

公立はこだて未来大学 2025 年度 システム情報科学実習
グループ報告書

Future University Hakodate 2025 Systems Information Science Practice
Group Report

プロジェクト番号/Project No.

21

プロジェクト名

生体信号を利用した身体拡張インターフェース～ASHURA～

Project Name

Body augmentation interface using biologic signals

グループ名

グループ B

Group Name

Group B

プロジェクトリーダー/Project Leader

山口拓海 Takumi Yamaguchi

グループリーダー/Group Leader

大成瞬平 Shunpei Onari

グループメンバー/Group Member

大成瞬平 Shunpei Onari

杉島怜央 Reo Sugishima

関根悠生 Yuuki Sekine

濱野雄貴 Yuuki Hamano

松下祐貴斗 Yukito Matsushita

山口拓海 Takumi Yamaguchi

指導教員

櫻沢繁 高木清二 山田恭史 辻義人

Advisor

Shigeru Sakurazawa Seiji Takagi Yasufumi Yamada Yoshihito Tsuji

提出日

2026 年 1 月 21 日

Date of Submission

Jan. 21, 2026

概要

人類の身体は長い年月を経て猿人から環境に合わせて進化した。我々の祖先である猿人の時代には行動が4足歩行から2足歩行へと進化を遂げた。さらに、猿人の時代から周辺にある木や石で道具を製作している。年月をかけての進化の中でも共通して人類は身体をある行動の処理のために変化させるのではなく周辺のモノを活用するための身体に変化したのではないのだろうか。こうした進化の過程で、人類は身体そのものを大きく変化させるのではなく、道具を進化させることで、様々な課題に適応してきた。現代においても、人間は依然としてその身体の限界と向き合いながら、テクノロジーを活用して日常動作を補助・拡張しようとしている。一方で、自然界には独自の身体構造によって多様な動作を実現している生物も存在している。もし、自然淘汰によって不要なものがそぎ落とされるように進化してきた我々ヒトの身体に、生物の部位が新たに備わった時、私たちの身体による日常操作にどのような変化が生じるのかと考えた。そこで、本グループでは「筋電位計測による日常動作の身体拡張インターフェース」の開発を行った。様々な生物についてグループ内で情報収集を行い、人類の身体では動作不可能な柔軟な動きを可能とする触手の構造に着目した。前期の活動では空気圧式での触手構造とワイヤー式での触手構造の2つの機構を製作し、課題点を議論した。前期では活動を通し、メインとして製作をする機構を決定し、どちらがより身体の一部として感じ取れるのかを考察した。考察の末、ワイヤー式をメインとし製作することを結論づけた。また、議論を通しワイヤー式ではモータとサーボモータの利用により可動域に変化が生じるのではないかと、制御している糸をモータを通して糸で巻く際、摩擦により糸の耐久力の低下がみられるのではないかと考察した。触手のモデルとなる構造により可動域に大きく影響を与えるのではないかと考察した。これらの考察を元に前期では全長約30cmのワイヤー式の触手構造を行い考察していた点も議論しながら製作を行った。触手の製作では Fusion と呼ばれる PC アプリを使用し 3D プリンタで製作を行った。

キーワード 身体拡張, 筋電位, 触手構造, 空気圧, 制御回路, 3D プリント

Abstract

The human body evolved over long ages from hominids to adapt to the environment. During the era of our hominid ancestors, locomotion evolved from quadrupedal to bipedal walking. Furthermore, since the ape-man era, humans have crafted tools from surrounding materials like wood and stone. Throughout this evolutionary process, rather than altering their bodies to handle specific actions, humans seem to have adapted their bodies to utilize the objects around them. In this evolutionary journey, humans adapted to various challenges not by drastically changing their bodies themselves, but by evolving tools. Even today, humans continue to confront the limitations of their bodies while seeking to assist and extend their daily movements through technology. Meanwhile, the natural world contains organisms that achieve diverse movements through unique bodily structures. We wondered: if parts from other organisms were added to the human body—which evolved through natural selection to shed unnecessary elements—how might this alter our daily physical operations? Therefore, our group developed a “body augmentation interface for daily actions using electromyography measurement.” After gathering information on various organisms within the group, we focused on the structure of tentacles, which enable flexible movements impossible for the human body. In the first phase, we constructed two mechanisms: a pneumatic tentacle structure and a wire-based tentacle structure, and discussed their challenges. Through these activities, we determined the primary mechanism to be developed and examined which felt more like an extension of the body. After deliberation, we concluded that the wire-based system would be the main focus. Discussions also raised concerns: the wire-based system might experience changes in range of motion due to the use of motors and servo motors, and the durability of the control wires could potentially decrease due to friction when winding them around motors. We also considered that the model structure of the tentacle might significantly impact its range of motion. Based on these considerations, we constructed a wire-based tentacle structure approximately 30cm in total length during the first semester, incorporating these points into our discussions while building it. For the tentacle construction, we used a PC application called Fusion and produced it using a 3D printer.

Keyword Body augmentation, electromyography, tentacle structure, pneumatic pressure, control circuitry, 3D printing

目次

第 1 章	背景	1
第 2 章	目的	3
2.1	本プロジェクトにおける目的	3
2.1.1	触手の形状	3
2.1.2	制御システムの開発	3
2.1.3	足の筋電位の計測	3
2.2	前期の目的	4
第 3 章	関連技術	5
3.1	筋電位	5
3.2	筋電位計測	5
3.2.1	アクティブ電極	5
3.2.2	差動増幅器	6
3.2.3	4 次ハイパスフィルタ	6
3.2.4	非反転増幅器	7
3.2.5	半波整流器	7
3.2.6	積分回路 (2 次ローパスフィルタ)	7
3.3	制御回路	8
3.3.1	Arduino	8
3.3.2	制御プログラム	8
3.3.3	DC ギヤードモータ	8
3.3.4	3D プリント	8
第 4 章	成果物	9
4.1	前期成果物	9
4.1.1	ワイヤー式の触手型デバイス	9
4.1.2	空気圧式の触手構造	11
4.1.3	前期に制作したプログラム	11
4.2	最終成果物	11
4.2.1	ワイヤー式の触手型デバイス	12
4.2.2	後期に製作したプログラム	12
4.2.3	装着方法	13
第 5 章	結果	14
5.1	把持実験の結果	14
5.2	被験者の評価	15
第 6 章	考察	16

6.1	触手の動作について	16
6.2	把持動作	16
6.3	身体拡張の可能性について	16
第 7 章	結論	17
	参考文献	18
付録 A	ソースコード	19
A.1	Arduino を稼働させるためのコード	19

第 1 章 背景

人間の身体は、日常場面において一定の機能を果たす動作が可能である。例えば、ドアを開ける、スマホを持ち上げる、足でドアを開けばなしにする、などである。しかし、鳥のような翼での飛行、バッタのような跳躍、たこや昆虫などの多肢での同時作業といった行為は、人間が持つ器官では動作に制限がある。本グループでは、このヒトの特徴を踏まえ、「もし人間に他の生物の能力が付与されたとき、我々の日常生活にどのような変化が生じるのか」という問いに取り組む。

ここで本研究では人間には存在しない生物の部位を付与した場合の行動変化の可能性の探求を目的とした。議論の結果、鳥のような翼や、バッタのような脚力をもつ脚などが挙げられたが今回は「触手」という部位に注目した。触手に注目した理由は、柔軟な行動が可能だからである。触手には関節がなく筋肉で構成されており、筋肉の収縮により一つの動作の可動域が大きくなる。触手のような柔軟な構造は、多様な動作を可能にする。例えば、カメレオンのしっぽは一定の角度を保ちながら螺旋状に枝に巻きつき、象の長い鼻は我々の腕や手のように器用にもものを持つことができる。イカやたこも触腕を使って移動や狩りを行っている。これらはいずれも関節がなく筋肉で構成されており、柔軟で広範囲な動作を実現している。ここでは、「触手」を、関節を持たず、筋肉の伸縮によって自由度の高い運動を可能とする器官とした。触手に着目することで、対象物に巻き付くことで多様な形状に対応することができると考えた。これにより、人間の手では把持が困難な形状の物体に対応できる可能性がある。そこで、筋電位信号を用いてユーザーの動作意図を直接読み取り、直感的に操作が可能な日常動作の補助を担うデバイスの開発を目標とし、触手型デバイスの基本機能として「物体の把持」に着目した。把持動作は、持ち上げる、支える、固定するなど多くの日常動作の基盤となる行為である。また、触手の特徴である「巻き付き」を評価するためには、多様な形状の物体を把持できるかを検証することが重要であると考えた。この動作を実現する触手型デバイスはロボットハンドに該当する。ロボットハンドには、剛性ロボットハンドとソフトロボットハンドと呼ばれる分野がある。剛性ロボットハンドとは、把持対象物を掴む際に爪やグリッパ本体が曲げやねじれに対して変形しにくい性質を持つロボットハンドである。一方で、ソフトロボットハンドとはやわらかい素材で作られた柔軟な動きが可能なロボットハンドである。剛性ロボットハンドでは多様な形状の物体を把持するためには、関節数を増やして機構の自由度を高め、各関節の角度を個別に制御する必要がある。しかし、自由度の増加には機構が複雑になることやコストが高くなること、そもそも剛性のロボットハンドでは把持することが困難な形状が存在するという課題がある [1]。以上の課題を踏まえ、我々はソフトロボットハンドという分野に着目した。ソフトロボットハンドには、アクチュエーター数を減らしながら多様な動作を実現することができるという特徴や、物体や環境との接触を駆動源として用いることができるという特徴がある [2]。つまり、物体に触れることで生じる変形を利用し、物体の形状に受動的に適応しながら把持動作を行うことができる。これは、関節がない柔軟な構造により、多様な形状の物体に対応するデバイスを作製するうえで重要な特徴であると考えた。これは、腕の代わりとなるデバイスを作製するうえで、そのデバイスのできることを増やすために必要な特徴であると考えた。そこで、本グループではソフトロボットハンドの分野の中で、対象物の形状に合わせてフィットする触手の動きに着目した。触手には前述したように関節がなく筋肉のみで動作する柔軟な構造を持ち、対象物に巻き付くことで多様な形状に対応することができる。この特徴から我々は物体を把持する場合

Body augmentation interface using biologic signals

に巻き付けるような持ち方をすることで物体との接触面積を増やし圧力が分散されると考えた。さらに、巻き付けて持ち上げることが可能となった時、やわらかい物体を把持する場合でも不要な力を加えず破損を防ぐ効果もあると考えた。我々はタコの触手の巻き付く動作を、多関節構造によって模倣することを試みた。真のソフトロボットハンドではないが、複数の関節を協調制御することで、対象物の形状に適応した巻き付き動作を実現することを目指した。詳細は次章で解説を行う。これらのことから、触手の形を採用したソフトロボットハンドを作製することで、剛性ロボットハンドでは把持することが困難であった対象物に対しても、対象物の形に適応し巻き付くことで、接地面が増え、把持することができるようになると考えられる。

第 2 章 目的

2.1 本プロジェクトにおける目的

本研究では、触手の高い柔軟性による多様な形状の物体を把持できる点に着目した。触手はその高い柔軟性により対象物の形状にフィットするように巻き付くことで、多様な形状の物体を把持することができる。このような触手構造から着想を得て、本研究では触手型デバイスを製作し、筋電位を用いて制御することで身体拡張の可能性を探求することを最終目的とする。従来のスイッチやボタン操作による外部機器制御では、操作と動作の対応関係が離散的であり、身体の一部として自然に扱うことには限界がある。一方、筋電位は、運動意図と密接に結びついており、身体動作と連続的に対応付けることが可能である。そのため、筋電位を用いることで装着者があたかも自身の身体の一部であるかのように触手型デバイスを操作することを実現する。以上を踏まえ、触手型デバイスの柔軟な動作とモノをつかむことができる能力の実現ため、制御システムと触手の形状の最適化を目指す。触手型デバイスの実現にはタコの触手構造を参考にしている。

2.1.1 触手の形状

触手の作製において、最小限の制御機構で、触手を立体的かつ柔軟に動かすことを目指す。把持できるモノの形状や大きさの幅を広げるために、つかむ対象物との接触面積を最大限増やし把持力を強化させるような形状を模索する。また、触手先端のユニット表面に摩擦係数の高い液体ゴムを塗布することでグリップ力を強化する。触手の素材の選定においては触手の柔軟な動きを再現できる耐久性と軽さを重視する。

2.1.2 制御システムの開発

本研究では、測定した筋電位信号を利用しモータの制御を行うことで触手型デバイスを動作させる。その際、触手の柔軟な動作を意図通り再現することがこの課題の一つとなる。そのためには筋電位信号を正確に計測し、その信号の結果を動作に反映させる必要がある。制御プログラムでは、筋電位信号を正確に計測し、得られた値に応じてモータを制御させ実際に体の一部として動作させているような感覚の実現を目指す。

2.1.3 足の筋電位の計測

本研究では、何らかの理由で両手がふさがっている場面での動作の補助を想定している。そのため、両手から筋電位信号を計測することは適切ではないと考えた。また、筋電位の強弱により細かなデバイスの制御を実現させるため、強弱のある筋電位を計測する必要がある。そのため、本研究では筋電位信号の計測箇所にもっとも適切なのは足だと考えた。具体的な箇所としては大腿筋、下腿三頭筋で筋電位信号の計測を行う。足の筋電位信号を利用して自分の意図した動きを触手型デバイスにさせることを目指す。また、歩行など触手型デバイスを動作させる以外の目的で足を動かしたときに触手型デバイスが意図しない動作をしないようなシステムの実現を目指す。

2.2 前期の目的

装着者の筋電位を計測することで得た信号をもとに動作が可能な触手型デバイスの試作品を以下の目標を持ち製作した。

- ・足の筋電位を計測する。
- ・足による筋電位計測を元に、使用者の意識下で触手型の義手を上下に動かす。
- ・ワイヤー式，空気圧式の2種の構造でデバイスを製作し，動作の違いを分析する。

ワイヤー式での触手型デバイスにおいては，モノを掴むための触手の構造を確立し，製作した触手型デバイスを筋電位信号の値に応じて上下に動かすことを検討した。

第 3 章 関連技術

3.1 筋電位

筋電位とは生体信号の一種であり、筋肉が収縮する際に発生する非常に微弱な電気信号である。筋肉を動かす際、脳の神経細胞で生じた電気信号が運動神経を通じて神経筋接合部に到達すると、神経伝達物質が神経筋接合部に放出され、筋細胞の受容体が神経伝達物質を受容することにより、ナトリウムチャンネルが開くことで、細胞膜の内外の電位差が変化して活動電位が発生する。この活動電位が、筋細胞の膜上を伝播し、T管を伝って、Ca小胞に伝えられると、Ca小胞がカルシウムイオンを放出する。トロポニンがカルシウムイオンを受容し、アクチンとミオシンの相互作用抑制が解除されることにより筋収縮が引き起こされる。筋電位の計測は、身体拡張技術の基盤として特に重要である。筋電位を計測し、マイコンで信号を利用することで、筋肉の活動とデバイスの動作を連動させることが可能となり、直観的な操作の実現が可能となる。

3.2 筋電位計測

筋電位計測には、侵襲的計測方法と非侵襲的計測方法の2つがある。侵襲的計測方法とは針電極を筋中に直接刺し、刺されている筋繊維から発生する活動電位を計測する方法である。この方法では、局所的な筋電位を測定することが可能であり、非侵襲的計測方法に比べ、ノイズの影響を受けにくい利点がある。一方で、広範囲の筋活動の活動電位を測定する際、複数の部位に針電極を刺す必要があり、また針の挿入時や筋収縮時に痛みを伴うという欠点もある。一方、非侵襲的計測方法とは、皮膚表面に2つの電極を対象となる筋肉の走行に沿って貼り付け、これらの電極間の電位差を筋電位として計測する方法である。この方法では、痛みを伴わず、広範囲の筋活動の活動電位を測定することが可能であるため、我々は非侵襲的計測方法を採用した。しかしこの方法では、皮膚の電気抵抗の高さにより計測される電位の値が小さいことや計測環境にある周辺機器の電源による電磁誘導の影響や動作アーティファクトが混入するなどの問題点がある。計測される電位が小さいという問題に対しては、アクティブ電極や差動増幅器、非反転増幅器を使用することで解決した。また、周辺機器による影響は、4次ハイパスフィルタや積分回路を使用することで解決した。

3.2.1 アクティブ電極

筋電位計測には、皮膚のインピーダンスが高いことで微弱な信号である筋電位の計測が難しくなる問題がある。そのため、電極側で高インピーダンスを電氣的に作り出すことで、皮膚の高いインピーダンスによって発生するノイズを抑えることのできるアクティブ電極を使用した。インピーダンスとは抵抗やリアクタンスの総和であり、電流が流れる際の回路の流れにくさを表す尺度である。内蔵されている回路は、バッファ回路であり入力電圧がそのまま出力される。使用したアクティブ電極を以下の図 3.1 に示す。

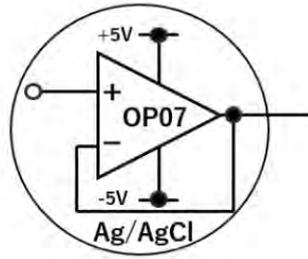


図 3.1: アクティブ電極

3.2.2 差動増幅器

差動増幅器とは、2つの入力電圧の差を増幅し出力する回路である。筋電位を計測する際、電子機器などから同相ノイズが発生する。同相ノイズとは、電源ラインや信号ラインとグラウンド(GND)間に発生するノイズのことである。今回は、2つの電極で同時に計測される誘導ノイズと呼ばれる商用電源による50Hzの同相ノイズを除去する目的で差動増幅器を使用した。使用した差動増幅器を以下の図3.2に示す。

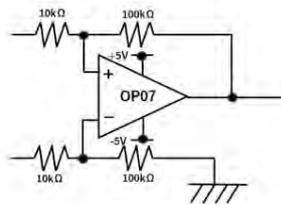


図 3.2: 差動増幅器

3.2.3 4次ハイパスフィルタ

ハイパスフィルタとは、特定の周波数以上の信号を通過させ、それ以下の周波数の信号を減衰させるフィルタの一種である。次数が高いフィルタほど減衰カーブが急峻なため、不要な低周波成分を除去でき筋電位測定の精度を向上させることができる。使用した4次ハイパスフィルタを以下の図3.3に示す。

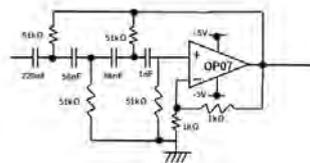


図 3.3: 4次ハイパスフィルタ

3.2.4 非反転増幅器

非反転増幅器とは、入力電圧の極性を変えずに増幅を行い出力する回路である。今回は、ハイパスフィルタやローパスフィルタの出力の増幅に使用した。使用した非反転増幅器を以下の図 3.4 に示す。

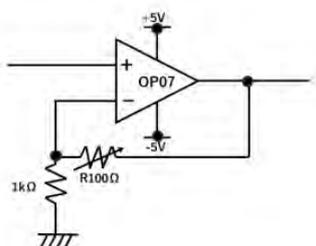


図 3.4: 非反転増幅器

3.2.5 半波整流器

半波整流器とは、交流電圧信号の負の電圧部分を削除し、正の電圧部分のみを出力する回路である。筋電位信号は、正負両方向に変動する交流信号として得られるため、半波整流器を使用することで、後の回路で処理しやすい形に変換している。今回は、筋電位計測回路で処理した信号を直流回路を前提に設計されている Arduino で使用するため、半波整流器を使用した。使用した半波整流器を以下の図 3.5 に示す。

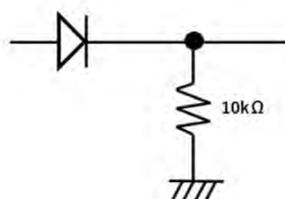


図 3.5: 半波整流器

3.2.6 積分回路 (2次ローパスフィルタ)

積分回路とは、入力された電圧信号を時間積分して出力する回路である。時間積分をすることによって、筋電位の強弱を定量的に評価することを目的とし、使用した。使用した積分回路を以下の図 3.6 に示す。

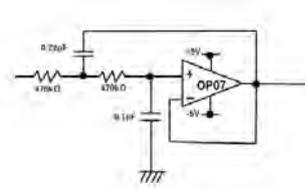


図 3.6: 積分回路

3.3 制御回路

3.3.1 Arduino

本製作物では、筋電位測定回路で処理された生体信号をデジタル信号に変換し、DC ギヤードモータを制御して触手を動作させる必要があった。そのため、A/D 変換機能を備えたマイコンボード「Arduino UNO R3」を用いた。

3.3.2 制御プログラム

DC ギヤードモータの動作を制御するプログラムを作成した。筋電位の閾値を設定し、その閾値を超えたときに DC ギヤードモータを動かすことで、筋肉の活動と触手の動作を連動する機構を実現した。さらに目安の値をいくつか設定することで、筋電位の大小により触手の動きを制御する。これによって、足から筋電位を計測している際に、歩いているときは触手が動作しないように設計した。

3.3.3 DC ギヤードモータ

DC ギヤードモータとは、直流電流で駆動され、減速機構により高いトルクを実現するモータである。本研究では、触手の動きを実現するため、DC ギヤードモータと触手をワイヤーで接続し、モータの回転動作と触手の動作を連動させて制御した。

3.3.4 3D プリント

触手構造を設計するために 3D プリント技術を活用した。3D-CAD ソフトウェア (Autodesk Fusion) を用いて触手構造の 3D モデルを設計し、スライサーソフト (Z-suite) を用いて印刷可能なデータに変換した。そのデータを 3D プリンタ (Zortax M200 Plus) とフィラメント (Z-ABS2 フィラメント) を使用してプリントした。

第4章 成果物

4.1 前期成果物

筋電信号にもとづく触手型デバイスの製作に関して、2つの先行研究に着目した。中国科学技術大学の Zhanchi Wang らは螺旋構造に基づくバイオインスパイア型のロボットの設計とその制御方法の検討を行い、多様な形状、重さの物体の把持を実現とした。また、ハーバード大学の Kaitlyn Becker らを中心とした流体圧を駆使した制御ロボットでは空気圧駆動の柔軟なフィラメントを多数並べることの検討を行い、安定した把持の実現を可能とした。本研究では先行研究の内容を踏まえ、3Dプリンタでタコの腕のような構造を製作可能な点と作動機構の単純さに着目した。前期では、金属線を利用したワイヤー式、空気圧式の2種を製作し、それぞれの動作の違いを比べることとした。図4.1はワイヤー式のプロトタイプであり糸がサーボモータに巻きつけられ、触手型デバイスが動作する。また、空気圧による膨張差を利用して曲がり、物体に絡みついて把持することを目指した空気圧式の触手型デバイスでは形状の作成後試運転を試みたが正常な動作を確立することができなかった。また、ワイヤー式では、以下の課題が確認できた。

- 触手の長さが足りない、らせん動作ができていない、グリップ力が足りないためモノがつかめない
- 反復動作によりワイヤーが劣化する
- モーターのトルクと回転角が足りない

そのため、後期ではこれらの課題を解消し耐久性、駆動範囲、および把持性能の向上を目的とした改良を目指す。

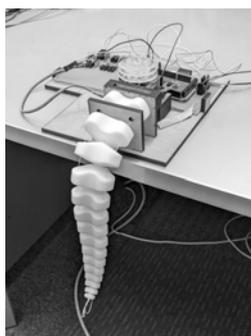


図 4.1: ワイヤー式の触手型デバイス

4.1.1 ワイヤー式の触手型デバイス

作成した触手型デバイスは、外側に通したワイヤーをサーボモータで巻き取ることで図4.2のように触手が上下に曲がるような仕組みである。ワイヤー式触手型デバイスでは、サーボモータにワイヤーを固定しサーボモータでワイヤーを巻き取ることで触手の動作を制御する構造を製作した。そして、ワイヤーで制御する触手の形状は、図4.3に示す形状を採用した。以下では製作した触手

Body augmentation interface using biologic signals

のモデル一つをユニットと呼ぶ。ユニットには計4つの穴が開いてある。中心の穴には柔軟性の低いシリコンチューブを通し、触手の意図しない動作を抑制する。外側の3つの穴にはワイヤーが通されており、ワイヤーがモーターに巻き取られることで触手全体が曲がる仕組みを実現した。このユニットの最大サイズを設定し、そのサイズを0.95倍した物を後ろに並べる。これを繰り返すことで計20個のユニットが連なる。このユニットを連ねる際に中心の穴を一直線上に並ぶようにすることですべての機構の中心が統一され図4.4のような触手型の機構を製作した。プロトタイプ製作では3Dプリンタを使用し、低コストでの開発を実現した。また、触手の上下の動作には、円盤型の根本にワイヤーを括り付け、サーボモーターの駆動力に合わせてワイヤーを巻き取ることでワイヤーの長さを調節した。これにより触手型デバイスに通されたワイヤーの遊び（無駄なたるみ）部分が解消された。触手型デバイスの腕部分がおよそ25cm、土台がおよそ20cm、滑車の構造は全長8cmとした。円盤の製作にはアクリル板を加工して製作した。



図 4.2: 触手の曲がる様子



(a) 真横から見た図



(b) 斜めから見た図



(c) 真上から見た図

図 4.3: 触手構造モデル



図 4.4: 触手の全体

4.1.2 空気圧式の触手構造

図 4.5 は空気圧で動かす触手構造である。シリコンを素材としており、図 4.6 より中心からずれた位置に空洞がある。こうすることで、シリコンの厚い層と薄い層ができ、この空洞に空気を通した際に、内部全体が膨張し、シリコンが薄い層側から厚い層側へ曲がる仕組みである。空気圧式では空気圧に応じて曲がる触手を複数作製し、それらが空気圧により伸び縮みすることでモノにうまく絡みつく。このことによって持ち上げる構造を想定していた。そのためまず、空気圧によって曲がる構造を持った触手を製作した。しかし、今期では空気圧を加えた結果、触手型のシリコンが想定よりも曲がらず、実際に制御することは実現できなかった。



図 4.5: 横から見た空気圧式の触手



図 4.6: 上から見た空気圧式の触手

4.1.3 前期に制作したプログラム

本研究では、第 2 章で述べた通り、触手型デバイスでのモノを掴む動作をはじめとした日常動作の実現を目的としている。そのため、筋電位計測から得られた信号が一定の数値を超えた場合、サーボモータが一定速度で回転し、糸を巻き取ることで 4.2.1 で記述した機構により触手を上下に曲げる動作を可能にした。また、筋電位信号を受信していない状態を初期状態とし、信号が一定の数値を下回った場合かつ、触手が伸びきった状態にない状態では、サーボモータが逆方向に回転し、糸を緩めることで触手は初期状態に戻る仕組みである。この設計により、筋電位計測の信号に基づいて動作する触手型のデバイスの制御が可能となった。

4.2 最終成果物

前期の成果を基に、安定した動作を確認できたワイヤー式の触手型デバイスを最終成果物として採用した。また、前期成果物で明らかとなった課題を踏まえ、主に耐久性、駆動範囲、および把持性能の向上を目的とした改良を行った。まず、ワイヤーには従来使用していた PE ラインに代えてステンワイヤーを採用した。これにより、繰り返し動作によるワイヤーの劣化を防ぎ、耐久性の向上を図った。次に、駆動部をサーボモータから DC ギヤードモータへ変更した。これにより、回転角度の制限が解消され、触手の巻き取りを柔軟に制御できるようになり、大きな可動域での動作が可能となった。また、触手部の全長を約 30cm から約 50cm に増やすことで、対象物に巻き付きやすい形状とした。加えて、先端から約 25cm に液体ゴムを塗ることで滑りを抑制し、把持したときのグリップ力を強化した。

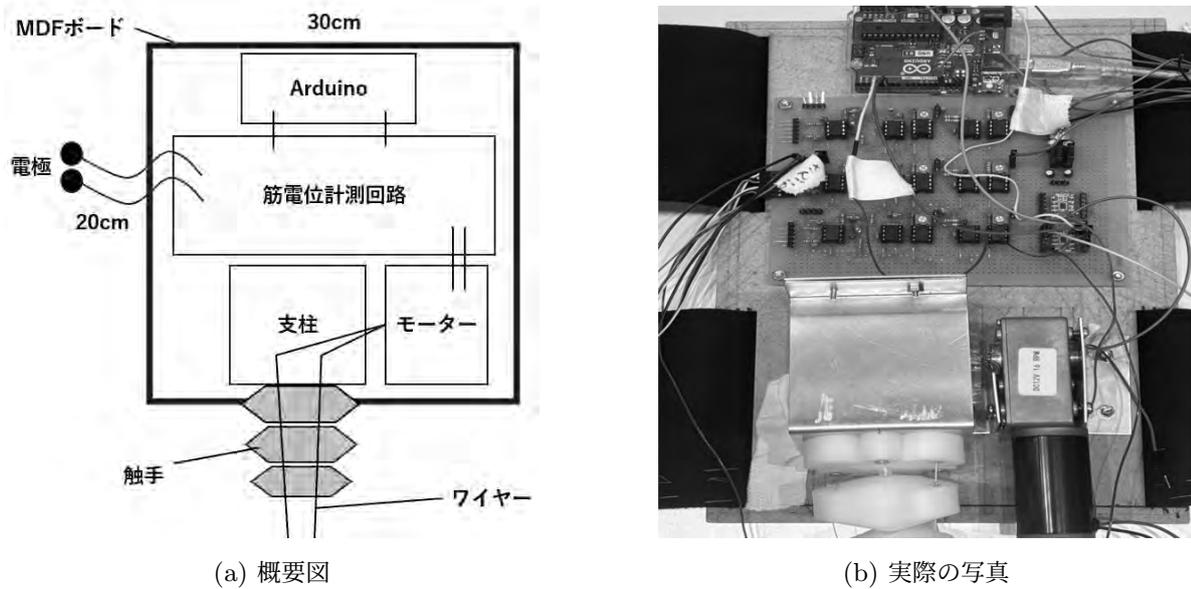


図 4.7: システム全体図

4.2.1 ワイヤー式の触手型デバイス

前期に使用していたサーボモーターでは回転角に制限があり触手の可動域に制限があった。そこで DC ギヤードモータの採用により、連続的な巻き取り動作が可能となり、触手全体が緩やかな湾曲から大きな屈曲まで連続的に動作する。これにより、図 4.8 のような物体に巻き付く螺旋動作を実現し、従来よりも把持対象の形状や大きさに応じた柔軟な動作が可能となった。また、液体ゴムを塗布した触手先端部が把持対象に密着することで、物体を安定して保持できることを確認した。

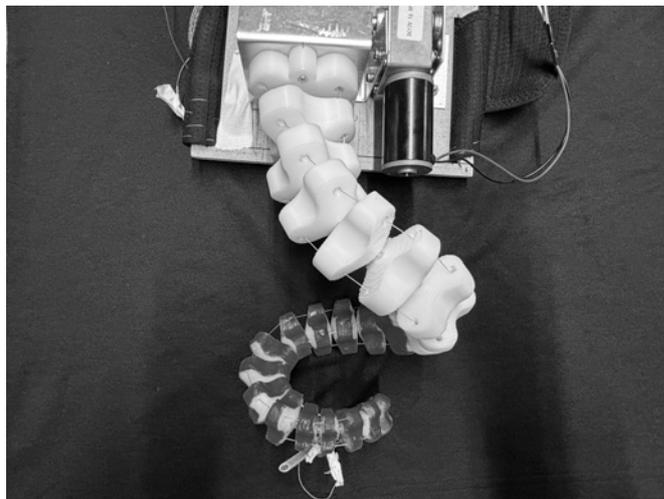


図 4.8: 触手の曲がる様子

4.2.2 後期に製作したプログラム

最終成果物における制御プログラムでは、前期に製作した筋電位信号に基づく制御方式を改良した。前期のプログラムでは、足部の筋電位を計測しているため、歩行時に発生する筋電位変動に

よって意図しない触手の動作が生じる課題があった。この問題に対し、本研究では筋電位信号が一定の閾値を連続して一定時間以上超えた場合のみ触手を動作させる制御方式を導入した。歩行時の筋電位は短時間で上下に変動するため、この条件を満たさず、触手は動作しない。一方で、意図的に筋肉を収縮させた場合には閾値を継続的に超えるため、触手が動作する仕組みとなっている。この制御方式により、移動時の誤作動を抑制しつつ、装着者の意思に基づいた触手型デバイスの制御が可能となった。

4.2.3 装着方法

前期では、ワイヤー式と空気圧式の比較をするため、基盤を机の上に置き、実験を行った。しかし、最終成果物としては、デバイスを腰に取り付け、使用することを目標としていたため、腰に取り付けるための部品を新たに作製した。デバイスを身体全体の重心に近い腰部に取り付けることで、上半身や四肢から離れた位置に装着する場合と比べて、デバイス動作時に生じる人体とデバイス系全体の重心位置の変化を小さく抑えることができる。その結果ユーザーの姿勢が崩れにくくなり、動作中の動的安定性を維持しやすくなる。この際、基盤には、作製した触手の根本部分と、Arduino やモータなどのデバイスの制御機構など、触手の動作に必要な部品を取り付けつつ、身体への負担を減らす必要があったことから、耐久性に優れ加工が容易な MDF ボードを選択した。MDF ボードの大きさは縦 30cm、横 20cm とした。図 4.9 のように、この MDF ボードに腰用のサポーターを 2 つ取り付けることで、胸のあたりと腰のあたりに巻き付け、身体に固定することとした。



図 4.9: サポーター 2 つでデバイスを装着

第 5 章 結果

本グループでは、触手型デバイスの駆動方式として、ワイヤー式を採用し、作製を行った。また、このデバイスを 2 週間で合計 20 時間、被験者に装着させ、最終的に評価実験を行わせることで、触手型デバイスの身体拡張インタフェースとしての評価を行った。装着期間中、初期段階では触手型デバイスの操作に不自然さが見られた。しかし、装着時間の増加に伴い、物体を把持する際に手で把持しようとする動作と同様の動作が触手型デバイスでも行われるようになり、デバイスへの適応が進行していることが確認された。以下に評価実験の結果を示す。

5.1 把持実験の結果

作製したデバイスの把持性能を検証するため、様々な形状の物体で図 5.1-図 5.4 のように、机の上に対象物を置いた状態での把持実験を実施した。その結果、図 5.4、図 5.5 のようにペットボトルを始めとし、人形や球状の物体を持ち運ぶことができた。また、繰り返し実験を行うことで、被験者から、デバイス本体や把持する対象が見えないにも関わらず、背面にある物体を持ち上げることが可能となった。



図 5.1: 把持実験 1



図 5.2: 把持実験 2



図 5.3: 把持実験 3



図 5.4: 把持実験 4

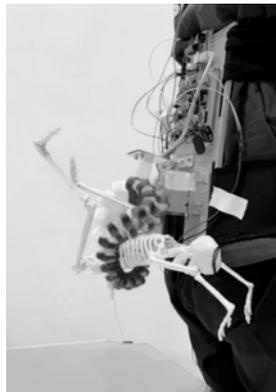


図 5.5: 人形を把持している様子

5.2 被験者の評価

把持実験の中で被験者から触手型デバイスの使用感について評価を行わせた。その結果、被験者が触手型デバイスを視認していない状況下でも、触手が伸びきった状態と巻き上げた状態の重心の違いによって触手が動いていることが認識できた、腰への圧力により、物体を把持していることを認識できた、試行回数を重ねることで思い通りに動かすことができた、という評価が得られた。

第 6 章 考察

6.1 触手の動作について

触手全体の動作方式としては、4.2.1 で前述の通り、1 本のワイヤーをモータで引っ張ることによって動作させた。これにより、根本から螺旋を描きつつ巻き上げることが可能であると考えた。その想定に対し、連続してデバイスを使用すると、触手がねじれてしまうことや、先端から巻いてしまうことがあった。これは、触手のそれぞれのユニット間の隙間が均等でないことや、ワイヤーがねじれた状態で巻き上げてしまうことがあったことが原因であった。このことから、それぞれのユニット間に椎間板のようなものを取り付ける必要があると考えた。これにより、ユニット間の隙間が均等に固定される且つ、ワイヤーの初期状態でのねじれを低減することができるようになり、触手の滑らかな動きを維持しつつ、デバイスを連続で使用しても、根元から巻き上げることが可能になると考えられる。

6.2 把持動作

把持実験の結果から、作製した触手型デバイスは、様々な物体を持ち運ぶことが可能であった。これにより、筋電義手の機構として採用することができる。しかし、物体にかかる力が強く、ガラス製の物体のような割れやすいものは持ち上げることが困難であった。これは、触手の巻き付きを強くし、物体の把持を安定させるため、トルクの大きいモータを使用したことが原因であった。そこで、触手の素材をやわらかい樹脂に変更することで、物体の把持に最低限必要なトルクを超えても、触手側が変形することで、この問題を解決することができると考えられる。

6.3 身体拡張の可能性について

足の筋電位を計測することでの操作の際には、歩行や起居などの被験者が意図していない場面でも、筋電位が発生するため、触手が動いてしまう問題があった。そこで、プログラム上で、筋電位信号が閾値を一定時間超えることで動作させるよう対策することで、被験者の意図通りに動くようになった。これにより、足の筋電位を計測することでの操作も可能となり、両手が塞がっている状況下でも、触手型デバイスを使うことができた。このことから、物の運搬やドアの開閉等の、他の日常動作の補助も可能になると考えられる。一方で、このプログラムを採用することで、装着者とデバイスが動作するまでにラグが生じてしまい、身体感覚を得るのが遅れるという問題がある。そのため、閾値の調整や、動作させるまでの時間を調整することでこの問題を解決することができると考える。

また、被験者の評価から、触手型デバイスの装着を続けることで、人の体に備わっていない部位である触手に対しても、新たな身体の一部として認識できることが確認できた。

第 7 章 結論

本プロジェクトでは、身体拡張の可能性を探求することを目的とし、触手型デバイスの開発を行った。その結果、作製した触手型デバイスを用いて、様々な形状の物体を持ち運ぶことが可能であった。また、デバイスの装着者からは、デバイスを身体の一部として扱うことができるといえる評価を得ることができた。これらの結果から、触手の場合に限っては、身体感覚を得ることができたといえる。また、鳥のような翼やバッタのような脚といった人が本来、有していない身体構造を模したデバイスであっても、筋電位を利用し装着者の意図通りに動かすことができるようにすることで、それらを従来の身体機能と同様に、身体の一部として操作できる可能性を期待できる。以上より、触手型デバイスの開発を通して、身体拡張の可能性を探求するという本研究の目的を達成できたと結論付けた。

参考文献

- [1] Tai Hoang. Autonomous soft hand grasping - Literature review. Technical University of Munich,2022 <https://arxiv.org/pdf/2203.04762>
- [2] 渡辺哲陽.” 物体把持・操作のためのロボットハンド”. 日本ロボット学会誌, 第 40 巻第 5 号,pp.363 368, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj/40/5/40_40_363/pdf
- [3] SpiRobs: Logarithmic spiral-shaped robots for versatile grasping across scales [https://www.cell.com/device/fulltext/S2666-9986\(24\)00603-3](https://www.cell.com/device/fulltext/S2666-9986(24)00603-3)
- [4] Active entanglement enables stochastic, topological grasping <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2209819119>

付録 A ソースコード

A.1 Arduino を稼働させるためのコード

```
include < Servo.h >
define MOTORIN1 3
define MOTORIN2 5
define EMGPIN A0
const int samples = 10; // 平均を取るサンプル数
int emgValues[samples];
int index = 0;

void setup()
pinMode(MOTORIN1, OUTPUT);
pinMode(MOTORIN2, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
void loop()
int rawValue = analogRead(EMGPIN);
emgValues[index] = rawValue;
index = (index + 1)
// 平均値計算
long sum = 0;
for (int i = 0; i < samples; i++) sum += emgValues[i];
int avgValue = sum / samples;
// 筋電位の値をプリント
Serial.println(avgValue);
int thresholdForward = 200; // 閾値
int thresholdReverse = 600; // 閾値
int sustainTime = 1000; // 1s 以上で動作する
static unsigned long aboveTimeForward = 0;
static unsigned long aboveTimeReverse = 0;
// — 正転条件 —
if (avgValue >= thresholdForward && avgValue < thresholdReverse)
if (aboveTimeForward == 0) aboveTimeForward = millis();
if (millis() - aboveTimeForward < sustainTime)
digitalWrite(MOTORIN1, LOW);
digitalWrite(MOTORIN2, HIGH); // 正転
aboveTimeReverse = 0; // 逆転タイマーはリセット
// — 逆転条件 —
else if (avgValue <= thresholdReverse)
```

Body augmentation interface using biologic signals

```
if (aboveTimeReverse == 0) aboveTimeReverse = millis();
if (millis() - aboveTimeReverse > sustainTime)
digitalWrite(MOTOR_I N1, HIGH);
digitalWrite(MOTOR_I N2, LOW); //逆転
aboveTimeForward = 0; // 正転タイマーはリセット
// — どちらでもない (静止) —
else
aboveTimeForward = 0;
aboveTimeReverse = 0;
digitalWrite(MOTOR_I N1, LOW);
digitalWrite(MOTOR_I N2, LOW); //停止
delay(20);
```