

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K21287

研究課題名（和文）不確実性を持つネットワーク上の信号処理：グラフ信号処理とベイズ的アプローチの融合

研究課題名（英文）Signal processing on graphs with uncertainties

研究代表者

山田 宏樹（Yamada, Koki）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・特任助教

研究者番号：70965524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、電力システムや交通網などのネットワークに不確実性が存在する場合における信号処理手法について取り組んだ。グラフ信号処理分野の重要課題である、グラフフィルタ転移、時変グラフ信号復元、グラフ信号のサンプリングに対し、検討および手法開発を行った。開発した手法を電力システムの状態推定、音響信号の時間周波数解析に応用し、従来法と比べ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

確率密度比推定を利用し、あるネットワーク上で学習したグラフフィルタを異なるネットワーク上でも適用可能とする技術を開発した。本研究成果を電力システムの状態推定に適用し、電力網の情報を適切に取り入れることで、より高精度な推定を実現した。本研究の成果は、状態推定問題に限らず電力システム分野の重要課題であるセンサ配置問題やセキュリティリスク検知などにも応用可能な技術である。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we addressed signal processing methods in the presence of network uncertainties, such as power systems and transportation networks. We investigated and developed methods for graph filter transition, time-varying graph signal restoration, and graph signal sampling, which are important issues in the field of graph signal processing. We applied the developed methods to state estimation of power systems and time-frequency analysis of acoustic signals, and demonstrated that they demonstrated superior performance compared to conventional methods.

研究分野：グラフ信号処理

キーワード：グラフ信号処理 グラフフィルタ 電力系統 状態推定 グラフ信号復元

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。

## 1. 研究開始当初の背景

IoT 技術の発展により、センサが小型化し安価になったことで、大量かつ多種多様なデータを取得することが容易となった。大規模なセンサデータから特徴抽出・知識発見は、IoT、バイオインフォマティクス、センサネットワーク、スマートグリッド等広範な分野で必要な技術であり、そのための基盤技術となるパターン認識・異常検知・可視化手法が求められている。IoT センサにより取得されたデータは時間的・空間的に広がり不均一な構造を持つ。従来の信号処理技術は、音や画像データのような信号が均一に並んでいることを想定しており、不均一な信号に対して適用不可能である。そこで、この不均一で複雑な構造を持つデータの解析手段としてグラフ信号処理に注目が集まっている。グラフ信号処理は信号間の「繋がり・関係性」のネットワーク構造に着目した信号処理技術である。このネットワーク構造はグラフにより数理的に表現可能である。グラフ信号処理はグラフの頂点上に配置された信号に対し、周波数解析・フィルタリング・サンプリング等のデータ解析基盤を提供しており、科学・工学分野への応用に関して多くの成果をあげている。

これまでグラフ信号処理分野では、グラフが所与として理論構築が進んでいる。しかし、実応用ではグラフが完全に既知である場合は少なく、グラフが未知あるいはグラフに対する信頼性が低い場合は多い。例えば、地理空間データでは観測地点の位置情報は与えられるが、観測地点間の関係性を表すグラフが明に与えられることはない。このようなデータの場合、位置情報や観測信号から観測地点の隣接関係を捉えたグラフを学習し解析を行うことが常道である。しかし、グラフ学習は不良設定問題であり、学習の際に必要なハイパーパラメータの選択の難しさから、常に信頼度の高いグラフを学習できるとは限らない。今後、Society 5.0 の実現に向けたサイバーフィジカルシステムの社会実装に伴い、より複雑な構造をもつデータの活用が求められる。そこで、信頼度の低いグラフ、つまり不確実性をもつグラフ上の信号処理技術の理論構築および革新的アルゴリズムの開発が必要不可欠であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下であった。

1. 不確実性を持つネットワーク上の信号情報処理の理論構築  
本研究課題の「信号間の関係性を表すグラフが不確実性を内包する場合、どのように信号処理を行うべきか？」という本質的な問いに対し、理論及び応用の両方で解決を目指す。具体的には、不確実性をもつグラフ上の信号のフィルタリング・サンプリング・信号復元の理論構築を目指す。
2. さまざまな実問題への応用  
不確実性をもつグラフ上の信号処理技術の発展を推し進めるにあたり、実データに対し統一的なフレームワークを利用して有効性を示す必要がある。そこで、電力システムの状態推定への応用を目指す。分散型システムに基づく電力システムでは、グラフが未知あるいは信頼できない場合がある。その問題に対応した状態推定手法の構築を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず不確実性をもつネットワーク上の信号処理の理論構築を行った。2022 年度にはグラフフィルタ転移と時間的に変動するグラフ（時変グラフ）上の信号復元問題に取り組んだ。グラフフィルタ転移の研究により、どのような条件下で、異なるグラフ上で学習されたフィルタを別のグラフへ転移可能であることを明らかにした。また、時変グラフ上の信号復元においては、凸最適化と深層学習を組み合わせた手法である深層展開を活用し、グラフが時間変動する条件下でも高精度な信号復元に成功した。2023 年度には実問題への応用に取り組んだ。具体的には、音響信号に対するスパース時間周波数表現に関する研究と、電力システムの状態推定に取り組んだ。

## 4. 研究成果

本研究における成果を以下にまとめる。

- (1) 確率密度比に基づくグラフフィルタ転移：グラフ信号の復元問題はグラフ信号処理の重要な課題の一つである。この問題の主流な手法の一つにグラフウィナーフィルタがある。これは学習データを利用しグラフフィルタを設計しグラフ信号復元を行うものである。しかし、この手法では学習データのグラフ構造からグラフが変化した場合に対応できないという問題がある。そこでグラフ構造の変化に対応したグラフフィルタ転移手法を提案した。提案手法はグラフが変化した場合であっても、高精度にグラフ信号を復元可能なフィルタを設計することに成功した。

(2) グラフ深層展開に基づく時変グラフ信号の復元：時間変化するグラフ、いわゆる時変グラフ上の信号復元手法を提案した。提案手法では、時間領域、および空間領域において信号が滑らかに変化するという先見情報を利用した最適化問題を定式化した。さらに深層学習と最適化アルゴリズムを組み合わせた技術である深層展開（図 1 参照）を用い、最適化アルゴリズムの解釈性の高さを維持したまま、精度よく時変グラフ上の信号を復元することに成功した。

(3) グラフ信号処理のスパース時間周波数表現への応用：スパース時間周波数解析は音響信号を詳細に解析する手段であり、広く知られている手法のひとつに再割り当て法がある。この手法はスペクトログラムの各成分を重心位置に再割り当てすることにより、スパースな表現を得ることを可能にしているが、重心位置計算に由来するノイズがしばしば問題となる。このノイズを時間周波数表現の構造を考慮しながらグラフフィルタで補正する手法を提案した。

(4) ネットワークの変化にロバストなサンプリング手法の開発：これまで、グラフ信号のサンプリングに関する研究は最適な頂点選択について焦点が当たっていたが、この方法では不確実性をもつネットワーク上の信号に対して頑健にサンプリングできない。そこで、最良線形不偏推定量に基づく集約型のサンプリング手法を開発した。

研究成果は国内学会や信号処理分野のトップ会議である ICASSP で発表した。上記テーマ以外にも電力システムの状態推定についても一定の成果を挙げており、2024 年度に学会発表することを予定している。

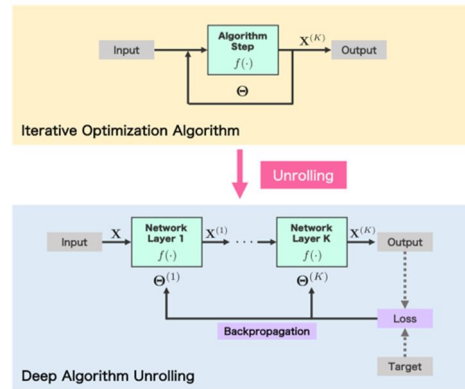


図 1 提案した深層展開アルゴリズム

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 山田 宏樹、田中 雄一	4 . 巻 62
2 . 論文標題 グラフ信号処理における数理モデリングと深層学習の融合技術	5 . 発行年 2023年
3 . 雑誌名 計測と制御	6 . 最初と最後の頁 751 ~ 756
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.62.751	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 0件 / うち国際学会 1件）

1 . 発表者名 山田宏樹
2 . 発表標題 確率密度比に基づくグラフフィルタ転移
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 Hayate Kojima
2 . 発表標題 RESTORATION OF TIME-VARYING GRAPH SIGNALS USING DEEP ALGORITHM UNROLLING
3 . 学会等名 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 山田宏樹
2 . 発表標題 グラフ学習の基礎と応用
3 . 学会等名 信号処理研究会 2023年8月（招待講演）
4 . 発表年 2023年

1．発表者名 山田宏樹
2．発表標題 グラフフィルタを用いたスペクトログラムの再割り当て
3．学会等名 2023年秋季音響学会
4．発表年 2023年

1．発表者名 福井健心
2．発表標題 最良線形不偏推定量に基づくグラフ信号の集約サンプリング
3．学会等名 2023年電子情報通信学会ソサエティ大会
4．発表年 2023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
---------	---------