

令和元年6月21日現在

機関番号：27101
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2015～2018
課題番号：15H02668
研究課題名(和文) 省エネルギーのためのスパース最適制御理論の構築

研究課題名(英文) Sparse Control Theory for Green Technology

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) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、制御入力 of 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、L0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。

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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超スマート社会(Society 5.0)の実現において、重要な技術的課題の一つが省エネルギーの達成である。超スマート社会においては、様々なシステムが複雑に関係し、システム的な観点から消費エネルギーの最小化を数理的に定式化し、実行することが極めて重要である。本研究は、そのような全体最適化の数理的な基礎を与える研究であり、大きな社会的意義を持つ。また、本研究で提案したL0最適制御は世界的にも新しく、現在では多くの研究者に影響を与えている。したがって、学術的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have proposed a novel control (L0 optimal control) to maximize the time duration on which the control takes zero values, and shown the effectiveness in view of energy saving. We have derived necessary conditions for L0 optimality based on the non-smooth maximum principle, and investigated properties of the L0 optimal control. We have also obtained a fast algorithm based on the proximal operator, and extended it to model predictive control.

The research team includes researchers from India, Germany, and United States, and has been publishing many papers in international journals and conferences. The results have been evaluated worldwide, and awarded as George S. Axelby Outstanding Paper Award from IEEE Control Systems Society.

研究分野：制御理論

キーワード：最適制御 スパースモデリング 圧縮センシング モデル予測制御 凸最適化 省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

信号処理や機械学習の分野で、近年、信号（ベクトル）のスパース性の仮定を巧みに利用した圧縮センシングの理論が急速に発展している。ここで、スパースなベクトルとは、その次元に比べて、非零の要素数がきわめて少ないベクトルのことである。研究代表者らは、この「スパース性」という性質に着目し、スパースな信号は効率のよい情報圧縮が可能であるという観点から、通信帯域に制約のあるネットワーク制御系における制御信号のスパース化の研究に着手し、その成果を発表した [永原・松田・林, 信号処理シンポジウム, 2010], [Nagahara and Quevedo, IFAC World Conference 2011]。これらの研究は、制御におけるスパース性の利用に関する、応募者の知る限り世界初の研究成果であり、この発表以降、スパース性を利用した研究がいくつかの研究グループにより提案されはじめてきている（たとえば [Kong, Goodwin, and Seron, Int. J. Robust and Nonlinear Control, 2014]）。

また、研究代表者らは、スパース性の概念を連続時間信号に拡張し、与えられた制約条件のもとで、制御入力 of 休止区間を最大化する新しい最適制御（スパース最適制御）を提唱した。そして、制御問題の正規性 (normality) という仮定のもとで、スパース最適制御が L1 最適制御問題の解として与えられることを理論的に証明した [Nagahara, Quevedo, and Netic, IEEE CDC 2013]。

この研究により、制御の休止区間を最大化する、言い換えると制御信号の L0 ノルムを最小化するという数学的に極めて難しい制御問題が L1 最適制御という凸計画問題に帰着されることが保障され、様々な工学的応用が期待できる。たとえば、スパース最適制御によって以下のような特徴を持つ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

本研究の目的は、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制御理論であるスパース最適制御理論を構築し、省エネルギーの観点からその有効性を実証することである。本研究では、これまでの予備研究で得られた線形制御系に対するスパース最適制御の理論的成果を非線形系のフィードバック制御へと拡張し、またスパース最適制御の高速計算アルゴリズムを導出する。そして、無人航空機の実験機にスパース最適制御を実装し、省エネルギー（低消費電力）の観点から提案手法の有効性を検証する。本研究で提唱するスパース最適制御理論が実現すれば、現実の様々な制御系において、省エネルギーや低公害を考慮した最適化設計が可能となり、社会的に極めて意義のある研究であるといえる。

3. 研究の方法

本研究では、スパース最適制御理論の確立、およびその無人航空機への応用を目指し、以下の 3 つの課題に取り組む。

(1) 入力アフィンな非線形系に対するスパース最適制御理論の構築

研究代表者がこれまでの研究で得た線形系に対するスパース最適制御の理論的結果を拡張し、入力アフィンな非線形系（制御入力に関しては線形で状態変数に関しては非線形な系）に対するスパース最適制御を考察する。さらに、モデル化誤差や外乱に対してロバストな制御系を実現するために、フィードバック制御の枠組みでのスパース最適制御方式の開発に取り組む。具体的には、モデル予測制御の概念を導入して、有限時間区間上のスパース最適制御を繰り返し適用することによりフィードバック制御則を構成し、その安定性やロバスト性を解析する。

(2) スパース最適制御のための高速アルゴリズムの開発

フィードバック制御系に対するスパース最適制御では、サンプリング周期内に最適制御問題を解く必要がある。特に無人航空機のように時定数が短い場合、高速アルゴリズムは必須となる。本研究では、圧縮センシングや凸最適化の分野で開発された最新の高速アルゴリズムを最適制御の計算に援用し、スパース最適制御の計算に有効な高速アルゴリズムを開発する。具体的には、線形系および入力アフィンな非線形系に対して、最適制御問題の必要条件（Euler-Lagrange 方程式）の離散化と上記の圧縮センシングにおける高速アルゴリズムとを組み合わせ、高速な最適制御計算法を確立する。

(3) 無人航空機による省エネルギーの検証実験

上記の研究成果の有効性を検証するために、無人航空機による制御実験を行う。無人航空機の制御系に制御アルゴリズムを実装するためには、無線通信ネットワークの使用を前提とした制御系設計を行う必要がある。これまでのネットワーク化制御系に対する研究成果を活かして制御器を設計し、MATLAB/Simulink を援用して制御器を実装する。そして、従来の LQ 最適制御と比較し、省エネルギー（低消費電力）の観点から提案手法の有効性を検証する。

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，L0 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) L0 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 L0 ノルムを最小化する最適制御問題を定式化し，その性質と L1 最適制御との関係を調べた[1,2,3]．また，L1 最適制御にもとづく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スパース最適制御を提案した [4]．さらに最短時間制御との関連を調べた[5]．

[1] M. Nagahara, D. E. Quevedo, and D. Nesic, Maximum Hands-off Control: A Paradigm of Control Effort Minimization, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 61, No. 3, pp. 735-747, 2016

[2] T. Ikeda and M. Nagahara, Value function in maximum hands-off control for linear systems, Automatica, vol. 64, pp. 190-195, Feb. 2016

[3] D. Chatterjee, M. Nagahara, D. E. Quevedo, and K. S. M. Rao, Characterization of maximum hands-off control, Systems & Control Letters, vol.94, pp.31-36, 2016.

[4] M. Nagahara, J. Ostergaard, D. E. Quevedo, Discrete-time hands-off control by sparse optimization, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016:76, Dec. 2016.

[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 L0 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 L1 最適制御に帰着する手法を提案した[5,7,9]．また，この方法をデジタル通信システムへ応用した[6,8]．

[6] M. Nagahara, Discrete Signal Reconstruction by Sum of Absolute Values, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 22, no. 10, pp. 1575-1579, Oct. 2015.

[7] H. Sasahara, K. Hayashi and M. Nagahara, Symbol Detection for Faster-Than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values Optimization, IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 12, pp. 1853-1857, Dec. 2016.

[8] T. Ikeda, M. Nagahara, and S. Ono, Discrete-Valued Control of Linear Time-Invariant Systems by Sum-of-Absolute-Values Optimization, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 62, No. 6, pp. 2750-2763, June 2017.

[9] H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, Multiuser Detection based on MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation, IEEE Trans. Signal Processing, vol. 65, no. 21, pp. 5621-5634, Nov. 2017.

[10] 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 Trans. 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 Trans. Control of Network Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 852-862, 2019.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 18 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 Trans. on Control of Network Systems, Vol.6, No.2, pp.852-862, 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 Trans. 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 Trans. 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 Trans. 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 Trans. 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 Trans. on Automatic Control, Vol.62, No.6, pp.2750-2763, 2017. (査読有)
 10. N. Hayashi, M. Nagahara, and Y. Yamamoto, Robust AC Voltage Regulation of Microgrids in Islanded Mode with Sinusoidal Internal Model, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 10(2),pp.62-69, 2017. (査読有)
 11. H. Sasahara, K. Hayashi and M. Nagahara, Symbol Detection for Faster-Than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values Optimization, IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 12, pp. 1853-1857, 2016. (査読有)
 12. M. Nagahara, J. Ostergaard, D. E. Quevedo, Discrete-time hands-off control by sparse optimization, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016:76, Dec. 2016. (査読有)
 13. D. Chatterjee, M. Nagahara, D. E. Quevedo, and K. S. M. Rao, Characterization of maximum hands-off control, Systems & Control Letters, vol.94, pp.31-36, Aug. 2016. (査読有)
 14. M. Nagahara and Y. Yamamoto, Digital repetitive controller design via sampled-data delayed signal reconstruction, Automatica, vol. 65, pp. 203-209, Mar. 2016 (査読有)
 15. T. Ikeda and M. Nagahara, Value function in maximum hands-off control for linear systems, Automatica, vol. 64, pp. 190-195, Feb. 2016 (査読有)
 16. M. Nagahara, D. E. Quevedo, and D. Nesic, Maximum Hands-off Control: A Paradigm of Control Effort Minimization, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 61, No. 3, pp. 735-747, 2016 (査読有)
 17. M. Nagahara, Discrete Signal Reconstruction by Sum of Absolute Values, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 22, no. 10, pp. 1575-1579, Oct. 2015. (査読有)
 18. 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, Vol. 8, No. 5, pp. 321-327, 2015. (査読有)

[学会発表] (計 34 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, 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. Masaaki Nagahara, Niharika Challapalli, and Mathukumalli 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. Niharika Challapalli, Masaaki Nagahara, and Mathukumalli 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)
 16. H. Sasahara, K. Hayashi, M. Nagahara, Symbol Detection for Faster-than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values Optimization, The 42nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2017 (査読有)
 17. S. Ohno, T. Shiraki, M.R. Tariq, M. Nagahara, RATE-DISTORTION ANALYSIS OF DELTA-SIGMA MODULATORS, The 42nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2017), 2017. (査読有)
 18. Y. Yamamoto, K. Yamamoto and M. Nagahara, Tracking of signals beyond the Nyquist frequency, 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas, NV, 2016, pp. 4003-4008. (査読有)
 19. T. Ikeda, M. Nagahara and K. Kashima, Consensus by maximum hands-off distributed control with sampled-data state observation, 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas, NV, 2016, pp. 962-966. (査読有)
 20. M. R. Tariq, S. Ohno and M. Nagahara, Synthesis of IIR error feedback filters for modulators using approximation, 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), Jeju, 2016. (査読有)
 21. R. Hayakawa, K. Hayashi, H. Sasahara, and M. Nagahara, Massive Overloaded MIMO Signal Detection via Convex Optimization with Proximal Splitting, The 2016 European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Aug.-Sept. 2016. (査読有)
 22. T. Ikeda, M. Nagahara and D. E. Quevedo, Quantized self-triggered control by sum-of-absolute-values optimization, 22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), Minneapolis, 2016 (査読有)
 23. H. Sasahara, K. Hayashi, M. Nagahara, and Y. Yamamoto, Control Theoretical Approach for Single-Frequency Full-Duplex Wireless Relaying, 22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), Minneapolis, Jul. 2016. (査読有)
 24. T. Ikeda and M. Nagahara, Fundamental analysis of sparse optimal control and its application to discrete-valued control, 2016 American Control Conference (ACC), Boston, Jul. 2016. (査読有)
 25. T. Ikeda and M. Nagahara, Maximum hands-off control without normality assumption,

- 2016 American Control Conference (ACC), Boston, Jul. 2016. (査読有)
26. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, Multiuser Detection by MAP Estimation with Sum-of-Absolute-Values Relaxation, IEEE International Conference on Communications (ICC) 2016, May 2016. (査読有)
 27. T. Ikeda and M. Nagahara, Computation of maximum hands-off control, SICE International Symposium on Control Systems 2016, Mar. 9, 2016. (査読有)
 28. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, Faster-than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values, SICE International Symposium on Control Systems 2016, Nagoya, Mar. 2016. (査読有)
 29. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, Y. Yamamoto, Sampled-data H-infinity optimization for self-interference suppression in baseband signal subspaces, 54th IEEE Conference on Decision and Control, Osaka, pp. 7244-7249, Dec. 18, 2015. (査読有)
 30. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, Y. Yamamoto, Time-domain equalization for single-frequency full-duplex wireless relay using H2 optimal control, 47th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'15), Hawaii, Dec. 5, 2015. (査読有)
 31. T. Ikeda and M. Nagahara, Discrete model predictive control by sum-of-absolute-values optimization, 47th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'15), Hawaii, Dec. 5, 2015. (査読有)
 32. M. Ogura, M. Nagahara, and V. M. Preciado, L1-optimal disturbance rejection for disease spread over time-varying networks, The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM2015), pp. 377-378, October 28-30, Kyoto, 2015. (査読有)
 33. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, Loop-Back Interference Suppression for OFDM Signals via Sampled-Data Control, 10th Asian Control Conference (ASCC), paper ID: 1570072769, pp. 1-4, May-Jun. 2015. (査読有)
 34. T. Ikeda and M. Nagahara, Continuity of the Value Function in Sparse Optimal Control, 10th Asian Control Conference (ASCC), paper ID: 1570074957, pp. 1-4, May-Jun. 2015. (査読有)

〔図書〕(計5件)

1. 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)
2. 川田編著, 永原ほか著, 倒立振子で学ぶ制御工学, 森北出版, 2017年2月(担当ページ: pp.60-75, pp.119-132)
3. 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9月(担当ページ: pp.21-79)
4. Y. Yamamoto and M. Nagahara, Digital Control, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, J. G. Webster (Ed.). Wiley, Feb. 2018. (電子書籍のためページ数無し)
5. K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, Hypertracking Beyond the Nyquist Frequency, Emerging Applications of Control and Systems Theory, A Festschrift in Honor of Mathukumalli Vidyasagar, R. Tempo, S. Yurkovich, and P. Misra (Eds.). Springer, 2018. (担当ページ: pp. 369-379)

〔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

(1)研究分担者:無し

(2)研究協力者

研究協力者氏名:Debasish Chatterjee

ローマ字氏名:Debasish Chatterjee

研究協力者氏名:Daniel Quevedo

ローマ字氏名:Daniel Quevedo

研究協力者氏名:Mathukumalli Vidyasagar

ローマ字氏名:Mathukumalli Vidyasagar