

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06049

研究課題名(和文) 確率的演算に基づく次世代デジタルフィルタに対する統一的な最適構造合成理論

研究課題名(英文) Unified Theory for Synthesis of Optimal Structures of Next-Generation Digital Filters Based on Stochastic Computation

研究代表者

越田 俊介 (Koshita, Shunsuke)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：70431533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、確率的演算を用いた次世代デジタルフィルタに対して、従来手法よりも高い演算精度を達成できるフィルタ構造を与えるための統一的な方法論を確立した。まず、確率的FIRフィルタにおいて、決定論的演算と確率的演算を併用したアプローチを用いたフィルタ合成法を与えた。次に、確率的IIRフィルタにおいて、縦続形構造とスケーリングおよび状態方程式を用いて、演算精度を向上させるフィルタ構造の合成理論を確立した。そして、これらの成果によって得られるフィルタをハードウェア実装し、提案法が最大で40dBの特性改善を達成できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：This research project has established theoretical approaches on unified synthesis of filter structures that achieve higher arithmetic precision of stochastic computation-based next-generation digital filters than conventional methods. First, a unified synthesis method has been developed for stochastic FIR filters, where the method makes use of the deterministic and stochastic hybrid computation. Next, two synthesis methods have been developed for stochastic IIR filters to improve arithmetic precision. The proposed methods respectively make use of the scaled/cascaded structure and the state-space equation. Furthermore, hardware implementation using the proposed theory has been conducted and it has been demonstrated that the proposed method can attain at most 40dB improvement in filter characteristics.

研究分野：工学

キーワード：電気電子工学 通信・ネットワーク工学 制御工学 信号処理 デジタルフィルタ 演算精度 確率的演算

1. 研究開始当初の背景

デジタルフィルタは、情報通信・音声・画像・制御・電力・医療など、非常に幅広い分野において用いられている重要なデバイスであり、それゆえに、デジタルフィルタの実装コスト削減と性能向上は非常に重要な研究課題である。デジタルフィルタは加算と乗算を主体とした算術演算に基づいて実装されるが、近年、従来の算術演算とは異なる「確率的演算」に基づいた実装方法が、次世代デジタルフィルタとして注目を集めている。この方法により、従来よりも遥かに実装コストの小さいデジタルフィルタを得ることが可能となるが、その一方で、確率的演算により生じる性能低下(すなわち特性劣化)が従来よりも大きくなってしまふことが問題点として指摘されている。この特性劣化を低減する手法が近年さまざま提案されているが、それらの手法は全て試行錯誤に基づいて得られたものである。ゆえに現時点では、次世代デジタルフィルタに対し、特性劣化の低減を実現し性能を向上させるための理論は確立されていない。

2. 研究の目的

上述の背景を受け、本研究課題では、実装コストを従来よりも大幅に削減可能な次世代デジタルフィルタをターゲットとして、数値データの確率的な挙動によって生じるフィルタ特性の劣化を低減できるフィルタ構造(すなわち、乗算器と加算器の配置方法)を与えるための統一的な理論を確立することを目的とする。デジタルフィルタはフィードバックループの有無により、FIR(Finite Impulse Response)フィルタと IIR(Infinite Impulse Response)フィルタとに大別され、かつ従来のデジタルフィルタ理論ではこれら二つのクラスそれぞれに対して性能を向上させるための理論が存在するため、本研究でも同様にして、これら二つのクラスそれぞれに対する最適構造を与えるための理論を別々に確立する。

3. 研究の方法

本研究課題では、下記の研究方法に基づいて、確率的演算を用いた FIR フィルタと IIR フィルタそれぞれに対して最適なフィルタ構造を与えるための統一的理論を確立する。

(1) 確率的 FIR フィルタの最適構造の合成理論の確立

本課題では、これまでに提案されている確率的 FIR フィルタよりもさらに高い演算精度を達成できるフィルタ構造を与えるために、決定論的 2 値演算と確率的演算を併用したハイブリッド実現のアプローチを用いて FIR フィルタ構造を与える。具体的には、従来手法では加算器をマルチプレクサによって実現していたが、この方法ではデータの確率的挙動による演

算誤差が大きくなってしまふため、本研究では、加算器を決定論的 2 値演算に基づいて実現し、精度向上を図る。さらに、確率的乗算を行う際に決定論的 2 値演算のビットシフトを併用することにより、確率的乗算の演算精度をも向上させる。また、線形位相 FIR フィルタの係数が対称となることを利用して、確率的 FIR フィルタ構造に転置形を適用し、さらなる実装コスト削減を達成する。

(2) 確率的 IIR フィルタの最適構造の合成理論の確立

IIR フィルタでは、FIR フィルタと比べて実装時に様々な問題が生じる。たとえば古典的な決定論的 2 値演算に基づく IIR フィルタでは、係数感度や丸め誤差、およびオーバーフロー発振などの問題が顕著になる。この問題は確率的演算においても同様に生ずることが確認されたため、まず本研究では、確率的 IIR フィルタに対して縦続形構造とスケーリングを併用し、これらの問題を低減する。さらに、状態方程式のアプローチを用いて、演算精度を最大化する構造を統一的に求める方法を与える。

(3) 得られた理論に基づく次世代デジタルフィルタのハードウェア実装および性能評価

本課題では、上記(1)および(2)によって得られた理論に基づいて実現される次世代デジタルフィルタを専用ハードウェア上に実装し、その性能を評価する。

4. 研究成果

本研究課題の成果は以下の通りである。

(1) 確率的 FIR フィルタの実現理論

先述したハイブリッド実現・ビットシフト・転置形構造のアプローチに基づき、従来よりも演算精度の向上を達成する確率的 FIR フィルタを実現するための統一的な方法論を確立することに成功した。

(2) 確率的 IIR フィルタの実現理論

縦続形構造とスケーリングのアプローチを用いて、従来よりも係数感度・丸め誤差およびオーバーフロー発振の問題を低減できる確率的 IIR フィルタを実現するための理論を確立できた。さらに、状態方程式を利用して、演算精度の高い構造を求める方法論も得られた。ただし、確率的演算に基づく精度の数学的な解析とその最大化については、まだ十分ではなく、それゆえに今後さらに検討していく必要がある。

(3) ハードウェア実装による性能評価

上記(1)と(2)の成果を用いて得られるフィルタを専用ハードウェアに実装し、従来手法よりも遥かに優れた演算精度が達成できることを実証した。たとえば FIR フィルタの場合、従来法と比較して 40dB の特性改善を達成できた。

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 17 件)

Shunsuke Koshita, Naoya Onizawa, Masahide Abe, Takahiro Hanyu and Masayuki Kawamata, “High-Precision Stochastic State-Space Digital Filters Based on Minimum Roundoff Noise Structure,” Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 査読有, May 2018. (印刷中)

Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Minimum Roundoff Noise Realization for Variable IIR Digital Based on M-D Polynomial Approximation,” Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 査読有, May 2018. (印刷中)

Naoya Onizawa, Shunsuke Koshita, Shuichi Sakamoto, Masayuki Kawamata, and Takahiro Hanyu, “Design of Stochastic Asymmetric Compensation Filters for Auditory Signal Processing,” Proceedings of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, 査読有, pp. 1315-1319, November 2017. <https://doi.org/10.1109/GlobalSIP.2017.8309174>

Naoya Onizawa, Shunsuke Koshita, Shuichi Sakamoto, Masahide Abe, Masayuki Kawamata and Takahiro Hanyu, “Area/Energy-Efficient Gammatone Filters Based on Stochastic Computation,” IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 査読有, vol. 25, no. 10, pp. 2724-2735, October 2017. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2017.2687404>

Shunsuke Koshita, Naoya Onizawa, Masahide Abe, Takahiro Hanyu and Masayuki Kawamata, “High-Accuracy and Area-Efficient Stochastic FIR Digital Filters Based on Hybrid Computation,” IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, vol. E100-D, no. 8, pp. 1592-1602, August 2017. <http://doi.org/10.1587/transinf.2016LOP0011>

Shunsuke Koshita, “Revisiting State-Space Approach to Digital Filters,” Proceedings of The 32nd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, 査読有, pp. 1-3, July 2017.

Shunsuke Koshita, Hiroyuki Munakata, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Correct Formulation of Gradient Characteristics for Adaptive Notch Filters Based on Monotonically Increasing Gradient Algorithm,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E100-A, no. 7, pp. 1557-1561, July 2017. <https://doi.org/10.1587/transfun.E100.A.1557>

Naoya Onizawa, Shunsuke Koshita, Shuichi Sakamoto, Masayuki Kawamata, and Takahiro Hanyu, “Evaluation of Stochastic Cascaded IIR Filters,” Proceedings of IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic, 査読有, pp. 224-229, May 2017. <https://doi.org/10.1109/ISMVL.2017.25>

Shunsuke Koshita, Yuki Noguchi, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Analysis of Frequency Estimation MSE for All-Pass-Based Adaptive IIR Notch Filters With Normalized Lattice Structure,” Signal Processing, 査読有, vol. 132, pp. 85-95, March 2017. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.09.019>

Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Variable State-Space Digital Filters Using Series Approximations,” Digital Signal Processing, 査読有, vol. 60, pp. 338-349, January 2017. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2016.10.010>

Hiroyuki Munakata, Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Improvement of Convergence Speed for Adaptive

Notch Filter Based on Simplified Lattice Algorithm Using Pilot Notch filters,” Proceedings of IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, 査読有, pp. 312-216, September 2016.
<https://doi.org/10.1109/ICNIDC.2016.7974587>

Shunsuke Koshita, Masahide Abe, Masayuki Kawamata, Takaaki Ohnari, Tomoyuki Kawasaki and Shogo Miura, “A Simple and Explicit Formulation of Non-Unique Wiener Filters for Linear Predictor with Rank-Deficient Autocorrelation Matrix,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E99-A, no. 8, pp. 1614-1617, August 2016.
<http://doi.org/10.1587/transfun.E99.A.1614>

Shunsuke Koshita, Naoya Onizawa, Masahide Abe, Takahiro Hanyu and Masayuki Kawamata, “Realization of FIR Digital Filters Based on Stochastic/Binary Hybrid Computation,” Proceedings of IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic, 査読有, pp. 223-228, May 2016.
<http://doi.org/10.1109/ISMVL.2016.40>

Naoya Onizawa, Shunsuke Koshita, Shuichi Sakamoto, Masahide Abe, Masayuki Kawamata and Takahiro Hanyu, “Gammatone Filter Based on Stochastic Computation,” Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 査読有, pp. 1036-1040, March 2016.
<http://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7471833>

Hiroyuki Munakata, Shunsuke Koshita, Masahide Abe and Masayuki Kawamata, “Performance Comparison of Adaptive Notch Filters With Respect to the Output Power Due to the White Noise Input,” Proceedings of International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, 査読有, pp. 30-34, August 2015.

Shunsuke Koshita, Masahide Abe, Masayuki Kawamata, Takaaki Ohnari,

Tomoyuki Kawasaki and Shogo Miura, “On Non-Unique Wiener Filters for Enhancement of Single Sinusoid in Noise-Free Case,” Proceedings of International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, 査読有, pp. 26-29, August 2015.

Naoya Onizawa, Shunsuke Koshita and Takahiro Hanyu, “Scaled IIR Filter Based on Stochastic Computation,” Proceedings of IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 査読有, pp. 297-300, August 2015.
<https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2015.7282118>

〔学会発表〕(計 21 件)

越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “2次システムの平衡形実現と多項式近似を用いた可変デジタルフィルタ,” 電気学会システム研究会, 2017年9月16日, 東京

越田俊介, 鬼沢直哉, 阿部正英, 羽生貴弘, 川又政征, “デジタル信号処理におけるストカスティック演算の課題,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2017年9月14日, 東京

越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “多項式近似に基づく状態空間形の可変デジタルフィルタの実現に関する一検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2017年8月25日, 東京

鎌田裕成, 越田俊介, 鬼沢直哉, 阿部正英, 羽生貴弘, 川又政征, “ストカスティック演算に基づくFIRフィルタの振幅特性測定,” 第30回回路とシステムワークショップ, 2017年5月11日, 福岡

越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “正規直交はしご形構造をもつ全域通過非整数遅延デジタルフィルタの実現,” 第30回回路とシステムワークショップ, 2017年5月11日, 福岡

鎌田裕成, 越田俊介, 鬼沢直哉, 阿部正英, 羽生貴弘, 川又政征, “ストカスティック演算に基づくデジタルフィルタにおける周波数振幅特性の測定法に関する一検討,” 電気学会制御研究会, 2017年3月13日, 東京

宗像宏幸, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “単調増加勾配アルゴリズムに基づく適応ノッチフィルタにおける勾配の特性について,” 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2017年2月23日, 滋賀

宗像宏幸, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “パイロット適応ノッチフィルタにおけるステップサイズパラメータの設定方法に関する検討,” 第31回信号処理シンポジウム, 2016年11月10日, 大阪

鬼沢直哉, 越田俊介, 坂本修一, 阿部正英, 川又政征, 羽生貴弘, “ストカステック演算に基づく省エネルギーガンマトーンフィルタのハードウェア実現,” 第31回信号処理シンポジウム, 2016年11月10日, 大阪

越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “乗算器の少ないラティス構造を用いた Simplified Lattice Algorithm に基づく適応ノッチフィルタの収束特性について,” 平成28年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2016年8月31日, 兵庫

鬼沢直哉, 越田俊介, 坂本修一, 阿部正英, 川又政征, 羽生貴弘, “ストカステック演算に基づくガンマトーンフィルタのハードウェア実現,” 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2016年6月16日, 青森

宗像宏幸, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “パイロットノッチフィルタを用いた Simplified Lattice Algorithm に基づく適応ノッチフィルタの収束の高速化,” 第29回路とシステムワークショップ, 2016年5月13日, 福岡

宗像宏幸, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “Pilot Notch を用いた Simplified Lattice Algorithm に基づく適応ノッチフィルタの収束の高速化,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月15日, 福岡

越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “はしご形構造をもつ全域通過非整数遅延フィルタの可制御性・可観測性グラミアンに基づく性能評価,” 電気学会制御研究会, 2016年3月4日, 東京

野口佑稀, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “ACLA に基づく適応ノッチフィルタの定常状態における MSE の閉じた形での導出,” 第30回信号処理シンポジウム, 2015年11月6日, 福島

越田俊介, 鬼沢直哉, 阿部正英, 羽生貴弘, 川又政征, “ストカステック演算に基づく FIR フィルタの性能評価,” 第30回信号処理シンポジウム, 2015年11月4日, 福島

宗像宏幸, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “白色雑音入力に関する出力パワーに基づく適応ノッチフィルタの性能比較,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月8日, 宮城

野口佑稀, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “SLA に基づく適応ノッチフィルタの定常状態における MSE の閉じた形での導出,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月8日, 宮城

越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “はしご形構造をもつ全域通過非整数遅延フィルタの可制御性・可観測性グラミアンについて,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年9月8日, 宮城

宗像宏幸, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “白色雑音入力に関する出力パワーに着目した適応ノッチフィルタの性能比較,” 電気学会制御研究会, 2015年8月31日, 東京

- ② 野口佑稀, 越田俊介, 阿部正英, 川又政征, “Simplified Lattice Algorithm に対する MSE の閉じた形での導出,” 電気学会制御研究会, 2015年8月31日, 東京

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