

	[21]
氏 名	きのした さとし 木下 聡
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記番号	理工博第 78 号
学位授与の日付	2020 年 3 月 31 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	マルチレート信号処理を用いた Volterra フィルタの演算量削減とそのスピーカ システムへの適用に関する研究
論文審査委員	主査教授 梶川 嘉延 副査教授 棟安 実治 副査教授 三好 誠司

論文内容の要旨

本論文は、マルチレート信号処理を用いた Volterra フィルタの演算量削減とそのスピーカシステムへの適用に関する研究成果をまとめたものである。スピーカシステムなどに含まれる線形歪みおよび非線形歪みを補正するために有効な手法である非線形逆システムに用いられる Volterra フィルタ、さらにはスピーカシステムの非線形性を表現可能な Volterra フィルタの係数を求める手法である適応 Volterra フィルタに着目している。これらのフィルタは演算量が莫大なため、組み込みシステムなどのソフトウェアでのリアルタイム実現が困難である。一方、スピーカシステムは一般的に最低共振周波数付近に大きな非線形歪みをもつため、それらの帯域を集中的に処理することで演算量を削減できる可能性がある。線形フィルタにおいては、マルチレート信号処理により帯域制限された信号に対してサンプリングレートを下げることで演算量を削減できるが、Volterra フィルタの出力信号は入力信号より帯域が広がるため、マルチレート信号処理をそのまま Volterra フィルタに適用できない。そこで、本論文では、マルチレート信号処理を Volterra フィルタに適用することを研究対象とし、(1) 帯域制限入力信号に対するマルチレート信号処理による Volterra フィルタの演算量削減手法、(2) それを全帯域に拡張したサブバンド適応 Volterra フィルタによる演算量削減手法、(3) それらを統合したフィルタ構造を簡略化したサブバンド適応 Volterra フィルタによる演算量削減手法を提案している。以下に本論文の構成を示す。

第 1 章は、緒論であり、研究背景とその目的、スピーカシステムの非線形歪みを補正するための非線形逆システムおよびスピーカシステムなどの非線形性を有するシステムを同定するための適応 Volterra フィルタについて述べている。

第 2 章では、本論文において特に重要となる離散 Volterra 級数展開と、その基本原理と

して Volterra 核の対称性について説明している。次に、離散 Volterra 級数の離散フーリエ変換 (DFT : Discrete Fourier Transform) と周波数領域 Volterra フィルタのフィルタリングに用いられる縮約について説明している。そして、Volterra 核の周波数応答である VFR (Volterra Frequency Response) の性質として、対称性、Volterra 核の実数性、エイリアシングが起きない VFR 領域について説明している。さらに、先行研究における Volterra フィルタの演算量削減手法とその問題点について述べている。

第 3 章では、第一の研究成果として、マルチレート信号処理を用いた Volterra フィルタについて述べている。線形化システムにおける Volterra フィルタでは入力信号の帯域制限が厳しくなるため、Volterra フィルタと入力信号との畳み込み演算において冗長性が生じる。そこで、マルチレート信号処理を Volterra フィルタに適用することでその冗長性を排除し、演算量を削減する手法について述べている。シミュレーションにおいてスピーカシステムの非線形歪みを補正する実験を行った結果、従来法と同程度の歪み補正効果を保ちながら演算量を約 1/4 に削減できることを実証している。

第 4 章では、第二の研究成果として、サブバンド適応 Volterra フィルタについて述べている。スピーカシステムのような非線形性を有する未知システムを同定する際に、第 3 章で述べた入力信号に対する帯域制限は不要となる。そこで、サブバンド適応 Volterra フィルタを用いた非線形システムの同定手法ならびにその各帯域における最適なタップ長を自動的に決定できる手法を提案している。サブバンド適応 Volterra フィルタをスピーカシステムの同定に適用した場合、シミュレーション結果より従来法と同程度の演算量で高い推定精度を実現できることを示すことで、提案法の有効性を示している。また、タップ長を自動制御するサブバンド適応 Volterra フィルタを音響エコーキャンセラへ適用し、本手法が従来法と比較して、2 倍早く収束し、より高い推定精度を実現できることを実証している。

第 5 章では、第三の研究成果として、フィルタ構造を簡略化したサブバンド Volterra フィルタについて述べている。サブバンド適応 Volterra フィルタの帯域分割数が多くなる場合、各帯域の組み合わせ数が指数関数的に増加するため、その構成が非常に複雑になる。そこで、第 4 章で述べたサブバンド適応 Volterra フィルタを入力信号変換ブロックによって 1 つの適応 Volterra フィルタで構成する手法を提案している。次に、提案するサブバンド Volterra フィルタのタップ長を短くした場合、帯域分割数によって得られる推定精度が異なることを示し、最も高い推定精度が得られる帯域分割数を自動的に求めることができるアルゴリズムも提案している。提案アルゴリズムによるサブバンド適応 Volterra フィルタによって非線形システムの同定シミュレーションを行った結果、従来法と同等の演算量で高い推定精度を実現できることを実証している。

第 6 章は結論であり、本研究によって得られた成果を要約するとともに、今後に残された課題について述べている。

論文審査結果の要旨

本論文ではスピーカシステムなどの非線形システムの同定を行うことができる適応 Volterra フィルタについて、その演算量を低減するためのマルチレート信号処理手法を提案している。スピーカシステムの場合、その非線形ひずみは最低共振周波数付近で顕著になることが知られているため、その性質を利用することで高い推定精度を保ったまま演算量を削減できる可能性がある。すなわち、対象となる非線形システムが周波数領域において何かしらの偏りがある場合、それを積極的に利用する機構を備えることが重要である。本論文で提案している Volterra フィルタへのマルチレート信号処理の適用手法は上記の特徴を積極的に利用可能とする方法となるため、その理論体系の確立は非常に重要であると言える。

まず、マルチレート信号処理による Volterra フィルタの演算量削減手法では、非線形歪み補正に利用する非線形逆システムにおいては、その入力信号の周波数帯域が制限されているという性質を利用している。具体的には、入力信号の帯域制限に伴う Volterra フィルタの冗長性を取り除くためにフィルタ係数の間引きを行うとともに、出力信号の帯域に応じてエイリアシングを回避するためにフィルタ係数の 0 補間を行っている。これらの処理により Volterra フィルタのほとんどの係数が 0 となるため、その出力演算において 0 係数部を無視することで演算量を削減することが可能となっている。提案する構成の有効性をスピーカシステムの非線形ひずみ補正実験を通じて検討しており、実験結果から推定精度を担保しながら演算量を約 $1/4$ に低減できることを実証している。

次にサブバンド構成を利用した Volterra フィルタの演算量削減手法では、スピーカシステムの同定において適応 Volterra フィルタの周波数帯域が制限されないという特徴を考慮している。帯域制限を行わないため、スピーカシステムの出力信号には多くのエイリアシング成分が含まれることになり、同定においてはそれらは外乱成分となる。したがって、外乱成分を抑圧しつつ、非線形性が顕著な低域に多くのフィルタタップを割り当てることが重要となる。そこでサブバンド Volterra フィルタにおいて各帯域で最適なタップ長を割り当てることのできる機構を導入することで、同一の演算量で高い推定精度を実現する方法を提案している。提案するサブバンド Volterra フィルタの有効性を音響エコーキャンセラへの適用例を通じて検証した結果、同一の演算量で従来の方法に比べて高いエコー抑圧量を実現できることを実証している。

最後に前述のサブバンド Volterra フィルタでは帯域分割数が増加するとそのシステム構造が非常に複雑になることから、分割数によらず同一のフィルタ構造で実現可能な手法を提案している。具体的には、入力信号ベクトルならびに対応するフィルタ係数を適切に並べ替えることにより、サブバンド Volterra フィルタは分割数によらずただ 1 つの Volterra フィルタで表現できることを示している。さらに最適な分割数を自動的に探索するアルゴ

リズムも提案することで、前述の2つの提案手法を統合したフィルタ構成を実現している。そして、従来の演算量削減手法との比較実験を通じて、提案手法は同一の演算量で高い推定精度を実現できることを実証している。

以上の3つの成果から、スピーカシステムなどの非線形システムを高い推定精度と低演算量を両立しながら同定できることが実証されたため、携帯情報端末などさまざまなところで実装されている安価なスピーカシステムの音質改善に今後大きく寄与するものと思われる。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。