

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01446

研究課題名（和文）不完全性を持つ非線形多重スケールデータのためのオンライン解析法の開発と実応用

研究課題名（英文）Development of online method for incomplete nonlinear multiscale data analysis and its real-world applications

研究代表者

湯川 正裕（Yukawa, Masahiro）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：60462743

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究プロジェクトでは、異なるスケールを持つ基底関数（異なる分散を持つガウスカーネル）を用いて、「多重スケール性を持つ非線形データ」を効率的に表現できる数理モデルの構築に向けた研究を行い、その成果を5編の国際学術論文と10編の国際会議論文に纏めた。その一つとして、多重スケール性を持つ非線形関数をガウス関数の線形和で表現し、係数とガウス関数の幅・中心点を変数とみて学習することで、複雑な非線形関数を簡潔な形で表現可能なオンラインアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、適応的にガウス関数の形状を変化させ、非定常信号を効率的に推定することができる。数値例により、提案法の有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報通信技術や機械学習技術が用いられるシーンが急速に拡大したことに伴い、様々な環境で多種多様なデータや信号を扱う必要性が生じている。これにより、非定常性や非線形性に加えて、多重スケール性や不完全性を持つデータ・信号を取り扱える技術へのニーズが増している。本研究成果は、このニーズに応えるものになっていることに加え、時系列データ予測・解析などに応用することができるため、カルマンフィルタなどとも関連があり、隣接分野に波及していくことが見込まれる。本研究で開発した手法は、既に無線通信などに応用されており、今後、IoT・AI産業で広く用いられていくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：We studied mathematical modeling for expressing multiscale nonlinear data efficiently using basis functions having different scales, and the outcomes were documented in five journal articles and 10 international conference papers. As one of the main results, we developed an online algorithm which generates an efficient estimate of complex (multiscale) nonlinear function as a linear combination of Gaussian functions with different scales, where the scale as well as the center point is adapted together with the coefficients. The algorithm can track non-stationary signals efficiently by adapting the shape of the Gaussians. The numerical examples show the efficacy of the proposed method.

研究分野：信号処理

キーワード：再生核 オンラインアルゴリズム 凸最適化 多重スケール

1. 研究開始当初の背景

人工知能(AI)技術の著しい進展により、データ解析や機械学習技術に対する産業的需要と社会的な期待・関心が高まっていた。特に、計測技術の発達により、データの種類(データ次元)や量(サンプル数)が増加し、複雑なビッグデータを効率的に読み解く技術への要請が高まっていた。高次元データを良好に近似する低次元部分空間(多様体)を求める「次元削減」は、データから有用な情報を抽出するための主要な要素技術である。次元削減の主な目的は、(a) データ圧縮・計算コスト削減、(b) データの可視化、(c) 特徴抽出である。次元削減では、項目2に記す四つの課題が残っていた。オンライン学習アルゴリズムは、非定常データを扱う際に有用であり、ビッグデータを効率的に解析する手段としても再び大きな注目を集めている。複雑なデータを解析する技術への期待が高まる中、四つの課題を全て解決し、多重スケールデータを効果的に解析できるオンライン学習アルゴリズムが切望されていた。

2. 研究の目的

本研究は、以下に挙げる四つの課題を統一的に扱うための新しいオンラインデータ解析パラダイムの構築を目的とする。

[課題1] 非線形性：低次元の線形部分空間で良好に近似できない

[課題2] 多重スケール性：様々な形状・データ密度のクラスタが存在

[課題3] 非定常性：データの特性(データトレンド)が時間とともに変化

[課題4] 不完全性：高次元データの一部が欠損

以下、具体的な研究目的を記す。

- 異なるスケールを持つ基底関数(異なる分散を持つガウスカーネル)を用いて、「多重スケール性を持つ非線形データ」を効率的に表現できる数理モデルを構築する。
- 構築した数理モデルの下、「非線形性・多重スケール性・不完全性を考慮した次元削減問題」の持つ数理構造(一般化固有値問題との関係性)を解明する。
- 解明された数理構造の下、非定常性に対応できるオンライン学習アルゴリズムを構築し、その収束特性を明らかにする。
- 構築した学習アルゴリズムを実世界問題に応用し、その有効性を実証する。

3. 研究の方法

本研究では、弱凸性(2乗ノルムの定数倍を加算することで凸関数になるという性質)を持つ罰則関数(正則化関数)を用いて、研究を進めた。幅の異なるガウスカーネルを用いて非線形性と多重スケール性に対応できる数理モデルを構築し、高性能なオンラインアルゴリズムを導出することで、非定常性に追従できる手法を構築した。大域的最適性を保証するために、凸解析の知見を利用した。実データなどを用いたシミュレーションにより、有効性の検証を行なった。

4. 研究成果

次元削減は、データをスパースに表現する技術であり、変数ベクトルのスパース性と深い関係にある。本プロジェクトでは、スパース解を高精度に求められることが知られている Minimax Concave (MC) 罰則関数に注目し、研究成果を5編の国際学術論文と10編の国際会議論文に纏めた。以下、国際学術論文に記した研究成果の概要を簡潔に述べる。

- MC 罰則関数とガウス・マルコフ確率場に基づくグラフ学習：ネットワーク上で得られる信号の関係性(リンク重み)を求める問題をグラフ学習といい、信号処理分野の重要な研究テーマとなっている。密なグラフは解釈が難しいため、解釈性の高いスパースグラフ(ノード間のリンクが適度に少ないグラフ)を求めることが望ましい。本研究では、グラフ学習に用いられるラプラシアン行列をグラフ重みと線形作用素で簡潔に表現し、MC 罰則関数によってスパースグラフを高精度に求める手法を提案し、従来法に対する優位性を数値例で実証した。これは、南カリフォルニア大学との共同研究成果であり、電子情報通信学会英文論文誌 A (2023)に掲載されている。
- 時間相関のある干渉波に対する緩和ゼロ強制ビームフォーミング法：複数のアンテナ素子を用いて、異なる角度から到来する信号を区別する信号処理技術をビームフォーミングという。従来のビームフォーミング手法である無歪最小分散ビームフォーミング法は、時間相関がない信号

に対しては、平均 2 乗誤差の意味で最適性を持つ一方、時間相関がある信号に対して、性能が劣化する。一方、ゼロ強制ビームフォーマ法は、時間相関がある信号に対処できるが、雑音を増幅し、高い性能が得られないという問題点があった。本研究では、ゼロ制約を緩和することで、これらの問題点を解決する緩和ゼロ強制ビームフォーマ (RZF) 法を新たに提案し、EEG 信号 (脳波) における逆問題への応用における有効性を実証した。RZF 法は、多領域適応アルゴリズム (Yukawa, Slavakis, Yamada 2010) を用いて、リアルタイムで効率的に計算することができる。シミュレーションによる実証に加えて、単一の干渉波に対する平均 2 乗誤差解析も与えた。これは、NCU-Torun (ポーランド) との共同研究成果であり、国際学術誌 *Signal Processing* (2022) に掲載されている。

- (3) オンライン非線形推定におけるモデルパラメータと係数の同時学習: 多重スケール性を持つ非線形関数を効率的に表現できるオンラインアルゴリズムを提案した。提案法は、ガウス関数の線形結合の形で非線形関数を表現し、係数とガウス関数の幅・中心点の 3 種類のパラメータを変数とみて学習することで、複雑な非線形関数を簡潔な形で表現することが可能である。さらに、適応的にガウス関数の形状を変化させることで、非定常性を持つ信号を効率的に推定することができるという利点がある。時系列予測への応用において、従来のカーネル適応フィルタに加えて、LSTM を用いたニューラルネットワークなどに対する優位性を実験的に示した。本成果は、国際学術誌 *IEEE Access* (2021) に掲載されている。
- (4) 複数のベクトルが共通のゼロパターンを持つ、すなわち、共通の成分がゼロである場合、同時スパース信号 (jointly sparse signal) という。信号に外れ値が含まれる場合でも、同時スパース信号を高精度に求めることができるロバストな推定法を提案した。提案法は、MC 罰則関数を誤差信号に適用することで、MC 損失関数を新たに定義することでロバスト性を担保すると同時に、同時スパース性を持つ信号を抽出するために、 L_{21} ノルムに基づく罰則項を導入した。さらに、コスト関数全体の凸性を担保し、大域的最適性を保証するために、変数行列の各成分の 2 乗和 (2 乗フロベニウスノルム) を加え、コスト関数全体の凸性を保証するための必要十分条件を明らかにした。シミュレーションにより、MECG 信号復元などへの応用における有効性を実証した。本成果は、国際学術誌 *IEEE Transactions on Signal Processing* (2021) に掲載されている。
- (5) 確率的最適化のための射影型正則化双対平均法: データから決まる閉凸集合への 2 乗距離関数を用いて、新しい正則化双対平均法を提案した。スパース性を促進する計量を導入し、それがスパース正則化項の効果を打ち消さないよう、ある 2 乗重みを $L1$ ノルムに与えた。MNIST を用いたクラス分類や音響エコーキャンセラへの応用 (線形回帰) における著しい有効性を実証した。本成果は、国際学術誌 *IEEE Transactions on Signal Processing* (2019) に掲載されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KOYAKUMARU Tatsuya, YUKAWA Masahiro, PAVEZ Eduardo, ORTEGA Antonio	4. 巻 E106.A
2. 論文標題 Learning Sparse Graph with Minimax Concave Penalty under Gaussian Markov Random Fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 23 ~ 34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2021EAP1153	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 該当する
1. 著者名 Kono Takehiro, Yukawa Masahiro, Piotrowski Tomasz	4. 巻 190
2. 論文標題 Relaxed zero-forcing beamformer under temporally-correlated interference	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Signal Processing	6. 最初と最後の頁 108323 ~ 108323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sigpro.2021.108323	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 該当する
1. 著者名 Takizawa Masa-Aki, Yukawa Masahiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Joint Learning of Model Parameters and Coefficients for Online Nonlinear Estimation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 24026 ~ 24040
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3053651	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 Suzuki Kyohei, Yukawa Masahiro	4. 巻 69
2. 論文標題 Robust Recovery of Jointly-Sparse Signals Using Minimax Concave Loss Function	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 669 ~ 681
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSP.2020.3044445	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 Ushio Asahi, Yukawa Masahiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Projection-Based Regularized Dual Averaging for Stochastic Optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 2720 ~ 2733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2019.2908901	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15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Tatsuya Koyakumar, Masahiro Yukawa
2. 発表標題 An Efficient Robust Graph Learning Approach Based on Minimax Concave Penalty and ℓ_1 -Cross Entropy
3. 学会等名 European Signal Processing Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masa-aki Takizawa and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Steepening squared error function facilitates online adaptation of Gaussian scales
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Kaneko and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Normalized least-mean-square algorithms with minimax concave penalty
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kyohei Suzuki and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Robust jointly-sparse signal recovery based on minimax concave loss function
3. 学会等名 European Signal Processing Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ran Iwamoto, Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Sentiment analysis based on multikernel adaptive filtering: an online approach to multiscale data classification
3. 学会等名 European Signal Processing Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Takizawa and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Online learning with self-tuned Gaussian kernels: good kernel-initialization by multiscale screening
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kwangjin Jeong and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Automatic kernel weighting for multikernel adaptive filtering: multiscale aspects
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Kono, Masahiro Yukawa, and Tomasz Piotrowski
2. 発表標題 Beamformer design under time-correlated interference and online implementation: brain-activity reconstruction from EEG
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Motoya Ohnishi, Masahiro Yukawa, Mikael Johansson, Masashi Sugiyama
2. 発表標題 Continuous-time Value Function Approximation in Reproducing Kernel Hilbert Spaces
3. 学会等名 Advances in Neural Information Processing Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Yukawa and Isao Yamada
2. 発表標題 A Fixed-Point Analysis of Regularized Dual Averaging Under Static Scenarios
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit and Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ran Iwamoto and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Sentiment Analysis in Twitter Based on Multikernel Adaptive Filtering
3. 学会等名 IEICE Signal Processing Symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuto Ogino and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Clustering without Pre-specifying Cluster-Number Based on Sparse Eigenproblem of Graph Laplacian
3. 学会等名 IEICE Signal Processing Symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩本蘭、湯川正裕
2. 発表標題 Auto-antonymの多カーネルオンライン意味変化分析
3. 学会等名 言語処理学会第25回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masa-aki Takizawa and Masahiro Yukawa
2. 発表標題 An Efficient Online Learning Method Based on Self-tuned Gaussian Kernels
3. 学会等名 Technical Report of IEICE
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Kono, Masahiro Yukawa, Tomasz Piotrowski
2. 発表標題 Beamforming for Brain-Activity Reconstruction under Time-Correlated Interference
3. 学会等名 Technical Report of IEICE
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Daniyal Amir Awan, Renato Luis Garrido Cavalcante, Masahiro Yukawa, and Slawomir Stanczak	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 496
3. 書名 Machine Learning for Future Wireless Communications (Chapter 11: Adaptive Learning for Symbol Detection: A Reproducing Kernel Hilbert Space Approach)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Masahiro Yukawa http://www.ykw.elec.keio.ac.jp/yukawa/index.html
--

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	山田 功 (Yamada Isao) (50230446)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

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			
米国	南カリフォルニア大学			
ドイツ	Technical University of Berlin	Fraunhofer Heinrich Hertz Institute		
ポーランド	Nicolaus Copernicus University			