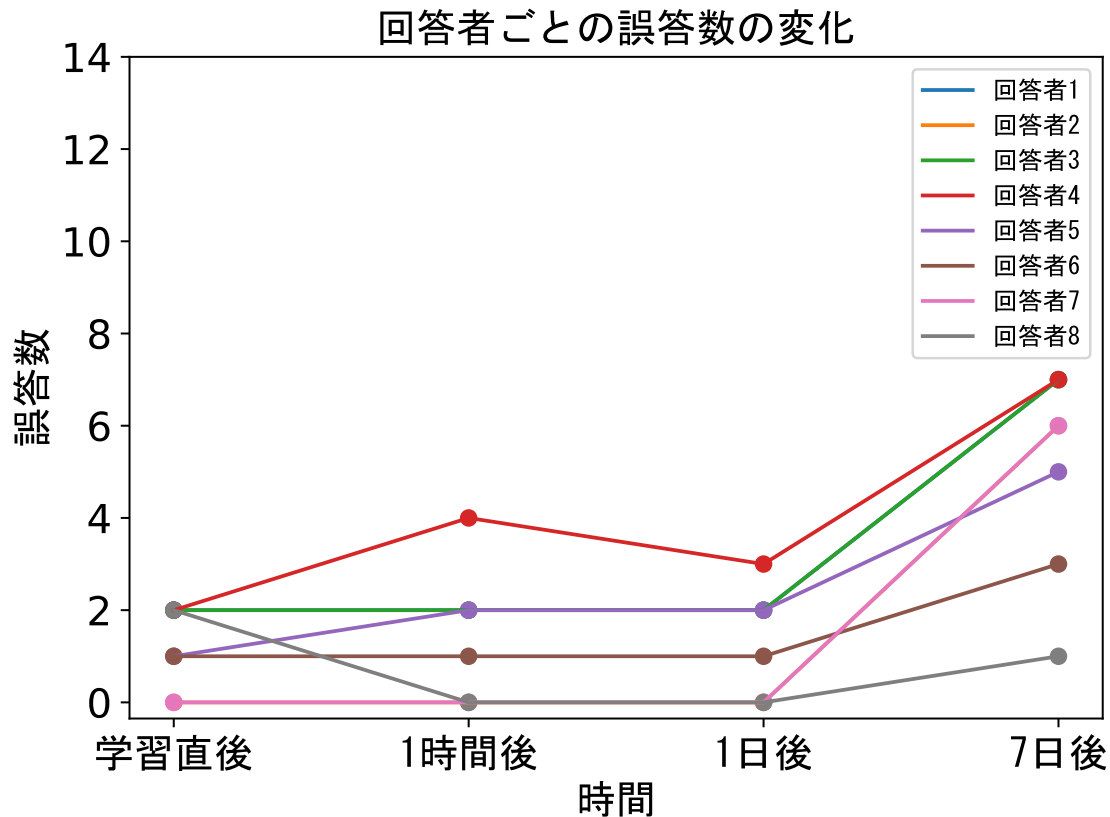


図 5.4: 提案手法を用いて学習した場合の学習後の誤答数の変化.

5.7.1 評価実験 1：議論

図 5.1 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 の効果を正確に調査することができると考えられる．

次に図 5.6 および表 5.3 より，提案手法における身体的要求が高いことが分かった．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 5.5 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ところ，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，不快感の度合いに

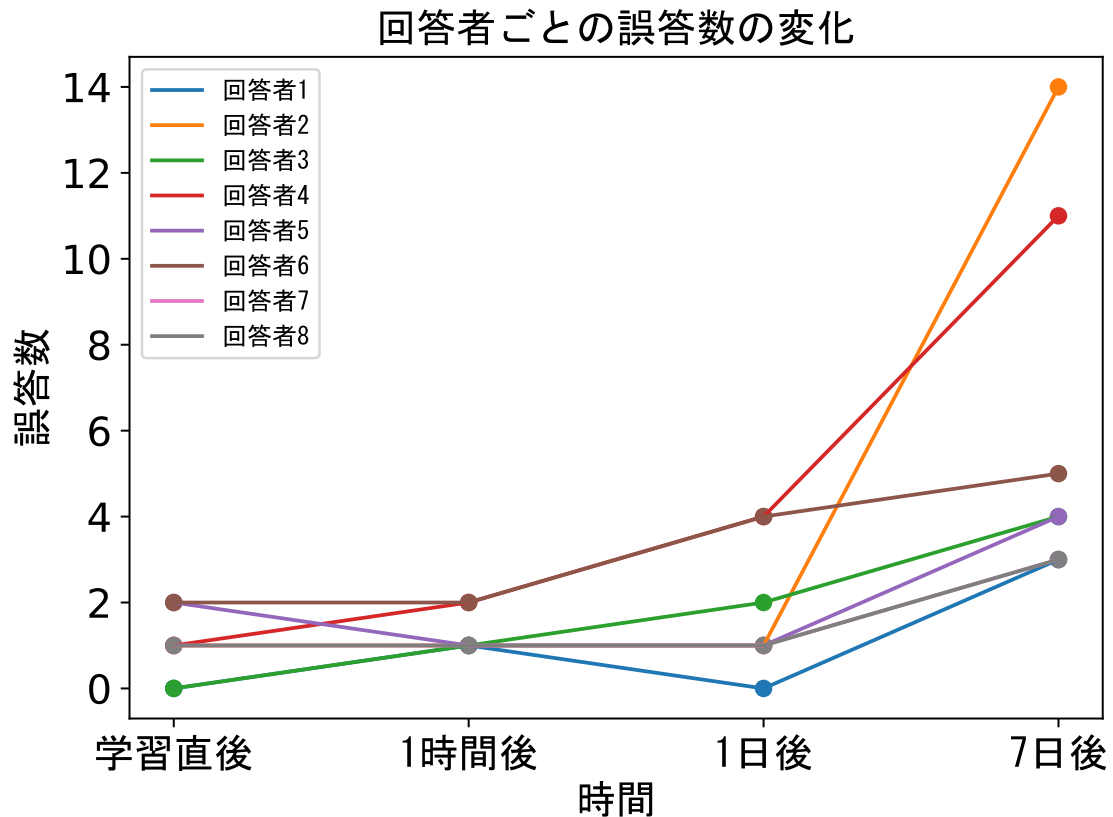


図 5.5: 既存手法を用いて学習した場合の学習後の誤答数の変化.

よってグループ分けをして再評価することにより、不快感が少ないグループでは有意差が見られる可能性がある。

さらに、アンケートの結果（表 5.4）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 5.5）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（表 5.5, No.9）。このことから、EMS による誘導の強いハンドジェスチャのみを用いて再度実験を行うことが考えられる。

また、今回の実験においては実際に使われている複雑なハンドジェスチャを対象に 1 週間の学習効果を調査した。しかし、単純な手指の動作を EMS を用いて補助した場合において実際に EMS の効果があるかどうかは調査されていない。そこで、短期間において単純な手指の動作に限定して、EMS の効果を調査する必要がある。

項目	p 値
1 時間後	1.0
1 日後	0.63
1 週間後	0.68

表 5.2: 学習後の各経過時間ごとの誤答数のマン・ホイットニー U 検定の結果.

項目	p 値
知的・知覚的要求	0.56
身体的要求	0.0023
タイムプレッシャー	1.0
作業成績	0.71
努力	0.34
フラストレーション	0.11

表 5.3: NASA-TLX 評価のマン・ホイットニー U 検定の結果.

5.7.2 評価実験 1：ハンドジェスチャ学習システムに関する改良点

表 5.5 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。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、現在のシステムはあらかじ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を構築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。

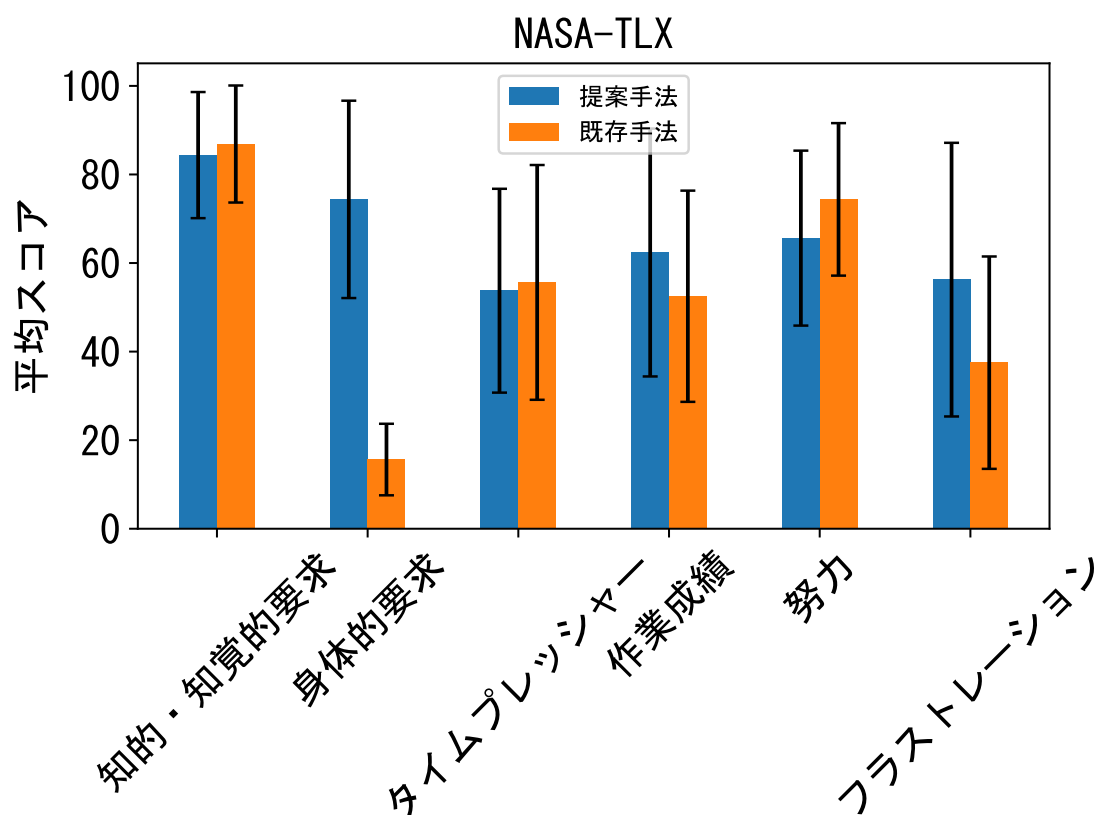


図 5.6: NASA-TLX の結果.

No.	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い、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 5.4: 学習するにあたって気を付けたこと.

No.	内容
1	電気刺激によるサポートのおかげで、目、音、および形に加え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 5.5: 実験の感想.

第6章 映像とEMSを組み合わせてハンドジェスチャ学習を補助するシステムの改良

第5.7節で述べた問題点であるハンドジェスチャ映像とEMSのずれを解消し、ハンドジェスチャ映像と同期して指を動かすシステムを改良した。本節では、システム全体の構成を説明し、EMS生成器、EMS制御回路、EMS適応箇所、およびEMS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。

6.1 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6.1にシステム構成図を示す。また、システムを使用している様子を図6.2aに示す。

6.2 EMS信号生成器、EMS適応箇所、およびEMSのパラメータ設定

デバイスを取り付けた様子を図6.3に示す。また、EMS信号生成器およびEMS出力制御回路を図6.2bに示す。また、回路図を図6.4に示す。EMS信号生成器には市販のEMSデバイス（Beurer Sanitas, SEM 43 Digital EMS / TENS）[SC]を使用している。EMSの生成を別のデバイスを用いて常に行い、マイコンからの信号にてEMSの出力を切り替えることにより、EMSの信号の生成にかかるずれを減少させた。また、電極固定用スリーブの内側には、手の甲側に4つ、手のひら側に1つ、手首の内側に4つ、および外側に1つの電極パッドを配置している（図4.2a）。各指には2つの電極パッドを用いてEMSを与えている。図4.2aにおいて、2つの電極パッドとそれに対して動く指を色を用いて対応を表している。この電気パッドの貼り付け位置（以降、EMS適応箇所）は、図6.3aを基準として、ユーザごとに目的の筋収縮が起こるまで変更する。したがって、本システムは計10枚の電極パッドからEMSを与えることにより、5本の指を屈曲する筋収縮を引き起こすことができる。第4章にて、使用した手の前腕部に配置する電極位置は、図5.1より、知覚しづらいことが示されたため除いた。

また、EMS適応箇所には4章のシステムと同様に湿式の電極パッド（HV-LLPAD, オムロンヘルスケア株式会社）[OHC]を貼りつける。電極パッドを貼り付け、図6.3aに対応するように電極パッドと配線をした後、図6.3bのようにスリーブを用いて電極がはがれないように固定する。

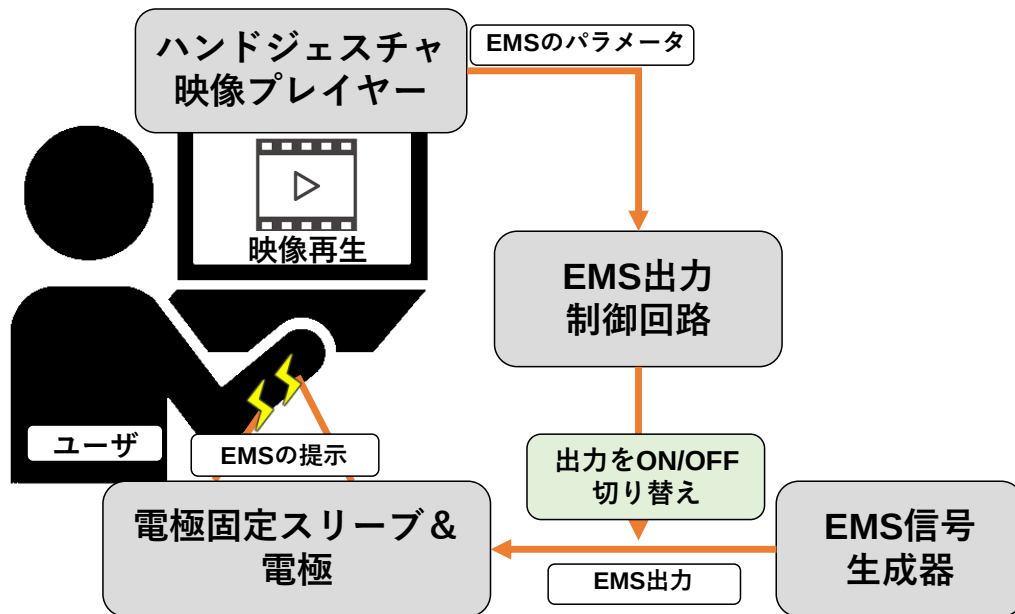


図 6.1: 改良したシステム構成.

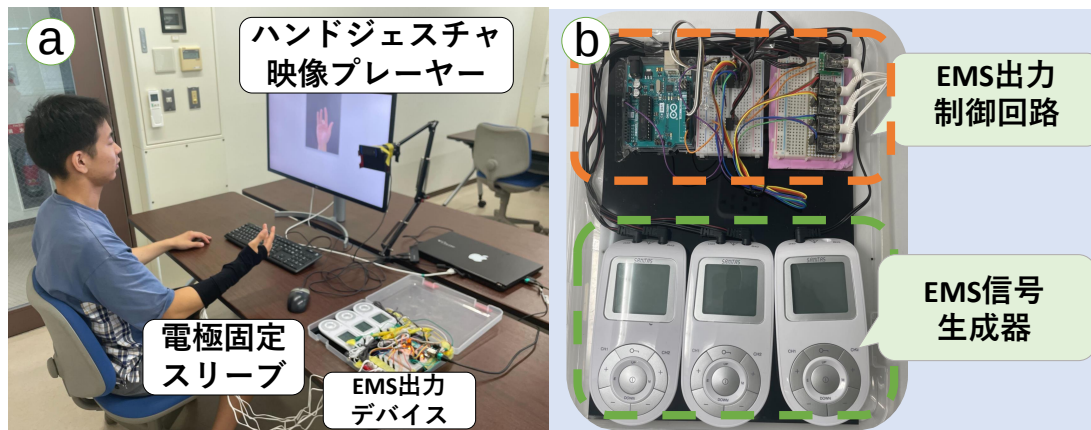


図 6.2: 改良したハンドジェスチャ学習システム. (a) システムを使用している様子. (b) EMS出力装置.

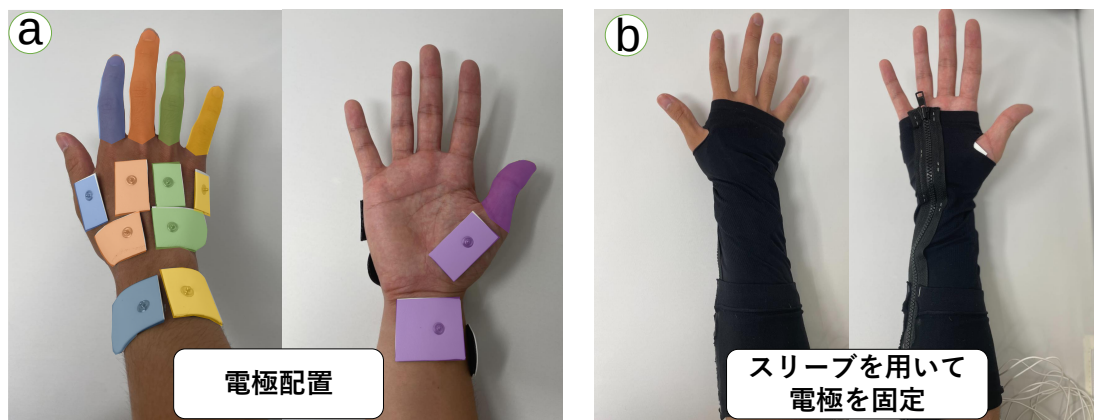


図 6.3: デバイスを取り付けた様子. (a) 各指を動かすための電極位置と対応を色で表す様子. (b) 電極固定用スリーブを装着している様子.

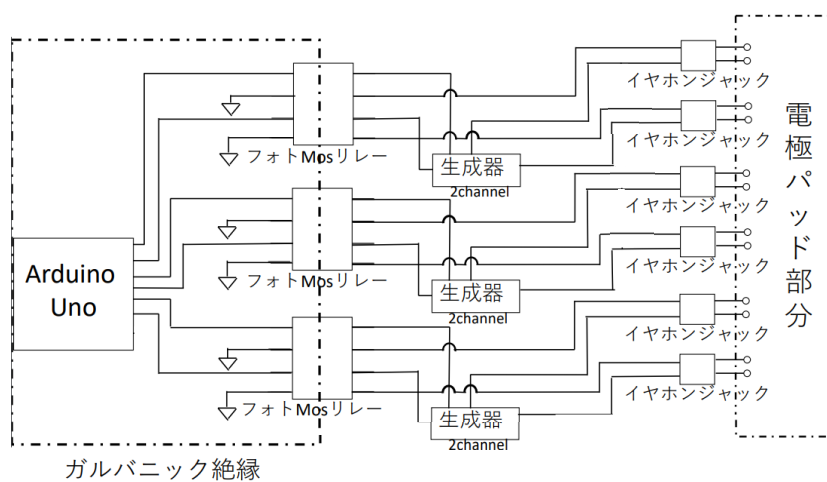


図 6.4: EMS 出力装置の回路.

また、EMS のパラメータの制御は市販の EMS デバイスを用いて行った。このデバイスは EMS のパルス幅、周波数、出力強度を調整できる。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、EMS の出力時間はそれぞれのハンドジェスチャに適当な値を用いる。また、各電極に与える出力強度は、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。

6.3 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。

- EMS 適応箇所に電極パッドを貼り付ける。
- 市販の EMS デバイスの出力強度を 1 つずつ上昇させる。これを、EMS 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出力強度を下げ、電極パッドの位置をずらして、再度 EMS を行う。
- ある程度、指が独立して屈曲させる。

上記の作業を片手の 5 本指全てに対して行う。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。

第7章 評価実験2

改良したシステムを用いて、動かすべき指およびタイミングを提示した場合の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。今回の実験では、第5章の実験とは異なり、実際にあるハンドジェスチャを学習し、その効果を調査するのではなく、単純な手指の動作をEMSを用いて補助した場合における短期間の学習効果を調査する。また、実験を行う際に、EMSを用いてハンドジェスチャ学習の補助を行ったが、補助する方法として、実験参加者が受動的にEMSの刺激だけで学習するのではなく、能動的にEMSの刺激を受けながら手を動かしてハンドジェスチャを学習する手法を用いた。本章では実験の参加者、内容、使用したハンドジェスチャ、評価方法、実験結果、およびその考察を述べる。

7.1 評価実験2：実験参加者

実験参加者は、研究室の学生12名（うち女性2名）であった。また、実験参加者は、21-24歳（平均22.6歳）であった。実験参加者のうち8名は以前にEMSを使用した経験があったが、日常的には使用していなかった。

7.2 評価実験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って能動的に手を動かしながら学習する手法。
- 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能動的に手を動かしながら学習する手法。

7.3 評価実験2：ハンドジェスチャのセット

本研究では、提案手法と既存手法を用いてハンドジェスチャの学習実験を行うため、特定のジェスチャセットを構築した。このセットは、親指、人差し指、中指、薬指、および小指の折り曲げ動作を基本とし、以下の2つの条件の組み合わせにより、9種類に分類される。

- 条件1：指を同時に折り曲げる本数（1本、2本、および3本）

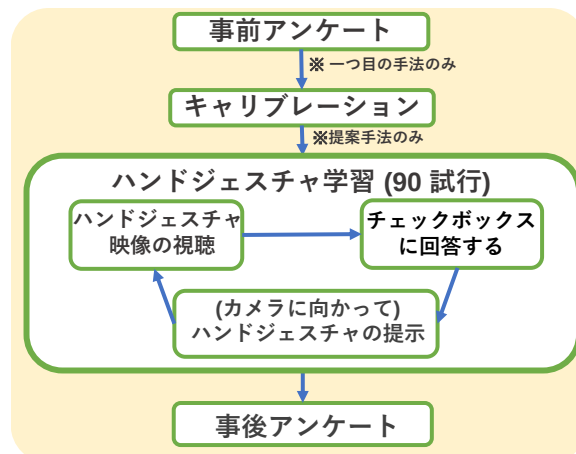


図 7.1: 実験タスク.

- 条件 2: 指を折り曲げる回数 (1 回, 2 回, および 3 回)

これらの条件に基づき, 1 本指のジェスチャから合計 30 ジェスチャ (1 本 × 1 回を 10 ジェスチャ, 1 本 × 2 回を 10 ジェスチャ, および 1 本 × 3 回を 10 ジェスチャ) を作成した. 同様に, 2 本指および 3 本指を用いたハンドジェスチャも各 30 ジェスチャずつ作成する. よって, ひとつの手法において使用するジェスチャ数は合計 90 ジェスチャとなる. また, 全ての手法で同一のハンドジェスチャセットを使用する.

2 回以上の動作を含むハンドジェスチャは, 基本となる 1 回動作のジェスチャを連結して構築した. また, 薬指を曲げずに中指と小指を曲げるような人間が提示しにくいジェスチャは除外し, 残りのジェスチャはランダムに生成した. 生成したハンドジェスチャセットにおいて, 各指が折れ曲がった回数はそれぞれ, 親指・75 回, 人差し指・72 回, 中指・67 回, 薬指・83 回, および小指・63 回であった.

7.4 評価実験 2: 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ハンドジェスチャ映像において動いた指とそのタイミング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全体の実験タスクの流れを図 7.1 に示し, 詳細を述べる.

1. 事前アンケート

実験参加者に属性および EMS への慣れについて実験前にアンケートにて質問する.

2. 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出力強度およびユーザに貼る電極位置を決定するためにキャリブレーションを行う.



図 7.2: 実験の様子。(a) 電気刺激を提示されながら、電気刺激に連動したハンドジェスチャ映像を見てハンドジェスチャを学習している様子。(b) 学習したハンドジェスチャ動作にて、折れ曲がった指をチェックボックスへ入力している様子。(c) カメラに向かって学習したハンドジェスチャを提示している様子。

3. ハンドジェスチャ学習（両手法）

図 7.2 に実験参加者が行ったハンドジェスチャ学習のタスクを示す。まず、実験参加者はハンドジェスチャの映像を視聴する（図 7.2a）。次に、そのハンドジェスチャ映像の指の屈曲した箇所とタイミングを記憶する。その後、記憶した指の屈曲箇所をチェックボックスを用いて回答（図 7.2b）し、最後に覚えたハンドジェスチャをカメラに向かって、指の屈曲箇所とタイミングを正確に提示する（図 7.2c）。これらの一連の流れを 1 試行とし、1 手法あたり 90 試行（ハンドジェスチャ数）、実験全体で合計 180 試行（90 試行 × 2 手法）行う。ハンドジェスチャ映像の提示の順序は、はじめに、1 本指 1 回動作のハンドジェスチャのタスクを行い、次に 1 本指 2 回動作、1 本指 3 回動作、2 本指 1 回動作と続き、最後に 3 本指 3 回動作のタスクを行い、1 手法あたりのタスクを終了とした。

4. アンケート

実験後のアンケートとして、NASA-TLX アンケート、各手法において簡単だと思ったタスク（1～3 番）、難しいと思ったタスク（1～3 番）、記憶するにあたって気を付けたこと、および実験について感じたことについて質問した。

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。各学習手法の学習順序はカウンタバランスをとった。

7.5 評価実験 2：評価方法

評価方法として、チェックボックスを用いてどの指が動いたかテストした際の誤答数、チェックボックスにて回答した内容および実際に手を用いて提示したハンドジェスチャとの比較、NASA-TLX [HS88] アンケート、ならびに実験後のアンケートから評価する。

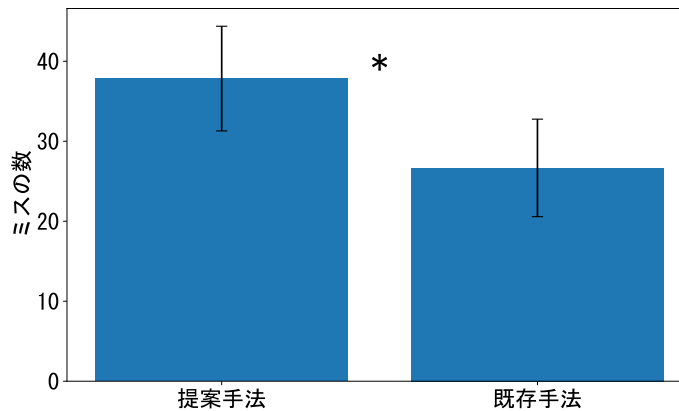


図 7.3: 提案手法および既存手法における誤答数.

7.6 評価実験 2：実験結果

本節では実験におけるチェックボックスを用いた回答の誤答数，チェックボックスにて回答した内容と実験参加者が提示したハンドジェスチャの違い，NASA-TLX，および実験後のアンケート結果を述べる．

7.6.1 評価実験 2：誤答数

各手法におけるタスク中のテストの全体の誤答数を図 7.3 に示す．また，指の種類ごとの誤答率を図 7.4，指の本数ごとの誤答率を図 7.5 に示す．また，各手法における誤答数の結果をシャピロウィルク検定に通し，正規性があった場合は対応のある t 検定，正規性がなかった場合はノンパラメトリック検定のウィルコクソンの符号付き順位検定を用いて解析した．用いた検定手法および p 値の結果を表 7.1 に示す．表 7.1 に示す通り， p 値が 0.05 以下であるため全体の誤答数および 2 本指における誤答率は有意な差があった．また，親指，人差し指，および中指においては p 値が 0.10 以下および 0.05 以上であったため，有意な傾向があった．

7.6.2 評価実験 2：チェックボックスにて回答した内容と実験参加者が提示したハンドジェスチャの違い

図 7.6 は，カメラの前で参加者が行った実際のハンドジェスチャとチェックボックスの回答との間の不一致を示すグラフを示している．カメラに手全体が映らなかった 1 人の参加者のデータは除外され，11 人の参加者のデータを用いた．

左側のグラフは，参加者がチェックボックスで正しく回答したが，カメラに向かって実際に提示したハンドジェスチャが間違っていた回数の平均を示している．逆に，右側のグラフは

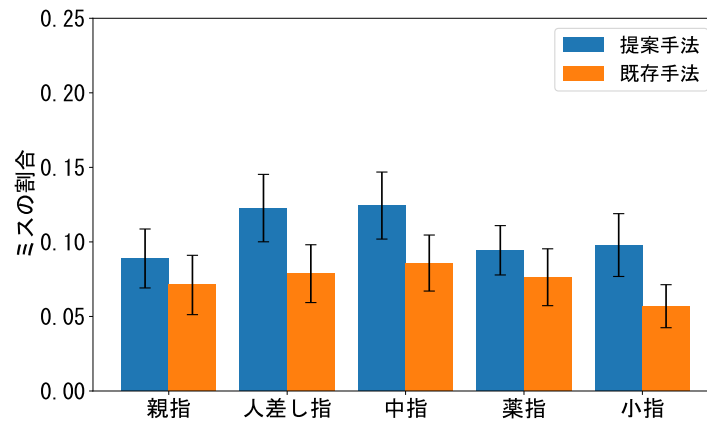


図 7.4: 指の種類ごとの誤答の割合.

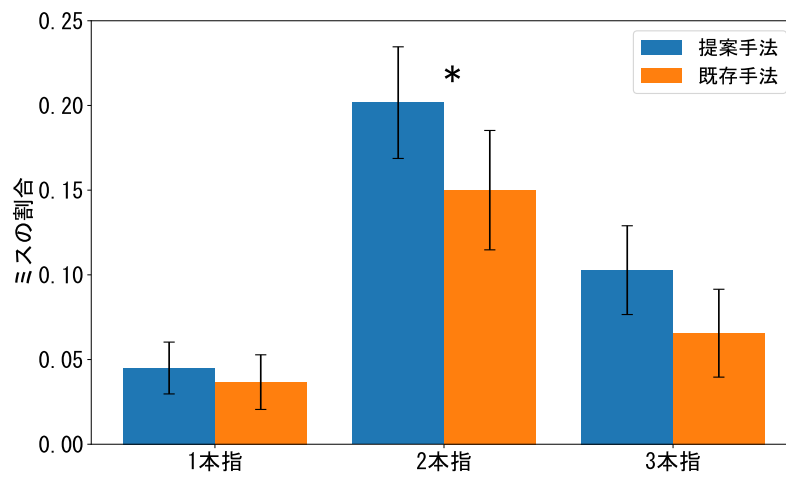


図 7.5: 指の本数ごとの誤答の割合.

項目	検定	p 値
合計	ペア t 検定	0.036
親指	ペア t 検定	0.054
人差し指	ペア t 検定	0.092
中指	ペア t 検定	0.054
薬指	ペア t 検定	0.28
小指	ペア t 検定	0.065
1 本指	ウィルコクソンの符号付き順位検定	0.46
2 本指	ペア t 検定	0.013
3 本指	ウィルコクソンの符号付き順位検定	0.12
チェックボックス正解カメラ不正解	ウィルコクソンの符号付き順位検定	0.76
チェックボックス不正解カメラ正解	ウィルコクソンの符号付き順位検定	0.072

表 7.1: 評価実験 2：誤答数におけるそれぞれの検定の結果.

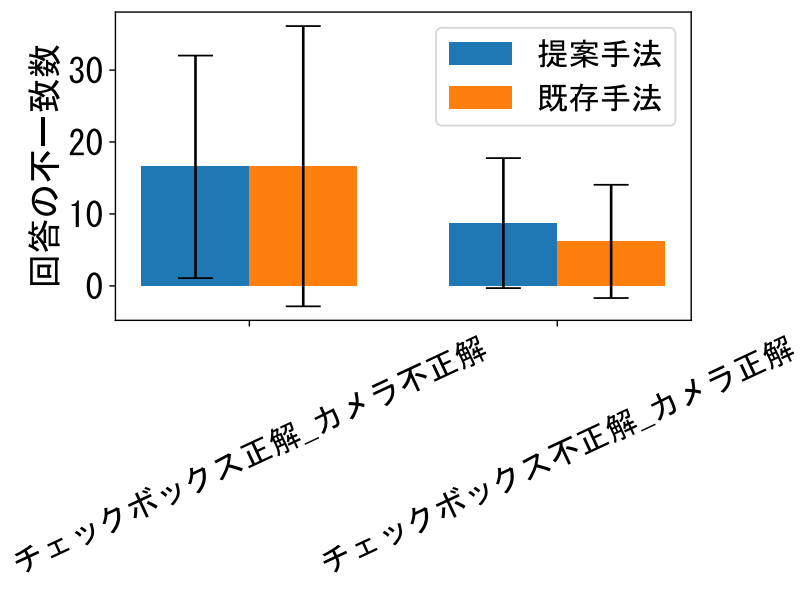


図 7.6: チェックボックスを用いた回答および実際に提示したハンドジェスチャの不一致数.

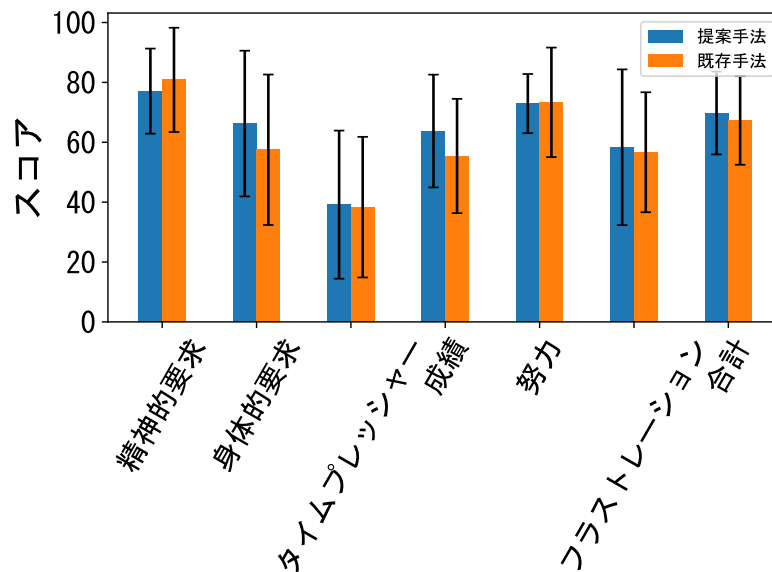


図 7.7: NASA-TLX の結果.

チェックボックスで間違えて回答したが、カメラに向かって実際に提示したハンドジェスチャが正しかった回数の平均を示している。シャピロ・ウィルク検定を行った結果、データの正規性がなかったため、ノンパラメトリック検定のウィルコクソンの符号付き順位検定を用いて解析した。チェックボックスで正しく答えたが、実際に提示したハンドジェスチャを間違えた場合の p 値は 0.76 であり、有意差はないことが示された。逆に、チェックボックスで間違えて答えたが、実際に提示したハンドジェスチャが正しかった場合の p 値が 0.072 であり、0.10 以下および 0.05 以上であったため、有意な傾向があった。

7.6.3 評価実験 2：NASA-TLX

NASA-TLX の結果を図 7.7 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、正規性があつた項目は対応のある t 検定、正規性がなかった項目は Mann-Whitney U test を用いて解析した。結果を表 7.2 に示す。表 7.2 に示される提案手法および既存手法の NASA-TLX スコアを比較したそれぞれの検定手法および p 値によると、すべての項目で p 値が 0.05 以上であり、有意な差がなかった。

7.6.4 評価実験 2：アンケート結果

ハンドジェスチャの記憶方法と実験に関する感想を自由記述形式でアンケートに回答してもらった。結果を表 7.3, 7.4 に示す。また、EMS あり条件、EMS なし条件において、難しいと思ったタスク (1~3 番)、簡単だと思ったタスク (1~3 番) を回答してもらった。この結

項目	検定	p 値
精神的要求	ウィルコクソンの符号付き順位検定	0.37
身体的要求	ペア t 検定	0.31
タイムプレッシャー	ペア t 検定	0.84
成績	ペア t 検定	0.39
努力	ペア t 検定	0.93
フラストレーション	ペア t 検定	0.81
合計	ペア t 検定	0.51

表 7.2: NASA-TLX の項目ごとの検定の結果.

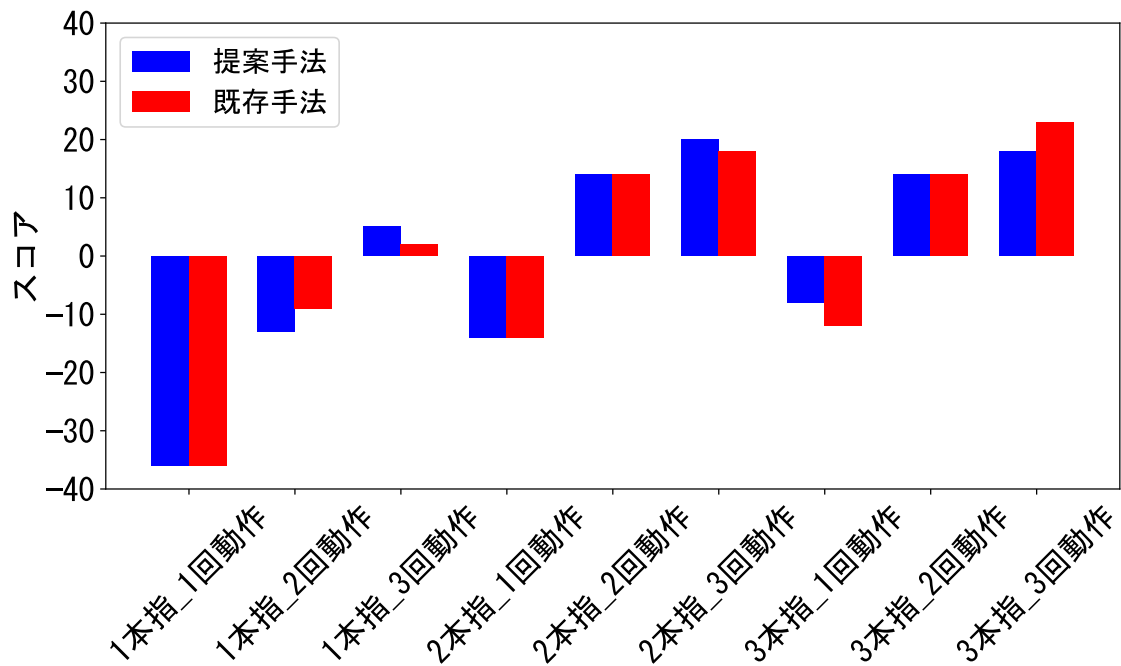


図 7.8: 実験参加者が感じた実験タスクの難易度.

No.	学習方法	参加者	条件
1	ジェスチャの形に名前を付けて覚えた	p1, p2, p3, p7, p8, p11, p12	提案手法 既存手法
2	頭の中で曲げた指の名前を復唱した	p2, p5, p6	提案手法
3	実際にジェスチャを真似した	p6	既存手法
4	刺激を感じた後の感覚と手の形を記憶した	p8	提案手法
5	2本指の方が名づけが難しかった	p7	既存手法
6	片方の手も使って記憶する	p9	提案手法 既存手法
7	形で覚えるようにした	p10	既存手法
8	集中するようにした	p10	提案手法
9	電気が流れている指と映像がマッチしていた場合、手の動きと記憶をすり合わせるようにした	p12	既存手法

表 7.3: 実験参加者の記憶方法.

果から難しいと思ったタスクの1～3番にそれぞれ3点, 2点, および1点, ならびに, 簡単だと思ったタスク1～3番に-3点, -2点, および-1点をつけて, 実験参加者が感じた総合的なタスクの難易度を示すグラフを作成した. そのグラフを図 7.8 に示す.

7.7 評価実験2の結果から得られた考察

この節では, 評価実験2の結果からいくつかの考察を述べる. まず, 提案手法において間違いが多かった理由, 次に, 2本の指を使ったハンドジェスチャで最も多くのミスが発生した理由について議論する. さらに, 1本指のハンドジェスチャでの顕著な差異がなかった理由についても考察する.

7.7.1 評価実験2: 提案手法におけるのミスの増加の理由

1. 電気刺激による不快感による学習の妨げ: 実験後のアンケート (表 7.4, No. 6) によれば, EMS による不快感が学習に影響を与えた可能性がある. 不快感が強いほど, 間違いの可能性が高まると考えられる.
2. 電気刺激による学習効果の減少: 実験後のアンケート (表 7.4, No. 5) は, 参加者が EMS に慣れるにつれて, その効果が減少したことを示唆している. これは, 参加者が EMS の刺激に慣れ, EMS によって動かされた指の動きがハンドジェスチャを学習したという錯覚を与えたためかもしれない.

No.	感想・コメント	参加者	条件
1	動かす指が隣り合っていたり同じ指を複数回動かす場合は比較的覚えやすいと感じた	p2	既存手法
2	電気刺激により感覚を覚えており，既存手法に比べて頭で覚える負荷および思い出す作業がしやすい	p2, p6, p5, p10, p12	提案手法
3	指が動かされないため，自分のタイミングで手を動かしてジェスチャを練習できるので短期的には覚えやすい	p3	既存手法
4	チェックボックス入力では覚えていてもカメラ入力は忘れやすかった	p4	既存手法
5	電気刺激に慣れたことにより，EMS の効果が下がっていると感じた	p4	提案手法
6	EMS の不快感によって覚えにくいと感じた	p4	提案手法
7	各指の曲がりやすさなどの差があると感じた	p5	提案手法
8	1 本指は EMS によって指を曲げている時間が感覚的に覚えられた	p7	提案手法
9	複数の指を曲げる際に電気刺激の位置が変化しているように感じた	p8	提案手法

表 7.4: 実験参加者の感想とコメント.

3. 学習の主体性：本研究の提案手法では、電気刺激に合わせて、参加者が自らの意志で指を動かすよう指示した。しかし、このタイミングはユーザの感覚に任せられている。そのため、ユーザによっては、主体性を減少させることにつながった可能性がある。主体性が減少したことにより、参加者の集中力が散漫になり、より多くのミスにつながった可能性がある。これは、能動的な学習への関与は学習の柱であると主張する神経科学の研究 [Deh20] と一致している。

7.7.2 評価実験 2：2 本指のハンドジェスチャのミスが多い理由

実験後のアンケート（表 7.3, No. 1）の結果は、3 本の指を使うハンドジェスチャは、「キツネ」および「ピース」のように名前をつけることで覚えるといったコメントが多かった。これにより、3 本指のハンドジェスチャでのミスが少なかった可能性がある。そのため、次に複雑である 2 本指のハンドジェスチャにおけるミスが一番多くなったのではないかと考えられる。

7.7.3 評価実験 2：1 本指のハンドジェスチャにおいて、両手法に差がなかった理由

両手法において 1 本指のハンドジェスチャでミスが少なかった理由を考察する。まず、1 手法における 1 本指のハンドジェスチャにおける指の曲げの試行回数は 60 回であった。そのため、両手法間においてミスの差が出なかった可能性がある。また、1 本指のハンドジェスチャは電気刺激を 1 つの指に対してのみに与えられるため、複数の箇所に電気刺激が与えられた場合に比べて、刺激による知覚的混乱が減少し、不快感が最小限に抑えられた可能性がある。これは、実験後のアンケート（表 7.4, No.9）より、複数の指に同時に電気刺激を受けるときに電気刺激の位置が変化しているように感じたという回答していることから示唆される。したがって、同時に与える電気刺激の数を制限することは有益である可能性がある。

第8章 全体の議論

本章では、評価実験1および評価実験2の結果および考察をもとに本研究の制限および新しいシステムデザインを述べる。

8.1 制限

本研究の評価実験1および評価実験2では、研究室内から実験参加を募り、実験を行った。そのため、性別および年齢などの属性にバイアスがかかっている。そのため、幅広い年齢層、手話の経験のあるなしなどいろいろな属性の実験参加者を用いて調査する必要がある。また、本研究の提案手法は電気刺激を与えるため、不快感を伴う。この不快感がどの程度学習に影響を与えているかは十分に調査されていない。また、評価実験2の結果から、能動的な関与が低下したことによる注意力が散漫になった可能性が示唆された。これは脳波や視線などの生体情報を用いることによって実験タスク中の注意力を測り、評価することができる。また、今回の評価実験では実験参加者に主体性を維持してもらうために、自分の指を電気刺激と共に動かしてもらうことを指示した。しかし、この動かしてもらうタイミングは実験参加者に依存しており、参加差によっては、電気刺激の刺激によって主体性が失われた可能性がある。そのため、実験参加者主観のタイミングに依存しない、実験参加者の動きに合わせた電気刺激を提示することによって、主体性を維持する必要がある。また、Tajimaら[TNLK22]はユーザ主導のタッチと電気刺激を用いたコンピュータ主導のタッチのタイミングにおいてユーザの主体性のトレードオフについて調査している。しかし、電気刺激を用いた運動学習の効果に対してはこの主体性のトレードオフがどう影響するかは調査されてない。そこで、デジタル的にユーザの動きに対しての電気刺激のタイミングを調整し学習の効果への影響を調査する必要がある。また、実際の手話学習の現場からのフィードバックが不足している。

8.2 EMSを用いた新しいハンドジェスチャ学習支援システムのデザイン

本研究では、ユーザがハンドジェスチャを学習する際に、ハンドジェスチャに必要なすべての指に対して電気刺激を行っている。しかし、頻繁に複数の箇所へ電気刺激を流すことにより、実験参加者の不快感が増加した可能性がある。さらに、電気刺激によって指が動くことが、実験参加者の主体性を損なわせるため、学習効果を低下させた可能性もある。

これらの要因を考慮して、EMS を用いたハンドジェスチャ学習支援システムのデザインにおいて、間違った場合にハンドジェスチャの反対方向に指が動くように電気刺激を与える触覚フィードバックを実装することを検討している。これは、ユーザが間違った動きをした場合に、指の動きを止める働きをする。このようなアプローチによって、ユーザの主体性を損なわない学習支援システムになると考えられる。さらに、電気刺激を高頻度および複数個所に同時に与えないことによって、ユーザの不快感が軽減が期待される。

第9章 おわりに

本研究では、EMS を用いたハンドジェスチャ学習の支援を行うために、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（提案手法）と、ハンドジェスチャ映像のみで学習した手法（既存手法）を比較調査した。

本研究の評価実験1では、EMS を用いて参加者がASLのハンドジェスチャを学習する際の支援を行った。また、評価実験2ではASLのような複雑なハンドジェスチャではなく、単純な5本指の折り曲げ動作を組み合わせたハンドジェスチャを学習するタスクを行った。参加者には既存の映像のみの学習方法とEMSを組み合わせた学習方法の両方を試してもらい、その後、評価実験1では7日間にわたりハンドジェスチャの記憶テストを行いデータを収集した。さらに、EMSによる学習がどの程度効果的であるか、また参加者がどのように感じたかについてのフィードバックも収集した。評価実験2では、学習した直後のみテストを行った。

評価実験1の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。評価実験2の結果から、既存の学習方法の方が有意にジェスチャの学習効果が高いことがわかった。また、評価実験1および評価実験2のアンケート結果からは、EMSにより学習が促進されたと感じたコメントがあった。

考察として、EMSを用いた学習は、参加者の能動的な学習へ関与が低下する可能性があると考えられる。そのため、効果的な学習には、参加者の自発的な動きとEMSの適切なタイミングの両方が重要であると考えられる。また、ジェスチャの複雑さおよび個々の指の動きによって、EMSの学習効果に差が出ることも考えられる。また、アンケート結果より、EMSを用いることにより、間違えた指を動かしてしまうことは少なくなった可能性がある。そのため、EMSの不快感および能動的な学習へ関与の低下がしなければ、学習効果が増加する可能性がある。

さらに、評価実験1および評価実験2の結果からEMSの不快感に個人差があり、学習効果に影響があることが明らかになった。さらに、ハンドジェスチャの覚え方に個人差があることも確認された。改良点として、不快感の削減および電気刺激の提示タイミングの変更が考えられる。また、これらの改良を通じて、ユーザが間違った場合に電気刺激を提示する新しいハンドジェスチャ学習補助システムのデザインを考案した。

研究の主な制限としては、参加者の属性にバイアスがかかっている点、不快感に関する十分な調査が行われていない点、および実験の設定が限定的である点が挙げられる。さらに、EMS

による学習が長期的な記憶または学習にどのような影響を与えるかについてはさらなる研究が必要である。

本研究は、EMS を用いた学習支援システムの設計および評価を行った。今後の研究では参加者の多様性を確保し、システムデザインを変更などの改良を加えて、より詳細な評価実験を実施この分野の理解と発展を促進することが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生、川口一画先生には多大なご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に、主指導教員である志築文太郎先生には、研究の進め方、論文執筆、発表の方法といった研究に関することのみならず、日常生活における研究者の心構えなど多岐に渡るご指導を頂きました。先生の熱心なご指導のおかげで、これまでの研究成果の発表および本論文の執筆ができました。ここに深く感謝の意を表します。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩、同輩、先輩方には研究生活においてお世話になりました。特に WAVE チームの皆様には、チームゼミにおけるご意見や論文の添削といった研究に関する多くのご支援に加えて、研究室においても研究の進め方や研究生活について多くのご助言を頂きました。また、メンターの日高さんには、より深く研究のアドバイスをいただき、研究および研究生活において多大なる支援をしていただきました。研究室の皆様のおかげで、3年間充実した研究生活を送ることができました。深く感謝いたします。

最後に、学生生活においてお世話になった皆様、そして、私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [APS19] Jonas Auda, Max Pascher, and Stefan Schneegass. Around the (virtual) world: Infinite walking in virtual reality using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [Bro96] John Brooke. *SUS: A Quick and Dirty Usability Scale*, pp. 189–194. Taylor and Francis, London, 1996.
- [Cyba] CyberGrasp. Cyberglove systems llc. <http://www.cyberglovesystems.com/cyberg grasp>. (Accessed on 01/31/2022).
- [Cybb] CyberGrasp. Dexta robotics - touch the untouchable. <https://origin.dextarobotics.com>. (Accessed on 01/09/2024).
- [CZZ14] Kaida Chen, Bin Zhang, and Dingguo Zhang. Master-slave gesture learning system based on functional electrical stimulation. In *Intelligent Robotics and Applications*, ICIRA '14, pp. 214–223, Cham, 2014. Springer International Publishing.
- [Deh20] Stanislas Dehaene. *How we learn: The new science of education and the brain*. Penguin UK, 2020.
- [Ebb85] Hermann Ebbinghaus. *Memory: A contribution to experimental psychology*. Oxford, England: Dover, 1885.
- [EHS⁺16] Ayaka Ebisu, Satoshi Hashizume, Kenta Suzuki, Akira Ishii, Mose Sakashita, and Yoichi Ochiai. Stimulated Percussions: Techniques for controlling human as percussive musical instrument by using electrical muscle stimulation. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Posters*, SA '16, pp. 37:1–37:2, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [HDS08] Kevin Huang, Ellen Yi-Luen Do, and Thad Starner. Pianotouch: A wearable haptic piano instruction system for passive learning of piano skills. In *2008 12th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 41–44. IEEE, 2008.
- [HLK⁺23] Seokhyun Hwang, Jieun Lee, Youngin Kim, Youngseok Seo, and Seungjun Kim. Electrical, vibrational, and cooling stimuli-based redirected walking: Comparison

of various vestibular stimulation-based redirected walking systems. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, pp. 767:1–767:18, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.

- [HPS⁺17] Mariam Hassib, Max Pfeiffer, Stefan Schneegass, Michael Rohs, and Florian Alt. Emotion actuator: Embodied emotional feedback through electroencephalography and electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 6133–6146, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [HS88] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183, 1988.
- [HSD⁺10] Kevin Huang, Thad Starner, Ellen Do, Gil Weinberg, Daniel Kohlsdorf, Claas Ahlrichs, and Ruediger Leibrandt. Mobile music touch: Mobile tactile stimulation for passive learning. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 791–800, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [IC] Information and Culture Center. Information and culture center for the deaf, inc. (iccd). <http://www.jyoubun-center.or.jp/english/>. (Accessed on 01/09/2024).
- [KGTL23] Ravi Kiran Kattoju, Ryan Ghamandi, Eugene Matthew Taranta, and Joseph J. Laviole. Automatic improper loading posture detection and correction utilizing electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, pp. 319:1–319:18, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [KIMR18] Michinari Kono, Yoshio Ishiguro, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Design and study of a multi-channel electrical muscle stimulation toolkit for human augmentation. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, AH '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [KKK⁺21] Annika Kilian, Jakob Karolus, Thomas Kosch, Albrecht Schmidt, and Paweł W. Woźniak. EMPiano: Electromyographic pitch control on the piano keyboard. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

- [Kna67] Miland E Knapp. Practical physical medicine and rehabilitation. *Postgraduate Medicine, Taylor & Francis*, Vol. 41, No. 3, pp. A–113–A–116, 1967.
- [KTN⁺18] Michinari Kono, Takumi Takahashi, Hiromi Nakamura, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Design guideline for developing safe systems that apply electricity to the human body. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 25, No. 3, 2018.
- [KTN⁺21] Shunichi Kasahara, Kazuma Takada, Jun Nishida, Kazuhisa Shibata, Shinsuke Shimojo, and Pedro Lopes. Preserving agency during electrical muscle stimulation training speeds up reaction time directly after removing ems. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’21, pp. 194:1–194:9, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [LIM⁺15] Pedro Lopes, Alexandra Ion, Willi Mueller, Daniel Hoffmann, Patrik Jonell, and Patrick Baudisch. Proprioceptive interaction. In *Proceedings of the 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’15, pp. 939–948, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [LJB15] Pedro Lopes, Patrik Jonell, and Patrick Baudisch. Affordance++: Allowing objects to communicate dynamic use. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’15, pp. 2515–2524, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [LYC⁺17] Pedro Lopes, Sijing You, Lung-Pan Cheng, Sebastian Marwecki, and Patrick Baudisch. Providing haptics to walls & heavy objects in virtual reality by means of electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’17, pp. 1471–1482, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [LYIB18] Pedro Lopes, Sijing You, Alexandra Ion, and Patrick Baudisch. Adding force feedback to mixed reality experiences and games using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’18, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [NA22] Arinobu Nijjima and Ryosuke Aoki. Diminished grip force from superimposed electrical stimulation on muscle coordination. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 27, No. 3, pp. 167–172, 2022.
- [NK23] Arinobu Nijjima and Yuki Kubo. Assisting with fingertip force control by active bio-acoustic sensing and electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’23, pp. 743:1–743:13, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.

- [NTAM22] Arinobu Nijima, Toki Takeda, Ryosuke Aoki, and Shinji Miyahara. Muscle synergies learning with electrical muscle stimulation for playing the piano. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [NTL⁺21] Romain Nith, Shan-Yuan Teng, Pengyu Li, Yujie Tao, and Pedro Lopes. DextrEMS: Increasing dexterity in electrical muscle stimulation by combining it with brakes. In *Proceedings of the 34rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, pp. 414–430, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [OHC] Ltd. Omron Healthcare Co. Long-life pads for low-frequency therapy device elepulse. (Accessed on 01/09/2024).
- [OK17] Oyeade K Oyedotun and Adnan Khashman. Deep learning in vision-based static hand gesture recognition. *Neural Computing and Applications*, Springer, Vol. 28, No. 12, pp. 3941–3951, 2017.
- [PDR16] Max Pfeiffer, Tim Dunte, and Michael Rohs. Let your body move: A prototyping toolkit for wearable force feedback with electrical muscle stimulation. *MobileHCI '16*, pp. 418–427, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [PDS⁺15] Max Pfeiffer, Tim Dunte, Stefan Schneegass, Florian Alt, and Michael Rohs. Cruise control for pedestrians: Controlling walking direction using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2505–2514, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [PGD20] Max Pfeiffer, Niklas George, and Auriol Degbelo. Ems-based actuated output gestures: A design process for novices. In *Proceedings of Mensch Und Computer 2020*, MuC '20, pp. 409–413, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [PR17] Max Pfeiffer and Michael Rohs. *Haptic Feedback for Wearables and Textiles Based on Electrical Muscle Stimulation*, pp. 103–137. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [PSA13] Max Pfeiffer, Stefan Schneegaß, and Florian Alt. Supporting interaction in public space with electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2013 ACM Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication*, UbiComp '13 Adjunct, p. 5–8, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

- [RBRPV⁺22] E. Rodríguez-Bies, I. Rizo, M.J. Peña-Vázquez, T. Fuentes, and G. López-Lluch. Pilates with whole body electromyostimulation exercise produces high levels of muscle damage. *Science & Sports*, Vol. 37, No. 7, pp. 633.e1–633.e10, 2022.
- [SC] Inc. Sanita Clogs. Lsem 43 - digital ems/tens. <https://sanitas-online.de/en/p/sem-43-digital-ems-tens-1/>. (Accessed on 01/09/2024).
- [SGJVHA⁺16] Oscar Sandoval-Gonzalez, Juan Jacinto-Villegas, Ignacio Herrera-Aguilar, Otniel Portillo-Rodriguez, Paolo Tripicchio, Miguel Hernandez-Ramos, Agustín Flores-Cuautle, and Carlo Avizzano. Design and development of a hand exoskeleton robot for active and passive rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13, pp. 13:1–13:66, 2016.
- [SSB⁺20] Qijia Shao, Amy Sniffen, Julien Blanchet, Megan E. Hillis, Xinyu Shi, Themistoklis K. Haris, Jason Liu, Jason Lamberton, Melissa Malzkuhn, Lorna C. Quandt, James Mahoney, David J. M. Kraemer, Xia Zhou, and Devin Balkcom. Teaching american sign language in mixed reality. In *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, IMWUT '20, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [TBKL21] Akifumi Takahashi, Jas Brooks, Hiroyuki Kajimoto, and Pedro Lopes. Increasing electrical muscle stimulation's dexterity by means of back of the hand actuation. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [TIS⁺21] Yuta Takayama, Yuu Ichikawa, Buntarou Shizuki, Ikkaku Kawaguchi, and Shin Takahashi. A user-based mid-air hand gesture set for spreadsheets. In *Asian CHI Symposium 2021*, pp. 122–128, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [TMR11] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In *Proceedings of the 2011 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 543–552, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [TNLK22] Daisuke Tajima, Jun Nishida, Pedro Lopes, and Shunichi Kasahara. Whose touch is this?: Understanding the agency trade-off between user-driven touch vs. computer-driven touch. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 29, No. 3, 2022.
- [WOM19] Kyosuke Watanabe, Makoto Oka, and Hirohiko Mori. Feedback control to target joints angle in middle finger pip and mp joint using functional electrical stimulation. In *Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems*, pp. 440–454, Cham, 2019. Springer International Publishing.

- [Wor] Haptic Workstation. Cyberglove systems llc. <http://www.cyberglovesystems.com/haptic-workstation>. (Accessed on 01/31/2022).
- [丸山 15] 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.
- [吉元 20] 吉元俊輔, 青山一真, 梶本裕之, 西川敦. 人体通電の影響と安全基準. 生体医工学, Vol. 58, No. 4-5, pp. 147-159, 2020.
- [山口 15] 山口智史, 菅原憲一, 前田和平, 田辺茂雄, 田中悟志, 里宇明元. 学習課題中の体性感覚電気刺激が運動学習と半球間抑制に与える影響. 理学療法学 Supplement, Vol. 2014, p. 0424, 2015.
- [小田] 小田隆. 手の筋肉図. <http://www.studio-corvo.com/contents/gallery/illustrations/手の筋肉図スライド.pdf>. (Accessed on 01/09/2024).
- [西川 21] 西川宜利. 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. 筑波大学, 2021.
- [野崎 23] 野崎陽奈子. 振動および光を提示するグローブ型デバイスを用いたピアノの練習効果の調査. 筑波大学, 2023.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 査読あり国際会議論文
 1. Yoshiki Nishikawa, Yui Atarashi, Shogo Sekiguchi, Buntarou Shizuki. Effects of Electrical Muscle Stimulation on Memorability of Hand Gestures: A Preliminary Study. in proceedings of 26th International Conference on Human-Computer Interaction, 2024, July(to appear)
- 査読なし国内会議論文
 1. 西川宜利, 志築文太郎, 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, 第 203 回ヒューマンコンピュータインタラクション研究会 (HCI203), 情報処理学会, 2023 年 6 月, 8 pages.
 2. 西川宜利, 日高拓真, 志築文太郎. ハンドジェスチャ学習のための電氣的筋肉刺激を与えるグローブ型デバイスの試作, 第 29 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 (WISS2021), 2021 年 12 月, 3pages

その他論文

- 査読あり国際会議論文
 1. Taisei Yamaguchi, Yoshiki Nishikawa, Buntarou Shizuki. Preliminary Study on Flick-Based Text Input on HMD's Front. in proceedings of 26th International Conference on Human-Computer Interaction, 2024, July(to appear)
 2. Shogo Sekiguchi, Shingo Kato, Yoshiki Nishikawa, Buntarou Shizuki. Authentication Method Using Opening Gestures. in proceedings of 26th International Conference on Human-Computer Interaction, 2024, July(to appear)
 3. Hinako Nozaki, Ryo Ikeda, Yoshiki Nishikawa, Yui Atarashi, Buntarou Shizuki, Prototyping an Urushi Display that Changes Color Interactively by Temperature Control, 2022 Nicograph International, Jun 2022, pp. 69-74.
- 査読なし国内会議論文

1. 西川宜利, 野崎陽奈子, 井口凌輔, 新由衣, 橋本悠希, 志築文太郎, サーモクロミック色漆を用いたインタラクティブに模様が変わるおぼん型アプリケーションの試作. 第30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(WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2022年12月
2. 赤田真由, 西川宜利, 磯本俊弥, 志築文太郎. HMDから取得可能な目に関する情報に基づく「楽しい」という感情の推定. 第31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(WISS2023), 日本ソフトウェア科学会, 2023年11月, 3pages.
3. 武山侑輝, 西川宜利, 志築文太郎. スマートフォンを台座として用いた3次元スケッチシステムの実装. 第31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(WISS2023), 日本ソフトウェア科学会, 2023年11月, 3pages.
4. 山口泰生, 西川宜利, 志築文太郎, HMD前面を用いたVR用フリック文字入力手法の予備評価, 第205回ヒューマンコンピュータインタラクション研究会(HCI203), 情報処理学会, 2023年10月, 8pages.
5. 山口泰生, 西川宜利, 志築文太郎, HMD前面を用いたVR用フリック文字入力手法の提案. HMD前面を用いたVR用フリック文字入力手法の提案, 日本ソフトウェア科学会, 2022年12月, 3page

付 録 A 評価実験 1 にて用いた各種書類

本付録にて，評価実験に関する各種書類を示す．

A.1 評価実験1にて用いた事前アンケート

2023/12/29 15:17

実験事前アンケート

実験事前アンケート

nishikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#)



共有なし

名前を入力してください

回答を入力

当てはまる年齢を教えてください（例：22歳）

回答を入力

当てはまる性別を教えてください

☐ 男

☐ 女

当てはまる利き手を教えてください

☐ 右

☐ 左

今まで市販のEMS機器の使用経験をお答えください（例：腹筋padをつかったことがある）

回答を入力



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdi3nchniNFL7oTuDly9CLKQk6IfQq2O3_qe04fU2pLi27tnA/viewform

1/4

図 A.1: 評価実験1にて用いた事前アンケート-Part1.

2023/12/29 15:17

実験事前アンケート

American Sign Language(ASL)を記憶した経験はあるか

- ☐ はい
- ☐ いいえ

送信

フォームをクリア

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング
研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdi3nchnlNFL7oTuDly9CLKQk6lfQq2O3_ge04fU2pLi27tnA/viewform

2/4

図 A.2: 評価実験 1 にて用いた事前アンケート-Part2.

A.2 評価実験 1 にて用いた事後アンケート

2023/12/29 15:09

実験の感想

実験の感想

nishikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#)



共有なし

名前を記述してください

回答を入力

記憶するにあたって気をつけたことを答えてください

回答を入力

実験の感想を記述してください

回答を入力

送信

[フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfwNJUvVp_RpiD_fMpOWXeo_9Pnd82XEivYNkPHzr-4DoLfw/viewform



1/4

図 A.3: 評価実験 1 にて用いた事後アンケート。

A.3 評価実験2にて用いた事前アンケート

2023/12/29 15:10

実験事前アンケート

実験事前アンケート

nishikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#) 

 共有なし

氏名を入力してください（ローマ字）例：nishikawa yoshiki

回答を入力

当てはまる年齢を教えてください（例：22歳）

当てはまる性別を教えてください

☐ 男

☐ 女

当てはまる利き手を教えてください

☐ 右

☐ 左



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd3HcIS42R5pX4R-H5uH5m6eqAvuyQ3qKF8AbLO_EOuCeeSag/viewform

1/4

図 A.4: 評価実験2にて用いた事前アンケート-Part1.

電氣的筋肉刺激（EMS）への慣れについて 1～5 の尺度でお答えください

- 1 : EMSを与えられたことがない
- 2 : 少なくとも 1 回はEMSを与えられた/自身に使用ことがある
- 3 : 何度かEMSを与えられた/自身に使用したことがある
- 4 : 日常的にEMSを与えられる/使用している
- 5 : EMSを日常的に使用し, EMSに慣れている

1 2 3 4 5

EMSを与えられたことがない ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ EMSを日常的に使用し, EMS
に慣れている

送信

[フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング
研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd3HctS42R5pX4R-H5uH5m6eqAvuyQ3qKF8AbLQ_EOuCeeSag/viewform

2/4

図 A.5: 評価実験 2 にて用いた事前アンケート-Part2.

A.4 評価実験2にて用いた事後アンケート

2023/12/29 15:08

実験の感想

実験の感想

nishikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#)



共有なし

氏名（ローマ字）例：nishikawa yoshiki

回答を入力

手法

☐ EMSあり条件

☐ EMSなし条件

記憶するにあたって気をつけたことを答えてください

回答を入力



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSewZlrgFjn-kCUxGsQOb_1ALsvEcP6MxGrMBzSCKWPEOuLj9A/viewform



1/6

図 A.6: 評価実験2にて用いた事後アンケート-Part1.

覚えやすかったタスクにチェックを入れてください（1番）

- ☐ 1本指 1回動作
- ☐ 1本指 2回動作
- ☐ 1本指 3回動作
- ☐ 2本指 1回動作
- ☐ 2本指 2回動作
- ☐ 2本指 3回動作
- ☐ 3本指 1回動作
- ☐ 3本指 2回動作
- ☐ 3本指 3回動作

覚えやすかったタスクにチェックを入れてください（2番）

- ☐ 1本指 1回動作
- ☐ 1本指 2回動作
- ☐ 1本指 3回動作
- ☐ 2本指 1回動作
- ☐ 2本指 2回動作
- ☐ 2本指 3回動作
- ☐ 3本指 1回動作
- ☐ 3本指 2回動作
- ☐ 3本指 3回動作



図 A.7: 評価実験 2 にて用いた事後アンケート-Part2.

覚えやすかったタスクにチェックを入れてください（3番）

- ☐ 1本指 1回動作
- ☐ 1本指 2回動作
- ☐ 1本指 3回動作
- ☐ 2本指 1回動作
- ☐ 2本指 2回動作
- ☐ 2本指 3回動作
- ☐ 3本指 1回動作
- ☐ 3本指 2回動作
- ☐ 3本指 3回動作

覚えにくかったタスクにチェックを入れてください（1番）

- ☐ 1本指 1回動作
- ☐ 1本指 2回動作
- ☐ 1本指 3回動作
- ☐ 2本指 1回動作
- ☐ 2本指 2回動作
- ☐ 2本指 3回動作
- ☐ 3本指 1回動作
- ☐ 3本指 2回動作
- ☐ 3本指 3回動作



図 A.8: 評価実験 2 にて用いた事後アンケート-Part3.

A.5 評価実験1および2にて用いたNASA-TLX アンケート

2023/12/29 15:19

NASA Task Load Index

タスクアンケート - パート 1

タスクの経験に最も近い各スケール上のポイントをクリックしてください

知的・知覚的要求

小さい 大きい

身体的要求

小さい 大きい

タイムプレッシャー

弱い 強い

作業成績

良い 悪い

努力

少ない 多い

フラストレーション

低い 高い

どの程度の知的・知覚的活動（考える、決める、計算する、記憶する、見るなど）を必要としましたか。課題はやさしかったですか難しかったですか、単純でしたか複雑でしたか、正確さが求められましたか大きざっぱでよかったですか

どの程度の身体的活動（押す、引く、回す、制御する、動き回るなど）を必要としましたか。作業はラクでしたがキツかったですか、ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが、休み休みできましたか働きづめでしたか

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感は何の程度でしたか。ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか、それとも速くて余裕のないものでしたか

作業指示者（またはあなた自身）によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか

作業成績のレベルを達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければならませんでしたか

作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じましたか。あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じましたか

<https://www.iplab.cs.tsukuba.ac.jp/~nishikawa/nasa-tlx>

1/1

図 A.9: タスクアンケート-Part1. 6つの指標に対する回答を行う.

タスクアンケート - パート 2

タスクのワークロード（作業負荷）へのより重要な要因を表す要素をクリックしてください

身体的要求	どの程度の身体的活動（押す，引く，回す，制御する，動き回るなど）を必要としましたか。作業はラクでしたかキツかったですか，ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたか，休み休みできましたか働きづめでしたか
or	
タイムプレッシャー	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか。ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか，それとも速くて余裕のないものでしたか

図 A.10: タスクアンケート-Part2. Part1 に示した 6 つの指標のうち，ランダムに選ばれた 2 つの名前が表示され，重要な要因だと思う方を選択する. これを，全通りに対して行う. 例として，「身体的要求」および「タイムプレッシャー」が選ばれた場合の画面を示す.