

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 年度 ～ 2011 年度

課題番号：21360203

研究課題名（和文）サンプル値制御理論によるハイブリッド信号処理の研究

研究課題名（英文）Hybrid Signal Processing 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・教授

研究者番号：70115963

研究成果の概要（和文）：

サンプル値 H_{∞} 制御理論によるアナログ特性を最適とするデジタルフィルタ設計法を開発・展開し、実应用到結びつけた。またこのようなフィルタの適応更新則を導くことに成功した。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、CDソースからの超高域再生、画像処理におけるジャギーな部分の処理による超解像度処理、本方法によるスプライン関数の最適構成、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などがあげられる。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3000万石を出荷する実績を上げるに至っている。ウェーブレット展開などへの新しい応用も視野に入れるに至った。

研究成果の概要（英文）：

This project has established the design methodology for digital filters that makes analog performance optimal, based on sampled-data control theory. We have also successfully derived adaptation scheme for sampled-data filters. Major achievements include a) high-quality restoration from compressed audio sources, b) super-sonic reproduction from compact disc sources, c) a super-resolution method for image processing that reduces jaggy components, d) optimal construction of splines, e) design method for fractional-delay filters with applications to pitch-shifting. In particular, the algorithm is implemented into sound-processing LSI chips, and their cumulative production has reached 30 million chips. We have also placed an application to wavelets in a subsequent scope for the future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

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：制御理論，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，音響処理，画像処理，適応フィルタ，分数次遅れフィルタ，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，サンプリング定理が成り立つとした上で，理想フィルタ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生じさせる上，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的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^2 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^2 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^1 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率を目指している．

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：

- サンプル値設計フィルタに対する適応更新則の導出
- 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
- 画像処理におけるジャギーな部分の処理による超解像度処理
- スプライン関数の最適構成
- 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．最近の6年間において，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30,000万台を突破している．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2009年度のシステム制御情報学会産業技術賞，2009年度のIEEE Control Systems Society の Distinguished Member Award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，可聴帯域を遙かに超える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。

さらにこのサンプル値設計フィルタの特性を活かし、画像処理において問題となるジャギーな部分の処理に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が可能となった。この方式は、画像処理分野で良く知られたバイキュービック法、ランチョス法、TV ノルム法をはるかに凌ぐ性能を有するもので、これからの展開が期待されている。

これ以外にも、最適 $\Delta\Sigma$ 変調コンバータの理論、あるいは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意図している。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。今後は、Wavelet 解析への応用、特に指数型スプライン関数に対する同様のフィルタ設計、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などを更に推進する予定であり、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 7 件)

① 宮崎, 工藤, 永原, 林, 山本
“エネルギーマネジメントシステムにおける電力需給バランス制御、パナソニック技報、査読有、57巻、2012、17-22

② Y. Yamamoto, M. Nagahara and P. P. Khargonekar, “A Brief Overview of Signal Reconstruction via Sampled-Data H-infinity Optimization”, *Applied and Computational Mathematics* 査読有, Vol. 11, 2012, 3-18

③ Y. Yamamoto, M. Nagahara, and P. P. Khargonekar, “Signal Reconstruction via H-infinity Sampled-Data Control Theory -- Beyond the Shannon Paradigm”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 査読有, Vol. 60, 2012, 613-625,

④ M. Nagahara, M. Ogura, and Y. Yamamoto, “H-infinity design of periodically nonuniform interpolation and decimation for non-band-limited signals”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* 査読有, Vol. 4, 2011, 341-348

⑤ 安福大輔, 藤井 彰, 山本裕, スラスト荷重下における転がり軸受振動の定式化と低速回転域での劣化診断への適用、*日本機械学会論文集*、査読有、77巻、2011、2627-2641

⑥ M. Nagahara and Y. Yamamoto, “ H^∞ optimal approximation for causal spline interpolation, *Signal Processing*, 査読有, Vol. 90, 2011, 176-184

⑦ 安福大輔, 藤井 彰, 山本裕, ラジアル荷重下における転がり軸受振動の定式化と低速回転域での劣化診断への適用、*日本機械学会論文集*、査読有、76巻、2010、2947-2954

[学会発表] (計 14 件)

① M. Nagahara, K. Hanibuchi, and Y. Yamamoto, “Duration-invariant pitch-shifting for stringed instruments,” *Proc. 3rd International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA)*, 2011, Ankara (Turkey)

② Y. Yamamoto and M. Vidyasagar, “Compact Sets in the Graph Topology and Applications to Approximation of System Design,” *Proc. 50th IEEE CDC*, 2011, Orland (U. S. A)

③ Y. Yamamoto, “Bezout Identity over a Ring of Distributions - Multivariable

- Case,” *Proc. IFAC 18th World Congress*, 2011, ,Milano(Italia)
- ④ M. Nagahara, K. Hanibuchi, and Y. Yamamoto, “Pitch Shifting by H-Infinity Optimal Variable Fractional Delay Filters,” *Proc. IFAC 18th World Congress*, 2011, Milano(Italia)
- ⑤ M. Ogura, Y. Yamamoto, and J. C. Willems, “On the dissipativity of pseudorational behaviors,” *Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control*, 2010, Atlanta(U. S. A)
- ⑥ M. Nagahara, C. F. Martin, and Y. Yamamoto, “Quadratic programming for monotone control theoretic splines,” *Proc. SICE Annual Conference 2010*, 2010, Taipei(Taiwan)
- ⑦ Y. Yamamoto, J. C. Willems and M. Ogura, “Pseudorational behaviors and Bezoutians,” *Proc. MTNS 2010*, 2010, Budapest(Hungary)
- ⑧ M. Ogura and Y. Yamamoto, “Dissipativity of pseudorational behaviors,” *Proc. MTNS 2010*, 2010, Budapest(Hungary)
- ⑨ M. Nagahara and Y. Yamamoto, “Robust repetitive control by sampled-data H^∞ filters,” *Proc. 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, 2009, Shanghai(China)
- ⑩ Y. Yamamoto and J. C. Willems, “Path integrals and Bezoutians for pseudorational transfer functions,” *Proc. 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, 2009, Shanghai(China)
- ⑪ M. Ogura and Y. Yamamoto, “Hankel norm computation for pseudorational transfer functions,” *Proc. 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, 2009, Shanghai(China)
- ⑫ M. Nagahara, M. Ogura, and Y. Yamamoto, “A novel approach to repetitive control via sampled-data H^∞ filters,” *Proc. 7th Asian Control Conference*, 2009, Hong kong(China)
- ⑬ M. Nagahara and Y. Yamamoto, “Optimal design of $\Delta\Sigma$ modulators via generalized KYP lemma,” *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, Fukuoka(Japan)
- ⑭ M. Nagahara, K. I. Sato, and Y. Yamamoto, “ H_2/H^∞ approach to the histogram method for density estimation,” *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, Fukuoka(Japan)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：超解像処理方法及び装置

発明者：山本 裕， 銭谷謙吾

権利者：山本 裕

種類：特許出願

番号：特願 2011-141632

出願年月日：2011 年 6 月 27 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計◇件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[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