学位論文題名

Analysis of Solutions in
Underdetermined Source Separation

(劣決定情報源分離における解の分析)

学位論文内容の要旨

近年、ブラインド情報源分離や独立成分分析という新しい枠組みでのデータ処理手法が注目を集めている。これは医療信号、映像や音響情報などの測定や通信において、観測状況等の制約により対象とする信号以外の信号が混入してしまう問題の解決に根ざしている。ここで、混合観測の過程が線形系（或いは加法雑音付のアフィン系）である場合を「信号源分離問題」と言う。これは、統計的に独立な複数の情報源があり、そこから発生する情報とその線形結合として観測される場合に、観測系列から元の情報源系列を推定する問題である。元信号間に統計的独立性を仮定するのみで、混合行列および元信号の双方を未知としてこの問題を解く手法が「ブラインド情報源分離」として研究されている。さらに問題の仮定から「独立成分分析」とも呼ばれ、観測された多変量データ系列をできるだけ成分が独立な系列へ線形変換する統計手法として、様々なデータ処理において重要性が高まってきている。

本研究では、観測の線形系が劣決定、つまり、観測系列数が元信号系列数より少ない場合を扱う。これは複数の線形混合された音声信号を分離する問題の例で言えば、 n 人の音声波形を m ($< n$) 本のマイクロホンによって同時に観測する場合に相当する。一般の計測においては多点観測が望ましいものの、前もって用意した観測器の個数以上の信号が存在しないということは予め保証できないため、このような場合の考察が重要となる。また、我々は両耳での観測から二つ以上の多数の音源を識別できるとされることから、信号源分離問題においては避けて通れない問題設定である。

系が正則な場合には問題や手法の性質はかなり解明されているものの、劣決定の場合は単純な線形の場合さえも十分に解明されているとは言えない。劣決定問題では仮に混合線形系を定めることができても解が一意に定まらないため、次の二つの問題を解く必要がある。

1. 系の混合行列を推定する問題
2. 与えられた混合行列の下で解系列を推定する問題

正則な場合は系が可逆であるため、1の問題を解けば2が一意に与えられるのに対して、劣決定の場合は1と2の両方を考察する必要がある。音声信号の分離のような連続値信号の場合、従来研究では前者の問題が重点的に分析され、後者の問題に対しては、元信号にスパース性を仮定して最小 L_1 ノルム解と呼ばれる解を用いる手法が主に提案されているのみである。

信号分離問題においては、系行列のほうは一種の攪乱母数で、実際に求めたいのは復元された元信号の推定系列であることがほとんどであり、系行列を正確に推定しても、それを用いて系列を定める手法に解の性質が依存する。従来の最小L1ノルム解による信号源分離の評価は実際に信号を分離した数値実験例において二乗誤差などで行われており、原理的にこの解がどのような性質を持ち、どのような条件下で良い近似となるか、また、どのように観測データと関連しているか、などの理解が不十分である。そこで本研究では、この最小L1ノルム解の分析を行った。特に、最小L1ノルム解は情報源がラプラス分布下での最尤推定量として妥当化されており、実際、音声信号の振幅などがこの分布に近似的に従う。そこで情報源をラプラス分布に従う確率変数とみなした場合の、最小L1ノルム解の推定量としての性質を調べ、確率密度関数を導出し、さらに誤差の確率的分析などを行った。また、その際、観測点に対する最小L1ノルム解の構成を観測空間における幾何構造に関連付けることで、分布によらず最小L1ノルム解の各点の推定値およびその誤差を分析する方法論を提示した。得られた主な知見は以下の通りである。

- 推定解の有効性は元信号がラプラス分布に従うかどうかでなく、むしろスパース性を持つかどうか依存する。
- スパース性のない一般の信号に対しては一般逆による線形復元（最小L2ノルム系列）と同程度の推定に留まる。
- 正則な場合と異なり、復元した系列の成分は一般に独立にならない。
- 絶対値が小さい部分が非基底部として割り当てられるわけではなく、従って高いスパース性を持っていても完全な復元ができるとは限らない。また誤差確率の上界はこの非基底部のノルムの定数倍で押さえられる。
- 復元過程は非線形であり、系行列の誤推定に対し不安定であるが、区分的線形性を持つ。従って、局所的な（短時間的な）安定性は保証される。
- 一般に復元誤差は系行列に依存するが、系行列に左正則変換を施しても解は不変である。

また、解析の副次的成果として、計算効率の良い信号復元アルゴリズムを導出した。幾何構造を利用した最小L1ノルム解の構成アルゴリズムは2次元の場合は発見的方法として既に研究されていたが、本研究では上記の知見に基づき既存のアルゴリズムを任意の次元へ拡張し、線形計画による解と同じ厳密解が求まることを示した。実際に、比較的観測が低次元の場合は線形計画を用いるよりも高速な復元が可能であり、データ数が多く5観測程度の場合には復元にかかる計算を大幅に効率化できることを示した。

本研究による成果は、劣決定信号源分離において従来より良く用いられてきた最小L1ノルム系列について、線形計画法に基づくアプローチにより解の性質を明確化するとともに、妥当な事前分布の仮定の下での確率的な誤差解析によって、どのような条件下であれば精度の良い解が得られるか、また、得られる解の精度の上界はどれ程か、等を明らかにした。また、効率的に解系列を構成するアルゴリズムを導出し、実際の音声データなどの大規模な信号データに対する実用性も得ることができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 峰 一
副 査 教 授 宮 腰 政 明
副 査 教 授 栗 原 正 仁
副 査 教 授 佐 藤 義 治
副 査 助 教 授 中 村 篤 祥

学 位 論 文 題 名

Analysis of Solutions in Underdetermined Source Separation

(劣決定情報源分離における解の分析)

我々が観測するものから、それが受けた各種の影響や変形を取り除き、源を復元する試みは古くから重要な工学的問題となっており、「逆問題」と呼ばれる。本研究は、逆問題の中で、線形混合という変形を受けた複数の観測系列から元の複数の系列を復元する問題を扱っている。特に、観測系列数が信号源系列数よりも少ないという劣悪な条件の下で、線形混合の実態も不明なままでこれを行うことを目的としている。これは、いわゆる「カクテルパーティ効果」と呼ばれる現象、つまり、多くの人が一斉に話している状態で我々は個々の会話を抽出できる、という現象の工学的実現を目指したものと言える。

一般には、どのように変形されたか、つまり、上記の場合では（劣化）線形混合行列が不明な場合、解系列を復元しようがない。そこで、複数の信号源系列がそれぞれ独立であることを手がかりに復元を試みる。このような試みは「独立成分分析」と呼ばれる。また、劣化行列が未知のままの復元であることから「ブラインド情報源分離」とも呼ばれる。これらの試みは近年、神経系の活動を数本の信号として観測した場合に本質的な脳内の活動信号系列を探る試みや、各種の観測信号から雑音を除去する試みなどに刺激を受け大いに研究が活性化している。しかし、本研究で扱っている、劣決定、つまり、観測系列数が信号源系列数よりも少ない厳しい条件では、劣決定でない場合よりむしろ広い応用可能性があるにもかかわらず、発見的な解法が幾つか提案されているにすぎない。そこで、本研究は、実験的成功を収めているこれまでの方法論を数理的に解析し、成功の本質的理由を明白にするとともに秘められた問題点を指摘したものである。

劣決定信号源分離においては、二つの量を同時推定する必要がある。混合行列と源信号系列である。前者の推定に関しては従来の研究によりほぼ正確に推定できるとして良い。しかし、混合行列が既知であっても、劣決定の場合は過完備基底により、解が一意的に求まらない。そこで、信号源系列の独立性を仮定し、各信号源がラプラス分布に従うとする

と、制約方程式を満たすものの中でさらにL1ノルム最小解を求めれば良いことになる。しかし、L1ノルム最小解はラプラス分布の最尤推定量としての解であり、実際に求めている解は時刻毎であることから、この仮定に根拠を求めることはできない。そこで、本研究では、方法としてはL1ノルム最小解を求めることとして、1)なぜ、実際にこれまでうまく働いていたのか？ 2)L1ノルム最小解以外に適切な解はないのか？ 3)解の誤差に影響を及ぼす主要因は何であり、要因と解の誤差の関係は定量的にどう測れるのか？ などの根本的な疑問に関して、解を構成的な視点から眺め直すことにより、その性質と誤差を定性的かつ定量的に解析したものである。

本論文による成果は以下にまとめられる。

1. 劣決定信号源分離問題における伝統的なL1ノルム最小解は、混合行列の幾つかの列ベクトルが張る領域（決定領域）の同定と等価であることを明らかにした。これにより、観測系列数を超えた数の信号源復元はできず値として零が割り当たる、などの解の性質に関する幾つかの重要な知見を得た。
2. 従来言われていたように、信号源がラプラス分布に従うことが良い復元（分離）の条件ではなく、むしろ時刻毎の非零の強度を持つ信号源の数と強度差、つまり、時刻毎のスパース性こそが解の良さの決定要因であることを明らかにした。従来の知見は、ラプラス分布の性質が平均的にスパース性を導く、ということに過ぎない。
3. 一方、これまでの応用研究においてL1ノルム最小解が効果的である、という報告に関して、時刻毎の解の良さだけでなく、信号源の連続性が、決定領域の隣接関係に基づき、やはり区分的に連続に保持されることが大きいということを明らかにした。
4. 決定領域による解の解析により、同じL1ノルム最小解を得るために、従来のように各時間で線形計画法を解く必要はなく、信号源の連続性の利用と各決定領域の事前復元作用素構成により、効率的なアルゴリズムが構成できることを示し、具体的な手続きを提案した。これにより実時間で信号源復元が行えるようになった。

現在、劣決定な場合だけでなく一般のブラインド信号源分離が注目を集め、数多くの検討や提案がなされている。しかし、研究の背景からも、応用志向性の強い研究が多く、評価も実験的に行われることが多い。このような状況にあって著者は、従来から「うまく働いている方法」に関して、科学の基本である批判眼を持って基礎に立ち返り、その仕組みを数理的に解析することで、うまく働く本質的な理由を明らかにしたものである。同時に、方法論の限界や適切な利用のために配慮すべき事項を明白にした。これらの成果は今後の信号源分離問題に関して確固とした一つの基盤を与えたものといえる。

これを要するに、著者は、ブラインド信号源分離問題において、従来の方法論とその解の性質を数理的に解析することで、その方法論の基本的な性質に関して重要な新知見を得たものであり、今後のこの分野の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。