

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760322

研究課題名（和文）高精度デジタルフィルタ構造の解析的合成による高性能信号処理システムの開発

研究課題名（英文）Development of high-performance signal processing systems by analytical synthesis of high-accuracy digital filter structures

研究代表者

八巻 俊輔（YAMAKI SHUNSUKE）

東北大学・国際高等研究教育機構・助教

研究者番号：10534076

研究成果の概要（和文）：2次モードがすべて等しいデジタルフィルタの伝達関数の一般式を導出した。特に2次のフィルタの場合は、その伝達関数が閉じた形で表せることを示した。また、その伝達関数の一般式は1次FIRフィルタをプロトタイプフィルタとした周波数変換により得られることを示した。さらに、2次デジタルフィルタの L_2 スケーリング制約を考慮した L_2 感度最小実現がリミットサイクルを発生しないための十分条件を満たすことを数値計算によって示した。

研究成果の概要（英文）：

We have derived a general expression of the transfer function of digital filters with all second-order modes equal. For the case of second-order digital filters, the transfer functions can be expressed in closed form. Furthermore, we show that the general expression is obtained by a frequency transformation on a first-order prototype FIR digital filter. Furthermore, we have numerically shown the absence of limit cycles of the minimum L_2 -sensitivity realizations subject to L_2 -scaling constraints of second-order digital filters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,900,000	570,000	2,470,000

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：信号処理，デジタルフィルタ， L_2 感度最小実現，リミットサイクル，2次モード

1. 研究開始当初の背景

マルチメディアが大幅に普及している
 昨今、デジタル信号処理分野の重要性が
 ますます高まっている。デジタル通信等
 のアプリケーションの開発には高度な信
 号処理技術が必要となり、その技術を支え
 るための基礎理論が非常に重要なものと

なる。その基礎理論の中でも、デジタル
 フィルタ構造の合成理論は必要不可欠で
 ある。

デジタルフィルタを有限語長で実現
 した際には「係数量子化」による影響が無
 視できない。係数量子化の影響により、理

想的なフィルタ特性と実際のフィルタ特性との間には、必ず誤差が生じる。そのため、係数量子化による影響が最小になるようなフィルタの構造を決定するための理論が非常に重要なものとなる。

デジタルフィルタのもうひとつの有限語長問題に「リミットサイクル」がある。リミットサイクルは、再帰形デジタルフィルタにおいて、零入力時または一定入力時に周期的に発生する発振現象のことである。リミットサイクルは、有限語長デジタルフィルタにおける乗算時の丸めや加算時のオーバーフローなどの非線形性によって生じるものであり、出力信号が発振してしまう現象であるため、発生しないことが望ましい。有限語長デジタルフィルタのハードウェア上の実装においては、係数量子化誤差が小さく、リミットサイクルを発生しないことが望まれる。

係数量子化誤差の小さいフィルタ構造として、「 L_2 感度最小実現」が知られている。このフィルタ構造を合成するためには、従来は非常に多くの繰り返し計算を必要とした。これらの方法は数値計算を用いて近似的に解を求める方法であるため、非常に効率が悪い。さらに、繰り返し計算を用いて得られた近似解は、本当に最適解に収束しているかどうか理論的に保証できない。そのため、繰り返し計算も近似も用いずに、解析的に L_2 感度最小実現を求める手法の開発が求められる。さらに、この L_2 感度最小実現がリミットサイクルを発生しないフィルタ構造にできるかどうか重要な課題である。これらのことが理論的に証明できれば、係数量子化誤差が小さくかつリミットサイクルを発生しない、理想的なデジタルフィルタ構造が完成し、高性能信号処理システムの開発に大きく

貢献する結果となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高精度なデジタルフィルタ構造の解析的合成手法の開発である。高精度なデジタルフィルタ構造とは、係数量子化誤差が小さく、リミットサイクルを発生しない構造である。本研究では、係数量子化誤差の小さいフィルタ構造としてよく知られる「 L_2 感度最小実現」を研究の対象とし、以下の問題の解明に取り組んだ。

(1) 平成 23 年度

3 次以上の高い次数のフィルタに関して「 L_2 感度最小実現」を解析的に合成する手法の開発を目指す。研究代表者らのグループは過去に、1 次のフィルタおよび 2 次のフィルタに関しては「 L_2 感度最小実現」を解析的に合成することを可能にした。しかし、3 次以上の高い次数のフィルタに関しては解析的に合成する手法は確立されていなかった。

(2) 平成 24 年度

「スケーリングを考慮した L_2 感度最小実現」がリミットサイクルを発生しない構造であることを明らかにすることを目指す。研究代表者らのグループは過去に、「スケーリングを考慮しない L_2 感度最小実現」は、リミットサイクルを発生しない構造にできることを示した。しかし、実際にデジタルフィルタをハードウェア上に実装する際には、内部状態のオーバーフローを抑制するために L_2 スケーリング制約を考慮しなければならない。そのため、「スケーリングを考慮した L_2 感度最小実現」がリミットサイクルを発生しない構造であることを明らかにする必要がある。

3. 研究の方法

(1) 平成 23 年度

研究代表者らはこれまでの研究において、デジタルフィルタの 2 次モードとよばれるパ

ラメータがすべて等しければ, L_2 感度最小実現を解析的に合成できることを証明してきた. 当該年度においては, デジタルフィルタの 2 次モードがすべて等しくなるための条件を明らかにし, 2 次モードがすべて等しいデジタルフィルタのクラスを明確化することを目指した. そして, それにより解析的な L_2 感度最小化が可能なデジタルフィルタのクラスを拡張していき, 一般的な高次のデジタルフィルタに対しても解析的な L_2 感度最小化手法を確立することを目指した.

(2) 平成 24 年度

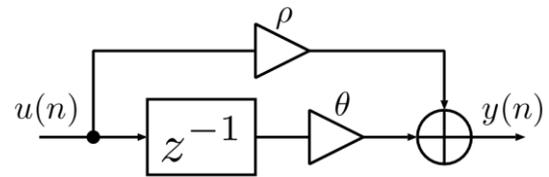
2 次デジタルフィルタの「スケーリングを考慮した L_2 感度最小実現」を合成し, その係数行列がリミットサイクルを発生しないための十分条件を満たすことを証明することを目指した. デジタルフィルタがリミットサイクルを発生しないための十分条件はこれまでにいくつか提案されてきており, そのいずれかの十分条件を満たせばよい. まず, さまざまなデジタルフィルタに関してスケーリングを考慮した L_2 感度最小実現を合成し, リミットサイクルを発生しないための十分条件を満たすかどうかを数値計算により実験した. そして, 数値計算の結果をもとに, リミットサイクルを発生しないための十分条件が満たされることの理論的な証明を目指した.

4. 研究成果

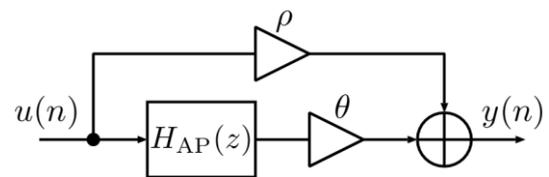
(1) 平成 23 年度

2 次モードがすべて等しい任意の次数のデジタルフィルタの伝達関数の一般式を導出した. さらに, その伝達関数の一般式は 1 次 FIR フィルタをプロトタイプフィルタとした周波数変換により得られることを示した. この周波数変換は, 以下の図 1 に示されるように, 1 次プロトタイプ FIR デジタル

フィルタの遅延素子ブロックを N 次全域通過形デジタルフィルタに置きかえるだけで実現することができる.



(a) 1 次プロトタイプ FIR デジタルフィルタ



(b) 周波数変換により得られた N 次デジタルフィルタ

図 1: 2 次モードがすべて等しいデジタルフィルタのブロック図

この結果は, 2 次モードがすべて等しいデジタルフィルタのクラスを明確化するものである. 特に 2 次のフィルタの場合は, 全域通過形デジタルフィルタの伝達関数が閉じた形で表せるため, その伝達関数が閉じた形で表せることを示した.

このようにして得られたデジタルフィルタの L_2 感度最小実現は平衡実現に等しい. 平衡実現は解析的に合成できるフィルタ構造であるため, すべての 2 次モードが等しいデジタルフィルタについては, L_2 感度最小実現を解析的に合成できるということになる. L_2 感度最小実現の解析的な合成が可能なデジタルフィルタのクラスを明確にできたという点で, 本研究成果は大変有用なものである.

(2) 平成 24 年度

2 次デジタルフィルタの L_2 スケーリング制約を考慮した L_2 感度最小実現がリミ

ットサイクルを発生しないための十分条件を満たすことを数値計算によって示した。2次デジタルフィルタの極の半径および偏角をとりうる値の範囲内で変化させ、それぞれの極配置に対して2次デジタルフィルタの L_2 スケーリング制約を考慮した L_2 感度最小実現を合成した。このとき、2次デジタルフィルタの係数行列から導出されるある評価関数の値が1未満であることがリミットサイクルを発生しないための十分条件である。その評価関数の値を算出した結果が以下の図2に示されている。

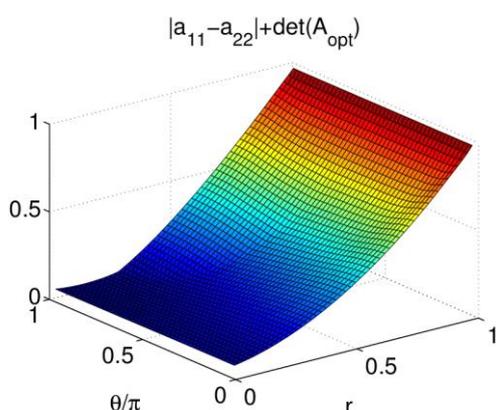


図2: リミットサイクルを発生しないための十分条件の判定

図2の結果より、与えたすべての極配置に対して、リミットサイクルを発生しない十分条件が満たされることが示された。評価関数の値は極半径に依存し、極の偏角にはほとんど依存しないことがわかった。

リミットサイクルを発生しないための十分条件が満たされることが理論的な証明には至っていないが、図2で示された数値計算例から、十分条件は一般に満たされるものと予想される。 L_2 感度最小実現は本来、係数感度が最小となるように合成されたデジタルフィルタ構造であるが、リミットサイクルを発生しないというもうひとつの利点をあわせ持つことを示せたという点で、本研究結果は大変有用なものである。

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. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Derivation of the Class of Digital Filters with All Second-Order Modes Equal," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 11, pp. 5236-5242, Nov. 2011. (DOI: 10.1109/TSP.2011.2164403)

[学会発表] (計27件)

1. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "方向統計学に基づく実信号の位相限定相関関数の統計的解析," 電子情報通信学会 2013年総合大会, 2013年3月20日, 岐阜.
2. 松本圭右, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "位相限定相関を用いた平行移動量推定における加法性雑音の影響の評価," 電子情報通信学会 2013年総合大会, 2013年3月20日, 岐阜.
3. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "方向統計学を用いた位相限定相関関数の統計的解析," 電子情報通信学会 回路とシステム(CAS)/信号処理(SIP)/通信方式(CS)研究会, 2013年3月15日, 鶴岡.
4. 伊藤理人, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "2次位相スペクトルの差を持つ信号間の位相限定相関関数," 情報処理学会第75回全国大会, 2013年3月6日, 仙台.
5. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "方向統計学を用いた複素信号の位相限定相関関数の統計的解析," 情報処理学会第75回全国大会, 2013年3月6日, 仙台.
6. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "方向統計学に基づく位相限定相関関数の統計

- 的解析," 電子情報通信学会 第 27 回 信号処理シンポジウム, 2012 年 11 月 28 日, 石垣.
7. 伊藤理人, 小山祐光, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "2 次位相差をもつ信号の位相限定相関関数の解析," 電子情報通信学会 第 27 回 信号処理シンポジウム, 2012 年 11 月 28 日, 石垣.
 8. K. Matsumoto, S. Yamaki, M. Abe and M. Kawamata, "Subpixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation and Its Experimental Evaluation," Korea-Japan-China International Workshop (KJC 2012), Nov. 1, 2012, Daegu, Korea.
 9. 八巻俊輔, "[招待講演] 高精度デジタルフィルタ構造合成のための解析的アプローチ," 電子情報通信学会 回路とシステム(CAS)/システム数理と応用(MSS)研究会, 2012 年 11 月 1 日, 盛岡.
 10. R. Ito, S. Yamaki, M. Abe and M. Kawamata, "Effects of Stochastic Phase Spectrum Differences on Phase-Only Correlation Functions Part II: Statistically Proportional Phase Spectrum Differences to Frequency Indices," IEEE 3rd International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Sept. 23, 2012, Beijing, China.
 11. S. Yamaki, J. Odagiri, M. Abe and M. Kawamata, "Effects of Stochastic Phase Spectrum Differences on Phase-Only Correlation Functions Part I: Statistically Constant Phase Spectrum Differences for Frequency Indices," IEEE 3rd International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, pp. 360-364, Sept. 23, 2012, Beijing, China.
 12. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "2 次デジタルフィルタの L_2 スケーリング制約を考慮した L_2 感度最小実現のリミットサイクルに関する考察," 電子情報通信学会 2012 年基礎・境界ソサイエティ大会, 2012 年 9 月 13 日, 富山.
 13. 松本圭右, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "位相限定相関関数による幾何変換パラメータのサブピクセル精度推定," 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会講演, 2012 年 8 月 31 日, 由利本荘.
 14. 伊藤理人, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "実数信号の位相スペクトルの差の確率的変動に対する位相限定相関関数の解析," 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2012 年 8 月 31 日, 由利本荘.
 15. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, " L_2 感度最小形 2 次デジタルフィルタのリミットサイクルに関する考察," 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2012 年 8 月 30 日, 由利本荘.
 16. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "実信号の位相スペクトルの差の確率的変動にともなう位相限定相関関数のふるまい," 電子情報通信学会 第 25 回 回路とシステムワークショップ, 2012 年 7 月 30 日, 淡路.
 17. 伊藤理人, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差の確率的変動の位相限定相関関数に対する影響の解析," 電子情報通信学会 第 25 回 回路とシステムワークショップ, 2012 年 7 月 30 日, 淡路.
 18. S. Yamaki, M. Abe and M. Kawamata, "Transfer Functions of Second-Order

Digital Filters with Two Equal Second-Order Modes," IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 23, 2012, Seoul, Korea.

19. 八巻俊輔, 小田切潤, 阿部正英, 川又政征, "実信号の位相スペクトルの差の確率的変動に対する位相限定相関関数の挙動," 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 2012 年 3 月 23 日, 岡山.
20. 八巻俊輔, 小田切潤, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差の確率的変動に対する 2 次元位相限定相関関数の挙動," 電子情報通信学会 第 26 回 信号処理シンポジウム, 2011 年 11 月 16 日, 札幌.
21. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "すべての 2 次モードが等しいデジタルフィルタの伝達関数," 電子情報通信学会 第 26 回 信号処理シンポジウム, 2011 年 11 月 16 日, 札幌.
22. 小田切潤, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差の確率的変動に対する位相限定相関関数の挙動," 電子情報通信学会 第 26 回 信号処理シンポジウム, 2011 年 11 月 16 日, 札幌.
23. 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "2 次モードがすべて等しいデジタルフィルタの伝達関数," 電子情報通信学会スマートインフォメディア(SIS)研究会, 2011 年 9 月 22 日, 秋田.
24. 八巻俊輔, 小田切潤, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差が確率的に変動する場合の 2 次元位相限定相関関数の性質," 電子情報通信学会 2011 年基礎・境界ソサイエティ大会, 2011 年 9 月 15 日, 札幌.

25. 小田切潤, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差が確率的に変動する場合の位相限定相関関数の性質," 電子情報通信学会 2011 年基礎・境界ソサイエティ大会, 2011 年 9 月 15 日, 札幌.
26. 八巻俊輔, 小田切潤, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差の白色ガウス性変動に対する 2 次元位相限定相関関数のふるまい," 平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2011 年 8 月 25 日, 多賀城.
27. 小田切潤, 八巻俊輔, 阿部正英, 川又政征, "位相スペクトルの差の確率的な変動に対する位相限定相関関数の解析," 平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2011 年 8 月 25 日, 多賀城.

[図書] (計 1 件)

1. S. Yamaki, M. Abe, and M. Kawamata, "Digital Filters and Signal Processing," Chapter 9: Analytical Approach for Synthesis of Minimum L_2 -Sensitivity Realizations for State-Space Digital Filters, InTech, pp. 213-242, Jan. 2013.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mk.ecei.tohoku.ac.jp/~yamaki>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八巻 俊輔 (YAMAKI SHUNSUKE)

東北大学・国際高等研究教育機構・助教
研究者番号：10534076

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：