

令和 元年 6 月 21 日現在

機関番号：27101
 研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
 研究期間：2017～2018
 課題番号：16KK0134
 研究課題名（和文）最適制御理論と統計的学習理論による動的スパースモデリングの展開（国際共同研究強化）
 研究課題名（英文）Dynamical Sparse Modeling by Optimal Control Theory and Statistical Learning (Fostering Joint International Research)
 研究代表者
 永原 正章 (Nagahara, Masaaki)
 北九州市立大学・環境技術研究所・教授
 研究者番号：90362582
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,400,000円
 渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）： インド工科大学ボンベイ校，インド工科大学ハイデラバード校，およびパダボーン大学（ドイツ）など海外研究機関と共同研究を行い，動的スパースモデリングの理論研究及びその応用に関する成果を得た．L1/L2最適制御のスパース性と連続性の性質について，非平滑最大値原理にもとづいて調べ，さらにはスパース最適制御のフィードバック制御を提案した．
 また，日本とインドの研究者交流を目的としたワークショップを北九州で1回（2018年5月10日），インド工科大学ボンベイ校で2回（2018年10月25日，2019年1月30日）開催した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

動的スパースモデリングはスパース最適制御とも呼ばれ，スパース性の観点からシステムの省エネルギー性を考慮し，それを最適化する数理的な手法として注目されている．本研究では，インド工科大学やパダボーン大学（ドイツ）の最適制御および統計的学習理論の専門家と共同研究を行い，最適制御の基礎研究を推進した．学術的に極めて重要なだけでなく，超スマート社会（Society 5.0）の実現に向けた重要な要素技術として，将来の発展も期待できる．以上より，本研究は，学術的意義だけでなく大きな社会的意義も持つ．

研究成果の概要（英文）： The research has been done by international collaborative team with Indian Institute of Technology (IIT) Bombay, IIT Hyderabad, and Paderborn University (Germany). We have investigated theoretical analysis of dynamical sparse modeling and its applications. We have analyzed the L1/L2 optimal control in view of sparsity and continuity, based on the non-smooth maximum principle. Also, we have proposed feedback control with sparse optimal control.

We organized three workshops in Kitakyushu (10/May/2018) and in IIT Bombay (25/September/2018, 30/January/2019) for networking by researchers from Japan and India.

研究分野： 制御理論

キーワード： 動的スパースモデリング 最適制御 圧縮センシング スパースモデリング ネットワーク化制御 スパース最適制御 省エネルギー 超スマート社会

1. 研究開始当初の背景

動的スパースモデリングは、機械学習や人工知能の分野で注目を集めているスパースモデリングのアイデアを制御系設計に応用したものである。動的スパースモデリングにおけるスパース性は、制御系のアクチュエータを可能な限り停止させるという指標（L0 ノルム指標）として解釈される。動的スパースモデリングにおける L0 ノルム最小化問題は非平滑（微分不可能）かつ非凸という極めて困難な性質を持つ。この問題に対して、研究代表者らは、制御問題の正規性（normality）を仮定すれば L0 最適解が L1 最適制御問題の解と一致することを発見した [Nagahara et al. IEEE TAC 2016]。L1 最適制御問題は凸最適化問題であり、その解は容易に計算できる。そして、L1 最適制御を解くことで得られるスパースな制御（スパース最適制御と呼ぶ）により、以下のような省エネルギーを陽に考慮した制御系が設計できる

- 信号のスパース性にもとづいたデータ圧縮による通信データ量の効率的な削減
- アクチュエータの休止区間を最大化することによる燃料や電力の消費量の最小化
- アクチュエータを休止させることによる CO2 排出や振動、騒音等の削減

2. 研究の目的

本国際共同研究では、これまでの動的スパースモデリング（スパース最適制御）研究を国際共同研究によりさらに加速し、理論の構築およびその社会実装の可能性を探ることを目的とする。具体的には以下の3つの課題に取り組む。

- (1) 非平滑 (non-smooth) 最適制御理論にもとづく L0 最適性の理論的解析
非平滑最適制御理論の専門家である Prof. Debasish Chatterjee (Indian Institute of Technology Bombay)との共同研究。正規性の仮定が成り立たない場合の動的スパースモデリングの解析、および最適制御の数値計算法の開発を行う。
- (2) スパースモデリングと最適制御をつなぐ統計的学習理論アプローチ
制御理論と統計的学習理論の世界的権威である Prof. Mathukumalli Vidyasagar (Indian Institute of Technology Hyderabad および University of Texas at Dallas) との共同研究。統計的学習理論における正則化の観点から動的スパースモデリングを定式化しなおし、機械学習や人工知能との関連を調べ、無人航空機の自動運転への応用を考察する。
- (3) 動的スパースモデリングの分散ネットワーク化制御への応用
分散ネットワーク化制御の専門家である Prof. Daniel Quevedo (University of Paderborn, ドイツ) との共同研究。スマートグリッドや IoT (Internet of Things) において重要な分散ネットワーク化制御へ動的スパースモデリングを拡張し、その応用としてインダストリー4.0 への適用を考察する。

3. 研究の方法

本国際共同研究は、基課題で提案した動的スパースモデリング（スパース最適制御）の理論を国際共同研究チームによりさらに発展させ、国際共同研究をさらに強化させることを目的とする。具体的には、以下の3つの課題に取り組む。

- (1) 非平滑 (non-smooth) 最適制御理論にもとづく L0 最適性の理論的解析
Prof. Debasish Chatterjee (Indian Institute of Technology Bombay)との共同研究（インド・ムンバイ）
研究代表者がこれまでの研究で得た L1 ノルムを用いた凸緩和による動的スパースモデリングの理論的結果を拡張し、正規性が成り立たない場合の解析に取り組む。正規性が成り立たない場合、凸緩和による方法は採用できず、問題は本質的に非平滑（すなわち微分不可能）かつ非凸となる。そのような場合に有効とされている非平滑最適制御理論（たとえば[F. Clarke, Springer, 2013]）を援用し、L0 ノルム、または Lp ノルム ($0 < p < 1$) を評価関数としたスパース最適制御の解析、およびその具体的な設計法の導出に取り組む。
共同研究者の Chatterjee 博士は非平滑最適制御理論の専門家である。実際 Chatterjee 博士と本課題の基礎検討をすでに行っており、最近学術論文としてまとめられた [Chatterjee, Nagahara 他, Systems & Control Letters, 2016]。この結果は L0 最適制御の存在性を調べたものである。本研究計画では、この結果をさらに進め、L0 最適制御の特徴や最適制御の効率的な数値計算法について調査する。
- (2) スパースモデリングと最適制御をつなぐ統計的学習理論アプローチ
Prof. Mathukumalli Vidyasagar (Indian Institute of Technology Hyderabad および University of Texas at Dallas) との共同研究（インド・ハイデラバードおよびアメリカ・ダラス）
機械学習や人工知能の分野におけるスパースモデリングは、統計的学習理論における正則化と呼ばれる手法で説明される。研究代表者はこのアイデアにもとづき、動的ス

パースモデリング（スパース最適制御）を無限次元空間（具体的には Lebesgue 絶対可積分関数からなる L_1 空間）における正則化と解釈して，その高速アルゴリズムを導出した [Ikeda and Nagahara, SICE ISCS, 2015]．本研究計画では，このアイデアを拡張し，制御理論および統計的学習理論の世界的権威である Vidyasagar 教授との共同研究により，動的スパースモデリングの統計的学習理論からのアプローチを考察する．無人航空機や自動運転などに機械学習や人工知能を搭載することが近年盛んに議論されているが，それら動的システムの制御には，そのダイナミクスを陽に考慮しなければならない．このような設計には動的スパースモデリングが有効である．その意味から，理論的な検討に加えて，無人航空機の自動制御にも取り組み，環境から学習する学習理論的側面と安定性を保証する制御理論的側面の両方からの設計法を提案する．

(3) 動的スパースモデリングの分散ネットワーク化制御への応用

Prof. Daniel Quevedo (University of Paderborn) との共同研究（ドイツ・パダボーン）

動的スパースモデリングの重要な応用のひとつにネットワーク化制御がある．動的スパースモデリングにより制御信号がスパースに表現され，ネットワーク通信路の制約やパケットロスなどに対応できることを Quevedo 博士らとの共同研究 [Nagahara, Quevedo, and Ostergaard, IEEE TAC, 2014] で提案して以来，ネットワーク化制御系に動的スパースモデリングが有効であることを研究代表者らは示してきた．

本共同研究ではこの研究をさらに推し進め，スマートグリッドや IoT (Internet of Things) などで重要な分散ネットワーク化制御に拡張する．その準備的な基礎検討として，平均合意をスパースな分散最適制御で達成する研究をすでに行っている [Ikeda, Nagahara, and Kashima, IEEE CDC, 2016 (accepted)]．特にドイツでは，インダストリー4.0 の名のもとに，工場システムの IoT を構成し，分散最適化の技術を導入して，産業を国全体で効率化させるという大きな目標を立てている．本研究は，まさにこのインダストリー4.0 の根幹技術であり，ドイツでの最新研究動向にも注視しながら，研究を推進する．

4. 研究成果

本研究では，制御入力の休止区間（制御の値が0である時間区間）を最大化する新しい最適制御を開発し，省エネルギーの観点からその有効性を示した．非平滑最適制御理論にもとづき， L_0 最適性の必要条件を導出し，その性質を明らかにした．また近接作用素を用いた高速アルゴリズムを導出し，モデル予測制御の枠組みでの有効性を示した．

さらに本研究では，インドやドイツ，米国の研究機関との共同研究を積極的に推進し，多くの国際共著論文を執筆した．本研究の成果は世界的に評価され，IEEE システム制御部門の国際賞 George S. Axelby 最優秀論文賞を受賞した．

以下，主要な研究成果について説明する．

(1) L_0 最適制御の理論的な枠組みの構築と計算アルゴリズムの導出

連続時間信号の L_0 ノルムを最小化する L_0 最適制御は不連続となることが知られているが， L_2 ノルムの正則化項を付け加えることにより，統計的機械学習における LASSO のような性質を獲得する．その性質，特に最適制御の連続性を調べた[1,2,4]．また，周波数領域におけるスパース最適制御とそのための高速アルゴリズムを導出した[3]．さらに最短時間制御との関連を調べた[5]．

[1] N. Challapalli, M. Nagahara, and M. Vidyasagar, Continuous Hands-off Control by CLOT Norm Minimization, Proc. of the 20th IFAC World Congress 2017, pp. 15019-15024, Toulouse, France, July 14, 2017.

[2] M. Nagahara, N. Challapalli, and M. Vidyasagar, CLOT Optimization for Distributed Hands-Off Control with Continuity, SICE Annual Conference 2017, Sept. 21, 2017.

[3] M. Nagahara and D. Chatterjee, Optimal Control with Sparsity Constraints in the Frequency Domain, SICE Annual Conference, pp. 398-400, Nara, 12 Sept, 2018.

[4] M. Nagahara and D. Chatterjee, Continuity of the Combined L_1 - L_2 Optimal Control for Linear Systems, 5th Indian Control Conference (ICC), pp. 506-509, Delhi, Jan, 2019.

[5] T. Ikeda and M. Nagahara, Time-Optimal Hands-off Control for Linear Time-Invariant Systems, Automatica, Vol. 99, pp. 54-58, 2019

(2) スパース最適制御の離散値制御への拡張

上記の L_0 最適制御のアイデアを離散値制御へと拡張し，離散値をとる制御系の設計を L_1 最適制御に帰着する手法を提案した[6,8]．また，この方法をデジタル通信システムへ応用した[7]．

- [6] T. Ikeda, M. Nagahara, and S. Ono, Discrete-Valued Control of Linear Time-Invariant Systems by Sum-of-Absolute-Values Optimization, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 62, No. 6, pp. 2750-2763, June 2017.
- [7] H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, Multiuser Detection based on MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 65, no. 21, pp. 5621-5634, Nov. 2017.
- [8] T. Ikeda and M. Nagahara, Discrete-valued Model Predictive Control using Sum-of-Absolute-Values Optimization, Asian Journal of Control, Vol. 20, No. 1, pp. 196-206, 2017

(3) マルチエージェント系への拡張

スパース最適制御をマルチエージェント系へ拡張し, スパースな分散制御を実現するための手法を提案した[12]. また, スパース最適化の分散最適化への応用も提案し, その有効性を示した[11].

[11] N. Hayashi and M. Nagahara, Distributed Proximal Minimization Algorithm for Constrained Convex Optimization over Strongly Connected Networks, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences Vol. E102-A, No. 02, Feb. 2019.

[12] T. Ikeda, M. Nagahara, and K. Kashima, Maximum Hands-off Distributed Control for Consensus of Multi-Agent Systems with Sampled-data State Observation, IEEE Transactions on Control of Network Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 852-862, June 2019.

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計9件)

1. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, Self-Interference Suppression based on Sampled-Data H-infinity Control for Baseband Signal Subspaces, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (印刷中, 査読有)
2. T. Ikeda, M. Nagahara, and K. Kashima, Maximum Hands-off Distributed Control for Consensus of Multi-Agent Systems with Sampled-data State Observation, IEEE Transactions on Control of Network Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 852-862, June 2019. (査読有)
3. T. Ikeda and M. Nagahara, Time-Optimal Hands-off Control for Linear Time-Invariant Systems, Automatica, Vol. 99, pp. 54-58, 2019 (査読有)
4. N. Hayashi and M. Nagahara, Distributed Proximal Minimization Algorithm for Constrained Convex Optimization over Strongly Connected Networks, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences Vol. E102-A, No. 02, Feb. 2019. (査読有)
5. S. Ohno, Y. Ishihara, and M. Nagahara, Min-Max Design of Error Feedback Quantizers without Overloading, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 65, No. 4, pp. 1395-1405, Nov. 2017 (査読有)
6. T. Ikeda and M. Nagahara, Discrete-valued Model Predictive Control using Sum-of-Absolute-Values Optimization, Asian Journal of Control, Vol. 20, No. 1, pp. 196-206, 2017 (査読有)
7. S. Ohno, T. Shiraki, M. R. Tariq, and M. Nagahara, Mean Squared Error Analysis of Quantizers with Error Feedback, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 65, No. 22, pp. 5970-5981, Nov. 2017 (査読有)
8. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, Multiuser Detection based on MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 65, no. 21, pp. 5621-5634, Nov. 2017. (査読有)
9. T. Ikeda, M. Nagahara, and S. Ono, Discrete-Valued Control of Linear Time-Invariant Systems by Sum-of-Absolute-Values Optimization, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 62, No. 6, pp. 2750-2763, June 2017. (査読有)

[学会発表](計15件)

1. S. M. Rayyan and M. Nagahara, State-Space Realization of Linear Time-Invariant Systems with Maximum Measure of Quality, 12th Asian Control Conference (ASCC), 2019. (査読有)
2. M. Nagahara and D. Chatterjee, Continuity of the Combined L1-L2 Optimal Control for Linear Systems, 5th Indian Control Conference (ICC), pp. 506-509, Delhi, Jan, 2019. (査読有)

3. Y. Yamamoto, K. Yamamoto, and M. Nagahara, Sampled-data Filters with Compactly Supported Acquisition Prefilters, 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 6650-6655, Miami Beach, 19 Dec 2018. (査読有)
4. M. Kishida, M. Barforooshan, and M. Nagahara, Maximum Hands-Off Control for Discrete-time Linear Systems Subject to Polytopic Uncertainties, Conference: 7th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys2018), pp. 355-360, Groningen, Aug. 2018. (査読有)
5. K. Fujimoto, J. Muramatsu, and M. nagahara, Dynamical Model of Overconfidence Phenomena Due to ZE-type Confirmation Bias, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2018), 7-10 Oct 2018. (査読有)
6. M. Nagahara and D. Chatterjee, Optimal Control with Sparsity Constraints in the Frequency Domain, SICE Annual Conference, pp. 398-400, Nara, 12 Sept, 2018. (査読有)
7. N. Hayashi and M. Nagahara, Consensus-Based Distributed Event-Triggered Sparse Modeling, SICE Annual Conference, pp. 1801-1805, Nara, 14 Sept, 2018. (査読有)
8. K. Nakashima, T. Matsuda, M. Nagahara, and T. Takine, Control Vector Selection with Delay Estimation in Wireless Networked Control Systems, IEEE International Conference on Consumer Electronics (Taichung), pp. 81-82, 19-21 May 2018. (査読有)
9. K. Yamamoto, M. Nagahara, Y. Yamamoto, Signal Reconstruction with Generalized Sampling, 56th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2017), Melbourne, Australia, Dec. 12-15, 2017. (査読有)
10. M. Nagahara, S. Takahashi, H. Higuchi, and T. Takebayashi, Sparse Optimization of Physical Distribution Systems based on Maximum Hands-off Control, 2017 International Symposium on Nonlinear Theory & Its Applications (NOLTA2017), Cancun, Mexico, Dec. 4-7, 2017.
11. K. Nakashima, T. Matsuda, M. Nagahara, and T. Takine, Cross-Layer Design of an LQG Controller in Multihop TDMA-Based Wireless Networked Control Systems, IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, Canada, October 8-13, 2017. (査読有)
12. M. Nagahara, N. Challapalli, and M. Vidyasagar, CLOT Optimization for Distributed Hands-Off Control with Continuity, SICE Annual Conference 2017, Sept. 21, 2017. (査読有)
13. K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, Hypertracking Beyond the Nyquist Frequency, Emerging Applications of Control and System Theory (EACST 2017), Dallas, Texas, USA, Sept. 2017. (査読有)
14. K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, Simultaneous rejection of signals below and above the Nyquist frequency, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Hawaii, USA, Aug. 29, 2017. (査読有)
15. N. Challapalli, M. Nagahara, and M. Vidyasagar, Continuous Hands-off Control by CLOT Norm Minimization, Proc. of the 20th IFAC World Congress 2017, pp. 15019-15024, Toulouse, France, July 14, 2017. (査読有)

〔図書〕(計2件)

1. 永原 (編著), ネットワーク化制御, コロナ社, 2019年7月(発刊予定)
2. 永原, スパースモデリング, コロナ社, 2017年10月(総ページ数: 205)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://nagahara-masaaki.github.io/>

6. 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名: Debasish Chatterjee

ローマ字氏名: Debasish Chatterjee

所属研究機関名 : Indian Institute of Technology Bombay

部局名 : Systems and Control Engineering

職名 : Associate Professor

研究協力者氏名 : Mathukumalli Vidyasagar

ローマ字氏名 : Mathukumalli Vidyasagar

所属研究機関名 : Indian Institute of Technology Hyderabad

職名 : Distinguished Professor and SERB Distinguished Fellow

研究協力者氏名 : Daniel Quevedo

ローマ字氏名 : Daniel Quevedo

所属研究機関名 : Paderborn University

部局名 : Computer Science, Electrical Engineering and Mathematics

職名 : Professor

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名 : Srikant Sukumar

ローマ字氏名 : Srikant Sukumar

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。