

令和元年6月13日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13986

研究課題名(和文)凸最適化型部分空間追跡アルゴリズムのロバスト化と高速化に関する研究

研究課題名(英文)Robustification and acceleration of subspace tracking algorithms via convex optimization techniques

研究代表者

山田 功 (Yamada, Isao)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50230446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：部分空間追跡問題は時々刻々観測されるランダムベクトルからその自己相関行列と固有ベクトルをオンライン推定する問題である。自己相関行列の推定誤差にロバストで高速な固有ベクトル推定を実現するには直交条件の担保と2次微分情報の活用が鍵になる。多様な応用への柔軟な拡張性を考慮した結果、本プロジェクトでは、[Nguyen, Yamada 2013]で観測されていた数値的不安定性の解消法の検討とエル1ノルムをペナルティ項に持つ新しいオンラインアルゴリズムへの拡張を行い、固有ベクトル系の可解釈性が高められることを確認している。さらに、これらの課題と相補的なパラメータ推定・信号復元問題を検討し、大きな成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

部分空間追跡は、オンライン型アルゴリズムであり、ビッグデータの分析に適用可能にした「主成分分析の一般化」と考えてよい。本プロジェクトでは、[Nguyen, Yamada 2013]で稀に観測されていた数値的不安定性の要因特定と不安定性を解消する簡易な手法を確立したばかりでなく、エル1ノルムをペナルティ項に持つ新しいオンラインアルゴリズムに拡張することにより、推定された固有ベクトルの可解釈性が高めることに成功した。更に上記課題に相補的なパラメータ推定・信号復元問題について検討し、大きな成果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The goal of this project has been to establish newly a robust as well as efficient adaptive subspace tracking algorithm for broader data-science applications. To keep the orthogonality among the estimated eigenvectors under severely noisy situation, we first analyzed and resolve a certain instability issue observed in an algorithm [Nguyen, Yamada 2013]. We then generalized this algorithm to enhance the interpretability of the estimated eigenvectors by promoting their sparseness. Numerical experiments demonstrate that the proposed algorithm (i) can improve the subspace tracking performance and (ii) can promote the interpretability of the estimate of the principal generalized eigenvector. Moreover, we also investigated certain closely related parameter estimation and signal recovery problems to the sparsity aware subspace tracking problems.

研究分野：信号処理，最適化，データサイエンス

キーワード：信号処理 部分空間追跡 凸最適化

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

### 1. 研究開始当初の背景

「部分空間追跡」は時系列データに潜む支配的な部分空間の基底をオンライン推定する信号処理技術であり、ビッグデータ解析等への応用でも重要な役割が期待されている。ところが既存の代表的なアルゴリズムは、次元の縮退や推定精度の劣化を露呈するため、最近の凸最適化技術の知見を取り入れた高い信頼性と優れた拡張性を備えたアルゴリズムの実現が望まれていた。

### 2. 研究の目的

従来の部分空間追跡アルゴリズムの弱点(次元の縮退や推定精度劣化)を解消するためには、学習過程で推定される基底に直交性を担保する必要があるが、直交性と最近の凸最適化技術は相反する数学的性質であり、お互いのよさを損なわない融合は一筋縄で実現できるものでない。本プロジェクトでは推定精度劣化に繋がりにくい変化や異常をいち早く検知するための適応信号処理技術やスパース性の活用を可能にする凸最適化技術で有望なアイデアを進展させ、これらを巧みに融合することにより、優れた部分空間追跡アルゴリズムの実現に挑戦する。

### 3. 研究の方法

学習過程で推定される基底に直交性を担保するために、研究代表者等は[NTY12]で「入れ子構造をなす直交補空間系に基底ベクトルの探索空間を埋め込むアイデア」を開拓するとともに[NY13]では高速な追跡性能を実現するために「非凸関数の2次微分の近似を部分空間追跡問題に応用するアイデア」を提案していた。これらは推定目標である固有ベクトル近傍で最適化のための逐次近似を実現するアイデアであり、本プロジェクトの目的に合うものであるが、不連続性を持つ非線形計算を含むため、稀に不安定な追従性能を露呈する現象が観察されていた。そこで本プロジェクトでは、まず、非線形計算を含む類似の適応信号処理問題として「非線形系を含む適応システム同定問題(非線形ひずみを伴う音響系のエコー消去問題)」を検討した。また、そこで得られた知見を活かすことにより[NTY12]と[NY13]で観測された数値的不安定性の解消に取り組んだ。次に、推定された固有ベクトルの可解釈性を高めるために、[NY13]で採用していたコスト関数のペナルティとして(凸最適化によるスパース性強調で広く利用されている)エル1ノルムを導入することにより、推定固有ベクトルのスパース性を促進するアルゴリズムに拡張する問題に取り組んだ。さらに、これらの知見を活かし、「不連続性を含む未知系のシステム同定問題」を「スパースなパラメータを推定する問題」に翻訳する方法を開発している。

[NTY12] T.D.Nguyen, N. Takahashi, I. Yamada, "An adaptive extraction of generalized eigensubspace by using exact nested orthogonal complement structure," Multidimens. Syst. Signal Process., pp.1-27, 2012.

[NY13] T.D.Nguyen, I. Yamada, "Adaptive normalized quasi-Newton algorithms for extraction of generalized eigen-pairs and their convergence analysis," IEEE Trans. Signal Process., vol.61, no.6, pp. 1404-1418, 2013.

### 4. 研究成果

「非線形系を含む適応システム同定問題(非線形ひずみを伴う音響系のエコー消去問題)」については従来法を遥かに凌駕する性能を持つアルゴリズムの開発に成功した(雑誌論文 など)。

「[NTY12]と[NY13]で観測された数値的不安定性の解消」については不安定性を引き起こす要因を解明し、直交射影計算を1つ追加するだけで、不連続写像がもたらすギャップが最小に抑えられ、不安定挙動が解消されることを明らかにした(雑誌論文、学会発表 など)。

「推定固有ベクトルのスパース性を促進し、可解釈性を向上させる問題」については新しいアルゴリズムの収束解析を与えると同時に数値実験によって、提案法の著しい効果を確認している(学会発表 など)。

「“不連続性を含む未知系のシステム同定問題”を“スパースなパラメータを推定する問題”に翻訳する方法」については翻訳機能を実現する線形変換が実現できることを明らかにするとともにこの線形変換を活用することによって、実用性の高いシステム同定アルゴリズムの開発に成功している(雑誌論文)。

更に、以上のアイデアを実現するために不可欠な各種最適化技術や信号処理技術の高度化に取り組み大きな成果を得ている(学会発表 など)。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

Hiroki Kuroda, Masao Yamagishi, Isao Yamada, Nonlinear Acoustic Echo Cancellation by Exact-Online Adaptive Alternating Minimization, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E99-A, no. 11, pp. 2027-2036, 2016, 査読有

Kenji Kakimoto, Masao Yamagishi, Isao Yamada, Smoothing of adaptive eigenvector extraction in nested orthogonal complement structure with minimum disturbance principle, Multidimensional Systems and Signal Processing, vol.

29, no. 1, pp. 433-465, 2018, 査読有  
Hiroki Kuroda, Masao Yamagishi, Isao Yamada, Exploiting Sparsity in Tight-Dimensional Spaces for Piecewise Continuous Signal Recovery, IEEE Transactions on Signal Processing, vol.66, no.24, pp. 6363-6376, 2018, 査読有

〔学会発表〕(以下の5件を含む計9件)

Kenji Kakimoto, Masao Yamagishi, Isao Yamada, ACCELERATION OF ADAPTIVE NORMALIZED QUASI-NEWTON ALGORITHM WITH IMPROVED UPPER BOUNDS OF THE CONDITION NUMBER, IEEE ICASSP 2017.

内田賢吾、山田 功, A Promoting Sparsity of Adaptive Generalized Eigenvector Estimation, 第32回信号処理シンポジウム 2017.

Kengo Uchida, Isao Yamada, A Nested  $l_1$ -penalized Adaptive Normalized Quasi-Newton Algorithm for Sparsity-aware Generalized Eigen-subspace Extraction, APSIPA ASC 2018.

Kengo Uchida, Isao Yamada, An  $l_1$ -Penalization of Adaptive Normalized Quasi-Newton Algorithm for Sparsity-aware Generalized Eigenvector Estimation, IEEE SSP 2018.

Yuto Ogino and Masahiro Yukawa, Spectral Clustering with Automatic Cluster-Number Identification via Finding Sparse Eigenvectors, EUSIPCO 2018.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：湯川 正裕

ローマ字氏名：Masahiro Yukawa

所属研究機関名：慶應義塾大学

部局名：理工学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：60462743

### (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。