

氏名	なが はら まさ あき 永 原 正 章
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学位記番号	情 博 第 80 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	情 報 学 研 究 科 複 雑 系 科 学 専 攻
学位論文題目	Multirate Digital Signal Processing via Sampled-Data H-infinity Optimization (サンプル値 H-infinity 最適化によるマルチレートデジタル信号処理)
論文調査委員	(主 査) 教 授 山 本 裕 教 授 磯 祐 介 教 授 酒 井 英 昭

論 文 内 容 の 要 旨

本論文はアナログ信号の特性を考慮した新しいマルチレートデジタル信号処理システムの設計手法を提案し、その有効性を示したものである。

従来の設計では、Shannon のサンプリング定理を基礎としてナイキスト周波数以上の周波数成分を考慮せず、デジタル信号の特性のみを考慮に入れた設計であった。本論文では制御理論において近年発展が著しいサンプル値 H-infinity 制御理論を用いた、ナイキスト周波数以上の周波数成分をも考慮した設計手法を与え、従来法にくらべてより自然な信号処理が可能となることを示している。

まず、第 1 章の序論で従来のデジタル信号処理およびその問題点をとりあげ、その問題に対処するために本論文で導入するサンプル値制御理論について歴史的背景をまとめている。

続く第 2 章では、このサンプル値 H-infinity 制御理論の基礎理論について述べている。特に本論文で主に用いるファーストサンプル・ファーストホールド (FSFH) 手法について述べ、それを用いたマルチレートサンプル値制御系にたいする設計公式を与えている。

第 3 章では、このサンプル値 H-infinity 制御を用いたマルチレートデジタル信号処理システムの設計法について述べている。ここでは特に、インターポレータ、デシメータ、サンプルレート変換器におけるデジタルフィルタの設計法を示している。ここでは、第 2 章で述べた FSFH 手法を用いて、もとのアナログ信号と復元されたアナログ信号との誤差系の H-infinity ノルムを最小化するフィルタの設計法を述べ、具体的な設計公式を与えている。また設計例により、従来法と比較して提案手法が有効であることを確認している。従来では、これらのシステムにおけるフィルタには、理想フィルタ特性に近い急峻なカットオフ特性をもつフィルタがしばしば用いられるが、アナログ信号の特性を考慮した場合、このような急峻な特性は逆に性能を劣化させることを示している。

第 4 章では、デジタル通信システムにおける送/受信フィルタの設計にサンプル値 H-infinity 制御理論を導入し、送信したい情報源のアナログ特性を考慮した最適なフィルタ設計の手法を提案している。通信においては情報の圧縮が重要な要素であるが、その影響も考慮したフィルタ設計法を示している。また、フィルタ設計では送信フィルタと受信フィルタの設計を交互に行うが、この繰り返しによって誤差系の H-infinity ノルムが単調に減少することを示している。最後に設計例を示し、提案手法の有効性を示している。

続く第 5 章は、量子化の問題を取り上げている。アナログ信号をデジタル信号に変換する際には、時間軸の離散化である標本化のほかに振幅を離散化する量子化が必要となるが、量子化は非線形の操作であり、その数学的な取り扱いが困難である。そこで本論文では、付加雑音モデルによってその取り扱いを不確定性をもつ線形化モデルに帰着させ、それを用いて量子化を含むサンプル値制御系の安定性と性能の解析を行っている。これにより、付加雑音を外乱とみなした H-infinity 設計が有効であることが示される。このことを利用して、デジタル通信などでしばしば用いられる予測量子化器の設計にサ

サンプル値 H-infinity 制御理論を応用し、アナログ特性を考慮しつつ量子化誤差および通信路の雑音の影響を最小化する予測量子化器の新しい設計法を提案している。特に従来法である Δ 変調では、受信側のフィルタが不安定であるため、通信路に雑音が入った場合、それが増幅され得るという問題点があるが、提案手法では通信路の雑音も考慮しており、そのような問題はない。また、設計例によって提案手法の有効性を示している。

第6章では、IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを FIR (Finite Impulse Response) フィルタにより近似する新しい手法を提案している。第5章までで述べた設計手法によって得られるフィルタは IIR フィルタであるが、実装の際には、フィルタの安定性や実装の容易さの観点から FIR フィルタが望まれる場合が多い。本章では、与えられた IIR フィルタにたいして、近似誤差を H-infinity ノルムの意味で最小化する近似 FIR フィルタの設計法を提案している。従来法で有効とされている Nehari Shuffle 法は誤差の Hankel ノルムを最小化する手法で、必ずしも H-infinity ノルムの意味で最適ではなく、また重み関数が可逆でなければならないという、厳しい制約が存在する。一方、提案する手法は、H-infinity (準) 最適なフィルタであり、また重み関数も安定でありさえすればよいので設計の自由度も大きい。この最適化問題は線形行列不等式で記述することができ、容易に (準) 最適フィルタを得ることができる。さらに、設計例では従来法の Nehari Shuffle と比較し、提案手法の有効性を示している。

最後に第7章で本論文の成果をまとめ、将来の研究課題を検討している。

論文審査の結果の要旨

本論文はアナログ信号の特性を考慮した新しいマルチレートデジタル信号処理システムの設計手法を提案し、その有効性を示したものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1) マルチレートデジタル信号処理システム、特にインターポレータ、デシメータ、サンプルレート変換器の設計にサンプル値制御理論を導入し、アナログ信号の特性を考慮したデジタルフィルタの設計法を提案し、ファーストサンプル・ファーストホールド (FSFH) 近似による設計公式を与えている。従来の設計に比べて、周波数特性、時間応答の優れたシステムが得られている。

2) デジタル通信システムの設計にサンプル値制御理論を導入し、情報源のアナログ特性を考慮した送受信フィルタの設計を提案している。設計のための FSFH 近似公式が与えられ、設計例によって従来よりも優れた通信システムが得られることを示している。

3) さらに、量子化の問題について議論し、量子化を含むサンプル値フィードバック系の安定性および性能に関して新しい結果を述べている。また、この結果を予測量子化器の設計に応用し、従来の Δ 変調システムよりも優れた量子化器の設計に成功している。

4) 最後に、IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを FIR (Finite Impulse Response) フィルタにより近似する新しい手法を提案し、従来法で有効とされている Nehari Shuffle 法よりも設計の自由度が高く、また誤差システムの H-infinity ノルムを最小化するフィルタの設計法を提案している。設計問題は線形行列不等式で記述され、最適フィルタを容易に得ることができる。

本研究における成果は、マルチレートデジタル信号処理やデジタル通信システムに対してアナログ特性を考慮した従来にはない新しい設計手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (情報学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月14日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。