

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14698

研究課題名（和文）尺度混合確率モデルに基づく筋疲労の潜在特徴評価法の提案と適応的筋電義手制御の実現

研究課題名（英文）Latent feature evaluation of muscle fatigue based on scale mixture stochastic model and its application to adaptive control of myoelectric prosthetic hand

研究代表者

古居 彬 (Furui, Akira)

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・助教

研究者番号：30868237

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、尺度混合表現に基づく確率モデルを用いて、筋疲労中の筋電位信号（筋収縮に伴って発生する電気信号）の潜在状態を推論するための方法論を構築した。副次的に、本手法は脳波など筋電位信号以外の生体信号にも適用可能であることを示した。また、このモデルを拡張し、筋活動中の不確実性を考慮可能な筋電位パターン分類法や、逐次学習に基づく適応的動作認識法を提案した。さらに、提案したパターン分類器を筋電義手システムに導入し、生体模倣動作を実現可能な筋電義手の開発に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、筋電位信号の時系列データに含まれる潜在的特徴を推定可能な、新たな確率モデリングの枠組みを提案している点である。これに加え、モデルをパターン分類法へと展開し、筋疲労に対して頑健な動作認識に応用したことも、本研究の貢献として挙げられる。筋電位信号などの生体信号から、ヒトの動作意図や異常の兆候といった内在的な情報を推定することができれば、より直感的かつ自然に操作可能なヒューマンマシンインタフェースに繋げることができる。本研究は、そのような技術を実現する上で考慮しなければならない「筋疲労」という現象の対処に焦点を当てたものであり、この点に本研究の社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study developed a methodology for inferring the latent state of electromyogram (EMG) signals during muscle fatigue using a stochastic model based on scale-mixture representation. Secondly, we showed that this methodology can be applied to biological signals other than EMG signals, such as electroencephalography (EEG). We also extended the model and proposed an EMG pattern classifier that can account for uncertainty during muscle activity and an adaptive motion recognition method based on Bayesian sequential learning. Furthermore, we developed a myoelectric prosthetic hand that can realize biomimetic movements by introducing the proposed classifiers into a prosthetic hand control system.

研究分野：生体信号解析，機械学習，確率モデル

キーワード：筋電位信号 生体信号 機械学習 確率モデル 筋疲労 逐次学習 筋電義手

1. 研究開始当初の背景

日本における上肢切断患者の数は8万2千人に上り、その数は増加傾向にある。上肢切断患者の機能を補う手段として、筋収縮時に皮膚表面から計測される筋電位信号 (Electromyogram: EMG) を制御信号として用いる筋電義手の研究開発が従来から行われてきた。特に近年は、ニューラルネットワークなどを用い、計測した筋電パターンと動作との間の関係を機械学習的に推定することで、多動作の制御を実現する筋電義手の開発が数多く行われている。

しかしながら、現在普及している義手のほとんどは単純な閾値処理による開き・握りなど少ない動作しか実現できないものであり、上肢、特に手指の機能を代替するには至っていない。これは、多動作の識別を実現するような高度な筋電義手に関する研究のほとんどが実験室レベルの理想的な環境下を想定したものであり、実際の日常場面で要求される性能を十分に発揮できないためである。特に、長時間の義手使用に伴い生じる筋疲労の影響は重大であり、筋疲労の進行によって筋電位信号の特性が徐々に変化することで、動作の識別性能の低下が引き起こされてしまうことが問題であった。

このような筋疲労に応じた筋電位信号の特性変化は、筋線維の集合である運動単位の活動パターンや伝導効率が経時的に変化することによって引き起こされる。しかしながら、非侵襲計測によって得られる筋電位信号から、このような潜在的な生理学的プロセスを推定することは容易ではない。また、このような筋疲労の影響を考慮可能な逐次学習法を導入した研究も存在するが、定期的に使用者から教師ラベル付きデータを収集する必要があるなど、実用性が低いものであった。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が独自に開発した筋電位信号の尺度混合確率モデル (IEEE TBME, 2019) に基づき、筋疲労の影響を考慮可能な適応的動作識別法を提案する。そして、提案法を筋電義手システムへと導入することで、長時間の義手使用に伴う筋疲労の影響に対してロバストな制御の実現を目指す。本研究により、義手装着時に一度学習するだけで高い識別性能を長時間維持できるような、実用的かつ先進的な筋電義手の開発が期待される。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、主に以下の3つの研究項目に取り組んだ。

- (1) 研究代表者が独自に提案してきた尺度混合モデルの枠組みに基づき、筋電位信号をはじめとする生体信号のモデル化や、その背景にある潜在的特徴を推定するための評価法の実現に関する研究を遂行した。
- (2) このモデルを拡張し、不確実性を考慮可能な筋電位パターン分類法や逐次学習に基づく適応的動作識別法を構築した。
- (3) 提案したパターン分類器を筋電義手システムに導入するとともに、人の動作特性をその制御モデルに組み入れることで、生体模倣動作を実現可能な筋電義手の開発に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 生体信号の尺度混合確率モデルと潜在状態推論

これまで研究代表者が取り組んできた尺度混合表現に基づく確率モデルの枠組みを拡張し、隠れマルコフに基づく時系列構造を導入した (図1)。これにより、潜在状態の時系列的な特徴変化を推論可能である。本手法は筋電位信号だけでなく、脳波など異なる生体信号にも適用可能であり、てんかん発作時脳波や睡眠時脳波、快不快感情と紐づいた脳波などへの応用可能性を示した。

[主な成果物]

- [Akira Furui](#), Ryota Onishi, Akihito Takeuchi, Tomoyuki Akiyama, and Toshio Tsuji, "Non-Gaussianity Detection of EEG Signals Based on a Multivariate Scale Mixture Model for Diagnosis of Epileptic Seizures", IEEE Transactions on Biomedical Engineering (IF=4.491), vol. 68, no. 2, pp. 515-525, DOI: 10.1109/TBME.2020.3006246, Feb 2021.
- [Akira Furui](#), Tomoyuki Akiyama, and Toshio Tsuji, "A Time-Series Scale Mixture Model of EEG with a Hidden Markov Structure for Epileptic

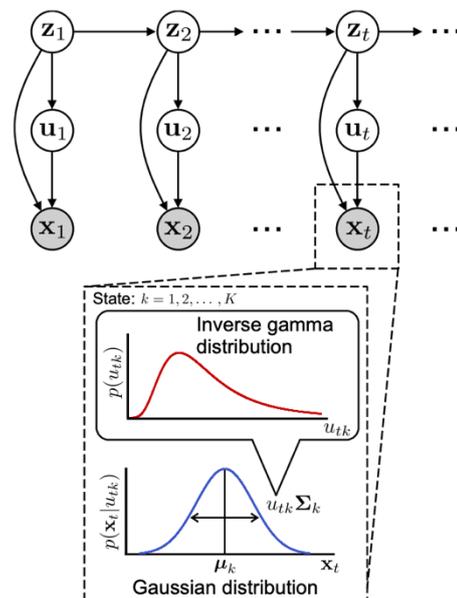


図 1. 時系列尺度混合モデル

Seizure Detection”, Proceedings of 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC’21), pp. 5832–5836, Virtual Conference due to COVID-19, Nov 1–5, 2021.

- Miyari Hatamoto, Akira Furui, Keiko Ogawa, and Toshio Tsuji, “Sleep EEG Analysis Based on a Scale Mixture Model and Spindle Detection”, Proceedings of the 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2022), pp. 887–892, Virtual Conference due to COVID-19, Jan 9–12, 2022.
- 福田 隼也, 古居 彬, 熊谷 遼, 阪井 浩人, 町澤 まろ, 辻 敏夫, “脳波の尺度混合モデルに基づく感情価の解説”, 2022 年電気学会電子・情報・システム部門大会, pp. 963–968, MC7-6, 2022 年 9 月 2 日.

(2)-1 不確実性を考慮可能な筋電位パターン分類モデル

前述の尺度混合モデルをベイズ確率モデルとして拡張するとともに、これを内包したパターン分類法を提案した(図 2)。本手法は、筋電位信号の分散を潜在的な確率変数と仮定することで、筋活動の不確実性を考慮した高精度な動作識別が可能である。また、変分ベイズ推論に基づく学習法を導入することで、学習過程でモデルの複雑さをデータから自動的に決定可能である。実験では、複数の筋電位データセットを用いた動作識別実験を行い、提案法が既存のパターン分類器よりも優れた識別能力を有することを示した。

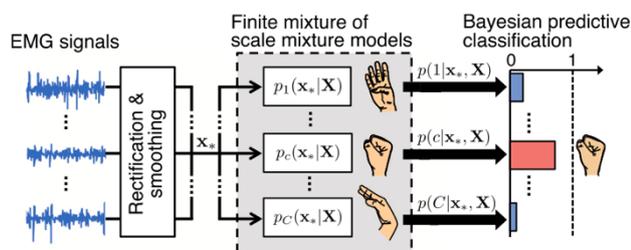


図 2. 筋電位パターン分類モデル

[主な成果物]

- Akira Furui, Takuya Igaue, and Toshio Tsuji, “EMG Pattern Recognition via Bayesian Inference with Scale Mixture-Based Stochastic Generative Models”, Expert Systems with Applications (IF = 6.954), vol. 185, 115644, DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115644, Jul 2021.
- 古居 彬, 辻 敏夫, “表面筋電位信号のベイズ確率モデルと動作パターン識別”, 第 60 回日本生体医工学会大会プログラム・抄録集, O1-4-1-5, p. 276, 2021 年 6 月 15 日.
- 古居 彬, “生体電気信号の尺度混合確率モデルとパターン認識への応用”, 2022 年電気学会電子・情報・システム部門大会, pp. 957–962, MC7-5, 2022 年 9 月 2 日.

(2)-2 半教師ありベイズ逐次学習に基づく筋電位パターンの適応的分類

筋電インタフェースを長時間使用していると、筋疲労などの影響で信号特性が徐々に変化してしまい、結果としてパターン分類器の性能が低下する問題が知られている。これに対し、信号特性が変化したタイミングで使用者から教師ラベル付き校正用データを収集し分類器を追加学習すれば精度の低下を防ぐことができるが、使用者への負担が増大するため非実用的である。そこで、半教師ありベイズ逐次学習に基づき、分類器を更新可能な適応的分類法を提案した。提案法は、確信度に基づく擬似ラベルを利用してモデルを逐次的に更新することが可能であるため、使用者からラベル付き校正用データを収集する必要がない。実験の結果、提案法は経時的な識別精度の低下を抑制可能であることに加え、既存の逐次学習法よりも優れた性能を示すことを確認した(図 3)。

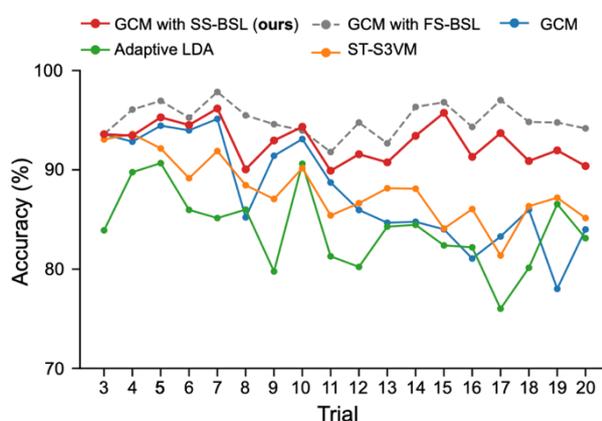


図 3. ベイズ逐次学習による識別精度低下の抑制

[主な成果物]

- 米田 清太郎, 古居 彬, “ベイズ逐次学習に基づく筋電位パターンの適応的分類”, 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022), pp. 363–68, 2022 年 12 月 (優秀講演賞受賞).

(3) 筋電義手の生体模倣制御

筋電義手の制御においては、高精度に動作を識別・実行できることが求められる一方で、人間らしい自然な挙動を実現できるかどうかも重要である。そこで、人の運動特性を模倣可能な制御システムの開発に取り組んだ。具体的には、筋の運動モデルである λ モデルに基づき随意的な関節の屈曲・進展が可能なシステム(図 4)や、筋電位信号から人の振戦を推定し義手の動作において再現可能なシステム(図 5)を提案した。シミュレーションや実データ実験を通して、これ

ら提案システムの有効性を検証した。

[主な成果物]

- Akira Furui, Kosuke Nakagaki, and Toshio Tsuji, "Biomimetic Control of Myoelectric Prosthetic Hand Based on a Lambda-type Muscle Model", Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 10484-10490, Virtual Conference due to COVID-19, May 30-June 5, 2021.
- 熊谷 遼, 畑元 雅璃, 李 佳琪, 大西 亮太, 古居 彬, 辻 敏夫, "筋電信号の分散分布モデルに基づく人工振戦生成法の提案と生体模倣筋電義手への応用", 第 60 回日本生体医工学会大会プログラム・抄録集, O1-4-1-6, p. 277, 2021 年 6 月 15 日.
- 熊谷 遼, 古居 彬, 城明 舜磨, 阪井浩人, 辻 敏夫, "振戦を再現可能な筋電義手の開発と生体模倣性の評価", 2022 年電気学会電子・情報・システム部門大会, pp. 969-973, MC7-7, 2022 年 9 月 2 日 (優秀講演賞受賞) .

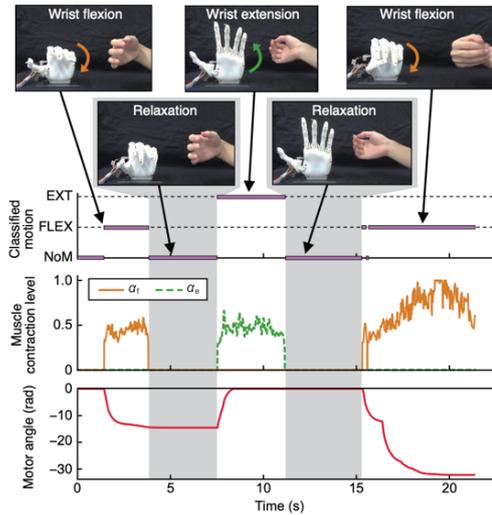


図 4. λ モデルに基づく義手制御

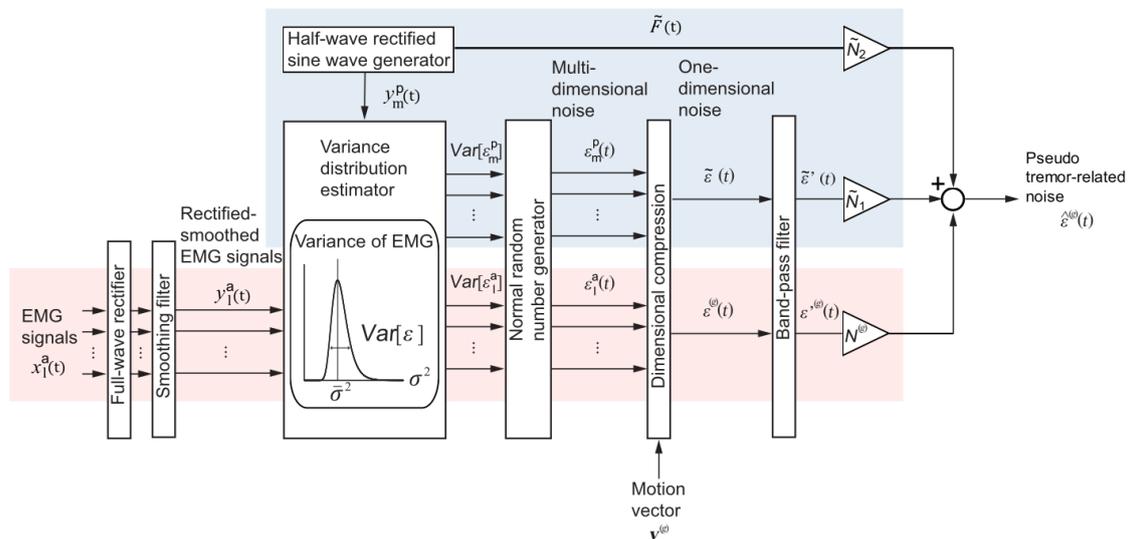


図 5. 義手に振戦を再現させるための擬似振戦生成モデル

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 0件）

1. 著者名 Ziqiang Xu, Toshiki Sakagawa, Akira Furui, Shumma Jomyo, Masanori Morita, Masamichi Ando, and Toshio Tsuji	4. 巻 69
2. 論文標題 Beat-to-Beat Estimation of Peripheral Arterial Stiffness From Local PWV for Quantitative Evaluation of Sympathetic Nervous System Activity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 2806-2816
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TBME.2022.3154398	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 Akira Furui, Takuya Igaue, and Toshio Tsuji	4. 巻 185
2. 論文標題 EMG pattern recognition via Bayesian inference with scale mixture-based stochastic generative models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Expert Systems with Applications	6. 最初と最後の頁 115644
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.eswa.2021.115644	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 Akira Furui, Ryota Onishi, Akihito Takeuchi, Tomoyuki Akiyama, and Toshio Tsuji	4. 巻 68
2. 論文標題 Non-Gaussianity Detection of EEG Signals Based on a Multivariate Scale Mixture Model for Diagnosis of Epileptic Seizures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 515-525
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TBME.2020.3006246	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 1件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 米田 清太郎, 古居 彬
2. 発表標題 ベイズ逐次学習に基づく筋電位パターンの適応的分類
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2022）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷 遼, 古居 彬, 城明 舜磨, 阪井浩人, 辻 敏夫
2. 発表標題 振戦を再現可能な筋電義手の開発と生体模倣性の評価
3. 学会等名 2022年電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古居 彬
2. 発表標題 生体電気信号の尺度混合確率モデルとパターン認識への応用
3. 学会等名 2022年電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田 隼也, 古居 彬, 熊谷 遼, 阪井 浩人, 町澤 まろ, 辻 敏夫
2. 発表標題 脳波の尺度混合モデルに基づく感情価の解読
3. 学会等名 2022年電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Furui
2. 発表標題 Evaluating Classifier Confidence for Surface EMG Pattern Recognition
3. 学会等名 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古居 彬, 辻 敏夫
2. 発表標題 表面筋電位信号のベイズ確率モデルと動作パターン識別
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古居 彬, 秋山 倫之, 辻 敏夫
2. 発表標題 振幅の確率の変動に着目した非ガウス脳波モデルとてんかん発作自動検出への応用
3. 学会等名 第51回日本臨床神経生理学会学術大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Furui, Tomoyuki Akiyama, and Toshio Tsuji
2. 発表標題 A Time-Series Scale Mixture Model of EEG with a Hidden Markov Structure for Epileptic Seizure Detection
3. 学会等名 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Miyari Hatamoto, Akira Furui, Keiko Ogawa, and Toshio Tsuji
2. 発表標題 Sleep EEG Analysis Based on a Scale Mixture Model and its Application to Sleep Spindle Detection
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Furui and Toshio Tsuji
2. 発表標題 Does the variance of surface EMG signals during isometric contractions follow an inverse gamma distribution?
3. 学会等名 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Furui, Kosuke Nakagaki, and Toshio Tsuji
2. 発表標題 Biomimetic Control of Myoelectric Prosthetic Hand Based on a Lambda-type Muscle Model
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷 遼, 畑元 雅璃, 李 佳琪, 大西 亮太, 古居 彬, 辻 敏夫
2. 発表標題 筋電信号の分散分布モデルに基づく人工振戦生成法の提案と生体模倣筋電義手への応用
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 操作装置、および、操作推定方法	発明者 辻敏夫, 古居彬, 城 明舜磨, 角田知己, 松本龍彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-206397	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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