

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360203
 研究課題名（和文） サンプル値制御理論による信号処理と新しい非定常システム理論への展開
 研究課題名（英文） New methodology in signal processing via sampled-data control theory and its development in new non-stationary system theory
 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

研究成果の概要：サンプル値 H_∞ 制御理論を用いることによって、新たなデジタルフィルタ設計法を開発・展開し、実应用到に結びつけた。これにより、従来のデジタル信号処理とは異なり、アナログ特性最適なデジタルフィルタの設計が可能となり、圧縮オーディオからの高品位音質の復元、CD ソースからの超高域再生、画像処理におけるブロックノイズ、モスキートノイズなどの効果的な処理が可能となった。ことに、圧縮オーディオに関しては、音響処理用民生 LSI として実製品化され、これまでに累計 700 万石を出荷する実績を上げるに至った。また、ウェーブレット展開などへの新しい応用への道筋も整った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2007 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

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：サンプル値制御理論，完全帯域制限仮定，デジタルフィルタ

ノイズ除去，ブロックノイズ，モスキートノイズ，ウェーブレット

1. 研究開始当初の背景

信号処理の対象となる画像や音声は本来アナログ量であるが、デジタル信号処理ではこれらを空間的、時間的に離散化して伝送、記録、通信を行う、すなわちサンプリングしてデジタル処理することになる。したがってデジタル信号処理は本来的にアナログ、デジタル量の混在したハイブリッド系と

してのモデル化、およびそれによる制御・信号処理における新しい枠組みと手法を必要とする。しかしこれまでの多くのデジタル処理方式では、このようなアナログ特性は無視されるかあるいは副次的な取り扱いしか受けてこなかった。

典型的なものは、完全帯域制限仮定を置き、Shannon のサンプリング定理が成り立つとし

た上で、理想フィルタの近似を目指すものである。しかし音声であれ画像であれ、完全帯域制限の仮定が成り立つほどサンプリング周期が短い例は稀であり、多くは Shannon の理論によっては処理限界とされる Nyquist 周波数以上にも情報を有している。さらにこのような急峻な遮断特性は遮断周波数付近で大きなリングング歪みを発生させる上、フィルタ設計も複雑な多段過程となりやすく、最終的な特性の保証は困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、以上述べたようなデジタル信号処理の問題に対し、近年制御理論の分野で著しい進展を遂げたサンプル値制御理論を適用することにより、アナログ特性を最適にするデジタル信号処理理論を確立し、またその具体的な応用を展開することを目的としている。さらにこれらを基にして、必ずしも定常性を有しないようなシステムの一般理論の展開をも目指している。

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、これをサンプル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^∞ 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^∞ 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 H^2 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。

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. H^∞ 最適なオーバーサンプリング $\Delta \Sigma$ コンバータの設計法
- b. ハイブリッド性能を有する filterd-X 適

応アルゴリズム

- c. H^∞ 性能を有する最適ウェーブレット展開
- d. 本手法による画像処理アルゴリズム
- e. スプライン補間フィルタの安定性条件
- f. むだ時間系を含む無限次元系の H^∞ 制御
- g. 数値解析法に関するシステム理論

このほかにも多数の理論的成果を得ているが、今回の研究成果として特筆すべきは、本理論に基づくアナログ特性最適なフィルタによる音声・音響処理フィルタに基づく補間理論が認められ、商用 LSI として実用化されたことである。この 3 年間に於いて、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、出荷台数は累計 700 万台を突破している。研究代表者は、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 2007 年度の文部科学大臣表彰、科学技術賞、および 2008 年度のシステム制御情報学会産業技術賞を受賞している。

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、可聴帯域を遥かに超える CD 用の DA コンバータの試作機を製作し、高音質が得られることを確認した。

またこれらの理論の発展として、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意図している。この一環としては、Wavelet 解析への応用、また離散と連続の間を埋めるハイブリッド系としての数値解析の研究がある。これらは今後さらに発展し、時不変系を含むより大きな理論体系に発展していくことが期待される。

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 10 件)

- ① K. Kashima and Y. Yamamoto,
“On standard H^∞ control problems for systems with infinitely many unstable pole, *Systems.*” *Control Letts*, vol. 57, 309-314, 2008, 有
- ② K. Kashima and Y. Yamamoto,
“Finite rank criteria for H^∞ control of infintedimensional systems ,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, No. 4, 881-893, 2008, 有

- ③ J. C. Willems and Y. Yamamoto, “Behaviors described by rational symbols and the parametrization of the stabilizing controllers,” *Recent Advances in Learning and Control*, 263–277, Springer Lecture Notes in Control and Information Sciences 371, Springer-Verlag, 2008, 有
- ④ Y. Yamamoto, “Pseudorational impulse responses—algebraic system theory for distributed parameter systems,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (SICE JCMSI)*, vol. 1, No. 1, 51–57, 2008, 有
- ⑤ Y. Yamamoto, “New Development of Digital Signal Processing via Sampled-data Control Theory,” *Modeling, Estimation and Control—Festschrift in honor of Giorgio Picci’s 65th birthday*, 345–355, Springer Lecture Notes in Control and Information Sciences 364, Springer-Verlag, 2007, 有.
- ⑥ Kashima, H., Ozbay and Y. Yamamoto, “Parameterization of suboptimal solutions of the Nehari problem for infinite-dimensional systems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, No. 12, 2369–2374, 2007, 有
- ⑦ K. Kashima and Y. Yamamoto, “System theory for numerical analysis,” *Automatica*, vol. 43, 1156–1164, 2007, 有
- ⑧ J. C. Willems and Y. Yamamoto, “Behaviors defined by rational functions,” *Linear Algebra and Its Applications*, vol. 425, 226–241, 2007, 有

- ⑨ P. A. Fuhrmann, P. Rapisarda and Y. Yamamoto, “On the state of behaviors,” *Linear Algebra and Its Applications*, vol. 424, 570–614, 2007, 有

- ⑩ 藤山, 蚊野, 岩崎, 海部, 山本, “サンプル値制御理論を用いた圧縮オーディオ向け高域補正技術,” *Trans. ISCIE*, vol. 20, No. 1, 31–38, 2007, 有

[学会発表] (計 17 件)

- ① Y. Yamamoto and J. C. Willems, “Behavioral controllability and coprimeness for a class of infinite-dimensional systems,” *47th IEEE CDC*, 2008, Cancun, Mexico.

- ② M. Nagahara, M. Ogura, and Y. Yamamoto, “Interpolation of nonuniform decimated signals via sampled-data H_∞ optimization,” *SICE Annual Conference*, 2008, Tokyo, Japan.

- ③ J. C. Willems and Y. Yamamoto, “Linear differential behaviors described by rational symbols,” *17th IFAC World Congress*, 2008, Seoul, Korea,

- ④ M. Nagahara, Y. Yamamoto, and P. P. Khargonekar, “Stability of signal reconstruction filters via cardinal exponential splines,” 2008, *17th IFAC World Congress, Seoul, Korea*,

- ⑤ Y. Yamamoto, “Minimal representations for delay systems,” *17th IFAC World Congress*, 2008, Seoul, Korea

⑥ M. Nagahara and Y. Yamamoto, “Hybrid design of filtered-x adaptive algorithm via sampled-data control theory,” *IEEE Int’l Conf. Acoustics, Speech, & Signal Processing (ICASSP)*, 2008, Las Vegas, USA

⑦ J. C. Willems and Y. Yamamoto, “Parametrization of the set of regular and superregular stabilizing controllers,” *46th IEEE CDC*, 2007, New Orleans, USA

⑧ Y. Yamamoto, “Pseudorational transfer functions—A survey of a class of infinite dimensional systems,” *46th IEEE CDC*, 2007, New Orleans, USA

⑨ Y. Yamamoto, “Coprimeness in the ring of pseudorational transfer functions,” *15th Mediterranean Conf. on Control and Automation*, 2007, Athens, Greece

⑩ M. Ogura, M. Nagahara and Y. Yamamoto, “Optimal wavelet expansion via sampled data H-infinity control theory,” *SICE Annual Conference*, 2007, Kagawa, Japan

⑪ M. Nagahara and Y. Yamamoto, “Causal spline interpolation by H_∞ optimization,” *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2007, Hawaii, USA,

⑫ J. C. Willems and Y. Yamamoto, “Behaviors defined by rational functions,” *45th IEEE CDC*, 2006, San Diego, USA

⑬ K. Kashima, T. Yamamoto, and Y. Yamamoto, “A Smith-type predictor for nonminimum phase infinite-dimensional plants and its Dual Structure,” *45th IEEE CDC*, 2006, San Diego, USA

⑭ M. Nagahara, T. Wada and Y. Yamamoto, “Causal spline interpolation by H_∞ optimization,” *SICE-ICCAS 2006*, 2006, Busan, Korea

⑮ M. Nagahara, T. Wada, and Y. Yamamoto, “Design of $\Delta\Sigma$ DA converters via sampled-data H_∞ optimization,” *MTNS 2006*, 2006, Kyoto, Japan

⑯ K. Kashima, Y. Yamamoto and H. Ozbay “Parameterization of suboptimal interpolants for the Nehari problem”, *MTNS 2006*, 2006, Kyoto, Japan

⑰ M. Nagahara, T. Wada and Y. Yamamoto, “Design of oversampling delta-sigma DA converters via H-infinity optimization,” *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2006, Toulouse, France, [図書] (計 件)

[産業財産権]
○出願状況 (計 3 件)

①名称：補聴器用の音声信号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：特許出願：特願 2008-201310

出願年月日：2008. 8. 4

国内外の別：国内

②名称：補聴器用の音声信号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：特許出願:特願 2008-278051

出願年月日：2008.10.29

国内外の別：国内

③名称：画像ノイズ除去方法

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：PCT/JP2008/003481

出願年月日：2008.11.26

国内外の別：外国

○取得状況（計 件）

[その他]

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

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
70115963

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

藤岡 久也 (FUJIOKA HISAYA)
京都大学・情報学研究科・准教授
60273596

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