

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K12723

研究課題名(和文) 双腕協調タスクモデルに基づく5指駆動型筋電電動義手の提案と義手処方支援

研究課題名(英文) A Five-fingered Myoelectric Prosthetic Hand Based on a Dual-arm Task Model and Its Application to Prosthetic Prescription Support

研究代表者

芝軒 太郎 (Shibanoki, Taro)

岡山大学・自然科学学域・准教授

研究者番号：70711290

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)：本研究では健康肢と義肢とを用いて行う日常生活動作をモデル化し、5指駆動可能な筋電義手の制御へ応用するとともに、その操作訓練支援システムを実現した。提案法では、各腕に取り付けた電極および慣性計測ユニットから、筋電位および各腕の位置・姿勢情報を抽出することで、義手制御に用いる手先の動作の識別と同時に、各腕の状態を判別できる。そして、各腕の状態から実施する作業を推定することで、作業状態に応じた手先動作の識別補助を行い、筋電義手と健康肢とで行う協調作業を精度良く実施できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筋電位信号を制御信号とする筋電義手の制御において、日常生活を行う上で重要となる健康肢との協調を考慮した新たなモデルを提案し、安定した制御を実現可能とした。また、単に健康肢と協調した義手制御を実現するだけでなく、双腕を用いて行う作業を推定した筋電義手の操作訓練支援およびその評価を実現した。

研究成果の概要(英文)：This work proposed a dual-arm task model for controlling myoelectric prosthetic hand with healthy limb in a daily life and realized a training system for the proposed prosthetic hand with the task model. The position and posture information of each arm is extracted from inertia measurement units attached to both arms simultaneously with the measurement of electromyograms signals using electrodes, enabling discrimination of the state of each arm as well as the discrimination of the hand motions used for prosthetic hand control. By estimating the task to be performed based on the state of each arm, the discrimination of the hand motions can be assisted according to the estimated state and cooperative task between the myoelectric prosthetic hand and the healthy limb can be performed with high accuracy.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：筋電義手 筋電位信号 姿勢情報 双腕協調動作 タスクモデル 操作訓練 virtual reality

## 1. 研究開始当初の背景

国内における上肢切断者の数は約 8 万人に上っており、上肢切断者の失われた機能を補うためさまざまな義手の適応が行われている。中でも筋の収縮に応じて発生する筋電位 (electromyogram: EMG) を制御信号とした筋電義手は、力の大きさやかたさ・やわらかさなどを反映した制御が期待でき、数多くの研究・開発が行われてきた [Jerard et al. 1974, Fukuda et al. 2003]。筋電義手の制御では、計測信号から動作毎の特徴量を抽出、学習・識別することで被験者の動作意図に応じた制御を実行できる。近年では、5 指を独立駆動可能なものなど高機能な義手 [Carrozza et al. 2008, Takaki et al. 2014] や義手の巧みな操作能力獲得のためのトレーニングシステムがさまざま提案されているもの [Takeuchi et al., 2008]、これらは切断肢のみを考慮していた。しかしながら実生活においては両腕を使って行う作業が多く、実際の義手作業の訓練においても、義手のみならず義手を含む両手を用いたタスク (例えばエプロンの紐を結ぶなど) が行われる。これに対し、従来、パターン識別技術や EMG パターンの識別精度向上および安定化についてさまざま研究が行われているものの、両腕を同時に動かした際の従属性を考慮した方法は十分に議論が行われていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、健常肢との協調動作に着目した双腕協調タスクモデルに基づく新しい 5 指駆動型筋電義手を開発するとともに、筋電義手処方のためのトレーニングシステムを提案する。本研究ではまず、日常生活動作をモデル化し、健常肢の状態に合わせた識別を実現する双腕協調タスクモデルを提案する。そして、提案モデルを内包した 5 指駆動型筋電電動義手の開発を目指す。さらに、5 指を有する多機能義手の開発から処方までを一貫して実施可能とするため、提案義手の操作訓練として、両腕を用いて行う新たな筋電義手トレーニングシステムを実現する。

## 3. 研究の方法

筋電義手を自らの手のように操作するためには、各動作の EMG パターンを随意的に発生させる必要がある。しかしながら日常生活においては片腕動作のみならず、健常肢との協調作業が必要不可欠であり、姿勢変化や協調動作によって各動作の EMG パターンが変化し、誤識別が生じる可能性がある。そこで、まず動作間の遷移 (例えば右利きの方が「ペットボトルの蓋を開ける」際には、左手親指が上になるように手首を回転させながらリーチング運動を行い把持を行なうとともに、右手甲を上にしてピンチ動作を行い指先を動かすなど) を状態遷移モデルによってモデル化し、双腕協調タスクモデルに基づく識別が可能な新たな方法を提案する。そして、提案モデルを内包した新たな 5 指駆動型筋電電動義手を開発する。筋電義手には筋電位信号を計測するための電極と姿勢を計測するための Inertial Measurement Unit (IMU) が統合されており、使用者が行う作業状態を評価することができる。健常肢 / 切断肢双方から得られた生体信号から被験者が実施中の作業を予測し、義手の動作 (開き、握りなどの動作や、開く際の各関節角度など) を調整可能とする。

ここで、モデルを内包した高度な筋電義手が開発できたとしても、被験者が 5 指動作に付随する筋電位信号を精度良く制御できなければ、日常生活で義手を巧みに操作することは困難である。そのため、双腕の協調動作トレーニングシステムを提案し、両腕を使用するタスクで生じる従属性を考慮した訓練を実施可能とする。さらに、訓練によって被験者の EMG 制御能力は向上するため、その熟練度に応じて高度な訓練を実施できる、訓練難易度を調節可能な新たな枠組みを導入する。以上によって、高度な機能を有する筋電義手の処方から日常生活での使用までを一貫して支援可能なシステムを提案する。

## 4. 研究成果

本研究では、(1) 双腕協調タスクモデルに基づく 5 指駆動型筋電義手の開発、(2) Virtual Reality 技術に基づく生体信号インタフェースの操作訓練支援、(3) モデル開発のための動作解析および義手に適用可能な触覚フィードバックについて検討を行った。

### 研究成果 (1) 双腕協調タスクモデルに基づく 5 指駆動型筋電義手の開発

ここではまず、義手を用いて行う作業をモデル化し、9 軸慣性計測装置によって得られた姿勢角から作業状態を求め、作業状態に応じて識別対象動作を限定することで識別の安定化の実現を図った。そして、3D プリンタを用いて構築した 3 指駆動型義手の操作に適用し、姿勢変化などによる筋電位信号の意図しない変化に対応して義手を用いた作業が精度良く行えることを確認した。

片腕の姿勢変化を推定し、義手制御の安定化を実現できたことから、双腕で行う作業のモデル化を行い、各腕の姿勢情報から推定した作業状態に応じた制御によって安定した動作が可能な新たな 3D プリンタブル 5 指駆動型筋電義手を開発した。実験では、両腕を用いて物体を掴んで

離す等の簡単な作業を実施することで、提案義手ともう片方の腕を協調して安定した作業を行えることを明らかにした。さらに、各腕の動作の時系列特徴量を抽出し、両腕の時系列姿勢情報からリカレントニューラルネットワークを用いて両腕の動作を識別することで、推定した作業状態から作業に用いる識別動作のみを安定して識別可能とした。実験では、日常生活において箱の蓋を開けて物体を移動する作業を行い、健常肢で箱を抑えながら、もう片方の腕に装着した開発した義手を用いて蓋を持ち上げて下ろす作業、そして、箱の中の物体を移動するために義肢で別の箱を移動して物体を移動するために保持する作業をスムーズに実施できることを示した。

#### 研究成果(2) Virtual Reality 技術に基づく生体信号インタフェースの操作訓練支援

双腕協調動作モデルを内包した 5 指駆動型筋電義手の開発において、いかに識別の安定化を実現できたとしても、操作者の生体信号が安定しなければ誤動作を生じてしまう。提案義手の操作訓練においては、双腕を用いて行う作業を想定した生体信号インタフェース操作のための新たなトレーニングシステムを開発しなければならない。そこで、まず筋電位信号の制御訓練システムについて検討を行った。ここではまず、筋電位信号から抽出した各動作の特徴量の分布から、使用者が制御できる可能性のある動作のパターンを、パターン間の距離および動作ごとのばらつきに基づき推定できる方法を提案した。そして、Virtual Hand (VH) を用いて訓練者に動作を提示することで、Virtual Reality (VR) 環境下で制御すべき動作ごとの筋電位信号パターンと動作イメージの整合性を実現可能な訓練システムを提案した。提案システムではさらに使用者の筋電位信号制御能力をデータ分布の推定精度を表す Kullback-Leibler (KL) 情報量に基づく偏 KL 情報量により評価し、能力に応じて訓練対象の識別動作を選定可能とした。さらに、VH を用いた筋の収縮・弛緩指示のための動作指示モデルを構築し、提案システムを用いた訓練実験の結果、動作の選定・指示により高い識別精度を保持した状態で識別可能動作を増加できることを明らかにした。

次に、双腕協調動作モデルを内包した 5 指駆動型筋電義手の実現に必要な双腕協調動作訓練システムとして、VR 環境下に構築した双腕の VH を切断肢では筋電位、健常肢では各指の姿勢情報に基づいて制御可能とし、訓練者は指示された双腕動作を再現するよう自身の筋電位信号および角度を制御することで、安定した双腕動作を実現可能となる方法を確立した。実験では各腕 6 動作の組み合わせで実現できる 36 動作を提案システムを用いて訓練することで、識別率が向上することを明らかにするとともに、訓練者の筋電位操作能力を訓練スコアから推定し、能力に応じた訓練難易度の調整を行うことで、訓練者の能力に応じたステージの提示や指示を行い、訓練者の能力を効率的に向上できることを示した。

これら使用者の生体信号制御能力を評価して訓練に用いる試みはさまざまな生体信号インタフェースに応用できることから、動作イメージ制御型ブレイン・コンピューター・インタフェースおよび音声で操作可能な環境制御装置に展開し、短時間の訓練で脳波信号を精度良く制御できること、また、使用者の発話能力に合わせた追加学習/訓練により、不明瞭な発話であっても安定した識別が実現できることを明らかにしている。

#### 研究成果(3) モデル開発のための動作解析および義手に適用可能な触覚フィードバック

研究成果(1)および(2)の実現のため、双腕動作時の従属性を考慮可能な識別モデルを提案し、ロボットマニピュレータ制御に応用した。そして、前腕の姿勢変化などの静的な運動情報と上肢全体の動作を含む動的な運動情報を同時に用い、双腕動作の状態を推定可能なモデルを開発した。これにより、一方の情報を用いた場合よりも操作者の作業状態を正確に推定できるようになり、その状態に合わせた作業の補助を実現可能となった。実験では、小型のロボットハンドを開発するとともに、簡易作業アームに搭載し、双腕動作を含むテレオペレーション作業を実施させた。結果より、右前腕に装着した電極から計測した筋電位信号を用いて精度良く手先の動作を識別できるとともに、両腕に装着した慣性計測装置から得た加速度信号により簡易作業アームを操作し、物体を把持・解放するなどの協調作業を実現できることを示した。これらから、単なる双腕動作の協調だけでなく、多種類の生体信号を協調的に用いたインタフェースが構築できることを明らかにしている。

また、義手を用いて日常生活を送る際に重要となる感覚フィードバックについて、振動刺激を用いた触覚フィードバック法の検討を行った。ここでは、危険が生じる作業状況を想定し、圧力センサで検知した物体の形状に応じた振動フィードバックを行い、使用者が把持すべき物体であるか否かを判断可能とした。さらに、物体との接触を検知した際に振動子による触覚刺激のタイミングを制御することで使用者に与える触覚情報を変化できることを明らかにした。このとき、触覚刺激が身体動作に与える影響を評価するため、同時に、振動刺激を付与した際の運動の変化を調査した。身体運動の評価を可能とするため、動画像から骨格追跡モデルに基づき推定した各肢の位置・姿勢情報、身体に装着した慣性計測装置などのセンサから得られた生体信号などをリアルタイムに描画し、それら情報から抽出した運動評価のための特徴量を評価指標として呈示可能なシステムを同時に開発した。実験では耳介付近への定常振動刺激付与時と無刺激時

において、身体動揺がどのように変化するかをシステムを用いて多角的に解析し、刺激付与が身体動作に与える影響度を解析するとともに、日常生活のモニタリングを行い、システムを用いて非接触に計測した特徴量から、生物の日常的な行動とそれ以外の行動を分類できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Taro Shibasaki, Kosuke Jin, Masaki Maeda	4. 巻 -
2. 論文標題 An EMG-based Teleoperation System With Small Hand Based on a Dual-arm Task Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 8th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE 2023)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Tadokoro M., Shibasaki T., Tonooka H.	4. 巻 -
2. 論文標題 A Monitoring System for Postural Sway Stabilization Using Tactile Stimulation Near the Auricles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 27th International Conference on Information Technology (IT)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IT57431.2023.10078716	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 -
1. 著者名 Sasaki Masaru, Shibasaki Taro, Tonooka Hideyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Mobile Robot Control Based on Virtual Impedance Force Feedback	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ESCI56872.2023.10099666	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 -
1. 著者名 Taro Shibasaki, Kosuke Jin	4. 巻 -
2. 論文標題 Relationship Between Delay Time and Sensation in Tactile Feedback for Myoelectric Prosthesis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 275-277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Masaya Tadokoro, Taro Shibanoki and Hideyuki Tonooka	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Tactile Stimulation Near the Auricle on Body Sway During Foot Stamping	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 278-281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Yugo Yamazaki, Taro Shibanoki and Hideyuki Tonooka	4. 巻 -
2. 論文標題 A Monitoring System of a Hamster Based on Video Image Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 282-286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taro Shibanoki, Kosuke Jin	4. 巻 -
2. 論文標題 A 3D-printable Prosthetic Hand Based on a Dual-arm Operation Assistance Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)	6. 最初と最後の頁 137-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taro Shibanoki, Go Nakamura, Takaaki Chin, and Toshio Tsuji	4. 巻 -
2. 論文標題 A Training Method for Voice Signal-based Human Interfaces Based on False Recognition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 roceedings of the SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 48-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taro Shibasaki and Kosuke Jin	4. 巻 -
2. 論文標題 A 3D-printable Prosthetic Hand Considering Dual-arm Operation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)	6. 最初と最後の頁 262-263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taro Shibasaki, Kazuya Hashimoto, Go Nakamura, Toshio Tsuji and Takaaki Chin	4. 巻 -
2. 論文標題 A New Approach for Training on EMG-based Prosthetic Hand Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)	6. 最初と最後の頁 307-308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Yuki Koizumi, Taro Shibasaki, and Toshio Tsuji	4. 巻 -
2. 論文標題 A Training System for Brain-Computer Interfaces Based on Motor Imagery Selection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)	6. 最初と最後の頁 217-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taro Shibasaki, Masaki Watanabe, Go Nakamura, Takaaki Chin and Toshio Tsuji	4. 巻 5
2. 論文標題 A Training Method for the Speech Controlled Environmental Control System Based on Candidate Word Discriminations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics, Networking and Artificial Life	6. 最初と最後の頁 135-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 鳥井保秀, 芝軒太郎, 中村豪, 陳隆明, 辻敏夫
2. 発表標題 動作指示が可能な筋協調制御訓練システム
3. 学会等名 第29回 ライフサポート学会 フロンティア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taro Shibasaki, Yuki Koizumi, Bi Adriel Jr. Yozan and Toshio Tsuji
2. 発表標題 Selection of Motor Imageries for Brain Computer Interfaces Based on Partial Kullback-Leibler Information Measure
3. 学会等名 The Second Annual IEEE Life Sciences Conference (LSC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Hashimoto, Taro Shibasaki, Go Nakamura, Takaaki Chin and Toshio Tsuji
2. 発表標題 A Dual-arm Cooperation Training System for Myoelectric Prosthetic Hand Control
3. 学会等名 The Second Annual IEEE Life Sciences Conference (LSC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神弘輔, 芝軒太郎
2. 発表標題 作業モデルを内包した3Dプリンタブル筋電義手
3. 学会等名 第28回 ライフサポート学会 フロンティア講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Taro Shibasaki, Masaki Watanabe, Go Nakamura, Takaaki Chin and Toshio Tsuji
2. 発表標題 A Training Method for the Speech Controlled Environmental Control System Based on Candidate Word Discriminations
3. 学会等名 Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tai Tomizawa, Taro Shibasaki, Takaaki Chin and Toshio Tsuji
2. 発表標題 An EMG-based Prosthetic Hand Training System Using a Class Partial Kullback-Leibler Information
3. 学会等名 The first IEEE Life Sciences Conference (LSC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富澤太, 芝軒太郎, 中村豪, 陳隆明, 辻敏夫
2. 発表標題 義手動作と動作イメージの整合性を実現可能な相互学習型訓練システム
3. 学会等名 第27回 ライフサポート学会 フロンティア講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Taro Shibasaki and Toshio Tsuji	4. 発行年 2018年
2. 出版社 IGI-Global	5. 総ページ数 28
3. 書名 Handbook of Research on Biomimetics and Biomedical Robotics, Chapter15, "Discrimination of Dual-Arm Motions Using a Joint Posterior Probability Neural Network for Human-Robot Interfaces"	

〔産業財産権〕

〔その他〕

メカトロニクスシステム学研究室  
<https://www.okayama-u.ac.jp/user/mechatro/>  
茨城大学工学部情報工学科芝軒研究室  
<http://bs.cis.ibaraki.ac.jp/>

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
---------	---------