

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04478

研究課題名（和文）自由自在な特性調節が可能な可変デジタルフィルタの高精度化のための基盤技術開拓

研究課題名（英文）Development of Fundamental Technology for High-Precision Variable Digital Filters with Flexible Characteristic Control

研究代表者

越田 俊介 (Koshita, Shunsuke)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70431533

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：信号処理アプリケーションの高度化に伴い、遮断周波数や遷移帯域幅など様々な特性を自由にリアルタイム調節できる可変デジタルフィルタの需要が高まっている。一方、デジタルフィルタをハードウェア上に実装した場合、ビット長が有限であることに起因する特性劣化が必ず生じる。本研究では、この特性劣化を低減できる高精度な可変デジタルフィルタの実現理論を確立した。また、この理論を用いると、既存の手法に対し約20ビット削減しても高い精度を保つことを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

可変デジタルフィルタは半世紀にわたって研究され、現在では様々な特性の要素をリアルタイム調節可能である。しかし既存の技術では、有限ビット長のハードウェア上に可変フィルタを実装したときの特性劣化の問題が考慮されていないため、実装時の性能低下の問題が避けられなかった。本研究により、この問題を理論と実用の両方の面で解決する基盤技術が開拓された。さらに、可変フィルタに対して構造最適化を初めて導入するという新概念の理論が確立されたとともに、世界最高の精度を達成するきわめて実用的な可変フィルタが利用可能となった。これらの成果は、種々の信号処理アプリケーションの性能向上をもたらすと期待できる。

研究成果の概要（英文）：Recent advance of signal processing applications has increased demand for variable digital filters with real-time control of various frequency characteristics such as cut-off frequency and transient bandwidth. On the other hand, digital filters that are implemented on hardware inevitably suffer from degradation on filter characteristics due to finite number of bit length. This research project has established a unified theory on realization of high-precision variable digital filters that sufficiently suppress the degradation. In addition, experimental results show that the variable digital filters based on the proposed theory achieve high precision with around 20-bit reduction compared to the existing technologies.

研究分野：信号処理

キーワード：信号処理 可変デジタルフィルタ 有限ビット長 演算精度 フィルタ構造

1. 研究開始当初の背景

デジタルフィルタは信号処理分野の基盤技術として知られているが、現在では境界領域の基盤技術にもなっており、通信・音声音響・画像・医療工学など非常に幅広いアプリケーションにおいて用いられている。近年ではそのアプリケーションの高度化に伴い、フィルタリングの実行中に特性をリアルタイムで調節できる可変デジタルフィルタへの需要が高まっている。可変デジタルフィルタは半世紀にわたって研究され、現在では遮断周波数・遷移域幅・阻止域減衰量等、様々な特性の要素を自由自在にリアルタイム調節できるようになった。しかし既存の研究では、可変フィルタを有限ビット長のハードウェア上に実装した場合に生じる量子化誤差の問題が考慮されていないため、有限ビット環境での可変フィルタは量子化によって大きな特性劣化を生じやすいという問題があった。

上述の問題について、特性を固定としたデジタルフィルタに対しては、フィルタ構造を適切に選ぶ(すなわち最適化する)ことによって量子化誤差を最小化できることが知られている。しかし可変デジタルフィルタにおいては、フィルタ構造の最適化とフィルタ特性のリアルタイム調節を同時に実現する方法が知られていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、フィルタ特性の様々な要素を自由自在に変更できる可変デジタルフィルタをターゲットとして、高精度な構造に基づいた可変フィルタを得るための基盤技術を統一的な方法論として確立することを目的とする。この目的を達成するため、本研究では以下(1)-(3)に示す課題を設定して、研究を遂行した。

- (1) 回路理論に基づく構造、すなわち電気回路の分野で有用とされる構造を可変デジタルフィルタに適用することで、高精度な可変デジタルフィルタを得る。
- (2) 課題(1)と並行して、数値最適化に基づく構造をもつ可変デジタルフィルタの設計・実現法を確立する。
- (3) 以上に述べた課題の達成によって得られる高精度可変フィルタを有限ビット長の環境上で実装し、従来の可変フィルタと比べてどの程度のビット削減が可能かを評価する。

3. 研究の方法

上述の(1)-(3)それぞれの研究課題を遂行する方法は、下記の通りである。

まず課題(1)では、可変としたい要素の特性をわざわざ変えた複数の固定フィルタを用意する。次に、これらの固定フィルタそれぞれの伝達関数を変換し、回路理論に基づくフィルタ構造に変換する。さらに、特性を調節するための可変パラメータを用意し、それぞれのフィルタ構造に対して異なる値のパラメータを割り当てる。そして、これらのフィルタ構造における各乗算器の係数を近似(カーブフィッティング)して、可変パラメータの多項式を得る。この多項式が所望の可変フィルタの係数となり、多項式における可変パラメータの値を変更することで、特性のリアルタイム調節が可能となる。このように、回路理論に基づくフィルタ構造の係数の多項式近似によって、所望の高精度可変フィルタが得られる。

課題(2)では、課題(1)と同様のアプローチに基づき、数値最適化に基づく固定フィルタを複数用意し、それらのフィルタの係数を多項式近似する。ただし、数値最適化によるフィルタ構造は1つの伝達関数から一意に定まるとは限らないため、多項式近似に困難が生じる可能性がある。そこで本課題ではまず、扱いの容易な1次・2次の低次数フィルタを対象として課題を遂行する。この達成後、高次数(3次以上)の可変フィルタを対象として、数値最適化に基づく構造をもたせるための手法を確立する。

課題(3)では、課題(1)と(2)によって得られる高精度可変デジタルフィルタを実装し、実装時のビット長とフィルタ特性の劣化の度合いとの関係を、実験的に評価する。これによって、本研究課題に基づく可変デジタルフィルタが既存の技術よりも有効となることを実証する。

4. 研究成果

課題(1)では、電気回路の分野で有用な梯子形や格子形に基づく構造を、可変デジタルフィルタに適用することに成功した。これによって、梯子形・格子形に本来備わっている高い演算精度を維持しつつ、自由自在な特性調節を可能とする高精度可変デジタルフィルタの実現理論を確立できた。

課題(2)では、高精度フィルタ構造を2次セクションおよびL1/L2混合係数感度最小構造に限定して、カーブフィッティングと多項式近似を適用した。2次セクションに基づくL1/L2混合係数感度最小構造では、与えられた伝達関数に対して所望のフィルタ係数を一意に定めることが可能であることが、既存の研究にて証明されている。このことを用いて本研究課題を遂行したところ、数値最適化に基づく高精度フィルタ構造と自由自在な特性調節の両方を実現する高精度

可変デジタルフィルタを得ることができた。そして、得られた可変デジタルフィルタの係数感度を数値計算にて評価した結果、本研究による可変デジタルフィルタの係数感度が理論的な最小値を近似的に達成していることを実証した。

課題(3)では、量子化の影響を受けやすい狭帯域の可変帯域阻止フィルタに焦点を当てて、演算精度を評価した。その結果、たとえばフィルタ次数を6次とした可変帯域阻止フィルタとした用いた場合には、本研究による手法は既存の手法と比べて20ビット程度の削減が可能となることが示された。さらに本研究では、この成果を医工学へ応用し、心電図波形の雑音除去システムの実装において本研究が有効となることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 越田 俊介	4. 巻 24
2. 論文標題 医療・ヘルスケアのための高性能可変デジタルフィルタ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地域ケアリング	6. 最初と最後の頁 86-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 越田 俊介	4. 巻 25
2. 論文標題 正弦波検出技術を用いた生体信号の雑音抑制	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 地域ケアリング	6. 最初と最後の頁 48-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Koshita	4. 巻 E106-A
2. 論文標題 Analytical Minimization of L2-Sensitivity for All-Pass Fractional Delay Digital Filters with Normalized Lattice Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 486-489
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2022sm10004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Koshita	4. 巻 -
2. 論文標題 On Coefficient Sensitivity of All-Pass Fractional Delay Digital Filters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia	6. 最初と最後の頁 101-103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34385/proc.66.SS2-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Koshita	4. 巻 -
2. 論文標題 On Quantization Effects of Adaptive Notch Filters With Simplified Lattice Algorithm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies	6. 最初と最後の頁 140-144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISCIT52804.2021.9590608	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Koshita	4. 巻 -
2. 論文標題 On Optimal Realizations for All-Pass Fractional Delay Digital Filters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference	6. 最初と最後の頁 222-225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 越田 俊介
2. 発表標題 2次離散時間全極モデルのHankel特異値の記述について
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 越田 俊介
2. 発表標題 全域通過特性に基づく非整数遅延デジタルフィルタの係数量子化に対する性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 回路とシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越田 俊介
2. 発表標題 状態変数を用いた係数更新に基づく適応ノッチフィルタにおける係数量子化の影響について
3. 学会等名 電気学会 システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越田 俊介
2. 発表標題 適応バンドパス・バンドストップフィルタ
3. 学会等名 電子情報通信学会 スマートインフォメディアシステム研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 電気学会・デジタル信号処理システム最適化技術調査専門委員会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 282
3. 書名 デジタル信号処理におけるシステム最適化技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	八巻 俊輔 (Yamaki Shunsuke) (10534076)	東北工業大学・工学部・准教授 (31303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------