

## 生体信号を利用した生体拡張インターフェース～ASHURA～

Body augmentation interface using biologic signals ASHURA

プロジェクトリーダー：山口拓海/Takumi Yamaguchi

### 1 背景

人類の歴史は、身体的な制約を道具によって補完することで、種の存続と発展を遂げてきた過程と言える。しかし、従来の道具利用は身体の外部に留まる「補完」に過ぎず、身体構造そのものを超えるような機能の獲得には至っていない。これに対し近年、デバイスを身体システムの一部として取り込み、外部ツールの利用から「身体拡張」へと変容させる試みが注目されている。本プロジェクトでは、この身体拡張の概念に基づき、人間に本来備わっていない器官や機能を付与することで、装着者の行動変容の可能性を追求する。そのための制御信号として、随意性の高い筋電位を制御信号として採用する。筋電位は、脳や脊髄からの電気信号が運動神経を通じて筋肉を収縮させる際に発生するものであり、装着者の意図を反映させやすいという利点がある。また、操作の習熟を通じて、デバイスを自身の身体の一部として知覚する特性を持つ。この筋電位を適切な制御信号に変換し、筋肉の活動強度に応じた操作を可能にすることで、身体機能の制約がある状況や両手が塞がっている場面でも、直感的な操作を実現できる。これにより、人間の行動や表現能力そのものを拡張することを目指す。本プロジェクトでは、具体的なアプローチとして「義手班」「触手班」「表現班」の3グループに分かれ、それぞれの側面から開発を行った。

### 2 課題設定と到達目標

以下に、各グループが設定した課題と到達目標について記述する。

#### 2.1 義手班

本研究の目的は、様々な形状の物体をその形状に沿って把持でき、使用者が物体を掴んでいることを直感的に認識できる義手システムの開発をすることである。従来の筋電義手では、視覚による確認への依存

が大きく、把持状態を直感的に把握することが困難である。この問題を解決するため、本研究では圧覚に着目し [5]、圧力変化を再現する感覚フィードバック機能を筋電義手に付加することを課題とする。圧力変化の再現として、感覚受容部と感覚提示部として柔軟な密閉容器2つをチューブで接続した感覚フィードバック構造を使用した。この構造はパスカルの原理に基づき、片側の容器に圧力が加わった際にもう一つの容器に空気が流れ膨張し、圧力が抜けると容器自体の弾性力により元の形状に戻るという特性をもつ。この仕組みを利用することで、簡易かつ低遅延な圧力伝達を実現できると考えた。また、筋電義手の駆動方式として、空気圧を利用して収縮・弛緩する特性を持ち、指の動きが対象物の形状に適応しやすいマッキベン型人工筋肉を用いる。筋電位計測によって得られた信号に基づいて空気圧制御を行い、指の動作を制御する。

#### 2.2 触手班

人間の身体は日常動作を遂行するための基本的な機能を備えているが、構造的制約により多様な環境や形状に適応した作業には限界がある。特に、把持動作においては、人間の手は関節構造に依存するため、複雑形状・不定形・柔軟物体への適応は困難である。一方、タコやイカなどが持つ触手は関節を持たず筋肉のみで構成され、対象物に巻き付くことで接触面積を増やし、形状に依存しない安定した把持を実現している。このような生物的特徴は、従来の剛性ロボットハンドでは機構の複雑化や制御自由度の増加を必要とするため再現が難しい。ソフトロボティクス分野では柔軟素材を用いることで環境との接触を利用した適応的動作が可能であるが、「触手型構造による巻き付き把持」と「ユーザーの動作意図を直接反映した直感的操作」を両立した日常支援デバイスは十分に確立されていない。したがって本研究では、触手型デバイスを製作し、人間の身体に装着した時、行動にどのよう

な変化が起こるのかを探求する。本研究の最終的な到達目標は、「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し、多様な物体に巻き付きながら安定把持を行う触手型デバイス」を実現することである。

### 2.3 表現班

本課題では、ドラム演奏において両手両足を同時に使用するという特性が、演奏中に扱える音数や表現の幅に制約を与えている点を課題として設定した。特にライブ演奏や即興演奏の場面では、演奏者が新たな音を追加したいと感じても、操作可能な身体部位が残っていないことが表現上の限界となる。そこで本研究では、従来演奏に用いられてこなかった「顔」に着目し、表情筋から得られる筋電位を新たな演奏入力として利用することで、身体拡張による演奏自由度の向上を目指した [1]。到達目標としては、顔の筋肉を意図的に動かすことで、手足とは独立して音を発生させられること、また演奏中の誤検出が少なく、実用的なタイミング精度で操作できる演奏インターフェースを構築することを設定した [4]。

## 3 課題解決のプロセスとその結果

本プロジェクトでは、最初に筋電位に関する講義が担当教員によって行われた。その後、筋電位計測回路と筋電位計測に使用する電極の製作方法に関する講義が行われた。担当教員による講義が終了すると、各グループで成果物の設計及び製作などの活動を行った。以下に各グループの課題解決プロセスとその結果を記述する。

### 3.1 義手班

本製作物では、ゴムチューブと繊維スリーブから成るマッキベン型人工筋肉を駆動源とする筋電義手を開発した。空気圧による人工筋肉の収縮でPEラインを牽引し、指を屈曲させて把持を行う仕組みである。あわせて、物体との接触を装着者に伝えるフィードバック装置も搭載した。これは、手のひらの「感覚受容部」が圧縮されると、空気圧の変化がチューブを介して上腕の「感覚提示部」に伝わり、皮膚感覚として把持を認識させる密閉システムである。検証のため、形状の異なるピン、テニスボール、ワイングラスの把持実験を行った結果、いずれも物体の形状に沿った適切な把持が可能であった (図1~3)。また、把持の際に装着者が上腕への圧力を知覚できることも確認され、形状への適応性と直感的な感覚提示の両立を

実証した。

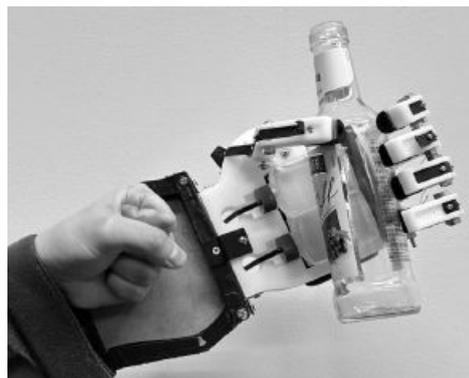


図1 ピンを把持したときの様子

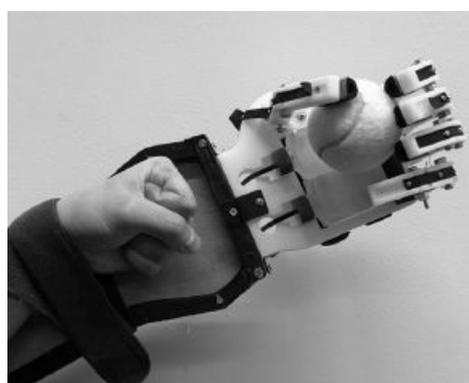


図2 テニスボールを把持したときの様子



図3 ワイングラスを把持したときの様子

### 3.2 触手班

本グループでは、前期に圧力式とワイヤー式の2方式の駆動方式を試作して比較を行い、把持動作の成立および安定性について複数の課題が明らかとなった。そこで後期では、前期で明らかとなった問題点を基に、実際の動作性能の向上を目的とした改良を行った。まず駆動機構に関して、前期で使用したサーボモータは回転角に制限があり、触手が十分に巻き付く

前に動作が停止してしまうという問題があった。さらにトルク不足により、物体に密着するほどの曲げ力が得られなかった。この課題に対し、後期では駆動部を DC ギヤードモータへ変更した。これにより回転角の制限が解消され、ワイヤーを連続的に巻き取ることが可能となった結果、触手全体が滑らかに湾曲し、螺旋状に物体へ巻き付く動作を実現した。また、前期モデルでは触手の長さが不足していたため物体への巻き付き量が不十分であり、接触面積の小ささからグリップ力が不足していた。この問題を解決するため、触手全長を約 50cm まで延長するとともに、先端部に液体ゴムを塗布し摩擦力を高めた。その結果、物体に対する巻き付き回数が増加し、接触面積が拡大したことで、把持時の安定性が向上した。また、柔らかい物体に対しても圧力が分散され、過度な力を加えずに保持できることを確認した。一方、空気圧式触手については、シリコン内部の空洞構造によって屈曲を生じさせる設計を行ったものの、想定した変形量が得られず、安定した駆動および把持を実現することができなかった。このため、本研究では後期以降の開発対象をワイヤー式に限定する判断を行った。以上の改良を通じて、前期に確認された主要な課題を解消し、多様な形状に巻き付きながら把持可能な触手型ソフトロボットハンドを実現した。

### 3.3 表現班

本課題では、顔の筋肉をドラム演奏の新たな入力手段として成立させるため、システム全体を段階的に構築し、実際の演奏を想定した検証を行った。まずフェーズ 1 として、顔の筋電位信号を Arduino で取得し、一定の閾値を超えた場合に演奏トリガを生成する制御処理を実装した。信号の取得にあたっては、微弱な筋電位を安定して増幅・平滑化するための回路構成を検討した [2]。このトリガを MIDI 信号として PC に送信し、DAW 上で電子音を再生することで、顔の動きが演奏操作として機能するかを確認した。検証の結果、手足で基本的なリズムを刻みながら、顔の動きによって追加の打音を発生させることが可能であり、従来の演奏操作を妨げることなく新たな操作自由度を付加できることが明らかとなった。次にフェーズ 2 では、フェーズ 1 で確立した入力判定および制御処理を基盤として、物理的な打音を出力する機構を追加した。Arduino からの制御信号によりソレノイドを駆動し、ドラムスティックを実際に動作させることで、電子音にとどまらない実体的な演奏拡張を実現した。実験では、演奏中に顔の筋活動に応じた打撃が安

定して行われ [3]、通常のドラム演奏と併用しても演奏感を大きく損なわないことが確認された。これらの結果から、本システムは顔という未使用部位を演奏入力として転用する身体拡張インターフェースとして、実演奏に適用可能な有効性を示した。

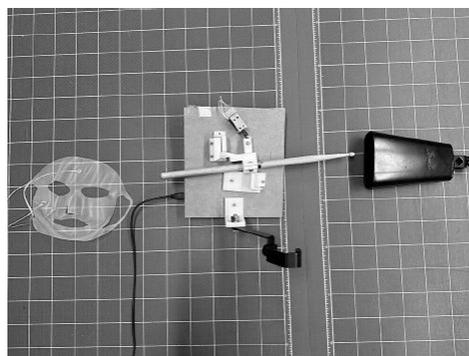


図 4 FaceDrum

## 4 今後の課題

以下に、各グループの今後の展望について記述する。

### 4.1 義手班

検証結果から、圧力が弱い場合、装着者が把持しているにもかかわらず、把持していないと誤認してしまう可能性がある。したがって、感覚受容器の材質の変更や取り付け位置の再検討など、上腕に十分な圧力を伝達できるようフィードバック機構の構造を改善する必要がある [6]。また、筋電義手の装着性を向上させるために、装着がしやすく固定できる方法の再検討、土台素材の軽量化、構造の縮小化など設計の改善が必要であると考察した。

### 4.2 触手班

結果として、筋電位を用いてデバイスを動かすことに成功した (図 5)。また、作製したデバイスで把持実験を行った。その結果から、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。また、デバイスの装着者に評価を行わせ、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。以上の結果から、到達目標であった「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し、多様な物体に巻き付きながら安定把持を行う触手型ロボット」は達成できた。今後の課題としては、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ることが挙げられる。この課題は、触手の

素材をやわらかい樹脂等に変更することで、解決できると考えている。



図5 ペットボトルを把持している様子

### 4.3 表現班

本研究により、顔の筋電位を用いたドラム演奏の拡張可能性が示された一方で、今後の課題として、まず意図しない誤検出や応答の遅れが発生する点が挙げられる。誤検出については、筋電位信号をオン・オフのトリガとしてのみ扱う手法に起因すると考えられ、今後は筋電位の振幅情報を利用した連続的な制御を導入することで [4]、課題の解決やさらなる表現の拡張が期待される。また、入力から出力までの遅延については、ソレノイド駆動に応答速度や駆動力に物理的な制約があることも原因として考えられるため、他のアクチュエータの検討や機構設計の改良も必要である。また、評価方法についても、本研究では、主観的評価にとどまっているため、性能指標を明確にし、定量的な評価を行うことも重要な課題である。これらを改善することで、より実用性と表現力の高い身体拡張インターフェースへと発展させることができると考えられる。

## 5 参考文献

### 参考文献

[1] 暦本純一. 人間拡張が築く未来. 東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究, 2021. (100), pp.19-45.

- [2] 妹尾勝利, 小林隆司. 肘関節運動を力源とした前腕能動義手制御システムの開発 (第1報). 日本義肢装具学会誌, Vol.25, No.4, pp.216-220, 2009
- [3] 菅原徹 (2014). 笑顔の形状と表情筋活動の分析. 可視化情報学会誌, 34(133), 14-19.
- [4] 福田修, 島圭介, 辻敏夫. 筋電位を用いた人間支援機器とその可能性 ~音楽演奏への挑戦~. 2011. 計測と制御. 50, 10, pp895-900
- [5] 一般社団法人 日本機械学会, <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=17:1000151> (最終アクセス日: 2025/7/17)
- [6] 森田高州, 菊地毅, 石井千春, ”筋電義手のための感覚フィードバック装置の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2014 巻