

[研究助成 (S)]

使い心地を認識し人と一体化するロボット制御技術の開発

Development of robot control that integrates with humans

2188001



研究代表者	東京工業大学 科学技術創成研究院	教授	小池 康 晴
共同研究者	東京工業大学 科学技術創成研究院	准教授	吉 村 奈津江
	東京工芸大学 工学部	准教授	神 原 裕 行
	NTT コミュニケーション科学 基礎研究所		高 木 敦 士

[研究の目的]

本研究は、義手などにおいて、身体の機能を補綴するだけでなく、第6の指、第3の手など人間の身体を拡張した場合でも、それらの機械が身体の一部のように操作できるようになることを目的とする。この技術が実現すると、人間と機械が一体となり、機械を意識することなく身体の一部として認識し、操作できるようになる。すなわち人間の能力を拡張することが可能となる。身体の一部を自身の一部として認識しているのは脳であり、また機械を操作するのも脳である。脳の運動制御機構を拡張することにより、機械を身体の一部として操作する技術を実現し、考えただけで機械が動かせるようになると考えている。

超高齢化社会を迎え体の衰えは避けられず、特に上肢の機能が失われた場合には日常生活において困難を感じる機会が増えてくる。不自由になった身体に慣れるまでには長い年月が必要になる。

これまでの機能を代替する装置としての選択肢が少なかったため、リハビリテーションなどにより機能回復を目指していた。しかし、新しい身体を手に入れることができれば、失われた

機能がすぐに復活することになる。そのためには短時間で使い方を覚えられ、新しい身体を、元の身体と同じように動かせることが重要になる。

また、失われた自由度が多ければ多いほど、それらの自由度を組み合わせた動きをすることが難しくなる。この問題を解決するために、脳が行っている仕組みを使うことを試みた。脳は身体を動かすために、800個以上の筋肉に指令を与えている。筋肉一つ一つに個別に指令を与えるのではなく、まとまった筋肉群に指令を送ることで、運動制御の負荷を下げているのではないかと考えられている。このような制御は生まれながら獲得しているのではなく、環境との相互作用の中で、学習によって構築されている。

本研究では、このような脳の機能の実現を目指して、多自由度の義手を思い通りに操作するためのシステムを構築した。また、脳活動から運動意図を推定することで、考えただけでロボットを動かすことを可能にするデコーダの構築も行った。

〔研究の内容、成果〕

1. 筋電図から動きの推定

1.1 深部の筋活動計測

解剖学的に見ると、図1に示すように、手首を動かす筋肉は表面に多く存在し、表面に設置した電極から信号が局所的に計測できる。一方、指を動かす筋肉は深部に多く存在し、表面に設置した電極からは、局所的ではなく、距離が同程度の場所では同じように計測できる。このため、図2に示すように、表面に添付した電極では、これらの信号が混合して計測されることになる。音声などで音源分離のために用いられる独立成分分析（ICA）を用いると、計測された

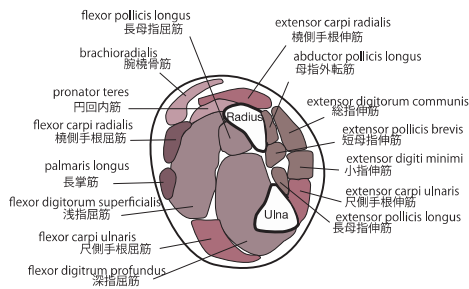


図1 前腕の筋肉の配置

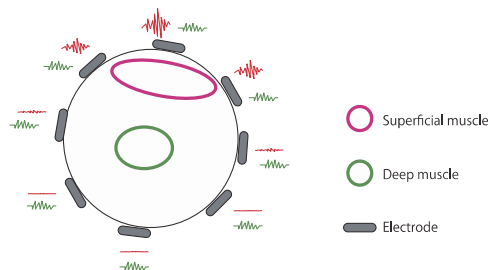


図2 電極で計測できる筋活動

信号から独立性の高い信号が分離して取り出されることから、多数の電極で計測した筋活動にICAを適用した。これにより、得られた信号から、ノイズ成分を取り除くことも可能となる。

図3に、96チャンネルの電極を腕に等間隔に装着した様子と計測された筋活動を示す。

また、ICAを適用した結果と選択結果について図4に示す。

1.2 筋シナジー抽出

ICAによって得られたコンポーネントは独立して活動する筋肉活動を捉えている。このため、電極の数だけICコンポーネントが抽出されるが、ノイズなどの成分を除くと、タスクに応じて活動する筋活動が抽出されていることになる。

一つ一つの筋活動から動きを識別しようとする、手首を動かしているのか、指を動かしているのか区別することが困難であったが、この手法を用いると手首の動きと指の動きを分離して精度よく動きを推定することが可能となった（図5）。さらに、筋シナジーを用いることで指が発生している力の推定も行うことが可能となった。

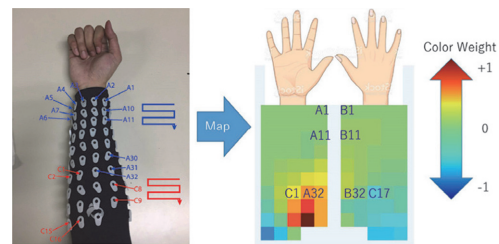


図3 脳波用96チャンネルの電極の配置と筋活動の様子

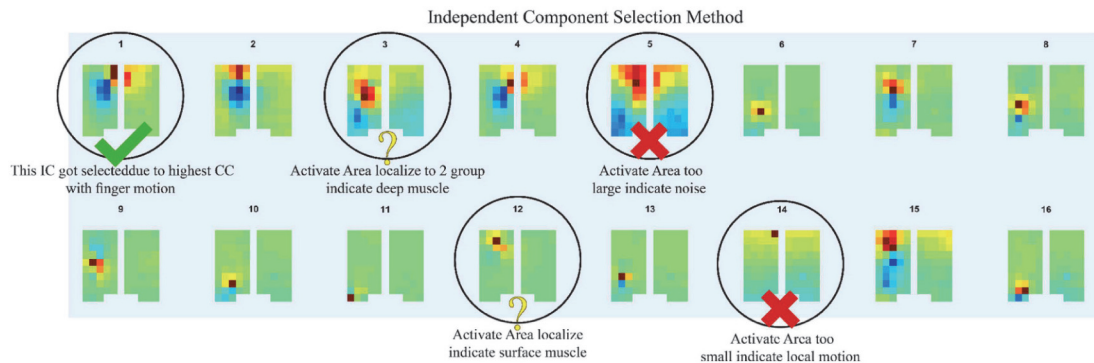


図4 抽出された独立成分とその選択結果

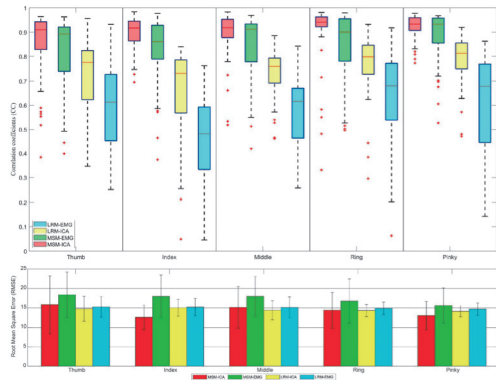


図5 各指毎の推定精度

2. リアルタイムロボット制御

これまでの電動義手は曲げる・伸ばすといった動作を識別し制御を行っており、正確に制御するためにはトレーニングが必要であった。トレーニングを必要とせず「思い通りに」動かすためには、切断前と同様、筋活動から関節の角度が時系列データとして推定される必要がある。このため、筋シナジーから関節の角度を計算しこの角度に従って義手を制御するアルゴリズムを構築した。筋シナジーを計算するためにはある程度まとまったデータが必要となるが、遅れなく筋シナジーを推定することが困難である。リアルタイムで動作するロボット制御のために、筋シナジーを直接計算せずに角度を推定するアルゴリズムを開発した（特許出願）。

図6に、中手指節関節（MP 関節）の運動の推定結果を示す。点線が計測データで、実線が推定値である。5秒程度継続して同じ姿勢を維持しているが、同じ姿勢であっても筋活動が減少するため、推定精度は時間とともに悪くなる傾向がある。

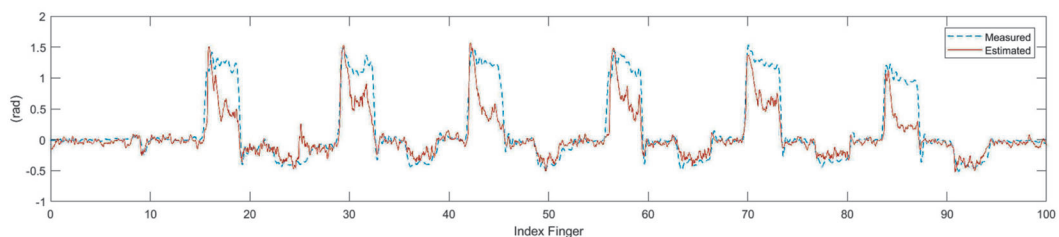


図6 指の動きの推定

3. 日常動作の再現

現在の電動筋電義手は2チャンネル程度の筋電信号を用いて指の開閉動作を行うものがほとんどである。これは、筋肉がどこに存在しているのかを特定することに解剖学的な知識を必要とすることや、切断者の場合は、残存する筋肉の場所を特定することが困難であることなどが主な原因である。また、実際のロボットの自由度が少ないため多チャンネルを必要としていない。

多チャンネルの電極を用いて筋電図を計測する場合、前章で示したように、均等に配置した電極から得られた信号から ICA などの手法を用いて筋活動を抽出することが可能となった。しかしながら、多チャンネルの電極を設置するためには長い時間を要する。このような問題を解決するために、32チャンネルの電極を前腕に均等に配置し、着るだけで多チャンネル筋活動を計測し無線で転送する装置を開発した（図7、イノベーションジャパン 2020 において展示）。



図7 開発した32チャンネル筋電計測計

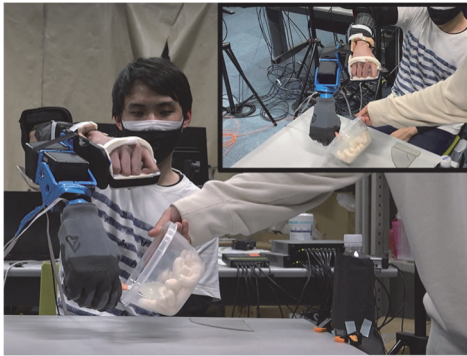


図8 日常動作

図8に示すとおり、この電極を用いて手首3自由度、指の開閉1自由度を制御する実験を行った。日常の動作を実施したところ、肘の姿勢が不自然にならずに動作を行うことができることを確認した。

4. 脳波からの運動情報推定

人は、日々の生活の中でも絶えず身体の特徴を学習して調整を行っている。筋力が衰えれば同じ重さのものであっても脳はより大きな運動指令を出す必要がある。ロボットの能力は変化しないため、例えば片方の手の筋力が下がった場合、左右の感覚にずれが生じてしまう。このようなずれが生じているのか、また、実際どのような動作を意図しているのかなどが分かれば、このような問題を解決することが可能となる。そこで、脳波から、動作を行う前にどのような情報が計画されているのかを解析した。その結果、運動の1秒前の脳活動から運動の方向と大きさを精度よく推定することができた。また、絶対的な位置情報の推定精度は悪かった。

このことから、脳は、絶対的な位置を考えて運動指令を生成していると言うよりも、相対的な位置に応じて運動指令を生成していることを示唆する結果となった。

さらに、思い通りに動かない場合を想定し、運動指令と実際の動きに差が生じたことを脳波から検出できるかどうかを確認した。手の動きに合わせてカーソルが動くように設定を行い、自分の手が見えない状態で、画面上の手の位置

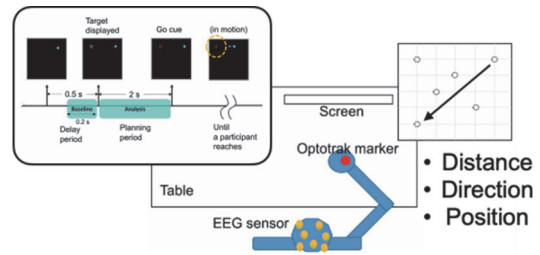


図9 脳波からの運動情報の推定

を動かしてもらった。このときランダムに手の動きに様々な時間遅れが存在する状態で、カーソルの位置が自分の手の位置から遅れているかどうかを判断してもらった。

この結果、遅れていない、あるいは遅れているかどうか分からないと答えた場合と遅れていると答えた場合を識別した結果が最も精度が高くなった。このことから、はっきりと遅れていると意識した場合に脳活動が最も変化している可能性が示唆された。この識別器を用いることで、脳がずれを認識した場合に、そのずれの感覚が生じないように制御パラメータを自動的に修正することができれば、身体の変化を読み取って自分自身の体の変化に応じてロボットを変化させることが可能となる。

[今後の研究の方向、課題]

本研究により、多自由度の義手をトレーニングなしで制御することが可能となった。また、脳活動から運動意図や意図とのずれが生じているのかを推定することが可能となった。今後は、これらを組み合わせることにより、身体が成長するに順い制御パラメータの調整を自動で行えるようなシステムを構築していく必要がある。

また、研究では主に制御の部分を開発したが、ロボットが環境との相互作用により感じるべき触覚や力覚の情報をどのように人にフィードバックするのかを重要な課題となる。現在は視覚により握っているのかを判断する必要があるが、将来的には視覚に頼らない手法の開発が必要である。

〔謝 辞〕

公益財団法人 立石科学技術振興財団からの助成に感謝いたします。

〔成果の発表, 論文等〕

展示

- [1] イノベーションジャパン 2020 大学見本市 出展

特許

- [1] 特願 2020-214629 情報処理装置, 情報処理方法およびコンピュータプログラム

論文

- [1] Takagi, A., Kambara, H., & Koike, Y. (2019). Increase in grasp force reflects a desire to improve movement precision. *ENeuro*, 6 (4), 2-9. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0095-19.2019>
- [2] Kim, H., Yoshimura, N., & Koike, Y. (2019). Characteristics of Kinematic Parameters in Decoding Intended Reaching Movements Using Electroencephalography (EEG). *Frontiers in Neuroscience*, 13 (November), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01148>
- [3] Stapornchaisit, S., Kim, Y., Takagi, A., Yoshimura, N., & Koike, Y. (2019). Finger angle estimation from array EMG system using linear

regression model with independent component analysis. *Frontiers in Neurorobotics*. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00075>

- [4] Kim, H., Yoshimura, N., & Koike, Y. (2019). Classification of Movement Intention Using Independent Components of Premovement EEG. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13 (February), 1-10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00063>
- [5] Koike, Y., Kim, Y., Stapornchaisit, S., Qin, Z., Kawase, T., & Yoshimura, N. (2020). Development of Multi-sensor Array Electrodes for Measurement of Deeper Muscle Activation. 32(3), 959-966.
- [6] Takagi, A., Xiong, G., Kambara, H., & Koike, Y. (2020). Endpoint stiffness magnitude increases linearly with a stronger power grasp. *Scientific Reports*, 10 (1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57267-0>
- [7] Kim, Y., Stapornchaisit, S., Kambara, H., Yoshimura, N., & Koike, Y. (2020). Muscle Synergy and Musculoskeletal Model-Based Continuous Multi-Dimensional Estimation of Wrist and Hand Motions. *Journal of Healthcare Engineering*, 2020.
- [8] Koike, Y., Kawase, T., Kambara, H., Schweighofer, N., & Yoshimura, N. (2020). Muscle Synergy Analysis for Rehabilitation. *Examines in Physical Medicine and Rehabilitation*, 2 (5), 1-2. <https://doi.org/10.31031/EPMR.2019.02.000520>