

信号処理の多様性

小野 順 貴*

* 東京都立大学 東京都日野市旭が丘 6-6
* Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo, Japan
* E-mail: onono@tmu.ac.jp

キーワード：信号処理 (signal processing).
JL 0012/23/6212-0723 ©2023 SICE

信号処理は、センサから得られる信号から目的とする成分のみを抽出したり、必要なパラメータを推定したりするために欠かせない技術であり、古くから科学技術の幅広い分野で活用されてきた。計測分野においても、センサの高度化と低コスト化によりさまざまな信号の収集が容易になり、信号処理技術の重要性が増している。膨大な学習データに基づき、データに内在する複雑な関係性をブラックボックス的に獲得する機械学習と比較すると、信号処理は、対象とする信号の物理的な生成過程や観測過程を捉え、これを適切にモデル化することで、最適性の追求、高い解釈性、バイアスフリーな推定を可能にしている。それゆえ、信号処理には対象に応じた多様な手法が生まれている。本特集「計測における信号処理技術の新展開とその応用」は、このような背景を踏まえ、計測に関連する多様な信号処理技術の最新の動向について、各分野の専門家に執筆いただいたものであり、7編の解説記事と3編の応用事例からなる。

「多チャンネルブラインド音源分離の進展」は、筆者が執筆したブラインド音源分離に関する解説である。未知の混合系から得られる多チャンネル観測から元の信号を復元する枠組みとして独立成分分析が有名であるが、音の伝搬は時間遅れを伴い畳み込み混合となるため、単純な独立成分分析では分離することができない。音響分野では畳み込み混合に対するブラインド信号分離のため、独立ベクトル分析といった新たな枠組みが発展してきた。この手法は、原理的には音に限らず、線形時不変な混合をもつ任意のセンサ信号に適用可能と考えられる。よって、ほかの計測分野への応用を期待し、その定式化と解法についてまとめている。また、効率的な反復解法を導出する際に補助関数法という最適化の枠組みを用いており、この点も他分野の読者の興味を引けば幸いである。

「有理指数信号：計測パルス波形の統一モデルとその短時間厳密パラメータ推定」(安藤繁先生)は、計測パルス波形の微分方程式モデルとそのパラメータ推定法について解説いただいたものである。前半では、ガボール波、ガウス包絡チャープ波といった一連のパルス波形が、時間多項式係数をもつ微分方程式により統一的にモデル化されること、また、荷重積分法による短時間観測からのパラメータ推定の直接代数解法がまとめられている。伝搬過程や反射等で計測パルスの波形が変化する場合、従

来の整合フィルタでは検出性能が低下するが、ここで述べられている手法は、パラメータ変化をむしろ情報として抽出する方法論を提供しており、新しい計測手法の創出につながることを期待される。後半では多重反射環境に適用するため、整合フィルタ(パルス圧縮)との併用が述べられている。ガウス包絡チャープ波同士の相互相関が再びガウス包絡チャープ波になるという性質が個人的にはきわめて興味深く、有理指数信号のもつ望ましい性質の1つと感じた。

「脳波計測と信号処理、機械学習の基礎と実践」(田中聡久先生)は、脳波計測を対象とした信号処理について解説いただいたものである。前半では、脳波についての概説やその計測方法から、与える感覚刺激と脳波の同期、脳波に生じる特徴など、信号処理の前提となる基礎知識を含めて説明いただいている。後半では、脳波の分類を目的とした機械学習について述べられている。脳波計測では多点計測により大きな信号次元の観測が得られるが、一方、画像や音声と異なりビッグデータを用いることができず(脳波の個人性も強く影響しているものと想像する)、十分な学習データを確保できない問題がある。本解説ではこの困難さへの対処として、脳波を共分散行列で表現し、半正定値行列のなすリーマン多様体上でデータを扱う手法が紹介されており、他分野にも新しい視点を与える独特なアプローチに思われる。

「リカレントニューラルネットワークの学習と情報処理」(黒江康明先生)では、ニューラルネットワーク(NN)の一種であるリカレントニューラルネットワーク(RNN)について解説いただいている。RNNはフィードバックや自己ループを含むネットワークであり、それゆえ非線形ダイナミカルシステムと捉えられる。本解説では学習法のみならず、RNNの非線形ダイナミカルシステムとしての表現力やその振る舞い、たとえば複数の平衡点、リミットサイクル、引き込みなどの現象について解説されている。また、実数値をとるネットワークだけでなく、複素数、さらには四元数、八元数といった拡張された代数系を用いるRNNや、計算コストを大幅に削減するリザバーコンピューティングと呼ばれる枠組みなど、最新の事例についても紹介されている。

「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」(山田宏樹先生、田中雄一先生)では、グラフ

信号処理について解説いただいている。等間隔サンプリングされた時系列データを対象とする一般の信号処理に対し、グラフ信号処理はグラフで表現されるような、一般には均一でない接続関係をもつネットワーク上での信号を扱うものである。本解説ではグラフ信号処理の定義、フィルタリング、逆問題の解法の解説に加え、深層学習との融合についても述べられている。これは単純な機械学習の適用ではなく、反復最適化の各ステップの処理をニューラルネットワークの層として展開する深層展開と呼ばれる手法により、数理モデルと深層学習の融合的な手法を目指すものであり興味深い。

「非凸最適化に基づくスパースモデリング」(早川諒先生)では、スパース性を活用した信号処理を最適化の観点から解説いただいている。推定したい信号(ベクトル)がスパースであるとの事前知識を活用し、観測からこれを推定する問題は、さまざまな分野の信号処理に現われる。本解説では、これを解くための数理最適化において、非凸関数を正則化項として用いるアプローチが、大域的最適化は得られないものの実験的にはより優れた性能を得られるとの動機から、複数の非凸正則化に対し、近接写像を用いた最適化手法が系統的に紹介されている。また、無線信号検出への応用についても述べられている。

「回路規模削減を考慮したデジタルフィルタ設計」(陶山健仁先生)では、回路規模を削減しつつ高い性能を維持するデジタルフィルタの設計が論じられている。具体的には、Canonic Signed Digit (CSD) 係数という、二進数表現における各桁を 1, 0, -1 の 3 値に拡張した表現を用い、デジタルフィルタの係数の非零桁数を最小化することで、フィルタの回路規模を削減する手法が紹介されている。問題設定量子化誤差を最小化するようにフィルタを設計する問題は NP 困難となるが、これを蟻コロニー最適化というメタヒューリスティックによって最適化を試みている。

「多チャンネル自己教師あり学習に基づく音響信号処理とそのロボット聴覚への応用」(坂東宜昭先生)では、深層学習と統計的信号処理の融合による、深層フルランク空間相関分析法 (Neural FCA) と呼ばれる音源分離の枠組みが紹介されている。また、これに基づき、音源物体を検出するロボット聴覚に応用についても述べられている。どちらも自己教師あり学習を用い、コストのかかる教師データの収集を不要とする点が特徴的である。

「Wi-Fi チャンネル状態情報 CSI を用いた生体情報の取得」(橋本秀紀先生)では、Wi-Fi 信号のチャンネル状態情報を活用し、屋内における人の呼吸数や心拍変動を推定する技術が紹介されている。Wi-fi のチャンネル情報から生体情報が推定できるという応用の面白さに加え、信号処理としては、変分的モード分解 (VMD) と呼ばれる手法により、観測信号を狭帯域な固有モード関数 (IMF) に分解する手法が興味深い。

「マイクロ波レーダ法の診断精度向上を図る信号処理技術」(高山潤也先生)では、構造物の非破壊検査に用いられるマイクロ波レーダの精度を向上させる信号処理技術が紹介されている。具体的には、マイクロ波伝播経路の厳密モデルと、ウェーブレット変換とヒルベルト変換を用いたマイクロ波の伝播時間と反射位相変化推定法について詳細な説明がなされている。コンクリート試験体に対する適用例についても述べられている。

これらの解説記事、ならびに応用事例は独立に執筆を依頼したものであるが、意図せずしていくつかの記事は深い関連をもつ内容となっている。たとえば、「多チャンネル自己教師あり学習に基づく音響信号処理とそのロボット聴覚への応用」で述べられている深層学習を用いた音源分離手法は、「多チャンネルブライント音源分離の進展」で述べている独立ベクトル分析の発展形とみなすことができ、あわせて読むことにより、より理解が深まると思われる。「マイクロ波レーダ法の診断精度向上を図る信号処理技術」における紹介事例で用いられているレーダ送信波はガボール波であり、「有理指数信号：計測パルス波形の統一モデルとその短時間厳密パラメータ推定」で述べられている手法の適用を期待せずにはいられない。また、機械学習に触れている解説、応用事例の多くで、単純な機械学習の適用ではなく、対象のモデリングに基づく信号処理との融合や、対象の構造をできるだけ取り入れようという動機が共通しており、計測、ないしは信号処理研究者に共通する問題意識の現われを見ることができるようと思われる。

本特集号を通じて、計測に用いられる多様な信号処理技術やその応用についての理解が深まり、読者が直面する課題の解決や新たな視点の提供につながれば幸いである。最後に、本特集に対し、示唆に富む解説記事、ならびに、応用事例を執筆して下さった執筆者の皆様へ深く感謝申し上げたい。また、本誌の特集として、計測における信号処理を題材として選び、充実した本特集を企画いただいた、担当編集委員の群馬大学の伊藤直史先生にも深く謝意を表する。

(2023 年 11 月 27 日受付)

[著者紹介]

小野 順貴 君 (正会員)



2001 年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年 4 月より同大学院助手。2005 年 4 月より同大学院講師。2011 年 4 月より国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系准教授。2017 年 9 月より同教授。2017 年 10 月より東京都立大学教授。音響信号処理、マイクロフォンアレイ、音源分離などの研究に従事。