

令和元年5月29日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06081

研究課題名(和文)再生核適応フィルタの解析と高性能アルゴリズム開発

研究課題名(英文)Analysis and Developments of Kernel Adaptive Filtering Algorithm

研究代表者

湯川 正裕 (Yukawa, Masahiro)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：60462743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：信号処理・データサイエンスにおいて、非線形性を考慮すべき状況が広く見られる。例えば、低品質スピーカーの入出力特性、光通信路の伝搬特性、時系列データにおける過去と未来のデータ間の関係性など、枚挙に暇がない。ガウス過程のオンライン版として位置付けられるカーネル適応フィルタは、推定精度・計算量・大域的最適性(凸性)の点で優れている。本研究では、カーネル設計が容易で多重スケール性に対応できるという特長を持つ多カーネル適応フィルタの解析と高性能化に取り組んだ。高速な収束を達成するアルゴリズム開発、高速性のメカニズム解明、再生核が存在しない空間への拡張、分散型への拡張に関する成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モデル選択問題は、数理科学における重要テーマとして長年研究されてきた。多カーネル適応フィルタは、複数の再生核を利用することで柔軟で冗長な数理モデルを用意し、スパース化によって冗長な辞書から適切な要素のみを自動抽出する機能を備えた手法である。研究代表者は、同手法に関する研究に2010年に着手し、2012年に誌上発表、以降、様々な方向に研究を進展させてきた。本科研費プロジェクトで得られた成果は、アルゴリズムの高速化・高速化メカニズムの理解・分散型アルゴリズムへの発展を含むものであり、ビッグデータ解析への需要と期待が高まる現代と未来において、基盤技術としての役割を担っていくことを期待する。

研究成果の概要(英文)：Nonlinearity is encountered in many situations in signal processing and data science, such as in characteristics of low-cost speaker, channel of optical communication, relationship between the past and future measurements of time-series data, to name a few. Kernel adaptive filtering has good tradeoffs among estimation accuracy, complexity, and global optimality (convexity).

In the current research project, analysis and performance improvements of multikernel adaptive filtering have been addressed. The multikernel adaptive filtering is insensitive to the design of kernels and is able to capture the multiscaleness of data. The outcomes of the project include the developments of fast converging algorithms with understanding of its mechanism, an extension to Hilbert spaces that have no reproducing kernels, and an extension to distributed settings with sensor networks envisioned.

研究分野：信号処理

キーワード：再生核ヒルベルト空間 直積空間 オンライン学習 カーネル法 非線形関数推定 凸射影 時系列データ予測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非線形関数を近似・推定するための数理モデルは広く研究されており、1990年代以降、サポートベクトルマシンに代表される「再生核を用いた数理モデル」が機械学習・信号処理分野で盛んに研究されていた。特に、今世紀に入ってから、再生核に基づくオンライン推定(適応推定)に大きな注目が集まり、高性能な適応アルゴリズムの開発競争が世界中で進展した。例を挙げると、Kivinen 教授(フィンランド)やPrincipe 教授(米国)らの研究チームは、関数空間(再生核ヒルベルト空間)で確率的勾配降下法を適用する「関数空間アプローチ」を提案した。一方、Richard 教授(仏国)らは、(有限個の)展開係数を並べたベクトルの空間(ユークリッド空間)に着目した「ユークリッド空間アプローチ」を提案し、その平均2乗誤差解析を与えた(Chen, Gao, Richard, and Bermudez, ICASSP2014)。関数空間アプローチに基づく多核適応フィルタの実現が、兼ねてからの構想であった。ユークリッド空間アプローチに対する「関数空間アプローチの優位性」が明らかになってきたため、前述の構想が実現できれば、既存法を凌ぐ性能が期待できると考えた。

2. 研究の目的

非線形関数の適応推定は、ビッグデータのオンライン解析への応用を含む重要なテーマである。非線形オンライン型アプローチである「再生核適応フィルタ」の既存アルゴリズムは2つに大別できる。本研究では、関数空間アプローチに着目し、複数の再生核の同時利用に基づく新しい非線形適応学習パラダイムを構築することを目的とする。第一に、2つのアプローチの関係性を統計的解析に基づいて解明する。第二に、「複数の再生核ヒルベルト空間の直積空間上の点」としての関数表現に着目して「関数空間多核適応フィルタ」を構築する。第三に、高性能な多核適応アルゴリズムを開発し、その統計的挙動を平均2乗誤差解析によって明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 再生核ヒルベルト空間の直積上で関数空間アプローチを定式化することで、関数空間射影に基づく多カーネル適応アルゴリズムを構築し、その性能を検証した。

(2) 特徴ベクトルの自己相関作用素を解析することにより、(ある仮定の下で)ユークリッド空間アプローチと関数空間アプローチの収束速度の違いを裏付ける理論的根拠を明らかにした。

(3) 一般に再生核が存在しない L_2 空間において、その有限次元部分空間における再生核が定義できることに着目し、再生核適応フィルタを「再生核が存在しないヒルベルト空間」に拡張した。また、同アプローチの有用性をシミュレーションで検証した。

(4) 多カーネル適応フィルタを分散処理に適用できる形に拡張し、不動点近似に基づく理論解析を検討した。また、同アプローチの有用性をシミュレーションで検証した。

4. 研究成果

(1) 複数の再生核ヒルベルト空間の直積上での適応学習(学術雑誌論文)、学会発表論文) 複数の成分(低周波と高周波、線形成分と非線形成分など)を含む非線形関数の適応推定を目的として、複数の再生核ヒルベルト空間の直積空間における適応学習の枠組みを提案し、その有効性を検証した。これによって非線形関数の局所的な特徴を表現することが可能となり、その結果、低次元部分空間で非線形関数を表現可能となる。提案法は、推定に用いる再生核ヒルベルト空間が原点のみで交わる場合(例えば、ガウス核と多項式カーネルを併用した場合)和空間での適応学習として解釈することができる。人工データと実データを用いた数値例により、提案法の有効性を実証した。

(2) 関数空間アプローチの高速な収束に関する理論的考察(学術雑誌論文、学会発表論文) 既存のカーネル適応アルゴリズムは、関数空間における射影に基づく手法(アプローチ1)とユークリッド空間における射影に基づく手法(アプローチ2)に大別される。経験的に、アプローチ1の方が速い収束を示すことが分かっていたが、その理由は未解明だった。本研究では、入力データに対応する特徴ベクトルの自己相関作用素が、辞書データのサンプル平均で近似で

きるといふ仮定をおき、2つのアプローチの収束速度の違いを理由づける近似式を得ることに成功した。具体的には、収束速度に影響する自己相関行列の固有値広がりと比較すると、アプローチ1の固有値広がりがアプローチ2の固有値広がりの平方根で近似できることを明らかにした。このことは、アプローチ2の固有値広がりが実用上、極めて大きい(10の10乗オーダー程度)ことから、アプローチ1の固有値広がりの方が遥かに小さいことを示す。したがって、アプローチ1の方が超球に近い誤差曲面を利用して適応学習していることが分かり、良好な収束特性の理由付けが得られる。さらに同条件の下、平均2乗誤差関数の最小解が、関数空間における最良近似(探索する部分空間の中で真の非線形関数を最も良く近似する点)と近似的に一致することを示した。本研究成果は、アプローチ1が特に有効である状況を明らかにするとともに、適応アルゴリズムによって良好な関数近似が達成され得る条件を明らかにしている。アプローチ1は、グラム行列で決まる計量を入れたユークリッド空間で射影する手法として解釈可能である。前述の知見に基づいて、収束速度をさらに改善する計量の導出にも成功した。

(3) L2空間射影型アルゴリズム(学術雑誌論文)

L2空間射影に基づく非線形適応アルゴリズムを構築した。従来のカーネル適応フィルタでは、基底ベクトルで張られる空間における未知非線形関数の最良近似が最小平均二乗解に一致しないという不整合性が生じていた。L2空間ではこの不整合性が解消される。L2空間の計量を効率的に算出する手法も提案し、有効性を複数の数値実験で実証した。

(4) 分散型アルゴリズム(学術雑誌論文、学会発表論文)

分散型信号処理に拡張し、不動点近似に基づく理論解析を与えるとともに、実データ(地形の高度データ)を用いて有効性を実証した。また、ハイブリッド型辞書アプローチ(大域的な辞書と局所的な辞書を用いる手法)も提案し、シミュレーションで有効性を実証した。これらはブレーメン大学(ドイツ)との共同研究成果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文(全て査読有)](計7件)

- Ban-Sok Shin, Masahiro Yukawa, Renato Luis Garrido Cavalcante, and Armin Dekorsy, "Distributed adaptive learning with multiple kernels in diffusion networks," IEEE Trans. Signal Processing, vol.66, no.21, pp.5505--5519, Nov. 2018.
- Motoya Ohnishi and Masahiro Yukawa, "Online nonlinear estimation via iterative L2-space projections: reproducing kernel of subspace," IEEE Trans. Signal Processing, vol.66, no.15, pp.4050--4064, August 2018.
- Masahiro Yukawa and Hideaki Kagami, "Supervised nonnegative matrix factorization via minimization of regularized Moreau-envelope of divergence function with application to music transcription", Journal of the Franklin Institute, Special Issue on Recent Advances in Machine Learning for Signal Analysis and Processing, Volume 355, Issue 4, pp. 2041--2066, March 2018.
- Osamu Toda and Masahiro Yukawa, "Online model-selection and learning for nonlinear estimation based on multikernel adaptive filtering", IEICE Trans. Fundamentals, vol.E100-A, no.1, pp.236--250, January 2017.
- Masahiro Yukawa and Klaus R. Müller, "Why does a Hilbertian metric work efficiently in online learning with kernels?", IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 10, pp. 1424-1428, October 2016.
- Masaaki Takizawa and Masahiro Yukawa, "Efficient dictionary-refining kernel adaptive filter with fundamental insights", IEEE Trans. Signal Processing, vol.64, no.16, pp.4337--4350, August 2016.
- Masahiro Yukawa, "Adaptive learning in Cartesian product of reproducing kernel Hilbert spaces", IEEE Trans. Signal Processing, vol.63, no.22, pp.6037--6048, November 2015.

[学会発表(全て査読有)](計14件)

- Yuto Ogino and Masahiro Yukawa, "Spectral Clustering with Automatic Cluster-Number Identification via Finding Sparse Eigenvectors," in Proceedings of EUSIPCO (European Signal Processing Conference), pp.1197--1201, Rome: Italy, September 2018.
- Daniyal Amir Awan, Renato L.G. Cavalcante, Masahiro Yukawa, and Slawomir Stanczak, "Detection for 5G-NOMA: An Online Adaptive Machine Learning Approach," in Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas City, MO, USA, May 2018.
- Kwangjin Jeong, Masahiro Yukawa, Masao Yamagishi, and Isao Yamada, "Automatic shrinkage tuning robust to input correlation for sparsity-aware adaptive filtering," in Proceedings of 43rd IEEE ICASSP, pp.4314--4318, Calgary: Canada, April 2018.
- Masahiro Yukawa, Klaus R. Müller, and Yuto Ogino, "How Are the Centered Kernel Principal Components Relevant to Regression Task?," in Proceedings of 43rd IEEE ICASSP, pp.2841--2845, Calgary: Canada, April 2018.
- Ban-Sok Shin, Masahiro Yukawa, Renato L.G. Cavalcante, and Armin Dekorsy, "A hybrid dictionary approach for distributed kernel adaptive filtering in diffusion networks," in Proceedings of 43rd IEEE ICASSP, pp.3414--3418, Calgary: Canada, April 2018.
- Hideaki Kagami, Hirokazu Kameoka, and Masahiro Yukawa, "Joint separation and dereverberation of reverberant mixtures with determined multichannel non-negative matrix factorization," in Proceedings of 43rd IEEE ICASSP, pp.31--35, Calgary: Canada, April 2018.
- Motoya Ohnishi and Masahiro Yukawa, "Online Learning in L2 Space with Multiple Gaussian Kernels," in Proceedings of EUSIPCO, Kos: Greece, pp. 1644--1648, August--September 2017.
- B.-S. Shin, H. Paul, M. Yukawa, and A. Dekorsy, "Distributed Nonlinear Regression Using In-Network Processing With Multiple Gaussian Kernels," in Proceedings of IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), pp.41--45, Sapporo: Japan, July 2017.
- Masao Yamagishi, Yukawa Masahiro, and Isao Yamada, "Automatic shrinkage tuning based on a system-mismatch estimate for sparsity-aware adaptive filtering," in Proceedings of 42nd IEEE ICASSP, pp.4800--4804, New Orleans: USA, March 2017.
- Hideaki Kagami, Hirokazu Kameoka, and Masahiro Yukawa, "A majorization-minimization algorithm with projected gradient updates for time-domain spectrogram factorization," in Proceedings of 42nd IEEE ICASSP, pp.561--565, New Orleans: USA, March 2017.
- Hirokazu Kameoka, Hideaki Kagami, and Masahiro Yukawa, "Complex NMF with the generalized Kullback-Leibler divergence," in Proceedings of 42nd IEEE ICASSP, pp.56--60, New Orleans: USA, March 2017.
- Asahi Ushio and Masahiro Yukawa, "Projection-based dual averaging for stochastic sparse optimization," in Proceedings of 42nd IEEE ICASSP, pp.2307--2311, New Orleans: USA, March 2017.
- Airi Takeuchi, Masahiro Yukawa, and Klaus R. Müller, "A Better Metric in Kernel Adaptive Filtering," in Proceedings of EUSIPCO, Budapest: Hungary, pp. 1578--1582, August--September 2016.

Hideaki Kagami and Masahiro Yukawa, "Supervised Nonnegative Matrix Factorization with Dual-Itakura-Saito and Kullback-Leibler Divergences for Music Transcription," in Proceedings of EUSIPCO, Budapest: Hungary, pp. 1138--1142, August--September 2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ykw.elec.keio.ac.jp/yukawa/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。