

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560543

研究課題名(和文)信号のスパース表現にもとづくネットワーク化制御系での高効率情報伝送

研究課題名(英文)Reliable Communications for Networked Control Systems Based on Sparse Representation

研究代表者

永原 正章(Nagahara, Masaaki)

京都大学・情報学研究科・講師

研究者番号：90362582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、信号処理や機械学習において近年特に重要な課題であるスパース性の概念をネットワーク化制御に応用し、ノイズが存在するもとの高効率な圧縮を可能とする信号表現法を提案した。また、スパース性の概念を連続時間制御系に拡張し、スパース最適制御と呼ぶ新しい最適制御理論を構築した。スパース最適制御とは、与えられた制約条件のもとで連続時間制御信号の台の長さを最小化するような制御方式で、そのままでは問題は凸でなく最適解を求めることは極めて難しい。これに対して、スパース最適制御の凸緩和であるL1最適制御の解がスパース最適制御となるための非常に簡単な条件を導出した。

研究成果の概要(英文)：In this research, I have applied the notion of sparsity, which has been an important research subject in signal processing and machine learning, to networked control. I have proposed a novel method of signal representation for networked control systems, which can achieve high efficient data compression of control signals in the presence of noise. Moreover, I have proposed a novel optimal control, called sparse optimal control, which is an extension of sparsity to continuous-time signals. Sparse optimal control is a control that has the minimum support length among all admissible control signals. This optimal control problem is highly non-convex and difficult to solve. For this problem, I have derived a simple sufficient condition for the equivalence between the sparse optimal control and the L1 optimal control that is a convex relaxation of the sparse optimal control.

研究分野：制御工学

キーワード：最適制御 制御
スパースモデリング スパース表現 圧縮センシング スパース最適制御 ネットワーク化

1. 研究開始当初の背景

無線通信路やインターネットなど帯域の狭い通信路を介して遠隔にある制御対象を制御する系をネットワーク化制御系と呼び、無人航空機や遠隔操作ロボット、スマートグリッドのような大規模プラントから自動車内 LAN まで 様々な制御系がこれに該当する。従来の古典的な制御理論では、フィードバック制御系の内部における信号伝送に無限の通信レートを仮定するが、ネットワーク化制御系では、通信路におけるパケット損失やビットレート制約、時間遅れなどの制約を陽に考慮した設計が必要不可欠となる。

このような背景のもと、研究代表者らは、特にビットレート制約に着目し、制御信号のスパース表現を導入することで、一定の制御性能を確保しつつ、伝送信号を高度に圧縮して伝送する手法を提案した [永原ほか, 信号処理シンポジウム 2010], [M. Nagahara and D.E. Quevedo, IFAC 2011], [M. Nagahara et al., ICCA 2011]。これらの研究では、信号処理や画像処理の分野で近年特に盛んに研究されているスパース性および圧縮センシングの概念を制御系に応用し、ベクトルの非ゼロ要素の個数として定義される「L0 ノルム」にもとづく最適化を提案している。このような最適化は、制御の分野ではこれまでほとんど考慮されてこなかったものの、研究代表者らの上記の研究により、ネットワーク化制御系における高効率な情報伝送に有効であることが明らかにされつつあった。

2. 研究の目的

これらの研究は、当初、シミュレーションによる有効性の検証がなされただけであり、理論的な安定性の解析や圧縮率の限界などの理論的な課題は未解決であった。また、これらは線形時不変な離散時間系のみのものである結果であり、非線形系や連続時間系への拡張法も知られていなかった。本研究では、これら未解決問題を解明すると同時に、スパース最適化のアプローチにもとづくネットワーク化制御系設計に関する基礎研究を完成させ、制御系の安定性や制御性能を犠牲にすることなく伝送信号を効率的に情報圧縮するための基盤研究を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的は、スパース性の概念にもとづく圧縮センシングの技法をネットワーク化制御系に応用し、伝送信号の高効率な情報圧縮のための基礎理論を確立することである。その目的のために、次の3つの課題に取り組む。

- (1) 非線形制御系に対する制御信号のスパース表現：入力アフィンな非線形系に対して、ポントリャーギンの最小原理にもとづき、信号のスパース表現を導出する。
- (2) 連続時間系に対する制御信号のスパース表現：信号のサポートの長さを最小化

することにより、スパースな連続時間最適制御を定式化し、凸緩和の方法により最適解を導出する。

- (3) 高速アルゴリズムの開発と計算量の評価：近接分解法 (proximal splitting) の方法を拡張し、高速アルゴリズムを導出する。

4. 研究成果

本研究では、スパース性の概念をネットワーク化制御系に応用し、通信制約のもとでの高効率な情報伝送の手法を提案することを目的とした。上記3で述べた方法にもとづき、ノイズが存在するもとでの高効率な圧縮を可能とする信号表現法を提案した。また、スパース性の概念を連続時間制御系に拡張し、スパース最適制御と呼ぶ新しい最適制御理論を構築した。スパース最適制御の凸緩和である L1 最適制御の解がスパース最適制御となるための非常に簡単な条件を導出した。さらに、スパース性の概念を「離散値性」に拡張し、離散値だけをとる制御信号の設計方法を拡張 L1 最適制御により定式化し、近接分解法 (proximal splitting) による高速アルゴリズムにより極めて効率的に解けることを示した。以下、各成果について詳細に述べる。

- (1) ノイズが存在するもとでの制御信号の高効率圧縮

ネットワーク化制御系において、パケットが消失するような信頼性の低い通信路に対してロバストな制御法であるパケット化予測制御を考察し、パケット長が長くなればなるほどデータ量が増えるという問題点をスパース最適化により解決した。L1/L2 混合最適化により、高速アルゴリズムが構築でき、実時間の制御にも適していることを示した。また、欲張り法にもとづく L0 最適化も提案し、この方式によれば漸近安定が達成できることを理論的に示した。以上の成果は、IEEE Transaction on Automatic Control の論文としてまとめられた [Nagahara, Quevedo, and Ostergaard, IEEE TAC, 2014]。

さらに、通信路に外れ値的なノイズが加わるようなネットワーク化制御系を考え、制御信号を制御理論のスプラインで展開したときのスパース表現を与えるアルゴリズムを提案した。これにより、少ないパラメータで突発的なノイズに強い制御信号が生成できることを示した。この成果は、Asian Journal of Control および IEEE Signal Processing Letters に論文としてまとめられた [Nagahara and Martin, Asian Journal of Control, 2012], [Nagahara and Martin, IEEE Signal Processing Letters, 2015]。

- (2) スパース最適制御理論

上で述べたような制御信号のスパース

表現を連続時間制御信号に拡張し，連続時間としてのスパース最適制御理論を提唱した．スパース最適制御を用いれば，ある一定の時間区間で制御信号を 0 とすることができ，その間アクチュエータを停止させることができる．この性質は，省エネルギーの観点から極めて重要である．この研究成果は，国際会議論文として発表され [Nagahara, Quevedo, Nesic, IEEE CDC, 2013]，後に学術論文としてまとめられた [Nagahara, Quevedo, Nesic, IEEE TAC, 2015]．

(3) 離散値制御の設計と高速アルゴリズム

スパース性の概念を拡張し，離散値をだけをとるような制御信号の設計問題を拡張 L1 最適化によって解く方法を提案した．離散値だけをとるような制御信号はネットワーク化制御系の量子化に対応し，極めて重要な課題である．拡張 L1 最適化の概念は，IEEE Signal Processing で発表された [Nagahara, IEEE SPL, 2015]．また，離散値制御の設計法は，国内会議で発表された [永原，林，高信頼制御通信研究会，2015]．現在，これらの成果を論文にまとめているところである．

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 9 件)

M. Nagahara, D. E. Quevedo, and D. Nesic, Maximum Hands-off Control: A Paradigm of Control Effort Minimization, IEEE Transactions on Automatic Control, 2015. (掲載予定)
H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, Digital Cancellation of Self-Interference for Single-Frequency Full-Duplex Relay Stations via Sampled-Data Control SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2015. (掲載予定)
M. Nagahara, Discrete Signal Reconstruction by Sum of Absolute Values, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 22, no. 10, pp. 1575-1579, Oct. 2015. (掲載予定)
M. Nagahara and C. F. Martin, L1 Control Theoretic Smoothing Splines, IEEE Signal Processing Letters, vol. 21, no. 11, pp. 1394-1397, Nov. 2014.
M. Nagahara, D. E. Quevedo, and J. Ostergaard, Sparse Packetized Predictive Control for Networked Control over Erasure Channels, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 59, no. 7, pp. 1899-1905, July 2014.
M. Nagahara and Y. Yamamoto, H-infinity-optimal fractional delay

filters, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 61, No. 18, pp. 4473-4480, 2013.

M. Nagahara and C. F. Martin, Monotone Smoothing Splines Using General Linear Systems, Asian Journal of Control, Vol. 5, No. 2, pp. 461-468, Mar. 2013.

K. Hayashi, M. Nagahara, and T. Tanaka, A User's Guide to Compressed Sensing for Communications Systems, invited paper, IEICE Trans. on Communications, Vol. E96-B, No. 3, pp. 685-712, Mar. 2013.

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.

[学会発表](計 28 件)

査読付き国際会議論文

H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, H-infinity Optimal Coupling Wave Canceler Loop-Back Interference Suppression for OFDM Signals via Sampled-Data Control 10th Asian Control Conference (ASCC), May-Jun. 2015 年 6 月 2 日, Kota Kinabalu.

T. Ikeda and M. Nagahara, Continuity of the Value Function in Sparse Optimal Control, 10th Asian Control Conference (ASCC), May-Jun. 2015 年 6 月 2 日, Kota Kinabalu

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, 東京, 2015 年 3 月 5 日.

T. Ikeda and M. Nagahara, Value Functions in Sparse Optimal and L1 Optimal Controls, SICE International Symposium on Control Systems, 東京, 2015 年 3 月 5 日.

M. Nagahara, H. Sasahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, Sampled-data H-infinity design of coupling wave cancelers in single-frequency full-duplex relay stations, SICE Annual Conference 2014, 札幌, 2014 年 9 月 10 日.

M. Nagahara and Y. Yamamoto, FIR digital filter design by sampled-data H-infinity discretization, The 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 2014 年 8 月 26 日.

M. Nagahara, D. E. Quevedo, and D. Nesic, Maximum-hands-off control and L1 optimality, 52nd IEEE Conference

on Decision and Control (CDC), pp. 3825-3830, Firenze, Italy, 2013年12月11日.

M. Nagahara and Y. Yamamoto, Optimal discretization of analog filters via sampled-data H-infinity control theory, The 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC 2013), pp. 527-532, Hyderabad, India, 2013年8月29日

M. Nagahara and C. F. Martin, L1-optimal splines for outlier rejection, The 59th World Statistics Congress, pp. 1137-1142, 香港, 2013年8月27日.

M. Nagahara, D. E. Quevedo, and J. Ostergaard, Packetized predictive control for rate-limited networks via sparse representation, 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 1362-1367, Hawaii, USA, 2012年12月10日~13日.

M. Nagahara, Y. Yamamoto, S. Miyazaki, T. Kudoh, and N. Hayashi, H-infinity control of microgrids involving gas turbine engines and batteries, 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 4241-4246, Hawaii, USA, 2012年12月10日~13日.

M. Nagahara, D. Quevedo, and J. Ostergaard, Sparsely-packetized predictive control by orthogonal matching pursuit Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS2012), Melbourne, Australia, 2012年7月9日~13日.

M. Nagahara and Y. Yamamoto, H-infinity optimal fractional delay filters with application to pitch shifting 2012 IFAC Workshop on Time Delay Systems, pp. 61-66, Boston, USA, 2012年6月22日~24日.

国内学会発表

笹原, 永原, 林, 山本, サンプル値 H 最適フィルタによる単一周波数全二重無線中継局の回り込み波抑制, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, 吹田, 2015年1月16日.

池田, 永原, スパース最適制御における値関数の連続性について, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会 吹田 2015年1月16日.

永原, 林, 離散値制御入力生成のための拡張 L1 最適制御, 高信頼制御通信研究会, 名古屋, 2015年1月15日.

笹原, 永原, 林, 山本, 回り込み波キャンセラのサンプル値 H ロバスト設計, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 徳島, 2014年9月15日.

池田, 永原, スパース最適制御の数値計算について, 7月高信頼制御通信研究会, 信学技報 RCC2014-25, 京都, 2014年7月30日.

笹原, 永原, 林, 山本, サンプル値 H 最適化にもとづく回り込み波キャンセラの設計, 高信頼制御通信研究会(RCC), 信学技報 RCC2014-16, 東京, 2014年5月30日.

大島, 永原, 山本, 2 輪型倒立振子ロボットのサンプル値制御, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 2014年5月23日.

笹原, 永原, 林, 山本, サンプル点間応答を考慮した回り込み波キャンセラの H 最適設計, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 2014年5月23日.

永原, D. E. Quevedo, D. Netic, 省エネのための無干渉制御, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014年3月7日.

永原, 省エネルギーのためのスパース制御, 11月高信頼制御通信研究会, 大阪, 2013年11月21日.

永原, 制御におけるスパース性の利用について, 第28回信号処理シンポジウム, 下関, 2013年11月20日.

永原, 最小燃料制御の L0 最適性, 第56回自動制御連合講演会, 新潟, 2013年11月16日.

永原, L1 最適制御のスパース性について, 2013年度第1回高信頼制御通信研究会, 京都, 2013年5月17日.

永原, 遠隔制御に適した圧縮センシング手法の検討, 2012年度第1回高信頼制御通信研究会, 岐阜, 2012年6月5日.

永原, D.E. Quevedo, J. Ostergaard, ネットワーク化制御のためのパケット化予測制御とスパース表現, 第41回制御理論シンポジウム, 神奈川, 2012年9月18日~20日.

〔図書〕(計2件)

東, 永原編著, マルチエージェントシステムの制御, コロナ社, 2015年(発刊予定)

M. Nagahara, K. Hamaguchi, and Y. Yamamoto, Active noise control with sampled-data filtered-x adaptive algorithm, Mathematical System Theory - Festschrift in Honor of Uwe Helmke on the Occasion of his Sixtieth Birthday, pp. 275-290, CreateSpace, 2013. ISBN 978-1470044008

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称: METHOD FOR DESIGNING POWER CONTROLLER, POWER CONTROLLER, AND POWER

CONTROL DEVICE
発明者：Takahiro Kudoh, Tatsuto Kinjo,
Seiya Miyazaki, Yutaka Yamamoto, Masaaki
Nagahara, Naoki Hayashi
権利者：Panasonic Corporation
種類：Application
番号：20150131346
出願年月日：May 14, 2015
国内外の別： 国外（アメリカ）

名称：METHOD FOR DESIGNING A CONTROL
APPARATUS AND CONTROL APPARATUS
発明者：Seiya Miyazaki, Takahiro Kudoh,
Yutaka Yamamoto, Masaaki Nagahara
権利者：Panasonic Corporation
種類：Application
番号：20130150993
出願年月日：June 13, 2013
国内外の別： 国外（アメリカ）

取得状況（計4件）

名称：Method and apparatus for removing
image noise
発明者：Yutaka Yamamoto, Masaaki Nagahara,
Akira Kobayashi
権利者：Kyoto University
種類：Grant
番号：8611680
出願年月日：November 11, 2008
取得年月日：December 17, 2013
国内外の別： 国外（アメリカ）

名称：Method for designing audio signal
processing system for hearing aid, audio
signal processing system for hearing aid,
and hearing aid
発明者：Yutaka Yamamoto, Masaaki Nagahara
権利者：Kyoto University
種類：Grant
番号：8488823
出願年月日：August 3, 2009
取得年月日：July 16, 2013
国内外の別： 国外（アメリカ）

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：京都大学
種類：特許
番号：特許第 5142300 号
出願年月日：2008 年 11 月 26 日
取得年月日：2012 年 11 月 30 日
国内外の別： 国内

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：京都大学
種類：特許

番号：特許第 530306 号
出願年月日：2009 年 8 月 3 日
取得年月日：2013 年 7 月 5 日
国内外の別： 国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://www-ics.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~nagahara>
<http://sparseland.blogspot.com/>

6. 研究組織
(1) 研究代表者
永原 正章 (NAGAHARA, Masaaki)
京都大学・大学院情報学研究科講師
研究者番号：90362582
(2) 研究協力者
Daniel E. Quevedo (Paderborn University)
Jan Ostergaard (Aalborg University)
Dragan Nesic (Melbourne University)
Clyde Martin (Texas Tech University)