

# グラフ信号処理によるセンサーネットワークデータ解析手法の研究開発 (142103007)

Sensor Network Data Analysis with Graph Signal Processing

## 研究代表者

田中雄一 東京農工大学

Yuichi Tanaka Tokyo University of Agriculture and Technology

## 研究分担者

田中聡久<sup>†</sup>

Toshihisa Tanaka<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東京農工大学

<sup>†</sup>Tokyo University of Agriculture and Technology

研究期間 平成 26 年度～平成 28 年度

## 概要

グラフ信号処理の体系化として、1) グラフ信号のためのウェーブレット・フィルタバンクの設計、2) グラフ信号のオーバーサンプリング、3) グラフ信号のノイズ除去、4) 動的ネットワーク上の信号に対する多重解像度変換手法の実現に対して研究を行った。シミュレーションデータにおいて、本研究開発で得られた成果は従来手法を大きく上回る性能を発揮した。さらに、多チャンネル脳波のデコーディングに対し、グラフフーリエ領域での制約をもうけることにより性能向上を図った。結果として公開データセットと実際に計測したデータセット双方において手法の有効性が示された。また、実際に環境データ取得可能なセンサーの設計と組み立てを行い、上述の手法を用いて解析を行った。センサーネットワークデータの取得のために非常に重要であるセンサー配置問題に対しても研究を行った。グラフ周波数領域での信号の振る舞いを考えることにより、従来の機械学習手法より最大で 100 倍程度性能高速に最適なセンサー位置を選択可能であることが示された。

## 1. まえがき

本研究開発では、センサーネットワークに着目し、センシングノイズ除去およびセンサー配置問題に対する技術課題を明確化することを目的とした。センサーデータとして、脳波データやスマートフォンセンサーから得られた環境データなどを利用し、シミュレーション及びプロトタイプ実験から本研究開発の有効性を示した。センサーデータは高次元かつ複雑な構造を持つデータであるため、信号処理における最新の研究分野であるグラフ信号処理を用いてデータの解析を行った。本研究開発では、グラフ信号処理の基礎理論の構築に関しても積極的に研究を進めた。

## 2. 研究開発内容及び成果

### 2. 1. グラフ信号処理の体系化、応用に即した理論の発展

グラフ信号処理の理論的発展のため、1) グラフ信号のためのウェーブレット・フィルタバンクの設計、2) グラフ信号のオーバーサンプリング、3) グラフ信号のノイズ除去、4) 動的ネットワーク上の信号に対する多重解像度変換手法の実現、に関して研究を行った。

時系列信号等を対象にした従来の信号処理において、フィルタバンクが広く利用されている。フィルタバンクとはフィルタの集合であり、一般には低域通過フィルタ・帯域通過フィルタ・高域通過フィルタの組み合わせで構成される。JPEG 等で用いられている離散コサイン変換(DCT)や離散ウェーブレット変換も代表的なフィルタバンクの例として挙げられる。

本研究開発で対象としているグラフ信号処理は、より複雑な構造を持つ信号を対象にしており、周波数自体の定義も通常の信号処理と異なる。そのため、グラフ信号処理のためのウェーブレット・フィルタバンクを設計するための理論的枠組みを新たに提案する必要がある。

現在までに提案されていた手法はいくつかの特性を満たしていないか、満たしていたとしてもグラフ信号処理のためにフィルタを逐一設計する必要があった。一方、上述の特性を満たすように通常の信号処理でのフィルタバンクをグラフ信号処理のために変換できれば、DCT 等の「良い」特性を持つフィルタバンクがグラフ信号処理でも自然に実現できると言える。そのため、本研究開発においては、従来の信号処理でのフィルタバンクをグラフ信号処理でのそれへ変換するための研究を行った。

結果として、通常のフィルタのインパルス応答を離散時間フーリエ変換した周波数特性に対し、変調と変数変換を行うことによって性質の良いグラフフィルタへと変換できることを理論的に示した。

グラフ信号に限らず、一般の信号のノイズ除去では、原信号と平滑化後の信号の平均二乗誤差を最小化することを目的としている。普通、過剰な平滑化を防ぐために、目的関数に正則化項と呼ばれる項を加算し、二乗誤差項と正則化項の和を最小化する手法がよく用いられる。正則化項の重み——すなわちどの程度信号を平滑化するか——は任意のパラメータによって決定される。本研究開発では、

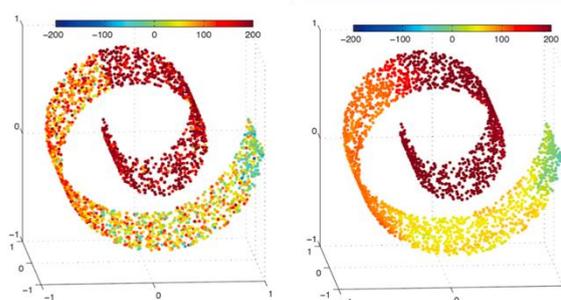


図 1 グラフ信号のノイズ除去 (左: ノイズ混入信号, 右: 提案手法によるノイズ除去信号) [Onuki et al., IEEE TSIPN 2016]

グラフ信号のノイズ除去のために、任意パラメータの最適値を理論的に求める手法について検討を行った。結果として、少ない回数の繰り返し処理で最適値が導出可能な手法を実現した。画像をグラフ信号とみなして行った平滑化処理においては、従来広く用いられている *bilateral filter* 等と比較し、大きな性能の向上を得た。グラフ信号のノイズ除去シミュレーションの結果を図 1 に示す。

## 2. 2. 多チャンネル脳波のデコーディング

実応用の観点から、本研究開発においては、事象関連電位 (ERP) と呼ばれる脳の反応を、頭皮脳波 (EEG) から効率的に抽出するアルゴリズムを構築した。一般に、EEG は頭皮上にまんべんなく配置した電極センサーにより取得した多変量 (多チャンネル) 信号であるため、データは時間×チャンネルのように多次元信号で表現できる。センサーの位置をグラフの頂点とみなすことで、ある瞬間においてはグラフ信号とみなすことができる。センサー同士の重みを距離や統計的性質を用いて定義することで、グラフ構造を定義できる。頭皮上の電極に導入したグラフ構造を図 2 に示す。

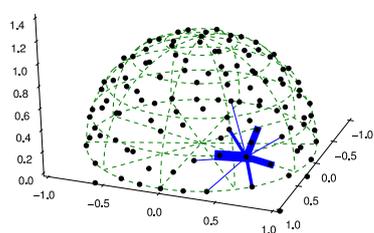


図 2 頭皮上の電極に導入したグラフ構造

実際に測定できる EEG は、信号対雑音比 (SNR) が極端に低い信号である。その一方で、本研究で検出したい ERP は緩やかに変動する単一信号源からの成分である。そこで、EEG が ERP に対して持つ冗長性に着目し、グラフから決まる部分空間に制限することで、高能率の ERP 検出アルゴリズムを構築することに成功した。この手法を、3 種類のデータセットで ERP 検出に適用したところ、全てのデータセットで平均的に検出精度が向上した。

データセットでの実験に加えて、運動を想像している最中の脳波を用いて、グラフフーリエ変換の有効性を確認する実験を実施した。脳波は通常、複数のセンタを頭皮上に配置して、その時系列信号として記録する。測定される電気信号の電圧は数  $\mu\text{V}$ ~数十  $\mu\text{V}$  にわたる微弱なものであるため、測定した信号にはしばしばノイズが含まれており、これを効率的に除去することが重要である。また多チャンネルであるという性質をうまく利用することで、効率的な次元削減と特徴抽出を実施できる。

提案したアルゴリズムを計算機に実装し、BCI Competition Dataset IVa とよばれる公開データおよび、農工大の田中研究室で測定した脳波 (Dataset JK-HH 1) を用いて識別分類実験を実施した。脳波の測定には、「東京農工大学 ヒトに関する研究倫理委員会」の承認を得た。実験結果より、学習データ数を 5% 以下に削減した場合でも、識別率の低下は被験者平均で 10~20% 程度、被験者によっては、4~5% 程度ということであり、提案手法の有効性が示された。

## 2. 3. センサー配置問題におけるグラフ信号処理を用いた定式化

センサー配置問題に対し、グラフ信号処理の観点から解

析を行った。センサー配置問題は、本研究開発で目的としているセンサーネットワークのみならず、電力システム (スマートグリッド) や機械学習などで活発に研究されている。より一般化された定式化のために、ある応用に特別な手法ではなく、一般的なセンサー配置問題を考えた。

本研究開発で考えたのは、グラフ信号処理に基づくコスト関数である。機械学習で用いられる代表的なコスト関数として、エントロピーに基づくコスト関数と、相互情報量に基づくコスト関数が広く知られている。これらの関数は、センシングされるデータ (信号) の空間的な特性がガウス過程に基づくと仮定した上で定式化されている。我々は、信号の復元可能性に着目し、近年グラフ信号処理で注目を集める理論である、グラフ信号のサンプリング定理 (グラフサンプリング定理) を用いてコスト関数を定式化した。

シミュレーションによる実験を行ったところ、本手法は従来手法と比較して、センサーを設置していない箇所のデータの推定性能を同等に保ちつつ、最適なセンサー配置を見つけるための計算時間を 10 倍~100 倍程度高速化できることが分かった。

## 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

研究計画書および継続提案書記載通り、産学連携を見据えた研究の提案を将来的に行うことを考えている。例えば NICT 所有のスマート ICT 基盤サービステストベッド等のセンサー群を用いて大規模な性能評価実験は候補の一つである。

本研究開発で得られた運動想像脳波のデコーディングアルゴリズムは、高密度脳波測定においても適用可能かつ、より効果的な応用であるので今後検証を重ねていく必要がある。また、本手法はクローズドループブレインマシンインタフェースと呼ばれる、脳卒中リハビリテーションの新しい手法に適用可能であるため、本研究開発で得られた成果を用いて、新たな医療・介護機器の開発につなげていくことも期待される課題である。

## 4. むすび

本研究開発では、萌芽的な研究分野であるグラフ信号処理の理論的発展と、その応用としてセンサーネットワークデータ解析に取り組んだ。シミュレーション及び小規模な実験で本研究開発の有効性を示すことができた。また、実際の産業的応用に向け、解決すべき課題を明らかにすることができた。

### 【誌上発表リスト】

- [1] Akie Sakiyama and Yuichi Tanaka, "Oversampled graph Laplacian matrix for graph filter banks", *IEEE Transactions on Signal Processing* Vol.62 No.24 pp6425-6437 (2014 年 12 月 15 日)
- [2] Masaki Onuki, Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, and Yuichi Tanaka, "Graph signal denoising via trilateral filter on graph spectral domain," *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, vol. 2, no. 2, pp. 137-148, 2016 (2016 年 6 月)
- [3] Akie Sakiyama, Kana Watanabe, and Yuichi Tanaka, "Spectral graph wavelets and filter banks with low approximation error," *IEEE Trans. on Signal and Information Processing over Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 230-245, 2016 (2016 年 9 月)