

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700154

研究課題名(和文)多重線型部分空間回帰法及び脳コンピュータインタフェースへの応用

研究課題名(英文)Multilinear Subspace Regression and Its Application in BCI.

研究代表者

ZHAO QIBIN (ZHAO, QIBIN)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・研究員

研究者番号：30599618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では次の二つの課題に取り組む：(1)多次元配列データ(テンソル)の分析法、本研究ではテンソルデータに基づく多重線形回帰、分類問題のためのたくさんの機械学習手法を提案、開発した。またテンソルデータの非線形関係を明らかにするためにテンソル値の入力を処理できるカーネル関数族を提案し、テンソル空間にカーネルマシンを適用するための扉を開くことに成功した。(2)ブレインコンピュータインタフェース及び脳信号分析、本研究では感情を表現した顔画像による感情BCIを開発した。また提案したテンソル技術を脳信号解析に適用することにより脳信号の復号化、特徴抽出およびERPの分類において性能の顕著な改善に成功した。

研究成果の概要(英文)：This project focuses on two aspects: 1) Multiway data (tensor) analysis methods. We proposed and developed many supervised learning methods for tensor data, which can perform multilinear regression or classification on multi-dimensional structured data. In addition, in order to capture the nonlinear relations of tensor data, we proposed a family of kernel functions that can handle tensor-valued inputs, which opens a door for applying kernel machines to tensor space. 2) Brain computer interface and brain signal analysis. We developed an affective brain computer interface (BCI) using emotional faces as stimuli. On the other hand, we extensively applied our proposed tensor techniques for analyzing brain signals, which have shown significant improvement of performance in terms of decoding of brain signals, feature extractions and classifications of ERPs.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：Machine learning Tensor analysis Kernel machines Brain computer interface Brain signal processing Bayesian inference

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 多次元配列データ(テンソル)はコンピュータビジョンや神経科学など最新のアプリケーションにおいて良く扱われており、テンソル分解の技術は最近の十年で大きな興味を集めている。しかしながら、テンソルデータに基づいた教師あり学習の手法はあまり活用されていない。さらに、ほとんどの既存のテンソル手法は線形な解析のみにとどまっており、非線形な関係を効果的に解析することができない。

(2) ブレインコンピュータインタフェース(BCI)の研究は、近年で大きな進歩を果たしたが、BCIの速度と性能はいまだにリアルタイムでの応用に適したものとは言えない。これらの制限は、より効果的なパラダイムを設計するか、もしくはEEGの空間-時間-周波数情報を効率的に処理できるテンソルデータに基づいた機械学習法を開発することによって改善することができる。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の理論的側面における目的は、テンソルによって機械学習と最適な解決策を見つけるためのアルゴリズムに対して新しいモデル系列を提案することである。これらのモデルにはテンソルによって多重線形回帰、非線形回帰及びテンソルデータに基づく線形/非線形の分類器が含まれる。

(2) 本研究の神経科学的側面における目的は、提案したテンソル手法を用いたEEGデータ分析やBCIアプリケーションのためのいくつかの新しいパラダイムを提案することである。これにより現在のBCIシステムの速度と性能を大幅に向上させることができる。

## 3. 研究の方法

(1) まず、多重線形回帰モデルについて考える。予測因子と応答の両方がテンソルデータによって与えられ、それらが予測因子と応答の間で共有された複数の潜在因子行列として分解できると仮定する。すると、これは連結型最適化問題として定式化することができ、対応するアルゴリズムによって問題を解くことができる。次に、非線形な依存性を分解モデルに組み込むために、テンソル値の入

力を処理することができるような新しいカーネル関数族を提案する。提案したテンソルカーネルを用いることで、非線形なテンソルベースの回帰と分類のためのアルゴリズム群を開発することができる。

(2) 次に、BCIパラダイムにおいて、本研究では刺激として物体画像、人間の顔画像及び感情表現をした顔画像などを考える。事象関連電位(ERP)は、判別に適した刺激を見つけるために最も適した指標と考えられる。また、提案したテンソル解析の技術を、これらの単一試行EEGデータの特徴抽出及び分類に適用する。

## 4. 研究成果

(1) 本研究では新しい一般化多重線形回帰モデル、HOPLSを提案した。HOPLSでは潜在空間上にデータを投影することを通してテンソル $X$ からテンソル $Y$ を予測することや、対応する潜在変数への回帰を実行することができる。潜在空間は直交タッカーモデルの和で表され、共通部分空間近似によって最適化される。このアルゴリズムには過学習の問題に対する予測性能と頑健性において利点がある。さらに、本研究ではサル脳のECOG信号から3次元移動軌跡の復号化のためにHOPLSを適用することに成功した。HOPLSにより、予測性能が大幅に改善された。また、潜在空間において最適化された基底から、手の動きに対応する皮質領域と周波数パターンに対する深い解釈が得られた。図1に手の動きの予測結果及び標準的なアルゴリズムとの比較を示す。

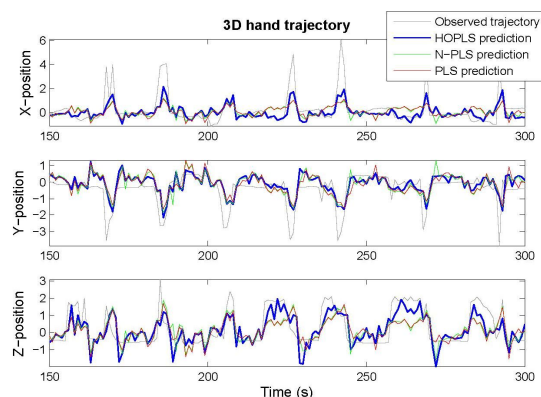


図1. 実際の軌道と予測結果

(2) 次に、本研究では複数モードプロダクトカーネルと確率生成モデルに基づくテンソルカーネル族を提案した。図2に概念図を示

す。このように、カーネルに基づいた多くの手法は、提案したテンソルカーネルを使用することにより、テンソル空間に拡張することができる。本研究では非線形次元削減や非線形特徴抽出や非線形回帰などテンソルデータの非線形解析のための多くのアルゴリズムを開発した。これにはカーネルテンソル部分最小二乗法 (KTPLS)、カーネルテンソル正準相関分析 (KTCCA)、及びテンソルベースのガウス過程 (TGP) が含まれる。

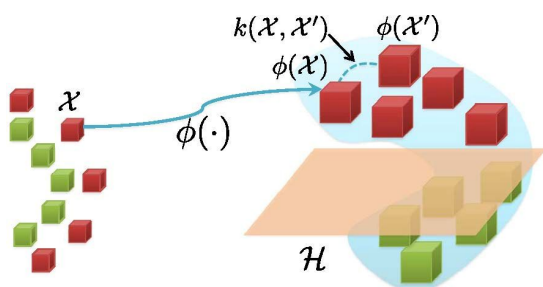


図2. テンソルカーネルは RKHS 空間内の 2 つのテンソル間の類似度として定義される。

(3) カーネル法に基づくテンソル解析には多くの用途がある。本研究では、動画の動作分類に KTCCA を適用し、既存の最先端手法を上回る分類精度が得られた。また、KTPLS と TGP を脳信号の軌道予測に適用することで、予測性能を改善することに成功した。また、TGP を用いて監視カメラを用いた歩行者数を予測することに成功した。

(4) 本研究では、多次元配列データ分類のための、テンソル変量ガウス過程を提案した。多クラス GP 分類器はテンソルカーネルを組み合わせるにより共分散関数として定式化される。また、カーネルパラメータおよび予測分布の完全な後方推論のための変分ベイズ法に基づくモデル選択アルゴリズムを開発した。提案手法を人工データと実際映像の分類に適用し、従来の GP よりも優れた性能が得られた。

(5) 本研究では、欠損データ復元のための、テンソル分解に基づくベイズ確率生成モデルを提案した。テンソルのランクはいまだ未解決の挑戦的問題であるため、本手法では他のすべての未知数な潜在因子と事前分布の複数グループに対する適切な階層的事前分

布を指定し、完全なベイズ処理によって、テンソルのランクをミスエントリの予測分布と同様に自動的に推定する手法を開発した。このモデルは画像/動画補完や画像合成及び EEG/ fMRI の補完など多くのデータに用いることができる。図3に80%の画素がランダムに削除された画像の復元例を示す。

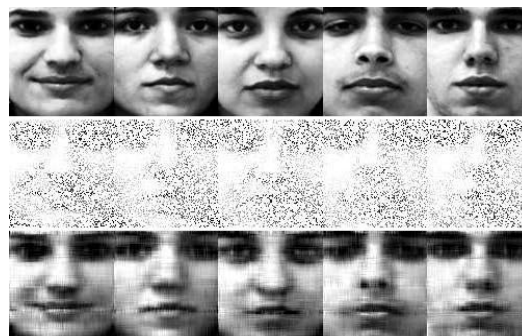


図3. 画像復元

(6) 本研究では、ブレインコンピュータインタフェース (BCI) アプリケーションのためのオドボール課題を研究し、顔による誘発電位を調べ、前頭中央サイトの頂点陽性電位 (VPP) と中央頭頂サイトの後期陽性電位 (LPP) を明らかにした。BCI で広く使用されている P300 成分と比較して、情緒顔に基づく感情 BCI は分類精度を向上させることができ、このようにして情報転送速度を向上させる。図4は事象関連電位(ERP)を示す。

(7) 本研究では、EEG 信号の分析、特にブレインコンピュータインタフェース (BCI) への応用に対して、多くのテンソル分解技術を適用してきた。EEG の分析では、空間 - 時間 - 周波数情報を同時に考えることが重要であるので、テンソル分解技術はそれを表すために効率的な方法である。また、単一試行 ERP の特徴抽出のために HOPLS と非負テンソル分解を適用し、識別性能の改善に成功した。更なる次元削減、特徴の自動選択、汎化性能の強化のためのスパース LDA の集約法を提案した。EEG データに関するテンソル解析の主な利点は複数ドメインの特徴量が神経機構の解釈のために利用できることや、サンプル数の少ない事例における過学習の問題を軽減できることである。

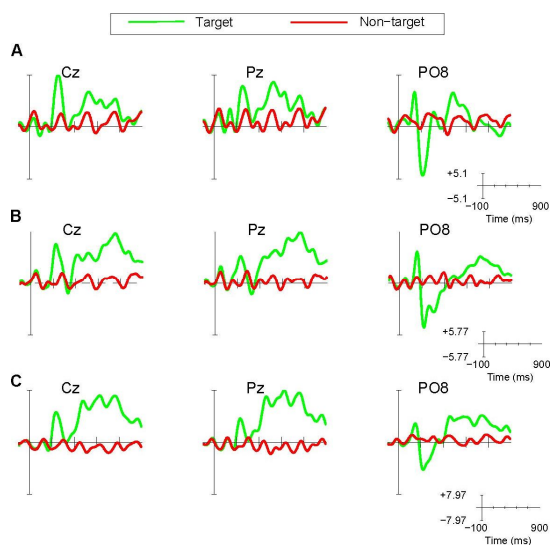


図4 . 物体、顔及び情緒な顔の画像により誘発される事象関連電位

## 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 6 件)

Q. Zhao, L. Zhang, and A. Cichocki, "Multilinear and nonlinear generalizations of partial least squares: an overview of recent advances", *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, Vol.4, pp.104-115, 2014, 査読有  
DOI: 10.1002/widm.1120

Q. Zhao, C.F. Caiafa, D.P. Mandic, Z. C. Chao, Y. Nagasaka, N. Fujii, L. Zhang, and A. Cichocki, "Higher-order partial least squares (HOPLS): A generalized multi-linear regression method", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.35, No.7, pp.1660-1673, 2013, 査読有  
DOI: 10.1109/TPAMI.2012.254.

Q. Zhao, G. Zhou, T. Adali, L. Zhang, and A. Cichocki, "Kernerlization of tensor based models for multiway data analysis", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.30, No.4, pp.137-148, 2013, 査読有  
DOI: 10.1109/MSP.2013.2255334

[学会発表](計 6 件)

Q. Zhao, G. Zhou, L. Zhang, and A. Cichocki, "Tensor-variate Gaussian processes regression and its application to video surveillance", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, May 6th, 2014,

Florence, Italy

Q. Zhao, "Tensor-based machine learning: modeling, algorithm and applications", *IEICE Technical Committee on Signal Processing (Invited Talk)*, Aug. 29th, 2013, Tokyo, Japan

Q. Zhao, L. Zhang, and A. Cichocki, "A tensor-variate Gaussian process for classification of multidimensional structured data", *The Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Jul. 14th, 2013, Bellevue, USA

Q. Zhao, G. Zhou, T. Adali, L. Zhang, and A. Cichocki, "Kernel-based partial least squares for reconstruction of limb movements", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, May 26th, 2013, Vancouver, Canada

[図書](計 1 件)

Q. Zhao, A. Onishi, Y. Zhang, and A. Cichocki, "An affective BCI using multiple ERP components associated to facial emotion processing", *Book Chapter in Brain-Computer Interface Research*, Springer Berlin Heidelberg, 123 pages, pp.61-72, 2013  
DOI: 10.1007/978-3-642-36083-1

[その他]

ホームページ等

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

ZHAO QIBIN (ZHAO , Qibin)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・研究員

研究者番号 : 30599618