



Title	最大エントロピー法による計測データの高分解能スペクトル解析
Author(s)	松本, 久功
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16674号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16674
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98284
Type	doctoral thesis
File Information	Hisanori_Matsumoto_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 松本 久功

学 位 論 文 題 名

最大エントロピー法による計測データの高分解能スペクトル解析

(High-Resolution Spectral Analysis of Measurement Data Using Maximum Entropy Method)

本論文は、有限長かつ雑音を含む計測データに対し、高分解能スペクトル推定を可能とする最大エントロピー法 (MEM) の理論を体系化し、産業分野において応用できる解析フレームワークを提案した。また、具体的な産業ユースケースに提案手法を適用し、その性能と有用性を論じた。

近年、我が国では労働人口の減少が社会課題となっており、今後も産業インフラを正常に維持していくためには IoT や AI を活用した製造業の高効率化と省人化が必須である。今日の製造現場では、生産工程の進捗管理、製品の良不良検査、設備の状態監視など、様々な目的で計測データ活用が試みられており、製造業のデジタルトランスフォーメーションがすすめられている。このような流れの中で、工場内のあらゆる設備や事象から計測データが収集されるようになり、発生するデータ量は増加の一途をたどっている。工場のデータトラフィック削減のため、個々の設備の計測データは必要最小限にとどめることが望まれる。本研究では確率過程論に基づくスペクトル推定法である MEM が短い計測データからでも鋭いスペクトルピークを計算可能であることに着目し、MEM に基づくデータ解析手法を検討した。まず、MEM の理論の定式化から出発し、分解能と推定誤差の特性について整理した。そのうえで、計測データ取得、スペクトル解析、特徴量抽出の三段階からなる解析フレームワークを構築した。続いて、具体的な産業ユースケースへの応用研究として、短時間振動信号を用いる軸受診断と、2次元 MEM による走査型プローブ顕微鏡像解析の二事例で有用性を検証し、FFT 比 10 倍の分解能で損傷周波数を±1%以内に特定するなど、データ削減しながら高精度も達成できることを示した。さらに、ピーク検定と特徴量の抽出手法を提案し、IoT エッジ診断やナノ材料表面評価への応用可能性を示し、MEM を核とした高分解能計測データ解析の設計指針を示した。

論文は全6章で構成した。第1章では、リアルタイム工程管理や設備保全における計測データ解析の重要性と、FFT等の従来手法の限界を踏まえたMEM採用の動機を提示し、研究目的と論文構成を概説した。続く第2章は、計測データの一般特性を整理したうえで、薄膜バルク弾性波共振器(FBAR)の成膜プロセスを例に具体的課題を示し、スペクトル推定法をその発展の歴史に沿って古典的手法、確率過程論に基づく手法、機械学習・深層学習手法の3分類で整理して本研究の位置づけを明確化した。第3章ではMEM理論をYule Walker方程式と予測誤差フィルタの関係から再整理し、分解能と推定分散の関係を解析した上で、計測データ取得、スペクトル解析、特徴量抽出の3段階を部品化したフレームワークを提案した。第4章は一つ目の産業事例として回転機械軸受診断を扱い、数周期分の信号成分しか含まれない短時間振動データにおいて、MEMがFFT比で10倍以上の分解能を示し、IoT実装で通信負荷を大幅削減できることを示した。第5章はもう一つの産業事例として2D MEMをSPM像解析に拡張し、AIN薄膜などのナノ周期構造を数%以内の誤差で定量化し検査自動化の可能性を示した。最終の第6章では、MEMフレームワークが産業横断で再利用可能な軽量・高精度解析基盤になり得ることを論じ、ピーク有意性検定やLLM連携など残された課題と今後の展望を整理して論文を締めくくった。

本研究は、製造計測・信号処理分野において、短データ長でも信頼性の高いスペクトル解析および特徴量抽出を実現する新たな基盤技術の提供において寄与した。具体的な産業ユースケースを通じて、時間・空間データを少ないサンプリングでも正確にその特徴量を抽出できることを実証し、産業データ解析の高度自動化の可能性を示した。