

次世代信号情報処理シリーズ 5

Next SIP series

グラフ信号処理の 基礎と応用

— ネットワーク上データのフーリエ変換, —
フィルタリング, 学習

田中聡久 監修
田中雄一 著

コロナ社

シリーズ刊行のことば

信号処理とは、音声、音響、画像、電波など、連続する数値や連続波形が意味を持つデータを加工する技術です。現代の ICT 社会・スマート社会は信号処理なしには成り立ちません。スマートフォンやタブレットなどの情報端末はコンピュータ技術と信号処理技術が見事に融合した例ですが、私たちがその存在を意識することがないほど、身の回りに浸透しています。さらには、応用数学や最適化、また統計学を基礎とする機械学習などのさまざまな分野と融合しながらさらに発展しつつあります。

もともと信号処理は回路理論から派生した電気電子工学の一分野でした。抵抗、コンデンサ、コイルを組み合わせると、特定の周波数成分を抑制できるアナログフィルタを構成できます。アナログフィルタ技術は電子回路と融合することで能動フィルタを生み出しました。そしてデジタル回路の発明とともに、フィルタもデジタル化されました。一度サンプリングすれば、任意のフィルタをソフトウェアで構成できるようになったのです。ここに「デジタル信号処理」が誕生しました。そして、高速フーリエ変換の発明によって、デジタル信号処理は加速度的に発展・普及することになったのです。

デジタル技術によって、信号処理は単なる電気電子工学の一分野ではなく、さまざまな工学・科学と融合する境界分野に成長し始めました。フィルタのソフトウェア化は、環境やデータに柔軟に適応できる適応フィルタを生み出しました。信号はバッファリングできるようになり、画像信号はバッチ処理が可能になりました。そして、線形代数や統計学を柔軟に応用することで、テレビやカメラに革命をもたらしました。もともと周波数解析を基とする音声処理技術は、ビッグデータをいち早く取り込み、人工知能の基盤技術となっています。電波伝送の一分野だった通信工学は、通信のデジタル化によって信号処理技術

なしには成り立たないうえ、現代のスマート社会を支えるインフラとなっています。このように、枚挙に暇がないほど、信号処理技術は社会における各方面での基盤となっているだけでなく、さまざまな周辺技術と柔軟に融合し新たなテクノロジーを生み出しつつあります。

また、現代テクノロジーのコアたる信号処理は、電気・電子・情報系における大学カリキュラムでは必要不可欠な科目となっています。しかしながら、大学における信号処理教育はデジタルフィルタの設計に留まり、高度に深化した現代信号処理からはほど遠い内容となっています。一方で、最新の信号処理技術、またその周辺技術を知るには、論文を読んだり、洋書にあたったりする必要があります。さらに、高度に抽象化した現代信号処理は、ときに高等数学をバックグラウンドにしており、技術者は難解な数学を学ぶ必要があります。以上のことが本分野へ参入する壁を高くしているといえましょう。

これがまさに、次世代信号情報処理シリーズ“Next SIP”を刊行するに至ったきっかけです。本シリーズは、従来の伝統的な信号処理の専門書と、先端技術に必要な専門知識の間のギャップを埋めることを目的とし、信号処理分野で先端を走る若手・中堅研究者を執筆陣に揃えています。本シリーズによって、より多くの学生・技術者に信号処理の面白みが伝わり、さらには日本から世界を変えるイノベーションが生まれる助けになれば望外の喜びです。

2019年6月

次世代信号情報処理シリーズ監修 田中聡久

ま え が き

信号処理は現代の情報化社会の礎である。我々が（自分自身が存在している）物理世界と（情報を処理する）サイバー世界とを自由に行き来できるのも、サンプリング定理をはじめとした信号処理や情報理論がその基盤として存在しているからこそである。

信号処理の理論体系はさまざまな数学・工学分野の研究を巻き込みながら螺旋的に発展を続けている。特に重要なのが適用範囲の拡大であろう。もともと時系列データを対象としていた信号処理であるが、画像などの空間上のデータ、さらにより高次元のデータへと、信号処理技術を利用することができる領域は拡大を続けている。ニューラルネットワークをはじめとした機械学習・AI技術にも信号処理技術は広く用いられている[†]。

従来のデジタル信号処理は信号の「構造」がサンプリング周波数で自動的に決められていた（あるいは、自動的に決められると仮定していた）。これは物理的なデータをA-D変換器でセンシングするという性質上、ある意味当然であった。この場合、デジタル信号の信号値は等間隔で整列していることになる。

一方で、信号が必ずしも整列しておらず、空間上に複雑・非均一に分布するデータを解析する需要が近年増加している。このような複雑な構造を持つデータは、しばしば信号値間の関係がネットワークとして与えられる場合がある。ネットワークの代表的な例は、社会的ネットワークや脳ネットワークである。このようなネットワーク上に存在する信号の場合、信号値（上述の例ではユーザや電極）の間関係は均一でないことが多い（ソーシャルネットワーキングサービスでのフォロワーの数がよい例である）。このようなネットワーク上のデータを解析するために必要な信号処理技術は果たしてどのようなものだろうか。

[†] 畳込みニューラルネットワークが代表的である。

本書でテーマとするグラフ信号処理は、信号の定義域をネットワーク（グラフ）の頂点上に持つ信号（グラフ信号）を解析するための信号処理技術の一群を指す。グラフ信号処理は上述した応用に対する需要のみならず、その理論的な面白さも手伝って、近年大きく発展している信号処理のホット・トピックである。特にグラフ信号処理が興味の対象とするのは、グラフフーリエ変換を中心としたネットワーク上データの周波数解析技術である。また、フィルタリングやサンプリングなど、通常の信号処理ではすでに大部分が完成されている理論体系も、ネットワーク上の信号のために再構築する必要がある。

我々はデータ（信号）の何を知っていて、何を知らないのか。そしてそのデータから何を得たいのか。わかっていることとわかっていないことを知り、それを利用してデータを眺めるのが信号処理だけでなく工学や数学の基本的な思想である。誤解を恐れずいえば、グラフ信号処理は信号処理を再定義する試みの一環である。

本書はグラフ信号処理の基礎とその応用に関する初めての和書である。本書は全8章から構成される。まず第1章ではすべての基礎となるグラフに関して説明する。第2章ではグラフ信号と、本書を通じて利用するグラフフーリエ変換に関して述べる。第3章から第5章まではグラフ信号処理の基盤技術を説明している。グラフ信号のフィルタリングをまず第3章で述べた後、サンプリングを第4章で説明する。また、グラフ信号の不確定性やシフト・変調などは第5章で解説している。以降の章は上述の基盤技術を利用した発展的な技術である。第6章ではフィルタリングとサンプリングを組み合わせたグラフウェーブレット・フィルタバンクを、また、第7章ではグラフ信号の多スケール解析に関して述べる。グラフ信号処理ではデータ解析のためにグラフが必要である。一方、必ずしもグラフが事前に与えられるとは限らない。本書の最後の章として、第8章でグラフの推定や学習手法に関して説明する。原則として、各章の最後に応用に関して記した。

基礎的な知識のある電気・電子・情報系の大学学部生が理解できるよう、本書を通じてできるだけ正確に、基本的な事項から記述するよう心がけた。一方

で、本書で扱うには技術的・理論的に複雑すぎる事項は思い切って簡略化した。また、発展的事項を学習できるようにするため、引用・参考文献を多く記載するようにした。グラフ信号処理はいまだ発展を続けている。本書を通じてグラフ信号処理の基礎や応用に興味を持ってもらえたら望外の喜びである。

本書を執筆する機会を与えてくださり、また初稿に対して有益なコメントをいただきました「次世代信号情報処理シリーズ」監修の東京農工大学 田中聡久先生に厚く御礼申し上げます。また、Meta 前原貴憲さま、東京工業大学 小野峻佑先生、東京理科大学 山田宏樹先生をはじめとして、さまざまな方から有益なコメントをいただきました。ありがとうございます。筆者の研究室の学生や秘書の皆さまにも校正（添字のミスが多かったです！）や図の作成に協力してもらいました。大変助かりました。特に原惇也さん、横田陽樹さんには多くの図を作成してもらいました。本書の完成を辛抱強く待ってくださったコロナ社にも心より感謝申し上げます。

最後に、本書の執筆を陰ながら支えてくれた家族へ：ありがとう！

2022年11月

田中雄一

目 次

1. グラフ

1.1	さまざまなグラフ	1
1.2	グラフ作用素	9
1.2.1	隣接行列	9
1.2.2	接続行列	11
1.2.3	度数行列	13
1.2.4	グラフラプラシアン	13
	章末問題	16

2. グラフ信号とグラフフーリエ変換

2.1	デジタル信号	17
2.2	グラフ信号	20
2.3	グラフのスペクトル：グラフ作用素の固有値と固有ベクトル	23
2.3.1	信号の変動	24
2.3.2	ラプラシアン2次形式	24
2.3.3	グラフのスペクトル	26
2.3.4	グラフ作用素の固有ベクトル	29
2.4	グラフフーリエ変換	31
2.4.1	導入：線形辞書によるスパース変換	31
2.4.2	グラフフーリエ変換の定義	32

2.4.3	フーリエ変換との関係	35
2.4.4	DFT・DCT との関係	37
2.5	グラフ作用素の固有値・固有ベクトルの特徴	40
2.5.1	隣接行列のスペクトル	40
2.5.2	グラフラプラシアン	42
	章 末 問 題	43

3. フィルタリング

3.1	導入：離散時間信号のフィルタリング	44
3.2	頂点領域でのフィルタリング	47
3.3	グラフ周波数領域でのフィルタリング	52
3.4	頂点領域でのフィルタリングとグラフ周波数領域での フィルタリングの関係	56
3.5	多項式グラフフィルタの設計	57
3.5.1	実関数のチェビシェフ多項式近似	58
3.5.2	グラフ周波数領域フィルタのチェビシェフ多項式近似	60
3.6	応 用	64
3.6.1	適応的画像フィルタ	64
3.6.2	バイラテラルフィルタのグラフフィルタ表現	65
3.6.3	画素適応型フィルタのグラフフィルタとしての設計	67
	章 末 問 題	70

4. サンプリング

4.1	時間領域でのサンプリングと一般化サンプリング	71
4.1.1	シフト不変空間でのサンプリング	71
4.1.2	一般化サンプリング	75

4.1.3	部分空間に対する事前知識がある場合	78
4.1.4	滑らかさに対する事前知識がある場合	80
4.2	グラフ信号のサンプリングと復元	81
4.2.1	サンプリング・復元のフレームワーク	82
4.2.2	部分空間に対する事前知識がある場合	83
4.2.3	滑らかさに対する事前知識がある場合	83
4.3	グラフ信号モデル	85
4.3.1	周波数領域における生成モデル	85
4.3.2	頂点領域における生成モデル	87
4.4	グラフ信号のサンプリング手法	88
4.4.1	頂点領域でのサンプリング	88
4.4.2	グラフ周波数領域でのサンプリング	89
4.4.3	シフト不変空間との違い	92
4.5	グラフ信号のサンプリングと復元の例	95
4.6	サンプリング頂点選択手法	97
4.6.1	決定性サンプリングと乱択サンプリング	98
4.6.2	決定性サンプリングによる頂点選択	99
4.6.3	乱択サンプリングによる頂点選択	103
4.6.4	計 算 量	106
4.7	応 用	107
4.7.1	センサ配置	107
4.7.2	能動的半教師あり学習	109
4.7.3	3次元点群のサブサンプリング	110
	章 末 問 題	111

5. 局所性と不確定性

5.1	グラフ信号の不確定性 (1) : エネルギーの広がり	113
-----	----------------------------	-----

5.1.1	通常の信号処理におけるエネルギーの広がり	113
5.1.2	グラフ信号処理におけるエネルギーの広がり	114
5.1.3	実現可能領域	115
5.2	グラフ信号の不確定性 (2) : スパース性	117
5.2.1	頂点部分集合の信号エネルギー	117
5.2.2	グラフ周波数部分集合の信号エネルギー	117
5.3	グラフ信号のシフトと変調	119
5.3.1	シフト	119
5.3.2	変調	122
	章末問題	124

6. グラフウェーブレット・フィルタバンク

6.1	グラフフィルタバンクの構成	125
6.1.1	分析側変換	127
6.1.2	合成側変換	127
6.2	望まれる特性	129
6.3	特徴による分類	132
6.3.1	フィルタの設計領域	133
6.3.2	サンプリング率	133
6.3.3	対称性	134
6.4	頂点領域でのフィルタ設計	135
6.4.1	リフティング	135
6.4.2	非間引き型変換	139
6.4.3	間引き型変換	139
6.5	グラフ周波数領域でのフィルタ設計	141
6.5.1	非間引き型グラフフィルタバンク	142

6.5.2	頂点領域サンプリングを用いた最大間引き型 グラフフィルタバンク	148
6.5.3	グラフ周波数領域サンプリングを利用した グラフフィルタバンク	156
6.6	応用	159
6.6.1	グラフ信号のノイズ除去	159
6.6.2	グラフ信号の圧縮	162
	章末問題	164

7. 多スケール分解

7.1	グラフ信号の多スケール分解	165
7.2	グラフの縮小	167
7.2.1	頂点数の削減	168
7.2.2	スペクトルクラスタリング	168
7.2.3	頂点の再接続	170
7.2.4	Kron 縮小	170
7.2.5	頂点領域とグラフ周波数領域でのサンプリングの関係	174
7.3	グラフラプラシアンピラミッド	176
7.3.1	ラプラシアンピラミッド	176
7.3.2	グラフラプラシアンピラミッドの構成	178
7.4	グラフの拡大とグラフ信号のオーバーサンプリング	182
7.4.1	3彩色グラフの拡大	183
7.4.2	K 彩色グラフの拡大	185
7.5	応用	187
	章末問題	190

8. グラフの推定と学習

8.1	グラフ推定	192
8.1.1	K 近傍法	192
8.1.2	ϵ 近傍法	193
8.2	統計的モデルを利用したグラフ推定	193
8.2.1	相関係数	194
8.2.2	ガウスマルコフ確率場	195
8.3	グラフ信号の生成モデルを利用したグラフ学習	198
8.3.1	グラフ周波数領域の生成モデル	198
8.3.2	頂点領域の生成モデル	201
8.4	有向グラフの学習	204
8.4.1	スパースベクトル自己回帰モデル	204
8.4.2	構造方程式モデル	205
8.5	時変グラフ学習	205
8.6	応用	207
	章末問題	208

付 録

A.1	グラフ信号処理に役立つツールボックス	209
A.2	レイリー商	209
	引用・参考文献	212
	章末問題解答	226
	索引	233

本章では、まず導入として**グラフ** (graph) に関して簡単に説明する。本書で扱う「グラフ」は、何らかの変数間の相対的な関係性を示す数理的な構造である[†]。数学や計算機科学の分野ではグラフ理論は非常に古くから研究されており、いまなお中心的なトピックの一つである。本書ではグラフ理論の詳細な説明は巻末の他の文献1), 2) に譲り、本章では、なぜ信号処理でグラフが必要とされているのかを見ていこう。

1.1 さまざまなグラフ

グラフは**頂点** (vertex, node) と**辺** (edge) からなるデータ構造であり、頂点間の何らかの相対的な関係を表すために用いられる。本書では、頂点の数が有限である有限グラフを考える。グラフ G は頂点集合 $V = \{0, 1, \dots, N-1\}$ と辺集合 $E \subseteq V \times V$ を用いて以下で定義される。

$$G = (V, E) \quad (1.1)$$

必要があるとき、頂点数を $N = |V|$ で表す。

グラフの例を図 1.1 に示す。図では円が頂点を、実線が辺を表す。このグラフは Petersen グラフと呼ばれ、頂点数 $N = 10$ 、辺数 $|E| = 15$ である。

実際にどのようなグラフがあるかを以下で見てみよう。

[†] つまり、 $y = f(x)$ の関係を描画した、いわゆる「プロット」とは違う。

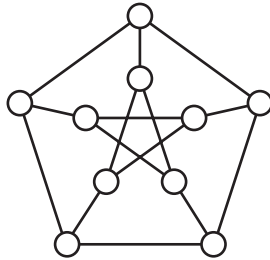


図 1.1 グラフの例

例 1.1 (交通網) 交通網は代表的な物理的ネットワークである。非常に多くの種類の交通網がグラフとして表現できる。市内の道路網を考えてみよう。道路網の例を図 1.2 に示す。例えば、交差点を頂点、道路を辺とすればグラフとして道路網が表現できそうである。辺の重み (1.2.1 項参照) は、例えば道路の幅や車線の数だろうか。道路網の中にはどこかに一方通行が存在するだろう。この場合、 n 番目の交差点から m 番目の交差点[†] に向かう辺は存在するが、逆に m 番目の交差点から n 番目の交差点へ向かう辺は存在しない。このように、辺に向きがあるグラフを**有向グラフ** (directed graph) と呼ぶ。また、有向グラフの辺を**有向辺** (directed edge) と呼ぶ。



図 1.2 交通網の例：東京都周辺の道路網
(OpenStreetMap Japan より)

[†] n 番目の交差点と m 番目の交差点の間に交差点がなく、直接つながっていると仮定している。

別の交通網として、鉄道網を考えてみよう。鉄道網の例を図 1.3 に示す¹¹。この場合、駅を頂点とし、線路を辺とすれば鉄道網のグラフが表現できそうである。辺の重みを考える場合には、列車の定員とすればよいかもしれない。通常、同じ路線の往復では同じ車両を使うし、行った列車は戻ってこないといけないから¹²、辺には方向がないと考えてもよさそうである。このように辺に方向がないグラフを**無向グラフ** (undirected graph) と呼ぶ。また、無向グラフの辺を**無向辺** (undirected edge) と呼ぶ。



図 1.3 交通網の例：鉄道網（『駅すばあと[®]』Web サービスより）

例 1.2 (動植物の構造) 人体を考えてみよう。人体は関節を支点として動くから、関節を頂点、骨を辺とすれば人体をグラフとして表現できそうである。頭は関節ではないが、頂点として追加したほうが、人体の動きを調べるためには都合がよさそうである¹³。こうすると、誰もが一度は書いたことのある「棒人間」ができあがる。また、人間に限らず、さまざまな

¹¹ 『駅すばあと』は株式会社ヴァル研究所の登録商標。

¹² 車両が違うかもしれないし、同じ型式でも仕様が異なったりするせいで定員が違うかもしれないが、簡単のためそこには目をつぶろう。「簡単のため」とは非常によい言葉である——それが適切な近似やいい換えである限り。

¹³ 不気味ではないともいう。

4 1. グラフ

動物の構造もグラフとして表現できそうである。大部分では尻尾も必要そうである。身体の構造は無向グラフとして表現するのが妥当であろうか。

また、人体全体をグラフとして表現しなくてもよい。例えば顔を見てみよう。表情は皮膚の下にある筋肉の動きで作られるので、適切に選択した顔面の特徴点を頂点とし、その頂点を筋肉の流れに沿って接続すれば顔面の動きを表現するグラフができるかもしれない。

例 1.3 (脳神経網) よく知られているように、脳内の情報伝達は神経細胞（ニューロン）の間で電気信号が流れることによって行われる。そこで、ニューロンを頂点、軸索を辺とすれば脳神経網がグラフとして表現できそうである。さらに、もう少しマクロな脳内の情報伝達を考えてみよう。大脳の半球には、前頭葉、頭頂葉、側頭葉、後頭葉、島葉、の5種類の脳葉がある。ほとんどの脳活動はこの中で複数の領域が協調して情報処理を行うことで実現される。つまり、活動ごとに脳機能領域間が連動する。そこで、脳機能領域を頂点とし、脳機能領域間の関係を辺で表すことができれば、脳活動を模擬するグラフが表現できそうである。

例 1.4 (センサネットワーク) 農場や工場の気温や気圧などの環境データを計測するセンサを考えてみよう。それなりに面積が大きい場所だと、一つのセンサよりも複数のセンサを使って環境データを計測したほうが正確であろう。一方で、センサが空間的に均等に配置できるわけではない（例えば柱の中心にセンサを埋め込んでも気温の計測にはあまり役立たないだろう）。各センサから得られたデータを集約するために局所的な通信ネットワークを利用するとき、分散的に、つまり近隣のセンサへ順々にデータを伝送し、最終的に集約するようなシステムを考えよう。この場合、センサを頂点、伝送ネットワークを辺とすれば、無線センサネットワークは（有

向) グラフとして表現できそうである。

例 1.5 (社会的ネットワーク) つぎは社会的ネットワーク (ソーシャルネットワーク) を考えてみよう。社会的ネットワークは、上述したような物理的なネットワークではなく、人間どうしのつながりを表す仮想的なネットワークである。人間を頂点、例えば友人関係を辺とすれば、社会的ネットワークをグラフとして表現できる。通常、友人関係は双方向的——一方が友人だと思っていれば相手も友人だと思っている——なので[†]、この場合の社会的ネットワークは無向グラフとするのが妥当かもしれない。一方で、インターネット上のソーシャルネットワーキングサービスでは、一方的な関係となる場合がある。例えば有名人の投稿はそれを「フォロー」している数多くの人が目にするが、一方でその有名人が自分をフォローしているユーザ全員の投稿を見ているわけではない。この場合には社会的ネットワークには方向があるため、有向グラフとしたほうがよいかもしれない。

上で紹介したいくつかのネットワーク以外にも、例えばタンパク質構造などもグラフとしてとらえられるし、機械学習などで利用される特徴量間の関係や画像中の画素値間の関係 (輪郭やテキストチャなど) もグラフとして考えることができる。すなわち、グラフ (ネットワーク) は科学・工学・産業のあらゆる分野で利用されている。

ここで少し注意する必要があるのは、グラフによって定められる頂点間の関係はあくまで相対的なものだという点である。つまり、一般には頂点は絶対座標に紐づいているわけではない。そのため、グラフないし本書のテーマであるグラフ信号を可視化する際には、頂点の座標を別に与える必要がある。

グラフの解析、あるいはグラフ上での信号処理を行うにあたっては、実際のグラフを単純化することも多い。以下では、比較的単純な構造を持つグラフや、

[†] 実際には物事はそんなにうまくいかないで、ここでは単純化が行われていることに注意。

索引

【あ】	
アトム	142
【い】	
一般化サンプリング	75
インパルス応答	19
【お】	
オクターブバンド分割	125
重み付きグラフ	10
重みなしグラフ	10
【か】	
ガウスマルコフ確率場	195
可逆圧縮	162
確率的ブロックモデル	7
過剰間引き型	134
完全グラフ	7
完全再構成	129
【き】	
基底	26
逆グラフフーリエ変換	33
近似的完全再構成	130
【く】	
区分的一定グラフ信号	87
区分的滑らかなグラフ信号	87
組合せグラフラプラシアン	13
グラフ	1
——の代数的接続性	28

グラフウェーブレット	125
グラフ作用素	9
グラフ周波数	33
グラフ周波数応答	53
グラフ周波数領域でのサンプリング	89
グラフ信号	20
グラフフィルタ	48
グラフフィルタバンク	125
グラフフーリエ変換	31
グラフ変動作用素	9
グリッドグラフ	6
【け】	
決定性サンプリング	98
ゲルシュゴリンの定理	102
【こ】	
硬しきい値処理	131
更新	135
更新器	136
合成側変換	126
構造方程式モデル	205
高速フーリエ変換	46
固有値	27
固有値分解	28
固有ベクトル	27
【さ】	
再構成変換	76
最大事後確率	196
最大間引き型	134
サブバンド	125
サンプリング定理	17, 71

【し】	
次数行列	13
シフト	119
シフト不変空間	71
シフト不変性	18
時不変性	18
周期的グラフスペクトル	
部分空間	86
周波数特性	19
冗長型	134
信号	17
信号値	17

【す】	
スケールフリーネットワーク	
ワーク	8
スペクトルインタレース	
	171
スペクトルクラスタリング	
	28, 168
スペクトルグラフ理論	23

【せ】	
正規化グラフラプラシアン	
	14
正規直交基底	27
正則化項	68
精度行列	196
接続行列	11
線形	19
全帯域信号	91

【そ】		【は】		【ゆ】	
相関係数	194	バスグラフ	6	有向グラフ	2
相互相関	72	半教師あり学習	109	有向辺	2
【た】		半正定値行列	24	【よ】	
帯域制限信号	84	【ひ】		予 測	135
対称正規化グラフラブラ		非可逆圧縮	162	予測器	136
シアン	14	非線形近似	162	【ら】	
タイトフレーム	143	【ふ】		ラブラシアン 2 次形式	24
多スケール分解	165	フィルタ	44	ラブラシアンピラミッド	176
畳込み	19, 44	不確定性原理	112	乱択サンプリング	99
【ち】		フーリエ変換	35	ランダムウォークグラフ	
チェビシェフ多項式近似	58	フレーム	143	ラブラシアン	14
頂 点	1	フレーム境界	143	ランダムグラフ	6
頂点領域でのサンプリング		分析側変換	126	【り】	
	88	【へ】		離散コサイン変換	31
直流成分	26	平均 2 乗誤差	100	離散時間信号	17
直和条件	78	ベイジアンネットワーク	194	離散時間フーリエ変換	19
直交変換	147	ベクトル自己回帰	204	離散フーリエ変換	30, 37
【て】		辺	1	リフティング	135
抵抗距離	172	変 調	119	輪郭保存型平滑化	64
データ忠実性項	68	【ほ】		リンググラフ	6
【と】		補正変換	76	隣接行列	9
独立同一分布	100	【ま】		【れ】	
度 数	8	マルコフ確率場	194	レイリー商	27, 209
度数行列	13	【む】		連続時間信号	17
【に】		無向グラフ	3		
二部グラフ	28	無向辺	3		
二部二重被覆	187				

【B】		DC component	26	【F】	
Barabási-Albert モデル	8	DFT	30, 37	FFT	46
【D】		DTFT	19	Fiedler ベクトル	28
DCT	31	【E】			
		Erdős-Rényi モデル	7		

[G]		[K]		[S]	
GFT	31	<i>K</i> 近傍法	192	SBM	7
GMRF	195	KNN	192	Schur 補行列	171
GraphBior	153			SEM	205
GraphQMF	153	[M]		sinc 関数	74
		MAP	196	[T]	
[I]		MRF	194	Tikhonov 正則化	67
i.i.d.	100	MSE	100	[V]	
IGFT	33	[P]		VAR	204
		PGS 部分空間	86		

—— 監修者・著者略歴 ——

田中 聡久 (たなか としひさ)	田中 雄一 (たなか ゆういち)
1997年 東京工業大学工学部電気・電子工学科卒業	2003年 慶應義塾大学理工学部電子工学科卒業
2000年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了	2005年 慶應義塾大学大学院理工学研究科前期博士課程修了
2002年 東京工業大学大学院理工学研究科修士後期課程修了, 博士 (工学)	2007年 慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了, 博士 (工学)
2002年 理化学研究所脳科学総合研究センター研究員	2007年 カリフォルニア大学サンディエゴ校博士研究員
2004年 東京農工大学講師	2008年 宇都宮大学助教
2006年 東京農工大学助教授	2012年 東京農工大学准教授
2007年 東京農工大学准教授	2016年 科学技術振興機構さきがけ研究者 (兼務)
2018年 東京農工大学教授	2022年 大阪大学教授
現在に至る	現在に至る

グラフ信号処理の基礎と応用

— ネットワーク上データのフーリエ変換, フィルタリング, 学習 —

Theory and Applications of Graph Signal Processing

— Fourier Transform, Filtering, and Learning for Network-Structured Data —

© Yuichi Tanaka 2023

2023年1月23日 初版第1刷発行

検印省略

監修者 田中 聡久
著者 田中 雄一
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01405-1 C3355 Printed in Japan

(齋藤)



JCOPY < 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構 (電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp) の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。