

日本ードイツ、ポーランド 国際共同研究
「レジリエント、安全、セキュアな社会のための ICT」
2022 年度 年次報告書

研究課題名 (和文)	高信頼かつ頑健な分散型 AI アルゴリズムの開発と応用 (TRURL)
研究課題名 (英文)	Trustworthy Distributed Learning (TRURL)
日本側研究代表者氏名	湯川 正裕
所属・役職	慶應義塾大学 教授
研究期間	2021 年 4 月 1 日～2024 年 3 月 31 日

1. 日本側の研究実施体制

氏名	所属機関・部局・役職	役割
湯川 正裕	慶應義塾大学 理工学部 教授	研究総括、アルゴリズム設計・解析
山田 功	東京工業大学 工学院 教授	研究総括、アルゴリズム設計
山岸 昌夫	東京工業大学 工学院 助教	アルゴリズム設計・解析、数値実験

2. 日本側研究チームの研究目標及び計画概要

2022 年度の第一目標は、多カーネルに基づく、外れ値に頑健な分散型オンライン非線形関数推定法の開発であり、分位点回帰のアイデアを発展させることによって、信頼性の高い推定法を構築する。第二目標は、DDoS 攻撃検出のための高精度ロバスト主成分分析に対して、分散型最適化アルゴリズムを導出することであり、ドイツチームの成果 (Limmer *et al.* 2015) 等を参考に、高精度な分散型ロバスト主成分分析の実現に直結する新しい最適化モデルを与える。

3. 日本側研究チームの実施概要

日本側研究チームが 2022 年度に実施した研究の実施概要について、以下、簡潔に述べる。

ピンボール損失関数の「Huber 化」とオンラインカーネル分位点回帰の検討

分位点回帰では、ピンボール損失関数 (またはチェック型損失関数) と呼ばれる左右非対

称な V 字型の関数が一般的に用いられている。ピンボール損失関数を最小化することで、経験分位点（サンプルデータに対する分位点）を求められることが知られているが、同関数を用いてオンライン分位点回帰を実現しようとする際、潜在的な問題が生じ得ることが判明した。具体的には、観測データに重畳される加法性雑音の分布に一時的な偏りが生じた場合、誤った方向に推定解が更新され、推定誤差が一時的に増大してしまう。この問題を解決すべく、ロバスト推定で用いられる Huber 損失関数に着目し、同様の発想でピンボール損失をロバスト化することを検討した。理論的な成果として、ピンボール損失関数の Moreau エンベロープ（非可微分凸関数を滑らかな凸関数に緩和したもの）として導出し、同関数の最小解が（ある仮定の下で）経験分位点の近似解を与えることを証明した。この結果に基づき、多カーネル適応フィルタ（湯川 2012）に基づく非線形オンラインアルゴリズムを導出し、ピンボール損失を用いた場合と比較して、優れた性能が達成されることを確認した。本研究は、ドイツチームとの共同で実施しており、共著で執筆した論文を信号処理分野の国際会議に投稿済である。

LiGME モデルに対する分散型アルゴリズムの検討

当初の予定では分散型アルゴリズムの導出に「行列核ノルムの別表現」が必要になると考えていたが、更なる文献調査により、そのような別表現を用いることなく、分散型アルゴリズムの導出が可能となることが分かってきた。2023 年 5 月現在、LiGME モデルに対する分散型アルゴリズムを実際に導出し、その性能を確認すべく、検討を進めている。

LiGME モデルをスケラブルにするための検討

LiGME モデルでは一般化 Moreau 強化行列（GME 行列）の適切な設計が目的関数の全体凸性を担保するための鍵となり、LiGME モデルの大域的最適解の探索が可能となる。検討の結果、任意の線形変換行列に対して、1 回の LDU 分解と部分空間への直交射影計算で完結する代数的 GME 行列設計法の実現に成功している。

- (a) 提案法は固有値分解や反復計算を必要としないため、各回の更新毎に非負定値行列集合への非線形射影計算を要する逐次近似型 GME 行列設計法(例えば[Liu, Chi, PRL, 2022])に比べて圧倒的に低計算量で全体凸性を保証する GME 行列が設計できる。
- (b) 既存の代数的 GME 行列設計法を、統一的に取り扱う方法を明らかにするとともに、既存の固有値分解を用いる設計法に比べて、圧倒的に低計算量で目的関数の全体凸性を保証する GME 行列が設計できる。

提案法とその応用（グループスパース性を積極的に活用する信号復元問題への応用）を纏めた論文は、以下の論文誌への採録が決定しており、既にオンラインで先行公開されている。[Chen, Yamagishi, Yamada, IEICE, 2023] Yang Chen, Masao Yamagishi, Isao Yamada, "A Unified Design of Generalized Moreau Enhancement Matrix for Sparsity Aware LiGME Models," IEICE Trans. Fundamentals., 2023. (in press)

また、LiGME モデルに対して、高速な(非分散型)逐次近似アルゴリズムを実現するための検討も行った。これについては、2023 年度も引き続き、検討を継続していく予定である。