

公立はこだて未来大学 2023 年度 システム情報科学実習
グループ報告書

Future University Hakodate 2023 Systems Information Science Practice
Group Report

プロジェクト名

生体信号を利用した身体拡張インタフェース ～ASHURA～

Project Name

Human Augmentation Interface Using Biological Signals ～ASHURA～

グループ名

グループ B

Group Name

Group B

プロジェクト番号/Project No.

22-B

プロジェクトリーダー/Project Leader

高橋稜 Ryo Takahashi

グループリーダー/Group Leader

横谷汐美 Shiomi Yokoya

グループメンバ/Group Member

古内義久 Yoshihisa Furuuchi

泉優香 Yuka Izumi

高橋稜 Ryo Takahashi

横谷汐美 Shiomi Yokoya

指導教員

櫻沢繁 高木清二 辻義人

Advisor

Shigeru Sakurazawa Seiji Takagi Yoshihito Tsuji

提出日

2024 年 1 月 17 日

Date of Submission

January 17, 2024

概要

本プロジェクトは、発足当初から生体信号の一つである筋電位を利用したインタフェースの開発を行ってきた。筋電位とは、筋繊維の収縮活動の際に発生する活動電位である。本グループでは、「筋肉スーツによる筋出力の変化」というテーマに基づいたデバイスの開発を行った。アニメやマンガには筋肉が肥大してパワーアップするシーンが存在するが、現実で実行するのは不可能である。しかし、疑似的な筋肉を肥大させることで実際に自身をパワーアップすることは可能ではないかと考えた。よって、本グループは自身の身体を疑似的に拡大し身体に対する視覚的知覚を変化させることで、筋出力を自身の持つ最大値以内で増幅させることを目的とした。袋を疑似的な筋肉に見立て、袋に空気を注入することで筋肉の肥大を表現した。この袋を「筋肉袋」と呼称する。上半身を肥大させるために、胸部、腹部、背部、前腕部、上腕部の筋肉袋を製作した。また、それらの筋肉袋を身に着けるための筋肉スーツを製作した。筋肉スーツを用いて、視覚的知覚の変化による筋出力の増加及び心境の変化の有無を確認する評価実験を行った。実験において、筋肉スーツの着用時と非着用時の被験者の握力を測定及び比較した。また、筋肉スーツの着用時と非着用時で心境の変化があったか確認する意見調査を実施した。実験の結果、握力の有意差は認められなかったが、筋肉スーツの非着用時に比べて着用時は被験者が力を出せそうだと感じる傾向が見られた。プロジェクトを通して、筋肉袋及び筋肉スーツの課題が複数認められた。ホースのつなぎ目からの空気漏れや、筋肉の再現度の低さ等が挙げられる。加えて、システム制御や実験過程での課題も発生した。実験の結果を得たことで、筋電位の制御方法と筋肉スーツへの筋収縮の状態の反映方法について再考する必要がある。

キーワード 生体信号, 筋電位, 身体拡張, 視覚的知覚

(※文責: 横谷汐美)

Abstract

This project has developed interfaces using myoelectric potentials, one of biological signals. Myoelectric potential is an action potential generated when muscle fibers contract. This group developed a device based on a theme, “fake muscles to be stronger”. It is impossible to realize a scene of animation and manga that a character makes large his muscles and be stronger. However, we considered it is possible to be stronger to make large fake muscles. Therefore, we set a goal that let muscle power output be close to maximum to change visual perception by pseudo enlargement of someone’s own body. We created fake muscles by bags and expressed muscle enlargement to inflate bags. We call these bags “muscle bags”. We created muscle bags of the chest, the abdomen, the back, the upper arms and the forearms to enlarge the upper body. Furthermore, we created muscle suits to put on muscle bags. We experimented to verify an increase of muscle power output and a change of mind by visual perception to use muscle suits. We measured the grip strength and compared measured values when subjects wear muscle suits and when they don’t wear muscle suits. In addition, we made a survey to validate a change of mind. As a result, there isn’t a significant difference in grip strength. However, the tendency that subjects feel stronger when they wear muscle suits can be seen. There are some problems with muscle bags and suits through this project such as air leak from muscle bags, low reproduction of muscles and so on. Also, there are system control and experimental issues. It is necessary to rethink how to control myoelectric potentials and express muscle contraction using muscle suits.

Keyword biological signal, myoelectric potential, human augmentation, visual perception

(※文責: 横谷汐美)

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	3
第 2 章	グループ活動概要	4
2.1	目的達成のための手順と課題・小目標の設定	4
2.2	課題の割り当て	4
第 3 章	筋電位計測とシステム制御の方法	6
3.1	筋電位計測	6
3.1.1	アクティブ電極	6
3.1.2	差動増幅器	7
3.1.3	ハイパスフィルタ	7
3.1.4	非反転増幅器	8
3.1.5	半波整流器	8
3.1.6	積分回路	9
3.2	制御回路	9
3.2.1	Arduino	9
3.2.2	制御プログラム	10
3.2.3	DC/DC コンバータ	10
3.2.4	H ブリッジ回路・フルブリッジドライバ	10
第 4 章	前期について	12
4.1	成果物	12
4.1.1	筋電位計測回路・電極の製作	12
4.1.2	外装部品のマイクロサーボモータ	12
4.1.3	筋肉袋の構造	12
4.1.4	筋電位の計測部位	13
4.1.5	筋肉袋の動作機構	13
4.1.6	視覚的知覚を変化させるデバイスの膨張機能の実装	13
4.2	仮説検証方法の考案	14
4.3	実験の目的	14
4.4	実験方法	15
4.5	実験結果	15
4.5.1	前期の成果の評価	16
4.6	前腕の筋肉袋の課題と改善策	16
4.7	後期の展望	17
第 5 章	最終成果物	19

5.1	筋電位計測回路・電極	19
5.2	外装部品	19
5.2.1	電磁バルブ	19
5.2.2	エアサブタンク	19
5.2.3	レギュレータ	19
5.2.4	エアソケット・エアプラグ・エアカプラ	20
5.2.5	ニップル・ソケット	20
5.3	3D モデリングソフトを用いた最終成果物の設計	20
5.3.1	3D モデリング	20
5.3.2	3D プリンタ	20
5.4	筋肉袋の構造	21
5.5	筋肉スーツの構造	23
5.5.1	筋肉スーツ（インナー）	24
5.5.2	筋肉スーツ（アップリフト）	25
5.5.3	筋肉スーツ（アウター）	26
5.6	筋肉スーツの構造	27
第 6 章	評価実験	29
6.1	実験準備	29
6.1.1	作業課題の設定	29
6.1.2	意見調査の設定	29
6.2	本実験の目的	29
6.3	実験方法	29
6.3.1	分析方法	30
6.4	実験結果	30
6.4.1	作業課題の結果	30
6.4.2	意見調査の結果	31
6.4.3	全体の結果	32
6.5	考察	32
6.5.1	アンケート結果と握力の増減値の相関について	32
6.5.2	筋肉スーツの着用有無に有意差が見られなかったことについて	32
6.5.3	プロテウス効果との関連性とその調査について	33
6.5.4	筋電位と高揚感の関係性について	34
6.5.5	筋出力増加の検証について	34
第 7 章	結論	36
7.1	本グループの成果	36
7.2	最終成果物の課題と改善策	36
7.3	今後の展望	38
第 8 章	中間発表会についてのフィードバック	39
8.1	中間発表会	39
8.2	評価された点	39

8.3	指摘された点	39
第 9 章	成果発表会についてのフィードバック	40
9.1	成果発表会	40
9.2	評価された点	40
9.3	指摘された点	40
第 10 章	課題解決のプロセスの詳細	41
10.1	各人の課題の概要とプロジェクト内における位置づけ	41
10.1.1	横谷汐美	41
10.1.2	高橋稜	41
10.1.3	古内義久	42
10.1.4	泉優香	43
10.2	担当課題と他の課題の連携内容	43
10.2.1	横谷汐美	43
10.2.2	高橋稜	44
10.2.3	古内義久	44
10.2.4	泉優香	44
付録 A	新規習得技術	45
付録 B	活用した講義	46
付録 C	相互評価	47
C.1	前期	47
C.1.1	横谷汐美からの相互評価	47
C.1.2	高橋稜からの相互評価	47
C.1.3	古内義久からの相互評価	48
C.1.4	泉優香からの相互評価	48
C.2	後期	49
C.2.1	横谷汐美からの相互評価	49
C.2.2	高橋稜からの相互評価	49
C.2.3	古内義久からの相互評価	50
C.2.4	泉優香からの相互評価	50
参考文献		52

第1章 はじめに

1.1 背景

本プロジェクトでは、プロジェクト発足当初から生体信号の一つである筋電位を利用した身体拡張インタフェースの製作を行っている。筋電位とは、脳波や心電図などの生体信号の一つである。身体の運動を意図した時、脳から脊髄、運動神経を経て筋細胞に電気的な信号が伝えられ、筋が収縮する。その時、筋細胞外のナトリウムイオンが細胞内に流入することで、膜電位という細胞内外の電位差に変化が生じる。これを活動電位と呼ぶ。この活動電位の計測には電極を用いる。筋電位からは人間の筋肉の動きを読み取ることが可能である。よって、筋電位を利用したデバイスの動きとデバイス装着者の意図を連動させることが可能である。これらの特徴から、筋電位は自らの身体のような直感的な操作が必要な筋電義手やパワードスーツの装着者の制御方法に適しているといえる。しかし、本プロジェクトでは、筋電位を使用してパワードスーツのようなモータによるパワーアシストではなく、疑似筋肉を使い身体拡張を行い、筋肉の能力を引き出すことを試みる。

アニメや漫画の作品内では「ドラゴンボール」の亀仙人や、「北斗の拳」のケンシロウのような「筋肉の肥大化によってパワーアップするシーン」が存在する。亀仙人は通常時は肋骨が浮き出ており痩せた体型をしている。また、自分の背丈ほどの石壁を登ることに苦戦し、他のキャラクターに手助けされている。しかし、筋肉を肥大させ、かめはめ波を打つことで山を一つ消している [1]。かめはめ波とは、凝縮した体内の潜在エネルギーを一気に放出する作品内での大技である。北斗の拳では、懸命に生きようとしている貧しい村人が悪党に殺されたことに対して、ケンシロウが怒り筋肉を肥大させて服を破り捨てている。その後、ケンシロウと同じもしくはそれ以上の体格をした悪党を3人難なく殺している [2]。これらのシーンでは筋力を中心とした身体能力の向上が描かれている。これらは漫画やアニメなどのフィクションのため読者や視聴者がパワーアップしたとわかりやすいように筋肉を肥大化刺せたと考えられる。そこで我々ももしアニメや漫画のように自分自身の筋肉が肥大化したら、実際に筋肉の出力も上がりパワーアップするのではないかと考えた。しかし、実際人間は筋肉や骨の損傷を防ぐために100%もしくは100%以上の力が出せないように脳によって意識的に発揮できるパワーに制限がかかっている。よって、本報告書では、パワーアップを自身の限界を超えた力の増幅ではなく、自身が持つ力の最大出力以内での増幅と定義する。

幸田によると、筋力の向上の主な要因は筋線維の肥大と神経系の賦活である [3]。筋には発達段階があり、絶対筋力が向上した後に筋肥大が起こる。絶対筋力とは、筋断面積1平方センチメートルあたりの筋出力である。さらに筋出力を十分に発揮させるために、筋収縮速度を速めるトレーニングを行う。一時的に高負荷なトレーニングを行うのではなく、トレーニングを継続することで十分に筋力が向上する。しかし我々が継続的なトレーニングを行わず、実際に筋肉の肥大化を自在に操ることができたら、筋肉の肥大化によって漫画やアニメのように筋出力の向上が可能なのかと考えた。そのため、この筋出力の向上を実現するためにパンプアップ現象を利用しようと考えた。パンプアップ現象とは、筋肉内に多量の水分が貯留して筋肉がはれ上がった状態である [4]。力をこめると筋肉が硬くなり、血管を押しつぶすことで血液の流れが阻害される。このような血流が制限された状態で運動を行うと、筋肉内が低酸素環境となり、乳酸などの無酸素性の代謝物が多量に筋肉内に蓄積される。その状態になると、筋肉内の浸透圧を一定にする働きによりパンプアップ現象

が発生する。しかし、パンプアップにより通常より大きな筋肥大や筋力増強効果を得るためには、それぞれの人にあった重さでトレーニングを行い今までトレーニングをして来なかった人には長期的なトレーニングが必要である [4]。それでは、アニメや漫画の作品内で行われるような瞬間的な筋肉の肥大化を体験できないのではないかと考えた。そのため本グループでは、筋肉を模したパーツとして上腕、前腕、腹、胸、背中の各部位を製作し、筋肉を模したパーツを膨張することで疑似的にアニメや漫画のような瞬間的な筋肉の肥大を体験できるのではないかと考えた。しかし、「筋肉の肥大化によってパワーアップするシーン」を再現するためには、筋肉を模したパーツを瞬間的に肥大させるだけではなく、肥大化したパーツによって自身の身体が拡大したと思わせる必要がある。そこで、筋肉を模したパーツを肥大させる時に錯覚を利用し、自身の身体が拡大したと思わせることにした。森川は、錯視とは物理的現実と主観的現実との間に生まれる多少のズレであると述べている [5]。そこで、錯視を起こす方法として筋肉の収縮方向に対して垂直方向に膨張することと、筋電位信号を利用できると考えた。

筋肉は、力が入った際に筋細胞内でアクチンとミオシンの首振り運動が発生し、筋収縮が起こる。ただ、筋細胞の体積は変化しないため、筋肉は収縮方向に対して垂直方向に膨張する。この垂直方向の膨張を過大に表現することで、物理的現実で膨張を発生させるとともに、主観的現実で筋肉の肥大化を起こす。これにより、物理的現実と主観的現実との間に多少のズレを生むことができると考えた。また、筋収縮によって活動電位が生じる。筋肉を模したパーツが肥大する基準を「活動電位の観測」にすることで、より物理的現実に近い主観的現実とのズレを起こせると考えた。つまり、筋肉を模したパーツを使用して、先述した収縮と膨張の内、膨張を過大に表現する。 [5]。そこで、錯視を起こす方法として筋肉の収縮方向に対して垂直方向に膨張することと、筋電位信号を利用できると考えた。

本グループは、視覚的知覚の変化に関する事柄として、物体の重量知覚を変化させる研究に注目した。Linkenauger らは、被験者に拡大レンズを装着させ、テーブルの上に設置された豆袋の重量を予測させる実験を行った [6]。被験者は豆袋の横に手を置くグループと置かないグループにランダムに分けられた。豆袋は 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 グラムの 8 種類用意し、その中から無作為に 1 つ選んで被験者に重量を予測させた。結果として、手が大きい被験者ほど豆袋の予測値を実際の重量よりも軽く判断した。他に、VR 空間にてユーザ自身の外見と異なる外見のアバターを使用した際に、ユーザの心理状態や行動に影響を与えるプロテウス効果 [7] を基に、物体の重量知覚を変化を調査する研究があった。角田らは、平均 BMI 値 21.4 の男性 24 名に細身、標準、筋肉質の 3 種のアバターを用意し、その内 2 つのアバターに一人称視点で没入させた状態での物体の重量知覚の変化を調べる実験を行った [8]。被験者はそれぞれで没入した状態で実際に 5kg のダンベルを持ち、被験者に対してどちらのアバターに没入した状態で持ったダンベルの重さを答える実験を、順序効果を考慮して 6 セット行った。結果として、筋肉量が多いアバターを使用したユーザは物体の重量を実際より軽く判断した。つまり、先述した 2 つの先行研究から、身体に対する視覚的知覚が変化した場合、重量に対する予測は変化することが言える。

また、プロテウス効果に関して石川らは、VR ゴーグルとモーションキャプチャを利用して一人称視点でアバターに没入させ、スクワット運動における主観的評価の変化を調査する実験を行った [9]。大学生の男女 16 名に細身と筋肉質の 2 種類のアバターを用意し、VR 空間上に設置した鏡をみることで自身のアバターを確認できるようにしていた。被験者は VR ゴーグル装着前に、疲れすぎない程度に予めスクワットを行い、少しでも疲れを感じたタイミングかつ 5 回、10 回、15 回、20 回のいずれかのタイミングでスクワットをやめ、これを実験の際の基準の回数とした。そこから被験者を細身から筋肉質の順番か、筋肉質から細身の順番の 2 グループに無作為に振り分け、基

準の回数スクワットを行い、疲労度を7段階で評価した。結果として、筋肉質のアバターでスクワットを行った場合が、他の状態と比べて1番疲労感が少ないと答える人の割合が多かった。

自身の身体を疑似的に拡大した際に、物体の重量を実際よりも軽く判断することと、自身の身体疲労感が軽減する現象が生じている。これらの現象は、錯覚による視覚的知覚の変化が原因ということが分かる。そこで本グループは、自身の身体の拡大により視覚的知覚が変化した場合、自身の身体が出力する力は増加するという仮説を立てた。

1.2 目的

本グループでは、アニメやマンガに登場する「筋肉の膨張によるパワーアップ」を、キャラクター自身の限界を超えた力の増幅ではなく、キャラクター自身が持つ力の最大出力以内での増幅であると考えた。この見解と先行研究の結果から立てた仮説に基づき、本グループはデバイス装着者の身体を疑似的に拡大し、装着者が自身の身体に対する視覚的知覚を変化させることで筋出力を自身の持つ最大値以内で増幅させることを目的とした。視覚的知覚の変化方法として、筋収縮の方向に対する垂直方向の膨張を過大に表現することを考案した。また、筋電位信号を読み取ることで筋肉の収縮や弛緩の状態が分かり、筋収縮に対する膨張の表現が可能であると考えた。そして本グループは、身体の疑似的な拡大を身体拡張と捉え、筋出力を自身の持つ最大値以内で増幅させる身体拡張インタフェースの開発を行った。前期では、筋出力をデバイスによって自身の持つ最大値以内で増幅したか実験を行うことによって、仮説の実証をすることを目標に据えて活動を行った。

(※文責: 古内義久)

第 2 章 グループ活動概要

2.1 目的達成のための手順と課題・小目標の設定

本グループではデバイス製作のために、初めは以下の手順で活動を行った。

1. 筋電位計測のための基礎理論の学習
2. 筋電位計測回路の配線練習
3. 視覚的知覚に関する先行研究の調査と共有

先行研究を調査し終えた時点での課題を以下に示す。

- 筋電位計測回路・電極の製作
- 視覚的知覚を変化させるデバイスの設計・製作
- 視覚的知覚を変化させるデバイスの動作機構の確立
- 視覚的知覚を変化させるデバイスの膨張機能の実装
- 仮説検証方法の考案
- PowerPoint に基づいた発表原稿の作成

本グループは上記の課題解決を小目標に定め、各メンバーに役割と小目標を分担して取り組んだ。前期は仮説検証を最終的な目標として、メンバー全員に割り当てた。

(※文責: 古内義久)

2.2 課題の割り当て

課題の割り当ては、各メンバーの得意分野や希望する活動に基づいて分担を行った。また、分担は原則的なものとし、メンバー間での確認や報告は適宜行い、議論を交えながら活動した。各メンバーへの課題割り当てを、全員で取り組んだ事柄を除いて以下に示す。

- 筋電位計測回路・電極の製作
横谷汐美・古内義久
- 視覚的知覚を変化させるデバイスの設計・製作
横谷汐美・泉優香
- 視覚的知覚を変化させるデバイスの動作機構の確立
高橋稜・古内義久
- 視覚的知覚を変化させるデバイスの膨張機能の実装
横谷汐美・泉優香
- 仮説検証方法の考案
高橋稜・古内義久
- PowerPoint に基づいた発表原稿の作成
高橋稜・古内義久

第 3 章 筋電位計測とシステム制御の方法

3.1 筋電位計測

筋電位計測には、侵襲的計測方法と、非侵襲的方法がある。侵襲的計測方法は針電極を用いて筋内部に刺入し筋電位を計測する。この方法は局所的な筋電位を計測することが可能である。しかし、この方法では電極を刺す際や筋収縮の際に筋に痛みが生じるという問題がある。また、針電極の性質として針電極を刺入した筋内部の筋繊維の筋電位しか計測できないため、複合活動電位の計測を行いたい場合には筋の複数個所に電極を刺し、筋全体の筋電位を計測し筋収縮が行われているかを判定する必要があるという問題がある。非侵襲的方法は皮膚表面に電極を貼り、筋電位を計測する方法である。この方法は計測する際に痛みが生じることなく計測することが可能である。しかし、この方法では筋全体の筋電位しか計測できず、個々の筋繊維の計測はできないという問題がある。しかし本グループの実験には、局所的な筋電位の計測は不要であり、被験者に痛みが生じないように、筋全体の筋電位を計測することができる表面筋電位計測方法を用いることにした。しかし表面筋電位計測には、計測できる筋電位が非常に微弱であることや、ノイズが多く混入するなどの問題点がある。これらの問題点を解決するために、差動増幅器、非反転増幅器、ハイパスフィルタ、計測した筋電位を Arduino で使用できるようにするために、半波整流器、ローパスフィルタから構成される回路を用いることが必要である。

(※文責: 高橋稜)

3.1.1 アクティブ電極

筋電位を計測する際に、グループで製作したアクティブ電極を使用した。アクティブ電極とは、皮膚と電極間の接触インピーダンスの高さが原因で発生するノイズを抑えることが可能な電極である。インピーダンスとは、交流回路での電気抵抗の値である。インピーダンスが大きくなるほど電流が流れにくくなる。また、インピーダンスの構成要素には抵抗とリアクタンスがある。抵抗は抵抗器のみを考慮した電気抵抗の値であり、インピーダンスと違い周波数の影響を受けない。リアクタンスには容量性リアクタンスと誘導性リアクタンスがあり、周波数の影響を受ける。容量性リアクタンスは、コンデンサの電気抵抗であり、誘導性リアクタンスはインダクタの電気抵抗である。アクティブ電極を用いた筋電位計測の際には、皮膚と電極間のインピーダンスが高いことで電流が流れにくくなり、微弱な電気信号である筋電位が計測しにくいという問題がある。そのため、オペアンプの出力端子と-端子を接続し、+端子の入力インピーダンスを高くした。オペアンプとは、二つの入力信号の差分を増幅し出力することで、微弱な電気信号を増幅することが可能な集積回路である。これにより、電極側で皮膚より高いインピーダンスを作り出すことで問題を解決した。図 3.1 に回路図を示す。

アクティブ電極は、グループで製作したものをを用いた。使用した素材は銀板、オペアンプ、導線、レジンは。皮膚と接触する部分には円形に切り取った銀板を用い、その上にオペアンプをはんだで接着した。オペアンプの+端子と-端子それぞれに導線をはんだで接着し、オペアンプと銀板が剥離しないようにレジンで補強した。

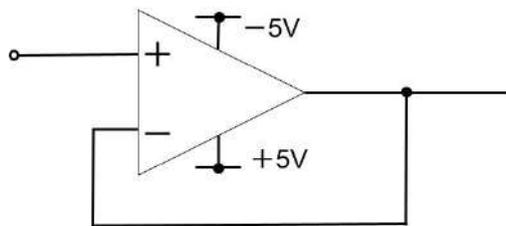


図 3.1 アクティブ電極

(※文責: 横谷汐美)

3.1.2 差動増幅器

差動増幅回路とは、二つの入力信号の差を増幅して出力する回路である。計測したときに筋電位と同時に出力されるノイズを正確に取り除く必要があるため、誤差が $\pm 0.1\%$ の精密な抵抗器を用いて二つの入力信号の差を増幅させた筋電位のみを出力する。図 3.2 に回路図を示す。

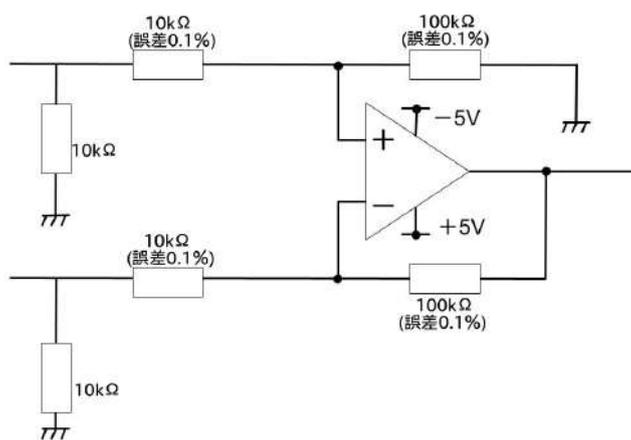


図 3.2 差動増幅器

(※文責: 高橋稜)

3.1.3 ハイパスフィルタ

特定の周波数よりも高い周波数の成分を通過させ、それよりも低い周波数の成分を減衰させる働きをする回路である。ハイパスフィルタは次数が高いほどフィルタの効果が高くなる。そこで今回の筋電位計測では 4 次のハイパスフィルタを使用した。図 3.3 に回路図を示す。

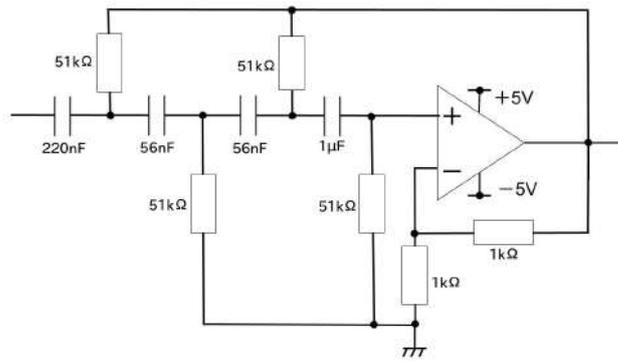


図 3.3 ハイパスフィルタ

(※文責: 高橋稜)

3.1.4 非反転増幅器

ハイパスフィルタを通過した時点では、まだ筋電位は微弱な信号であり、デバイスに利用できるような信号ではない、そのため非反転増幅回路では、この微弱な筋電位を十分大きな信号に増幅する。図 3.4 に回路図を示す。

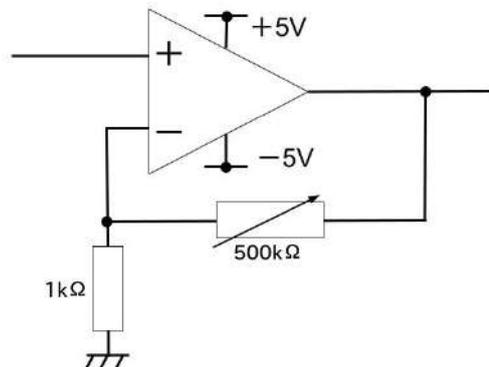


図 3.4 非反転増幅器

(※文責: 高橋稜)

3.1.5 半波整流器

半波整流器回路は、交流電圧のマイナスの電圧のみを削除し、プラスの電圧のみの信号を出力するものである。それにより、交流の信号を扱えない Arduino を使用することを可能にする。今回はダイオードを利用して半波整流を実現している。図 3.5 に回路図を示す。

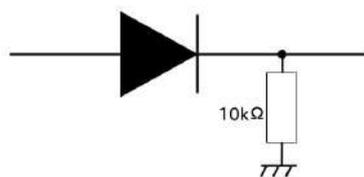


図 3.5 半波整流器

(※文責: 高橋稜)

3.1.6 積分回路

積分回路は、入力された筋電位を時間積分して出力する回路である。また、一定の周波数を境に、その周波数よりも高い周波数を減衰し、低い周波数だけが通過される特性を持つため、ローパスフィルタともよばれる回路である。この回路により、信号から包括線を抽出することができる。図 3.6 に回路図を示す。

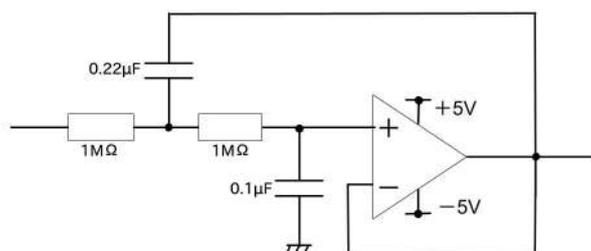


図 3.6 積分回路

(※文責: 高橋稜)

3.2 制御回路

3.2.1 Arduino

Arduino とは、Arduino ボードおよび Arduino IDE から構成されるシステムである。Arduino ボードはマイコン、入出力ポートを備えた基板である。また、Arduino IDE はプログラムの作成・コンパイル・デバッグを行い、それを Arduino ボードに転送するためのソフトウェアである。Arduino は、電子部品や半導体素子と呼ばれる素子を使った電子工作の開発などに用いられている。本グループでは、Arduino Uno を用いて、筋電位計測回路から出力されたアナログ信号をデジタル信号に変換する処理を行った。また、入力信号が設定した閾値を超えると電磁バルブが開く処理も Arduino で行った。

(※文責: 泉優香)

3.2.2 制御プログラム

筋電位信号に対して A/D 変換を施した後の値によって、Arduino からの電気信号の送信を制御するプログラムを構築した。具体的には、まず筋電位計測回路を通じて処理された筋電位信号を Arduino Uno のアナログピンから読み取る。次に、読み取った筋電位信号に A/D 変換を施し、筋電位信号をデジタル信号に変換する。さらに、この信号の値を条件式に当てはめ、一定値以上の筋電位信号が計測された場合に、計測された回数を記録する変数の値を 1 増やす。その変数の値が 10 になった際に一定時間だけ電磁バルブが開くように Arduino UNO から電気信号を送るプログラムを構築した。また、計測された回数を変数に記録した後に delay 関数を入れた。これは、一定値以上の筋電位信号が計測されてから次に計測されるまで微小な時間だけ伸ばすことによって、筋肉の膨張のための「力を込める動作」を実現するためである。加えて、変数の値をむやみに大きくすることなくプログラムの動作が可能のため、メモリの負担を減らせると考えたためである。さらに、電磁バルブを開くための電気信号の送信と閉じるための電気信号の送信の間にも delay 関数を入れることで、一定時間だけ電磁バルブが開く仕組みを実装した。開発環境には Arduino IDE を使用した。

(※文責: 古内義久)

3.2.3 DC/DC コンバータ

DC/DC コンバータは、流す電圧を直流のまま増加または減少させたい場合に回路に組み込む部品である。本グループでは筋電位計測回路と Arduino を動作させるために必要な 5V の電圧を 9V の積層電池から取得するため、9V から 5V へ電圧を下げる降圧コンバータを使用した。使用した降圧コンバータは、Minmax Technology が製造している「1W 級絶縁型 DC-DC コンバーター MAU106」である。

(※文責: 古内義久)

3.2.4 Hブリッジ回路・フルブリッジドライバ

Hブリッジ回路は、4本のトランジスタによって電流を正転・逆転させるために組み込む回路である。図 3.7 に回路図を示す。この回路はトランジスタと抵抗を 4本ずつ配線する必要があるが、予め Hブリッジ回路の機能が内蔵されたフルブリッジドライバを使用することで配線の手間を省くことが可能である。本グループでは、Arduino から送信される電気信号によって電磁バルブを制御するため、Arduino と電磁バルブの間にフルブリッジドライバを使用した。フルブリッジドライバには、日清紡マイクロデバイスが製造している「NJU7386RB1」を使用した。

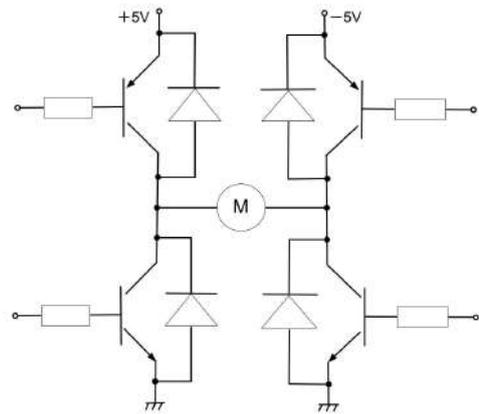


図 3.7 Hブリッジ回路

(※文責: 古内義久)

第 4 章 前期について

前期の成果物を以下に示す。

4.1 成果物

4.1.1 筋電位計測回路・電極の製作

筋電位計測回路は、担当教員から教わった回路図をもとに、ブレッドボードを使用した配線の練習後に基板への配線を行った。

(※文責: 古内義久)

4.1.2 外装部品のマイクロサーボモータ

サーボモータは、入力される電力によって回転速度や回転位置を制御することができるモータである。プログラムによって入力する電力を変化させることで、回転位置を変化させることができる点から前期では、空気を注入するための空気入れのスイッチを自動的に押させるためにサーボモータを用いた。

(※文責: 高橋稜)

4.1.3 筋肉袋の構造

前期では、上腕部と前腕部の筋肉袋を製作した。形状や加工の容易さを考慮し、素材は気泡緩衝材を用いた。初期の筋肉袋の形状は、縦 25cm × 横 50cm の長方形の袋を丸めて筒状にしたものであった。しかし、自身の腕が膨張したという感覚にはならなかった。そのため、図 4.1 のように、袋の上下端をすぼめた筒状の設計にすることで腕を全体的に膨張させ、膨張した感覚を高めることとした。



図 4.1 筋肉袋の構造

(※文責: 横谷汐美)

4.1.4 筋電位の計測部位

1.2で述べたように、本グループはデバイス装着者の身体を疑似的に拡大し、装着者が自身の身体に対する視覚的知覚を変化させることで筋出力を自身の持つ最大値以内で増幅させることを目的として、筋電位の計測から、筋肉袋を膨張させて筋収縮に対する膨張を表現することを目指した。アニメやマンガでは筋肉を膨張させる際に、拳を握りしめている。そのため、本グループの実験でも同様に、拳を握りしめた時に筋肉袋が膨張するようにした。拳をにぎると前腕の伸筋群の筋肉が収縮する。そこで、電極を前腕の伸筋群に計2か所に貼りつけ筋電位の検出を試みた。拳を握りしめた時の筋電位を閾値とし閾値以上の筋電位が計測された時に Arduino から電磁バルブに電気信号を送る。Arduino から電気信号を送られた電磁バルブは2.5秒間開く設定にした。電磁バルブが開くとエアサブタンクの中に入っている空気が筋肉袋に一気に流れ込み、筋肉袋が膨張する。

(※文責: 横谷汐美)

4.1.5 筋肉袋の動作機構

筋肉の収縮時に、収縮方向に対して垂直方向に膨張することを利用し、力を入れた際に筋肉袋の膨張がリアルタイムで開始する仕組みを実装した。筋電位の計測値を Arduino に送信し、サーボモータを作動させてコンプレッサのスイッチを押して筋肉袋に空気を注入することで、筋肉の肥大化を表現した。筋肉袋とコンプレッサの接続にはホースを使用した。これらの流れは図4.2のようになる。

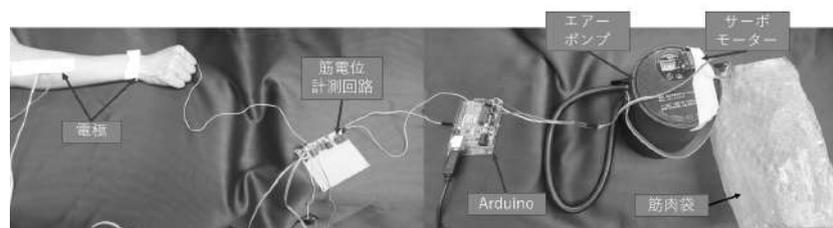


図 4.2 筋肉袋の動作機構

(※文責: 横谷汐美)

4.1.6 視覚的知覚を変化させるデバイスの膨張機能の実装

Arduino を使い、筋電位の測定値によってサーボモータの角度を変えるプログラムを実装し、スイッチを押すことを実現した。筋肉袋とエアポンプのホースをつなげ空気を注入することで筋肉袋の膨張を実現した。

(※文責: 泉優香)

4.2 仮説検証方法の考案

本グループは、自身の身体の拡大により視覚的知覚が変化した場合、自身の身体が出力する力は増加するという仮説を立てた。本グループでは筋電位信号を計測する部位として心理的抵抗感の少ない前腕部を選択している。前腕の筋肉は握力に関係していると考え、握力の変化を調査することで仮説の検証を行った。前腕部の筋肉袋を制作し、筋肉袋の膨張による視覚的知覚を変化させた際の握力の変化を調査するために、握力計を使用して握力の変化を計測した。図 4.3 は、実際に筋肉袋を装着及び膨張させて握力を測定した様子である。



図 4.3 筋肉袋膨張後の握力測定の様子

(※文責: 高橋稜)

4.3 実験の目的

前期では自身の前腕を疑似的に拡大して視覚的知覚の変化が起きれば自身の握力は変化するのかと仮説をたて検証を行った。そこで、筋肉袋を製作した。筋肉袋とは身体の疑似的な拡大により装着者自身の身体に対する視覚的知覚を変化させることを目的としたデバイスである。図 4.4 は実際に製作した筋肉袋である。

(※文責: 泉優香)

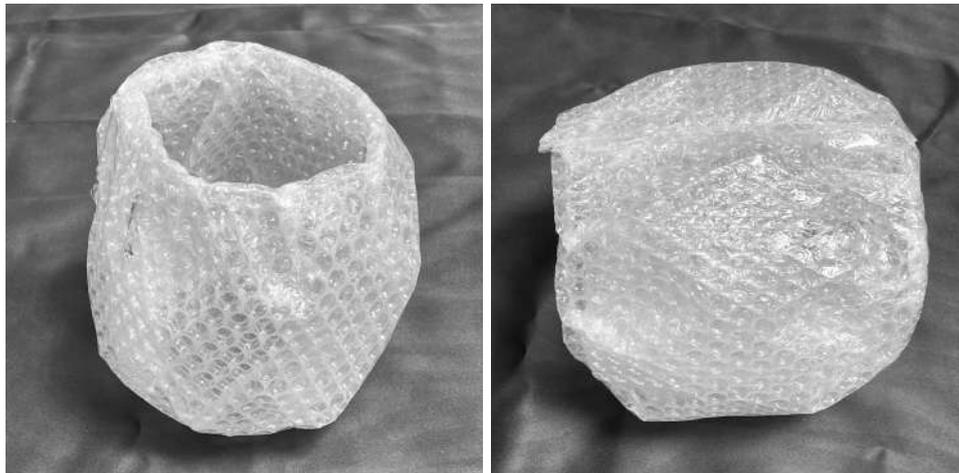


図 4.4 実際に製作した筋肉袋

4.4 実験方法

被験者は健常な 20 代男性 2 名，女性 2 名であり、4 名とも右利きである。前腕の筋肉袋を用いた。前腕の筋電位を測定し，Arduino に測定値を送信する。送信された筋電位が一定値を超えた場合にサーボモータがエアポンプのスイッチを押し，筋肉袋に空気の注入を開始した。被験者はまず筋肉袋を付けていない状態で 5 秒間，握力計で握力を声を出さずに測定した。次に前腕に筋肉袋を装着し，前腕に力を入れた。筋肉袋に空気注入が始まり筋肉袋は膨張した。膨張した前腕の筋肉袋をつけた状態で 5 秒間，握力計で握力を声を出さずに測定した。被験者はこの試行を 1 回行った。

(※文責: 泉優香)

4.5 実験結果

仮説検証を行った。以下の表は被験者が試行を行った結果である。

表 4.1 筋肉袋着用前と膨張後の握力の結果

被験者	筋肉袋着用前 (kg)	筋肉袋膨張後 (kg)
A	25	28
B	37	40
C	25	28
D	25	25.5

この結果から帰無仮説を筋肉袋着用前と筋肉袋膨張後の握力の平均値が 0 とする。有意水準 5 % とし 1 標本を対象とした t 検定を実施した。筋肉袋なしの時， $M = 28$ で筋肉袋ありの時， $M = 30.38$ であった。 $n = 4$ であり $t = -3.8$ であった。 $p = 0.032$ であり t 境界値 = 3.18 であった。1 つの平均値について 1 標本を対象とした t 検定の結果，「筋肉袋の着用なし→筋肉袋の着用あり」の条件では $t > t$ 境界値，また $p < 0.05$ より帰無仮説は棄却された。よって，二つの平均値に有意差が認められるため握力は増幅した。

これにより，「筋肉袋の着用なし→筋肉袋の着用あり」の条件では，身体の疑似的な拡大により

装着者自身の身体に対する視覚的知覚を変化させることができた。しかし、「筋肉袋の着用なし→筋肉袋の着用あり」の条件のみでしか検証していないため、検証する順番による効果を相殺できていない。

(※文責: 泉優香)

4.5.1 前期の成果の評価

筋肉袋を用いることにより、疑似的な筋肉を拡大し、自身の体が拡大したと思わせることができ、筋力が増幅したと考えられる。また、筋肉袋や検証についての問題点も得ることができた。問題点を以下に記述する。

成果物の製作過程において発生した問題について記述する。空気の注入方法に関する問題は以下の通りである。

- エアポンプの空気注入のスピードが遅いので筋肉袋の膨張に時間がかかる
- 後期では前腕以外に上腕、背中、腹筋、胸筋を作る予定なのでエアポンプのホースと前腕の取り外しがしやすいようにテープで止めていたが、空気が接続口から抜ける
- エアポンプのスイッチが小さく、サーボモーターでは押しにくいボタンだったため、スイッチを押せる時と押せない時があった

デザインに関する問題は以下の通りである。

- 筋肉袋の素材は気泡緩衝材を使用しているのを見た目に筋肉感がない

検証の過程において、発生した問題について記述する。検証方法に関する問題は以下の通りである。

- 被験者が少ないので検証データが不十分である
- 検証方法を「筋肉袋の着用なし→筋肉袋の着用あり」でしか検証していないため検証する順番による効果を相殺できていない

検証結果に関する問題は以下の通りである。

- 筋肉袋が膨張したことによって筋肉にかかった圧力と握力の増幅の関係性についての説明がなかった
- t 検定は平均値を対象とした検定手法なので今回の検証結果を求める手法として正しいのか不明である

(※文責: 泉優香)

4.6 前腕の筋肉袋の課題と改善策

前期では上半身の中の前腕の筋肉袋のみの製作だったが、後期では上半身全部の筋肉袋の製作にとりかかる。

成果物の製作過程において、発生した課題と改善策は以下に示す。空気の注入方法に関する課題は以下の通りである。

- エアポンプの空気注入のスピードが遅いので筋肉袋の膨張に時間がかかる
改善策：空気をエアータンクに貯めておき、レギュレーターの空気圧やホースの太さを変え、エアポンプより速い時間で空気を注入できるようにする
- 後期では前腕以外に上腕、背中、腹筋、胸筋を作る予定なのでエアポンプのホースと前腕の取り外しがしやすいようにテープで止めていたが、空気が接続口から抜ける
改善策：エアータンクに対応しているホースの先に分岐用のラインプラーを使用し、それぞれの筋肉袋とホースの接続口を接着剤などで密閉し空気漏れを防ぐ
- エアポンプのスイッチが小さく、サーボモーターでは押しにくいボタンだったため、スイッチを押せる時と押せない時があった
改善策：サーボモーターでスイッチを押すのではなく、電磁バルブを使用し、閾値になったら電磁バルブが自動で開き空気の注入を開始する構造にする

デザインに関する課題は以下の通りである。

- 筋肉袋の材料は気泡緩衝材を使用しているのを見た目に筋肉感がない
改善策：筋肉袋の材料を変更及び筋肉袋の上から服を着用

検証の過程において、発生した課題と改善について以下に示す。検証方法に関する課題は以下の通りである。

- 被験者が少ないので検証データが不十分である
改善策：実験許可をとって被験者を募集し、被験者の人数を増やす
- 検証方法を「筋肉袋の着用なし→筋肉袋の着用あり」でしか検証していないため検証する順番による効果を相殺できていない
改善策：カウンターバランスを考慮し、「筋肉袋の着用なし→筋肉袋の着用あり」と「筋肉袋の着用あり→筋肉袋の着用なし」の2種類の条件を用意し、被験者にランダムに両条件を均等に割り付け検証を行う

検証結果に関する課題は以下の通りである。

- 筋肉袋が膨張したことによって筋肉にかかった圧力と握力の増幅の関係性の説明がなかった
改善策：圧力と力の増幅の関係性についての先行研究を調べ、説明する
- t検定は平均値を対象とした検定手法なので今回の検証結果を求める手法として正しいのかわからない
改善策：多様な分析方法を知り、適切な手法を選択する

(※文責: 泉優香)

4.7 後期の展望

前期は前腕の筋肉袋のみの製作だったが、後期では上半身の筋肉袋の製作を行う。前腕の筋肉袋を製作し、上半身の製作で課題になりうることと改善案を以下に記述する。

- 前腕の筋肉袋が1つに対して筋肉袋が複数になった場合に空気をどのように分けるのか
改善案：ホースの先に分岐用のラインプラーを使用する
- エアータンクの開閉をどのように行うか

改善案：電磁バルブを使用し，制御する

- 筋肉袋の空気をどのように抜くのか

改善案：エアタンク側に繋がっている電磁バルブを外し，筋肉袋側の電磁バルブを開いて空気を抜く

(※文責: 泉優香)

第 5 章 最終成果物

5.1 筋電位計測回路・電極

筋電位計測回路と電極は、前期に製作したものをそのまま使用した。筋電位計測回路の電源として、9V の積層電池を使用した。ただ、筋電位計測回路の動作電圧は 5V であるため、電源と筋電位計測回路の間に DC/DC コンバータを組み込むことによって、電圧を 5V に降圧させて使用した。

(※文責: 古内義久)

5.2 外装部品

5.2.1 電磁バルブ

電磁バルブは、電流の流れを利用してバルブの開閉を制御プログラムによって機械的に制御するバルブである。本グループでは、Arduino で読み取った筋電位信号に基づいて空気の流入を制御するため電磁バルブを使用した。使用した製品は、mumisuto が製造している DC4.5V 駆動の電磁バルブである。

(※文責: 古内義久)

5.2.2 エアサブタンク

エアサブタンクには、一定量の空気を溜め込むことができる。空気を溜めるには別途エアコンプレッサなどの空気を注入できる機械が必要になる。本グループでは、空気を溜め込むだけでなく、空気を再装填せずにデバイスを複数回使用することを想定したため、エアサブタンクを使用した。使用した製品は、ASTRO PRODUCTS が製造している容量 38L, 最大使用圧力 0.78MPa の「04-07968 エアサブタンク」である。

(※文責: 古内義久)

5.2.3 レギュレータ

レギュレータは、空気を一定の圧力に減圧した状態で供給するために空気が流れる経路に接続する機器である。本グループでは、エアサブタンクから放出する空気の圧力を調節するために使用した。使用した製品は、モノタロウが製造している「フィルタレギュレータ オートドレン FR-02A」と、BeHAUS が製造する「レギュレータ T-423」である。

(※文責: 古内義久)

5.2.4 エアソケット・エアプラグ・エアカプラ

エアソケット・エアプラグは、空気が流れる経路内にある部品間の着脱に使用する接続器具である。部品側に設けられているネジ穴やネジに対し、エアソケット・エアプラグのおねじまたはめねじをはめ込むことで装着する。エアカプラは、空気が流れる経路内にある部品とホースの着脱に使用する接続器具である。エアカプラにはオスとメスの2種類存在し、オスのエアカプラはエアプラグと、メスのエアカプラはエアソケットと同様の機能を持つ。本グループでは、エアサブタンクとレギュレータ、電磁バルブの接続のためにエアソケット・エアプラグを使用し、ホースで接続する部分には適宜対応するエアカプラを使用して接続した。今回使用した製品は全てアストロプロダクツが製造している「Rc1/4 メネジ ワンタッチエアソケット」、「R1/4 オネジ ワンタッチエアソケット」、「R1/4 オネジ エアプラグ」、「04-00921 エアカプラー 6.5 φ x10 φ」である。

(※文責: 古内義久)

5.2.5 ニップル・ソケット

ソケットとニップルは配管の際にパイプを直線で繋げるために使われる継手である [10]。電磁バルブのネジ穴が G1/2 であったため、本グループでは G1/2 のネジ穴を R 及び Rc1/4 へ変換するために使用した。使用した製品は、SANEI が製造している「オスメスニップル T253-2-13」と、エスコが製造している「Rc1/2 × Rc1/4 異径ソケット EA469AB-304AA」である。

(※文責: 古内義久)

5.3 3D モデリングソフトを用いた最終成果物の設計

5.3.1 3D モデリング

3D モデリングとは、三次元のオブジェクトまたは形状の数学的表現をソフトウェアを使って製作するプロセスのことである。作製されたオブジェクトは 3D モデルと呼ばれ、映画やテレビ、ビデオゲーム、建築、建設、製品開発、科学、医療といった業界で 3D モデルを視覚化、シミュレーション、レンダリングイメージの作成に使用されている [11]。

本グループではシリコンゴムを成型するための型の設計に、3D モデリングソフトである Fusion360 を使用した。Fusion360 は、CAD、CAM、CAE、PCB ソフトウェアを搭載した製品開発クラウドプラットフォームである。

(※文責: 横谷汐美)

5.3.2 3D プリンタ

3D モデリングを行った後、3D プリンタを用いて筋肉袋の型の印刷を行った。3D プリンタとは、3DCAD や 3DCG などで作成した設計データをもとにして、断面形状の層を積み上げていくことで立体的なモデルを製作する機械のことである。3D プリンタには複数の造形方式が存在し、その中のひとつに熱溶解積層方式がある。この方式では、熱可塑性樹脂を溶かし、ノズルから出力

させながら一層ずつ積み上げて造形する。ABS樹脂などの材料を使用できることで強度の高い造形物を作れる、加工しやすいなどの特徴がある。

本グループでは大学の工房にある Zortrax M200 Plus V2 という熱溶解積層方式の 3D プリンタを用いた。ABS 系樹脂は熱収縮が大きく、本来造形が難しいが本プリンタは特殊な穴あきプラットフォームを用いているため、接着剤を使用する必要がない [12]。また、フィラメントは、Zortrax M200 プリンタ専用の Z-ABS(V1) を使用した。

(※文責: 横谷汐美)

5.4 筋肉袋の構造

上半身の筋肉を再現するために、胸部、腹部、背部、上腕部、前腕部にあたる筋肉袋を製作した。筋肉袋の素材にはシリコンゴムを用いた。シリコンゴムを使用した理由は、以下の 3 点である。

- 伸縮性があり、空気を注入した際に大きく膨張する
- 厚さの調整ができるため、膨張した際の形状を調節しやすい
- 硬化前は液体であるため、自由に成型できる

シリコンゴムを成型するために、型を 3D プリンタ及びアクリル板で製作した。上腕及び前腕の型は複雑な構造であったため、3D プリンタで製作した。図 5.1 は Fusion360 で設計した上腕部の型である。その他の部位の型は製作時間短縮のためアクリル板で製作した。設計をする際には、空気の注入時に筋肉袋の形状が大きく変わることを考慮し、上から服を着たときに自然な筋肉に見えるよう工夫した。エアタンクと筋肉袋の接続にはポリウレタンホースを用いた。各部位の筋肉袋にそれぞれ 1.5m のポリウレタンホースを接続し、エアタンクの近くであれば自由に身体を動かすことができるようにした。しかし、ポリウレタンホースとシリコンゴムの接着後、空気を注入したり持ち歩いたりした際に簡単に剥離したため空気漏れが発生した。そのため、筋肉袋にはポリエチレンホースを接着し、ポリプロピレンのチューブ用プラグでポリウレタンホースと接続した。

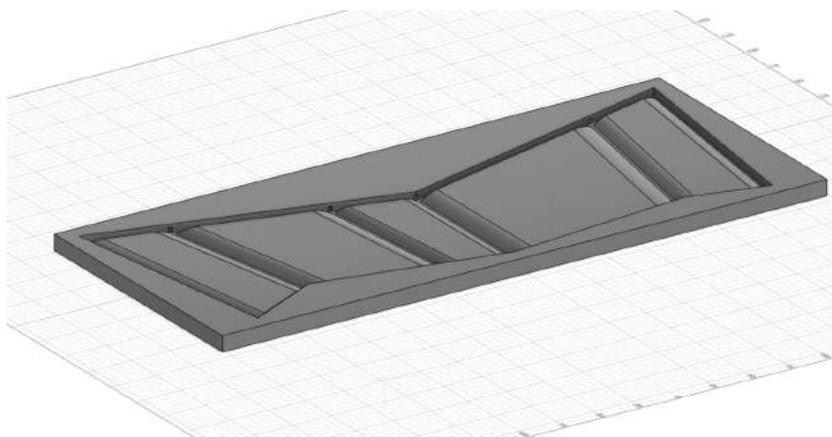


図 5.1 上腕部の 3D モデリング

筋肉袋の膨らみ方を調節するために、シリコンゴムの厚さを調整した。筋肉袋は全て、身体に触れる側を膨らみづらくするために厚くし、身体に触れない側を膨らみやすいように薄くした。以降、身体に触れる側を内側、触れない側を外側と記述する。

それぞれの部位の筋肉袋の厚さと工夫点を以下に示す。

- 胸部

- 内側：4 mm，外側：2 mm
- 筋肉質な人間の身体は逆三角形であり，製作する筋肉袋の中では胸部が最も膨らむ必要があるため，最も薄い構造とした．図 5.2 は左胸の筋肉袋と膨張前後である．



図 5.2 胸部の筋肉袋

- 腹部

- 内側：13 mm，外側：8 mm
- シックスパックを表現した．初回の試作では，内側は 5 mm の平面，外側は 2 mm の平面に 3 mm の壁を合わせたものを製作した．壁の幅は 0.5 mm で，6 個の空間ができる．壁には空気の通り道を開け，どれか 1 個の空間に空気を注入すれば，6 個の空間全てに空気が入る構造である．しかし，他の筋肉袋よりも容積が小さく，空気を注入できる限界量が少なかったため，壁の接着部分に必要な以上に負荷がかかる問題が発生した．試作品を複数製作したが，初回の試作品と同じ型を使用することに限界があったため，二つ目の型を製作した．その際，容積と壁の接着面積を増やした．内側に 5 mm の壁を作り，外側には内側の壁と同じ形の 2 mm のくぼみを作った．加えて，壁の幅を 1 mm にすることで接着面積を増やし，負荷を減らした．図 5.3 は二つ目の型で成型した腹部の筋肉袋であり，右側の図は膨張後である．

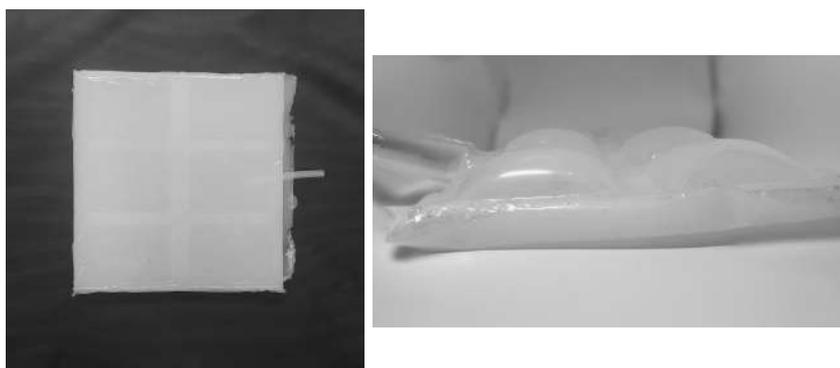


図 5.3 腹部の筋肉袋

- 背部

- 内側：4 mm，外側：2～4 mm
- 逆三角形の体格を再現するために，上から下にかけて厚さを 2 mm から 4 mm に変化させ，上部がより大きく膨らむようにした．図 5.4 は左右あるうち右側の筋肉袋と膨張前後である．

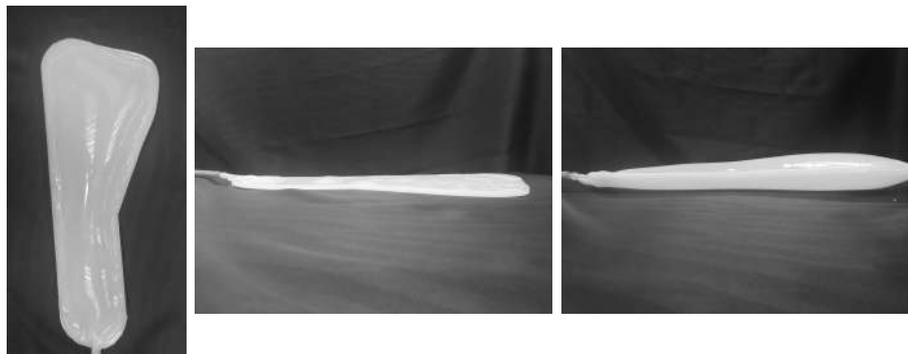


図 5.4 背部の筋肉袋

- 上腕部・前腕部

- 内側：5 mm，外側：4 mm

- 鍛えられた腕部の筋肉を再現する際，最も効果的な膨らみ方にするために実際の筋肉のスケッチを描き，様々な角度から撮影された筋肉質な人間の腕部を観察した．その結果，最も目立たせる筋肉を，上腕部の場合は上腕二頭筋，前腕部の場合は腕橈骨筋とした．筋肉袋の最も大きな空間はそれらの筋肉にあたる部分である．また，前腕部の筋肉袋は上腕部の筋肉袋の両端の空間を除いたものである．筋肉袋のそれぞれの空間を隔てる壁には空気の通り道を作った．また，腕に装着するために，左右端に長さ調節が可能なベルトを追加した．図 5.5 は 3D プリンタで印刷した腕部の型と，実際に上腕に筋肉袋を装着した図である．

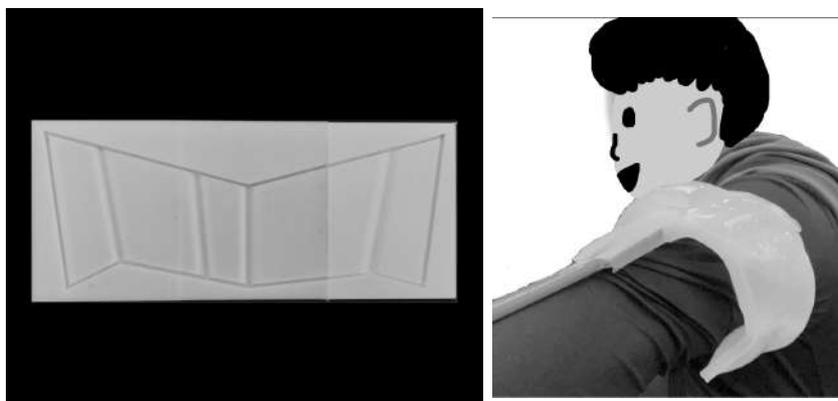


図 5.5 上腕部の筋肉袋

(※文責: 横谷汐美)

5.5 筋肉スーツの構造

筋肉袋を入れるための筋肉スーツを製作した．図 5.6，図 5.7 のように中に着るのをインナー，図 5.8 のように外に着るものをアウターとした．



図 5.6 筋肉スーツインナー正面



図 5.7 筋肉スーツインナー背面



図 5.8 筋肉スーツアウター背面

5.5.1 筋肉スーツ（インナー）

筋肉袋を入れるために以下の 4 点を工夫した。

- 実際の筋肉に近づけるためのリアル感
- 装着のやりやすさ
- サイズ調整のしやすさ
- 服の伸びやすさ

腹筋と背筋の下部分の筋肉袋を入れるために筋肉スーツのインナーを製作した。筋肉袋の製作の際に使用したシリコンゴムはシリコンゴムでしか接着できないため、直接筋肉袋を加工して、服に付けることが難しかった。そのため、筋肉袋を加工しなくてもよいポケットの構造にした。筋肉袋をポケットの中に入れる際に膨らむ事を考慮し、大きめのポケットにしたところたるんでしまい、リアル感がなくなってしまった。そのため、筋肉袋と同じサイズのポケットにし、たるまないようにした。また、ポケットの中の筋肉袋が膨らみやすいように服は伸びやすい素材にした。

- 腹筋部における筋肉袋の配置

腹筋の筋肉袋は図 5.9 のように横にホースがついている。そのため、横にホースを出す部分を作らないといけないので図 5.10 のように下から 1/3 のところまで縫い、上から 1/3 のところはスナップボタンを 3 個つけ、ホースが出る部分を確保した。



図 5.9 腹筋の筋肉袋



図 5.10 腹筋の筋肉袋を入れるためのポケット

- 背筋部における筋肉袋の配置

背筋の筋肉袋は図 5.11 のように下にホースがついている。そのため、下にホースを出す部分を作らないといけなないので下の部分は縫わず、空洞のままにした。また、アップリフトをつけるので、背筋部分を上まで縫ってしまうとアップリフトの下に背筋の筋肉袋がきてしまうので、図 5.12 のように背筋の筋肉袋の下から半分までを縫い、上の背筋の筋肉袋は図 5.13 のようにアップリフトの上にくるようにした。背筋の筋肉袋のポケットとアップリフトはスナップボタンで固定した。スナップボタンで固定する際に、筋肉袋を入れたポケットがたるまないように背筋の筋肉袋の形に沿ってスナップボタンをつけた。



図 5.11 背筋の筋肉袋



図 5.12 背筋の筋肉袋のポケット



図 5.13 背筋の筋肉袋のポケットとアップリフト

(※文責: 泉優香)

5.5.2 筋肉スーツ (アップリフト)

胸筋の筋肉袋を入れるためにアップリフトを製作した。胸筋の筋肉袋を入れたまま着用してもらうため、アップリフトの構造にした。胸筋は図 5.14 のように斜めのところにホースがついている。

そのため、斜めのところにホースを出す部分を作らないといけないので斜めの部分は縫わず、空洞のままにした。胸筋の筋肉袋のポケットの上の部分を開けたままにすると筋肉袋をポケットの中に入れた際にたるんでしまうのでスナップボタンで留め、たるまないようにした。また、図 5.15 のようにアップリフトはサイズ調節しやすいように後ろをコルセットのように紐で調節できるようにした。ポケットの下に紐を通すことによって腹筋と胸筋の境目をはっきりさせ、リアル感を追求した。

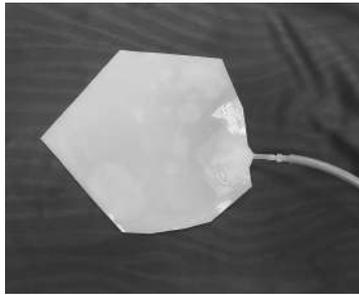


図 5.14 右胸の筋肉袋



図 5.15 筋肉スーツのアップリフト正面



図 5.16 筋肉スーツのアップリフト背面

5.5.3 筋肉スーツ（アウター）

筋肉スーツのインナーのみだと縫い目や、紐が見えてしまうため、筋肉スーツのインナーの上に着る、筋肉スーツのアウターを製作した。筋肉スーツのインナーの上に着るので筋肉スーツのインナーより1サイズ大きいサイズにした。図 5.17 は上腕の筋肉袋のホースを通すために製作した穴である。筋肉スーツのアウターを着る際に上腕をつけて無理やり着てしまうと、上腕の筋肉袋とホースのつながり目が壊れ、空気が漏れる可能性があった。そのため、上腕のホースを通す穴を製作した。



図 5.17 上腕部分のホース用の穴

図 5.18 はアップリフトと同様にサイズ調節しやすいよう、コルセットのように紐で調節できるようにした前腕の筋肉スーツのアウトター部分である。筋肉スーツのアウトターに用いた服は前腕の幅が狭く、前腕の筋肉袋をつける人によって入らないという問題があった。また、電極を正確な位置に貼った後にはずれるのを防止するため、筋肉スーツのアウトターを着た後に電極を貼り、その後に前腕の筋肉袋をつけることが良いと考えた。しかし、筋肉スーツのアウトターに用いた服の袖の幅が狭く前腕の筋肉袋をつけた後に前腕の筋肉袋の上から筋肉スーツのアウトターを被せることが出来ないという問題もあった。そのため、前腕の筋肉袋をつける人によって入らないという問題と前腕の筋肉袋をつけた後に前腕の筋肉袋の上から筋肉スーツのアウトターを被せることが出来ないという問題を解決するために、コルセットのように紐で調節できるようにした。



図 5.18 前腕部分の筋肉スーツのアウトター

(※文責: 泉優香)

5.6 筋肉スーツの構造

デバイス装着者の前腕に筋電位計測するための電極を貼りつける。電極は前腕の伸筋群に計 2 か所に貼りつける。電極と表面筋電位計測回路から、デバイス装着者が前腕に力を入れた際に、筋電位を計測する。計測した筋電位を Arduino を用いてデジタル信号に変換し、一定値以上の筋電位が計測された場合に、Arduino から電磁バルブに電気信号を送る。Arduino から電気信号を送られた電磁バルブは 2.5 秒開く設定にした。電磁バルブが開くとエアサブタンクの中に入っている空気が筋肉袋に一気に流れ込み、筋肉袋が膨張する。筋肉袋に空気が流れる際に、レギュレータを使用し、エアサブタンクから放出する空気の圧力を調節し、筋肉袋が膨張しすぎることを防止した。本グループでは、パンプアップ現象を筋肉袋が膨張することで表現した。実際のパンプアップの持続時間は 10～20 分であり、筋肉袋が膨らんだ後に行う実験は 20 分未満を想定していた、そのため、膨張後はホースを外すまで膨張した状態が維持されるようにした。これらの流れは図 5.19 になる。

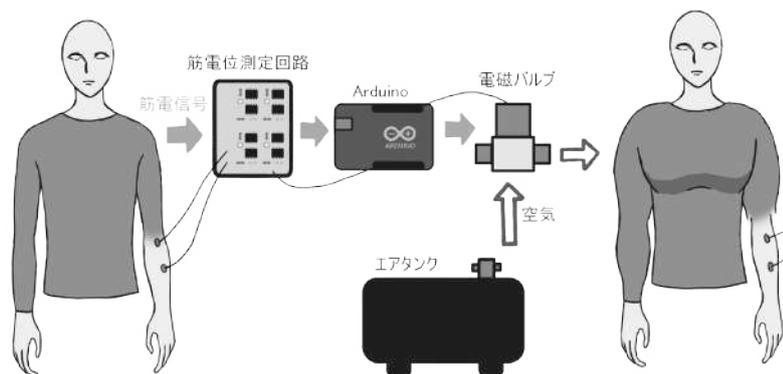


図 5.19 筋肉スーツの動作機構

(※文責: 泉優香)

第 6 章 評価実験

6.1 実験準備

6.1.1 作業課題の設定

評価実験に際して、本グループは筋肉スーツによる視覚的知覚の変化によって力の出力が増幅すること数値として示すため、筋肉スーツの着用ありとなしの力の出力が変化しているのかを確かめる必要があると考えられる。そこで課題として、筋肉スーツの着用ありとなしで握力測定を行うことを設定した。課題を握力測定に設定したのは二つの理由がある。一つ目は、出力された力が数値で得られるためである。二つ目は、握力測定は被験者が行った経験がある可能性があり、測定の説明が簡単であり、被験者が行いやすいと考えたからである。握力測定を行う際、被験者は利き手で 5 秒間声を出さずに測定することを条件として統一した。その課題を筋肉スーツ着用なしとありの時にそれぞれ 1 試行行った。

(※文責: 高橋稜)

6.1.2 意見調査の設定

評価実験に際して、本グループは筋肉スーツによる視覚的知覚の変化によって心境に変化があるのかを示すため、筋肉スーツ着用有無で力が出せる気がするのか、出せない気がするのかを確かめる必要があった。そこで調査として、筋肉スーツ着用有無で力が出せる気がしたのか、出せない気がしたのかを 7 段階で評価するアンケートを意見調査として作業課題終了後に行うことを設定した。

(※文責: 高橋稜)

6.2 本実験の目的

本実験では、製作した筋肉スーツを用いて被験者に視覚的知覚の変化を与えることにより、力の出力が増幅し、心境に変化があったのか確かめることが目的である。

(※文責: 高橋稜)

6.3 実験方法

被験者は健常な男性 (20 歳～24 歳)7 名と健常な女性 (19 歳～21 歳)7 名をランダムにグループ A, B の二つのグループに分けて実験を行った。グループ A では筋肉スーツ着用なし、ありの順番で握力測定を行い、その後筋肉スーツ着用有無で力が出せる気がしたのか、出せない気がしたのかを 7 段階で評価するアンケートを行う。グループ B ではグループ A とは異なり、筋肉スーツ着用あり、なしの順番で握力測定を行い、その後グループ A と同様のアンケートを行った。

6.3.1 分析方法

前期の課題として分析方法の再検討が挙げられていた。そこでt検定について詳しく調べた。t検定は、一般的に、条件の異なる2つの群において、それぞれの群の平均値の間の差が統計的に有意なものなのかを判定する手段のことである。t検定には以下の3つの種類がある。

- スチューデントのt検定（対応なし）
スチューデントのt検定は、対応のないt検定である。この対応がないとは、異なる2つの群団から得られたデータを比較することを指している。例えば、A中学校とB中学校の学力の差を検討する場合は、対応のないデータである。このt検定は、2つの母集団の分散が等しいと仮定できる時に実施する。
- ウェルチのt検定（対応なし）
ウェルチのt検定も対応のないt検定である。このt検定は、2つのデータ群の母分散が等しいとは限らない時に実施する。
- 対応のあるt検定
対応のあるt検定は同一の被検者から得られる1回目と2回目の結果を比較する時に実施する。

本グループは、同一の被検者から得られる1回目と2回目の結果を比較するので対応のあるt検定をRを用いて実施した。t検定を実施する前にF検定を実施し、2つの平均値のデータのばらつきについて、不適切な差があるかを確認した。分析結果より、 $p=0.894$ の値が得られ、等分散性が確認された。そのため、「対応のあるt検定」が適切である。

(※文責: 横谷汐美)

6.4 実験結果

6.4.1 作業課題の結果

各被験者に対して筋肉スーツの着用が無い状態での測定値を基準値とし、筋肉スーツを着用した状態での測定値を基準値と比較した。その測定値が基準値よりも高ければ握力は増加、低ければ握力は減少、同値であれば変化なしとした。結果は6名の握力が増加、5名の握力が減少、3名は握力に変化が見られなかった。図6.1に筋肉スーツの着用有無について握力を比較をしたグラフを示す。横軸に着用の無い状態での測定値、縦軸に着用の有る状態での測定値をとり、縦軸と横軸が同値となる場所に直線を引いた。

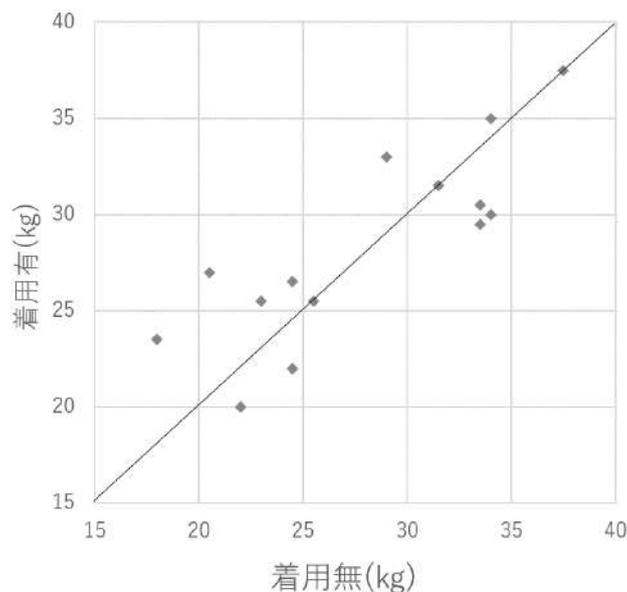


図 6.1 着用有無の握力の変化

また、測定値を基に筋肉スーツの着用有無に関する握力に対して t 検定を行った。帰無仮説を「筋肉スーツの着用有無による握力の測定値に有意差がない」と設定し、 $p < 0.05$ で帰無仮説を棄却することとした。結果、 $p = 0.64$ で $p > 0.05$ となったため帰無仮説は棄却されず、筋肉スーツ着用有無について握力に有意差は見られないことが分かった。

(※文責: 古内義久)

6.4.2 意見調査の結果

アンケートの結果、2 と答えた人が 1 人、3 と答えた人が 1 人、4 と答えた人が 2 人、5 と答えた人が 5 人、6 と答えた人が 3 人、7 と答えた人が 2 人であった。以下に、アンケートの回答についてのヒストグラムを示す。

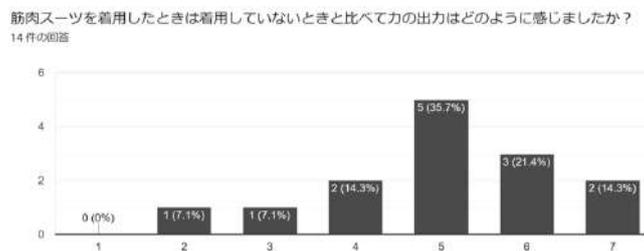


図 6.2 アンケート結果

また、アンケートの平均値は 5 であったため、筋肉スーツを着用した際は筋肉スーツを着用していない場合よりも、やや力を出せそうに感じる傾向があることが分かった。

(※文責: 古内義久)

6.4.3 全体の結果

アンケートの回答値と筋肉スーツの着用有無による握力の増減値に対して相関係数を求めたところ、 $r = 0.33$ となったため、この2つの間に弱い正の相関があることが分かった。以下にアンケートの結果と筋肉スーツの着用有無による握力の増減値の関係を描画したグラフを示す。横軸にアンケートの回答値、縦軸に握力の増減値をとり、傾きが相関係数となる回帰直線を引いた。

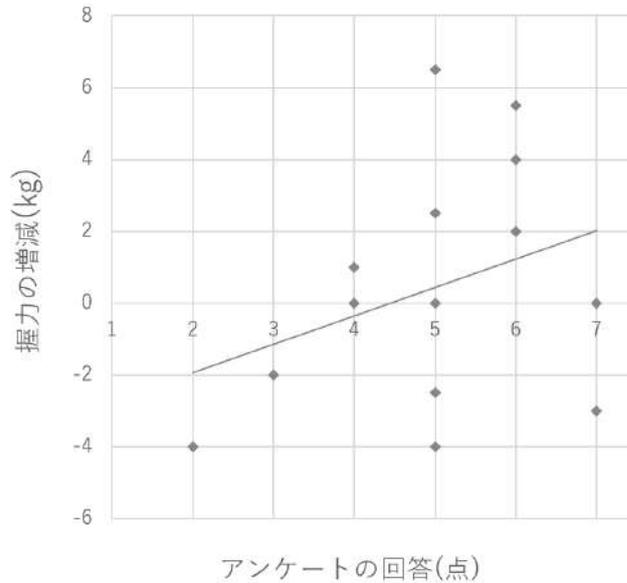


図 6.3 アンケート結果と握力の増減

(※文責: 古内義久)

6.5 考察

6.5.1 アンケート結果と握力の増減値の相関について

アンケートの結果と筋肉スーツの着用有無による握力の増減値に正の相関が見られているが、本グループはこの2つの間には相関はほぼ無いと考える。理由として、t検定によって筋肉スーツの着用有無による握力の増減値に有意差がないことが判明していることと、相関が弱いことの2点が挙げられる。

6.5.2 筋肉スーツの着用有無に有意差が見られなかったことについて

筋肉スーツの着用有無について有意差が見られなかったことについて、握力測定の方法に原因の1つがあったと考える。握力が下がった被験者5名のうち3名が、筋肉スーツ着用時の握力測定終了後に「手が滑った」という旨の感想を述べていた。実験に使用した握力計はABS素材のプラスチック製であり、滑り止めの措置などは設けていなかった。そのうえ、被験者の手汗についても考慮していなかったため、手が滑るという事象が発生したと考えられる。今回は条件に変更を加えないために、握力計には実験終了まで何も対処を行わなかった。今後、同様の測定を行う場合には、測定器具と測定対象の間で不必要な要因が発生しないよう対策を施す必要がある。そして、本来得

られるはずの測定値が変化しないよう努める必要があると考える。別の原因としては、筋肉スーツの装着者の身体の状態と筋肉スーツの状態に齟齬が生じていたことが考えられる。本グループが制作した筋肉袋には収縮機能がなく、膨張後はホースを外すまで膨張した状態が維持されるようになっていた。そのため、筋肉袋の膨張後は装着者が力を入れていなくとも膨張したままであった。よって、装着者の身体の状態と筋肉スーツの状態に齟齬が発生する可能性が十分に存在し、我々が想定していた視覚的知覚の変化とは別の変化が装着者に発生していた可能性が高い。この齟齬によって、本来は装着者に与えたかった変化を与えることができていなかった可能性があるため、装着者の身体の状態と筋肉スーツの状態に齟齬が生じていたことが、握力の増加しなかった原因の1つと考えられる。

6.5.3 プロテウス効果との関連性とその調査について

仮に、装着者の身体の状態と筋肉スーツの状態に齟齬が発生していたとしても、アンケートの回答から筋肉スーツを着用した際には多少なりとも力を出せそうに感じる傾向があることが分かっている。そして、この齟齬が生じている状態は、角田ら [8] と石川ら [9] の実験でのプロテウス効果を発生させた状態と相似している。本グループの実験で、被験者は筋肉スーツの着用により、普段の自身の外見と異なる外見に変化した。齟齬が生じている可能性があるのに力を出せそうに感じることから、被験者に対してプロテウス効果における心理状態への影響と似た効果が生じた可能性がある。我々はアンケートに筋肉スーツの着用感についての項目を設けていなかったため、装着者が筋肉スーツに対してどのような認識だったのか、筋肉スーツとの一体感や筋肉スーツへの没入感が存在していたのか分からない。しかし、装着者に対して高揚感を与えられたことが分かった。この高揚感がプロテウス効果と同様の効果から生じているとすれば、角田らが観測した重量知覚の変化 [8] や、石川らが観測した疲労感の低減 [9] を同様に観測できることが考えられる。今回は筋出力の変化についてのみ検証を行ったため、握力測定以外の実験を行わなかった。筋出力の変化が見られなかったことに対する原因の調査をするためには、生じている高揚感がプロテウス効果と同様の効果から生じているのかを検証する必要があると考える。プロテウス効果と同様の効果から生じたのであれば、装着者は筋肉スーツに対して没入感を抱いていたと考えられる。しかし、装着者の筋肉の状態と筋肉スーツの状態に齟齬が生じていたため、筋出力が増加しなかったと予想される。一方、プロテウス効果と同様の効果から生じていない場合、装着者は筋肉スーツに対して没入感を抱いていなかったと考えられる。そのため、自身の身体に関する変化を感じておらず、筋出力が増加しなかったと予想される。いずれにせよ、検証を行うことで装着者と筋肉スーツの間のどの部分に齟齬が生じているかを明確にすることができる。よって、筋出力の変化が見られなかった原因の調査にはプロテウス効果を観測した際の実験と同様の実験を行い、プロテウス効果と同様の効果の有無について検証する必要があると考える。

プロテウス効果を観測した際の実験と同様の実験の例として、ラット・プルダウンを使用した主観的疲労感の測定を挙げる。重量知覚に対する影響の検証については角田らが行ったダンベルを使用した実験 [8] を基に、カウンターバランスを考慮したうえで筋肉スーツの着用有無によって検証することができる。ただ、主観的疲労感の測定については、石川らが行ったスクワットを行う実験 [9] を基に行う検証のみでは妥当な判断を下すのは難しいことが考えられる。その理由は2つある。1つは、スクワットで鍛えられる部位と我々が製作した筋肉スーツの膨張部位がほとんど関係していないからである。スクワットは主に脚や大腿部など、下半身に対して効果のある運動である。そのため、握力を含め上半身の筋出力向上を目指した本グループの筋肉スーツとは効果を及ぼす部位

に食い違いが生じる。もう1つの理由は、スクワット運動において筋肉スーツが装着者に対して1種のおもりとして機能してしまう可能性があるためである。本グループが製作した筋肉スーツは上半身のみである。筋肉スーツ装着者の全身のバランスを考えると、装着によって上半身だけが若干重くなることが分かる。若干重くなると言っても、複数回のスクワット運動を行うことを踏まえると、一定回数を越えたところで筋肉スーツが装着者に対して負担となり、結果としておりのように機能する可能性が出てくる。そうなった場合、検証結果の要因が不明瞭になってしまう。そのため、この実験の代わりとなる実験か、この実験に加えて別の「同様の実験」を行う必要があると考える。この1つとしてラット・プルダウンの使用が効果的だと考える。ラット・プルダウンは、定滑車に繋がれたバーを座った状態で上から下へ引っ張る運動である [13]。バーの反対側には錘がついており、錘の重量を調整することで負荷を調整することができる。この運動で鍛えられる部位は腕と背中であり、我々が製作した筋肉スーツの膨張部とも一致する。加えて、スクワット運動のように回数が1つの指標となるため、回数による主観的疲労感の測定を行いやすい。そのうえ、スクワット運動と違って座りながらの運動であるため、筋肉スーツが装着者への負荷になる可能性を減らせることが考えられる。以上の理由から、主観的疲労感の測定が効果的であると考えたため、プロテウス効果を観測した際の実験と同様の実験の例として挙げた。

6.5.4 筋電位と高揚感の関係性について

筋電位の利用が被験者に対して高揚感を生じさせる役割を担ったかどうか、検証の余地があると考えられる。今回、筋肉スーツによる身体の疑似的な拡大の開始には、装着者が腕の筋肉を一定時間収縮させることを条件として設定していた。つまり、装着者が腕に力を入れたことに対する応答として筋肉スーツが膨張する仕組みとなっており、これは筋電位による一種のスイッチとして考えることができる。本グループでは、筋電位信号を利用することで、筋収縮に対する膨張の表現と筋肉スーツへの没入感を生じさせることが可能であると考えていた。しかし、筋肉スーツと被験者の間には齟齬が生じていたため、没入感の発生に筋電位信号が関わっていなかった可能性が考えられる。そのため、筋電位制御以外にもスイッチ制御や脈拍での制御などを試して、筋電位の利用が筋肉スーツの制御として有用だったのかを調べる必要がある。そして、その検証を踏まえて、筋電位の扱いと筋肉スーツへの筋収縮の状態の反映方法について再考する必要があると考える。

6.5.5 筋出力増加の検証について

今回、本グループでは握力測定以外の筋出力増加の検証を行っていなかった。1つの検証のみで筋出力増加の有無を判断したが、他の検証と併せることで総合的に判断をすることができた可能性がある。前期では腕部の筋肉袋のみを製作していたため、握力測定で使用する筋肉と膨張させる筋肉が対応していた。そのため前期で行った仮説検証には問題はないと考えられる。ただ、後期では上半身全体の筋肉を膨張させたため、握力測定以外にも上半身を動かす運動であれば、膨張させる筋肉と使用する筋肉は概ね対応していたことが予想される。つまり握力以外の指標を用いても判断ができた可能性がある。例えば、ダンベルを上下させる運動を行い、その秒数を計測し、筋肉スーツの着用有無で秒数の比較を行うこともできたはずである。また、上半身のどこかを動かす運動であれば、一定時間内に行えた回数を筋肉スーツの着用有無で比較を行うこともできたはずである。ただ、6.5.3で述べたように、筋肉スーツが装着者に対して負担とならないように考慮する必要があるが、様々な検証を行える可能性は充分にあったと考えられる。今後、筋出力の検証方法について、何を行うことが適切か不適切か、どの指標を用いて筋出力増加の有無をどう判断するかを議論

する必要があると考える。

(※文責: 古内義久)

第7章 結論

7.1 本グループの成果

本グループは、「デバイス装着者の身体を疑似的に拡大し、装着者の身体に対する視覚的知覚を変化させることで筋出力を自身の持つ最大値以内で増幅させるデバイスの製作」を目的として活動を行った。この目的を達成するために、本グループでは1.1節に挙げた先行研究を参考にして、身体を疑似的に拡大する筋肉スーツの製作を行った。得られた成果として、筋肉スーツによる視覚的知覚の変化によって実際に力の出力は増幅しなかったが、筋出力が増加している気持ちにすることができたというアンケート結果が得られた。

(※文責: 泉優香)

7.2 最終成果物の課題と改善策

後期では上半身の筋肉袋を製作した。

成果物の製作過程において発生した問題について記述する。筋肉袋に関する課題と解決策は以下の通りである。

- 筋肉袋とポリプロピレンのチューブ用プラグのつなぎ目から空気が漏れる
改善策：筋肉袋の型を作る際に、ポリプロピレンチューブ用プラグを入れる部分もつくり、一緒に固める
- 腕の筋肉袋を固定するベルトを筋肉袋を張り合わせているところに入れているので空気が漏れる
改善策：腕の固定方法を筋肉袋を張り合わせているところに入れるのではなく外側に付ける

筋肉スーツに関する課題と解決策は以下の通りである。

- 筋肉スーツの着脱に時間がかかる
改善策：筋肉袋を筋肉スーツのポケットに入れた状態で着れるようにアップリフトの構造ではなく、図7.1のように背中部分にチャックを付け、筋肉袋を筋肉スーツのポケットに入れる時間を短縮する

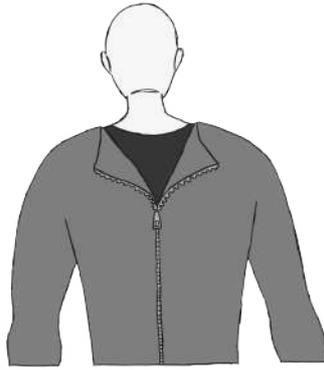


図 7.1 背中部分のチャック

- 腹筋をシックスパックにしたが服の上からは伝わりづらい
改善策：筋肉スーツの構造が腹筋の筋肉袋の上に服を二枚着ている状態なので、一枚に減らすか、スポーツ選手が着ているコンプレッションウェアのようにピタッとする素材にする。または、腹筋の肥大をより過大に表現する
- 筋肉袋を膨らませると太った人ようになる
改善策：紐やチューブを使用し、血管など細部まで表現する。また、胸筋と腹筋の間を締めるなど、筋肉スーツのアウトターを加工し、膨らんでいる部分と膨らんでいない部分でメリハリを付ける
- 筋肉スーツからホースをだしてしまい、リアル感がなくなる
改善策：筋肉スーツのアウトターの中からホースを出す構造にする

制御に関する課題と解決策は以下の通りである。

- 一度膨らませたらその後、力を抜いても膨らんでいる
改善策：閾値に達していないときに筋肉袋に入っていた空気が戻る設計にする

実験の過程において、発生した課題と改善について以下に示す。実験方法に関する課題と解決策は以下の通りである。

- 筋肉スーツを着た際、腕を下に伸ばした状態で手首しか動かすことが出来ず、可動範囲が狭い
改善策：図 7.2 のように腕の曲げ伸ばしなどが出来るように電極を伸ばす

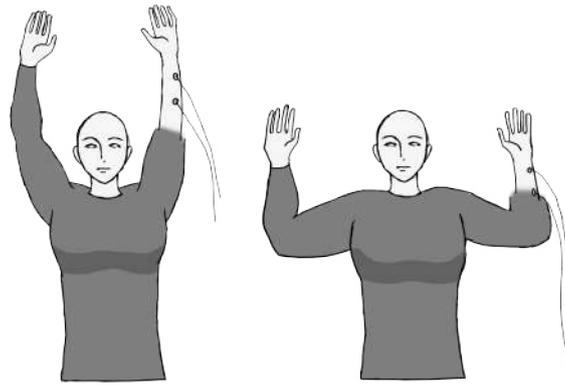


図 7.2 電極をつけて出来る動き

- 筋肉スーツを着た時、暑く手汗をかき、握力計が滑った
改善策：筋肉スーツを着る時にかかる時間を短縮する。また、握力計に滑り止めをつける
- 膨らんでいる様子をパソコンのカメラでディスプレイに映したときに、歪みや画質の粗さなどがあった
改善策：カメラから全身鏡に変える

(※文責: 泉優香)

7.3 今後の展望

筋肉スーツのアウターを加工し、膨らんでいる部分と膨らんでいない部分でメリハリを付けることや、血管が浮き出すように細部まで表現することで、より実際の筋肉に似た膨張・拡大を表現することが出来ると考える。また、動作機構を実際の筋肉の膨張・拡大の感覚に近づけるため、力を入れている時だけ膨らむ設定にすることなどを検討する必要がある。

また、本実験では筋肉スーツを着用し、実際に筋力が増加した結果は得られなかったが、装着者に対して高揚感を与えられ、プロテウス効果と似た効果が得られた。そのため、得られた効果はプロテウス効果と同様の効果なのかを確かめる実験を行うべきである。先行研究で行っていた、主観的疲労感の評価の変化 [9] と重量知覚に対する影響 [8] を実験で調査したいと考える。例えば、主観的疲労感の評価の変化の調査方法には、筋肉トレーニングの器械であるラット・プルダウンを使用し、カウンターバランスを考慮した上で、筋肉スーツの有無による疲労の感じ方のアンケートの実施が挙げられる。重量知覚に対する影響の調査方法には、ダンベルを使用し、カウンターバランスを考慮した上で、筋肉スーツの有無による重量知覚の感じ方のアンケートの実施が挙げられる。このような、プロテウス効果と同様の効果だと示唆するために実験の実施が必要である。

(※文責: 泉優香)

第 8 章 中間発表会についてのフィードバック

8.1 中間発表会

2023 年 7 月 7 日に、2023 年度プロジェクト学習の中間発表会が行われた。まず初めに、スライドによって簡単な概要の説明、筋肉袋の動作機構・膨張機能、仮説検証の説明を行った。その後質疑応答を行った。発表後、聴衆が、本プロジェクトの発表技術や発表内容についての評価した。集計した結果、本プロジェクトの総評価者数は 42 名であった。発表技術についての評価の平均点は 10 点満点中 7.7 点であり、発表内容についての評価の平均点は 8.5 点であった。また、グループ B の発表に関して評価者からコメントを評価された点と指摘された点に分けて以下に示す。

(※文責: 高橋稜)

8.2 評価された点

中間発表会において、評価者から挙げられた良かった点を以下に示す。

- アイデアの着目点がおもしろいと思った。
- 先行研究から仮説を立てて検証することがよいと感じた。
- スライドがまとまっていて見やすかった。

(※文責: 高橋稜)

8.3 指摘された点

中間発表会において、評価者から挙げられた悪かった点を以下に示す。人体の反応の調査や実験方法の検討をしっかりとった方がよい。具体的な今後の目標がなかった。

- 人体の反応の調査や実験方法の検討をしっかりとった方がよい。
- 具体的な今後の目標がなかった。

(※文責: 高橋稜)

第 9 章 成果発表会についてのフィードバック

9.1 成果発表会

2023 年 12 月 8 日に、2023 年度プロジェクト学習の成果発表会が行われた。スライドによって、概要、筋肉袋及び筋肉スーツ、実験とその結果の説明を行った。その後、実演と質疑応答を行った。発表後、聴衆によって本プロジェクトの発表技術とプロジェクト内容の評価がなされた。集計した結果、発表技術の評価の平均点は 10 点満点中 8.6 点であり、プロジェクト内容の評価の平均点は 10 点満点中 8.9 点であった。また、グループ B の発表に関して評価者からのコメントを評価された点と指摘された点に分けて以下に示す。

(※文責: 横谷汐美)

9.2 評価された点

成果発表会において、評価者から挙げられた良かった点を以下に示す。

- 着眼点や発想が面白い。
- 結論まで辿り着いていて良い。
- 発表会での実演があって成果物がどのようなものかわかりやすい。
- 良い方法で実験が行われていた。
- 用語は難しいが活動内容はわかりやすかった。
- スライドでの説明の段取りがちゃんとしててわかりやすい。
- 参考文献が示されており、説得力があった。

(※文責: 横谷汐美)

9.3 指摘された点

成果発表会において、評価者から挙げられた問題点を以下に示す。

- 読み上げている部分が目立っていた。
- 最初の全体の説明がわかりにくかった。
- 自分たちの成果物の工夫点がわかりにくかった。
- 筋肉スーツの見た目をカッコよくできたらいいのではないか。
- 説明しながらデモを行うとより理解しやすくなると感じた。

(※文責: 泉優香)

第 10 章 課題解決のプロセスの詳細

10.1 各人の課題の概要とプロジェクト内における位置づけ

各メンバーの担当課題は以下のとおりである。

10.1.1 横谷汐美

- 5月 担当教員の指導の下、筋電位の基礎知識と計測回路の制作方法を学んだ。また、製作物についてのアイデアを出し、関連情報の収集を行った。
- 6月 筋肉袋の初期設計をもとに制作を行った。その過程で腕にフィットしやすく、膨らみやすい設計を考案し、実際に製作した。また、Arduino を用いて筋肉袋の膨張機能を実装した。
- 7月 中間発表に向けて製作物の調整をして、仮説の検証を行った。中間発表後は、発表の評価を踏まえて後期の活動に向けた話し合いを行った。
- 8月 後期の活動日程及び前期の製作物の改善方法について話し合いを行った。その後、夏季休暇の間に必要な部品や素材を調査し発注することで、後期からの活動を円滑に行えるようにした。
- 9月 発注した素材で筋肉袋を試作し、どれが最適か検討した。後期の具体的な活動日程についてメンバー及び指導教員と話し合いを行った。
- 10月 教員のアドバイスの下、筋肉袋の素材をシリコーンゴムに決定し、成型のための型を製作した。上腕部と前腕部の型を担当し、Fusion360 を用いて型の設計を行った。
- 11月 引き続き型の設計を行った。3D プリンタでの印刷及びシリコーンゴムの成型にあまり時間がかからないような型の設計を試行錯誤した。同時に、既に完成した他部位の型から筋肉袋を成型する作業を行った。最適な厚さや筋肉袋の接着方法を検討するために試作を繰り返した。
- 12月 製作物の完成後、実験を実施した。実験で破損した筋肉袋の補修を行った。最終発表に向けてポスターの文章の作成及び発表用スライドに使用するイラストの描画を行った。

(※文責: 横谷汐美)

10.1.2 高橋稜

- 5月 担当教員の指導のもと筋電位の基礎知識を習得した。また、製作物のアイデア出しや、それについての情報や知識の収集を行った。
- 6月 それぞれ担当分野を決めて作業を行った。筋肉袋の動作機構の確立や目的達成のため仮説の検証方法を立案した。
- 7月 中間発表に向けて、パワーポイントでのスライドと原稿の作成を行った。中間発表後は評価のフィードバックから良い点と悪い点を確認し後期の活動に向けての話し合いを行った。
- 8月 後期の製作物や日程についての話し合いを行った。前期での反省点を生かし、筋肉袋の素材や筋肉袋に空気を送る方法について話し合いを行った。

- 9月 実際の筋肉の形を参考にして筋肉袋の大きさを決めた。筋肉袋に袋に空気を送るために必要な電磁バルブを調べて決めた。
- 10月 製作物を製作するために必要な物の買い出し。実験方法を考え、実験に必要な物を購入し、準備を開始した。
- 11月 最終発表に向けて、パワーポイントでのスライドと原稿の作成を行った。筋肉スーツに筋肉袋をつけるために筋肉スーツに袋を製作した。
- 12月 被験者を集め、実験を行った。ポスターやパワーポイントに使うための写真を撮影した。また、最終発表に向けた準備と最終報告書を作成した。

(※文責: 高橋稜)

10.1.3 古内義久

- 5月 担当教員から筋電位計測のための基礎知識と回路制作方法を学んだ。また、筋電位計測回路の配線を行いつつ、製作物についての意見やアイデアを挙げた。
- 6月 筋電位計測のための電極を製作した。筋肉袋の制作が決定した後、筋肉袋の設計や動作機構について議論するとともに、仮説検証方法の考案を行った。また、PowerPoint に基づく発表原稿作成を開始した。
- 7月 仮説の検証を行い、中間発表のための PowerPoint のスライドと発表原稿をメンバーと協力して完成させた。
- 8月 後期の活動日程についての仮決めと製作物改善について話し合いを行った。必要な部品や筋肉袋に使用する素材をメンバー全員で調査し、後期の活動初日に作業が行えるように物品の発注の要請を行った。
- 9月 筋電位計測回路と Arduino を積層電池で動作させるために、筋電位計測回路の基板に DC/DC コンバータとそれに付随する抵抗やコンデンサの配線を行った。また、筋肉袋に使用する素材と筋肉袋の形状について話し合いを行った。さらに、後期の活動日程についてメンバー全員と教授で話し合い、調整を行った。
- 10月 エアタンクから各筋肉袋までの空気注入の流れを図で可視化し、足りない部品の買い出しや発注の要請を行った。また、実験方法についてメンバー間で話し合いを行った。さらに、電磁バルブの動作回路について教授から添削とアドバイスを頂いた。
- 11月 ホースの結合や部品の合体によってエアタンクから各筋肉袋までの空気注入経路を制作した。また、電磁バルブの動作回路の配線を行い、Arduino を使用して電磁バルブの動作を制御するプログラムを書き込んだ。自分の担当課題が完了した後は、筋肉袋の制作の補助や筋肉スーツの制作の補助、パワーポイントによる発表スライドの制作をメンバーと協力して行った。最終発表に向けて、パワーポイントでのスライドと原稿の作成を行った。筋肉スーツに筋肉袋をつけるために筋肉スーツに袋を製作した。
- 12月 実験の補助や、実験に伴って故障した電気回路の修復と補強を行った。実験終了後は結果の集計と検定を行った。また、結果に基づいてグラフの描画と発表スライドの加筆、ポスター内の文章の作成と期末報告書の作成をメンバー全員で話し合いながら行った。

(※文責: 古内義久)

10.1.4 泉優香

- 5月 教員の指導のもと筋電位の基礎知識を習得した。また、製作物のアイデア出しや、それについての情報や知識の収集を行った。
- 6月 それぞれ担当分野を決めて作業を行った。筋肉袋の設計をし、筋肉袋を製作した。Arduinoを制御し筋肉袋の膨張機能を実装した。
- 7月 中間発表に向けての準備を行い製作物の最終調整をした。中間発表後は評価のフィードバックから良い点と悪い点を確認し後期の活動に向けての話し合いを行った。
- 8月 後期の製作物についての話し合いを行った。前期での反省点を生かし、筋肉袋の素材や筋肉袋に空気を送る方法について話し合いを行った。
- 9月 筋肉袋の大きさを決め、3種類の素材で筋肉袋を製作し、どれが適しているか検討した。教員からの提案で筋肉袋の素材をシリコーンゴムに変更した。
- 10月 シリコーンゴムの長所を生かすため、筋肉袋の形、大きさを再検討し、シリコーンを流しこむための型の大きさや形を決めた。Fusion360での3Dモデリングを行った。Fusion360での3Dモデリングを行ったが、3Dプリンターは時間がかかるため、アクリル板で型を製作することになり、3Dで作ったモデルをイラストレーターで2Dに直し、レーザーカッターでアクリル板の型を制作した。
- 11月 引き続き、アクリル板での型を制作した。完成した型を使い、シリコーンゴムで筋肉袋を製作した。試作を行い、シリコーンの厚さを調整し担当した、胸筋、腹筋、背筋の筋肉袋を完成させた。
- 12月 被験者を集め、実験を行った。ポスターに使う写真の編集やレイアウト、色を決め、ポスターを作成した。また、最終発表に向けた準備と最終報告書を作成した。実験の補助や、実験に伴って故障した電気回路の修復と補強を行った。実験終了後は結果の集計と検定を行った。また、結果に基づいてグラフの描画と発表スライドの加筆、ポスター内の文章の作成と期末報告書の作成をメンバー全員で話し合いながら行った。

(※文責: 泉優香)

10.2 担当課題と他の課題の連携内容

10.2.1 横谷汐美

前期では、古内と筋電位計測回路と電極を製作及び泉と筋肉袋の製作し、Arduinoの制御による筋肉袋の膨張機能を実装した。また、発表用スライドへの意見出しや、図の作成を行った。

後期では、筋肉袋の素材と形状を決め、Fusion360を用いて筋肉袋の型の設計を行った。上腕部と前腕部の筋肉袋の型の設計を担当した。製作した型を用いてシリコーンゴムを成型し、都度筋肉袋の改良や補強を行った。筋肉袋及び筋肉スーツの完成後、評価実験を実施した。

(※文責: 横谷汐美)

10.2.2 高橋稜

前期では、目的達成のため情報収集を行った。また古内と動作機構や仮説検証方法を立案した。さらに、古内と中間発表に向けてスライドや発表原稿を作成した。

後期では、メンバーと筋肉袋の素材や形、活動日程や製作物完成に必要な部品について話し合いを行った。実験方法の考案や発表スライドの作成、買い出しについては古内と共にを行った。ポスターや発表スライドに使用する写真の撮影をメンバーと行った。

(※文責: 高橋稜)

10.2.3 古内義久

横谷と共に筋電位計測回路と電極を製作した。筋肉袋の設計や仮説検証の考案、スライドや発表原稿の構成など、理論に関わる事柄を高橋と共に取り組んだ。また、講義で習ったプログラムの知識を活かし、Arduino 制御のためのプログラム修正を補助した。

後期では、筋肉袋の素材や形状、活動日程や必要な部品についての話し合いをメンバー全員で話し合いながら活動を行った。実験方法の考案や発表スライドの作成、買い出しについては高橋と共にを行った。また、前期に Arduino を担当していた泉から Arduino の使い方やプログラミングの方法について質問しつつ制御プログラムの制作と Arduino への配線を行った。自分の担当課題が完了した後は、筋肉スーツや筋肉袋の製作の補助を行った。

(※文責: 古内義久)

10.2.4 泉優香

前期では、製作物についての情報収集を行った。また横谷と製作物の製作と Arduino を制御、筋肉袋の膨張機能の実装を行った。発表用のスライドのアイデアを出し、発表準備に加担した。

後期では、班員と筋肉袋と筋肉スーツの素材を決めた。横谷と筋肉袋の形や大きさを相談し、アクリル板を加工や Fusion360 での 3 D モデリングを行い 3 D プリンターで筋肉袋の型を製作した。製作した型を使いシリコンゴムで筋肉袋を製作した。主に腹筋、背筋、胸筋の製作を担当した。また、班員と筋肉スーツの構造を決め、製作した。製作した筋肉スーツを使い、実験を行った。ポスターに使う写真の編集やレイアウト、色を決め、ポスター制作に加担した。

(※文責: 泉優香)

付録 A 新規習得技術

- 回路の製作技術
- 筋電位計測技術
- Arduino のプログラム作成技術
- Fusion360 を用いた 3D モデル製作技術

付録 B 活用した講義

- 櫻沢先生による生体信号に関する講義
- 人体生理学
- 情報処理演習 II

付録 C 相互評価

課題解決過程で分担し、連携した前期と後期の作業全般について、互いに評価する。

C.1 前期

C.1.1 横谷汐美からの相互評価

【高橋】

メンバー同士で円滑なやり取りができるよう、積極的に話し合いに参加してくれた。制作物の関連情報を多く探し、筋肉袋の設計を考案してくれた。発表会のスライド作成と発表原稿の作成に関わってくれた。

【古内】

制作物に関して的確な意見を多く出してくれた。先行研究を探し、筋肉袋の設計を考案してくれた。発表会のスライド作成では、より正確で聴衆に伝わりやすい表現を模索してくれた。

【泉】

話し合いの中で、様々な角度からの意見を出してくれた。グループでの話し合いの内容や教員からの意見をまとめ、共有してくれた。共同で制作物の作成やプログラム作成に参加してくれた。

(※文責: 横谷汐美)

C.1.2 高橋稜からの相互評価

【横谷】

回路の製作や筋肉袋の設計を試行錯誤し考えてくれた。中間発表に向け製作物の製作に加えて、スライドに使用する図や絵を描いてくれた。

【古内】

先行研究の収集・共有や筋肉袋の動作機構を考えて確立してくれた。共同で中間発表に向けてスライド作りや発表原稿の作成をした。

【泉】

サーボモータを動かすためのプログラムを考えてくれた。中間発表のスライド作りや製作物作製の最中に担当教員からももらったアドバイスをメモしてくれた。

(※文責: 高橋稜)

C.1.3 古内義久からの相互評価

【横谷】

筋電位計測回路の配線やパワーポイントに使うイラスト描画，筋肉袋の制作など技術が必要な部分に全体的に携わっていた。技術的な作業はどうしても個人差が生まれてしまうものだが，どの点においても高品質であり，成果物のクオリティを格段に上昇させた。

【高橋】

共にパワーポイントの作成や筋肉袋の動作機構制作など，論理的な部分の構築に取り組んでいた。また，プロジェクトリーダーとして全体を指揮するとともに，グループの話し合いを先導したり気を配ってムードメーカーの役割を担うなど，グループを裏から支えていた。

【泉】

話し合いの際にはユニークなアイデアを提案していた。特に参考文献の話し合いの際には，調達された論文が決め手となり，詰まっていた議論が一気に進展した。また，サーボモータの動作プログラムの完成に努めていた。

(※文責: 古内義久)

C.1.4 泉優香からの相互評価

【横谷】

発表スライドのイラストを全部描いてくれた。発表スライドを作成する際に写真だけではわかりにくくイラストを必要とした。イラストを描くのは難しく，とても助けになった。また，筋肉袋の制作の時に形などを工夫して制作していた。回路制作などリーダーとして全部の役割に関わってくれ協力していた。

【高橋】

先行研究を探し内容の説明をしてくれた。発表スライド，発表原稿を作ってくれた。時間がなく大変だったので発表スライドや発表原稿を作ってくれたことはとても助けになった。また，意見を出したりするとき積極的に話してくれた。

【古内】

先行研究を探しわかりやすく説明してくれた。発表スライド，原稿を作ってくれた。時間がなく大変だったので発表スライドや発表原稿を作ってくれたことはとても助けになった。また，制作物を作る際などあらゆる場面で意見をくれ，良いものが製作できた。

(※文責: 泉優香)

C.2 後期

C.2.1 横谷汐美からの相互評価

【高橋】

先行研究の調査や成果物の評価実験内容の考案など、研究を行う上で特に重要な部分を担当していた。発表スライドや発表原稿などの資料作成といった事務作業及び買い出しを始めとする雑務も行ってたため、製作物に関する作業に集中することができた。話し合いでは、積極的に発言するほか、他のメンバーの意見を否定することなく一度は受け入れる姿勢が見られた。場を和ませることも多々あり、グループの精神的な支えにもなっていた。

【古内】

先行研究の調査および評価実験内容の考案だけでなく、電気回路の製作や動作機構の確立など多岐に渡って活動していた。また、時間外活動や担当外の業務に対しても積極的にサポートしてくれた。主に技術的な面からグループを支えており、グループへの貢献度はひと際大きかった。

【泉】

筋肉袋の型の設計・製作及びシリコンゴムの成型を共に行った。その際、教員に積極的に助言を求めたり、新しいことに取り組んだりしており、製作物の進捗の多くを担っていた。筋肉スーツの製作時には、他メンバーに指示を出して効率的に進めていた。また、話し合いの際は様々な案を出すことで議論を進めることが多かった。プロジェクト全体を通して、自ら行動することでチームを引っ張っていく場面が多く見られた。

(※文責: 横谷汐美)

C.2.2 高橋稜からの相互評価

【横谷】

グループリーダーとしてグループの全体的なスケジュールの管理を行ってくれた。スケジュールが遅れていたり、話し合いが必要と判断した時にみんなの予定を合わせて話し合いの場を積極的に作ってくれた。その他にも筋肉袋を製作するために必要なアクリル板の加工や3Dプリンターのモデリングを担当してくれた。基本的に夜遅くや朝早くに学校に来てくれてスケジュールが遅れが内容に3Dプリンターなどを起動させてくれた。発表に使用するパワーポイントの絵など他の人ができないことを自分から見つけて積極的に声をかけて請け負ってくれてとても助かった。

【古内】

主に筋肉袋に空気を送るためのタンクとホースを繋ぐことや筋電位計測回路とそれに用いるアクティブ電極やArduinoのプログラミングを担当してくれた。タンクとホースを繋げることは知識がないなか一から調べて筋肉袋に空気が送られるように試行錯誤をしてくれた。実験で必要なアクティブ電極やプログラミングを一人で担当してくれスケジュール通りに製作を終わらせてくれたため、実験がスムーズにできた。その他にも発表に使用するパワーポイントや発表原稿と一緒に考えてくれ、時には相談にのってもらい添削をもらった。

【泉】

主に筋肉袋や筋肉スーツの製作を中心に行ってくれた。筋肉袋についてはアクリル板の加工やシリコーンゴムを固めるなど筋肉袋を製作するのに大切な役割を担ってくれた。筋肉スーツでは服に袋をつける時間がかかる作業を行ってくれた。シリコーンゴムや筋肉スーツは学校にいる時間内にできなかった場合は家に持ち帰り製作をしてくれた。グループとしての話し合いの場では積極的に意見をいってくれ、他の人が言っていたことをまとめてくれたりしてくれ一回の話し合いの場でみんなの悩みが解決できるように導いてくれた。

(※文責: 高橋稜)

C.2.3 古内義久からの相互評価

【横谷】

泉と共にシリコーンゴム流入用の金型製作のための3Dモデリングやアクリル板の切断・加工、シリコーンゴムによる筋肉袋の製作を行っていた。また、発表スライドやポスターに使用するイラストやポスターのレイアウト考案など、主にデザイン関連の作業で中核を担っていた。休日やプロジェクト時間外でも積極的に活動しており、製作の進捗に大きく貢献していた。

【高橋】

実験方法の考案や発表スライドの製作、先行研究の調査と内容を簡潔にまとめあげることを共に行った。また、プロジェクトリーダーとして全体を指揮するとともに、グループでの話し合いや購入物品のリストアップ、買い出しに赴くなどグループを裏から支えてくれる場面が多く、縁の下で製作を手助けしてくれた。

【泉】

横谷と共にシリコーンゴム流入用の金型製作のための3Dモデリングやアクリル板の切断・加工、シリコーンゴムによる筋肉袋の製作を行っていた。筋肉スーツの製作ではグループ全体を仕切っており、効率よく筋肉スーツの製作を行うことができた。また、Arduinoの担当を前期から引き継ぐ際の説明が簡略で分かりやすかった。

(※文責: 古内義久)

C.2.4 泉優香からの相互評価

【横谷】

グループリーダーとして班員を引っ張ってくれた。話し合いの日程を提案してくれるなど、グループ活動を円滑にするために努めてくれた。筋肉袋では、前腕と上腕の製作を主に担当していた。前腕と上腕の筋肉袋は筋肉スーツの中で、一番大事な部分であり、リアル感を追求するなど製作するのが難しい部分であった。また、私が担当した、腹筋、胸筋、背筋の筋肉袋の形や作り方などの適切なアドバイスをしてくれ、とても助けになった。成果発表会では声が枯れるまで筋肉スーツを着用して実演してくれた。

【高橋】

プロジェクトリーダーとしてプロジェクト全体をまとめ、スケジュール管理や担当教員との連絡を行っていた。グループ活動では、実験の内容を考えてくれ、班員に説明してくれた。また、パワーポイントの作成をしてくれた。担当教員のアドバイスを受けてプロジェクトの成果をわかりやすくまとめてくれた。成果発表会での発表原稿も考えてくれ、忙しかったのでとても助けになった。成果発表会では筋肉スーツを着用して実演をしてくれたので、発表を聞いている人に興味を持たすことができ、楽しませることができた。

【古内】

グループ活動では、動作機構の確率を行ってくれた。プログラミングなど技術面の役割を多く担っており、負担は大きかったと思うがスケジュール通りに進めてくれた。実験をする際は、配線が外れても大丈夫なようにまとめてくれとても助かった。実験の内容も考えてくれ、実験から結果を得ることができた。また、担当教員との話し合いでは率先して、担当教員からの質問に答えてくれた。担当教員に説明することは緊張すると思うが、わかりやすく簡潔に説明しており、とても助けになった。そのため、プロジェクトが変な方向に行かずに無事に終えることができた。

(※文責: 泉優香)

参考文献

- [1] 幸田利敬 (1994) 筋力トレーニングについて. 理学療法のための運動生理, 9(3) :131-138
- [2] 鳥山明 (1986) ドラゴンボール. 集英社, 第 2 巻, p.41
- [3] 武論尊, 原哲夫 (1984) 北斗の拳. 集英社, 第 1 巻, p.67-68
- [4] e-ヘルスネット (厚生労働省), スロートレーニングとは. <https://www.e-healthnet.mhlw.go.jp/information/exercise/s-04-003.html> (2024/1/14 アクセス)
- [5] 森川和則 (2016) 視覚の心理学 日常に潜む錯覚・錯視の研究. 色材協会誌, 89(1) :11-16
- [6] Sally, A. L, Dennis, R. Proffitt and Betty, J. M. (2011) Body-Based Perceptual Rescaling Revealed through the Size – Weight Illusion. Perception, 40 :1251-1253
- [7] Yee, N. and Bailenson, J. (2007) The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior. Human Communication Research, 33 :271-290
- [8] 角田賢太郎, 小川奈美, 鳴海拓志, 廣瀬通孝 (2020) 筋肉質アバタを用いたプロテウス効果が重さ知覚に与える影響. 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 25 :ROMBUNNO.2A2-2.
- [9] 石川貴一, 粕野悠聖, 高野保真, 佐久田博司 (2019) VR を用いた筋力トレーニングにおけるプロテウス効果. 情報処理学会研究報告, 2 :1-5.
- [10] 現場市場 (2022), 配管に使う継手の種類を用途ごとに紹介! . <https://www.genbaichiba.com/shop/pages/mag-20221018.aspx> (2024/01/09 アクセス)
- [11] Autodesk, 3D モデリングソフト・3DCG 制作ソフト. <https://www.autodesk.co.jp/solutions/3d-modeling-software> (2023/12/13 アクセス)
- [12] Zortrax, M200 Plus V2. <https://www.zortrax.sin.jp/product-page/m200-plus> (2023/12/14 アクセス)
- [13] KONAMI SPORTS CLUB, ラットプルダウン. <https://www.konami.com/sportsclub/fitness/machine/lat-pulldown.html> (2024/01/16 アクセス)