

令和元年6月6日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17724

研究課題名(和文) 随意独立活性に着目したヒトの多筋制御システムのモデル化と筋電肩義手制御への応用

研究課題名(英文) Modeling of human multi-muscle control system based on voluntary activation and application for myo-electric upper limb prosthetics

研究代表者

東郷 俊太 (Togo, Shunta)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：30751523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒトの随意多筋制御メカニズムをモデル化するとともに、筋電肩義手制御へ応用することを目的とした。筋シナジーの概念に随意制御性を導入し、適切な指標を用いれば、随意活性可能な筋シナジーを抽出可能であることを示した。また、筋シナジーは随意筋制御の最小単位ではないことも示唆された。また、低自由度制御入力でロボットアームの腕運動を制御しなければならない筋電肩義手システムに、自由度を削減するシナジーの概念を適用することで、両肩離断者のユーザーにおいても単純な物体の把持移動動作が可能であることを示した。本研究の以上の成果は、研究代表者が提案する人間化ロボティクスの有用性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、筋シナジー解析において抽出する因子の数によって随意活性化可能かどうかが変わることを明らかにし、抽出の際にVAF指標を使うと随意活性化可能である筋シナジーを抽出しやすくなることを明らかにした点に学術的意義がある。また、随意活性化不可能な筋シナジー因子を抽出することがあることを実験的に示し、筋シナジー解析において随意制御性を考慮する重要性を示した。さらに、自由度を削減するシナジーの概念を導入することで、必要最低限の物体の把持移動動作を行うことの出来る、筋電肩義手システムの開発に成功し、実際の両肩離断者が物体の把持移動動作に使用できることを示した点に社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to model a mechanism of voluntary control of human multi-muscle, and apply it for controlling EMG shoulder disarticulation prosthesis. First, a notion of voluntary control was introduced to the framework of muscle synergy analysis. Then, our experiments demonstrated that voluntarily activatable muscle synergies could be extracted by using an appropriate index. It was also suggested that the muscle synergy is not a minimum unit of voluntary muscle control. Moreover, we applied the notion of the synergy freezing degrees of freedom to the EMG shoulder disarticulation prosthesis system so as to control its robot-arm movements by low degrees of freedom input. As a result, both-shoulder amputee user could use our developed EMG shoulder disarticulation prosthesis to pick an object and place on it. Above results showed the usability of our proposed notion "humanize-robotics."

研究分野：人間化ロボティクス

キーワード：筋シナジー EMG 随意運動 肩義手 ロボットアーム 人間機械融合系 シナジー制御 人間化ロボティクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

両腕を肩から離断した両肩離断者の運動機能を再建するためには、使用者の生体信号情報を使って電動アームを制御する筋電肩義手の使用が望ましい。筋電肩義手は、使用者の体幹の筋電情報から、使用者の運動意図を推定し、電動アームの動作を生成する。しかしながら、体幹から計測可能な入力信号の自由度に対して、生成すべき電動アームの動作の自由度は大きいため、低自由度な入力情報を使って高自由度な運動出力を生成しなければならない問題がある。一方で、ヒトの身体運動制御においても低自由度な制御モジュールを制御することで、高自由度な多筋を制御していると考え、筋シナジーの概念に注目が集まっている。筋電肩義手システムにおける使用者の運動意図は、随意運動の運動意図である。しかしながら、従来の筋シナジーが随意的に活性化可能なモジュールであるのかどうか明らかでない。また、シナジーの概念をロボット実機の制御に応用し、有効性を示した研究も少ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)随意独立活性に基づいたヒトの多筋制御システムのモデル化、および(2)モデル化した多筋制御システムを筋電肩義手へ応用することである。随意独立活性とは、複数の筋を支配する制御モジュールの一つのみを随意的に、他のモジュールから独立に活性化することと定義する。随意独立活性の観点から、ヒトの中枢神経系が随意制御に用いている制御モジュールを実験的に同定する。また、シナジーの概念を応用した筋電肩義手を開発し、実際の両肩離断者が使えることを実験によって示し、有効性を検討する。

3. 研究の方法

本研究では、研究目的に対応した、以下の方法で研究を行った。

(1) 随意独立活性に基づいたヒトの多筋制御システムのモデル化

第一に、等尺性力生成時の筋シナジーの随意制御性を実験により検証した。10人の被験者を対象とし、等尺性の目標手先力生成課題を実施し、課題中の筋活動を計測した(図1)。計測した筋電に対して非負行列因子分解法を用いて筋シナジーを抽出した。抽出のための指標として VAF と決定係数を用い、従来の方法において筋シナジーであると考えられる抽出因子を従来筋シナジー、よりスパースな抽出因子を拡張筋シナジーとそれぞれ定義した。非負行列因子分解法によって、因子を抽出する際の任意パラメータである因子の数を変化させることで、それぞれの筋シナジーを抽出した。そして、被験者が抽出されたそれぞれの単独の筋シナジーベクトルを随意的に生成可能かどうか、すなわち筋シナジーベクトルに沿った筋活動ベクトルを生成可能かどうか、を随意活性の度合いを視覚フィードバックする実験により確かめた。第二に、抽出された筋シナジーが多筋随意制御の最小単位であるかどうかを実験により検証した。5名の被験者を対象とし、等尺性力生成課題の環境下において、随意的に一つの筋を活性化しようとした際に生成される筋活動ベクトルを、随意筋活動プリミティブと定義し、同環境下で抽出される筋シナジーとの比較を行った。

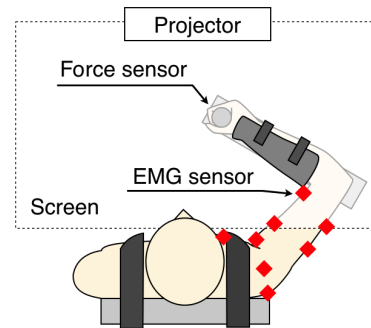


図1：実験の様子

(2) シナジーの概念に基づいた筋電肩義手システムの開発

まずは実際に両肩離断者が動かすことのできるシステムの開発を目指し、自由度を削減するシナジーの概念を応用した簡易型筋電肩義手を開発した。日常生活動作において重要な動作の一つである物体の把持移動動作を行うことのできる最低限の動作自由度を有する肩義手を設計開発した。矢状面において手先を任意の点に移動させるための2リンクアームを搭載し、ハンドは日常生活動作における把持姿勢の85%をカバーできる2自由度の前腕義手用のハンドを搭載した。体幹部における筋電の計測位置は、事前の多点計測によって適正箇所を同定し、導電性シリコン性の柔軟な筋電センサを筋電計測、すなわち筋電肩義手の入力センサとして用いた。制御系は、高速フーリエ変換による特徴量抽出と、3層ニューラルネットワークによる運動意図推定を組み合わせた個性適応制御の枠組を応用した。構築した簡易型筋電肩義手システムの有効性を確認するために、壁面に貼り付けたボールを剥がし、水平方向あるいは垂直方向に移動させ、それを繰り返し行うピックアンドブレース実験を、健常者および両肩離断者で実施した。さらに、筋電肩義手での実行可能動作の向上を目指して、肩義手ロボットアームおよび筋電センサシステムの多自由度化を行った。

4. 研究成果

各研究項目に対して下記の研究成果を得た。

(1) 随意独立活性に基づいたヒトの多筋制御システムのモデル化

実験の結果、従来筋シナジーの抽出因子郡の中で、VAF 指標を用いて抽出された従来筋シナ

ジー群はほぼ全て随意活性化可能であり、その他の指標を用いた場合はその割合が有意に低下することがわかった(図2a)。また、100%全ての筋シナジー群を活性化可能であった被験者が最も多かったのも、VAF指標で抽出された従来筋シナジー群であった。さらに、従来筋シナジーよりもスパースである拡張筋シナジーの随意独立活性を調べた結果、どの指標においても約25%程度の拡張筋シナジーが随意的に活性化可能であった(図2b)。以上の結果から、適切な指標を用いれば随意的に活性化

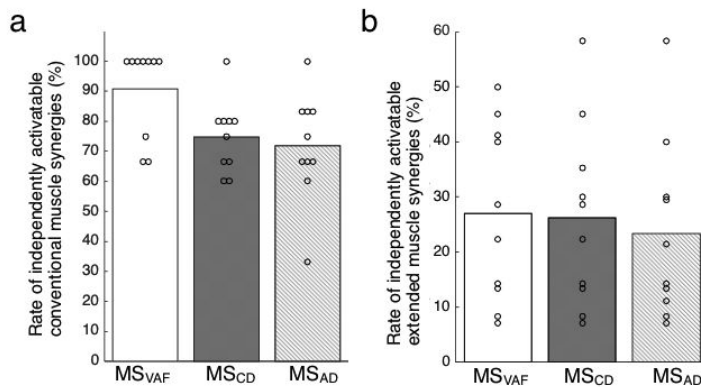


図2：随意活性化可能な従来筋シナジー(a)および拡張筋シナジー(b)の割合

可能な筋シナジー群を抽出可能であることが実験的に示され、さらに従来は無視されていたスパースな因子を随意多筋制御に用いている可能性が示唆された。本研究の結果は、随意多筋制御における筋シナジーの存在をサポートする結果であり、査読付き国際論文誌 および国際会議発表 の成果を得た。

また、同様の等尺性力生成課題の環境下において、随意筋活動プリミティブを求め、筋シナジーとの比較を行った。その結果、筋シナジーは随意筋活動プリミティブの重ね合わせで表現できる可能性が示唆された。今後は、随意筋活動プリミティブと運動学習やリハビリテーションのプロセスの関係を調べる枠組みへの拡張を試みる。

(2) シナジーの概念に基づいた筋電肩義手システムの開発

開発した簡易型筋電肩義手システムを図3に示す。サーボモータによって、肩関節、肘関節、拇指MP関節、4指MP関節がそれぞれ屈曲伸展する。総重量は両腕およびソケットを含んで3.2[kg]であり、自由度を削減することで軽量化を可能とした。制御可能な動作は、腕の上昇および下降、手の開閉の4動作とした。物体把持を安定化させるために、手の開閉および腕の上昇下降の動作間に切り替え動作を設定した。したがって、必要な制御入力には屈筋関連動作、伸筋関連動作、切り替え動作に関連する3入力を必要とした。多点計測によって最も筋電を安定して取れる電極貼り付け箇所を胸、背中部分で同定した。個性適応制御の枠組みを利用することで、方の水平

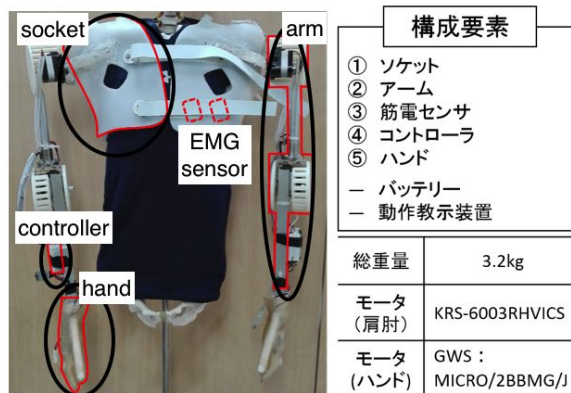


図3：開発した簡易型筋電肩義手

内転動作を屈筋関連動作、水平外転動作を伸筋関連動作、噛み締め動作を切り替え動作にそれぞれ対応付けた。また、健常者および両肩離断者それぞれで実験を可能とするために、ソケットを2種類用意

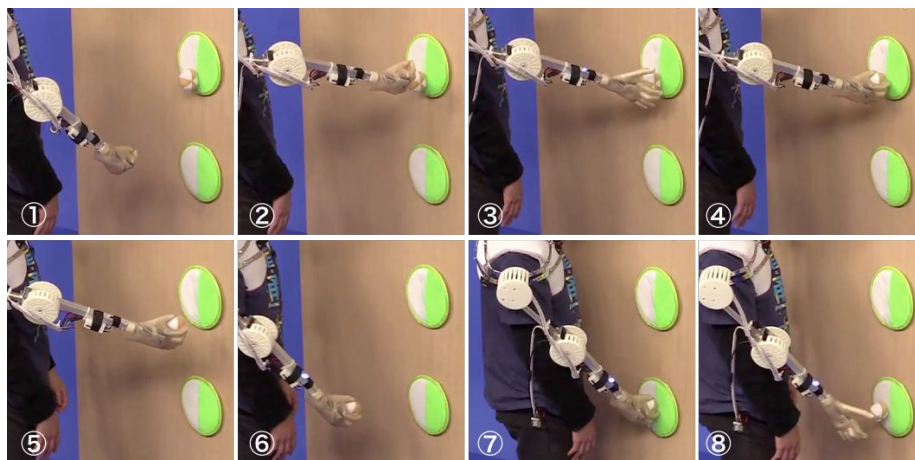


図4：健常者によるピックアンドブレース実験の様子

した。図4に健常者によるピックアンドブレース実験の様子を示す。これは、垂直方向にボールを移動させる課題である。4名の健常者および1名の両肩離断者において、1分間に1往復以上のボールの移動が可能であった。この結果は、開発した簡易型筋電肩義手によって、物体の把持移動動作が可能となったことを示している。また、自由度を削減するというシナジースの概念を応用することで、多自由度の運動生成問題を解決した一つの例を示すことができたと考えている。課題としては、実行可能な動作の少なさが挙げられるため、システム全体の多自由度化が求められる。本研究期間内においては、ロボットハードウェアと筋電センサシステムの多自由度化を行うことができた。ロボットハードウェアとしては、軽量・高出力を達成できるように干涉機構を拡張した、8自由度のロボットアームを作成した。また、筋電センサシステムとして、日常生活での使用を想定した防水型の筋電センサを開発し、多チャンネル計測環境を整えた。今後は、ハードウェア全体としての多自由度システムを統合し、ソフトウェア上でシナジースを実装することで、実用的な多自由度筋電肩義手の開発を目指す。

筋電肩義手の開発に関して、関連した国際学会発表、および国内学会発表、の成果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

Shunta Togo, Takashi Itahashi, Ryuichiro Hashimoto, Chang Cai, Chieko Kanai, Nobumasa Kato and Hiroshi Imamizu, "Fourth finger dependence of high-functioning autism spectrum disorder in multi-digit force coordination", *Scientific Reports*, Vol.9, No.1737, pp.1-11, 2019. doi:10.1038/s41598-018-38421-6 査読あり

東郷 俊太, "用語解説 筋シナジース (Muscle synergy)", *知能と情報*, Vol.30, No.3, p.36, 2018. 査読なし

Shunta Togo, and Hiroshi Imamizu, "Empirical Evaluation of Voluntarily Activatable Muscle Synergies", *Frontiers in Computational Neuroscience*, Vol.11, No.82, 2017. doi:10.3389/fncom.2017.00082 査読あり

その他：査読なし論文2件，査読付論文3件

〔学会発表〕(計32件)

松本 一朗, 君塚 進, 東郷 俊太, 姜 銀来, 横井 浩史, "心電ノイズ除去による筋電肩義手の誤動作の低減", 第39回バイオメカニズム学術講演会, 1C-2-1, 筑波大学, 2018年11月10-11日.

Susumu Kimizuka, Yutaro Hiyoshi, Hesong Ye, Shunta Togo, Youhei Tanaka, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, "Development of an intuitive operation type shoulder prosthesis hand system using the surface myoelectric potential of trunk," 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2018), pp.597-602, Shenzhen China, 25-27 Oct. 2018.

Kazuaki Matsumoto, Susumu Kimizuka, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, "Reduction of malfunction of myoelectric shoulder prosthesis by removing ECG noise," 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2018), pp.489-493, Shenzhen China, 25-27 Oct. 2018.

君塚 進, 日吉 祐太郎, 叶 鶴松, 田中 洋平, 東郷 俊太, 姜 銀来, 横井 浩史, "体幹部の表面筋電位を用いた直感操作型肩義手システムの開発", 第36回日本ロボット学会学術講演会, 3P2-04, 中部大学春日井キャンパス, 2018年9月4-7日.

Shunta Togo, Hiroshi Imamizu, "Experimental evaluation of voluntarily activatable muscle synergies", *Neuroscience 2017*, No. 152.06, Washington, DC, USA, November 11. 2017

君塚進, 日吉祐太郎, 東郷俊太, 田中洋平, 姜銀来, 横井浩史, "両肩離断者のための表面筋電位を用いた電動肩義手の開発", 第38回バイオメカニズム学術講演会, pp167-170, 大分, 2017.11.

東郷俊太, 板橋貴史, 橋本龍一郎, 金井智恵子, 加藤進昌, 今水寛, "指先合力生成時における自閉症スペクトラム障害患者の特異的薬指依存", 第11回 Motor Control研究会, B16, 中京大学, 2017.8.

その他：国際会議13件，国内会議12件

〔図書〕(計2件)

横井 浩史, 矢吹 佳子, 村井 雄太, 雍 旭, 景 曉蓓, 東郷 俊太, 白 殿春, 朱 笑笑, 姜 銀来, “義肢ロボット開発の最新技術と今後の製品化展望”, 最先端医療機器の病院への普及展望と今後の製品開発, (株)技術情報協会, 2018. ISBN: 978-4861047145

横井 浩史, 矢吹 佳子, 東郷 俊太, 姜 銀来, 加藤 龍, 杉 正夫, “電気刺激による運動と感覚の再生”, オグメンテッド・ヒューマン (株)エヌ・ティー・エス, 2017. 978-4-86043-515-8

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: ワイヤ駆動装置

発明者: 横井 浩史, 景 曉蓓, 雍 旭, 矢吹 佳子, 東郷 俊太, 姜 銀来

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2018-230625

出願年: 2018

国内外の別: 国内

名称: 機能的電気刺激システム, 及び機能的電気刺激方法

発明者: 上平 倫太郎, 横井 浩史, 姜 銀来, 東郷 俊太, 杉 正夫

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2017-074607

出願年: 2017

国内外の別: 国内

名称: 信号測定装置, 及び信号測定方法

発明者: 横井 浩史, 姜 銀来, 東郷 俊太, 矢吹 佳子, 村井 雄太

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2017-029981

出願年: 2017

国内外の別: 国内

取得状況 (計 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hi.mce.uec.ac.jp/togo/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 今水 寛

ローマ字氏名: (Imamizu, Hiroshi)

研究協力者氏名: 横井 浩史

ローマ字氏名: (Yokoi, Hiroshi)

研究協力者氏名: 姜 銀来

ローマ字氏名: (Jiang, Yinlai)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。