

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360163

研究課題名(和文) サンプル値制御理論による非定常信号のシステム理論とその応用

研究課題名(英文) System Theory for Non-stationary Signals via Sampled-Data Control Theory and Its Applications

研究代表者

山本 裕 (Yamamoto, Yutaka)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：70115963

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：アナログ特性を最適とするデジタルフィルタ設計法を推進し、実応用を更に展開した。またサンプル値設計フィルタに対する適応更新則を導出し、実応用に結びつけた。主たる成果として、圧縮オーディオからの高品位音質の復元、PC音源からの超高域再生による高品位音響処理のプロトタイプ作成、画像処理における超解像度処理および斜線処理の高品位化、適応処理化、携帯電話音声の最適帯域拡張などがあげられる。また圧縮オーディオに関しては、音響処理用LSIだけでなく携帯音楽プレーヤーの開発も行った。またウェーブレット展開などへの応用も視野に入れ、非定常信号用のフィルタの検討を進めた。

研究成果の概要(英文)：This project has advanced the digital filter design method by sampled-data control theory that makes analog performance optimal, proposed by the principal investigator, and further explored real applications. It also successfully derived an adaptation scheme for this, and also applied the algorithm to real problems. As major achievements, we here list a) high-quality restoration from compressed audio sources, b) a prototype processing program for super-sonic restoration for PC music sources, c) super-resolution and smooth restoration of slanted lines in image processing, inclusive of adaptive processing, d) optimal bandwidth expansion of mobile phone sound sources. Along with the application to custom-made audio processing chips, a new portable music player has also been developed. A digital filter design method has also been conducted with a view to application to wavelets.

研究分野：システム・制御理論

キーワード：サンプル値制御理論 デジタルフィルタ 非定常信号 音響・画像処理 適応更新則 ウェーブレット

### 1. 研究開始当初の背景

デジタル信号処理の対象とする画像や音声データは本来アナログ量であるが、これらはサンプリングによって離散化して処理される。従来手法ではこれをアナログ復元する際、完全帯域制限の仮定の下に高周波成分を切り捨てた上で処理を行っていた。この仮定は非現実的であるだけでなく、画像におけるモスキート歪など種々の歪の原因となっていた。さらに、アナログ特性の規範が存在しないため、トータルの誤差の歪特性が把握できず、またフィルタ設計も統一的な評価基準を持たない複雑な多段設計となっていた。代表者はこれに対し、サンプル値制御理論を用いて、完全帯域制限過程によらず、サンプル点間の高周波信号をも含めた最適復元し得るフィルタ設計手法を提案・展開し、従来のものをはるかに超える信号処理を可能としてきた。ただ、画像を始めとする非定常信号については、処理結果が一律でない場合があり、その他斜線処理など適応的な処理が必要とされる等の課題が存在していた。またウェーブレット展開などの、非定常信号に適したフィルタ処理なども強く望まれる状況にあった。

### 2. 研究の目的

上に述べたような課題に対応するべく、本研究は現代的サンプル値制御理論に基づき、連続-離散時間データの混在した非定常信号のシステム理論を展開することを目的とする。またこれによって、これまで代表者が進めてきた、サンプル値制御理論による画像、動画、音声などに対する新しいデジタル信号処理の理論と応用を更に進展させることも目的としている。

さらに、より高度なデジタル信号処理方式を確立するとともに、ウェーブレット展開などを含む、一般的な非定常信号に対するシステム理論の構築への発展を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では以上の方針の下に、まずアナログ信号の発生機構を連続時間集中定数システムでモデル化する。このアナログ信号発生モデルへの入力はいずれの2乗可積分な連続時間信号とし、これをサンプリングして得られたものが与えられたデジタル信号であると仮定する。これをアップサンプルとデジタルフィルタ、ホールド要素によって処理された信号と、元の信号が有限次遅れた信号との偏差が、アナログ信号発生器へのすべての入力下で最小となるような、すなわちH-infinity

評価関数の下で最適なデジタルフィルタを設計することによって、アナログ特性を最適とするデジタルフィルタが得られることになる。従来手法との大きな違いは、信号の最適性がサンプル点間応答も含めたアナログ特性に対して保証されている点である。性能指標が全周波数帯域における性能を保証するH-infinity評価規範によっていること、したがって従来信号処理分野で採用されている2乗評価規範であるH2評価規範に比べて、最悪性能の保証が得られること、またShannonのサンプリング定理に限定された帯域制限波に対する理論と異なり、現実的な波形特性に対する最適応答が得られることなどがその特長として挙げられる。さらにこれらを踏まえて、系の特性が変化するものに対する適応更新則の確立とともに、外生信号のフィルタをスプライン関数にとることによって処理の局所化をも図る。またより高度な画像処理あるいは音声処理のために、適応処理の導入を図る。

### 4. 研究成果

以上のような研究方針に基づき、本研究では以下のような成果を得た：

- a. サンプル値設計フィルタに対する適応更新則の導出
- b. 圧縮オーディオからの高品位音質の復元；携帯音楽プレーヤーの開発
- c. PC音源からの超高域再生による高品位音響処理のプロトタイプ作成
- d. 画像処理における超解像度処理および斜線処理の高品位化
- e. 携帯電話音声の最適帯域拡張
- f. 分数次遅れフィルタの設計法とそのピッチシフトへの応用

このほか、本処理理論を応用した音声・音響処理フィルタに基づく商用LSIは順調に実用化され、直近の3年間で3000万石を超える出荷台数を記録した。これらはMP3プレーヤ、携帯電話、デジタルレコーダ、カーオーディオなどに組み込まれ、圧縮オーディオからの高品位再生に貢献している。また研究代表者と連携研究者は、これらサンプル値制御理論の展開、そのデジタル信号処理理論への適用、さらにこの信号処理応用の成果に対して2012年度のIEEE Control Systems SocietyのTransition to Practice Awardを受賞し、その成果は世界的に広く認められている。さらに、このアナログ特性最適なデジタルフィルタの応用として、可聴帯域を遙かに超えるDAコンバータをPC上に実装する試作ソフトウェアおよび携帯音楽プレーヤを製作し、従来のCDあるいはAAC仕様の再生をはるかに超える高音質が得られることを確認した。またこのサンプル値設計フィルタの特性を活かし、画像処理において常に問題となる斜線部分の処理においてLCM(Local Circulation Matching)と呼ぶ新しい方式を

見出した。これにより、原画像の解像度を4倍あるいは8倍に引き上げる超解像度処理における従来にはない高品位化が可能となることを確認した。さらにこれらを新たな適応処理と組み合わせ、さらなる高画質化を実現した。

また音声処理においては、いわゆるAMR処理を施された低品位携帯電話音声に対する適応処理を含む高品位復元方式を得た。これによって、狭帯域の音声に対する高品位再生、復元への道が開かれることになった。

これ以外にも、分数次フィルタによる音響信号のピッチシフトなどを実現し、これからの応用と発展が期待される場所である。

さらに、必ずしも時不変性を満たさない系に対してのシステム理論の展開を試みた。この一環として、系の特性が変化したものに対する適応更新則を得た。これの一部は分数次遅れフィルタとピッチシフトに生かされている。またスプライン関数族を用いるフィルタ設計は、高速サンプリングにより一応の理論的成果を得たが、実用面を含めて必ずしも予期した成果までを得るに至ってはいない。Wavelet解析を含んだフィルタバンクへの応用を含めて、今後の課題としたい。

#### 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 12 件)

- 1) D. Yasufuku, A. Fujii, and Y. Yamamoto, "A New Approach to Fault Diagnosis of Rotating Machine by Using Particle Filter as Parameter Estimation," *Trans. Inst. Systems, Control and Information Engineers*, vol. 25, No.9 pp. 221-229, 2012.
- 2) M. Wakaiki, Y. Yamamoto and H. Ozbay, "Sensitivity reduction by strongly stabilizing controllers for MIMO distributed parameter systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, No. 8 pp. 2089-2094, 2012.
- 3) Y. Yamamoto, M. Nagahara and P. P. Khargonekar, "A brief overview of signal reconstruction via sampled-data  $H^\infty$  optimization," *Applied and Computational Mathematics*, vol. 11, pp. 3-18, 2012.
- 4) M. Nagahara and Y. Yamamoto, "Frequency domain min-max optimization of noise-shaping Delta-Sigma modulators," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, No. 6 pp. 2828-2839, 2012.
- 5) Y. Yamamoto, M. Nagahara, P. P. Khargonekar, "Signal reconstruction

via  $H^\infty$  sampled-data control theory - beyond the Shannon paradigm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, pp. 613-625, 2012.

- 6) S. Miyazaki, K. Kudoh, M. Nagahara, N. Hayashi, and Y. Yamamoto, "Power balancing control for energy management systems," *Panasonic Technical Journal*, vol. 57, No. 4, pp. 17-22, 2012.
- 7) D. Yasufuku, A. Fujii, and Y. Yamamoto, "A New Approach to Fault Diagnosis of Rotating Machine by Using Particle Filter as Parameter Estimation," *Trans. Inst. Systems, Control and Information Engineers*, vol. 25, No.9 pp. 221-229, 2012.
- 8) M. Nagahara and Y. Yamamoto, " $H^\infty$ -optimal fractional delay filters," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 61, No. 18, pp. 4473-4480, 2013.
- 9) M. Nagahara, K. Hamaguchi, and Y. Yamamoto, "Active noise control with sampled-data filtered-x adaptive algorithm," *Mathematica System Theory," Festschrift in Honor of Uwe Helmke on the Occasion of his Sixtieth Birthday*, pp. 275-290, CreateSpace, 2013.
- 10) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, and H. Ozbay, "Stable controllers for robust stabilization of systems with infinitely many unstable poles," *Syst. Control Lett.*, vol. 62, pp. 511-516, 2013.
- 11) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Stable controller design for mixed sensitivity reduction of infinite-dimensional systems," *Syst. Control Lett.*, vol. 72, pp. 80-85, 2014.
- 12) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, and H. Ozbay, "Sensitivity reduction by stable controllers for MIMO infinite dimensional systems via the tangential Nevanlinna-Pick interpolation," *IEEE Tran. Autom. Control*, vol. 59, No. 4, pp. 1099-1105, 2014.

[学会発表] (計 16 件)

- 1) M. Nagahara, Y. Yamamoto, S. Miyazaki, T. Kudoh, and N. Hayashi, "H-infinity control of microgrids involving gas turbine engines and batteries," *Proc. 51st IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4241-4246, 2012.
- 2) M. Nagahara and Y. Yamamoto, "H-infinity optimal fractional delay filters with application to pitch

- shifting," *Proc. 2012 IFAC Workshop on Time Delay Systems*, pp. 61–66, 2012.
- 3) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, and H. Ozbay, "Robust stabilization for distributed parameter systems by stable controllers," *Proc. 20th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, pp. 9–13, 2012.
  - 4) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, and H. Ozbay, "Tangential Nevanlinna-Pick interpolation for strong stabilization of MIMO distributed parameter systems," *Proc. 51st IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1584–1590, 2012.
  - 5) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, and H. Ozbay, "Robust stabilization for distributed parameter systems by stable controllers," *Proc. MTSN 2012*.
  - 6) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, "Mixed sensitivity reduction for time-delay systems by stable controllers," *52nd Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 1065–1070, 2013.
  - 7) Y. Yamamoto, "Signal Processing via Sampled-data control – a challenge to go beyond Shannon," *2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC 2013)*, 2013 (特別講演)
  - 8) M. Nagahara and Y. Yamamoto, "Optimal discretization of analog filters via sampled-data  $H^\infty$  control theory," *2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC 2013)*, pp. 527-532, 2013.
  - 9) M. Wakaiki, Y. Yamamoto, "Mixed sensitivity reduction for time-delay systems by stable controllers," *52nd Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 1065-1070, 2013.
  - 10) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Output feedback stabilization of switched linear systems with limited information," To appear in *Proc. 53rd IEEE CDC*, 2014.
  - 11) M. Nagahara, H. Sasahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, "Sampled-data  $H^\infty$ -design of coupling wave cancelers in single-frequency full-duplex relay stations," *SICE Annual Conference 2014*, 2014.
  - 12) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Quantized feedback stabilization of sampled-data switched linear systems," *Proc. 19th IFAC World Congress*, pp. 9979-9984, 2014.
  - 13) M. Nagahara and Y. Yamamoto, "FIR digital filter design by sampled-data

$H^\infty$ -discretization," *19th IFAC World Congress*, pp. 3110-3115, 2014.

- 14) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Quantized output feedback stabilization of switched linear systems," *Proc. in MTNS 2014*, pp. 758-763, 2014.
- 15) M. Nagahara, H. Sasahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, "Sampled-data  $H^\infty$ -infinity design of coupling wave cancelers in single-frequency full-duplex relay stations," *SICE Annual Conference*, 2014.
- 16) M. Wakaiki and Y. Yamamoto, "Output feedback stabilization of switched linear systems with limited information," *Proc. 53rd IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 3892-3897, 2014.

[図書] (計 1 件)

- 1) *From Vector Spaces to Function Spaces: Introduction to Functional Analysis with Applications*, SIAM Publications, Philadelphia, 2012

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：超解像処理方法及び装置

発明者：山本 裕

権利者：山本 裕

種類：特許

番号：2012-025003

出願年月日：平成24年2月8日

国内外の別：国内

名称：画像データ処理方法及び画像データ処理装置

発明者：山本 裕

権利者：山本 裕

種類：特許

番号：特願2013-65502

出願年月日：平成25年3月27日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 3 件)

名称：超解像処理方法及び装置

発明者：山本 裕

権利者：山本 裕

種類：特許

番号：5318234

出願年月日：平成24年2月8日

国内外の別：国内

名称：画像ノイズ除去方法及び装置

発明者：山本 裕, 永原正章, 小林陽

権利者：国立大学法人京都大学  
種類：特許  
番号：5 1 4 2 3 0 0  
出願年月日：平成 20 年 11 月 26 日  
取得年月日：平成 24 年 11 月 30 日  
国内外の別： 国内および PCT 出願

名称：補聴器用の音声信号処理システムの設  
計方法、補聴器用の音声信号処理シス  
テム、および補聴器

発明者：山本 裕, 永原正章  
権利者：国立大学法人京都大学  
種類：特許  
番号：5 3 0 5 3 0 6  
出願年月日：平成 21 年 8 月 3 日  
取得年月日：平成 25 年 7 月 5 日  
国内外の別： 国内および PCT 出願

[その他]  
ホームページ等

<http://www-ics.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~yy/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 裕 (YAMAMOTO YUTAKA)  
京都大学・情報学研究科・教授  
研究者番号：70115963

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

永原 正章 (NAGAHARA MASAOKI)  
京都大学・情報学研究科・助教  
研究者番号：90362582