

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：若手研究（B）

研究期間：2010 年度 ～ 2011 年度

課題番号：22760317

研究課題名（和文）サンプル値制御理論にもとづく無限次元コントローラの最適離散化

研究課題名（英文）Optimal discretization of infinite-dimensional controllers based on sampled-data control theory

研究代表者 永原 正章（NAGAHARA MASAOKI）

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：90362582

研究成果の概要（和文）：本研究の目標である無限次元コントローラの離散化について、「有限個のパラメータによる離散化」の方法を確立し、さらに、圧縮センシングの概念を応用した「制御器・制御則のスパース表現」という新しい方法の基礎を築いた。それをもとに、ネットワーク化制御系や遠隔制御系などにおける通信制約を考慮した最適制御法を提案した。

研究成果の概要（英文）：For the objective of this study, discretization of infinite-dimensional controllers, I established a method of discretization by finite-dimensional parameters, and then I revealed a new method of sparse representation of controllers, which is based on the study of compressed sensing. Based on this, I proposed optimal control schemes for networked control systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：制御工学、デジタル制御、無限次元系

1. 研究開始当初の背景

むだ時間系や分布定数系などの無限次元系に対する制御理論では、これまで様々な手法が提案されており、特に H^∞ コントローラ的设计方法はかなり広いクラスの無限次元系に対して確立されている。しかし、これらのコントローラは一般に無限次元系であり、現実の機器に実装するためには離散化、すなわち有限次元化と離散時間化が必要となる。これに対し、むだ時間系に対する H^∞ コント

ローラの離散化に Q.-C. Zhong の研究があるが、この離散化ではサンプル点間にリップルが生じる可能性がある。さらに、無限次元のパラメータを有限次元近似する場合、そのサイズが非常に大きくなってしまふことがあり、特にデジタル制御系やネットワーク化制御系などでは、そのような複雑なコントローラを実装することは難しい。しかし、実装のための小規模な（スパースな）コントローラ的设计法は、これまでほとんど確立されて

いなかった。

2. 研究の目的

むだ時間系や分布定数系などの無限次元系に対するコントローラは一般に無限次元となる。しかし、これをデジタル機器に実装するためには、コントローラの無限次元部分を有限次元・離散時間系に適切に変換（離散化）しなければならない。本研究では、サンプル値制御理論および圧縮センシングの理論を援用して、この問題の解法を明らかにし、無限次元コントローラの離散化法の確立を目指す。

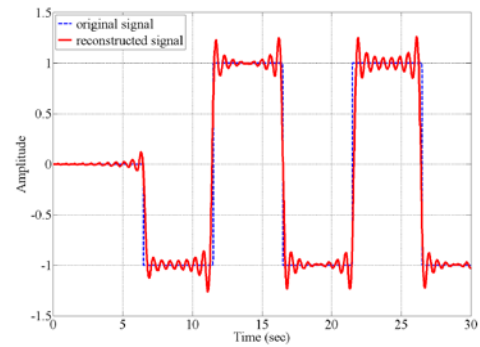
3. 研究の方法

無限次元系のコントローラの離散化法を確立するために、サンプル値制御理論および圧縮センシングの技法を援用する。具体的には、無限次元系のうち、FIR型と呼ばれるシステムの最適離散化をサンプル値制御理論を用いて行なう。また、無限個の基底で表現されたシステムのインパルス応答を離散化し、コンパクトに表現するために圧縮センシングの理論を援用し、制御信号のスパース表現を導出する。さらに、提案手法の有効性を確認するための計算機シミュレーションを行なう。

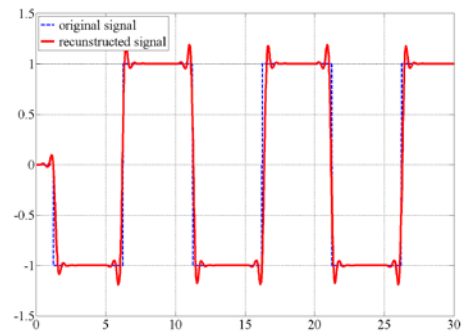
4. 研究成果

無限次元系に限らず、システムの離散化にサンプル値制御理論が有効であることを実証し、それらの結果を雑誌論文および国際会議等で発表した。また、圧縮センシングの理論が特にコントローラの離散化に有効であることを示した。現在の制御系がデジタルコントローラの使用を前提としていることを考えると、当該研究によって得られた成果は、非常に重要であり、また有用である。具体的な成果は下記の通りである。

(1) サンプル値制御理論にもとづくシステム・信号の最適離散化を研究し、従来のL2最適化よりもはるかに優れた離散化システムが得られることを示した。特に、すべての周波数成分を含む矩形波の応答を見ると、提案法の優位性が明らかとなる。次の図は従来法による矩形波応答であり、不連続点のまわりでリングングと呼ばれる振動現象が見られる。

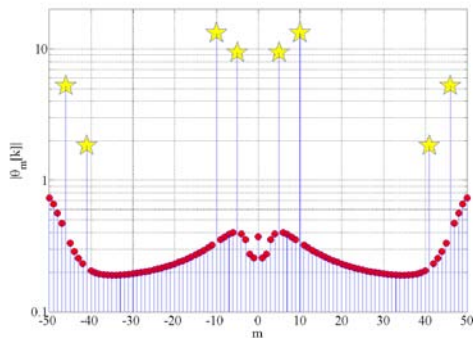


いっぽうサンプル値制御理論で離散化したシステムの矩形波応答は以下のようになり、リングングが無い忠実な応答を示している。これは、サンプル値制御理論を用いたサンプル点間の応答をも考慮した設計の優位性を示している。

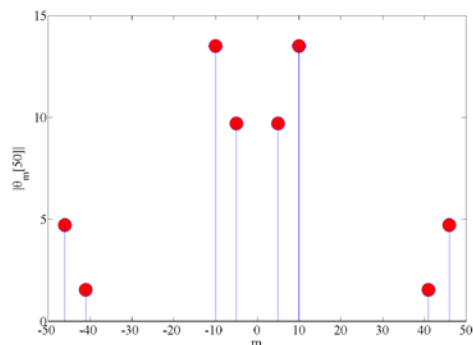


(2) 遠隔制御系における制御信号の離散化および符号化において、通信路制約に対処するために、圧縮センシングの技法を導入し、制御信号のスパース表現を提案した。この方法により、制御性能の劣化を抑えたまま、制御信号をより小さなデータサイズへと圧縮することが可能となり、通信路制約に対処できる。通常では、データを圧縮する場合、そのデータを大きい順にならべ、ある閾値を設定して、その閾値以下のデータを0と置くことにより、サイズの縮小をはかる。しかし、圧縮センシングの手法を用いれば、スパース性を最適にする設計が可能となり、性能もただ単に打ち切るよりも、良いものとなる。例え

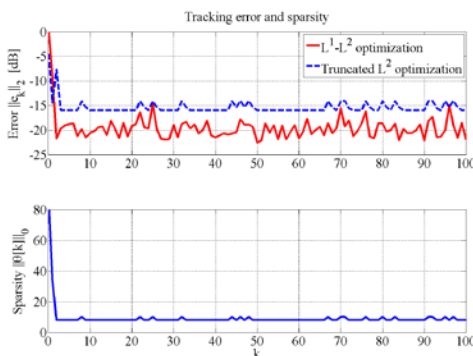
ば、次の図は、従来法で設計された制御パラメータと、そのうち大きいものから8つ選んだパラメータ（星印）を示す。



いっぽう、圧縮センシングの手法により得られたパラメータは以下となる。

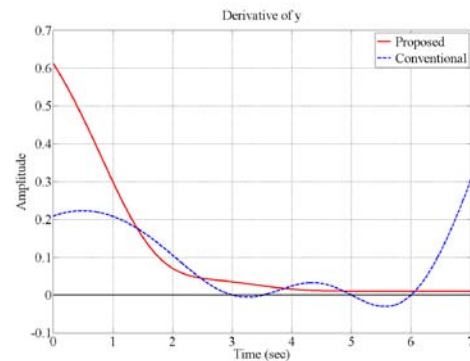


8つのパラメータ以外は厳密に0の値をとる。これらの制御パラメータを用い、制御系のシミュレーションを行なう。結果は以下の図である。



パラメータを大きい順に並べ、ある閾値でパラメータを打ち切る従来法よりも、提案手法の性能が良い様子がわかる。この研究により、圧縮センシングの理論は、コントローラの離散化や制御信号のサイズ縮小に有効であることが示された。これらの性質は、特にネットワーク化制御系や遠隔制御系など、通信が帯域制限されていたり、通信のデコード側で複雑な処理が不可能な場合には、特に有効である。

(3) また、制御理論スプラインの枠組みを用いた制御則の離散化の研究も行なった。特に、追従問題を考え、出力の微分値が常に正となるように制御を行なう問題は、monotone control theoretic spline と呼ばれ、これまで未解決であった。本研究で、2次最適化を用いた解法を与え、数値例により有効性を示した。次の図は、出力の微分をあらわすもので、従来法の単なる離散化では、サンプル点間にリップルが生じ、微分値が負となってしまうが、提案手法では、そのようなことはなく、常に正の微分値が得られていることがわかる。



上記3つの成果は、国内はもとより国際的にも評価されつつある。実際、IEEE Transaction on Signal Processing などの一流論文誌や ICASSP などの国際会議での発表を行い、大きなインパクトを与えたと考えている。今後は、特に圧縮センシングの手法にさらに取り組み、ネットワーク化制御系の安定性などの考察等の課題を解決したい。

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5件)

1. 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, No.2, pp.613-625, 2012年2月

2. 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), Vol.57, No.4, pp.17-22, 2012年1月.

3. T.Matsuda, M. Nagahara, and K.Hayashi, "Link quality classifier with compressed sensing based on l1-l2 optimization," IEEE Communications Letters (査読有), vol.15, no.10, pp.1117-1119, 2011年10月

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, No.5, pp.341-348, 2011年4月.

5. M. Nagahara and Y. Yamamoto, "H-infinity optimal approximation for causal spline interpolation", Signal Processing (査読有), Vol.91, No.2, pp.176-184, 2011年2月

[学会発表] (計9件)

1. M. Nagahara, Compressive sampling for networked feedback control, IEEE ICASSP 2012, 2012/3/30, Kyoto, Japan

2. M. Nagahara, Sparse Command Generator for Remote Control, IEEE ICCA 2011, 2011/12/21, Santiago, Chile

3. 永原, 制御工学と信号処理 (招待講演), 電子情報通信学会 2011年ソサイエティ大会, 2011/9/13, 北海道大学

4. 永原, スパースの国のネットワーク化制御 (招待講演), 電子情報通信学会 2011年ソサイエティ大会, 2011/9/15, 北海道大学

5. M. Nagahara, Pitch Shifting by H-Infinity-Optimal Variable Fractional Delay Filters, IFAC World Congress 2011, 2011/8/30, Milano, Italy

6. M. Nagahara, Sparse Representations for Packetized Predictive Networked Control, IFAC World Congress 2011, 2011/8/29, Milano, Italy

7. M. Nagahara, Duration-invariant pitch-shifting for stringed instruments, COIA 2011, 2011/8/22, Bilkent University, Turkey

8. 永原, 制御理論的スプラインのスパース表現, 第39回制御理論シンポジウム, 2010年9月27日, ホテルコスモスクエア国際交流センター (大阪)

9. M. Nagahara, Quadratic programming for monotone control theoretic splines, SICE Annual Conference 2010, 2010年8月19日, Grand Hotel (台湾・台北)

[図書] (計2件)

1. M. Nagahara (分担執筆), Applications of Digital Signal Processing, InTech, 2011年, 400ページ

2. M. Nagahara (分担執筆), Perspectives in Mathematical System Theory, Control, and Signal Processing, Springer, 2010年, 388ページ

[その他]

ホームページ等

http://www-ics.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~nagahara/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永原 正章 (NAGAHARA MASA AKI)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号: 90362582

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: