

審査の結果の要旨

氏 名 光藤 祐基

近年の音場再現技術の進歩により、膨大な数のマイクロホンによる音源分離が注目を集めるようになり、実現のための議論が活発になされている。事前に得た情報を必要としないブラインド音源分離（BSS）では非負行列因子分解（NMF）による手法が長く研究されてきた。複数マイクロホンシステムへの拡張である多チャンネルNMF（MNMF）は、2～4チャンネルを仮定した状況を題材に研究されてきたが、音場再現で使用されるような32チャンネル以上のマイクアレイで得られる信号に用いられる事はなかった。主要な要因の一つに計算コストが挙げられる。MNMFで必要となる計算コストは、マイクロホンの数が A のとき $O(A^3)$ にも及ぶ。空間相関行列（SCM）を更新する場合は、更新式に固有値分解が含まれるため、非常に計算コストが大きい。これまでに計算量を削減した数々のBSS手法が提案されてきたが、波動場の性質を陽に利用した手法は存在しない。以上に鑑み、本論文では、「Blind Source Separation Exploiting Characteristics of Wave Fields（波動場の特性を陽に利用したブラインド音源分離）」と題し、波動場の持つ物理的な性質を取り入れた効率的かつ高精度なBSS理論の提案、解析、および検証実験を行っている。本論文は全7章から構成されている。

第1章「Introduction（序章）」では、従来BSSアルゴリズムの概要およびその総括を行っている。特に、上述した従来BSSにおける計算コストの問題点を指摘し、大規模なマイクアレイへの適用が困難である事を述べている。一方で、音場再現の分野では空間周波数領域への変換を計算効率向上のために用いられる事が多い旨を指摘し、両者の融合、つまり音場再現で用いられる空間周波数への変換をMNMFに導入する事で計算コストの課題を解決でき、かつ波動場の特性を陽に利用する事で性能向上を達成出来るという着想に至っている。

第2章「Physical Fundamentals of Wave Fields（波動場の物理的基礎）」では、本論文における波動場記述の数学的基礎について述べている。特に、デカルト座標系および球座標系における波動方程式とその解について解説を行っている。更に、本論文において中心的な役割を演じる球面調和領域における信号表現について触れ、その際に顕在化するエバネッセント波について具体的な例を出して説明を行っている。

第3章「Multichannel Blind Source Separation（多チャンネルブラインド音源分離）」では、従来のBSSアルゴリズムに関してその数学的基礎を述べている。まず音響信号を時間周波数領域で記述する局所複素ガウス分布モデルを定義し、それに基づいてMNMF

の動作原理（コスト関数およびパラメータ最適化法）について述べている。ここでは独立ベクトル分析等のSCM空間ランクが1となる手法と比較し、MNMFの演算量が観測の次元に対して3乗のオーダーで増加する事を指摘し、その解決が急務であると結論付けている。

第4章「Diagonal Spatial Covariance Matrix in Wavenumber Domain（波数領域における対角空間相関行列）」では、デカルト座標系の波動方程式を解くと得られる波数領域における信号表現への変換、およびそれを利用したMNMFの効率的解法について提案している。具体的には、まずMNMFのモデルが含むSCMに対して空間周波数変換行列を用いて対角化する事で、非負値テンソル分解（NTF）と同型な問題を解く事に帰着させ、その計算量を $O(A)$ に抑えるというものである。音楽信号を用いた音源分離実験により、従来のMNMFよりもはるかに少ない計算コストで処理を行う事ができ、かつ独立ベクトル分析等の高速簡易手法よりも音源分離精度が高い事を確認している。

第5章「Banded Spatial Covariance Matrix in Wavenumber Domain（波数領域における帯空間相関行列）」では、第4章にて述べた波数領域変換に基づく手法の拡張理論を提案している。一般に残響の多い実環境においては、厳密な意味においてSCMが対角化される事はなく、非対角成分に漏洩が生じる。これに対処するため、SCMが三重対角化されると仮定し、その基でMNMFを効率的に解くアルゴリズムを導出している。実環境にて計測されたデータを含む音源分離実験において、音源分離精度の向上を確認し、かつ計算コストが $O(A)$ よりは多いもののMNMFよりは少ない事を示した。

第6章「Diagonal Spatial Covariance Matrix in Spherical Harmonic Domain（球面調和領域における対角空間相関行列）」では、球座標系の波動方程式を解くと得られる球面調和領域における信号表現への変換を通じて、球状マイクアレイにおいて実践的に使用可能な手法を提案し、その有効性を検証している。特に極近距離場以外において球面調和領域へ変換されたSCMが周波数間で近似的独立になる事に着目し、計算コストが $O(A)$ となるアルゴリズムを導出している。また近距離場に関しても、エバネッセント領域に適切なマスク関数を乗じる事によってその影響を減じ、同時に観測雑音の増幅を抑える処理も提案している。32チャンネル・マイクアレイを用いた音源分離実験によって、従来のMNMFよりも音源分離精度が高く、かつ計算コストも少ない事が確認された。

第6章「Conclusion（結論）」では、本研究の成果がまとめられている。

以上、本論文は要するに、従来BSSでは考慮されてこなかった波動場特性を利用した統一的なBSS理論に基づき、それをデカルト座標系および球座標系に適用して効率的かつ高精度なアルゴリズムを導出し、その有効性を音源分離実験で検証・確認したものである。本論文で提案された理論を導入する事により、従来では不可能とされてきた数十チャンネル超える観測のMNMFが可能となる。これは音楽信号解析や音場解析システムの拡張を与えるものであり、システム情報学に対する貢献が大きいと判断される。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。