

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760271

研究課題名 (和文) グラミアン保存周波数変換を用いた高性能適応信号処理システムの開発

研究課題名 (英文) Development of High-Performance Adaptive Signal Processing Systems Using Gramian-Preserving Frequency Transformation

研究代表者

越田 俊介 (KOSHITA SHUNSUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70431533

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、線形離散時間システムのグラミアン保存周波数変換をデジタル信号処理に応用して、精度の高い構造のもとでフィルタ特性を自由に変更することが可能な新しい高精度可変デジタルフィルタの設計・実現手法を確立した。さらに、この高精度可変デジタルフィルタを適応信号処理に応用することで、従来の可変デジタルフィルタに基づく適応信号処理システムのさらなる高性能化を達成した。

研究成果の概要 (英文)：

This research project has established a new method for design and realization of high-accuracy variable digital filters that simultaneously attain high-accuracy structure and arbitrary control of filter characteristics. This result has been obtained by applying the Gramian-preserving frequency transformation for linear discrete-time systems to the field of digital signal processing. In addition, this research project has applied the proposed high-accuracy variable digital filters to adaptive signal processing and achieved significant performance improvement of the adaptive signal processing systems based on variable digital filters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学，制御工学，適応信号処理，可変デジタルフィルタ，周波数変換，状態方程式，可制御性グラミアン，可観測性グラミアン

1. 研究開始当初の背景

デジタル信号処理における重要な手法の1つとして「可変デジタルフィルタ」がある。可変デジタルフィルタは、少数のパラメータの調節という簡単な仕組みによって、フィルタ特性の形（低域通過・帯域通過

など）を維持したまま遮断周波数をリアルタイムで変化させるという手法である。本研究代表者のグループでは、この可変デジタルフィルタを適応信号処理に応用したシステムをこれまでに提案している。そして、提案されたシステムによって、少ない計算量のも

とで高い信号処理能力が得られることを示している。

しかし、これまでの研究で提案した適応信号処理システムでは、フィルタ構造に関する問題が全く考慮されていない。そのため、これまでのシステムでは数値データの量子化の影響を受けやすいという問題がある。すなわち、システムを有限語長のハードウェア上で実現した際に、可変デジタルフィルタの特性が理論上の特性に対して劣化するという問題が発生する。この問題を解決するためには、可変デジタルフィルタの実現手法および適応信号処理システムの実現手法の両方において、構造に関する問題を考慮した新しいシステム実現手法を確立することが必要とされる。

本研究では、上述の新しい手法を確立するために、本研究代表者がこれまでに提案した「グラミアン保存周波数変換」が有効であると考え、グラミアン保存周波数変換とは、システムの構造の性質を決定する量として知られる「可制御性・可観測性グラミアン」を変化させずに、システムのみを調節することを可能とした理論である。したがって、この理論を可変デジタルフィルタの実現手法に応用することによって、量子化による影響を受けにくい構造を持たせた高精度な可変デジタルフィルタの実現が可能になるものとする。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は2つある。1つは、可変デジタルフィルタの高精度化を達成することである。可変デジタルフィルタの高精度化に関する研究成果はこれまでもいくつか報告されているが、それらの手法では、適用可能なフィルタ特性およびフィルタ構造の範囲が簡単なものに制限されている。そこで、本研究課題では、この制限を不要とし、任意の特性・構造に適用可能な高精度可変デジタルフィルタの実現理論を確立することを目的とする。もう1つの目的は、上述の高精度可変デジタルフィルタを適応信号処理へ応用して、従来よりも性能の高い適応信号処理システムを実現することである。

3. 研究の方法

本研究を遂行するにあたり、まず、高精度可変デジタルフィルタの新しい実現法を確立する。この目的を達成するために、前述のグラミアン保存周波数変換を可変デジタルフィルタの設計・実現に応用する。次に、確立した高精度可変デジタルフィルタの実現法を適応信号処理へ応用することで、高性能適応信号処理システムの実現を達成する。具体的な研究内容は下記の通りである。

(1) 高精度可変デジタルフィルタの実現に

ついて

- ① 本研究代表者がこれまでに提案しているグラミアン保存周波数変換を可変デジタルフィルタの実現に応用し、量子化誤差の小さい構造を有する高精度可変デジタルフィルタの実現理論を確立する。
- ② 確立した理論によって得られる可変デジタルフィルタの精度を、係数感度・丸め誤差・リミットサイクルなどの観点から定量的に評価する。この評価によって、本研究で提案する可変デジタルフィルタの理論の有効性を実証する。

(2) 高性能適応信号処理システムの実現について

- ① 高精度可変デジタルフィルタを用いた適応信号処理システムの実現を達成するために、まず、従来の手法を拡張することを考える。従来の適応信号処理システムで用いていた可変デジタルフィルタでは、フィルタの次数が2次に制限されている。よく知られている通り、2次のフィルタでは次数が低いため、遷移域や阻止域減衰量といった仕様において、システム利用者の要求を満足できないことが多い。したがって、上述の高精度可変デジタルフィルタをそのまま従来の適応信号処理システムに応用したとしても、その効果は十分ではないと思われる。そこで本研究ではまず、従来の適応信号処理システムを拡張して、高次の可変デジタルフィルタの適応的な制御を簡単な方法で可能とする手法を確立する。
- ② 上記の高次の可変デジタルフィルタに基づく適応信号処理システムに対して、前述の高精度可変デジタルフィルタの実現法を適用する。これによって、可変デジタルフィルタに基づく適応信号処理システムの高性能化を達成する。

上述の研究において必要とされる計算機シミュレーションと性能評価を円滑に遂行するために、信号処理・回路解析用ソフトウェアを利用する。

4. 研究成果

本研究課題の成果は下記の通りである。

- (1) 高精度可変デジタルフィルタの実現に関する成果
 - ① 本研究では、グラミアン保存周波数変換を用いて、従来の手法におけるフィルタ特性の制限を一切必要と

しない新しい高精度可変デジタルフィルタの実現法を提案した。提案法では、まず低域通過型のデジタルフィルタを高精度な構造としてあらかじめ与えておき、そのフィルタにおける遅延素子を全域通過フィルタで置き換えて、可変特性を実現する。この操作そのものは従来の可変デジタルフィルタの設計法と同一であるが、本研究による提案法のポイントは、この全域通過フィルタの構造を正規化ラティス構造として与え、そのラティス係数を特性制御用パラメータと簡潔な形で対応づけた点にある。結果として、はじめに与えた低域通過型フィルタの精度を高く保ったまま、特性を自由にかつ容易に変更することを可能とした新しい可変デジタルフィルタの実現法が確立された。

- ② 提案する高精度可変デジタルフィルタの精度を定量的に評価した。結果として、本研究による可変デジタルフィルタの精度は、従来よりも高くなることを理論的かつ実験的に示した。すなわち、本研究による可変デジタルフィルタでは、従来の可変デジタルフィルタよりも係数感度や丸め誤差を低減できる。さらに、本研究による可変デジタルフィルタでは、特性をどのように変更しても常にリミットサイクルを発生させないようにすることが可能である。
- ③ 上述の成果に関連した別の成果として、高精度可変デジタルフィルタの実現において重要な役割を果たしたグラミアン保存周波数変換の理論を、線形連続時間システムの領域に拡張した。この成果によって、デジタルフィルタの分野だけでなくアナログフィルタの分野においても、高精度な構造を保ったまま特性を自由に変更することが可能であることを証明した。

(2) 高性能適応信号処理システムの実現に関する成果

- ① 従来の可変デジタルフィルタに基づく適応信号処理システムを拡張した手法として、高次の可変フィルタを用いた適応信号処理の手法を提案した。そして、提案手法が従来法と比べて雑音除去性能に優れていることを実験により定量的に示した。提案法のポイントは、ブロック図を用いて周波数変換を記述

し、これによって可変フィルタの入出力関係および適応アルゴリズムの数式を簡潔な形で記述した点にある。これによって、フィルタの次数を高くした場合、従来の方法では実現が非常に困難になると指摘されていたが、提案法では、簡単に可変特性および適応システムを実現することを可能とした。なお、提案法の雑音除去性能の定量的な性能評価については、現時点では実験的に示しているが、その理論的な証明については、今後進めていく予定である。

- ② 上述の成果を用いて、グラミアン保存周波数変換に基づく状態空間形の可変フィルタを用いた新しい適応信号処理システムを提案した。そして、この提案法がもたらす演算精度の向上によって、従来よりも雑音除去性能を向上できることを実験的に示した。さらに、提案法では、演算精度の向上だけでなく、適応アルゴリズムにおいても有効な成果が得られた。従来の適応アルゴリズムでは勾配法を用いているが、勾配法では、フィルタの遷移域幅が狭い場合に最適解への収束が遅くなる場合があることが指摘されていた。これに対し提案法では、新しい適応アルゴリズムとして、フィルタの内部状態に基づく係数更新式を用いている。この結果、提案法ではフィルタの遷移域幅が狭い場合でも、良好な収束特性が得られた。この特性の改善は、現時点では実験的に示しているのみであり、理論的な解析が今後の課題である。

以上に述べた研究成果により、可変デジタルフィルタに基づく適応信号処理システムの高性能化が達成された。この成果により、可変デジタルフィルタの実現手法およびその応用技術が発展し、さらに適応信号処理の分野においても新しい重要な知見が得られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Gramian-Preserving Frequency Transformation and Its Application to Analog Filter Design,” IEEE

Transactions on Circuits and Systems
I: Regular Papers, 査読有, vol. 58, no.
3, pp. 493-506, March 2011.

[学会発表] (計 12 件)

- ① 三好啓太, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “状態空間形の可変帯域阻止フィルタを用いた狭帯域雑音除去,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 16 日, 東京
- ② 熊本裕樹, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “高次の可変帯域阻止フィルタに基づく狭帯域雑音除去システムの定量的な性能評価,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 16 日, 東京
- ③ 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “ステップ応答を用いた状態空間形の可変低域通過デジタルフィルタの実現,” 第 25 回信号処理シンポジウム, 2010 年 11 月 25 日, 奈良
- ④ Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Realization of Variable Low-Pass State-Space Digital Filters Using Step Responses,” 2010 IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, 2010 年 10 月 28 日, 東京
- ⑤ 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “状態空間形の可変低域通過デジタルフィルタのためのステップ応答発生システムの改良,” 2010 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, 2010 年 9 月 14 日, 大阪
- ⑥ 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “状態空間表現とステップ応答を用いた高精度可変低域通過デジタルフィルタ,” 平成 22 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2010 年 8 月 27 日, 八戸
- ⑦ Masahide Abe, Shunsuke Koshita, Masayuki Kawamata, Shogo Miura, Tomoyuki Kawasaki and Katsuhiko Sekiguchi, “Adaptive Filtering for Noise Reduction in the Input Circuits of Protection Relay Systems,” 2010 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2010 年 7 月 28 日, ミネアポリス (アメリカ合衆国)
- ⑧ Shunsuke Koshita, Keita Miyoshi, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Realization of Variable Band-Pass/Band-Stop IIR Digital Filters Using Gramian-Preserving Frequency Transformation,” 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2010 年 6 月 1 日, パリ (フランス)
- ⑨ 三好啓太, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “グラミアン保存周波数変換を用いた高精度可変帯域通過・阻止フィルタの実現,” 第 23 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2010 年 4 月 19 日, 軽井沢
- ⑩ 熊本裕樹, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “高次の可変デジタルフィルタを用いた狭帯域雑音除去システムの改良,” 第 23 回 回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2010 年 4 月 19 日, 軽井沢
- ⑪ 三好啓太, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “平衡形を有する高精度可変帯域通過デジタルフィルタの実現,” 平成 21 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2009 年 8 月 21 日, 仙台
- ⑫ 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “高次の可変デジタルフィルタを用いた狭帯域信号検出システムに関する検討,” 平成 21 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2009 年 8 月 21 日, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越田 俊介 (KOSHITA SHUNSUKE)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70431533

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし