

氏名（本籍） 齋藤晋哉（東京都）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第1033号
学位授与の日付 2019年9月30日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 近似同時対角化問題の解法を用いたブラインド信号源分離に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 古川 利博
嘱託教授 宮部 博史 教授 八嶋 弘幸
教授 谷口 行信 准教授 池辺 淑子
東京工科大学大学院 バイオ・情報メディア研究科
コンピュータサイエンス専攻 准教授 大石 邦夫

論文内容の要旨

近年、行列の同時対角化（joint diagonalization, JD）はブラインドシステム同定、補聴器、ブラインド信号抽出（blind source extraction, BSE）、ブラインド信号源分離（blind source separation, BSS）等に広く適用されている。音声、音楽等を対象にすると、推定誤差や加法的な雑音の混入等のために入手できる対角化対象行列は推定値となり、しかも入手個数は制限される。このような応用では対象行列を近似的に同時対角化（approximate JD, AJD）する。これらの応用の一つに、未知の畳み込み混合過程が未知で雑音と残響が存在する環境下で、観測信号から信号源信号を復元するブラインド信号抽出がある。

混合モデルでは、ある時刻において未知の信号源信号が未知系で混合され、観測信号として受信される。ここで、信号源信号は互いに無相関とする。ここで、信号源信号が定常過程とみなされる短時間区間はエポックサイズと呼ばれ、エポック外での自己相関は無相関になる。時間周波数領域のブラインド信号源分離では、できる限り観測信号のクロススペクトル密度行列が対角行列になるように混合行列を推定する。一方、ブラインド信号抽出では、同時対角化問題の解法によって分離行列を求め、信号源信号を復元する。

同時対角化問題の解法は、直交同時対角化手法（orthogonal JD approach, OJD

approach) と非直交同時対角化手法 (non-orthogonal JD approach, NOJD approach) に大別される。直交同時対角化手法では、観測信号の白色化を必要とし、ユニタリ行列を計算する手法に基づく。一方、非直交同時対角化手法では、観測信号を白色化することなく反復法が用いられる。

ダイレクト最小 2 乗型 (direct least-squares, DLS) 同時対角化評価量は対角化行列と対角行列の関数である。一方、インダイレクト最小 2 乗型同時対角化 (indirect LS, ILS) 評価量は分離行列と対角行列の関数である。ALS (alternating least-squares) アルゴリズムは最小 2 乗型同時対角化問題の解法手法の一つであり、2 つの手順から成る。手順 1 では対角化行列を固定して対角行列に関して DLS 評価量を最小にする。手順 2 では、対角行列を固定して対角化行列に関して DLS 評価量を最小にする。これらの手順は交互に繰り返される。近年、ALS アルゴリズムの一つとして ALSP (alternating least-squares with projection) が提案された。このアルゴリズムでは、最小 2 乗法を用いて DLS 評価量を最小化する対角化行列を求め、制約条件を写像によって課している。ALSP アルゴリズムの特徴はカトリー・ラオ (KR) 積を利用すると、事実上、対角化行列に関して DLS 評価量を 2 次形式で表現でき、既存の最小化手法が利用できる点にある。ALSP アルゴリズムの欠点は、収束が遅いことである。従って、収束速度の改善と演算量の低減が、重要な課題となっている。本論文では、ALSP アルゴリズムの利点を生かし、欠点を克服する方法を提案し、ブラインド信号源分離とブラインド信号抽出に応用する。

近似同時対角化問題において推定精度は、入手可能な推定対象行列の個数に依存する。十分な個数の推定対象行列が入手できれば、高精度な推定値が期待できるが、同時に演算量は増大する。他方、入手できる推定対象行列の個数が限定されると、推定精度は劣化する。このように、推定精度と演算量にはトレードオフが存在する。信号源の個数よりも信号の観測点数を増やすと、分離性能が向上することが知られ、overdetermined 混合と呼ばれている。それ故、入手可能な推定対象行列の個数が制限される応用では、overdetermined 混合が分離性能向上に有効である。

周波数領域におけるブラインド信号源分離、並びにブラインド信号抽出では、パーミュテーション問題とその解法、スケーリング問題とその解法が不可欠である。周波数ビン毎に分離フィルタの出力に信号源信号を割り当てると、周波数ビン毎に割り当てが異なり、全周波数帯域で割り当てを揃える問題をパーミュテーション問題という。また、復元された信号源信号の振幅は周波数ビン毎に異なる問題をスケーリング問題という。代表的なパーミュテーション問題の解法として、信号の到来方向に基づく方法と同一信号源から同一時刻に発せられた信号源信号の相関を利用した方法が存在する。前者の方法では、同方向

に存在する信号源信号の分離は不可能である。一方、後者の方法として、信号源信号が音声である場合、音声信号のスパース性を利用すると、ある時刻で特定の信号源信号が支配的となるスパース性を利用して、その隣接周波数ビン間の電力比の相関係数を用いると、高精度でパーミュテーション問題を解法できることが報告されている。

本論文では、最小 2 乗型同時対角化問題の解法に基づく 3 つのアルゴリズムを提案する。

はじめに、観測信号のクロススペクトル密度行列の逆行列を展開式で表現すると、制約条件付きインダイレクト最小 2 乗 (constrained ILS, CILS) 評価量が導出でき、ALSP アルゴリズムの適用が可能となる。評価量に課した制約条件はスケーリング問題を解法することと等価であるので、スケーリング問題を解くことなく分離行列を直接推定することができるので、スケーリング問題を解くことなく分離行列を推定することができる。更に、この解法にブロック処理を導入すると、推定精度を劣化させることなく少ない演算量で高い分離性能を発揮できることを示す。

制約条件付きダイレクト最小 2 乗 (constrained DLS, CDLS) 評価量を混合行列に関してラグランジェの未定乗数法によって最小にした後、ILS 評価量を対角行列に関して最小化し、これらを交互に繰り返す反復アルゴリズムを提案する。近似同時対角化問題では、対角化行列の推定値は正則でなければならないが、CDLS 評価量の最小化では、これを保証できない。そこで、対角化行列の推定値が正則でない場合は、これを正則な行列で置き換える。対角化行列が正則であれば、分離行列を一意に決定することができる。また、混合・分離過程が因果性となるように、分離行列に遅延要素を付加し、観測点で加わる雑音の影響を低減させる。このように、近似同時対角化問題に 2 つの評価量を導入する利点は、分離信号の質を高めることにある。パーミュテーション問題は隣接周波数ビン間の電力比の相関係数を利用して解法する。また、分離行列の各列ベクトルをその大きさを正規化することによってスケーリング問題を解法できることを示す。分離行列の推定精度だけを評価するために非パーミュテーションブラインド手法を使用する。これは、パーミュテーション行列の算出に限り混合行列が既知と仮定する方法である。本提案法の分離行列の推定精度を正確に評価することに役立つ指標の一つである。

最後に、本論文では、最小 2 乗型同時対角化問題の解法に基づく ALS アルゴリズムを提案する。インダイレクト評価量を対角行列に関して最小にした後、ダイレクト制約条件付き評価量を対角化行列に関して最小にする。この操作を収束するまで反復する。このアルゴリズムの特徴は、対角化行列を最小にする際、入れ子のループを用いることなく非反復法で混合行列を推定できることが特徴である。シミュレーションでは、仮想環境と実環

境の両方において、信号源の個数と観測点数が等しい **determined** 混合過程と **overdetermined** な混合過程を実現して提案手法の性能を評価する。通常、室内空間インパルス応答は線形モデルを仮定して、小部屋を想定して点音源から理想点マイクロフォンまでの室内空間インパルス応答を **image method** と呼ばれるシミュレータを用いて発生させて、ブラインド信号抽出法の性能を比較している。一方、実際の室内では、観測信号にはスピーカ、並びにアンプから発生する非線形な成分が含まれる。更に、実際のスピーカは点音源ではなく、マイクロフォンは無指向な点マイクロフォンではないので、このような非線形性、実際のスピーカ、マイクロフォンの悪影響が分離性能に及ぼす影響も検証することは有意義である。シミュレーションでは、仮想環境と実環境の両方において、**determined** 混合過程より **overdetermined** な混合過程を用いると、分離性能が大幅に向上することが明らかになった。特に、空室に 5 個の指向性スピーカと 9 本のマイクロフォンを配置して BSE を試みた実験では、本手法による分離信号の振幅スペクトラムで音声信号のスペクトラムが再現できていること、また、PESQ (average perceptual evaluation of speech quality) 評価においても忠実の音声信号を再現できていることが明らかになった。

論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査の付託を受けて、標記 6 名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会では、学位申請者より学位論文の内容、あるいは前回審査における指摘事項に対する対応結果について説明し、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認する、という形式により審査を行った。

以下、本論文の要旨を述べる。

近年、観測信号の自己相関行列の同時対角化 (joint diagonalization, JD) はブラインドシステム同定、補聴器、ブラインド信号抽出 (blind source extraction, BSE)、ブラインド信号源分離 (blind source separation, BSS) 等に広く適用されている。本論文では、対象行列 (観測信号の自己相関行列) を近似的に同時対角化 (approximate JD, AJD) することにより、観測信号から信号源信号を復元するブラインド信号抽出問題について議論している。

本論文では任意の時刻において各音源信号、音声伝搬路特性が共に未知であり、これらが時間領域でたたみ込み演算された結果、観測信号として受信される混合モデルを対象としている。ただし、信号源信号は互いに無相関とする。ここで、信号源信号が定常

過程とみなされる短時間区間はエポックサイズと呼ばれ、エポック外での自己相関は無相関になる。時間周波数領域のブラインド信号源分離では、できる限り観測信号のクロススペクトル密度行列が対角行列になるように混合行列を推定する。ブラインド信号抽出は同時対角化問題の解法によって分離行列を求め、信号源信号を復元する技術の一つである。

上記を鑑みて本論文では、最小 2 乗型同時対角化問題の解法に基づく 3 つのアルゴリズムを提案している。

本論文では第 3 章で、観測信号のクロススペクトル密度行列の逆行列を展開式で表現すると、制約条件付きインダイレクト最小 2 乗 (constrained ILS, CILS) 評価量が導出できることに着目し、その結果 ALSP アルゴリズムの適用が可能となることを明らかにしている。評価量に課した制約条件はスケージング問題を解くことと等価であるので、これを意識すること無く分離行列を推定することができる。更に、この解法にブロック処理を導入すると推定精度を劣化させずに少ない演算量で高い分離性能を発揮できることを示している。

次に、第 4 章では制約条件付きダイレクト最小 2 乗 (constrained DLS, CDLS) 評価量を混合行列に関してラグランジェの未定乗数法によって最小にした後、ILS 評価量を対角行列に関して最小化し、これらを交互に繰り返す反復アルゴリズムを提案している。近似同時対角化問題では、対角化行列の推定値は正則でなければならないが、CDLS 評価量の最小化では、これを保証できない。そこで、対角化行列の推定値が正則でない場合は、これを正則な行列で置き換える。対角化行列が正則であれば、分離行列を一意に決定することができる。また、混合・分離過程が因果性となるように、分離行列に遅延要素を付加し、観測点で加わる雑音の影響を低減させている。このように、近似同時対角化問題に 2 つの評価量を導入する利点は、分離信号の質を高めることにある。

さらに第 5 章では、最小 2 乗型同時対角化問題の解法に基づく ALS アルゴリズムを提案している。具体的にはインダイレクト評価量を対角行列に関して最小にした後、ダイレクト制約条件付き評価量を対角化行列に関して最小にする手法について議論している。このアルゴリズムの特徴は、対角化行列を最小にする際、入れ子のループを用いることなく非反復法で混合行列を推定できること、すなわち先に提案したアルゴリズムの高速化が図れている点である。シミュレーションでは、仮想環境と実環境の両方において、determined 混合過程より overdetermined な混合過程を用いると、分離性能が大幅に向上することが明らかになった。特に、空室に 5 個の指向性スピーカと 9 本のマイクロフォンを配置して BSE を試みた実験では、本手法による分離信号の振幅スペクトラムで音声信号のスペクトラムが再現できていること、また、PESQ (average perceptual evaluation of speech quality) 評価においても忠実に音声信号を再現できていることが明らかになった。

以上により、審査委員会は本論文を博士 (工学) の学位論文として十分に価値あるものと認める。