

氏名（本籍）	な とり たか ひろ 名 取 隆 廣（長野県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 928 号
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 18 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	状態空間モデルに着目した最小分散状態推定法とその応用

論文審査委員 （主査）教授 古川 利博
教授 浜田知久馬 教授 八嶋 弘幸
嘱託教授 太原 育夫 教授 谷口 行信
諏訪東京理科大学 工学・マネジメント研究科
工学・マネジメント専攻 准教授 田邊 造

論文内容の要旨

本論文は、状態空間モデルに着目した最小分散状態推定法を用いた MIMO MC-CDMA 通信方式におけるチャンネル推定、およびカラオケ音源の自動生成システムについて研究成果をまとめたものである。

本論文で扱う状態量とは、(i) 観測値からは直接得ることのできないシステム内部の状態量（例：加速度や速度）または、(ii) 外乱などの影響をうけた所望信号（例：音声信号や元画像など）を指す。これら状態量を直接得ることは稀であり、観測値に含まれる状態量を抽出する手法は様々なアプリケーションへの応用においても非常に重要である。

状態量を何らかの数学的手法を用いて推定する問題を状態量推定問題と呼ぶ。この問題を解く手法としてカルマンフィルタがあげられる、状態量の時間変化を表した状態方程式と状態量が外乱などの影響をうけた観測される過程を表した観測方程式により定式化された状態空間モデルを構成することにより状態量を推定する。

状態量の時間変化が各時刻間において相関を有する場合、一般的に状態量の時間変化は自己回帰(AR:Auto Regressive)モデルを用いて表現され、自己回帰係数(AR 係数)を算出することにより状態方程式を構成する。ここで、AR モデルに用いる次数(AR 次数)の決定問題が生じる。即ち、AR 次数が AR 係数の推定精度を決定づけるため、誤った次数を設定した場合、最終的に得られる状態量の推定精度が劣化する。また状態量の性質によっては AR

係数そのものの算出が困難な場合がある。

この問題点に対して田邊らは、雑音抑圧のための AR モデルを用いない有色駆動源を用いた状態量推定方法（以降、雑音抑圧法と呼ぶ）を提案した。これは文字通り、AR モデルを用いない代わりに状態方程式の駆動源に状態量と相関をもつ物理量を用いることで、状態量の時間変化を表している。AR モデルを用いないことにより、AR 次数の決定問題が解決され AR 係数の算出も必要がないため、計算コストが削減されているものの、推定される状態量についての議論がなされてこなかった。本研究の一つ目の成果は、この雑音抑圧法が最小分散推定法と呼ばれる手法に帰着されることを示したことである。

本研究の二つ目の成果は、上記の雑音抑圧法を MIMO MC-CDMA 通信方式に対する伝送路推定法に応用し、伝送路の推定精度が移動体の移動速度に依存しないことおよび、伝送路推定に要する演算量が軽減されることを示したことである。

MIMO MC-CDMA 通信方式とは、送信アンテナ数を増加させることでシャノン・ハートレーの通信容量の限界を超えた大容量通信を可能とする MIMO (Multi-input Multi-output) 通信方式、隣接する狭帯域のサブキャリア同士を直交させて周波数利用効率を高めることができ、また周波数選択性フェージングに強い OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 通信方式、さらに、同一時刻同一周波数を複数のユーザが共有して通信することができる CDMA (Code Division Multiple Access) を合わせて通信方式である。

一般的に無線通信は空間を伝搬媒体としているため、送信信号は伝送路変動の影響を受けシンボル間干渉 (ISI: Inter Symbol Interference) が生じ、通信品質の劣化要因となる。このような干渉を補償するために、適応的にかつ適切に伝送路を推定する必要がある。伝送路変動に対応し、リアルタイムに伝送路推定を行うためには、できるだけ直近の情報を活用し、かつ演算量を可能な限り軽減する必要がある。

このような観点から、受信側で既知な情報 (パイロット信号) を定期的に送信信号へ付加することで、伝送効率を犠牲にしてリアルタイムに伝送路を推定する手法は数多く研究されている。その中でも、AR モデルとカルマンフィルタ理論を用いた伝送路推定法は演算効率と推定精度のバランスに優れた手法である。この手法は、推定対象となる送受信アンテナ間ごとの伝送路変動を AR モデルにより定式化した上で、伝送路を推定するものである。しかし (1) 移動体に移動速度に対して適切な AR 次数が存在する、(2) MIMO 通信は、送受信アンテナ数の増加に伴いモデル化すべき伝送路数も増加するため、伝送路推定に要する演算量が増加する、というような問題点を有する。

そこで提案手法では、任意の送受信アンテナ間に対する伝送路変動を AR システムを用いずにモデル化した状態方程式、および伝送路の影響を受け、かつ回線雑音が重畳した受信信号を表す観測方程式からなる状態空間モデルを構成し、雑音抑圧法を適用することで伝送路を推定している。

提案手法の特徴は、伝送路推定精度が移動体の移動速度に依存せず、伝送路推定に要する演算量が提言されていることである。

提案手法の有効性は、伝送推定精度比較、シンボルエラーレート比較および演算量比較により示されている。

本研究の三つ目の成果は、上記雑音抑圧法を自動カラオケ音源生成に応用することにより、ステレオのカラオケ音源がリアルタイムに生成できる手法を提案したことである。

近年、スマートフォンに代表されるように小型で高性能な電子機器が急速に普及している。同時に通信速度の向上も相まって、音楽や映像データなどのデジタルコンテンツをいつでもどこでも楽しむことのできる時代となった。

広い世代に渡って親しまれている音楽コンテンツとして「カラオケ」が挙げられる。カラオケを楽しむためには音響設備の整った店(カラオケ BOX 等)を利用することが一般的である。しかしながら生活の多様化に伴い、時間的、金銭的な余裕が無くカラオケ BOX に行くことのできないユーザやカラオケに行く前に家で練習をしたいというユーザ、さらに花見や忘年会などの各種イベントの際にカラオケをしたいなど、ユーザはカラオケをする場所を限定しない新たな楽しみ方を求めていると考えられる。

本研究では、市販されている CD(Compact Disc)や音楽配信サイトなどからダウンロードできる、ヴォーカル信号に実際の楽器による伴奏信号が加わった楽曲信号より、手軽にリアルタイムでカラオケ信号を生成可能とする手法を提案した。

ステレオ構造を維持したカラオケ信号を生成可能な手法として、差信号合成型カラオケ信号生成法が挙げられる。これは、ステレオ楽曲信号を周波数領域に変換し左右チャンネルのスペクトルの差を算出した後に、差の小さいスペクトルをヴォーカルとして抑圧し、差の大きいスペクトルを暫定カラオケスペクトルとして抽出する手法である。この手法の特徴は、暫定カラオケスペクトルにミュージカルノイズが発生するものの、暫定カラオケ信号に左右楽曲信号の差信号を加えることにより、上記ノイズを抑圧できる点にある。しかし、この手法の差信号を加える操作は左右のチャンネルに対して同一成分の信号を加えることを意味する。その結果、左右のチャンネルに別々の成分が入るステレオ楽曲信号の構造を考慮していない補正方法のため、左チャンネルもしくは右チャンネルに本来は存在しない音が出力され、ステレオ感が減少する問題が生じる。

上記に鑑み、本論文ではヴォーカルが中央定位していることを前提とし、差信号合成型カラオケ信号生成法を従来手法と位置付け、雑音抑圧技術を応用したステレオのカラオケ信号生成手法を提案した。提案手法の各ステップは次のようになる。Step1 ではステレオ楽曲信号を周波数領域へ変換して得られたステレオ楽曲スペクトルに対して左右チャンネルのスペクトルの差を算出し、閾値を設けてヴォーカルスペクトルのみを抽出する。次いで、抽出したヴォーカルスペクトルを逆フーリエ変換(IFFT:Inverse Fast Fourier Transform)によりヴォーカル信号へ変換し、その分散値を計算する。Step2 では Step1 において算出されたヴォーカル信号の分散値を用いて、伴奏信号の時間変化を表す状態方程式、および伴奏信号にヴォーカル信号が加わりステレオ楽曲信号が生成される過程を表した観測方程式より構成される状態空間モデルに対して、雑音抑圧手法を適用することにより、カラオケ信号を生成する。

提案手法の特徴は、左右のチャンネルに対して独立した状態空間モデルを構成するため、(a) 生成されるカラオケ信号はステレオであること、(b) IFFT の回数が減少することによる演算量の軽減であり、ステレオ型のカラオケ信号が生成できる、ことである。

提案手法の有効性は、客観評価として左右チャンネルのスペクトログラム比較、既知カラオケ信号と提案手法によって得られたカラオケ信号との誤差評価および演算量比較、主観評価として MOS(Mean Opinion Score)による音質の評価により示される。また、提案手法をスマートフォン用 OS(Operating System)へ実装することで実用性の面からの有効性も示されている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、本研究の基礎となるモデルによる状態推定法が最小分散推定法と呼ばれる推定手法に帰着されることを示し、これが無線通信方式の一つである MIMO MC-CDMA 通信方式のチャンネル推定、およびカラオケ音源の自動生成に応用可能なことを述べている。

状態量の時間変化が各時刻間において相関を有する場合、一般的に状態量の時間変化は自己回帰(AR:Auto Regressive)モデルを用いて表現できる。ここで、AR モデルに用いる次数(AR 次数)が AR 係数の推定精度を決定付けるため、誤った次数を設定した場合、最終的に得られる状態量の推定精度が劣化するという問題が発生する。この問題に対して既に雑音抑圧のための有色駆動源を用いた状態量推定方法(以降、雑音抑圧法と呼ぶ)が提案されている。これは AR モデルを用いない代わりに状態方程式の駆動源に状態量と相関を有する物理量を用いることで、状態量の時間変化を表している。しかしながら、この手法は、AR 次数の決定問題が解決され、計算コストが削減されているものの、状態量の指定値の性質に関する議論がなされていなかった。

本論文でははじめに、状態遷移行列と観測行列の特徴的な構造および、雑音抑圧アルゴリズムにおける各時刻の最適推定値の算出に必要な部分のみに着目し、この手法によりある時刻における推定状態量が、推定誤差分散値、並びに観測雑音分散値を含むゲイン値と観測値との積で得られ、その結果この推定値が最小分散推定法であることが確認された。

上記の結果を受けて、本論文では上記雑音抑圧法が具体的な状態推定問題すなわち、(i) MIMO MC-CDMA 無線通信システムにおけるチャンネルゲインの推定問題、(ii)自動カラオケ音源生成システムにおける伴奏信号推定問題にそれぞれ応用し、その有効性について議論している。

まず、無線通信におけるチャンネルゲイン推定に応用した例である。MIMO MC-CDMA は、データ送信の際に同一時刻で同一周波数を複数ユーザが共有し複数アンテナを用いることで、周波数利用効率に優れ大容量通信を可能とする無線通信システムである。ここで無線通信は空間を伝搬媒体とするため、送信信号は伝送路変動(チャンネルゲイン)の影響を受けシンボル間干渉(ISI: Inter Symbol Interference)が生じ、通信品質の劣化が問題となる。このような干渉を補償するために、適応的にかつ適切にチャンネルゲインを推定する必要が

ある。

提案手法は、任意の送受信アンテナ間に対するチャンネルゲイン変動を AR システムを用いずにモデル化した状態方程式、およびチャンネルゲインの影響を受け、かつ回線雑音が重畳した受信信号を表す観測方程式からなる状態空間モデルを構成し、雑音抑圧法を適用することによりチャンネルゲインを推定している。

提案手法の特徴は、チャンネルゲイン推定精度が移動体の移動速度に依存せず、演算量が低減されていることである。提案手法の有効性は、チャンネルゲイン推定精度評価、シンボルエラーレート比較および演算量比較により示されている。

次いで、自動カラオケ音源生成システムに雑音抑圧法を応用した例である、広い世代に渡って親しまれている音楽コンテンツとして「カラオケ」が挙げられ、生活の多様化に伴い、ユーザはカラオケをする場所を限定しない新たな楽しみ方を求めていると考えられる。このような時代背景を鑑み本論文では、ヴォーカル信号に実際の楽器による伴奏信号が加わった楽曲信号より、手軽にリアルタイムでカラオケ信号を生成可能とする手法を提案している。

提案手法は、伴奏信号の時間変化を表す状態方程式および、伴奏信号にヴォーカル信号が加わりステレオ楽曲信号が生成される過程を表した観測方程式より構成される状態空間モデルに対して、雑音抑圧手法を適用することにより、カラオケ信号を生成する。

提案手法の特徴は、左右のチャンネルに対して独立した状態空間モデルを構成するため、(a) 生成されるカラオケ信号はステレオであること、(b) IFFT の回数が減少することによる演算量の軽減である。提案手法の有効性は、客観評価として左右チャンネルのスペクトログラム比較、既知カラオケ信号と提案手法によって得られたカラオケ信号との誤差評価および演算量比較、主観評価として MOS(Mean Opinion Score)による音質の評価により示される。また、提案手法をスマートフォン用 OS(Operating System)へ実装することで実用性の面からの有効性も示されている。

以上、本論文で得られた結果は各種多様な場面で状態量推定に関して、大いなるインパクトを与えるものであると考えられるため、審査の結果、本論文を博士（工学）の学位論文として十分に価値があるものと認める。