

令和元年6月23日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04021

研究課題名(和文) サンプル値制御理論によるデジタル非定常信号処理

研究課題名(英文) Digital signal processing for non-stationary signals via sampled-data control theory

研究代表者

山本 裕 (Yamamoto, Yutaka)

京都大学・情報学研究科・名誉教授

研究者番号：70115963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：現代的サンプル値制御理論を用いることにより、アナログ特性を最適にする信号処理、デジタルフィルタの設計法を確立した。従来、信号族が線形定常システムによって生成されるものに限られていたのに対し、コンパクト台を持つような非定常な特性を持つ信号族に対して最適フィルタ設計を可能にしたのが大きな特徴である。これは信号を受け取るフィルタを、一般化されたサンプリングあるいは認識フィルタに拡張したことによる成果である。またこのような研究の成果として、Nyquist周波数以上の成分を持つ信号への正確なトラッキングが可能であることを見出した。これはデジタル制御・信号処理に対して大きな可能性を開くものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サンプル値制御理論によるデジタルフィルタ設計は、アナログ特性を最適にコントロールし得る点において、これまでのデジタルフィルタの設計法を大きく超える特性を有するものであり、商用の音響処理チップに採用されるなど、大きな貢献をなしてきた。今回の拡張されたフィルタ設計はこれを更に超えるもので、地震波や画像処理などへの応用が期待される。さらに研究の中で発見されたNyquist周波数を超える信号に対するトラッキングを行うサンプル値制御は、その応用に大きな新しい可能性を開くものであり、低速のサンプリングによって高速の動作を制御する可能性を開くものとして、大きな可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)：The present research has successfully developed a design method for digital filters that give an optimal analog performance via modern sampled-data control theory. The novel contribution here is that the new method can handle non-stationary signals, e.g., those having compact supports, in contrast to the conventional signal classes generated by finite-dimensional linear filters. This is the result of the extension provided by acquisition filters or generalized samplers that possess compact supports. As a serious by-product of the research conducted, it has been found that it is possible to construct a controller that achieves precise tracking for signals beyond the Nyquist frequency. This will open a new horizon for digital control and signal processing, and is expected to develop in the future.

研究分野：システム・制御理論

キーワード：デジタル信号処理 サンプル値制御 非定常信号 Wavelet展開 音響・画像処理

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、現代的サンプル値制御理論を用いたデジタル信号処理の理論、ことにアナログ特性を最適にするデジタルフィルタの設計手法を世界に先駆けて提案し、研究してきた。この手法の大きな特徴は、サンプル値制御理論がサンプル点間のアナログ特性をも最適化することに着目することにより、Shannon らによるこれまでのデジタル信号処理では不可能であった Nyquist 周波数を超える広域特性までも最適に復元、処理し得ることにある。その具体的な成果の一例として、Gibbs 現象に起因するリンギングあるいは画像におけるモスキート歪の低減に大きな効果を発揮したことが挙げられる。しかし、これらの成果は与えられた信号族が線形定常システムによって生成されたものに限られ、Wavelet 解析等で扱われるような、非定常な信号クラスについては必ずしも最適な処理方法とは言い難く、このような信号クラスに対する理論の拡張と処理方法の開発が望まれる状況にあった。

### 2. 研究の目的

上に述べた課題を解決するには、非定常信号に適したデジタルフィルタの設計法で、かつ従来展開してきたサンプル値制御理論に基づくフィルタ設計の特徴を兼ね備える設計手法が必要である。これらの特徴を持つデジタル信号処理理論の展開が強く望まれるが、そのためには、非定常信号、ことにコンパクト台を持つような信号や、必ずしも線形定常システムによって生成されたのではない信号族を対象とするデジタルフィルタ設計法、ひいてはデジタル信号処理の理論が必要である。本研究の目的は、このような信号処理を可能とするデジタルフィルタ設計法を確立することにある。

### 3. 研究の方法

上記の課題を解決するには、信号を受け取るプレフィルタ、あるいは Acquisition filter をコンパクト台を持つようなフィルタに対応させること、またサンプリング作用素を理想サンブラでなく、時間分布を持つ一般化サンブラに対応させることが必要である。従来のサンプル値制御理論を用いたフィルタ設計の枠組みでは、これらの課題に直接に対応することはできない。一般化サンブラやコンパクト台による Acquisition filter を実現するには全体が無次元システムとなり、サンプル値制御理論の枠組み自体を拡張する必要があるためである。そこで、よく知られた高速サンプリング - 高速ホールドの近似を用いることにより、これらの問題を近似的に有限次元の離散時間問題に変換する。これらはすでにこれまで研究してきたサンプル値制御と信号処理の枠組みで解くことができる。無論ここでの問題はこのような手法による解の収束性、更には真の解に収束するか否かという点であるが、これについては、代表者がこれまで研究してきた擬有理型伝達関数の理論が適用できることが見出され、それによって正しい解が得られることが保証された。

### 4. 研究成果

以上のような研究方針に基づき、以下のような成果を得た：

- a. 一般化サンブラに基づく H-無限大最適サンプル値フィルタの設計法
- b. コンパクト台を持つ acquisition フィルタによる最適サンプル値フィルタの近似設計法、およびその収束証明
- c. 上記の一般化フィルタ設計法の画像などへの適用
- d. リフティングされたシステムの伝達零点ともとの連続時間プラントの零点との対応の明確化
- e. Nyquist 周波数を超える高周波信号に対する正確なトラッキングを可能にする、制御系設計法の開発
- f. アンテナ電波伝送における全 2 重回り込み歪のサンプル値制御法による低減。

この他一連のサンプル値制御理論とその信号処理への応用への貢献に対し、2016 年度の立石賞、功績賞を受賞した。これらの成果は音響、音声処理の LSI などに応用され、広く普及している。また上記の成果の内、e に述べた Nyquist 周波数を超える信号に対するトラッキング（あるいは同様の条件における外乱除去）はこれまで想定されていなかったもので、本研究の成果として将来の発展につながる重要な成果である。これまでではサンプル点間の信号を最適に補間することに重点を置いていたが、このような正確なトラッキングが可能であるとは、想像されていなかった。しかし系の適切なモデル化、トラッキング信号に対する適切な重み関数の設定等を工夫することにより、サンプル値制御系が従来の枠組みを遥かに超えて、低周波動作によって高周波を制御することが可能になるとうとしている。しかし現実には、ロバスト性などの大きな検討課題が有り、本計画の重要な発展形態として、今後詳細な検討を進める予定である。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, "Hypertracking beyond the Nyquist frequency," Proc. Emerging Applications of Control and Systems Theory, Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp. 369-379, 2017.
- 2) K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and S. Niculescu, "A renewed look at zeros of sampled-data systems-|from the lifting viewpoint," IFAC-PapersOnLine, pp. 3668-3673, 2017.
- 3) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Stability analysis of sampled-data switched systems with quantization," Automatica, vol. 69, No. 6, pp. 157-168, 2016.
- 4) M. Nagahara and Y. Yamamoto, "Digital repetitive controller design via sampled-data delayed signal reconstruction," Automatica, vol. 69, No. 3, pp. 203-209, 2016.
- 5) H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, "Digital cancelation of self-interference for single-frequency full-duplex relay stations via sampled-data control," SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 8, No. 5, pp. 321-327, 2015.

〔学会発表〕(計 11 件)

- 1) Y. Yamamoto, K. Yamamoto, and M. Nagahara, "Sampled-data Filters with Compactly Supported Acquisition Prefilters," 57th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6650-6655, Miami, Florida, 2018.
- 2) K. Yamamoto, M. Nagahara, and Y. Yamamoto, "Signal reconstruction with generalized sampling," 56th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6253-6258, Melbourne, Australia, 2017.
- 3) K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, "Simultaneous rejection of signals below and above the Nyquist frequency," Proc. 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 1135-1139, Kona, Hawaii, 2017.
- 4) Y. Yamamoto, K. Yamamoto, and M. Nagahara, "Tracking of signals beyond the Nyquist frequency," 55th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4003-4008, Las Vegas, 2016.
- 5) C. Bonnet and Y. Yamamoto, "Coprimeness of fractional representations," Proc. 55th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1399-1404, Las Vegas, 2016.
- 6) C. Bonnet and Y. Yamamoto, "Stability of some neutral delay systems with chains of poles clustering at the imaginary axis," Proc. MTNS16, Minneapolis, USA, July 2016.
- 7) H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, "Communication Performance Analysis of Sampled-Data H-infinity Optimal Coupling Wave Canceler," SICE International Symposium on Control Systems, 513-5, 2015.
- 8) H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, "Loop-Back Interference Suppression for OFDM Signals via Sampled-Data Control," 10th Asian Control Conference, 1798-1801, 2015.
- 9) H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, Y. Yamamoto, "Time-domain equalization for single-frequency full-duplex wireless relay using H2 optimal control," Proc. 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 3-4, Hawaii, 2015.
- 10) H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, Y. Yamamoto, "Sampled-data H-infinity optimization for self-interference suppression in baseband signal subspaces," 54th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 7244-7249, Osaka, 2015.
- 11) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Stabilization of discrete-time piecewise affine systems with quantized signals," Proc. 54th IEEE Conference of Decision and Control, pp. 1601-1606, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

Frequency Domain Techniques for H-infinity Control of Distributed Parameter Systems, by H. Ozbay, S. Gumsoy, K. Kashima, and Y. Yamamoto (共著) SIAM Publications, Oct 2018

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年：  
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：  
ローマ字氏名：  
所属研究機関名：  
部局名：  
職名：  
研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：永原 正章  
ローマ字氏名： MASA AKI NAGAHARA

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。