

生体信号を利用した身体拡張インタフェース ～ASHURA～

Interface using biosignal to augment body ～ASHURA～

福留 康介 Kousuke Fukudome

1. 背景

本プロジェクトでは、長年にわたって身体拡張インタフェースの開発を行っている。身体拡張とは、義手やロボットスーツのように人間の運動能力や感覚をテクノロジーによって拡張することである。我々は、身体拡張の満たすべき条件について「自身の身体の一部であると認識できること」であると考え、装着者の意図と連動した身体拡張インタフェースを製作することが必要であると考えた。そこで、我々は、デバイスの制御入力として、生体信号の一つである筋電位に着目した。筋電位とは筋繊維が収縮するときに発生する活動電位である。筋電位を制御入力に使用することで、装着者の意図を読み取り、直感的な制御が可能になると考えた。また今年度は、身体部位の中でも手に着目した。人間の手は身体から外界への活動に際して、重要な役割を果たすため、手が不自由になった場合は日常生活に大きな制限が生じると考えた。そのため、今年度のプロジェクトでは、「筋電位を利用した身体拡張インタフェースを製作し、拡張部分を自身の身体の一部として認識すること」を目標として、二つのグループに分かれて「全指欠損者を対象とした5本指を独立に動かすことができる筋電義手」と「片手が不自由な人を対象としたつまむ機能を拡張する親指型デバイス」を製作した。

1.1. 5本指を独立に動かすことができる筋電義手

身体の不自由な部位を補完することを目的とした身体拡張の一つとして、義手がある。義手は使用目的によって装飾義手・能動義手・筋電義手の3種類に分類される。中でも、筋電義手は、義手を駆動する動力の制御入力として筋電位を使用する。手を動作させるための筋肉のほとんどは手ではなく前腕部に存在するため、手を切断していても、手を動かすための筋肉は残っている可能

性がある。手を動かすための筋肉が残存している場合、それらの筋肉の筋電位を制御入力として用いることで、手の握り開きをするイメージで義手を制御することができる。そのため、装着者は直感的な制御が可能になると考えた。

1.2. つまむ機能を拡張する親指型デバイス

近年、身体を拡張する研究が多く行われている。例えば、生来の手に人工の指を「第6の指」として追加する研究がある[1]。この研究では筋電位を利用した独立制御可能な人工指を装着することで、それを自身の身体の一部として感じるか否かを調べるための実験が行われた。結果として、被験者全員がこの人工指を使いこなすことができた。この研究では、筋電位を利用した制御の人工指を思い通りに動かせることにより、自らの身体の一部として認識したといえる。類似した研究として、「第3の親指」を追加した研究もある[2]。この研究では身体を拡張するデバイスが脳における身体のイメージにどう影響するのか調べるための実験が行われた。実験の結果、訓練を行うと、かなり高度に第3の親指を使いこなせることが明らかになった。そこで本グループでは、身体部位の中で人間の手に着目し、手で行う動作の中でも、つまむ動作に着目した。つまむ動作は応用の利く範囲が極めて広く、物の把持や開閉など、日常生活の様々な場面で多く用いられている。そのため、片手が不自由になった場合、両手でつまむ動作ができなくなるため、日常生活に制限が生じる。ここで、身体拡張の観点に基づき、親指の本数を増やすことで、つまむ能力をより発展させることが可能となる。具体的には、片手が不自由な人の不自由な手を補うのではなく、使い慣れている手に親指を増やし、つまむ動作を二つ行うことによって、片手で多

くのものを持したり、片手でリボン結びを行うなど、日常生活がより便利になるのではないかと考えた。

2. 課題の設定と到達目標

本プロジェクトでは、「手に着目した身体拡張を行い、拡張部分を自身の身体の一部として認識すること」をプロジェクト全体の目標として掲げて活動を行った。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. 5本指を独立に動かすことができる筋電義手

本グループは、今年度の被験者である左手全指欠損者に必要とする義手の構造と機能についてのヒアリングを実施した。その結果より、全指欠損者の欠損している5本の指先の動きを筋電義手で自身の身体の一部であるかのように再現し、残存部位を活かして5本指を独立に動かすことによって、指が欠損している手でも多様な動作をすることができる筋電義手の開発が必要であると考えた。そこで我々は、5本指をそれぞれ独立に動かすことができる全指欠損者向けの筋電義手を製作することによって、装着者の指先の動きを自身の身体の一部であるかのように再現して身体を拡張することを目標とした。そして、この目標を達成するために、次の四つの構造・機能を実現することを課題として設定した。①機械学習によって32通りに信号を識別し動作する機能、②装着者の欠損している指の位置に再現した指があると感じることができる構造、③義手を装着した状態で自由に移動することができるように、バッテリーのみで動く構造、④日常的に義手を使用しても疲れないような軽量な構造。

2.2. つまむ機能を拡張する親指型デバイス

本グループは、筋電位を利用した片手のつまむ動作を拡張する親指型デバイスの開発を目標とした。そして、評価実験によって、次の二つを明らかにすることを目的とした。①親指型デバイスに身体との一体感が生まれることを示す、②親指型デバイスが片手のみで2点をつまむデバイスとして適しているかを示す。そして、目標を達成するために、次の三つを課題として設定した。①デバイスの曲がる方向や曲がる角度、手に装着する向き、固定方法を考慮して設計する、②正確に筋電位を計測するため回路を用いた計測の安定性を向上させる、③自身

の指とデバイスの指部分の動作との間に発生するタイムラグを解消する。

3. 課題解決のプロセスとその結果

本プロジェクトでは、最初にプロジェクトメンバーが担当教員から筋電位に関する基礎知識を学ぶために、講義を受けた。その後、筋電計測回路と計測に使用する電極の製作方法に関する講義を受けた。そして、各グループで必要な知識・技術に関する勉強会等を行い、得た知識や技術を基に課題解決に向けて、成果物の設計を行い、組み立てやプログラム製作などの活動を行った。その後、成果物を実際に被験者に操作してもらうことによる評価実験を行った。各グループの詳細な課題解決プロセスとその結果を以下に記述する。

3.1. 5本指を独立に動かすことができる筋電義手

本グループでは、製作物として図1に示されている「5本指を独立に動かすことができる筋電義手」の製作を行った。今年度の被験者である全指欠損者の手の形に合った構造にするため、筋電義手で再現する指の位置を欠損している指の位置の高さに合わせた。そして、義手を装着した状態で自由に移動することができるように、バッテリーのみで駆動する構造にした。また、筋電義手を使用するためのほとんどの部品を腕や手の甲に載せないことによって、義手本体の軽量化を行った。さらに、機械学習を用いて6か所から計測した筋電位のパターンを32種類に分類することで、5本指の指折りの組み合わせで表現される32通りの手指動作を行うことができる筋電義手を製作した。そして、課題として設定した内容をどれほど達成できたかを調べるために、評価実験として動作の識別率と動作までにかかった時間を調査した。また、装着した際の重さや身体所有感等の使用感に関する聞き取り調査も行った。その結果、動作の識別率は2.5%、被験者が動作してから製作物の動作完了までにかかった時間は、6.62秒であった。被験者からの感想として「動作によってはある程度意思を反映させて動かせた」、「義手本体が重く感じた」という意見をいただいた。



図1 5本指を独立に動かすことができる筋電義手

3.2. つまむ機能を拡張する親指型デバイス

本グループでは、図2に示されている「つまむ機能を拡張する親指型デバイス」の製作を行った。デバイスの制御方法には、筋収縮の強弱を基にした閾値判別を行った。また、プログラムによって、薬指に力を入れたときのみデバイスによるつまむ動作を可能とするように制御した。そして、製作したデバイスを用いて正確につまむことができるか、つまむ力が適切か、そしてデバイスを用いて複雑な動作が可能か確かめることを目的として、評価実験を行った。始めに、デバイス操作に慣れるためのトレーニングを行ってもらった。その後、デバイスを用いてピンポン玉をつまむ、空箱を開ける、靴紐をリボン結びにする、の三つの作業課題を課した。結果として、三つすべての作業課題を達成することができた。実験後に実施した意見調査では、「操作に慣れるとデバイスを思い通りに動かすことができ、片手では行えない動作を行うことができるのが良かった」、「薬指と小指が一緒に動いてしまうときのような感覚が、デバイスにも感じられた」、という意見が得られた。

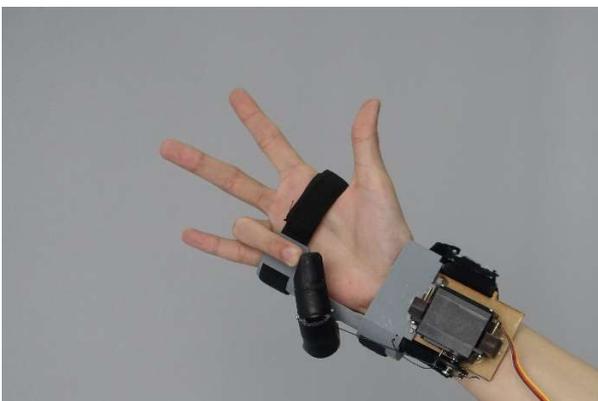


図2 つまむ機能を拡張する親指型デバイス

4. 考察

両グループに共通して、今年度のプロジェクトの目標である「手に着目して身体拡張を行い、拡張部分を自身の身体の一部として認識すること」を意識して身体拡張インタフェースを製作することができたと考えられる。しかし、成果物を自身の身体の一部として使用するには問題点・改善点が多い。そこで、各グループの結果を基に行った考察を以下に記述する。

4.1. 5本指を独立に動かすことができる筋電義手

機械学習によるパターン識別方式を用いて、テストデータに対する32動作の識別率39%を達成することができた。しかし、実験の際には識別率が2.5%と低い結果となった。実験を行った際の電極の貼付位置が原因であり、貼付位置を一定にすることで改善されると考えられる。

被験者が動作を意識してから、製作物が動作するまでの時間が約6.62秒と長かった。識別にかかる時間が長かったことが原因であり、識別時間を短くすることで改善できると考えられる。

義手によって再現する指の位置を、欠損した指の位置の高さに合わせて設計することで、装着者が義手を自身の身体の一部と感じる工夫をすることはできた。しかし、指を屈曲する動作が十分に行うことができない結果となった。力の加わる向きを考慮せずに設計したことが原因であり、設計を見直す必要がある。

実験や成果発表会の際には、安定化電源を使用せずに、バッテリーからの電源のみで動かすスタンドアロン型を実現することができた。しかし、成果物を鞆に収納することができなかった。配線が複雑であったことが原因であり、配線をまとめる必要がある。

比較的軽量のサーボモータを使用したり、マイコンやバッテリーなどの重いものを腕に載せないような構造にすることで、日常的に義手を使用しても疲れのない軽量な構造にすることはできたと考えられる。しかし、実験後に被験者から「義手本体が重たく感じた」という意見をいただいたことから、十分に課題を達成することはできなかった。手の甲にすべてのサーボモータを載せたことが原因であり、より軽量のモータに変更する必要がある。

4.2. つまむ機能を拡張する親指型デバイス

本グループでは、評価実験における意見調査の結果から、「トレーニング次第でデバイスを思い通りに動かすことができ、デバイスの動作を通して自分の身体を動かしている際の感覚を感じることができる」という成果が得られた。このことから、使用者は親指型デバイスを使用することでデバイスに対し身体との一体感を感じ取ることができ、身体感覚という側面で身体拡張が可能となると言える。

一方で、評価実験の結果から、二つの問題点が挙げられた。一つ目は、トレーニングを行い、デバイスを使用した場合においても、二か所紐をつまんだ状態で行う紐を引っ張るという行為が困難という問題である。この原因として、親指以外の指は屈曲させた状態において指の外転・内転が困難となることが考えられ、結果として紐を二か所つまんだ状態のまま自身の指を動かさず、リボン結びにおける紐を結ぶという行為が困難となったと推測できる。改善策として、自身の指の屈曲を最小限にした状態で、デバイスの指部分を用いて紐をつまむことが可能となれば指の外転・内転を行うことが可能となると推測できる。二つ目は、自身の指を動かしてからデバイスが動くまでにタイムラグが生じるという問題である。この原因として、制御プログラムにて設定した閾値の調節が適正でないことであると推測できる。改善策としては、閾値の調節が挙げられる。

5. 今後の課題

両グループに共通する今後の課題として、成果物の動作が安定しないということが挙げられた。中間発表会の際には、主に筋電計測回路が正常に機能しなかった。そのため、後期は基板上に筋電計測回路を製作した。しかし、後期の製作物の仕組みは前期以上に複雑であり、回路以外の様々な部分で不具合が多発した。そのため、スケジュールが押ししまい、時間に余裕がなくなってしまった。このことから、両グループに共通して、スケジュール管理が十分にできていなかったことが課題として挙げられる。スケジュールを頻繁に見直し、余裕をもって行動することが必要であったと考えられる。以下に、各グループの今後の展望についての詳細を記述する。

5.1. 5本指を独立に動かすことができる筋電義手

本グループは、5本指を独立に動かすことができる全指欠損者向けの筋電義手を製作することはできたと考えられる。しかし、筋電義手の指先の動きを課題として設定した動きに十分に近づけることはできなかった。考察で述べた目標を達成することができなかった原因を解決するためには、構造面や機能面で様々な改善を行う必要がある。今後は、構造面ではワイヤの通し方等に関する具体的な設計を見直し、検討する必要がある。また、機能面では識別するアルゴリズムを変更する、教師データを増やす等の工夫をする必要がある。さらに、今後の展望としては、5本の指先の多様な動きの実現に向けて自由度を増やすために、パターン識別方式以外の制御方式を用いる方法や識別率を上げる方法を検討する必要があると考えられる。

5.2. つまむ機能を拡張する親指型デバイス

現段階では、製作したデバイスは片手のみで2点をつまむデバイスとして未だ適していないと考えられる。そのため今後の課題として本グループでは、問題点を解決するための改善を行う必要がある。一つ目の問題点である、二か所紐をつまんだ状態で行う紐を引っ張るという行為が困難であることについては、デバイスの指部分の長さを伸ばし、親指型デバイスに外転・内転の機能を追加することで改善できると考えられる。また、二つ目の問題点である、自身の指を動かしてからデバイスが動くまでにタイムラグが生じることについては、最も誤作動が少ない閾値の組み合わせを算出することで、改善できると考えられる。これらの問題点を改善することによって目的の達成に近づくと考えられる。

参考文献

- [1] 梅沢昂, 鈴木悠汰, Gowrishankar Ganes, 宮脇陽一, “Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study”, *Nature*, 2022, 12(2339)
- [2] Paulina Kieliba, Danielle Clode, Roni O. Maimon-Mor, Tamar R. Makin, “Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation”, *SCIENCE ROBOTICS*, 2021, 6(54)