

平成 22 年 5 月 11 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19760289

研究課題名(和文) 共有乗算器とシフト演算回路に基づく高速デジタルフィルタの設計と実現

研究課題名(英文) Design and Implementation of Fast Digital Filters with the Shift Operation Circuits and Single Multiplier

研究代表者

福光 昌由(中本 昌由)(FUKUMITSU MASAYOSHI (NAKAMOTO MASAYOSHI))

広島大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：00403585

研究成果の概要(和文)：

まず、有限語長デジタルフィルタの設計問題に対して、Lagrange の未定乗数法によって緩和問題を解くことにより最適化を行う設計法を提案した。次に、デジタルフィルタの丸め雑音を低減化するために、分枝限定法をデジタルフィルタにおける誤差フィードバック回路の設計問題に適用した。さらに、FIR デジタルフィルタに対して共有乗算器とシフト演算回路による構成を提案し、最適な設計法を Lagrange の未定乗数法と分枝限定法を組み合わせて用いることにより実現した。これらの提案手法の有効性は計算機シミュレーションによって検証した。また、デジタルフィルタの応用として電子透かしに関する研究を行った。

研究成果の概要(英文)：

We have proposed a design algorithm for the finite wordlength digital filters based on the lower bound estimation using the Lagrange multiplier method. Next, we have applied this method to the error feedback network which is useful for the reduction of product roundoff noise of digital filters. Also, we have shown the design algorithm for the FIR digital filters with the shift operation circuits and single multiplier by combining the Lagrange multiplier method and the branch-and-bound method. We have discussed the effectiveness of the above methods based on the result of computer simulation. We have considered the digital watermarking as the application of the digital filters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	390,000	2,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：デジタルフィルタ, 分枝限定法, フィルタ設計, 共有乗算器, シフト演算回路, 最適化アルゴリズム, 電子透かし

1. 研究開始当初の背景

公知のように FIR フィルタは、安定性が常に保障され、完全な直線位相が実現できる点など実用性が高いフィルタである。しかしながら、優れた特性（例えば、急峻なカットオフ特性）を実現するためには、高い次数が必要となる。

また、2次元以上の多次元 FIR フィルタの実現の際には、さらに多くのパラメータ（乗算器）を必要とする。ハードウェア上でデジタルフィルタを実現する場合、係数を有限語長で実現する必要があるため、離散空間上でフィルタ係数を最適化する方法が研究されてきた。ハードウェア上において、乗算演算はシフト演算と足し算の繰り返しによって実行され、フィルタ係数の語長が短ければ、乗算に要する計算コストが減少し、フィルタリングの速度が向上する。しかしながら、フィルタリングの速度とフィルタの特性（カットオフ周波数における急峻さや通過域または阻止域における誤差）にはトレード・オフの関係が存在し、高速かつ高性能なデジタルフィルタを実現するのは難しい。

本研究では、デジタルフィルタの実用上、乗算にかかる計算コストを効果的に（フィルタの特性を劣化させることなく）削減する方法の開発がきわめて重要であると考えた。我々は、これまで IIR デジタルフィルタにおける誤差フィードバック (FB) 回路に関する研究を行ってきた。ここでは、「共有乗算器とシフト演算回路による誤差 FB 回路」なる回路構造を提案し、この構造を用いて少ない演算量で効果的な丸め雑音低減化を目指している。そこで、我々は誤差 FB 回路設計と共通する部分が多い FIR フィルタの設計にも本構造 (手法) が有効ではないかと考えた。誤差 FB 回路の設計問題と FIR フィルタの主な相違点は2つある。一つは FIR フィルタの実現の際には線形位相を実現する必要があること。もう一つは、FIR フィルタの次数は一般的に誤差 FB 回路の次数よりもはるかに高いという点である。この2点を踏まえて FIR フィルタの設計と実現に関する研究を進めていかなければならない。

本研究は、フィルタ係数の最適化のみに着目するものではなく、フィルタの回路構造にも着目して高性能で高速演算可能なデジタルフィルタの実現を目指す研究として位置づけられる。また、本研究課題は前述したように、これまで我々が行ってきた IIR デジタルフィルタと誤差 FB 回路に関する研究内容を発展・応用させるものである。

さらに、近年注目を集めているデジタル画像に対する電子透かし法への応用についても検討する。電子透かし技術においてデジタルフィルタが極めて重要な役割を果たすことは、解説論文で指摘されており、設計したフィルタを用いてデジタル画像処理の実験を行うことにより、実用的な有効性を明らかにする予定である。

2. 研究の目的

デジタルフィルタの実現において優れた特性を実現するためには高い次数が必要である。とりわけ、多次元 FIR フィルタの実現の際にはさらに多くのパラメータ（乗算器）を必要とする。ハードウェア上でデジタルフィルタを実現する場合、係数を有限語長で実現する必要があるため、離散空間上でフィルタ係数を最適化する方法が研究されてきた。ハードウェア上において乗算演算はシフト演算と足し算の繰り返しによって実行され、フィルタ係数の語長が短ければ、乗算に要する計算コストが減少してフィルタリングの速度が向上する。しかしながら、フィルタリングの速度とフィルタの特性にはトレード・オフの関係が存在し、高速かつ高性能なデジタルフィルタを実現するのは一般的に困難である。

本研究課題は、デジタルフィルタの実現において計算コストを効果的に削減する方法の開発を目指すものである。また、設計されたデジタルフィルタの実現と電子透かしへの応用を検討して、その有用性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

研究は、研究室に在籍する大学院生数名と共同して行った。役割分担としては、理論的な展開や考察は申請者本人が行い、大学院生に対して基本的な方針を指示することによって研究を進めた。大学院生と様々な観点から提案手法の有効性や問題点について議論し、必要に応じて関連研究を調査するという手法によって研究を遂行していった。また、設計するデジタルフィルタの応用という観点からも検討を行い、情報収集を行った。

具体的には、数値計算ソフトウェア Matlab を用いて、計算機上において共有乗算器とシフト演算回路によるデジタルフィルタに対する最適なシフト演算回路を設計するアルゴリズムの開発を行い、計算機シミュレーションによって提案手法の有効性の確認を

行った。最適化アルゴリズムの候補としては、分枝限定法、遺伝的アルゴリズム、焼き鈍し法、直接探索法等が挙げられるので、このうち分枝限定法を中心として研究を行った。また、前述のフィルタ実現問題と平行して行っている IIR デジタルフィルタの有限語長実現問題および誤差 FB 回路の離散係数実現問題においても本研究で扱う最適化アルゴリズムが有効であると考えられるので、これらの最適設計法に関する研究も同時進行で行った。

また、設計したデジタルフィルタの応用例として、周波数領域埋込型の相関情報に基づく電子透かし法の研究も同時に行った。得られた研究成果は、国際会議や国内学会において発表することにより、会議に出席した他の研究者や技術者と意見交換を行い、様々な観点から検討を行った。

さらに、デジタルフィルタの構成、最適化手法、設計したデジタルフィルタの応用例としての画像・音声電子透かしに関する情報を収集し、デジタルフィルタの応用という側面からも研究を行うことにより、より幅広い視野からのアプローチを行った。

4. 研究成果

有限語長デジタルフィルタの設計問題に対して、Lagrange の未定乗数法によって緩和問題を解くことにより最適化を行う「分枝限定法」に基づく設計法について研究し、その成果を国際会議および国内学会で発表した。この方法では、フィルタ設計問題を 2 次形式で表すために設計誤差を重み付きの修正最小二乗法によって定式化し、求めた 2 次形式を利用して分枝限定法を用いている。ただし、すべての離散値候補を調べると、たとえ分枝限定法を利用したとしても多大な計算コストを要することが分かったので、探索すべき候補値を連続値の近傍に限定することにより、設計の効率化を図った。

また、修正最小二乗法は平均二乗誤差との間に方程式誤差が存在するので、そのギャップを低減するために重み関数を適切に調整する方法について検討を行った。ここでは、各周波数における修正最小二乗誤差と平均二乗誤差との差分をとり、その差分が大きい周波数成分で重みを大きくとることにより、方程式誤差を低減する方法について検討した。その結果、平均二乗誤差をより小さくする 2 次形式の評価関数を求めることができた。さらに、デジタルフィルタの積和演算に起因した丸め雑音を低減化するために、分枝限定法をデジタルフィルタにおける誤差 FB 回路の設計問題に適用し、提案アルゴリズムの有効性について計算機シミュレーションに基づく検討を行った。

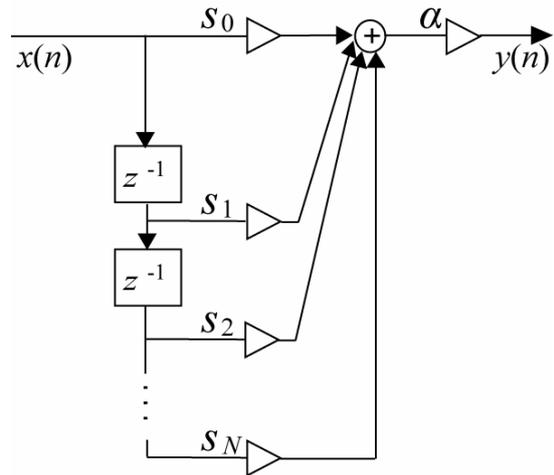


図 1 共有乗算器とシフト演算回路

によるデジタルフィルタの構成

次に、図 1 に共有乗算器とシフト演算回路による N 次デジタルフィルタ構成を示す。ただし、 S_k がシフト演算回路の係数で α が共有乗算器を示す。また、 $x(n)$ が入力信号、 $y(n)$ が出力信号である。

共有乗算器とシフト演算回路によるデジタルフィルタに対する最適なシフト演算回路を設計するアルゴリズムは、Lagrange の未定乗数法と分枝限定法を組み合わせることにより実現し、その有効性を計算機シミュレーションによって確認することができた。また、初期暫定解として、良好な解を得るために単純丸めの結果を利用した初期暫定解の算出法も示した。そして、得られた研究成果を国際会議において発表した。

さらに、上述の構成をデジタルフィルタの丸め雑音低減化を目的とした誤差 FB 回路に対しても適用し、同様に Lagrange の未定乗数法と分枝限定法を組み合わせ設計アルゴリズムを実装し、計算機シミュレーションによってその有効性を確認した。得られた研究成果は、国際会議において発表する予定である。

また、電子透かし法への応用を想定して、1 次元（音）信号および 2 次元（画像）信号に対する電子透かし法についても研究を行った。デジタルフィルタの電子透かしへの応用に関しては、デジタルフィルタによる平滑化に基づく電子透かしシステムを考案し、その有効性を計算機シミュレーションにより検証した。

以上より、当初の研究計画どおり、デジタルフィルタの実現（回路モデルの提案と設計アルゴリズムの開発）と応用（電子透かしシステム）の両面から様々な検討を行うことができた。

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 6件)

① M.Nakamoto, T. Hinamoto and S. Ohno
Fast Arithmetic Error Feedback Circuits
for Digital Filters with Shift Operati
on Circuits and Shared Multiplier
Proc. of The 53th IEEE International Mi
dwest Symposium on Circuits & Systems
査読有 (採録済)

② M.Nakamoto, T. Hinamoto and S. Ohno
Branch and Bound Method for FIR Digital
Filters Design with the Shift Operatio
n Circuits and Single Multiplier
Proc. of The 24th International Technic
al Conference on Circuits/Systems, Comp
uters and Communications
査読有 2009 pp. 492-pp. 495, 巻なし

③ M.Nakamoto, Y. Hayakawa, Y. Kurumaj
and T. Hinamoto
Design for IIR Digital Filters with
Discrete Coefficients Using Weighted
Modified Least-Square Criterion
Proc. of The 23rd International Technic
al Conference on Circuits/Systems, Comp
uters and Communications
査読有 2008 pp. 1049-pp. 1052, 巻なし

④ 中本昌由, 早川裕貴, 車地豊, 雛元孝夫
重み付き修正最小2乗法を用いた有限語長デ
ジタルフィルタの設計 査読有
第21回回路とシステム(軽井沢)ワークシ
ョップ講演論文集 2008 143-146, 巻なし

⑤ M. Nakamoto, T. Yoshiya, T. Hinamoto
Finite Wordlength Design for IIR Digital
Filters based on the Modified Least-Square
Criterion in the Frequency Domain
Proc. of 2007 International Symposium on
Intelligent Signal Processing and
Communication Systems
査読有 2007 pp. 25-28, 巻なし

⑥ 中本昌由, 藤本卓, 土井章充, 雛元孝夫
ビットパターン埋込み可能な画像電子透かし
法に対する新しい鍵系列の提案
査読有 第20回回路とシステム(軽井沢)ワ
ークショップ講演論文集 2007 619-624,
巻なし

[学会発表] (計 3件)

① 中本昌由, 門田英晃, 大野修一: ディジ
タルフィルタを用いた相関利用型画像電子
透かし法 電気・情報関連学会中国支部第60
回連合大会講演論文集 2009年10月17日
広島市立大学

② 中本昌由, 早川裕貴, 車地豊, 雛元孝夫
分枝限定法を用いた有限語長ディジタルフ
ィルタの重み付き修正最小2乗設計
電気・情報関連学会中国支部第59回連合大
会講演論文集 2008年10月25日 鳥取大学

③ 中本昌由, 藤本卓, 土井章充, 雛元孝夫
GAによるDWT利用型画像電子透かし法にお
ける鍵の最適化
電気・情報関連学会中国支部第58回連合大
会講演論文集 2007年10月20日 広島大学

[その他]

2008年10月に発表した分枝限定法を用いた
有限語長ディジタルフィルタの設計に関す
る研究成果が平成20年度電気学会論文発
表賞に選定された。

平成20年度 電気学会論文発表賞
発表者 中本昌由
題目「分枝限定法を用いた有限語長ディジ
タルフィルタの重み付き修正最小2乗設計」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福光 昌由 (中本 昌由)

(FUKUMITSU MASAYOSHI

(NAKAMOTO MASAYOSHI))

広島大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00403585

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: