

研究報告書

「生体信号の確率的生成モデルと 推論ニューラルネット」

研究期間：2020年4月～2022年3月

研究者番号：50249

研究者：早志 英朗

1. 研究のねらい

パターン認識をはじめとする自然情報処理において、データの特性をどのようにモデル化するかは重要な課題である。確率的生成モデルはデータのモデル化手法の一種であり、データの生成過程を確率分布の組み合わせでモデル化し、観測データからモデルパラメータを推論することでパターン認識問題へ応用できる。領域知識を柔軟に組み込むことができ、解釈性が高く欠損値に強いといった様々な利点があるものの、複雑なモデルの場合パラメータや潜在変数の推論が困難になる課題があった。一方、ニューラルネットワーク(NN)は入力の線形和の非線形変換に基づくニューロンモデルを多層に結合したモデルであり、高い表現能力と強力な学習能力を持つことからパターン認識に多用される。ただし、内部の解釈性が低く、ブラックボックス的になる問題があった。

本研究では、確率的生成モデルと NN を融合することで両者の長所を相補的に生かす機械学習手法の基礎的な検討を行う。そして、それにより得られた知見を生体信号などの実世界データ解析につなげることを目的とする。

具体的には、以下の3つのテーマに取り組む：(A) NN への確率モデル埋め込み、(B) NN による確率モデル推定、および(C) 確率モデルによる NN 解釈。(A)では、解析対象の特性を良く表す確率モデルを構造に展開した NN を開発する。そして、これを誤差逆伝播法で学習させることで、効率的なモデル推論を行う。(B)では、NN を用いて事前に仮定した確率分布を推定することにより、半教師あり学習や時系列予測へ応用する。(C)では、確率モデルの知識を利用して、NN の学習挙動や内部状態の解釈に取り組む。

2. 研究成果

(1) 概要

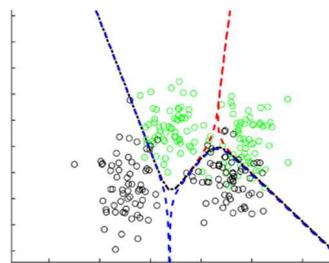
確率的生成モデルとニューラルネットワーク(NN)を融合した機械学習手法の開発およびその応用研究に従事した。具体的には、(A) NN への確率モデル埋め込み、(B) NN による確率モデル推定、および(C) 確率モデルによる NN 解釈の3つのテーマに分割し研究を遂行した。研究成果は、ICLR や ICASSP といったトップ会議を含む5件の国際会議発表、1編のジャーナル論文、および7件の国内会議発表として公表した。

(2) 詳細

研究テーマ A 「NN への確率モデル埋め込み」

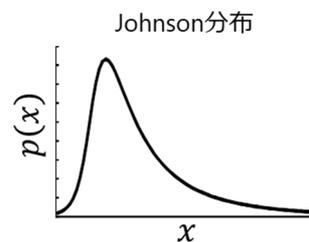
・混合正規分布に基づくスパースな識別モデルと NN への埋め込み

混合正規分布に基づくスパースな識別モデルを提案した。提案法では、混合正規分布に準ずるモデルを事後確率最大化により学習させる問題において、Sparse Bayesian learning に基づいて重み係数をスパース化することにより、汎化性能を向上させるとともに、混合正規分布のコンポーネント数を自動決定できることを示した。また、理論的な貢献として、関連ベクトルマシンと混合正規分布の関係性に新しい解釈を与えた。さらに、提案ネットワークを畳み込み NN の最終層として利用し End-to-end で学習することで、特徴量を正規分布状に埋め込み、かつ Softmax 関数を利用したときと比較しクラス間のマージンを広げられることを示した。本研究は機械学習のトップ会議である ICLR2021 へ採択された。



・Johnson 分布に基づく NN と筋電識別への応用

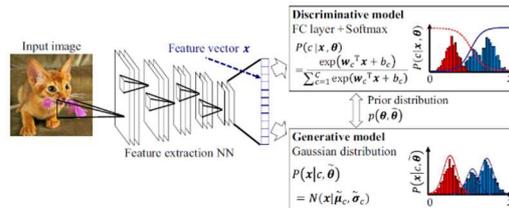
筋電識別に特化した Johnson 分布に基づく NN を提案した。筋電信号は皮膚表面から筋活動を計測した信号であり、インタフェース制御等に応用される。筋電信号の識別の際は整流平滑化などの信号処理が加えられることが一般的である。本研究では、信号処理後のデータ分布が歪度や尖度を持つことに着目し、この知識を埋め込んだ NN を提案し、筋電位識別の精度を向上させられることを示した。具体的には、Johnson 分布と呼ばれる 4 種類のパラメータと非線形変換を組み合わせた右図のような確率分布に基づく NN を提案した。Johnson 分布に基づくクラス事後確率計算の過程の NN による表現は、要素間の積を計算する層やハイパボリックサイン関数などの特殊な活性化関数を利用することによって実現した。本研究は IEEE Access へ掲載された。



研究テーマ B 「NN による確率モデル推定」

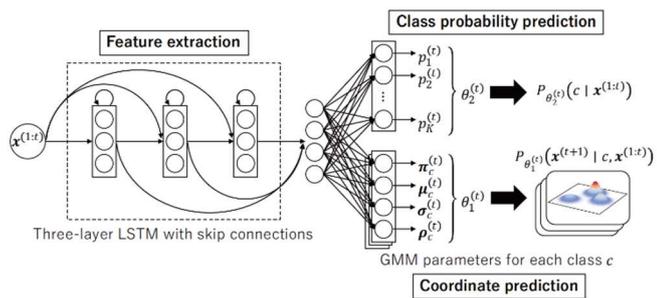
・生成と識別のハイブリッドモデルと半教師有り学習への応用

生成モデルと識別モデルを協調的に学習する方法を提案し、半教師有り学習へ応用した。生成モデルはデータの生成過程をモデル化する手法であり、パターン認識問題においてはラベル付きデータのみならず、分布推定にラベル無しデータを活用できる。識別モデルは識別に必要なクラス事後確率を直接モデル化するため、識別モデルは一般的に生成モデルと比較して高い分類性能を持つと言われるが、ラベル無しデータを扱うことができない。本研究では、両者の長所を兼ね備えた生成と識別のハイブリッドモデルを提案し、半教師あり学習への有効性を示した。具体的には、NN の識別層として一般的に用いられる softmax 層が、正規分布に基づく識別モデルと解釈できることを利用し、これと対になる正規分布に基づく生成モデルを同時に学習する。この際、各モデルのパラメータが相関を持つように事前分布を設定することで、両者を融合する。本研究は MIRU2020 において発表した。



・生成モデルと NN を融合した時系列予測手法

生成モデルと NN を融合した時系列予測手法を提案し、筆記予測へ応用した。時系列予測において、全ての系列を一意的に予測することは困難であり、途中でクラスが分岐する可能性 (bifurcation) を考慮する可能性

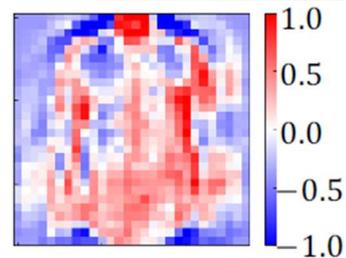


がある。例えば筆記予測において、`0`と`6`は途中までは同じ軌跡であるが、途中から分岐する。提案モデルではクラス分岐を考慮した時系列予測手法を提案した。具体的には、次の時刻の座標を混合正規分布に基づきモデル化する。そして、混合正規分布のパラメータを分岐の可能性があるクラス確率とともに推定することにより、分岐を考慮した予測を行う。本研究は ICFHR において発表した。

研究テーマ C 「確率モデルによる NN 解釈」

・NN の単位初期化と内部特徴解釈への応用

NN の重みを単位初期化した際の勾配消失が防止できる条件を明らかにするとともに、単位初期化が内部特徴解釈への応用できる可能性を示した。具体的には等幅な十分に深い多層パーセプトロンの重みを単位行列の定数倍で初期化した際の勾配消失が防止できる条件を、dynamical isometry の理論に基づき入出力ヤコビアン固有値を調べることで導出した。また、単位初期化した NN は学習後においてもスパースな重みを学習し、出力層周辺においても入力データの構造をおおよそ保存することから、特徴量の解釈に応用できる可能性を示した。本研究は信号処理のトップ会議である ICASSP2021 へ採択された。



3. 今後の展開

本研究提案で設定した課題を解決することによって、これまでの機械学習の研究で得られた知見と、実世界データ解析とのギャップを埋めることができる。近年の深層学習の成功は、大量の教師付きデータを用いた学習によるところが大きい。そのため、ベンチマークデータのような整備されたタスクに対しては強力な性能を発揮するが、実社会のデータに応用する場合にはいくつかの壁がある。具体的には(1) 教師なしデータを用いた学習、(2) 欠損値や不確実なデータへの対応、(3) モデルの解釈性の向上、の3点が必要不可欠であると考える。確率的生成モデルはこれら3つの要素を全て統一した自然な枠組みで扱うことのできる方法である。提案法のような確率モデルに基づくニューラルネットワークの構築法を発展させていけば、ディープニューラルネットワークのような大規模なモデルにおいてもこれら3点の課題を解決することができると思う。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

(A) NN への確率モデル埋め込み, (B) NN による確率モデル推定, および(C) 確率モデルによる NN 解釈の各テーマにおいて, ジャーナル論文や複数のトップ会議論文を公表でき, 一定の成果を達成できたと考える。しかしながら, 本来の計画では(D)確率モデルへの NN 埋め込み, というもう一つのテーマを掲げており, これに関しては公開可能な成果を挙げるができなかった。これは, このテーマにおいて CTG と呼ばれる生体信号のモデル化を目的としており, これには医師の協力および助言が必要不可欠であったにもかかわらず, 新型コロナウイルスの影響で共同研究が中断したことが主な理由である。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

【研究実施体制】研究全体の統括および遂行を代表者の早志が担った。また, 九州大学の学生 3 名がデータ整理や解析に従事した。加えて, 外部の研究協力者として, 富士通研究所の早瀬友裕氏と単位初期化について共同研究を進め, 主に理論部分について助言を仰いだ。

【研究費執行状況】GPU サーバの購入やレンタル, 生体信号センサの購入に主に利用し, これらは有効に活用された。

・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

現在ディープニューラルネットワークをはじめとした機械学習は急速な発展をみせているが, 産業や医療など実社会に貢献するためには整備されていないデータに対する手法を発展させていく必要がある。本研究の確率モデルとニューラルネットワークを融合するアプローチは, 欠損を含むデータに適用でき, 整備されていない実データに対して有効であると考えられる。また, 確率モデルを利用することで実現できる不確実性の推定や解釈性の向上は, 医療のようなシビアな判断が必要な場面において重要となる。

・研究課題の独創性・挑戦性

確率モデルと NN を複数の異なる観点から融合する点にある。これにより, データに関する領域依存知識に基づいて解析対象の確率的生成モデルを NN へ埋め込んだり, 逆に NN を用いて確率的生成モデルを推論したりすることが可能となる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Hideaki Hayashi and Seiichi Uchida, A Discriminative Gaussian Mixture Model with Sparsity Proceedings of the 9th International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021.
2. Shohei Kubota*, Hideaki Hayashi*, Tomohiro Hayase, Seiichi Uchida (*Equal contribution), Layer-Wise Interpretation of Deep Neural Networks Using Identity Initialization, Proceedings of the 45th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2021.
3. Takato Otsuzuki, Heon Song, Seiichi Uchida, Hideaki Hayashi, Meta-learning of Pooling Layers for Character Recognition, Proceedings of the 16th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), pp. 188-20, 2021.
4. Takato Otsuzuki, Hideaki Hayashi, Yuchen Zheng, Seiichi Uchida, Regularized Pooling,

Proceedings of the 29th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN), pp. 241–254, 2020.

5. Masaki Yamagata, Hideaki Hayashi, and Seiichi Uchida, Handwriting Prediction Considering Inter-Class Bifurcation Structures, Proceedings of the 17th International Conference on Frontiers of Handwriting Recognition (ICFHR), 2020.

6. Hideaki Hayashi, Taro Shibasaki, and Toshio Tsuji, A Neural Network Based on the Johnson SU Translation System and Related Application to Electromyogram Classification, IEEE Access, vol. 9, pp. 154304–154317, 2021.

(2)特許出願

なし

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- ・第 23 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2020)インタラクティブ発表賞
- ・早志英朗, 内田誠一, 識別・生成のハイブリッドモデルと弱教師あり学習への応用, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), IS3-1-21, オンライン開催, 2020 年 8 月 2 日-5 日