

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16067

研究課題名(和文) テンソルネットワークのモデル選択と分散处理的ビッグデータ解析への応用

研究課題名(英文) Model Selection for Tensor Factorization and its Applications for Big Data Analysis

研究代表者

横田 達也 (Yokota, Tatsuya)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80733964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ベクトルや行列などで表すことができないより次元の高い配列データのことをテンソルと呼ぶ。テンソルデータの解析にはさまざまなアプローチがあるが、テンソルをより低次元で表現するテンソル分解モデル、テンソルネットワークモデルの研究が盛んに行われている。しかし、どのデータに対しても万能に有効なモデルは存在せず、与えられたデータに対して適切なモデルを設計する必要がある。この問題をモデル選択とよぶ。本研究では、テンソルデータ解析におけるモデル選択とその応用に関して理論構築、アルゴリズム開発、およびさまざまな検証実験、応用研究を行い、4本の学術論文、14件の国内研究会および国際学会にて発表を行った。

研究成果の概要(英文)：Tensor is a name of multi-dimensional array including vectors and matrices. For analyzing tensors, there are many approaches such as tensor factorization and tensor networks. However, model selection (i.e., rank estimation) is a critical issue of tensor factorization and its applications. In this study, we tackled the problem of model selection in tensor analysis while developing many algorithms for tensor rank estimation, noise reduction, completion, and super-resolution. Totally, we published four journal papers including arXiv and fourteens conference presentations including domestic and international conferences. It includes two highly impact journal papers published in the IEEE Transactions on Signal Processing, and two highly impact international conference papers accepted for the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

研究分野：テンソル信号処理

キーワード：テンソル分解 モデル選択 情報量基準 テンソル補完 テンソル核ノルム テンソル総変動

### 1. 研究開始当初の背景

(1) テンソルとは、ベクトル、行列を一般化した概念である。1階のテンソルはベクトル、2階のテンソルは行列である。一般に、階数が大きくなるほど全体の情報量は指数関数的に増え、高度な解析が難しくなる。しかし、このような大規模なデータでも、テンソル分解モデル、テンソルネットワークモデルによって、できるだけ情報を保った状態で、低次元で表現することができる。また、テンソル分解モデル、テンソルネットワークモデルは単なる低次元データ表現モデルにとどまらず、ノイズ除去、データ補完、特徴抽出などにも有効なことが示されている。

(2) どのデータに対しても万能に有効なモデルは存在しない。与えられたデータに対して有効なモデルを選び、適用することはテンソル分解モデル、テンソルネットワークモデルを有効に活用するための要であり、これを自動的に行う技術をモデル選択という。モデル選択はテンソル分解モデル、テンソルネットワークモデルのための大きな課題のひとつであり、これまで際立って有効な手法は提案されていない。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、テンソル分解モデル、テンソルネットワークモデルのモデル選択、およびそれを用いたノイズ除去、データ補完、低次元表現などの理論構築、アルゴリズム開発、および応用研究を行うことである。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、モデル選択の問題をテンソルのランク推定問題として考える。行列のランクとは異なり、テンソルではCPランク、Tuckerランクなど複数の定義が存在する。ランク推定には、核ノルム最小化、情報量基準、ランク探索などのさまざまなアプローチが考えられ、それぞれについての研究が必要となる。また、単純にランク推定のための研究でなく、ノイズ除去、データ補完、低次元表現などへの応用と合わせ、実データによる有効性の検証を行う。

### 4. 研究成果

(1) テンソルのランク推定問題へ取り掛かる事前の研究として、行列のランク推定に関する調査、理論構築、アルゴリズム開発から研究をスタートした。行列のランク推定問題は1980年代からすでに研究されているが、そのほとんどが完全データに対するものであった。未完データに対する補完処理およびそのランク推定は、2010年代から少しずつ研究が進んでいるが、ノイズ下における問題に限定するとあまり進んでいない。

そこで、本研究では行列補完およびランク推定のためのランク増加アルゴリズムを新しく提案し、これにより未完データの損失要素および行列ランクをノイズ下でも精度よく求めることを可能にした。この研究成果は国際会議APSIPA2015で発表された。また、ランク増加アルゴリズムは、本研究課題の研究成果の根幹を成す技術的枠組みであり、テンソル分解、テンソルネットワークなどへの拡張が可能である。

(2) 次に、テンソルのランク推定問題としてCP分解モデルに関する研究を行った。テンソルのCP分解は、ひとつのテンソルを独立なランク1テンソルの線形和で表現するモデルであり、行列からのテンソルへの拡張としては最も標準的と考えられている。しかし、CPモデルには特殊な非線形的性質があることが知られており、解析が難しい。本研究では、ランク増加アルゴリズムをテンソルCP分解モデルへ適用し、さらにランク1テンソルの平滑性を制約に加えた新しいテンソル分解法を提案した。これにより、未完テンソルをCP分解モデルに基づいてランク推定し、同時に補完処理も可能となった。最先端のテンソル補完手法と比較実験(図1)を行うことによって、提案手法の有効性を検証した。この研究成果は学術論文としてIEEE Transactions on Signal Processingにて発表された。



図1：平滑CP分解モデルによるテンソル補完

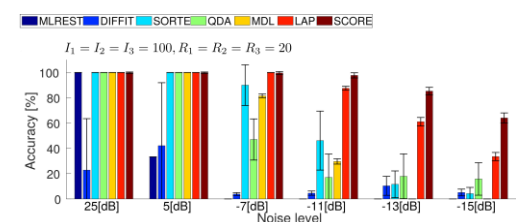


図2：情報量基準を用いた新しいテンソル多重線形ランク推定法の精度(SCOREが提案手法)

(3) 赤池情報量基準やベイズ情報量基準などは行列データの本質的な次元数を求めるために広く用いられてきたが、テンソルデータのランク推定に活用する研究はとても重要である。前節で述べたCP分解モデルなどのテンソル分解を用いるランク推定に比べて、情報量基準を用いる手法は格段に計算量

が少なく済む。本研究では、情報量基準に基づいてテンソルが完全データかつノイズ下で与えられているときの多重線形ランク (T u c k e r ランク) を効率的かつ高精度に求める新しいアルゴリズムを提案した (図 2)。この研究成果が国際的に認められ、学術論文として I E E E T r a n s a c t i o n s o n S i g n a l P r o c e s s i n g にて発表された。

(4) ノイズ下におけるテンソル補完は、応用上とても重要な研究課題である。本研究では、テンソル核ノルムおよびテンソル総変動最小化に基づくテンソル補完法におけるノイズ不等式制約問題に着目し、凸最適化アルゴリズムの定式化と実装、比較実験を行った。また、最適化アルゴリズムにおけるステップサイズパラメータの効率的な調整法に関してさらに研究を深めた。この研究成果は、難関国際会議 C V P R に採択され、発表された。また、関連研究が国際会議 A P S I P A にて発表された。これらの研究成果とさらに新しい研究成果をまとめた学術論文のプレプリント版が a r X i v を通して公開された。

(5) T u c k e r 分解におけるランク増加アルゴリズムの開発とそれを用いたテンソル補完法の研究を行った。単純に未完テンソルを T u c k e r 分解モデルへ当てはめるのではなく、より高次元の埋め込み空間において T u c k e r 分解モデルを適用する新しいアプローチが非常に新しい。この研究成果が認められ次年度の難関国際会議 C V P R へ採択され、発表予定である。

(6) その他応用研究を行った。主に医用画像に関して、M R I、機能的 M R I、P E T 画像などの 3 階または 4 階テンソルを扱う問題において、超解像、ノイズ除去、特徴抽出などの技術開発を行った。テンソル核ノルムおよびテンソル総変動の最適化による画像超解像に関する研究は、動画像や M R I などへの応用において有効な成果が得られ国内の複数の研究会に発表された。また、P E T 画像再構成に関する研究成果は国内の研究会、国際会議 A P S I P A、学術論文誌 E n t r o p y などを通して発表された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① T. Yokota, and H. Hontani. Simultaneous Tensor Completion and Denoising by Noise Inequality Constrained Convex Optimization. [arXiv:1801.03299](https://arxiv.org/abs/1801.03299), 2018.

② N. Kawamura, T. Yokota, H. Hontani, M.

Sakata, and Y. Kimura. Parametric PET Image Reconstruction via Regional Spatial Bases and Pharmacokinetic Time Activity Model, *Entropy*, 19(11), 629, 2017

③ T. Yokota, N. Lee, and A. Cichocki. Robust Multilinear Tensor Rank Estimation Using Higher Order Singular Value Decomposition and Information Criteria, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, issue 5, pp. 1196-1206, 2017.

④ T. Yokota, Q. Zhao, and A. Cichocki. Smooth PARAFAC Decomposition for Tensor Completion, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, issue 20, pp. 5423-5436, 2016.

[学会発表] (計 14 件)

① T. Yokota, B. Erem, S. Guler, S. Warfield, and H. Hontani, Missing Slice Recovery for Tensors Using a Low-rank Model in Embedded Space. In *Proceedings of CVPR 2018*. 2018

② T. Yokota, and H. Hontani. An Efficient Method for Adapting Step-size Parameters of Primal-dual Hybrid Gradient Method in Application to Total Variation Regularization. In *Proceedings of APSIPA-ASC 2017*, 2017.

③ K. Kawai, J. Yamada, H. Hontani, T. Yokota, M. Sakata, and Y. Kimura. A Robust PET Image Reconstruction using Constrained Non-negative Matrix Factorization. In *Proceedings of APSIPA-ASC 2017*, 2017.

④ T. Yokota, and H. Hontani. Simultaneous Visual Data Completion and Denoising based on Tensor Rank and Total Variation Minimization and its Primal-dual Splitting Algorithm, In *Proceedings of CVPR 2017*, 2017.

⑤ 横田達也. [招待講演]低ランク性および平滑性を用いたテンソル補完. MICT/MI 研究会, 2016年9月.

⑥ 河村直輝, 横田達也, 本谷秀堅. 空間の低ランク性と平滑性を考慮したフーリエ係数最適化による MR 超解像. MI 研究会, 2017年1月.

⑦ 永田達也, 本谷秀堅, 横田達也, 木村裕一, 伊藤康一, 加藤隆司, 岩田香織, 中村昭範. アミロイド  $\beta$  経時変化モデル構築のた

めの Sparse NMF を用いた PET 画像解析. MI 研究会, 2017 年 1 月.

⑧ 山田純也, 本谷秀堅, 横田達也, 坂田宗之, 木村裕一. 低ランク非負行列分解を用いたダイナミック PET 同時再構成の初期検討. MI 研究会, 2016 年 11 月.

⑨ 脇田章裕, 川出康平, 横田達也, 本谷秀堅, 安藤繁. 時間相関イメージセンサで計測した静止画からの TV-正則化による高精度動画再構成. CVIM 研究会, 2016 年 9 月.

⑩ 河村直輝, 横田達也, 本谷秀堅. TV 最小化と周波数適合による MR 画像の高解像度化. MI 研究会, 信学技報, vol. 116, no. 160, MI2016-46, pp. 55--60, 2016 年 7 月.

⑪ N. Lee, T. Yokota, A. Cichocki. Multilinear rank selection for denoising and dimensionality reduction of multiway data. The Korean Statistical Society Spring Conference 2016, Kyungpook National University, Daegu, South Korea, May 20-21, 2016.

⑫ T. Yokota, A. Cichocki. Tensor Completion via Functional Smooth Component Deflation. In *Proceedings of 41st International Conference on Audio, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2016)*, pp. 2514-2518, 2016.

⑬ T. Yokota, A. Cichocki. A fast automatic rank determination algorithm for noisy low-rank matrix completion. In *Proceedings of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2015)*, pp. 43-46, 2015.

⑭ T. Yokota, A. Cichocki. Smooth PARAFAC Decomposition for Tensor Completion, *Low-rank Optimization and Applications*, Bonn, Germany, Jun. 8-12, 2015.

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/yokotatsuya>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横田 達也 (YOKOTA, Tatsuya)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 8 0 7 3 3 9 6 4