

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03511

研究課題名（和文）知識埋め込み型ベイズ深層学習の提案と希少データ解析への応用

研究課題名（英文）Knowledge-embedded Bayesian deep learning and its application to small data analysis

研究代表者

早志 英朗（Hayashi, Hideaki）

大阪大学・データビリティフロンティア機構・准教授

研究者番号：00790015

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：医療データのような、データ収集にコストがかかり、ラベリングに専門知識が必要な希少なデータでは既存の深層学習アルゴリズムの適用が困難な場合が多い。そこで本研究では、希少データを適切に学習するための枠組みとして知識埋め込み型ベイズニューラルネットワークを提案するとともに、その基盤技術の開発や実データ応用研究を実施した。具体的には、データの分布を推定しながら識別器を学習することで必要なラベル付きデータ数を削減する方法や、識別器と人が協力することで学習に用いるデータを効率よく選択する手法を提案した。さらに、新生児動画画像や筋電位といった実データ解析も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会的意義としては、機械学習アルゴリズムを実データ解析に応用する際、データ収集やラベル付けに必要なコストを削減する技術を提案した点である。特に、医用データ解析では大規模データの収集そのものが難しく、ラベル付けにも医師の専門知識が必要となるため、有効な手段となる。学術的意義としては、単一の深層学習モデルで識別モデルと生成モデルを同時学習できる半教師あり学習や信頼度較正に有効な手法の提案や、相対ラベルを用いて学習できるベイズ深層学習モデルの提案とその妥当性の理論的証明が主な貢献となる。

研究成果の概要（英文）：Applying existing deep learning algorithms is often challenging for small data, such as medical data, where data collection is costly and annotation requires specialized knowledge. In this study, we proposed a framework for appropriately learning small data, called knowledge-embedded Bayesian deep learning. During the study, we developed the foundational techniques and applied them to real-world data analysis. Specifically, we proposed methods to reduce the amount of labeled data by estimating the distribution of input data while training the classifier, and methods to efficiently select training data through collaboration between the classifier and humans. Additionally, we performed real-world data analysis on various datasets such as infant motion images and electromyograms.

研究分野：パターン認識

キーワード：ニューラルネットワーク 深層学習 ベイズ推定 希少データ

1. 研究開始当初の背景

深層学習は、多層のニューラルネットワークを用いた機械学習の方法論である。音声、画像、言語といった様々な問題に対し他の手法を圧倒する高い性能を示すことから多大な注目を集めてきた。深層学習では一般的に多数のパラメータを大量のデータを用いて学習することによって高い性能を実現している。そのため、医療データのような学習データ数が限られる領域（以下、希少データ）への応用には課題があった。

2. 研究の目的

本研究課題ではベイズ深層学習を拡張した、知識埋め込み型ベイズ深層学習を提案する。提案手法では、重み分布だけでなく、ネットワーク構造に知識を埋め込むことにより、ベイズ深層学習の柔軟な学習能力を生かしつつ、大量の学習データを確保することが困難な希少データへの適用性を獲得する。具体的には、まず適用先のデータの特性を数理モデルによりモデル化する。構築した数理モデルをさらにネットワーク構造へ展開することによりベイズ深層学習の学習フレームワークを用いて学習する。

3. 研究の方法

本研究は、(A) 特殊な分布を利用した Bayesian Deep Neural Network の開発、(B) 計算グラフを利用した確率モデルのネットワーク埋め込み、(C) 希少データ解析への応用から構成される。

4. 研究成果

Johnson 分布に基づくニューラルネットワークと筋電信号識別応用

平均や分散に加え歪度や尖度を表現できる Johnson SU 分布を利用したニューラルネットワークを提案し、生体信号識別へ応用した（図 1）。筋電信号の識別問題において、一般的に用いられる整流・平滑化後の信号は正規分布には従わず、歪度や尖度を持つゆがんだ分布となる。本研究では、この前提をドメイン知識として利用することで筋電信号識別の精度向上を試みた。具体的には、Johnson SU 分布をクラス条件付き分布として利用してクラス事後確率を算出する過程を分割し、それぞれをニューラルネットワークの層として表現することで end-to-end での学習を実現した。これにより、従来の識別手法と比較してハイパーパラメータ調整のコストを削減しつつ、識別精度を向上させられることを示した（Hayashi et al., IEEE Access, 2021）。

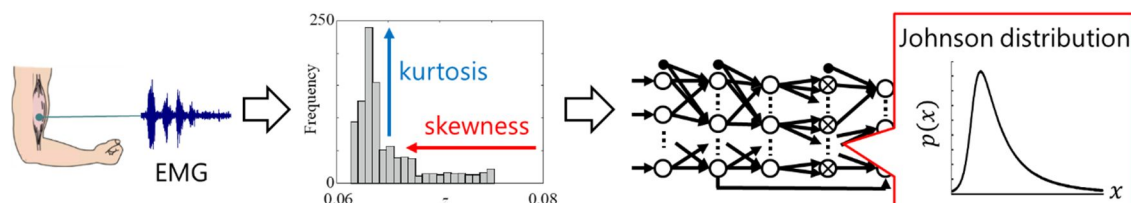


図 1. Johnson 分布に基づくニューラルネットワーク

学習可能なプーリング層の提案

畳み込みニューラルネットワークにおいて広く用いられるプーリング層を学習可能にするための特殊なレイヤーを提案し、提案レイヤーを用いることでノイズに頑健な識別ができることを示した。具体的には、プーリングのカーネル形状をパラメータ化するとともに、演算を L_p ノルムで定義する。そして、カーネルパラメータならびに演算のパラメータ p をメタ学習することで、学習的にカーネル形状と演算方法を獲得する（図 2）。実験では、文字認識の few-shot 学習タスクにおいて、テストデータにノイズを付与していった際の精度低下が一般的なプーリングより緩やかであることを示した（Otsuzuki et al., ICDAR, 2021）。

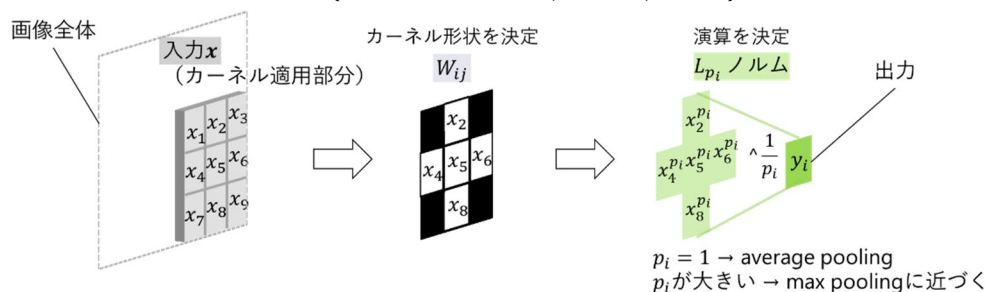


図 2. 学習可能なプーリング層

Gaussian-coupled softmax layer の提案と半教師あり学習ならびに信頼度較正への応用
 生成モデルと識別モデルを単一のニューラルネットワークで協調的に学習する方法を提案した。提案法では、正規分布をベースとした energy-based model と softmax 関数を用いた識別層を相関させつつ学習することで、クラス識別とデータ分布の推定を同時に実現できる (図 3)。これにより、半教師あり学習やデータ生成に応用できるとともに、識別器の信頼度較正にも有効である (Hayashi, IEEE TNLS, 2024)。さらに、提案法で構成した信頼度を利用した疑似ラベル学習手法を提案し、半教師あり画像識別タスクへ応用した (Toba et al., WCCI, 2024)。

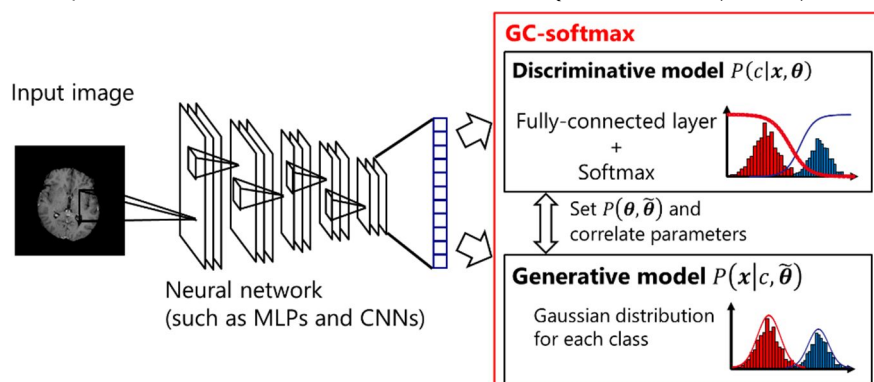


図 3. Gaussian-coupled (GC) softmax layer の提案

新生児自発運動識別法の提案

新生児の自発運動である general movements 動画の自動識別において既存手法を上回る精度を達成した。提案法では新生児を情報から撮影した動画に対して、空間情報と時間情報を抽出するニューラルネットワークをそれぞれ構築し、抽出した特徴量を結合することで精度良い識別に役立てる (Hashimoto et al., MICCAI, 2022)。

尺度混合確率モデルと筋電信号解析応用

筋電信号の確率モデルである尺度混合確率モデルを提案した。提案モデルでは、筋電信号の分散を確率変数として表すとともに、複数の尺度パラメータを持つ分布を混合して用いることで、分散の不確実性を表現できる (Furui et al., Expert Systems with Applications, 2021)。

相対ラベルで学習可能なベイズニューラルネットワークと active learning への応用

相対的な順序ラベルが付与されたデータセットから学習できるベイズニューラルネットワークを提案した。提案法は、病気の相対的重症度推定のようなランキングタスクにおいて、ペア画像に対する相対ラベルのみで学習できるとともに、予測に対する不確実性を算出できる。さらに提案ネットワークの不確実性予測と active learning と組み合わせることにより、内視鏡画像の効率的なアノテーションへ応用した (Kadota et al., MIUA, 2022)。

曖昧な表情認識

顔の動画から曖昧な感情推定を行うためのデータ拡張技術を開発し、実環境における表情認識精度を向上させた (Kawamura et al., WACV, 2024)。また、micro expression と呼ばれるごく微小な表情の変化を検出・認識するアルゴリズムを提案した (Deng et al., FG, 2024)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hayashi Hideaki	4. 巻 -
2. 論文標題 A Hybrid of Generative and Discriminative Models Based on the Gaussian-Coupled Softmax Layer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems	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/TNNLS.2024.3358113	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 Hayashi Hideaki, Tsuji Toshio	4. 巻 17
2. 論文標題 Human-Machine Interfaces Based on Bioelectric Signals: A Narrative Review with a Novel System Proposal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1536 ~ 1544
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23646	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 -
1. 著者名 Hayashi Hideaki, Shibasaki Taro, Tsuji Toshio	4. 巻 9
2. 論文標題 A Neural Network Based on the Johnson SU Translation System and Related Application to Electromyogram Classification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 154304 ~ 154317
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3126348	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 -
1. 著者名 Furui Akira, Igaue Takuya, Tsuji Toshio	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 -
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 -

[学会発表] 計21件(うち招待講演 0件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Masahito Toba, Seiichi Uchida, Hideaki Hayashi
2. 発表標題 Pseudo-Label Learning with Calibrated Confidence Using an Energy-Based Model
3. 学会等名 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yicheng Deng, Hideaki Hayashi, Hajime Nagahara
2. 発表標題 Multi-Scale Spatio-Temporal Graph Convolutional Network for Facial Expression Spotting
3. 学会等名 International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryosuke Kawamura, Hideaki Hayashi, Noriko Takemura, Hajime Nagahara
2. 発表標題 MIDAS: Mixing Ambiguous Data with Soft Labels for Dynamic Facial Expression Recognition
3. 学会等名 Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Naoya Yasukochi, Hideaki Hayashi, Daichi Haraguchi, Seiichi Uchida
2. 発表標題 Analyzing Font Style Usage and Contextual Factors in Real Images
3. 学会等名 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023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 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Seitaro Yoneda and Akira Furui
2. 発表標題 Bayesian Approach for Adaptive EMG Pattern Classification via Semi-supervised Sequential Learning
3. 学会等名 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunya Fukuda, Akira Furui, Maro Machizawa, and Toshio Tsuji
2. 発表標題 Stochastic Fluctuation in EEG Evaluated via Scale Mixture Model for Decoding Emotional Valence
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宝満竜一, 内田誠一, 田中聖人, 早志英朗
2. 発表標題 ランキングと分類による疾病重症度の推定
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鳥羽真仁, 内田誠一, 早志英朗
2. 発表標題 Energy-based modelを用いた信頼度較正と疑似ラベル学習への応用
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 矢沢 樹, 古居 彬
2. 発表標題 Mixupを利用した筋電位信号の擬似データ生成と複合動作の識別
3. 学会等名 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 (SI2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeaki Kadota, Hideaki Hayashi, Ryoma Bise, Kiyohito Tanaka, and Seiichi Uchida
2. 発表標題 Deep Bayesian Active Learning to Rank for Endoscopic Image Data
3. 学会等名 The 26th UK Conference on Medical Image Understanding and Analysis (MIUA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Hashimoto, Akira Furui, Koji Shimatani, Maura Casadio, Paolo Moretti, Pietro Morasso, and Toshio Tsuji
2. 発表標題 Automated Classification of General Movements in Infants Using a Two-stream Spatiotemporal Fusion Network
3. 学会等名 The 25th International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention (MICCAI2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideaki Hayashi
2. 発表標題 Combining Generative and Discriminative Models Based on the Gaussian-coupled Softmax Layer
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥羽真仁, 内田誠一, 早志英朗
2. 発表標題 Energy-Based Modelに基づく識別器の信頼度較正
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
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 米井 陸也, 橋本 悠己, 古居 彬, 城明 舜磨, 土居 裕和, 島谷 康司, 辻 敏夫
2. 発表標題 非負値行列因子分解を用いた乳児運動解析によるASDリスク評価
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論文集 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takato Otsuzuki, Heon Song, Seiichi Uchida, Hideaki Hayashi
2. 発表標題 Meta-learning of Pooling Layers for Few-shot Recognition
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)
4. 発表年 2021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プログラム・抄録集
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 振幅の確率的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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takato Otsuzuki, Heon Song, Seiichi Uchida, Hideaki Hayashi
2. 発表標題 Meta-learning of Pooling Layers for Character Recognition
3. 学会等名 The 16th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Furui Akira, Akiyama Tomoyuki, Tsuji Toshio
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 The 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	古居 彬 (Furui Akira) (30868237)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授 (15401)	

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