

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K19804

研究課題名（和文）異常通信の発生要因特定能力を備えた次世代ネットワークトモグラフィの開発

研究課題名（英文）A study of signal processing algorithms toward advanced network tomography

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ネットワークトモグラフィの進化を支える複合的信号処理技術の底上げを実現するために、必ずしも旧来のネットワークトモグラフィでは十分に応用されてこなかった関連する多様な信号処理問題、例えば「超複素テンソルの低ランク補完アルゴリズム」や「近似同時対角化に基づくテンソルCP分解アルゴリズム」や「スパース性を先験知識に活用するLiGME型信号推定アルゴリズム」等に取り組むことにより、信号処理の進化に貢献する多くの成果を上げることができた。特に論文[AYY21]と[CYY23]は各々電子情報通信学会論文賞(2021年度,2023年度)を受賞している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深刻なサイバー攻撃の脅威に日々晒され続けているネットワークを安全に保守するため、異常通信発生状況をトラフィックデータから検出できるネットワークトモグラフィへの期待は高まる一方であるが、これを支える信号処理技術の進化も重要である。実際に国際会議でネットワークトモグラフィのスペシャルセッションを企画し、信号処理に求められる技術的課題について情報収集した結果、旧来のネットワークトモグラフィを支えてきた特別な信号処理技術の他に、関連する多くの信号推定アルゴリズムの性能向上が求められていることが確認された。本プロジェクトでは、関連分野で2編の学会賞受賞論文を含む実りある多くの研究成果が生むことができた。

研究成果の概要（英文）：In order to advance the integrated signal processing technologies that certainly realize the evolution of network tomography, we studied various related signal processing problems that have not been sufficiently applied in conventional network tomography, such as "hypercomplex tensor completion", "Tensor CP decomposition algorithms based on approximate simultaneous diagonalization" and "LiGME-type signal estimation algorithms that utilize sparsity as a priori knowledge". Fortunately, we obtained many useful results that can contribute to the evolution of modern signal processing.

In particular, [AYY21] and [CYY23] have received the 2021 IEICE Best Paper Award, and the 2023 IEICE Best Paper Award, respectively.

研究分野：信号処理，最適化，逆問題

キーワード：ネットワークトモグラフィ 超複素テンソル補完 複数行列の近似同時対角化 テンソルCP分解 LiGMEのMoreau強化行列

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

深刻なサイバー攻撃の脅威に日々晒され続けているネットワークを安全に保守するため、異常通信発生状況をトラフィックデータから検出できる「ネットワークトモグラフィ(例えば[Mardani et al.'13])」への期待は高まるばかりであり、また、ネットワークトモグラフィの進化にはこれを支える信号処理技術の進化が欠かせないことが指摘されていた。そこでネットワークトモグラフィの最新の技術動向を把握するために国際会議(APSIPA ASC 2018年11月ホノルル開催)でネットワークトモグラフィのスペシャルセッションを企画し、研究発表[YEY18]を行うと共に、信号処理に求められる技術的課題の洗い出しを兼ねた情報収集を行った。その結果、送信元ノード(Origin)と送信宛ノード(Destination)を共有する通信毎にまとめられたトラフィック量の時間遷移データ行列(拡大 OD フロー行列)に Principal Component Pursuit (PCP)[Candes et al.'09]を応用し、異常通信発生状況を顕在化させる旧来のネットワークトモグラフィの進化には、PCPに代表される近似分解アルゴリズムの進化の他、関連する多くの信号推定アルゴリズムの性能向上が信号処理分野の研究者に求められていることが確認された。

2. 研究の目的

PCP に代表される近似分解アルゴリズムの性能向上には旧来の近似分解アルゴリズムの数理に縛られない柔軟な情報表現の可能性を追求していく必要がある。そこで、必ずしも実数を成分としない「超複素テンソルの低ランク補完問題」や「テンソル CP 分解アルゴリズムの高性能化問題」や「スパース性を先験知識に活用した信号推定アルゴリズムの進化」などをターゲットとする複合的研究課題にも柔軟に取り組み、信号処理の進化に貢献する。

3. 研究の方法

- ✓ 多次元情報の効率表現を可能にする数体系として注目される超複素数(ケーリー・ディクソン数)を成分に持つテンソルの応用に道筋をつけるために低ランクテンソル補完法のアイディアを Cayley-Dickson テンソルを拡張する問題に取り組んだ。
- ✓ 区分的連続な多次元信号の不連続点位置が異常生起点に対応付けられることに注目し、区分的連続関数の有限サンプルから不連続点の位置を推定可能にする方法の開発に取り組んだ。
- ✓ 正則化付き最小 2 乗推定問題のスパース性強化性能を高める新モデル(LiGME)の実現と応用に取り組んだ。
- ✓ テンソル CP 分解問題を複数行列の近似同時対角化問題に翻訳する問題に着手した。
- ✓ PCP によって推定されてきた低ランク行列の情報は Stiefel 多様体上の最適化問題としても解釈可能であるため、適応 Cayley パラメトリゼーションの検討に着手した。
- ✓ 階層構造を持つ凸最適化戦略の応用可能性についても検討を行った。
- ✓ スパース主成分分析の一般化としてスパース固有ベクトルのオンライン推定問題に取り組んだ。
- ✓ 複数行列の近似同時対角化問題の新解法の開発に取り組んだ。
- ✓ 近似同時対角化問題の新解法のテンソル CP 分解問題への応用法について検討した。
- ✓ LiGME モデルのグループスパース信号推定問題への応用法を検討した。
- ✓ LiGME のグラフ正則化型ロバスト PCA への応用を検討した。
- ✓ 超複素テンソルの特異値分解と応用法を検討した。
- ✓ LiGME の Moreau 強化行列の代数的設計法を検討した。

4 . 研究成果

主なものに絞って簡単に報告する。超複素テンソルの低ランク補完問題に対しては、大域的最適解への収束が保証されたアルゴリズムを実現することに成功し、信号処理分野のトップジャーナルに発表した[MY19]。区分的連続関数の有限サンプルから不連続点の位置を推定する問題に対する解法の実現に成功し、国際会議発表を行った[KYY19]。スパース性強化項の性能強化問題では、LASSO の非凸強化に成功し、国際会議発表を行った[YY19a]。テンソル CP 分解問題に関する初期検討結果を国内シンポジウムで発表した[AYY19]。適応 Cayley パラメトリゼーションの基本構想について国際会議発表した[KY19]。階層構造を持つ凸最適化戦略についても国際会議発表を行った[YY19b]。スパース固有ベクトルのオンライン推定問題のアルゴリズムを国際ジャーナルに発表した[UY20]。近似同時対角化問題の新解法を国際ジャーナルに発表した[AYY21]。テンソル CP 分解問題を近似同時対角化問題に帰着する初期検討結果を国内シンポジウムで発表した[AYY19]。近似同時対角化問題の新解法のテンソル CP 分解問題への応用法について国際会議発表し[KY19]、国際ジャーナルに発表した[AYY22]。LiGME のグループスパース信号推定問題への応用法を国際会議発表し[CYY21a]、国際ジャーナルに発表した[CYY21b]。グ LiGME のグラフ正則化型ロバスト PCA への応用については国際会議発表し[KYY21]。超複素テンソルの特異値分解と応用法は国際会議で発表した[MY21]。LiGME の Moreau 強化行列の代数的設計法は、国際ジャーナルに発表した[CYY23]。

信号処理の知見を駆使して実現されるネットワークトモグラフィの進化を支えるものと予想される多くの信号処理課題に取り組むことにより、予想以上の研究成果を生み出すことができた。特に論文[AYY21]と[CYY23]は極めて高く評価していただくことができ、各々2021年度電子情報通信学会論文賞と2023年度電子情報通信学会論文賞を受賞している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yang CHEN, Msao YAMAGISHI, Isao YAMADA Isao	4. 巻 E106-A
2. 論文標題 A Unified Design of Generalized Moreau Enhancement Matrix for Sparsity Aware LiGME Models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 (to appear)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2022EAP1118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 AKEMA Riku, YAMAGISHI Masao, YAMADA Isao	4. 巻 E105.A
2. 論文標題 A Robust Canonical Polyadic Tensor Decomposition via Structured Low-Rank Matrix Approximation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 11~24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020EAP1138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yang Chen, Masao Yamagishi, Isao Yamada	4. 巻 -
2. 論文標題 A Linearly Involved Generalized Moreau Enhancement of $l_{2,1}$ -Norm with Application to Weighted Group Sparse Classification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MDPI algorithms	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/EUSIPCO54536.2021.9616042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida Kengo, Yamada Isao	4. 巻 357
2. 論文標題 An l_1 -penalized adaptive normalized quasi-newton algorithm for sparsity-aware generalized eigen-subspace tracking	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Franklin Institute	6. 最初と最後の頁 5033~5057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfranklin.2020.03.034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Riku AKEMA, Masao YAMAGISHI, Isao YAMADA	4. 巻 E104-A
2. 論文標題 Approximate Simultaneous Diagonalization of Matrices via Structured Low-Rank Approximation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE TRANS. FUNDAMENTALS,	6. 最初と最後の頁 680-690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020EAP1062	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takehiko Mizoguchi, Isao Yamada	4. 巻 vol. 67 no. 15
2. 論文標題 Hypercomplex tensor completion via convex optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Signal Process	6. 最初と最後の頁 pp. 4078-4092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2019.2922156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 CHEN Yang, YAMAGISHI Masao, YAMADA Isao
2. 発表標題 A Simple Design of Generalized Moreau Enhancement Matrix for LiGME Models
3. 学会等名 第37回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chen Yang, Yamagishi Masao, Yamada Isao
2. 発表標題 'A GENERALIZED MOREAU ENHANCEMENT OF L2,1-NORM AND ITS APPLICATION TO GROUP SPARSE CLASSIFICATION''
3. 学会等名 29th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2021, Aug. 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Komatsu Ryota, Yamagishi Masao, Yamada Isao
2. 発表標題 A Graph Regularized RPCA by Generalized Moreau Enhanced Model
3. 学会等名 29th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2021, Aug. 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takehiko Mizoguchi, Isao Yamada
2. 発表標題 ``A hypercomplex tensor-SVD and its application''
3. 学会等名 13th Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内山翔馬、山岸昌夫、山田功
2. 発表標題 核ノルムのLiGME正則化を用いたテンソル補完に関する一考察
3. 学会等名 第36回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riku Akema, Masao Yamagishi, Isao Yamada
2. 発表標題 Exploiting Commutativity Condition for CP Decomposition via Approximate Simultaneous Diagonalization
3. 学会等名 IEEE ICASSP2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Kuroda, Masao Yamagishi, Isao Yamada
2. 発表標題 Segmentation of Piecewise ARX Processes by Exploiting Sparsity in Tight Dimensional Spaces
3. 学会等名 Eusipco 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Kume, Isao Yamada
2. 発表標題 Adaptive Localized Cayley Parametrization Technique for Smooth Optimization over the Stiefel Manifold
3. 学会等名 Eusipco 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Yamada, Masao Yamagishi
2. 発表標題 Global optimization of sum of convex and nonconvex functions with proximal splitting techniques
3. 学会等名 ICCOPT 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Riku Akema, Masao Yamagishi, Isao Yamada
2. 発表標題 Commutativity-Based Strategies for Reducing Canonical Decomposition to Approximate Simultaneous Diagonalization
3. 学会等名 第34回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Yamada, Masao Yamagishi
2. 発表標題 Hierarchical Convex Optimization with Proximal Splitting Operators - Robust Hierarchical Convex Relaxation for Multiclass Support Vector Machine
3. 学会等名 AMS Special Session on "Interactions of Inverse Problems, Computational Harmonic Analysis, and Imaging" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masao Yamagishi, Masaya Endo, Isao Yamada
2. 発表標題 A DDoS Attack Detection by Group-Sparse Plus Low-Rank Temporally-Smooth Decomposition for Extended OD Flow Matrix
3. 学会等名 APSIPA ASC 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関