

令和 2 年 9 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06506

研究課題名（和文）深層ニューラルネットワークによる深層準線形サポートベクターマシンの構築と応用

研究課題名（英文）Deep Quasi-Linear SVM Based on Deep Neural Network and Its Applications

研究代表者

古月 敬之（HU, Jinglu）

早稲田大学・理工学術院（情報生産システム研究科・センター）・教授

研究者番号：50294905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、深層準線形サポートベクターマシン（SVM）の構築を行う。深層ニューラルネットワークにより深層準線形カーネルを深層学習で合成する。これにより、訓練済の深層ニューラルネットワークからSVMのカーネルを合成し（転移学習）、このカーネルに基づいた分類器をSVM最適化（小データ）することによって、小データでも深層学習の実現が可能になる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、サポートベクターマシン（SVM）を深層学習で訓練済みの深層ニューラルネットワークから構築する。SVMのための深層準線形カーネルの構築を通してSVMと深層ニューラルネットワークとの間に橋を架け、近年著しく発展できている深層学習技術を活用し、深層カーネルの学習は大規模なデータの場合でも容易に実現できる。一方、深層学習の立場から見れば、訓練済の深層ニューラルネットワークからSVMのカーネルを合成し（転移学習）、このカーネルに基づいた分類器をSVM最適化（小データ）することによって、小データでも深層学習の実現が可能になる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a quasi-linear support vector machine (SVM) is constructed by using deep neural networks, in which a deep quasi-linear kernel is composed by using deep learning. By using the deep quasi-linear SVM, it is possible to realize a deep learning in the cases where there is rather few data. First, pretrain a deep neural network via transfer learning for composing a deep quasi-linear kernel; Then an SVM with the quasi-linear kernel can be obtained using the few data.

研究分野：システム工学、ソフトコンピューティング

キーワード：深層ニューラルネットワーク サポートベクターマシン 深層学習 機械学習 パターン認識

1. 研究開始当初の背景

実世界の多くのシステムは複雑な非線形特性を持っている。従来、このような複雑な非線形システムのモデルとして大脳・小脳をモデル化した人工ニューラルネットワークなどが提案されている。しかし、分類や予測・制御などの応用観点からみれば、ニューラルネットワークはブラックボックスモデルであり、パラメータ推定に工夫する必要だけでなく応用に利用しにくい問題点がある。そこで、本研究では、準線形 **ARX** ニューラルネットワーク・準線形サポートベクターマシン (**SVM**) を提案し、その有効性の検討を行う。準線形 **ARX** ニューラルネットワークでは、線形 **ARX** モデル構造をニューラルネットワークという非線形モデルに取り入れて構成された準線形 **ARX** モデルで、制御などに利用しやすい構造を持っている。一方、準線形 **SVM** は、**SVM** 最適化技術を準線形 **ARX** モデルに適用したもので、機械学習で準線形カーネルを合成し、カーネルの学習機能を持つ **SVM** である。しかし、画像などのデータに直接適用できるようにするため、近年著しく発展できている深層学習技術を適用し、特徴量を自動的に学習する機能も備える必要がある。

2. 研究の目的

制御系を容易にするための線形ネットワーク構造をニューラルネットワークに取り入れることにより準線形回帰モデルを構築する。また、そのパラメータを推定するための体系的な学習法を確立することを目指して、準線形カーネルを導入することにより、回帰または分類のための利用しやすい線形構造を有する準線形サポートベクターマシン (**SVM**) を構築する。さらに、画像などのデータに直接適用できるようにするため、近年著しく発展できている深層学習技術を適用し、特徴量を自動的に学習する機能も備えるようにする。

3. 研究の方法

まず、区分線形モデリングにより、線形回帰モデルの回帰ベクターを観測空間から特徴空間へのマッピング関数として **SVM** のための準線形カーネル関数を合成し準線形 **SVM** を構築する。これをベースにして、深層ニューラルネットワークにより合成する深層準線形カーネルを持つ深層準線形 **SVM** を構築する。次に、深層ニューラルネットワークとサポートベクターマシンとの間に架け橋として深層準線形カーネルを構築することにより、深層ニューラルネットワークから **SVM** のカーネルを合成し (転移学習) そして分類器を **SVM** 最適化 (小データ) することによって、小データでも深層学習を実現する。さらに、画像などのデータに直接適用できる高性能分類器の開発を行う。具体的に、

- ・深層ニューラルネットワークからサブネットワークのダイナミック構成情報を抽出する技術の開発を行う。
- ・サブネットワークのダイナミック構成情報に基づいた深層カーネルの合成技術の開発を行う。
- ・深層カーネルを用いた準線形 **SVM** の構成技術および高性能分類技術の開発を行う。

と三つのステップで研究を進める。

4. 研究成果

(1) 深層ニューラルネットワークからサブネットワークのダイナミック構成情報を抽出する技術の開発について、Rectified Linear Unit (ReLU 活性化関数) を持つ深層ネットワークでは、パラメータは同時に二つの機能を持っている。一つは、入力パターンに応じてサブネットワークを形成する；もう一つは、サブネットワークのパラメータとする。後者が対象とする問題に依存性が強いが、前者が比較的に対象とする問題に依存性が強くない。そこで、パラメータを2セットに分けて、一つのセットはサブネットワークを動的に構成し、もう一つのセットは Multilayer gated bilinear classifier のパラメータとする。具体的に、

- ・ReLU、maxout、および local winner-take-all などの活性化関数による局所競争およびサブネットワークの形成についての解析を行い
- ・それぞれの与えた入力パターンに対して、深層ニューラルネットワーク が各々の小さい一部分のサブネットワークしか活性化させないようにするための学習技術の開発を行い
- ・訓練済みの深層ニューラルネットワークから入力パターンに応じてサブネットワークのダイナミック構成情報を抽出する技術の開発を行うことにより、サブネットワークのダイナミック構成情報を分離し抽出する手法を提案しその有効性を確認した。

(2) サブネットワークのダイナミック構成情報に基づいた

・深層カーネルの合成技術の開発について、**Multilayer gated bilinear classifier** で深層 ReLU ネットワークの振舞を模倣する技術の開発を行い

・訓練済みの深層 **NN** から入力パターンに応じてサブネットワークのダイナミック構成情報による **Multilayer gated bilinear classifier** のゲート信号の生成方法の検討および生成機構の構築を行い

・深層ニューラルネットワークから抽出したサブネットワークのダイナミック構成情報に基づいた深層カーネル関数の合成技術の開発を行うことにより、**ReLU** ネットワークのパラメータを2セットに分ける。事前に訓練済みの**ReLU** ネットワークからサブネットワークのダイナミック構成情報で**SVM**のための深層準線形カーネルを合成し、再帰的な方式で深層準線形カーネルの合成を実現した。

(3) 深層カーネルを用いた深層準線形**SVM**の構成技術および高性能分類技術の開発について、**SVM**最適化技術を**Multilayer gated bilinear classifier**の線形パラメータの推定に適用し、深層準線形カーネル関数を導出して、深層準線形カーネル関数を持つ階層的構造を持つ深層準線形**SVM**を導出した。具体的に、**Multilayer gated bilinear classifier**はゲート信号を深層**ReLU**ネットワークにより生成して与えたら、線形分類器になるので、**SVM**最適化技術を適用することにより深層準線形**SVM**の構築を行った。一方、訓練データ数が N とすれば、**SVM**の計算複雑さは $O(N^3)$ となるので、サポートベクターにならないデータを訓練データセットから外す**SVM**の訓練高速化手法を開発し、深層準線形**SVM**に基づいた高性能分類器の開発を行った。

さらに、応用として開発した深層準線形**SVM**を用いてデータ不均衡が有する問題に適用し高性能な分類器の構築を行った。

・クラス間の不均衡だけでなく、クラス内にも不均衡を有する場合において、局所的な不均衡補正を実現できる深層準線形**SVM**分類器を構築し、その有効性を実データ例で明らかにした。

・クラス間の不均衡を有するだけでなく、片クラスにおいてサンプル数非常に少ない場合において、特徴空間で**SMOTE (Synthetic Minority Oversampling TEchnique)**という**Oversampling**を行う不均衡補正法を提案し、高性能な深層準線形**SVM**分類器を構築した。

・クラス間の不均衡を有するだけでなく、片クラスのサンプルしかを訓練に使えない場合には、高性能な**One-class**深層準線形**SVM**分類器を開発した。

一部の研究成果のとして、次のようなテーマで雑誌論文を発表した。

A Geometry-Based Two-step Method for Nonlinear Classification Using Quasi-Linear Support Vector Machine

A Multilayer Gated Bilinear Classifier: from Optimizing a Deep Rectified Network to a Support Vector Machine

A Semi-Supervised Classifier Based on Piecewise Linear Regression Model Using Gated Linear Network

Fast SVM Training using Data Reconstruction for Classification of Very Large Datasets

A Coarse-to-Fine Two-step Method for Semi-Supervised Classification Using Quasi-Linear Laplacian SVM

One-Class Classification Using Support Vector Machine with Quasi-Linear Kernel

Quasi-Linear SVM Classifier with Segmented Local Offsets for Imbalanced Data Classification

Oversampling the Minority Class in a Multi-Linear Feature Space for Imbalanced Data Classification

A New Segmented Oversampling Method for Imbalanced Data Classification Using Quasi-Linear Support Vector Machine

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22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 X. Yuan, E. Pang, K. Lin and J. Hu	4. 巻 15(7)
2. 論文標題 Hierarchical Multi-label Classification for Gene Ontology Annotation using Multi-head and Multi-end Deep CNN Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23150	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 Y. Ren, W. Li and J. Hu	4. 巻 15(7)
2. 論文標題 A Semi-Supervised Classifier Based on Piecewise Linear Regression Model Using Gated Linear Network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23149	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 P. Liang, W. Li and J. Hu	4. 巻 15(3)
2. 論文標題 Fast SVM Training using Data Reconstruction for Classification of Very Large Datasets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 372-381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23065	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 H. Zhu and J. Hu	4. 巻 2019(8)
2. 論文標題 Air Quality Forecasting using SVR with Quasi-Linear Kernel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the 2019 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS'2019) (Beijing)	6. 最初と最後の頁 126-130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 X. Yuan, W. Li, K. Lin and J. Hu	4. 巻 2019(8)
2. 論文標題 A Deep Neural Network Based Hierarchical Multi-Label Classifier for Protein Function Prediction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the 2019 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS'2019) (Beijing)	6. 最初と最後の頁 131-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Y. Ren, W. Li and J. Hu	4. 巻 2019(7)
2. 論文標題 A Semi-Supervised Classification Using Gated Linear Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2019) (Budapest)	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) なし	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 W. Li, P. Liang and J. Hu	4. 巻 14(8)
2. 論文標題 An Autoencoder Based Piecewise Linear Model for Nonlinear Classification using Quasi-Linear Support Vector Machines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 1236-1243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22923	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 Zhou Bo, Li Weite, Hu Jinglu	4. 巻 14(3)
2. 論文標題 A coarse to fine two step method for semisupervised classification using quasi linear Laplacian SVM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 441-448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22825	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 P. Liang, W. Li, H. Tian and J. Hu	4. 巻 14(3)
2. 論文標題 One-Class Classification Using Support Vector Machine with Quasi-Linear Kernel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 449-456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22826	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 P. Liang, F. Zheng, W. Li and J. Hu	4. 巻 14(2)
2. 論文標題 Quasi-Linear SVM Classifier with Segmented Local Offsets for Imbalanced Data Classification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 289-296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22808	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 P. Liang, W. Li and J. Hu	4. 巻 13(10)
2. 論文標題 Oversampling the Minority Class in a Multi-Linear Feature Space for Imbalanced Data Classification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering C	6. 最初と最後の頁 1483-1491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22715	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 P. Liang, X. Yao and J. Hu	4. 巻 2018(10)
2. 論文標題 A Metric Learning Method for Improving Neural Network Based Kernel Learning for SVM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE Inter. Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'2018) (Miyazaki)	6. 最初と最後の頁 1637-1642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Y. Cui, Y.P. Sun and J. Hu	4. 巻 2018(10)
2. 論文標題 A Convolutional AutoEncoder Method for Anomaly Detection on System Logs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE Inter. Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'2018) (Miyazaki)	6. 最初と最後の頁 3053-3058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 L.J.V. Miranda and J. Hu	4. 巻 2018(10)
2. 論文標題 Feature Extraction using a Mutually-Competitive Autoencoder for Protein Function Prediction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE Inter. Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'2018) (Miyazaki)	6. 最初と最後の頁 1333-1338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 L.J.V. Miranda and J. Hu	4. 巻 2018(7)
2. 論文標題 A Deep Learning Approach Based on Stacked Denoising Autoencoders for Protein Function Prediction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the 42th IEEE Inter. Conference on Computers, Software & Applications (COMPSAC'2018) (Tokyo)	6. 最初と最後の頁 480-485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 W.Li, B.Zhou, B.Chen and J.Hu	4. 巻 12(6)
2. 論文標題 A Geometry-Based Two-step Method for Nonlinear Classification Using Quasi-Linear Support Vector Machine	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 883-889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 B.Zhou, W.Li and J.Hu	4. 巻 12(6)
2. 論文標題 A New Segmented Oversampling Method for Imbalanced Data Classification Using Quasi-Linear Support Vector Machine	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 891-898
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 W.Cao, A.Song and J.Hu	4. 巻 44(3)
2. 論文標題 Stacked Residual Recurrent Neural Network with Word Weight for Text Classification	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IAENG International Journal of Computer Science	6. 最初と最後の頁 277-284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 P. Liang, W. Li, D. Liu and J. Hu	4. 巻 2017(5)
2. 論文標題 Large-Scale Image Classification Using Fast SVM with Deep Quasi-Linear Kernel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of 2017 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2017) (Anchorage)	6. 最初と最後の頁 1064-1071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 W. Li, B. Chen, B. Zhou and J. Hu	4. 巻 2017(5)
2. 論文標題 A Mixture of Multiple Linear Classifiers with Sample Weight and Manifold Regularization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of 2017 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2017) (Anchorage)	6. 最初と最後の頁 3747-3752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 W. Li and J. Hu	4. 巻 2017(5)
2. 論文標題 A Multilayer Gated Bilinear Classifier: from Optimizing a Deep Rectified Network to a Support Vector Machine	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of 2017 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2017) (Anchorage)	6. 最初と最後の頁 140-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 W. Li, P. Liang, X. Yuan and J. Hu	4. 巻 2017(5)
2. 論文標題 Non-Local Information for a Mixture of Multiple Linear Classifiers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of 2017 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2017) (Anchorage)	6. 最初と最後の頁 3741-3746
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----