

研究報告書

「ネットワーク上の信号情報処理: 感染や災害の拡大を最小限に抑えるための基盤技術」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016年12月～2020年3月

研究者: 田中 雄一

1. 研究のねらい

高速フーリエ変換(FFT)をはじめとした時間—周波数変換は、長い間データ解析ツールとして中心的な存在であった。FFT等の信号処理技術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。一方、現在までの(デジタル)信号処理では「物理的に近い位置にある信号には近いインデックスが与えられている」という一つの大きな仮定が存在する。例えば音声等の時系列信号は強くこの仮定に従うし、画像等の多次元信号も、一般には格子点上に信号が配置される。信号処理がデータ解析ツールとして有用であったのは、従来の信号では、この仮定が(ある程度)成り立っていたからに他ならない。

一方、センサネットワーク、ソーシャルネットワーク、神経網、交通網等の広い意味でのネットワーク上に存在する大規模データ(信号)——ビッグデータ——は複雑な構造を持つため、前述した仮定が普通成り立たない。すなわち、従来利用されてきた信号処理技術・ツールを用いてこれらのビッグデータを解析することは非常に困難である。結果として、現在までのビッグデータ解析には、信号処理分野からの貢献が非常に小さかった。

本研究では、「安心・安全」な社会システムの実現を出口に見据え、信号情報処理の基盤技術の研究を進展させることをねらいとした。特に、我々の周りに存在する無数のセンサデータを有効に活用するために、信号処理の立場からセンサビッグデータ解析の基盤技術の提案を目指す。具体的には、ユーザやセンサ等の関わり・繋がりをネットワークとして考え、そのネットワーク上で信号処理(データ解析)を行う、グラフ信号処理及び関連研究分野の発展を中心として研究を行った。

さきがけ研究で取り組んだ主な研究項目は以下の通りである。

1. 不均一なグラフ上のデータをサンプリングするための理論とアルゴリズム
2. 劣化したグラフ上のデータを復元するためのアルゴリズム
3. データからネットワーク(グラフ)を推定する手法
4. グラフ信号処理の実データへの応用

2. 研究成果

(1) 概要

グラフサンプリング定理を利用し、高速にグラフの部分頂点を選択するアルゴリズムに関して成果を挙げた(論文発表 1)。本アルゴリズムはグラフを行列で表した隣接行列・グラフラプラシアンなどの変分作用素の固有値分解を必要としないため、従来手法と比較して数十倍～数千倍高速に部分頂点を選択することができる。また、理論面においては、提案した評価関

数が多いの従来手法を特別な場合として含むことを明らかにした。さらに、グラフ信号処理のためのグラフ周波数領域におけるサンプリング手法を提案した(論文発表 4)。本サンプリングは従来の頂点領域における手法と根本的に異なるパラダイムであり、従来手法に内在する数多くの問題点を解決した。

劣化したグラフ上のデータを復元するアルゴリズムでは、2 種のアプローチを主に用いた。1 点目はグラフ上でデータ(信号)を帯域ごとに分割する、グラフウェーブレット・フィルタバンクを用いたアプローチである(論文発表 3)。ノイズ除去やぼけ除去に関して、従来手法と比較して大きな性能向上を果たした。2 点目は繰り返し処理に基づくアプローチである(論文発表 2)。特に凸最適化の反復アルゴリズムを拡張した Plug-and-Play アルゴリズムを利用し、現実的な計算時間で 10 万頂点を超えるグラフ上のデータを復元する手法を実現した。

グラフ信号処理は、信号だけでなくその背後に存在するグラフもデータ解析に必要であるが、グラフが与えられていない場合も数多くある。そのため、データの集合からグラフを推定する問題にも取り組んだ。特にネットワークが時間的に変動する時変グラフの推定に対し、従来手法と比較してよりネットワークがスパースになるよう定式化を行うことで、非常に精度よくグラフ推定ができることを明らかにした。

本研究の実データ解析への応用にも取り組み、成果を上げた(未公開)。

(2) 詳細

上記研究項目ごとの概要は以下の通りである。

1. 不均一なグラフ上のデータをサンプリングするための理論とアルゴリズム

グラフサンプリング定理は、時間領域のデータに対する(Shannon の)サンプリング定理のグラフ上データへの拡張として捉えられる。その本質は「グラフ上で滑らかに変動するデータを、その部分集合からいかに忠実に復元できるか」である。グラフ上のデータは通常の信号と異なり不規則な構造を持つため、サンプリング処理自体に任意性がある。本研究で取り組んだ問題は、

- ・ 様々なグラフサンプリング定理を、統一したフレームワークで記述することが可能か？
- ・ 多数の頂点を持つグラフから、その適切な(=データを高精度で復元できる)部分頂点を高速に選択する手法はどのようなものか？

の 2 点を中心である。

本項目では、グラフ局所性作用素を用いることで上記の問題に取り組んだ。グラフ局所性作用素は、各頂点とその近傍頂点上に局所的に存在する「フィルタ」であり、頂点領域・グラフ周波数領域双方で応答が局所化していることに特徴がある。サンプリングしたデータからの他の頂点上のデータの復元は、この局所性作用素によって行わ

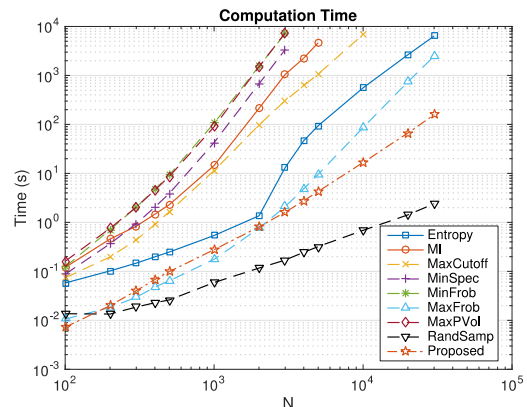


図 1 頂点選択の計算時間の比較。横軸はグラフの頂点数、縦軸は計算時間。両軸とも対数スケール。提案手法を赤色で示した。黒色は乱択による選択手法(信号復元精度が低い)。

れる。すなわち、一般の信号処理と同様の考え方で補間が行われることになる。サンプリング点選択は、直感的には局所性作用素ができるだけ重ならないような部分頂点集合を求める問題として定式化できる。さらに、局所性作用素は固有値分解を必要としないアルゴリズムを利用して実装できるため、従来手法で課題であった計算量の大きさを克服することができる。

従来のサンプリング頂点選択アルゴリズムは、行列値関数の最小化・最大化に基づいている(どのような行列を使うか、どのような関数にするか、等が手法によって異なる)。本研究では、従来手法で用いられている様々な行列が局所性作用素として表現でき、さらに、多くの行列値関数が局所性作用素を利用した評価関数の特別な場合として表現できることを明らかにした。

実際の頂点選択アルゴリズムをシミュレーションデータにより比較した従来手法と比較した。計算時間を図1に示す。図からわかるように、数十倍～数千倍高速に部分頂点を選択することが可能となった。

本成果は信号処理分野の権威ある論文誌である IEEE Transactions on Signal Processing へ掲載された(論文発表1)。

上記で述べたサンプリングは頂点の部分集合を選択する手法であり、従来の信号処理における時間領域でのサンプリングに相当する。時間領域でのサンプリングは周波数領域(フーリエ領域)で等価な表現が可能であることが昔から知られており、それを利用した様々なマルチレートシステムや信号処理アルゴリズムの提案や、解析手法が考案されてきた。一方で、グラフ信号処理システムは基本的にシフト不変性を持たないため、従来の信号処理のようにグラフ周波数領域で頂点領域のサンプリングを表現することは一般に不可能である。

本項目ではその欠点を逆に利用し、グラフ周波数領域でのサンプリングを新たに提案した。グラフ信号のサンプリングを周波数領域で定義することにより、1) シフト不変空間でのサンプリング(通常のサンプリング)と同様の処理をグラフ信号処理でも実現できる、2) 原信号の周波数特性をサンプリング後も引き継ぐことができる、等の利点がある。さらに、特別な場合において、頂点領域とグラフ周波数領域でのサンプリングが一致することを明らかにした。

本成果は信号処理分野の権威ある論文誌である IEEE Transactions on Signal Processing へ掲載された(論文発表4)。

2. 劣化したグラフ上のデータを復元するためのアルゴリズム

グラフ上データは、通常の信号と同様に 1) ノイズ, 2) 欠損, 3) ぼけ, などの劣化過程が考えられる。本研究では、画像処理における修復手法にもとづき、これをグラフ上データのために拡張した。

画像処理では、信号を帯域ごとに分割し、それぞれの帯域(サブバンドと呼ばれる)ごとに別々の処理(例えば、閾値を変えた処理)を実行する処理が行われることが多い。そのために必要なのがグラフ上データを帯域ごとに分割するグラフウェーブレット・フィルタバンクであり、特に上記周波数領域でのサンプリングを利用したフィルタバンクを新たに設計し、これをノイズ除去へ応用した。ランダムセンサグラフ上のデータのノイズ除去結果を表

1 に示す. ほとんどの場合で提案手法が優れた性能を示すことがわかる.

本成果は信号処理分野の権威ある論文誌である IEEE Transactions on Signal Processing へ掲載された(論文発表 3).

表 1 グラフ上データのノイズ除去結果. ノイズは加法性白色ガウシアンノイズ. Graph-SS が提案手法.

Methods / Graphs	Random sensor			Swiss roll			Community			
	σ	1/16	1/8	1/4	1/16	1/8	1/4	1/16	1/8	1/4
GraphQMF	11.61	7.80	3.81	9.96	5.73	2.67	10.43	5.89	1.23	
GraphBior	11.70	7.82	3.70	10.03	5.73	2.60	10.33	5.93	1.20	
GraphFC	11.69	7.85	3.82	9.88	5.65	2.70	10.50	5.91	0.96	
DiffWav	4.18	3.26	2.25	1.60	1.00	0.19	1.77	1.08	0.08	
SubGFB	11.23	6.82	2.42	10.18	5.97	1.71	14.71	9.83	2.65	
GLP	8.36	5.69	3.73	9.73	5.51	1.71	7.67	4.85	1.69	
GraphSS-O(N)	11.22	7.75	4.51	9.26	5.91	3.16	7.30	2.77	-0.42	
GraphSS-O(C)	12.87	10.32	6.28	11.98	7.78	3.76	12.39	7.58	1.81	
GraphSS-B(N)	11.20	7.75	4.52	9.29	5.89	3.06	7.25	2.82	-0.48	
GraphSS-B(C)	13.93	10.78	6.32	12.08	7.87	3.75	12.06	7.33	1.69	
GraphSS-I(N)	11.22	7.68	4.46	9.43	5.90	3.10	7.33	2.81	-0.43	
GraphSS-I(C)	11.74	9.32	5.76	11.56	7.68	3.65	13.05	8.02	2.03	
Noisy	13.33	7.34	1.39	11.85	5.83	-0.15	10.10	4.09	-2.00	

さらに, Plug-and-Play アルゴリズムと呼ばれる繰り返し処理をグラフ信号処理のために利用可能とした. Plug-and-Play アルゴリズムは凸最適化の繰り返し処理の一部を任意のノイズ除去手法に差し替えることにより構成される信号の復元アルゴリズムである. 全体の問題としては(一般に)凸でなくなってしまう一方で, 実装的には優れた性能を示すことが知られている. 本研究はこの Plug-and-Play アルゴリズムを世界で初めてグラフ上データのために利用可能とした. さらに, 特別な場合において, 本アルゴリズムを用いたデータの補間がグラフサンプリング定理の一種を用いた場合と等価となることを明らかにした. 従来手法が 1 万頂点以下でメモリ不足になってしまう一方で, 提案手法は固有値分解不要なアルゴリズムとして実装することで 10 万頂点程度まで安定して動作可能であり, 実応用のためには非常に大きなアドバンテージとなる. 本成果は信号処理分野の著名な国際会議である ICASSP 2019 に論文が採録された(論文発表 2).

3. データからネットワーク(グラフ)を推定する手法

グラフ信号処理手法を用いるためには, 当然ではあるがデータサンプル間の関係を表すグラフが事前に必要である. 一方で, 環境センサデータや点群などではグラフが明に与えられていない場合が多い. さらに, 格子点上に存在するデータ(例えば画像)においても, サンプル間の関係をグラフとして表現できれば, そのデータに対する理解度が格段に深まる.

本項目では, 特に時系列データに着目し, 空間的ネットワークが時間的に変動する時変グラフの推定に取り組んだ. 従来まで行われてきたほとんどのグラフ推定アルゴリズムは時間の変動を考慮しない静的なグラフの推定問題であったため, 時変グラフ推定のために新たな評価関数を考案した. 特にネットワークの時間的変化がスパースになるような制約項をもとに, 凸最適化問題を解くことで, 時変グラフ推定を達成した. 本成果は信号処理分野の著名な国際会議である ICASSP 2019 に論文が採録された.

4. グラフ信号処理の実データへの応用

本研究においては理論やアルゴリズムを実データへ手法を応用することも重要である。様々な実データが候補として考えられるが、基本的には非公開データが主である。例えば公開データに対する応用として画像処理や点群処理が考えられる。本項目では画像処理に関して述べる。

画像処理の前処理として広く用いられているのが、バイラテラルフィルタ等を利用したエッジ保存型平滑化である。一般にはエッジ保存型平滑化ではフィルタ係数を自身と周辺の画素値から決定する。つまりフィルタ係数が画素位置に依存する。そのため、通常の意味での周波数解析は困難であった。上述のようにグラフ信号処理はシフト不変性を持たない処理に対し周波数的解釈を与えることが可能であるため、画素依存型の画像処理に対してグラフ周波数領域の処理として表現することが可能となり、画像処理に対する理解度が飛躍的に高まった。

本成果の一部は総説論文として Proceedings of IEEE へ掲載された(発表論文 5)。

3. 今後の展開

本さがけ研究で得られた成果は、グラフ信号処理基礎理論の広い範囲に渡る。本研究開始前は黎明期にあったグラフ信号処理が、基礎理論の充実により徐々に成熟期に入ってきたと考えられる(一方で国内では我々がほとんど唯一の研究グループである)。今後は、基礎理論の発展とともに、実際の社会システムの応用に向けてより一層力を入れて取り組み、信号処理のみならずより広い分野へと成果を波及することを狙う。

具体的には、IoT を含めた広い意味でのセンサネットワーク・生体情報処理・自動運転などに利用される点群データのリアルタイム分類等を見据え、研究を展開していく。

4. 自己評価

当初申請時より一部の研究目的が変遷したものの、大きな目標として掲げていたグラフ信号処理の基盤理論構築に関して大きな進展が得られた。海外との共同研究も順調に進展し、共著論文も多数発表することができた。基礎理論よりの成果であるため社会への普及には時間がかかるが、その端緒としての成果も得られたと考えている。今後は自分自身だけでなく、本さがけで得られた人的ネットワークも利用して社会実装を目指しチームとしての共同研究を開始したいと考えている。

自己評価としては当初考えていた以上の成果が挙げられた。さらに、今後の展開・発展も見込めると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. A. Sakiyama, Y. Tanaka, T. Tanaka, and A. Ortega, "Eigendecomposition-free sampling set selection for graph signals," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 67, no. 10, pp. 2679-2692, 2019.

2. Y. Yazaki, Y. Tanaka, and S. H. Chan, "Interpolation and denoising of graph signals using plug-and-play ADMM," in Proc. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP), 2019,

pp. 5431–5435.
3. A. Sakiyama, K. Watanabe, Y. Tanaka, and A. Ortega, “Two-channel critically-sampled graph filter banks with spectral domain sampling,” IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 67, no. 6, pp. 1447–1460, 2019.
4. Y. Tanaka, “Spectral domain sampling of graph signals,” IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 66, no. 14, pp. 3752–3767, 2018.
5. G. Cheung, E. Magli, Y. Tanaka, and M. Ng, “Graph spectral image processing,” Proceedings of the IEEE, vol. 106, no. 5, pp. 907–930, 2018.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. (ブックチャプター) Y. Tanaka and A. Sakiyama, “Oversampled transforms for graph signals,” in Vertex-Frequency Analysis of Graph Signals, L. Stanković and E. Sejdić, Ed., Springer, 2019.
2. (チュートリアル講演)田中雄一, グラフ信号処理～基礎から応用まで～, 第22回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2019), 大阪, 2019年7月
3. (招待講演)田中雄一, “ネットワーク上のデータの周波数解析: グラフ信号処理とその応用”, 電子情報通信学会総合大会, 東京, 2018年3月
4. (招待講演)田中雄一, “グラフ信号処理の基礎理論と最近の成果”, 第40回情報理論とその応用シンポジウム, 新潟, 2017年11月
5. (Tutorial Talk) Y. Tanaka, “Graph wavelets and filter banks: Designs in graph spectral domain,” Graph Signal Processing Workshop 2017, Pittsburgh, PA, May 2017.