

電氣的筋肉刺激が重量知覚に及ぼす影響に関する一検討

中張 遼太郎¹ 新島 有信¹ 小川 剛史²

概要: 日常生活において、物を持ち上げたり運んだりするような軽度な力仕事を頻繁に行う。力仕事を支援する手法についての研究はいくつか行われているが、装置が高価であったり、安価であっても効果が小さいなどの課題がある。本稿では、電氣的筋肉刺激を用いて、物体の重量知覚を変化させる手法を提案する。物体を持ち上げる際に収縮する各筋肉に対して、電氣刺激を与えた際に重量知覚がどのように変化するかを調査した。被験者実験により、上腕三頭筋、浅指屈筋、総指伸筋のいずれかに対して電氣刺激を与えることで、実際よりも軽く感じることを確認し、本手法が力仕事支援に有効であることが示唆された。

キーワード: 電氣的筋肉刺激、重量知覚、力仕事支援

A Study on the Influence of Electrical Muscle Stimulation on Weight Perception

NAKAHARI RYOTARO¹ NIJIMA ARINOBU¹ OGAWA TAKEFUMI²

Abstract: There are many situations where we are doing simple tasks such as lifting or carrying something in daily life. Several studies have been conducted on supporting method for physical work. These methods have problems about cost and effectiveness. In this paper, we propose weight perception control methods using electrical muscle stimulation (EMS). We investigated the change of weight perception when electrical signals are delivered to the muscles to be contracted in lifting objects. Subjective experiment results showed that subjects perceived objects lighter when electrical signals are delivered to their biceps brachia muscle, extensor digitorum muscle or flexor digitorum superficialis muscle. It was suggested that our methods are effective for supporting physical work.

Keywords: electrical muscle stimulation, weight perception, assistance for physical work

1. はじめに

日常生活において、家事や買い物、家具の移動など、物を持ち上げたり、運んだりする作業を頻繁に行っている。特に高重量の物体を扱う作業を支援するために、Hybrid Assistive Limb (HAL) [1] などのパワードスーツに関する研究が進められている。パワードスーツは高出力のアクチュエータを使用しており介護や医療の現場などでの利用が期待されているが、日常生活において使用するにはその運用やメンテナンスのために多大なコストが必要である。

簡易なデバイスで日常の力仕事を支援するシステムとして、伴らの研究がある [2]。人間は明度が低い物体ほど重量を重く見積もることが知られており、伴らはこの現象に着目し、拡張現実感を利用して対象物体の明度を変更することで、使用者の重量知覚を制御し、疲労軽減効果を実験により確認した。この研究では、心理的な錯覚を利用しているため重量知覚の変化量は小さく、より大きな重量変化を提示できれば更なる疲労軽減効果が期待できる。

本研究では、提示できる重量知覚の変化量を大きくするために電氣的筋肉刺激 (EMS, Electrical Muscle Stimulation) を利用することを提案する。EMS は、脳から送られる電氣信号の代わりに、皮膚に装着した電極から電氣信号を筋肉に与えることで運動神経を刺激し、筋肉を運動させる技

¹ 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
² 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo

術である [3]。心理的な錯覚とは異なり、筋肉の運動という実体を伴うフィードバックを引き起こせるために重量知覚の変化量をより大きくできると考えられる。EMS が重量知覚へ影響を与える可能性があることは石川らの研究で明らかになっている [4]。しかし、石川らの研究は仮想環境における仮想物体の重量知覚の変化を対象としており、実環境において実物体でも重量知覚の変化が生じるかは不明である。また、電気刺激を行った筋肉は上腕三頭筋のみであり、他の筋肉に対して電気刺激を行った際に重量知覚にどのような影響が出るかは言及されていない。そこで本研究では、実物体を持ち上げる際に様々な筋肉に対して電気刺激を行い、重量知覚にどのような影響が生じるかを実験により検証した。以下、2 章では、本研究で利用する EMS について説明を行い、3 章で提案システムの概要を説明する。4 章では、EMS により生じる重量知覚への影響について仮説を述べ、5 章で仮説を検証するために行った実験の結果を示し、6 章で本稿のまとめについて述べる。

2. 電氣的筋肉刺激

人間の筋肉は自分の意思で動かせる随意筋と、自分の意思では動かせない不随意筋の大きく二つに分類できる。人間は随意筋を収縮させることで手や足など体の各部位を動かすことができる。随意筋は、運動単位として知られる機能単位に含まれる末梢神経によって神経支配されている。末梢神経に対して脳から活動電位を伝えることで随意筋の収縮が起こる。外部デバイスを用いて、皮膚の上から電極を介して末梢神経に対して電気刺激を与えることで、本人の意思とは無関係に筋肉を収縮させる技術を EMS と呼ぶ [3]。EMS はリハビリなど主に医療分野で用いられてきたが、近年ではフィットネスやトレーニングに使用されることも多い。

また、EMS を用いてユーザの動きを外部から制御することで、ナビゲーションや訓練に活用する手法も提案されている。Pfeiffer らは、股関節の外旋や膝関節の内旋を司る縫工筋を電気刺激することで、ユーザの足の向きを意思とは無関係に変化させ、無意識の歩行誘導を実現している [5]。Lopes らは、モーションセンサによってユーザの位置関係を認識し、EMS によってユーザの体を動かすことで、ユーザが使おうとしている物の使い方を直接提示するシステムを開発している [6]。玉城らは、前腕に電極を貼り付けることで手のひらや指の動きを制御し、琴などの楽器を演奏する際にどのタイミングでどの指を動かすのかを提示する装置を開発している [7]。いずれの研究も、EMS によって生じる体の動きそのものをユーザへのフィードバックとして利用している。

一方で、石川らは自然に起こる筋肉の動作を EMS により再現することで、その筋肉の動作に対応した感覚などを生起できるのではないかと考えた [4]。石川らは物体の重

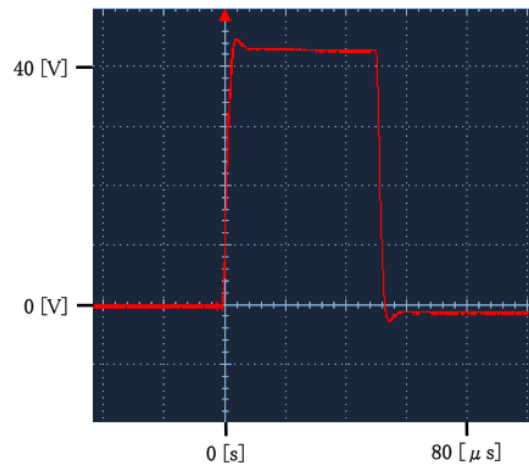


図 1 単一パルス波形

量により肘関節が伸展することに着目し、上腕三頭筋に電気刺激を与えることでこの動作を再現した。電気刺激を与えて上腕三頭筋を収縮させた場合、元の姿勢を維持するためには、上腕二頭筋をはじめとする拮抗筋群を能動的に活動させる必要がある。この筋活動が重量感を生み出すと考えられ、この現象を利用することで仮想物体の重量感を提示した。しかし、仮想物体ではなく実物体を把持する場面で電気刺激を与えることを考えると、物体の重量により上腕三頭筋の収縮が引き起こされるため、電気刺激を与えて更に収縮させたとしても重量知覚の変化が生じるかは不明である。また、実物体を把持した際に収縮する筋肉には、上腕二頭筋や上腕三頭筋だけでなく、前腕に位置する筋肉なども含まれることから、電気刺激を与える筋肉については更なる検討が必要である。以上より、EMS が実物体把持時の重量知覚に与える影響については、十分に検討されていないと言える。

3. 提案システム

3.1 システム概要

本章では、EMS を用いた重量知覚制御システムの概要を説明する。筋肉の収縮という実体を伴うフィードバックを引き起こせる EMS を利用することで、大きな重量知覚の変化を提示する。本システムでは、物体を持ち上げてから置くまでの間に特定の筋肉に対して電気刺激を与える。電気刺激開始のタイミングは実験者が手動で入力を行い、一定時間後に刺激を終了する実装になっているが、感圧センサや筋電センサを使用することで自動化が可能である。電気刺激を与える方法については 3.2 節で説明を行う。電気刺激を与えることで、物体をそのまま把持した時とは異なる筋肉の運動を引き起こし、重量知覚に影響を与えることを目指す。

3.2 電気刺激提示方法

電気刺激装置として Digitimer 社の医療用電気刺激装置

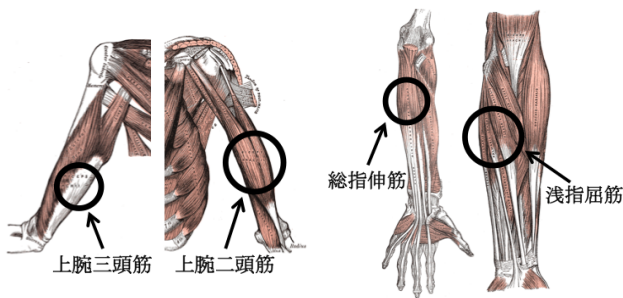


図 2 上腕の筋肉 [8]

図 3 前腕の筋肉 [8]

マルチパルス D185 を使用した。この電気刺激装置は、刺激電圧と群発刺激パルスの数の積が一定の値を超えると自動的に刺激出力を遮断する機構を内蔵しており、人体への安全性を確保している。この電気刺激装置では、トリガが発動するとパルス幅 0.05 [ms] のパルスを 1~9 個出力する。複数のパルスを出力する際のパルス間隔は 1.0~9.9 [ms] まで調整可能であり、電圧は最大約 1000 [V] まで 1 [V] 刻みで指定できる。電圧 42 [V] での単一パルスの例を図 1 に示す。トリガ制御をマイクロコントローラ (Arduino MEGA) によって行い、シリアル通信によりコンピュータで刺激タイミング、刺激時間、周波数が調整可能となる。電気刺激を行う際に使用する電極は、日本光電社のディスコ電極 Vitrode F-150-M と AXELGAARD 社の PALS Electrodes (MODEL 895220) を使用した。

3.3 刺激対象筋肉の検討

物体の重量を知覚する場面はいくつか考えられる。本研究では、日常生活で発生する頻度の高い、手のひらに物体の一部を載せて前腕を動かして持ち上げる場面を想定した。このような場面において収縮する筋肉は複数存在するが、いずれも前腕と上腕に位置する。

上腕には前腕を動かす筋肉が位置する。前腕を動かして物体を持ち上げる際に収縮する筋肉としては、前腕を内側に曲げる上腕二頭筋、前腕を外側に伸ばす上腕三頭筋がある。一方で、前腕には手のひら全体や指を動かす筋肉が位置する。手のひらに物体の一部を載せて持ち上げる際に収縮する主な筋肉としては、手のひらを内側に曲げる浅指屈筋、手のひらを外側に伸ばす総指伸筋がある。前腕には他にも各指を動かす筋肉や、手の内旋と外旋を引き起こす筋肉などがあるが、本研究で想定している場面では殆ど収縮しない、もしくは総指伸筋が浅指屈筋を刺激することで代替できるため、対象から除外した。

上記の上腕二頭筋、上腕三頭筋、浅指屈筋、総指伸筋を人間が物体を持ち上げる際に主に収縮する筋肉と考えた。図 2、図 3 に各筋肉の位置を示す。この四つの筋肉に対して電気刺激を与えることで、重量知覚にどのような影響が生じるかを実験により調査した。

4. 仮説

3.3 節で刺激を行う対象筋肉を上腕二頭筋、上腕三頭筋、浅指屈筋、総指伸筋の四つとした。これらの筋肉を刺激した際に生じる重量知覚への影響を検討する。

物体を把持した際には、物体の重量に応じて上腕三頭筋が受動的に収縮し、姿勢を維持するために上腕二頭筋が収縮する。実物体把持時に上腕三頭筋に電気刺激を与えると、上腕三頭筋の収縮が強まり、それに伴い姿勢維持のための上腕二頭筋の活動量が増加すると考えられ、これにより対象物を実際よりも重く感じる可能性がある。しかし、実物体を把持した際には、電気刺激を与えなくとも上腕三頭筋が収縮した状態になるため、電気刺激によって変化する活動量が減ると考えられる。このため、実物体を把持した際の重量知覚の変化量は、石川らが実験で得た重量知覚の変化量よりも小さくなる可能性がある。一方で、上腕二頭筋に電気刺激を与えると、脳からの電気信号で上腕二頭筋を収縮する強度が小さくなることや、上腕三頭筋が受動的に収縮する強度が小さくなることが考えられる。これらの現象を利用することで、対象物を実際よりも軽く感じる可能性がある。

次に、手のひらに物体を載せた際の筋活動を考える。手のひらに物体を載せると、物体の重量に応じて総指伸筋が受動的に収縮し、姿勢を維持するために拮抗筋群である浅指屈筋が収縮すると考えられる。これは、実物体を把持した際の上腕三頭筋と上腕二頭筋の関係と同じである。このため、総指伸筋を電気刺激により収縮させることで、姿勢を維持するために必要な浅指屈筋の活動量が増加し、対象物を実際よりも重く感じる可能性がある。一方で、浅指屈筋に電気刺激を与えることで、脳からの電気信号で浅指屈筋を収縮する強度が小さくなることや、総指伸筋が受動的に収縮する強度が小さくなることが考えられる。これらの現象を利用することで、対象物を実際よりも軽く感じる可能性がある。

以上の検討より、下記の仮説を立てた。

- (1) 上腕二頭筋に電気刺激を与えると、対象物を実際よりも軽く感じる
- (2) 上腕三頭筋に電気刺激を与えると、対象物を実際よりも重く感じる
- (3) 浅指屈筋に電気刺激を与えると、対象物を実際よりも軽く感じる
- (4) 総指伸筋に電気刺激を与えると、対象物を実際よりも重く感じる

上記の仮説を検証するために実験を行った。5.1、5.2 節で実験条件と実験手順を述べ、5.3、5.4 節で実験結果を示す。

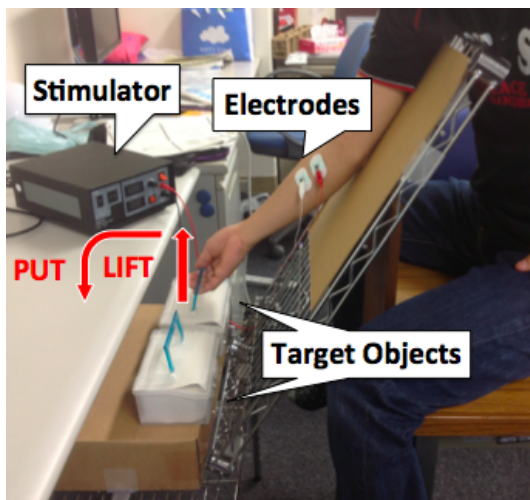


図 4 実験風景

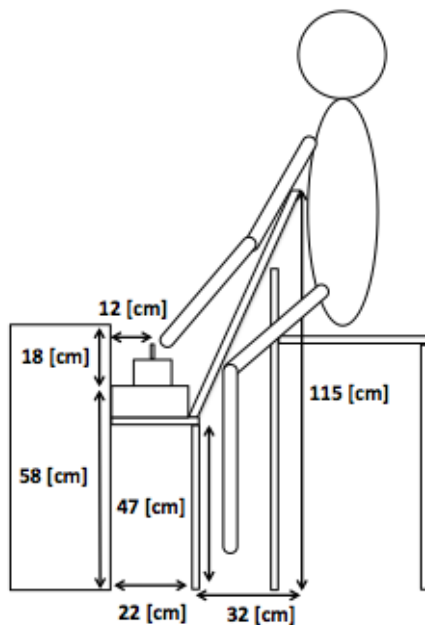


図 5 実験環境

5. 検証実験

5.1 実験条件

3.3 節で述べた筋肉に対して電気刺激を行い、人間の重量知覚がどのように変化するかを実験により調査した。実験風景を図 4 に、実験環境を図 5 に示す。被験者は外観が同一で中身の見えない二つの箱を利き腕で交互に持ち上げて重量を比較する。箱の寸法は幅 15 [cm]、奥行き 11 [cm]、高さ 9 [cm]（取っ手を上げた状態では 13 [cm]）であり、箱の初期重量は、実験中に疲労の影響が生じにくい重量で最大になる値を予備実験により決定して 1 [kg] とした。錘の重量は、錘を追加したことが 50 [%] より高い確率で識別できる重量値の中で、できるだけ小さい値を予備実験により決定して 50 [g] とした。

電気刺激としては、筋張力を最大化するために周波数約 60 [Hz]、パルス幅 0.05 [ms] のパルス波を与えた [9]。電圧は、刺激箇所や被験者の身体条件によって筋肉の収縮を起こすために必要な値が異なるため、電極の箇所、及び被験者により調整を行い、痛みの無い範囲で最大の値を採用した。電極を貼る箇所は、電気刺激を与えたい筋肉が収縮した際に動く体の部位を被験者に動かさせて、筋肉の動きから大まかな位置を決め、実際に電気刺激を与えて微調整を行った。本実験の被験者は 23~24 歳の男性 5 名で、全員右利きである。被験者には電気刺激を与えることについて十分な説明を行い、同意を得た後に実験を行った。

5.2 実験手順

電気刺激を与えることによってどのような重量知覚の変化が生じるのかを調査するために行った実験の手順を示す。

実験では、外観が同一で中身の見えない箱 X と箱 Y を被験者に利き腕で交互に持ち上げさせて重量を比較させ、被験者の主観で重量が釣り合うまで箱 Y の重量調整を行った。この時、箱 X を持ち上げる際には電気刺激を行うが、箱 Y では電気刺激を行わない。また、各箱の初期重量と重量調整に使用する錘の重量は被験者には伝えていない。重量調整後の箱 X と箱 Y の重量を記録し、その差を求めることで、電気刺激によって変化した重量知覚を測定することができる。

被験者は図 4 のように肘を板に押し当てて固定し、前腕が床と平行になる高さまで箱を持ち上げ、前方の机に箱を置くまでに重量を確認する。被験者が箱 X を持ち上げ終えたら、実験者が箱 Y を被験者の前に移動させるため、被験者は箱 X を持ち上げた時と同じ体勢で箱 Y を持ち上げることができる。箱 X を持ち上げる際の電気刺激は 5.1 節で示した電気信号を 3 秒間与えた。被験者には、電気刺激が行われる 3 秒間の間に箱 X を持ち上げ終えるように指示を与えた。被験者はそれぞれの箱を 2 回ずつ持ち上げた後、箱 Y に錘一つを追加するか取り除くあるいは変更せずにもう一度試行するかを選択する。被験者の主観で二つの箱の重量が釣り合うまで重量調整を行うが、箱 Y の重量が α [g] と $\alpha+50$ [g] の間で箱 X の重量と釣り合っていると被験者が述べた場合は、 $\alpha+25$ [g] を箱 Y の重量として記録して実験を終了した。実験終了後に被験者に対してアンケート調査を行い、EMS によってどのような変化を感じたかなどを調査した。

5.3 実験 1：上腕への電気刺激

5.3.1 実験概要

上腕に対して電気刺激を与えることによって重量知覚がどのように変化するかを調査した。電極は、上腕二頭筋と上腕三頭筋の皮膚表面に貼り付けた。上腕二頭筋には Vitrode F-150-M を、上腕三頭筋には PALS Electrodes を

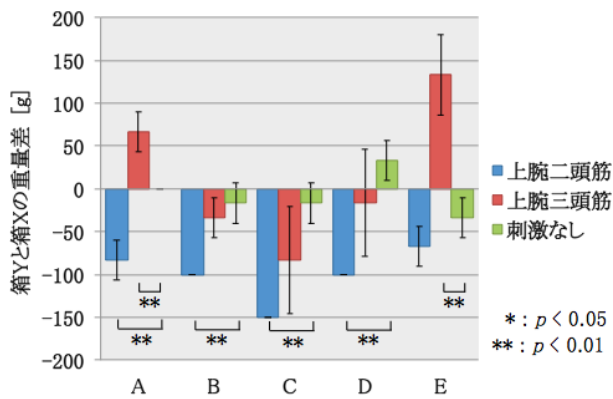


図 6 実験 1 結果

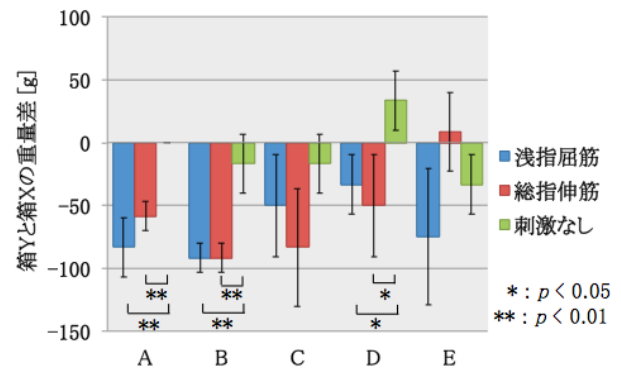


図 7 実験 2 結果

使用した。これは、Vitrode F-150-M では面積が小さく、上腕三頭筋の収縮に必要な電気刺激を与えるための電圧値が高くなり被験者に痛みが生じるからである。電圧は被験者が痛みを訴えない範囲で最大化した。上腕二頭筋では電圧値 45 ~ 75 [V]，電流値 24 ~ 42 [mA] であり，上腕三頭筋では電圧値 25 ~ 40 [V]，電流値 34 ~ 51 [mA] であった。また，比較を行うために電気刺激を与えない条件も加えた。以上の 3 条件についてそれぞれ 3 回試行を行った。

5.3.2 実験結果

実験 1 の結果を被験者ごとにまとめたグラフを図 6 に示す。以下，図中の縦軸は，箱 Y の重量から箱 X の重量を引いた値，横軸は被験者を表しており，エラーバーは標準偏差を示している。縦軸の値が正であれば，EMS によって箱 X を実際よりも重く知覚したことを表し，値が負であれば実際よりも軽く知覚したことを表す。

図 6 より，上腕二頭筋に電気刺激を与えることで，実際の重量よりも軽く知覚する傾向があることが分かる。上腕二頭筋に電気刺激を与えた場合の重量差と電気刺激を与えなかった場合の重量差に有意差があるかを調べるために片側 t 検定を行ったところ，被験者 A は $t(2)=11.49, p<.01$ ，被験者 B は $t(2)=11.49, p<.01$ ，被験者 C は $t(2)=27.46, p<.01$ ，被験者 D は $t(2)=27.46, p<.01$ となり，有意水準 1% で有意差が認められた。4 章で検討したように，意識的に上腕二頭筋を収縮する強度が小さくなった，あるいは上腕三頭筋が収縮する強度が小さくなったのではないかと考えられる。実験後に実施したアンケート調査では，体の一部に電気刺激を与えられているため意識が分散し，重量知覚が鈍くなったと述べた被験者が 1 人いたが，他の被験者は重量知覚への影響はなかったと答えていることから，電気刺激による痺れなどの影響は小さいと考えられる。

一方で，上腕三頭筋に電気刺激を与えた場合については，実際よりも重く知覚した被験者が 2 人，軽く知覚した被験者が 3 人となった。上腕三頭筋に電気刺激を与えた場合と電気刺激を与えなかった場合で重量差に有意差があるかを調べるために片側 t 検定を行ったところ，被験者 A は $t(2)=7.78, p<.01$ ，被験者 E は $t(2)=9.43, p<.01$ となり，

有意水準 1% で有意差が認められた。仮説とは異なる結果となった理由を考察する。実験後のアンケート調査では，重量を体のどの部位で知覚したかという質問に対して，3 人の被験者が手のひらと答えており，残る 2 人の被験者についても手のひらを含めた腕全体で総合的に知覚したと答えた。手のひらで受ける物体からの圧力は，電気刺激が与えられても変化しないため，手のひらでの重量を判断すると電気刺激による重量知覚への影響が小さかったと考えられる。また，上腕三頭筋への電気刺激では，痺れのような感覚や骨に響く感覚，振動などによって重量知覚が鈍くなったと感じた被験者が 4 人いたため，電気刺激そのものによる影響があったと考えられる。他にも，箱を持ち上げて机の上に置く間に重量を判断させた実験手順にも問題があった可能性がある。上腕三頭筋に電気刺激を与えることで，箱を持ち上げる過程では拮抗筋である上腕二頭筋の活動を増加させることができるが，箱を置く過程ではその効果が得られないため，電気刺激による影響が半減した可能性がある。被験者へ手袋を装着させることで手のひらでの重量判断を難しくしたり，箱の持ち上げ方を変更したりすることで，さらに詳細な検証を行う予定である。

5.4 実験 2：前腕への電気刺激

5.4.1 実験概要

前腕に対して電気刺激を与えることによって重量知覚がどのように変化するかを調査した。電極は，浅指屈筋と総指伸筋の皮膚表面に Vitrode F-150-M を貼り付けた。電圧は被験者が痛みを訴えない範囲で最大化した。浅指屈筋では電圧値 35 ~ 60 [V]，電流値 14 ~ 32 [mA] であり，総指伸筋では電圧値 45 ~ 70 [V]，電流値 20 ~ 46 [mA] であった。以上の 2 条件についてそれぞれ 3 回試行を行った。

5.4.2 実験結果

実験 2 の結果を被験者ごとにまとめたグラフを図 7 に示す。浅指屈筋に電気刺激を与えることで，実際の重量よりも軽く知覚する傾向があることが分かる。浅指屈筋に電気刺激を与えた場合の重量差と電気刺激を与えなかった場合の重量差に有意差があるかを調べるために片側 t 検定を

行ったところ、被験者 A は $t(2)=11.49$, $p<.01$, 被験者 B は $t(2)=7.86$, $p<.01$ となり、有意水準 1% で有意差があり、被験者 D は $t(2)=4.43$, $p<.05$ となり、有意水準 5% で有意差が認められた。実験後に実施したアンケート調査では、電気刺激によって手の感覚が鈍くなったと全ての被験者が述べた。先述のように、全ての被験者が手のひらを重量判断に利用しているため、手の感覚が鈍くなることで重量判断の材料が減り、重量知覚に影響が生じたと考えられる。

総指伸筋に電気刺激を与えた場合については、実際よりも重く知覚することを仮説として立てたが、軽く知覚する傾向が見られた。総指伸筋に電気刺激を与えた場合と電気刺激を与えなかった場合で重量差に有意差があるかを調べるために片側 t 検定を行ったところ、被験者 A は $t(2)=21.32$, $p<.01$, 被験者 B は $t(2)=7.86$, $p<.01$ となり、有意水準 1% で有意差があり、被験者 D は $t(2)=3.67$, $p<.05$ となり、有意水準 5% で有意差が認められた。仮説とは異なる結果になった理由としては、仮説で想定した、拮抗筋である浅指屈筋の収縮が起らなかったことと、浅指屈筋の場合と同様に手の感覚が鈍くなったことが挙げられる。仮説では、総指伸筋に電気刺激を与えることで、姿勢を維持するために必要な浅指屈筋の活動量が増加すると述べたが、全ての被験者が姿勢が崩れたまま箱を持ち上げたため、浅指屈筋の活動量が増加せず重量知覚に影響を与えることができなかったと考えられる。一方で、アンケート調査では、全ての被験者が手の感覚が鈍くなったことから、この影響が大勢を占め、浅指屈筋に電気刺激を与えた場合と似た結果になったと考えられる。手のひらの姿勢を維持するように指示を与えたり、前腕に位置する他の筋肉を刺激して手の感覚を鈍らせることで同様の結果が得られるかどうかについては検証を進める予定である。

6. おわりに

本稿では、日常生活においての使用を想定した力仕事を支援するシステムとして EMS を用いた重量知覚制御手法を提案した。物体を持ち上げる際に収縮する各筋肉に対して連続的な電気刺激を与えることで重量知覚にどのような影響が出るかを被験者実験により検証した。実験の結果、上腕二頭筋に電気刺激を与えると実際よりも軽く知覚し、上腕三頭筋に電気刺激を与えると実際よりも重く知覚する可能性が示された。また、浅指屈筋、総指伸筋を刺激すると実際よりも軽く知覚する傾向を確認した。今後は、実験手順や実験条件の変更、電気刺激を行う筋肉を変更するなどして更に検証を行い、EMS により重量知覚にどのような影響があるのか詳しく調査していく予定である。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)(25330227)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Tomohiro Hayashi, Hiroaki Kawamoto, and Yoshiyuki Sankai. Control Method of Robot Suit HAL working as Operator's Muscle using Biological and Dynamical Information. In *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3063–3068. IEEE, 2005.
- [2] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tatsuya Fujii, Sho Sakurai, Jun Imura, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Augmented Endurance: Controlling Fatigue while Handling Objects by Affecting Weight Perception using Augmented Reality. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 69–78. ACM, 2013.
- [3] Brian Reed. The Physiology of Neuromuscular Electrical Stimulation. *Pediatric Physical Therapy*, Vol. 9, No. 3, pp. 96–102, 1997.
- [4] 石川敬明, 辻敏夫, 栗田雄一. 電気刺激ならびに視覚・振動覚刺激による仮想重量感呈示. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 4, pp. 487–494, 2014.
- [5] Max Pfeiffer, Tim Dünz, Stefan Schneegass, Florian Alt, and Michael Rohs. Cruise Control for Pedestrians: Controlling Walking Direction Using Electrical Muscle Stimulation. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2505–2514. ACM, 2015.
- [6] 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. ACM, 2015.
- [7] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. PossessedHand: Techniques for Controlling Human Hands using Electrical Muscles Stimuli. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 543–552. ACM, 2011.
- [8] Henry Gray. *Anatomy of the Human Body*. Lea & Febiger, 1918.
- [9] Nicola A Maffiuletti. Physiological and methodological considerations for the use of neuromuscular electrical stimulation. *European journal of applied physiology*, Vol. 110, No. 2, pp. 223–234, 2010.