

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12600

研究課題名（和文）データの価値を高める深層学習と筋シナジーによる手首筋電認識ネットからのルール生成

研究課題名（英文）Rule Generation from Wrist EMG Recognition Network Using Deep Learning and Muscle Synergy to Increase Data Value

研究代表者

福見 稔 (FUKUMI, Minoru)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・教授

研究者番号：80199265

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）： 入力層で学習データにガウス乱数を掛け合わせ、データ数を数百倍程度に増加させ、その価値（有用度）を中間層付近の抽象化された空間で評価した。学習後に中間層付近でt-SNEで次元圧縮を実施した。一定のしきい値以下のデータを用いて学習させたところ、認識精度の改善効果があることが分かった。

次に、遺伝的アルゴリズムにより、筋シナジー毎に筋電信号の周波数分布を求めた。結果として、筋シナジー毎に、ある程度の違いを検出できた。

最後に、ルール抽出に関してであるが、畳み込みに対する効果的な抽出法は開発できていない。現在、3層ネットの連結化によるルール抽出法を検討している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

入力層で学習データ数を増加させ、その価値（有用度）を中間層付近の抽象化された空間で評価する方法は、従来とは異なる新しい手法であり、またその効果も大きい。この方法は深層学習を用いるすべての分野に適用することが可能で有効性と影響度は大きい。今後、様々な分野に適用していく予定である。

深層学習ネットからのルール抽出法の開発は、深層学習ネットの内部のホワイトボックス化に繋がり、大変意義の大きい研究である。現時点では、有効な解決法を見いだせていないが、今後、3層ネットの連結化などの方法を検討し、ルール抽出の研究開発を行う予定である。

研究成果の概要（英文）： In the input layer, the training data is multiplied by Gaussian random numbers, the number of data was increased several hundred times, and their values (usefulness) were evaluated in an abstracted space near the middle layer. After learning, dimensionality reduction was performed by t-SNE near the hidden layer. It was found that learning using data below a certain threshold had the effect of improving recognition accuracy.

Next, a genetic algorithm was used to determine the frequency distribution of myoelectric signals for each muscle synergy. As a result, some differences could be detected for each muscle synergy.

Finally, regarding rule extraction, we have not been able to develop an effective extraction method for convolutional networks. Currently, we are studying a rule extraction method by connecting three-layer neural networks.

研究分野：信号処理

キーワード：手首筋電 データ増量 深層学習 筋シナジー

1. 研究開始当初の背景

1990年代後半以降に下火となっていたニューラルネットワーク (Neural Network 以後 NN と略記) 研究は、2006年の Hinton らによる深層学習の提案以後に世界中で活発化し、従来法を大幅に上回る性能を示してきた。

その一方で、1980年代から指摘されている欠点が解決されたわけではない。そのため、内部表現の解釈困難性などは、深層学習でも課題となっている。1990年代後半に学習済みの3層 NN からパターン認識を行う際のルールを生成する方法が幾つか提案された。ただ深層学習では、4層以上の深い層 (4~30層程度) の NN を用いるため、ルール生成の研究は限られていた。しかし最近、深層学習に対するルール生成法が幾つか提案された。例えば、4層 NN を決定木に置き換える方法では、10%程度の精度悪化を生じ、提案者がルール抽出法としては問題があると記載している。別の文献では、各入力信号 (属性) の空間を別々に 50 程度に分割し、分割された空間毎に決定木で場合分けして出力クラスに関連付けており、Table-lookup 法と類似している。したがって、回帰の場合や畳み込み層には使えない、など制約が大きく通常の深層学習に適用することは困難である。つまり現在でも深層学習 NN の内部はブラックボックスと変わらない。そのため、深層学習を自動運転や医療診断、大規模プラントの制御などに利用して事故が発生してもその原因を探ることは困難である。

本研究では、深層学習の内部表現の解釈困難性 (ブラックボックス性) を解決するために、筋シナジー仮説に基づいて学習済みの深層 NN から生成できるルール表現を検討し、人間が理解しやすいルールを生成する方法を研究する。深層学習の高精度認識達成の理由を明確にし、安心・安全な適用方法を確立するためにも人間が理解 (許容) できるルールとしてその性能を説明することは重要である。

他方、本研究では手首筋電に基づくインタフェースを開発する。筋電を用いた研究は従来から、義手や義足、様々なインタフェースに応用 (ゲームコントローラも含む) できるのではないかと期待から世界中で活発に行われていた。しかし、それらの研究の中で、例えば腕の筋電を利用する場合、上腕や前腕の太い筋肉 (橈側・尺側主根屈筋上等) に電解クリームを塗布して湿式センサを装着する方式であり、装着に際して若干の専門的知識を必要とする。インタフェース利用目的の場合、本研究で目指す手首筋電の利用形態 (腕時計型、乾式センサ、図 1) が装着性に優れている。

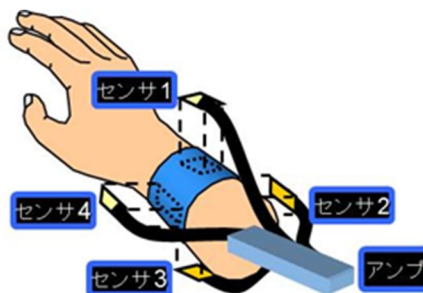


図 1 : 手首筋電の計測

2. 研究の目的

本研究では、深層学習 NN を用いて手首で計測される筋電による指・手首動作の認識および個人認証を高精度に実現し、かつ入力データと出力信号の関係性を筋シナジーに基づいて説明できるルールを生成する方法の開発を目指すことが目的であり学術的独自性でもある。これらを実現するためには、NN から生成できるルール表現と人間の理解し易さ (許容可能か否か) などをまず検討する必要がある。そのため本研究でのルール生成では、筋シナジー仮説に基づいたルール生成法の開発を目指す。深層学習では一般に、畳み込み層を含む複雑で深い層構造の NN を用いて大量の良質なサンプルを学習することにより人間に匹敵する性能を獲得してきた。しかし逆に、この複雑な深層構造がルール生成を困難にしてきた。そこで本研究では、入力データを直接出力クラスに関連付けるのではなく、筋シナジーという中間的表現に関連付ける。そして、筋シナジーの組合せにより出力クラス (指動作等) を表現するルール生成法を開発する点が学術的創造性である。この方法を他分野に適用することにより、自動運転システムや医療診断等のブラックボックス性を可能な限り解消し、深層学習の実利用を可能としたい。

また、深層構造の NN を効率的に学習させるためには、良質のデータが大量に必要である。しかし、生体信号データを大量に準備することは一般的に困難である。そこで、本研究では、生体信号データ数を効率的に増加させる方法を開発する。従来は、入力層で乱数等を使ってデータ数を増加させる方法であったが、データの質の良否は評価されていない。また、中間層付近でデータ数を増加させ評価する方法は提案されているが、入力層から中間層付近までの学習ができない欠点があった。本研究では入力層でデータ数を増加させ、中間層付近で効果的に評価し、NN 全体を効率的に学習する方法を開発する点も本研究の独自性である。さらに、大量の学習データを生成し中間層付近で評価することで、敵対的事例 (入力の少しの改変で出力クラスが変わる入力データ、近年、敵対的事例による様々な AI システムへの攻撃が懸念されている) の発生可能性を極限まで低減させることも本研究の特色である。

3. 研究の方法

本研究では、少数の筋電信号からデータ個数を効率的に増加させてその良否を評価する (デー

タの価値を高める)方法と筋シナジーに基づいて深層学習 NN から人間が理解(許容)できるルール生成法を研究開発する。そのために以下の研究(1)(2)を行う。対象とする深層学習 NN の構造は、入力層 - 畳み込み層を 3 層 - 筋シナジー層 - 全結合層 - 出力層を想定する。NN への入力信号は時系列の筋電信号と周波数変換した信号の両方で検討する。指と手首の動作であるが、最初は指の動作だけを対象とし、研究進捗後に手首動作を加える。

(1)令和 2 年度：データの価値を高める方法

入力層で学習データにガウス乱数等を掛け合わせ、データ数を 1,000 倍以上に増加させ、その価値(有用度)を中間層付近の抽象化された空間で評価する。そのために、まず当初の学習データだけで深層学習を行い、学習後に中間層付近でオンライン判別分析を実施する。その後、新たに生成した学習データを入力し、中間層付近での判別分析の空間に射影し、当初の学習データとの分布関係と何らかの距離で有用性を評価し、ある閾値以下のデータを学習に用いる方法を開発する。判別分析で上手く評価できない時は他の非線形手法を検討する。中間層付近の位置は、筋シナジー層の前後で検討する。この方法は NN 全体を学習でき、従来法よりも敵対的事例を防ぐ効果が高く、かつ高精度認識を達成できると考えられる。

(2)令和 3 年度以降：筋シナジーに基づくルール生成

ルール生成は、入力層でのデータと筋シナジー層の各ユニットとの関係性、筋シナジー層のユニットと出力層ユニットとの関係性の 2 段階構成とする。また、各筋シナジーユニットは指の単純動作を表現するものと考え、最初は各指(親指、人差し指、中指、薬指と小指のペアの 4 種類)の屈曲動作に対応するように学習させる。この場合、筋シナジーユニットは 4 個である。指動作を学習する際は、各筋シナジーが独立となるように筋シナジー層には出力層とは別の教師信号を与える。さらに、生成されたルールの根拠を筋シナジーと入力信号との関係性で説明できる仕組みを構築するために、筋シナジーと密接に関連する入力信号(属性)を勾配に基づいて推定できる深層学習技術の Grad-CAM(Class Activation Map)を使用する。そして筋シナジーと最も密接に関連する少数の入力信号(属性)により各筋シナジーの動作を説明する仕組みを開発する。単純動作を学習した後、複合動作(ジャンケン動作やピンチ動作)および個人認証を同時に学習させるが(出力層は別々)教師信号は出力層にだけ与え、畳み込み層は学習しない。複合動作と個人認証を上手く学習できない場合には、別の単純動作(指の伸展等)を筋シナジーに追加し、他の層構造と学習方法も再検討する。筋シナジー層から出力層までの間のルール生成は申請者の提案方法を用いる。そして、これらの 2 段階の結果を統合してルール表現とする方法を開発する。この方法が実現できると、入力属性の一部が出力ユニットに与える影響を筋シナジーに基づいて説明できると考えている。この方法を別分野に適用する際は筋シナジーを別の概念に置き換える必要がある。

4. 研究成果

まず、データの価値を高める方法について研究成果を記述する。入力層で学習データにガウス乱数を掛け合わせ、データ数を増加させ(疑似データの作成)、その価値(有用度)を中間層付近の抽象化された空間で評価する。そのために、まず当初の学習データだけで深層学習を行い、学習後に中間層付近での次元圧縮された空間に射影し分布を調査する。その後、新たに生成した学習データを入力し、中間層付近で低次元の空間に射影し、当初の学習データとの分布関係と何らかの距離で有用性を評価し、ある閾値以下のデータを学習に用いる方法を開発する。本研究では、非線形手法を用いるが、t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding)と呼ばれる方法を用いた。中間層付近の位置は、出力層の少し前の層で検討する。実験では、7 層 NN を用い 5 層目の出力に対して次元圧縮を実施する。この方法は NN 全体を学習でき、従来法よりも敵対的事例を防ぐ効果が高く、かつ高精度認識を達成できると考えられる。本研究では、指の屈曲動作に対して手首で計測された EMG を用いて認識実験を行った。指動作は 5 指の屈曲動作であり、その識別を行う。当初の計測データは、5 動作×5 回×計測 4 日間×被験者 1 名 = 100 データである。まず、当初の学習データだけで学習を行ったところ、70%程度の識別精度であった。次に、疑似データを作成して学習・評価を行うと、75%程度の精度が得られた。疑似データは乱数により 1,000 個作成し、一定のしきい値以下のデータを学習に使用した。今後、被験者数や動作数を増やした実験が必要である。ただし、学習サンプル数はどの程度増加させれば良いのか、しきい値の大きさの決め方、t-SNE 以外の次元圧縮方法での評価を行うとどうなるのか、などは検証が必要である。例えば、線形の主成分分析や判別分析、さらには非線形の UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) などでの評価が必要である。また今回は単に乱数を用いて新しい学習サンプルを生成したが、他の方法ではどうなるのか、なども検討が必要である。

以上から、今回の学習データ数の増加法は一定の効果があり、他の分野の問題にも同様に適用でき、精度改善効果が得られることが予想される。今後さらに、効果の高い方法を検討するとともに、他分野の問題での検証が必要である。さらに、敵対的事例による様々な AI システムへの攻撃が懸念されているが、その防御法の開発において、本研究の方法がどの程度の効果を発揮することができるかも検証する必要がある。

次に、手首で計測された各指の単純動作時(屈曲時)の筋電信号を筋シナジーと見なし、筋シ

ナジーに基づくルール抽出に関する研究成果であるが、以下に記載する。

まず、手首で計測された各指の単純動作時の筋電信号を筋シナジーと見なし、複合動作をしている場合の筋電信号を各筋シナジーで表現することを試みた。各指の屈曲動作として、親指、人差し指、中指、薬指、小指の屈曲動作を筋シナジーの基本動作として筋電信号を手首で計測した。そして、これらの筋電信号を筋シナジーと関連付けるための機械学習を行った。機械学習手法として、サポートベクタマシンと3層 NN を用いて学習を行った。その後、親指と人差し指を同時に曲げる（屈曲）動作（タッピング）を行い、その際の筋電信号を計測して、機械学習システムに入力した。機械学習手法の出力部で、筋シナジーの表現を確認したが、どちらの機械学習手法でも人差し指の筋シナジーだけが観測される場合が多かった。これは、親指と人差し指の複合動作時の筋電信号が、単純動作時と比べて、かなり弱かったためではないかと考えられる。親指と人差し指を引っ付ける動作（タッピング）では、指の屈曲の度合いが比較的小さくなるため、筋電信号も小さくなっていたと考えられる。今後の方針として、複合動作時の筋電信号を再計測し、もっと明確な筋シナジー信号が観測されるように工夫することが必要である。また、学習に用いる NN を深層学習モデルに置き換えて実験することも必要である。

さらに、ルール生成法の研究開発とルール生成に有効と考えられる筋シナジーと入力特徴の関連付け方法の開発を目指した。まず、筋シナジー（指の屈曲と伸展動作）と関連する入力特徴の関連付けであるが、まず筋電信号を高速フーリエ変換により周波数成分に変換した。そして、遺伝的アルゴリズムに基づく特徴選択により、筋シナジー毎に関連する周波数帯を選定した。各周波数成分をそのまま使用すると特徴選択が上手くできなかったため、100Hz 単位で周波数成分をまとめてから特徴選択を行った。この場合、比較的明確に特徴選択ができた。ただし、各指動作に関連する周波数帯域の精細かつ詳細な選定は今後の課題である。今後、もっと細かな周波数帯で特徴選択を実施し、筋シナジーと関連付ける予定である。

最後に、各筋シナジーに基づいて NN からのルール生成を行う方法の検討を行った。使用する NN が3層の場合には、研究代表者が20年以上前に提案した方法を使用することができる。深層学習 NN の場合で検討を行ってきたが、畳み込み型 NN の場合には、直接的なルール生成が困難であることが分かってきた。そのため、まずは、畳み込み結合のない場合で、二つの3層全結合型 NN を連結する仕組みを検討してきた。3層と3層を連結して5層（3層目は共通）とする方法である。この方法であれば、連結することにより、5層、7層と層数を増加させることが可能である。5層の場合には、3層目に各筋シナジーに関するユニットを設け、入力層と各筋シナジーユニット（前半部）、各筋シナジーユニットと出力層ユニット（後半部）をルールとして関連付け、その前半部と後半部を連結してまとめる方法である。連結する仕組みは原理的に実現可能と考えているが、前半部ルールと後半部ルールを統合化する部分で詳細を検討中である。そのため、具体的な連結のためのプログラム実装はまだできていない。現在、5層の場合に、この方法でのルール生成法の開発を目指している。しかし、この方法では、畳み込み型 NN でのルール生成は困難である。そのため、畳み込み型 NN に適用可能な方法も検討しており、近い将来に畳み込み型 NN に対するルール生成法を提案したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Eisuke Yamamoto, Momoyo Ito, Shin-ichi Ito and Minoru Fukumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Separation of Compound Actions with Wrist and Finger Based on EMG	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11794, Fifteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2585334	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 斎藤 佑樹, 伊藤 伸一, 伊藤 桃代, 福見 稔
2. 発表標題 手首筋電に基づくタッピング動作の認識
3. 学会等名 人工知能学会全国大会,
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------