

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：2018年10月～2020年3月

研究者番号：50184

研究者：早志 英朗

1. 研究のねらい

生体信号は、脳波や心電図などといったヒトの体から計測できる信号のことであり、ヒトの体の内部状態を強く反映して信号の特徴が変化する。そのため、信号の特徴を解析することにより、体内の状態や変化を推定することができる。代表的な方法は、識別モデルを用いて正常・異常といったクラスラベルを推定、つまり分類することである。ただし、この方法では生体信号が生成されるまでの複雑な過程すべてを表現することはできない。

このような複雑なデータの生成過程を表現できる枠組みとして、確率的生成モデルが挙げられる。確率的生成モデルは、データの生成過程を確率変数の依存関係を用いてモデル化し、観測不能な内部変数を観測されたデータから推論する方法である。この方法は、生体信号にモデル化に適し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。

本研究の目的は、(A) 生体信号の生成プロセスを記述する確率的生成モデルの構築、および(B) 複雑な確率的生成モデルを推論するための、確率モデルに基づくニューラルネットワークの提案である。(A) では、脳波、筋電といったヒトの体から計測できる信号の生成メカニズムを、複数の確率分布を組み合わせることで表現する。そして、モデルのパラメータと潜在変数を計測データから推論することにより、ヒトの内部状態を推定する。(B) では、(A) で構築した確率モデルに基づくニューラルネットワークを開発する。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。これにより、生体信号を用いた医療やインタフェース応用のための基礎技術を発展させるだけでなく、他分野へも応用可能な確率的生成モデルとニューラルネットワークを統合する枠組みの構築を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

研究代表者は、ACT-I 期間中において生体信号の確率的生成モデルとニューラルネットワークに関する研究に従事した。確率的生成モデルは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、データからモデルパラメータを推論する機械学習の手法であり、解釈性が高く欠損値に強いなどの特性を持つ。このことから医療データ解析に適している。一方で、使用できる確率分布が限られており、表現能力に限界があった。本研究では、確率的生成モデルとニューラルネットワークを組み合わせることによりこの問題を解決しつつ、生体信号解析への応用を試みた。具体的には、(A) 生体信号の確率的生成モデル、(B) 確率モデルとニューラルネットワークの融合、それぞれに関して以下のような研究に従事した。

(2) 詳細

(A-1) Generative Adversarial Networks を用いた生体信号生成に関する研究 [研究業績 3]

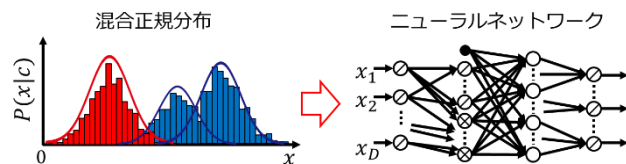
Generative Adversarial Networks (GANs)に基づき、脳波や心電図といった時系列特性をもつ生体信号の生成モデルを提案した。提案手法は、GANs をリカレントニューラルネットワークで構築することにより、時系列特性を考慮してデータの潜在表現の獲得と新規データの生成ができる。実験では、心電図と脳波の識別問題におけるデータ拡張に応用し、提案法を利用して分類精度が向上することを示した。また、生体信号の特性を表す定量値(振幅や周波数等)と潜在表現の関係性を解析することで、生成される信号の特性を潜在表現に基づき制御できることを示した。

(A-2) Cardiotocography (CTG)解析に関する研究 [研究業績 5]

Cardiotocogram (CTG)は胎児心拍数と子宮収縮圧を経時的に記録したものであり、臨床では胎児機能不全の判定に用いられる。臨床での有効性に関わらず、CTG を工学的に解析した研究は少なく、解析に有効なアプローチや特徴量は明らかでない。本研究では CTG の特性を明らかにするとともに波形の特性を表現するモデルを構築し、胎児機能不全の推定や出生時刻の予測に応用する。本研究期間ではその足掛かりとして、分類に有用な特徴量を明らかにした。具体的には、出生直後の新生児状態を示すアプガー指数をクラスラベルとした CTG 波形の分類を実施した。これにより、CTG 波形を約 70%の精度で識別できるとともに、胎児心拍の微小変動がアプガー指数推定に有効である可能性を示唆した。

(B-1) 混合正規分布に基づくニューラルネットワークのスパースベイズ学習 [研究業績 1, 4]

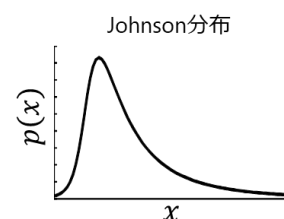
混合正規分布に基づくニューラルネットワークを提案した。提案法では混合正規分布に基づき構築した識別モデルをネットワークの構造へ展開



することにより、モデルパラメータをニューラルネットワークの重み係数として学習的に獲得できる。また、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する。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ニューラルネットワーク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。

(B-2) 非ガウス分布を埋め込んだニューラルネットワークの提案と筋電位解析への応用 [研究業績 2]

Johnson 分布に基づくニューラルネットワークを提案した。Johnson 分布は 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であり、歪度や尖度を持つ非正規分布を表



現可能である。本研究では多変量 Johnson 分布に基づくニューラルネットワークを提案し、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 分布に基づくクラス事後確率計算の過程をニューラルネットワークで表現するために、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。

3. 今後の展開

申請者は、近年における人工知能ブームの一端は、ディープニューラルネットワークの教師あり学習、特に識別モデルとして学習させるための技術発展によるところが大きいのと考える。この方法では、大量のデータとそれに付随する教師ラベルを必要とする。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もう一段階の壁がある。

この技術発展を止めることなく、5 年後、10 年後の社会実装へ滑らかにつなげていくためには、(a) 教師なし学習の発展、(b) 欠損値や不確実なデータへの対応、(c) モデルの解釈性の向上、の 3 つが必要不可欠であると考え。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。確率的生成モデルでは、教師なし学習や欠損値がある場合でも本質的なアルゴリズムの差はなく、変数の観測値の有無が変わるのみである。また、(c)に関連して、数多くの高性能なニューラルネットモデルや学習アルゴリズムが提案されてきたが、その多くが経験的なものであった。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、なぜそのモデルやアルゴリズムが有効に働くかを明らかにする足がかりになると考える。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

(A) 生体信号の確率的生成モデルと(B) 確率モデルとニューラルネットワークの融合、それぞれの項目に関しては一定の成果を収めることができた。しかし、本研究期間中ではそれぞれが独立した成果となっており、(B)で開発した技術を(A)で応用するなど相乗効果を狙った研究には至らなかった。これに関しては今後の加速フェーズで精力的に取り組む予定である。

・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 2 名がデータ整理や解析(特に、CTG データ)に従事した。加えて、外部の研究協力者として、九州医療センターの古賀氏をはじめとした医師 4 名にデータのアノテーションを依頼するとともに解析結果に対するディスカッションを行った。

【研究費執行状況】概ね予定通りに執行できた。ただし、研究計画当初は初年度に GPU サーバーを購入する予定であったが、全国的な GPU の品薄により第 2 年次へ持ち越した。そのため、第 2 年次の予算執行が予定より多くなった。

・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(今後の見込みも重視してください。)

上記の通り、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

ネットワークの構造そのものに確率モデルが埋め込まれている点にある。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書き下すことができれば、ネットワーク構造が自動的に決定される。

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. SDGM: Sparse Bayesian Classifier Based on a Discriminative Gaussian Mixture Model. arXiv preprint arXiv:1911.06028. 2019.
2. Hideaki Hayashi, Taro Shibasaki, Toshio Tsuji. A Neural Network Based on the Johnson SU Translation System and Related Application to Electromyogram Classification. arXiv preprint arXiv:1912.04218. 2019.
3. Shota Harada, Hideaki Hayashi, Seiichi Uchida. Biosignal Generation and Latent Variable Analysis with Recurrent Generative Adversarial. IEEE Access, 2019, Vol. 7, No. 1, pp. 144292–144302.
4. 早志英朗, 内田誠一. 識別と生成のハイブリッドニューラルネットワーク. 電子情報通信学会技術研究報告, 2019, vol. 119, no. 481, PRMU2019-64, pp. 1-4.
5. 原田翔太, 早志英朗, 古賀俊介, 重見大介, 柴田綾子, 吉田昌義, 蓮尾泰之, 内田誠一. Cardiotocogram の識別に基づく胎児の状態推定. 医用画像研究会, 2019.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(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)

【受賞】

- ・PRMU 研究奨励賞, 2019/4/26
- ・SI2019 優秀講演賞, 2019/12/27