

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14125

研究課題名（和文）筋シナジーに基づく手指運動の低自由度表現と多指ロボットハンドの巧緻な制御の実現

研究課題名（英文）Low DOF representation of hand movements and precise control of a multi-fingered robot hand based on muscle synergies

研究代表者

山野井 佑介（Yamanoi, Yusuke）

東京理科大学・工学部電気工学科・助教

研究者番号：40870184

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は筋電義手の新しい制御手法を提案するものである。筋電位とは筋が収縮する際に発せられる微弱な電位であり、上肢を切断された方でも筋電位から手をどのように動かそうとしているのかが動作意図を抽出することが可能であり、本人の意思に基づいて義手を動かすことができる。しかしながら筋電位は非常に不安定な生体信号であるため、動作意図抽出が難しく、現状、健常の手と比べるととてもシンプルな動作しか実現できていない。それに対して本研究では最新の機械学習と画像認識型モーションキャプチャを用いて手指運動を詳細に解析することにより、各指をそれぞれ動かすことができる制御手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では筋電センサと画像認識型モーションキャプチャを組み合わせ、複数の被験者からデータ収集を行いデータセットを構築した。手は身体の中で最も関節が密集している部位であり、全部の関節にセンサを取り付けて関節角度を測るということは不可能であったが、近年の画像認識技術の向上によって非接触に計測することができるようになった。今回構築したデータセットはヒトの筋活動と手指運動の関係性の解明、義手の制御手法にとって非常に有用である。現在、研究レベルでは手指の動作パターンを認識し制御する義手が主流であるが、本研究によって各指の詳細な関節角度を推測し制御する手法を構築することができた。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a novel control method for myoelectric prosthetic hands. Electromyogram (EMG) signals are biosignals that occur by muscular contractions and it is possible to extract the intention to move the hand from amputees. Therefore, the prosthetic hand can be controlled by the wearer's intention. However, current control methods achieve only simple movements of the prosthetic hand compared with a healthy hand because EMG signals are very weak and fragile and it is difficult to extract the intention in detail. For this issue, this study analysed the movement of hands by using a cutting-edge machine learning method and an image-recognition-type motion capture and we developed the control method for myoelectric prosthetic hands to drive each finger independently.

研究分野：生体信号認識

キーワード：筋電義手 運動機能解析

1. 研究開始当初の背景

ヒトの手は手首関節を含めて 20 関節 24 自由度あると言われ、非常に複雑な構造を有しており、汎用性が高く、巧緻で精密な作業を行うのに適している。上肢切断者の把持機能を代替する**筋電義手**や“第 3 の手”と呼ばれる健常者に新たな腕を付与する**人工拡張肢**などのウェアラブルロボットの分野では使用する環境を限定できないこと、ヒトの手を想定した道具を使用できること、ヒトに近い審美性が求められることなどの理由からヒトの手を模したロボットハンドの開発が盛んに行われている。ヒトの手を再現しようとする試みにおいて、機構の複雑性も然ることながら、**ハンドの多自由度をどのように制御するのが大きな課題となる。**

動作意図抽出を行うための生体信号として、**筋電位**は有力な制御入力信号である。上肢切断者からも手の動作意図が計測可能であり、代替動作を必要とせず他の運動自由度を阻害しない。また、筋電位には把持力や姿勢など手の運動意図に関する多くの情報を含んでいることが分かっている。一方で、筋電位は皮膚表面から計測すると数百 μV 程度の非常に微弱な信号であり、周囲の電磁ノイズは勿論、疲労や発汗など様々な要因によって変動する。そのため、大規模なデータや複雑な解析が行えるオフライン解析では筋活動に関して細かい知見が得られているのだが、オンラインでロボットの入力として多くの情報を利用しようとするのは難しい状況にある。

筋電義手を例に、こうした不安定な信号が実社会においてどのように用いられているか整理すると、筋電位を入力とした制御手法としては主に閾値制御とパターン認識制御の 2 つがメジャーな手法である。閾値制御は主に短自由度義手に対して用いられる制御手法で、屈筋群と伸筋群それぞれにセンサを貼付し、屈筋群の振幅が閾値を超えたらハンドが握る、伸筋群の振幅が閾値を超えたらハンドが開くという制御を行う。それに対してパターン認識制御は主に多自由度義手に対して用いられる制御手法で、あらかじめ握りや摘みといった離散的な動作パターンを定義して起き、その動作と筋電位の対応関係を機械学習によって学習しパターンの分類を行う制御手法である。このように動作数を限定することによって近い筋活動を同一の動作に割り当てることによって不安定な筋活動からの制御を実現しているが、実現可能な動作を制限してしまっている。各指を一本ずつ曲げ伸ばしし、それを学習させて制御しようとしている研究も存在するが、オフラインではそれぞれの指の動きを識別できるが、オンラインでは筋活動が変化しやすい傾向が変わってしまい、うまく実現できていない。

ヒトの手は多くの自由度を有しているがそれらの自由度は全て独立しているわけではなく高い従属性を有している。それは物理的な可動域の制限や一つの筋が複数の関節を、また、一つの関節を複数の筋が駆動する干渉駆動系であることに起因する。ヒト型ロボティクスの分野では筋シナジーや姿勢シナジーという概念が提唱されており、それぞれ各節を一つ一つ制御しているのではなく、よく使う組み合わせ(シナジー)が予め定義されており、それらを協調して動かすことにより制御の負荷を大幅に減らしていると考えられている。ヒトの手は多くの自由度が密度高く存在しており、センサを配して運動を計測することが難しかった。しかし近年、機械学習による画像認識技術の向上により非接触で手指角度を計測できるようになったため、手指運動と筋活動を同期して計測することによって、手指の運動解析を行えばより高度な動作意図抽出及びロボットハンド制御が実現できると考えた。

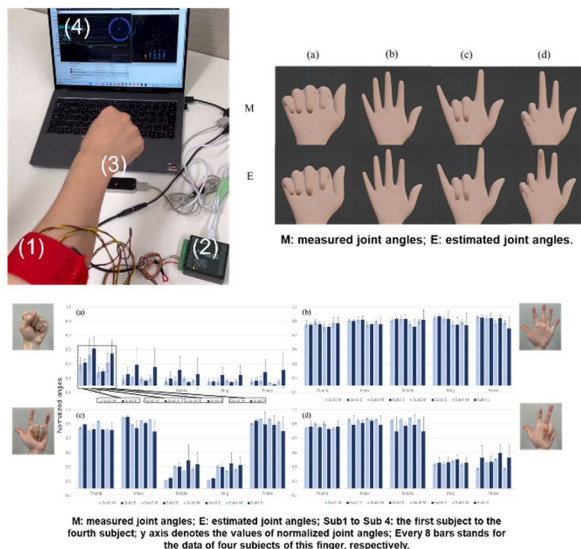
2. 研究の目的

そこで、本研究では**手指運動の基底となるシナジーを相関解析によって獲得し、獲得したシナジーと筋活動を機械学習的に対応付けて、筋活動から多自由度ロボットハンドの手指運動を連続的に再現すること**を目的とした。

前述のように手指の関節は密集しているため、以前は詳細な角度を計測することが困難であった。そのため、従来の研究は各指の屈伸といった外観として分かりやすい運動を制御対象動作としており、手指の従属性について考慮されていなかった。本研究では画像認識型モーションキャプチャを用いることによって手指関節角度を詳細に非接触で計測し、また、シナジー理論に基づいて動作を決めることによって、多自由度義手の制御を目指した。また、筋電位は多くの要因によって変動するため、従来は積算や平滑化などノイズをキャンセルし、信号の大きな変化のみをとらえることによって筋電位から安定的に情報を取得しようという試みが主流であった。しかし、このような方法はノイズのみでなく、本来取得したい動作意図に関する情報もそぎ落としてしまっており、単純な動作しか実現できていない要因となっている。申請者の先行研究によって大規模なデータを用いて機械学習の訓練を行うことによって、こうした細かな動作意図が抽出できることが明らかとなっており、最新の機械学習手法を用いることによって関節角度の連続的な制御の実現を試みた。

3. 研究の方法

この目標を達成するために、4つの小目標を設定した。1つ目は筋活動と手指運動を同時に計測できるシステムを用いてデータセットを構築し、そこから手指運動と筋の協調関係を調べて運動と基底となる筋シナジー・姿勢シナジーを決定すること、次に獲得した筋シナジー・姿勢シナジーを用いて機械学習的に義手制御モデルを獲得すること、3つ目に異なる個人間や健常者と切断者の筋活動を、手指運動を用いることによって比較し、個人差を吸収するようなマッピング手法を開発すること、そして最後に実機・シミュレーションにおいて、義手を制御し、把持タスクによって制御手法の把持性能の評価を行うことである。



4. 研究成果

まず、筋活動と関節角度を同時に計測できるシステムを構築し、それによって収集したデータセットを用いて機械学習の一種である Generative Adversarial Network (GAN)によって動作推定を行うモデルの構築に取り組んだ。また、推定した角度からバーチャルハンドの制御及び実機の5指駆動型筋電義手の制御を実現した。ただ、ハイパーパラメータの調整に時間を要し精度が低かった。この結果については国際会議[1]にて発表した。

[1] より引用

	PC1		PC2		PC3		PC4		PC5	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Sub1										
Sub2										
Sub3										
Sub4										

Min and Max respectively denote the minimum and maximum values of the PCs across the corresponding subject's dataset. Sub1 to Sub4: the first subject to the fourth subject.

[3] より引用

複雑なネットワークを用いると学習に時間が掛かり、パラメータ最適化に時間が掛かり、また、オンラインでの評価も難しくなるため、方針を転換し計算負荷が比較的小さいモデルでの学習に切りかえた。また、筋電位から関節角度を推定するモデルを構築したことによって、これと対となるデコーダ(指関節角度から筋活動を推定)を構築した。これによって筋シナジーの詳細な解析や個人間の筋活動の比較などが行えるようになる。この結果については国際会議[2]にて発表予定である。

オンラインで義手を使用するために、ファインチューニングから着想を得て、ネットワークを個人差の部分と共通の部分に分割し、事前に多くのデータから時間を掛けて推定モデルを学習し、個人の筋活動と共通する典型的な筋活動のマッピングを行うことによって、複雑で高度なネットワークを少ないデータ、短い時間で学習できる手法の開発に取り組んでいる。

また、構築したデータセットを用いて筋活動や動作の相関を解析して基底となる筋シナジー・姿勢シナジーの同定に取り組んでいる。様々な物体を把持する際の手指の運動を計測し、主成分分析をすることによって、四指を握る、拇指を対立させる、示指を伸ばす、薬指小指を曲げるなどといった基底となる動作を抽出した。この結果については国際会議[3]にて発表予定である。

参考文献

- [1] Hai Jiang, Yusuke Yamanoi, Yuki Kuroda, Peiji Chen, Shunta Togo, Yinlai Jjiang, Hiroshi Yokoi: "Conditional Generative Adversarial Network-based Finger Position Estimation for Controlling Multi-Degrees-of-Freedom Myoelectric Prosthetic Hands", 2022 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS2022), SuB3.4, (2023).
- [2] Zehao Liu, Hai Jiang, Yusuke Yamanoi, Peiji Chen, Xiaobei Jing, Guanglin Li, Hiroshi Yokoi, Xu Yong: "Analysis of Typical Features Using an Angle-to-sEMG Decoder Model", The 2024 17th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, (2024). 採択済み未発表
- [3] Hai Jiang, Yusuke Yamanoi, Peiji Chen, Xu Yong, Guanglin Li, Hiroshi Yokoi, Xiaobei Jing: "Postural Synergy Analysis for Continuous Hand Movements for Application to Prosthetic Hands", The 2024 17th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, (2024). 採択済み未発表

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakao Soichiro, Hirai Taichi, Ono Yuma, Yamanoi Yusuke, Kuroda Yuki, Yabuki Yoshiko, Togo Shunta, Jiang Yinlai, Kato Ryu, Takagi Takehiko, Ishihara Masahiro, Yokoi Hiroshi	4. 巻 40
2. 論文標題 Development of Robotic Hand for Prosthetic Limb using a Gear Mechanism for Infants with Congenital Upper Limb Defects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 903～914
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.40.903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kuroda Yuki, Yamanoi Yusuke, Togo Shunta, Jiang Yinlai, Yokoi Hiroshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Coevolution of Myoelectric Hand Control under the Tactile Interaction among Fingers and Objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cyborg and Bionic Systems	6. 最初と最後の頁 9861875
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34133/2022/9861875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yamanoi Yusuke, Togo Shunta, Jiang Yinlai, Yokoi Hiroshi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Learning Data Correction for Myoelectric Hand Based on “Survival of the Fittest”	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cyborg and Bionic Systems	6. 最初と最後の頁 1～12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34133/2021/9875814	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yuki Inoue, Yuki Kuroda, Yusuke Yamanoi, Yoshiko Yabuki, Hiroshi Yokoi
2. 発表標題 Development of Separate Exoskeleton Socket of Wrist Joint on Myoelectric Prosthetic Hand for Congenital Defects with Symbrachydactyly
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hai Jiang, Yusuke Yamanoi, Yuki Kuroda, Peiji Chen, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi
2. 発表標題 Conditionaonal Generative Adversarial Network-based Finger Position Estimation for Controlling Multi-Degrees-of-Freedom Myoelectric Prosthetic Hands
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柿野 和真, 山野井 佑介, 東郷 俊太, 横井 浩史, 姜 銀来
2. 発表標題 伸縮機構を備えたロボティック・フィンガーの開発
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayoshi Shimada, Yusuke Yamanoi, Yoshiko Yabuki, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Ryu Kato, Takehiko Takagi, Yuki Kuroda, Hiroshi Yokoi
2. 発表標題 Development of a motorized prosthetic hand for infants with phocomelia
3. 学会等名 18th World Congress of the International Society for Prosthetics and Orthotics (ISPO2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Kuroda, Tatsuki Tsujimoto, Takayoshi Shimada, Yoshiko Yabuki, Dianchun Bai, Yusuke Yamanoi, Yinlai Jiang, Jinying Zhu, Hiroshi Yokoi
2. 発表標題 Development and Clinical Evaluation of a Five-Fingered Myoelectric Prosthetic Hand with Pattern Recognition
3. 学会等名 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Kuroda, Taichi Hirai, Yoshiko Yabuki, Yusuke Yamanoi, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi
2. 発表標題 Development and Evaluation of a Lightweight Two-Degree-of-Freedom Electric Prosthetic Hand for Toddlers
3. 学会等名 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒田勇幹, 山野井佑介, 島田岳佳, Hai Jiang, 矢吹佳子, Dianchun Bai, 高木岳彦, Yinlai Jiang, 横井浩史
2. 発表標題 個性適応型学習機能を有した他自由度筋電義手の臨床適応と性能評価
3. 学会等名 第37回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千田知広, 島田岳佳, 黒田勇幹, 矢吹佳子, 山野井佑介, 横井浩史, 高木岳彦
2. 発表標題 回内外と掌背屈運動を活かす分離型ソケットの開発
3. 学会等名 第37回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上祐希, 島田岳佳, 高橋明丈, 千田知広, 大谷俊介, 黒田勇幹, 山野井佑介, 矢吹佳子, 高木岳彦, 横井浩史
2. 発表標題 小児手掌欠損者に対する筋電義手の開発
3. 学会等名 第37回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷俊介, 平井太智, 黒田勇幹, 矢吹佳子, 山野井佑介, 東郷俊太, 姜銀来, 横井浩史
2. 発表標題 可動指を変えた幼児用2自由度電動義手の開発
3. 学会等名 第37回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢吹佳子, 山野井佑介, 黒田勇幹, 島田岳佳, 大谷俊介, 千田知広, 溝口恒雄, 高木岳彦, 高山真一郎, 横井浩史
2. 発表標題 超小型対立回転機構を用いた手掌筋電義手, 能動指義手の開発
3. 学会等名 第37回日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷 俊介, 姜 銀来, 東郷 俊太, 横井 浩史, 山野井 佑介
2. 発表標題 ワイヤ劣駆動ロボットフィンガによる薄板小物体把持のための関節トルク比と過伸展機構の検討
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 義手	発明者 横井浩史, 井上祐希, 山野井佑介, 矢吹佳子, 黒田勇幹	権利者 国立大学法人 電気通信大学
産業財産権の種類、番号 特許、2023-004600	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 義手	発明者 横井浩史, 飯塚達也, 山野井佑介, 矢吹佳子, 井上祐希	権利者 国立大学法人 電気通信大学
産業財産権の種類、番号 特許、2023-004609	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 義手ソケット	発明者 横井浩史, 井上祐希, 山野井佑介, 矢吹佳子, 黒田勇幹	権利者 国立大学法人 電気通信大学
産業財産権の種類、番号 特許、2023-004614	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 横井 浩史 , 石原 正博 , 山野井 佑介 , 高木 岳彦	発明者 義手	権利者 国立大学法人電気通信大学, 他
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/037172	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 横井 浩史, 小野 祐真, 山野井 佑介, 島田 岳佳, 矢吹 佳子, 棚橋 一将, 若松 享平	発明者 筋電センサシステム	権利者 国立大学法人電気通信大学, 株式会社タナック
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-156039	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

採択済み未発表雑誌論文 2件, 採択済み未発表国際会議発表 2件

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------