

氏名	石橋孝昭
学位の種類	博士(情報工学)
学位記番号	情工博甲第193号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	独立成分分析に基づく実環境下での信号分離と脳波解析に関する研究
論文審査委員	主査 教授 井上勝裕 " 岡崎悦明 " 江島俊朗 " 尾知博 " 五反田博(近畿大学)

学位論文内容の要旨

雑音が混入された混合信号から、本質的な信号を抽出することが、信号処理や情報処理の大きな目的である。目的信号の抽出や雑音の除去に関して、フィルタ処理やマイクロホンアレー処理などについて研究されているが、これら従来の方法では、目的信号の特徴や到来方向などの先験的な知識が必要である。そこで近年、本質的な信号である原信号と、原信号に雑音が混合されるまでの過程を未知として、原信号を抽出する研究が進められている。このように、観測した混合信号のみを用いて元の原信号を復元する手法はブラインド信号分離と言われ、このブラインド信号分離問題を解く方法として、独立成分分析が脚光を浴びている。独立成分分析は、観測された混合信号が互いに統計的に独立な原信号の重ね合わせであるとの仮定の下で、混合信号から独立な成分を分解する統計的手法である。実環境下での音声信号に対する音源分離問題については、観測される混合信号が原信号の畳み込みとして得られるため、独立成分分析は一般的に周波数領域で適用されることが多いが、独立成分分析によって得られる分離信号には、スケールの不定性と成分置換の問題があり、各周波数帯域での原信号のスペクトルは良好に推定できるものの、それらの推定スペクトルを時間領域に逆変換するとき、スケールの不定性と成分置換の問題が立ちはだかることになる。スケールの不定性は、推定信号のスペクトルの振幅や位相のスケールが原信号と異なることであり、成分置換は推定信号のスペクトルの推定順序が原信号の順序と異なることである。したがって、現実の応用に際しては、これらの問題を解決する必要がある。また、原信号数が未知の場合、センサをどのように配置すれば良いかを検討しておく必要もある。

そこで本論文では、上記問題を解決するために必要となる要素技術を確認し、周波数領域での独立成分分析を利用した実環境下で有効に機能する雑音除去システムと、独立成分分析に基づく単一試行脳波からの特徴抽出・変動識別システムを構築することを目的としている。

以下に本論文の構成を示す。

第1章では、研究の背景を述べ、本論文の提案内容を概観している。

第2章では、ブラインド信号分離の基礎概念を明確にするため、目的信号の強調と雑音除去の代表的な手法について説明し、次に、独立成分分析について概説するとともに、独立成分分析の代表的な手法である Natural Gradient アルゴリズムと FastICA アルゴリズムについて説明している。そして、それぞれのアルゴリズムは、観測されるまでに反射や時間遅れのない環境で得られる混合信号から、スケールの不定性と成分置換の問題を除いて、原信号を復元できることをシミュレーションにより確認するとともに、成分置換の問題はアルゴリズムの初期パラメータに依存するものの、FastICA アルゴリズムでは非ガウス性の高い信号から出力される頻度が高いことを示した。

第3章では、通常の独立成分分析によって得られる分離信号に存在するスケールの不定性の問題に対する解決法を提案している。スケールの不定性問題に関しては、分割信号を導入した解決法を提案し、分割信号は原信号と伝達関数の積で表現できることを証明するとともに、伝達関数によって分割

信号のスケールが決定できるため、スケールの不定性を解消できること、また、原信号数が混合信号数より少ない場合、分割信号を適用することで容易に原信号数の推定が可能であることを示した。次に、瞬時混合での信号分離シミュレーションによって、原信号数と混合信号数が異なる場合の独立成分分析の分離性能を調査し、分離信号のスケール回復した推定信号は、原信号数が混合信号数より同じか少ない場合は原信号に一致する分離信号が得られ、残りの分離力信号は振幅が0になること、原信号数が混合信号数より多い場合は、正確に原信号を推定できないものの、原信号の特徴は抽出可能であることを確認した。

第4章では、実環境下でも有効に機能する雑音除去システムの構築を目的として、周波数領域の独立成分分析で大きな問題である成分置換について、音響伝達特性に基づいた解決法を提案している。まず、周波数領域の独立成分分析を用いた実環境下で観測される音響信号の分離方法と非ガウス性の最大化に基づく周波数領域のFastICA アルゴリズムについて説明し、周波数領域の独立成分分析で得られる分離信号のスペクトルにはスケールと位相の不定性と成分置換の問題が存在し、その値は各周波数で異なるために非常に困難な問題であることを示した後、スケールと位相の不定性に対しては、分割スペクトルを導入することで解消できることを示した。また、分割スペクトルが音源のスペクトルと伝達関数の積で表せることを導出し、この結果から、成分置換の問題は、各音源からマイクロホンまでの距離によって得られる伝達関数から解決できることを示し、伝達関数のゲインと位相の大小関係に基づく成分置換の修正法を提案している。さらに、実環境下での音響信号のゲイン比と位相差は、音源からマイクロホンまでの距離でほぼ理論通りに決まること、周波数帯域やマイクロホン間隔、音源とマイクロホンの距離に依存していることを明確にし、この音響伝達特性に基づいて、伝達関数のゲインと位相の情報を組み合わせて利用する統合的な成分置換の修正法を提案している。また、音源分離後の目的音声選択方法については、音源とマイクロホンの相対的な位置情報が得られている場合には、提案する成分置換の修正法を用いることで目的音声を選択できることを確認するとともに、この位置情報が得られない場合に対応できる周波数領域のFastICA アルゴリズムの特徴を利用した話者音声選択法を提案している。そして、実環境下での検証実験において、提案した成分置換修正法は音源とマイクロホンの距離や周波数帯域に依存せず、高い修正能力を持つこと、騒音環境下で話者音声が存在する場合だけでなく、他人の発話が雑音となる場合においても有効に機能すること、そして、多音源多マイクロホン環境下でも適応可能であることを確認するとともに、提案した目的音声選択法は、正確に話者音声を選択できることを確認した。

第5章では、人間の頭皮上から導出された単一試行視覚認識時脳波信号から、独立成分分析を用いて人間の脳内の活動状況に関連した情報を抽出するための手法を提案している。そして、視覚性オドボール課題実験時の応答脳波に適用し、独立成分分析によって得られる分離信号にフィルタ処理を行うことで、単一試行脳波から事象関連電位や閃光刺激に応答した成分の抽出が可能であることを示した。さらに、推定信号の振幅と非ガウス性に基づいて原信号数を推定し、この推定信号数を用いて、再度、独立成分分析を行うことにより、単純に分離した場合よりも特徴抽出が容易になることを示した。また、前頭部で観測された脳波から思考に関連した成分が抽出できることを示すとともに、これらの特徴的なピークの出現時刻に着目して脳波変動識別を行った結果、高い精度の変動識別結果が得られることを確認し、提案する特徴抽出法と脳波変動識別法が、単一試行脳波解析に有効であることを確認した。

第6章では、本論文を総括し、本研究によって得られた成果についてまとめている。

学位論文審査の結果の要旨

身の回りの情報や信号には、本質的な情報と雑音が混合して含まれている。このような雑音が混入した混合信号から、本質的な信号を抽出するための手法として、近年、原信号に雑音の混入される過程が未知の場合に適用できるブラインド信号分離が注目を集めている。ブラインド信号分離問題を解く方法として、観測された混合信号が互いに統計的に独立な原信号の重ね合わせであるという仮定のもとで信号を分解する統計的手法である、独立成分分析法がある。

本論文は、実環境下でも有効に機能する雑音除去システムの構築を目的とした周波数領域での独立成

分分析を利用した雑音除去に関する研究と、単一試行で得られる実測脳波の解析を目的とした独立成分分析に基づく特徴抽出と変動識別に関する研究をとりまとめたものである。

本研究において得られた成果を要約すれば次の通りである。

1. 周波数領域での独立成分分析におけるスケールの不定性や成分置換の問題に関して、分割スペクトルを用いた解決法を提案し、この中で、スケールの不定性については、分割スペクトルが原信号と伝達関数の積で一意に表現できることを導出して分割スペクトルにはスケールの不定性がないことを明らかにするとともに、成分置換については、伝達関数の比を推定し、ゲインや位相の情報を利用して成分置換を解決する方法を提案した。
2. 音源分離の問題に関して、実環境下での伝達関数のゲインと位相が、周波数帯域やマイクロホン間隔、音源からマイクロホンまでの距離に依存して変動することを明らかにし、その事実からゲインと位相の情報を組み合わせた成分置換の解決法を提案するとともに、スケールの不定性と成分置換の問題が解決されて得られた復元音声から目的音声を抽出するために、話者音声の分布が騒音に比べて尖度が高いことを利用した成分置換の頻度情報に基づく話者音声の抽出法を提案した。
3. 音源分離実験において、提案された成分置換の解決法が、定常信号と非定常信号の組み合わせからなる混合信号のみならず、非定常雑音同士の混合信号に対しても高い解決率を持つことを確認するとともに、提案する目的音声の抽出法を用いることで、騒音環境下で発話された話者音声を正確に抽出できることを確認した。
4. 視覚性オドボール課題実験によって得られる視覚認識時の応答脳波に独立成分分析を適用して、得られた推定信号のピークの出現時刻から事象関連電位や閃光刺激に対する応答と考えられる成分を抽出し、そのピークの存在の有無で標的刺激呈示時と非標的刺激呈示時の脳波の識別を行う方法を提案した。また、分割信号に基づいてスケールを回復した推定信号から脳波の主要な信号数を推定し、前頭部で観測された脳波から思考に対する応答と考えられる特徴的な形状のピークが抽出可能であることを確認するとともに、その波形の形状に着目した脳波の識別法を提案した。脳波変動識別実験において、被験者や実験日によって抽出される特徴に若干の変動が見られるものの、個々の実験では一貫した特徴を示しており、本論文で提案した変動識別法を用いることにより、いずれも高い精度で識別できることを確認し、視覚認識に関連した情報の抽出が可能であることを示した。

以上のことから、本論文では実環境下でのブラインド信号分離に関する手法を具体化しており、今後、多くの分野において更なる発展が期待でき、情報工学の分野に寄与するところが大きい。

本論文に関し、調査委員会において、ICA 適用に関する評価方法、センサ数と原信号数との関係、本手法の適応範囲などについて質問がなされたが、いずれも著者から明快な回答が得られた。また公聴会においても、多数の出席者があり、周波数領域 ICA の適用における周波数刻み幅の設定法、成分置換解決時のゲイン特性、位相特性の利用方法、脳波処理結果の検討事項などについて質問がなされたが、いずれも著者の論理的な説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（情報工学）の学位に十分値するものであると判断した。