

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20H02145
研究課題名（和文）エクストリーム信号処理：数理モデリングと深層学習の統合によるスモールデータ解析

研究課題名（英文）Extreme Signal Processing

研究代表者
田中 雄一（Tanaka, Yuichi）
大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10547029
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：エクストリーム信号処理—非常に SN 比が低く、一期一会に近い環境から得られたセンサデータ（エクストリーム信号）の修復や、エクストリーム信号からの知識発見・情報抽出のためのデータ解析基盤技術—を創出するための研究に取り組んだ。グラフ信号処理と深層展開を中心に、理論的にはグラフサンプリング定理に対する検討を行った。センサデータ修復のため、深層展開を用いた手法や時間的に変動するグラフ上データの補間・ノイズ除去手法に関して従来法と比較し優れた性能を示すことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
信号処理技術と深層学習技術を適切に組み合わせ、利用することで、様々な劣化状態のデータ（信号）に対して優れた修復手法が実現できることを明らかにした。特に、サンプリング定理や深層展開のグラフ上データへの拡張に関して成果を挙げた。本研究から得られた成果は、今後必須となるグリーンなデータ解析技術の嚆矢となる技術である。

研究成果の概要（英文）：We conducted research aimed at creating a data analysis technology for the restoration of "extreme signals," i.e., sensor data obtained from environments with very low signal-to-noise ratios and approaching a "once-in-a-lifetime" situation, as well as knowledge discovery and information extraction from extreme signals. We focused on graph signal processing and deep unrolling, and theoretically investigated the graph sampling theorem. We demonstrated the superior performance of methods using deep unrolling for sensor data restoration and interpolation/noise removal of data on time-varying graphs compared to conventional methods.

研究分野：信号情報処理

キーワード：信号処理 深層学習

1. 研究開始当初の背景

信号処理技術は、長い間データ解析ツールとして中心的な存在であった。高速フーリエ変換 (FFT) をはじめとしたアルゴリズムは今日あらゆるデバイスで動作し、センサなどから得られた生のデータを、価値のある情報へと文字通り「変換」してきたと言える。さらに、深層学習をはじめとした人工知能技術は、(特定の分野の)ビッグデータからのパターン認識や情報抽出といった問題に対しパラダイムシフトを起こすような性能向上を果たし、次世代のデータ解析ツールとして急激に研究が進展している。

今までの信号処理や機械学習技術は、データの質が揃っている場合には非常に有効である。例えば、音声信号に含まれる雑音が比較的少ない場合、独立ベクトル分析などの(教師なし)信号処理手法を利用することで話者分離が非常に高性能に行える [Hiroe, Proc. ICA 2006, Benesty et al. (Ed.) Springer Handbook of Speech Processing, 2008 等]。また、通常環境下で撮影され、適切にアノテーションされた(大量の)映像からの物体認識には、深層学習を代表とする教師あり学習が強力なツールとなる [Girshick et al., Proc. CVPR 2014 等]。特に近年の深層学習技術の発展には、ImageNet (<http://image-net.org/>) などの良質なデータベースの整備が大きな要因となっていることは疑いの余地がない。

つまり、我々はビッグデータの 4V (Volume【量】、Variety【種類】、Velocity【速度】、Veracity【信頼性】)、特に Volume と Veracity が確保された信号であれば、現代の計算機を用いることで「それなりに」うまく解析できることを知っている。

しかしながら、様々なセンサを用いた実データの計測・取得に関しては、豊富に良質のデータが揃うような「行儀のよい」センシングと異なり、以下のような問題点が内在する。

- データに大きな雑音が重畳する：例えば頭皮脳波は脳内で発生した電気信号を、頭蓋骨・皮膚・頭髪等を通じて計測しているため、実際の脳派由来の信号は雑音に埋もれてしまう。
- センシング環境がそれぞれの計測で大きく異なる：例えばゴミ集積場等でのガスセンサを利用した温室効果ガス・悪臭源探索においては、地形が集積場ごとに異なり、また同じ集積場でも風向・風速が毎回違う。
- 雑音源が多種多様である：例えば水中での映像取得においては、地上と異なり、水深に応じた波長ごとに異なる光の減衰や、マリンスノーなどの非ガウスの画質の劣化が発生する。

このような過酷な環境で取得された、一期一会なセンシングデータを、我々は「エクストリーム信号」と称する。エクストリーム信号から知識発見や有用な情報抽出を行うことができれば、ソサエティ 5.0 で目標とするサイバー空間(データ解析を行う領域)とフィジカル空間(センシングを行う領域)の融合のために大きな一歩となる。一方で、従来の信号処理・機械学習での解析では限界があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下であった。

1. センシングドメインに関する知識を利用した劣化過程の数理モデリング

エクストリーム信号は典型的にはデータの信頼度が低く、学習に使えるデータセットが少ない、もしくは存在しない。加えて、計測点が不均一に分布している場合も多い。つまり、学習に十分な数のデータが集まらない上に、音声・画像等で利用されているニューラルネットワークの構造をそのまま使うことができない。本研究の 1 点目の目的は、エクストリーム信号の計測過程を可能な限り正確にモデリングすることで、原データ(隠れ変数)から劣化した信号を人工的に生成するシミュレータを構築することである。

2. End-to-end 深層学習によるエクストリーム信号修復システム

2 点目の目的は、数理モデリングによって人工的に生成したデータセットを利用して、ディープニューラルネットワークを学習させることで、エクストリーム信号を修復するシステムを実現することである。研究初期段階では計測・劣化過程に対する先見情報を信号と同時に入力するネットワークを構築する。最終的には劣化データのみを利用してデータを修復する end-to-end システムを目指す。

3. 様々な実データを解析することによるエクストリーム信号処理の有用性の検証

エクストリーム信号処理の深化のためには、様々な実データに対して、統一的なアルゴリズムを利用して有効性を示す必要がある。また、実応用からのフィードバックはエクストリーム信号処理技術の発展に大いに役立つ。本研究課題の 3 点目の目的は、エクストリーム信号を実際に計測し、修復および解析を行うことでアルゴリズムの検証を行うことである。

3. 研究の方法

本研究では、まず、エクストリーム信号処理に対する理論構築を行った。その後に提案した理論を利用したエクストリーム信号処理修復手法のアルゴリズムを構築し、計算機実験を行った。ま

た、シミュレーションデータ、実データを用いて提案手法の有効性を検証した。

4. 研究成果

本研究における代表的な成果を抜粋して以下に述べる。

1) ネットワーク上の信号に対するサンプリング定理の拡張

グラフサンプリング定理は、従来の時間・空間領域の信号に対するサンプリング定理をネットワーク（グラフ）上の信号に対して拡張した理論である。しかしながら、従来手法は主に帯域制限された信号のサンプリングおよび復元理論しか考えられていなかった。本研究では以下の成果を挙げた。

- 信号の部分空間が既知の場合に、帯域制限されていなくてもネットワーク上の信号が復元可能となること
- 統計的性質に基づくサンプリングを提案したこと
- グラフ上データに対する多チャネルサンプリングの理論を確立したこと

2) データからの時変ネットワークの学習

ネットワーク上のデータを解析するためには、まずネットワークが必要である。一方で、潜在的なネットワークがあることは期待されるものの、陽に与えられていない状況が存在する。例えばセンサネットワークや環境データなどが代表的である。このために必要な技術が、データからネットワークを学習するグラフ学習である。従来手法では主に静的なグラフ学習、つまりデータから唯一つのグラフを生成するアルゴリズムが研究されていたが、我々は適切な制約のもとで時間的に変動するネットワークを学習する手法を提案した。

3) 深層展開によるグラフ上データの復元

深層展開 (deep algorithm unrolling; DAU) は、(凸) 最適化の繰り返し処理アルゴリズムのパラメータを誤差逆伝播法などの深層学習技術を用いて学習データから調整する手法の一群である。本研究では、深層展開をグラフ上データ復元のために利用可能とした。特に、ネットワークに依存しないパラメータを学習し、適用することでネットワークの変化に対し頑健な手法を実現した。数理モデルに基づく手法や深層学習を利用した手法と比較し、優れた性能を示すことを明らかにした。例を図1に示す。

4) 特徴空間での幾何的な構造を考慮したグラフニューラルネットワーク

グラフニューラルネットワークは、深層学習技術をネットワーク上データに適用した手法であり、機械学習分野で注目を集めている。一方で、画像認識分野で畳込みニューラルネットワークが示したような劇的な性能向上を果たすには至っていない。本年度においては、グラフニューラルネットワークの各層において特徴量がなす「構造」(特徴量間の角度等)を考慮に入れた手法を提案した。点群の分類や被引用ネットワークの分類で優れた性能を示すことを確認した。

新型コロナウイルス感染症の影響により、国内・海外出張が制限されるなど、対面での研究実施には大きな影響があった。一方で、理論的な検討は大きく進展することができた。上記テーマ以外にも脳波を含む様々なエクストリーム信号を計測できたことで、今後の研究の進展も大きく期待できる。

研究成果はIEEE論文誌やIEEE ICASSPなどのトップ論文誌・国際会議へ採択された。今後は本研究のグリーン信号情報処理への応用に関して積極的に研究を進める。

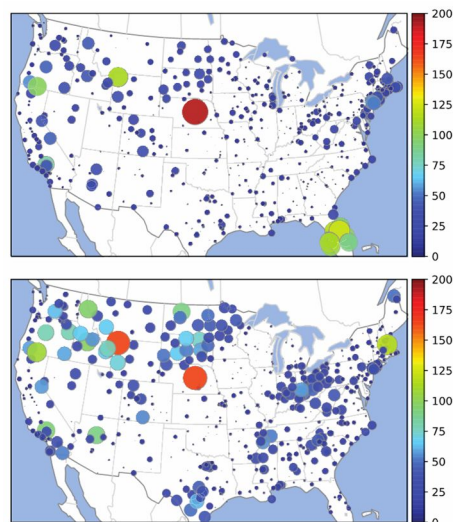


図1 深層展開を利用した米国気温データの補間・ノイズ除去。円の半径が誤差の絶対値を表す(上:提案法,下:従来法)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Yamada Koki, Tanaka Yuichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Temporal Multiresolution Graph Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 143734 ~ 143745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3120994	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Li Yang, Tanaka Yuichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Structure-Aware Multi-Hop Graph Convolution for Graph Neural Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 16624 ~ 16633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3149619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hara Junya, Yamada Koki, Ono Shunsuke, Tanaka Yuichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of Graph Signal Sampling Matrices for Arbitrary Signal Subspaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ICASSP 2021	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSP39728.2021.9414240	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 Nagahama Masatoshi, Yamada Koki, Tanaka Yuichi, Chan Stanley H., Eldar Yonina C.	4. 巻 1
2. 論文標題 Graph Signal Denoising Using Nested-Structured Deep Algorithm Unrolling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ICASSP 2021	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSP39728.2021.9414093	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 該当する

1. 著者名 Tanaka Yuichi, Eldar Yonina C.	4. 巻 68
2. 論文標題 Generalized Sampling on Graphs With Subspace and Smoothness Priors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 2272 ~ 2286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2020.2982325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Yuichi, Eldar Yonina C., Ortega Antonio, Cheung Gene	4. 巻 37
2. 論文標題 Sampling Signals on Graphs: From Theory to Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Signal Processing Magazine	6. 最初と最後の頁 14 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MSP.2020.3016908	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 該当する

1. 著者名 Hara Junya, Tanaka Yuichi, Eldar Yonina C.	4. 巻 1
2. 論文標題 Generalized Graph Spectral Sampling with Stochastic Priors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ICASSP 2020	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSP40776.2020.9053720	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 該当する

1. 著者名 Nagahama Masatoshi, Yamada Koki, Tanaka Yuichi, Chan Stanley H., Eldar Yonina C.	4. 巻 70
2. 論文標題 Graph Signal Restoration Using Nested Deep Algorithm Unrolling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 3296 ~ 3311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2022.3180546	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hara Junya, Tanaka Yuichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Multi-Channel Sampling on Graphs and Its Relationship to Graph Filter Banks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 148 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJSP.2023.3249112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hara Junya, Tanaka Yuichi, Eldar Yonina C.	4. 巻 71
2. 論文標題 Graph Signal Sampling Under Stochastic Priors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1421 ~ 1434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2023.3267990	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nagahama Masatoshi, Tanaka Yuichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Multimodal Graph Signal Denoising Via Twofold Graph Smoothness Regularization with Deep Algorithm Unrolling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ICASSP 2022	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSP43922.2022.9747784	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 Hara Junya, Tanaka Yuichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Sampling Set Selection for Graph Signals under Arbitrary Signal Priors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ICASSP 2022	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSP43922.2022.9747703	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 Yamada Koki, Tanaka Yuichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Graph Learning Information Criterion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ICASSP 2022	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICASSP43922.2022.9746309	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5件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 田中雄一
2. 発表標題 エクストリーム信号処理：スモールデータから知見を得る方法
3. 学会等名 データサイエンス的手法により探求する天文学 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gene Cheung and Yuichi Tanaka
2. 発表標題 GRAPH SPECTRAL IMAGE PROCESSING
3. 学会等名 IEEE ICIP 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中雄一
2. 発表標題 グラフ上の信号に対するサンプリング
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中雄一
2. 発表標題 ネットワーク上の信号処理とグラフサンプリング定理
3. 学会等名 第1回SICEポストコロナ未来社会ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中雄一
2. 発表標題 グラフ上データのための深層展開
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中 雄一	4. 発行年 2023年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 250
3. 書名 グラフ信号処理の基礎と応用	

〔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
研究 分担者	田中 聡久 (Tanaka Toshihisa) (70360584)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	石田 寛 (Ishida Hiroshi) (80293041)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	
研究分担者	小野 峻佑 (Ono Shunsuke) (60752269)	東京工業大学・情報理工学院・准教授 (12608)	

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			
イスラエル	ワイツマン科学研究所			
米国	パデュー大学	南カリフォルニア大学		
カナダ	ヨーク大学			