

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360165

研究課題名(和文)大規模非線形時空間パターン制御の実時間最適化アルゴリズムと応用

研究課題名(英文)Real-Time Optimization Algorithms and Their Applications for Control of Large-Scale Nonlinear Spatiotemporal Patterns

研究代表者

大塚 敏之(Ohtsuka, Toshiyuki)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：40272174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：大規模かつ複雑なシステムでも最適に制御できるよう、非線形最適制御問題を高速に解くアルゴリズムについて研究し、さまざまな分野への応用を検討した。たとえば、大規模システムを制御する場合の最適化計算効率化、制御の応答を見通しよく調整する方法の提案、アルゴリズムのプログラミングを自動化するツールの開発などの成果を得た。そして、熱流体における温度や流速の制御、鉄鋼プロセスにおける製品ばらつきの抑制、高度下水処理施設の水質制御、スマートグリッドにおける需要誘導、浮体式洋上風力発電施設の発電量と動揺の制御など、多岐にわたる問題でアルゴリズムの有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：Fast algorithms for solving nonlinear optimal control problems were investigated to optimally control large-scale and complicated systems, and their applications to various fields were examined. Achievements in this research include, for example, development of efficient optimization algorithms for control of large-scale systems, systematic tuning methods of control responses, and a tool for automatic coding of the algorithms. The algorithms have been validated in various applications such as control of distributions of temperature and velocity in thermal fluid systems, suppression of quality dispersion in a steel making process, water quality control in advanced sewage treatment facilities, demand control in smart grids, control of power generation and attitude oscillation in floating off-shore wind turbines, and so on.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 大規模システム 非線形システム 実時間最適化 時空間パターン

### 1. 研究開始当初の背景

拘束条件や非線形性を有するダイナミカルシステムに対するフィードバック制御手法として、モデル予測制御が近年注目されている。モデル予測制御は **receding horizon** 制御とも呼ばれ、各時刻において有限時間未来までの最適制御問題を解くことで制御入力を決定することが大きな特徴である。最適制御問題さえ実時間で数値的に解ければフィードバック制御が実現できるため適用範囲が広いが、計算量の多さが長らく実装の障害となってきた。

それに対し研究代表者の大塚は、非線形モデル予測制御に特化し反復計算の不要な実時間最適化アルゴリズムを世界に先駆けて提案した。その後、実用性を高めたアルゴリズムを提案し機械制御にミリ秒単位の計算時間で実装することにも成功した。これらの研究成果は自動操船システムで実用されたほか、自動車、航空機、化学プロセス、鋼板の冷間圧延、空調システムなど、さまざまな応用研究がなされている。適用対象は従来考えられなかったほど大規模化・複雑化しており、たとえば、無限次元システムである非線形分布定数系の制御も視野に入りつつある。

### 2. 研究の目的

非線形分布定数系をはじめとする大規模非線形システムの制御手法を発展させれば、さまざまなシステムにおける何らかの特性分布の時間発展を制御できるようになり、幅広い分野の重要な問題へ応用できる。そこで、本研究は、大規模非線形システムにおける時空間パターン制御の理論と実時間最適化アルゴリズムを構築し、それらを現実の問題に応用することを目標とする。また、分布定数系以外の一般的な大規模非線形システムに対する実時間最適化アルゴリズムや、評価関数の調整方法などの確立も目指す。さらに、実時間最適化の適用範囲拡大と普及を促進するため、並列計算やプログラム自動生成など実時間最適化アルゴリズムの実装環境整備も課題とする。

### 3. 研究の方法

(1) 時空間パターンの解析と制御の理論に関しては、大規模システムのモデル縮約や問題の構造を利用した実時間最適化アルゴリズムの計算簡略化に取り組んだ。また、実際に制御を行う前のオフラインでのシミュレーション結果を利用して実時間最適化アルゴリズムの計算量を減らすという新しい着想や、実時間最適化アルゴリズムを活用しつつ適応制御を実現する方法についても検討した。評価関数の調整方法に関しては、ある程度確立されている線形システムの手法を拡張する方針で検討した。

(2) 実装環境に関しては、すでに普及しつつある汎用的な並列処理のツールを活用す

る方針をとった。プログラム自動生成に関しては、以前のツールとは異なる数式処理言語で広く普及しているものをベースにして新たに開発することを目指した。

(3) 応用に関しては、非線形分布定数系や大規模非線形システムの制御に関する独自の応用に加えて、他分野の研究者と積極的に連携してさまざまな実問題にも取り組んだ。

### 4. 研究成果

(1) 時空間パターンの解析に関して、反応拡散系の数値シミュレーションによる予備検討を行い、時空間パターンの挙動を再現する簡易モデルに必要な条件を考察した。また、あるクラスの偏微分方程式に支配されるシステムを制御する問題において、最適制御問題の特殊な構造に着目し、ある条件の下では簡易な計算によって最適化が行えることを示した。これによって、計算量を従来手法の1/5程度に低減できた。一例として、熱流体を制御したシミュレーション結果を図1に示す。境界における温度勾配を制御入力として熱対流を生じさせ、目標状態である一様な温度分布へ向けて速やかに遷移している。ナビ

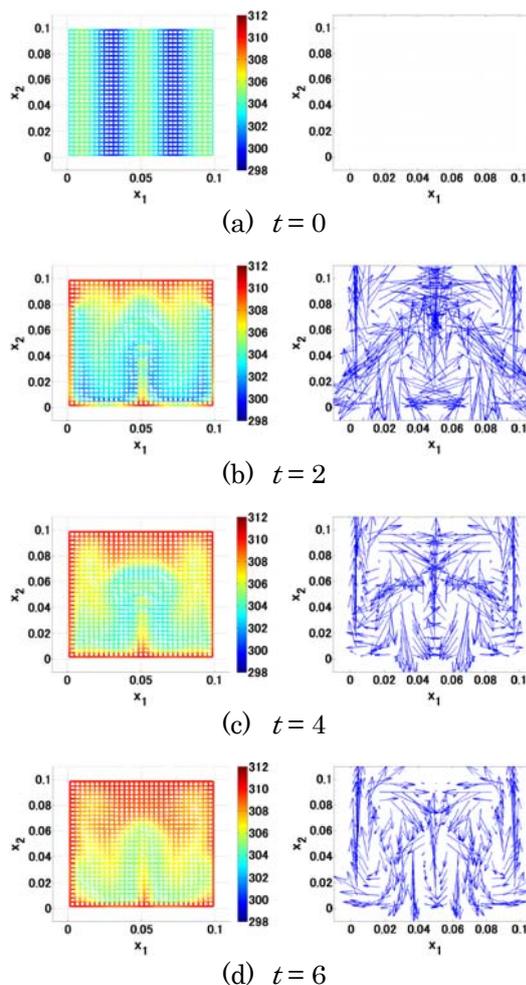


図1 熱流体の制御シミュレーション (左列：温度分布，右列：流速分布)

エ・ストークス方程式で記述されるシステムが制御対象であり、応答のシミュレーション自体の計算量が多いため、この例では最適制御問題を実時間で解くに至っていないが、1回の制御入力更新に従来手法では6.3秒を要したのに対し、提案手法では1.3秒に低減できている。

さらに、実用上重要な問題である評価関数の調整方法に関しては、線形システムに対する最適制御の逆設計法(ILQ法)を利用して評価関数の調整パラメータを減らす手法を確立した。図2に、自動車エンジン回転数制御の応答が単一の調整パラメータによって変化する様子を示す。そのほか、オフラインのシミュレーション結果を利用して未知変数のサイズを小さくすることでオンラインの計算量を削減する手法や、実時間最適化アルゴリズムとパラメータ推定則を組み合わせ非線形適応制御を実現する手法など、実用上有用な拡張も達成した。

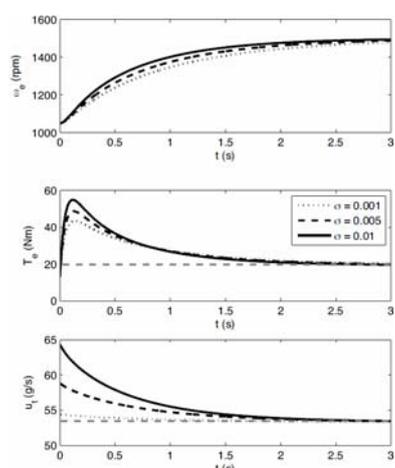


図2 ILQ設計法を利用して非線形モデル予測制御の応答を調整した例

(2) 実装環境に関しては、実時間最適化アルゴリズムの並列処理について検討を行った。OpenMPというAPIを用いて逐次計算と並列計算の計算時間を比較したところ、現状の実時間最適化アルゴリズムの場合、並列処理のオーバーヘッドが大きく、並列計算による計算時間短縮は見られなかった。したがって、アルゴリズム自体を並列計算に適したものに修正する必要があることが分かった。その後、計算機科学の専門家との共同研究により、投機実行という手法で並列計算を活用しうることを明らかにした。また、ソフトウェア会社と共同で、数式処理によって実時間最適化のプログラムを自動生成する新しいツールを開発した。

(3) 応用に関しては、バーガース方程式や波動方程式、熱流体をはじめとする非線形分布定数系の制御、鉄鋼プロセスにおける製品ばらつき抑制、高度下水処理施設の生化学反応を考慮した大規模モデルの制御、スマートグリッドにおける需要誘導などに取り組み、現時点では問題設定が限定されるものの、

実時間最適化による制御の有効性を示した。さらに、自動車エンジンの回転数制御、タイヤ力の飽和と荷重移動を伴う四輪車両の操舵制御、四輪車両の横転回避制御、粒子加速器における超伝導磁石の温度制御、浮体式洋上風力発電施設のブレードピッチ角制御、船舶の変ピッチプロペラ制御など、さまざまな実問題に実時間最適化アルゴリズムを適用し、非線形かつ複雑なシステムであっても最適制御問題を実時間で解いて高性能なフィードバック制御が可能であることを示した。一例として、四輪車両の横転回避制御における制御入力(操舵によって生じる横方向の力)とその最大振幅との時間履歴を図3に示す。操舵によって生じる力はタイヤの最大摩擦力を超えることができず、さらに、タイヤの最大摩擦力は操舵によって生じる慣性力の影響も受けるため、制御入力の拘束条件に相当する最大振幅は複雑な式で表され、時間とともに変化する。このような複雑な問題であっても実時間で制御入力を最適化できている。

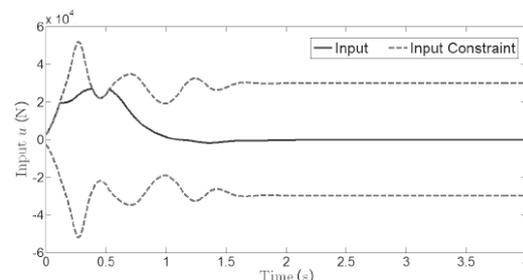


図3 四輪車両の横転回避制御における制御入力(実線)と拘束条件(破線)の時間履歴

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計31件) すべて査読有り

- ① Hashimoto, T., Satoh, R., and Ohtsuka, T., "Receding Horizon Control for Spatiotemporal Dynamic Systems," *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 3, No. 2, 2016, paper 15-00345. <http://doi.org/10.1299/mej.15-00345>
- ② Jaiwat, P., and Ohtsuka, T., "Recovery of Vehicle near Rollover by Nonlinear Model Predictive Control," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 8, No. 6, 2015, pp. 380-389. <http://doi.org/10.9746/jcmsi.8.380>
- ③ Kang, M., Tahir, F., Shen, T., and Ohtsuka, T., "MPC-based Speed Tracking Control Design for Spark-Ignition Engines," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 8, No. 3, 2015, pp. 201-208. <http://doi.org/10.9746/jcmsi.8.201>
- ④ 梅津佑介, 小川知之, 加嶋健司, "反応拡散系における不安定定在波の選択的安定化," 計測自動制御学会論文誌, Vol. 51, No. 2, 2015, pp. 110-119. <http://doi.org/10.9746/sicetr.51.110>

- ⑤ Tomiyama, K., Kawano, Y., Hashimoto, T., and Ohtsuka, T., “Real-Time Price Optimization for Load Frequency Control in Electric Power Systems with Wind Farms,” *Proceedings of the SICE International Symposium on Control Systems 2016*, 2016, paper 2A2-1.
- ⑥ Noga, R., Ohtsuka, T., de Prada, C., Blanco, E., and Casas, J., “NMPC for Superfluid Helium Cryogenics,” *Reprints of the 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control*, 2015, pp. 441-446.
- ⑦ Ohtsuka, T., “A Tutorial on C/GMRES and Automatic Code Generation for Nonlinear Model Predictive Control,” Invited Lead Paper, *Proceedings of the 14th European Control Conference*, 2015, pp. 73-86.
- ⑧ 大西彰, 大塚敏之, “高度下水処理における生物反応モデル ASM3+Bio-P を利用した非線形モデル予測制御,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 1, 2015, pp. 1-11.  
<http://dx.doi.org/10.5687/iscie.28.1>
- ⑨ Jaiwat, P., and Ohtsuka, T., “Stabilization of Suspension Vehicle near Rollover by Nonlinear Model Predictive Control,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 7, No. 6, 2014, pp. 364-373.  
<http://dx.doi.org/10.9746/jcmsi.7.364>
- ⑩ 亀本大貴, 橋本智昭, 加嶋健司, 大塚敏之, “モデル予測制御に基づいた実時間価格制度による電力系統の負荷周波数制御,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 10, 2014, pp. 405-411.  
<http://dx.doi.org/10.5687/iscie.27.405>
- ⑪ Tahir, F., and Ohtsuka, T., “Tuning of Nonlinear Model Predictive Controller for Parameter-Dependent Systems and its Application to the Speed Control of Spark Ignition Engines,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 8, 2014, pp. 333-342.  
<http://dx.doi.org/10.5687/iscie.27.333>
- ⑫ 氷野康平, 橋本智昭, 大塚敏之, “タイヤ力の飽和と荷重移動を伴う四輪車両の非線形モデル予測制御,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 5, 2014, pp. 432-440.  
<http://dx.doi.org/10.9746/sicetr.50.432>
- ⑬ Noga, R., de Prada, C., Ohtsuka, T., Blanco, E., and Casas, J., “Non-linear Moving Horizon State Estimation and Control for the Superfluid Helium Cryogenic Circuit at the Large Hadron Collider,” *Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2014, pp. 3530-3535.
- ⑭ Hashimoto, T., “Receding Horizon Control for a Class of Discrete-time Nonlinear Implicit Systems,” *Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2014, pp. 5089-5094.
- ⑮ Satoh, R., Hashimoto, T., and Ohtsuka, T., “Receding Horizon Control for Mass Transport Phenomena in Thermal Fluid Systems,” *Proceedings of the 2014 Australian Control Conference*, 2014, pp. 273-278.
- ⑯ Gagliardi, D., Ohtsuka, T., and del Re, L., “Direct C/GMRES Control of the Air Path of a Diesel Engine,” *Reprints of the 19th IFAC World Congress*, 2014, pp. 3000-3005.
- ⑰ Jaiwat, P., and Ohtsuka, T., “Real-Time Swing-Up Double Inverted Pendulum by Nonlinear Model Predictive Control,” *Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*, 2014, pp. 290-295.
- ⑱ 大角洗平, 大塚敏之, 平田光男, 塩谷政典, “粒子モデル予測制御による鋼板温度のばらつき制御,” 鉄と鋼, Vol. 99, No. 4, 2013, pp. 275-282.  
<http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.99.275>
- ⑲ Hashimoto, T., Takiguchi, Y., and Ohtsuka, T., “Receding Horizon Control for High-Dimensional Burgers' Equations with Boundary Control Inputs,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 56, No. 3, 2013, pp. 137-144.
- ⑳ Hashimoto, T., Takiguchi, Y., and Ohtsuka, T., “Output Feedback Receding Horizon Control for Spatiotemporal Dynamic Systems,” *Proceedings of the 9th Asian Control Conference*, 2013, paper ID 77.
- ㉑ Hashimoto, T., Fukui, Y., and Ohtsuka, T., “Model Predictive Control for Nonlinear Wave Equations,” *The IPSI BGD Transactions on Advanced Research*, Vol. 9, No. 2, 2013, pp. 2-6.
- ㉒ Marutani, J., and Ohtsuka, T., “A Real-Time Algorithm for Nonlinear Infinite Horizon Optimal Control by Time Axis Transformation Method,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 23, No. 17, 2013, pp. 1955-1971.  
<http://dx.doi.org/10.1002/rnc.2863>
- ㉓ Jaiwat, P., and Ohtsuka, T., “Stabilization of Vehicle Rollover by Nonlinear Model Predictive Control,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2013*, 2013, pp. 1568-1573.
- ㉔ Tahir, F., and Ohtsuka, T., “Tuning of Performance Index in Nonlinear Model Predictive Control by the Inverse Linear Quadratic Regulator Design Method,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 6, 2013, pp. 387-395.  
<http://dx.doi.org/10.9746/jcmsi.6.387>
- ㉕ Tahir, F., Ohtsuka, T., and Shen, T., “Tuning of Nonlinear Model Predictive Controller for the Speed Control of Spark Ignition

- Engines,” *Proceedings of the 2013 CACS International Automatic Control Conference*, 2013, paper ID #1007.
- ②⑥ 赤山慶太, 大塚敏之, “オフラインでの特異値分解に基づく拘束条件付き非線形 Receding Horizon 制御の実時間アルゴリズム,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 5, 2012, pp. 126-133.  
<http://dx.doi.org/10.5687/iscie.25.126>
- ②⑦ 櫻井優太, 大塚敏之, “外乱推定による連続時間モデル予測制御のオフセット補償,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 7, 2012, pp. 172-180.  
<http://dx.doi.org/10.5687/iscie.25.172>
- ②⑧ Fujii, N., and Ohtsuka, T., “Nonlinear Adaptive Model Predictive Control via Immersion and Invariance Stabilizability,” システム制御情報学会論文誌, Vol. 25, No. 10, 2012, pp. 281-288.  
<http://dx.doi.org/10.5687/iscie.25.281>
- ②⑨ Hashimoto, T., Yoshioka, Y., and Ohtsuka, T., “Receding Horizon Control for Hot Strip Mill Cooling Systems,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 998-1005.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2012.2195671>
- ③⑩ Hashimoto, T., Yoshioka, Y., and Ohtsuka, T., “Receding Horizon Control with Numerical Solution for Nonlinear Parabolic Partial Differential Equations,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 58, No. 3, 2013, pp. 725-730.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TAC.2012.2208318>
- ③⑪ Hashimoto, T., Yoshioka, Y., and Ohtsuka, T., “Receding Horizon Control with Numerical Solution for Spatiotemporal Dynamic Systems,” *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control*, 2012, pp. 2920-2925.
- [学会発表] (計 35 件)
- ① 橋本智昭, “分布定数系のモデル予測制御,” 第 3 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, チュートリアル講演, 南山大学 (愛知県・名古屋市), 2016 年 3 月 8 日. (招待講演)
- ② 大塚敏之, “非線形モデル予測制御,” 第 4 回 Mathematics for Industry シンポジウム 基調講演, 秋葉原コンベンションホール (東京都・千代田区), 2015 年 7 月 2 日. (招待講演)
- ③ 牧野秀成, 梅田直哉, 池島章司, 大塚敏之, 関口秀樹, 深澤正樹, “プロペラ翼角と推進電動機のリアルタイム最適制御による波浪中燃費改善の試み”, 平成 27 年日本船舶海洋工学会秋季講演会, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区), 2015 年 11 月 17 日.
- ④ 里内亮, 河野佑, 橋本智昭, 辻隆男, 大塚敏之, “送電制約を考慮した実時間価格最適化による西日本 60Hz 系統の負荷周波数制御”, 第 58 回自動制御連合講演会, 神戸大学 (兵庫県・神戸市), 2015 年 11 月 15 日.
- ⑤ 山田雅貴, 羽田絢, 中條俊樹, 大塚敏之, “浮体式洋上風力発電施設におけるタワー基部の曲げモーメントを評価したモデル予測制御,” 第 58 回自動制御連合講演会, 神戸大学 (兵庫県・神戸市), 2015 年 11 月 14 日.
- ⑥ Tomiyama, K., Kawano, Y., Hashimoto, T., and Ohtsuka, T., “Real-Time Price Optimization for Load Frequency Control in Electric Power Systems with Wind Farms,” *Western Economic Association International 90th Annual Conference*, ホノルル (米国), 2015 年 6 月 28 日.
- ⑦ 里内亮, 河野佑, 橋本智昭, 辻隆男, 大塚敏之, “モデル予測制御を用いたリアルタイムプライシングによる西日本 60Hz 系統の負荷周波数制御,” 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 中央電気倶楽部 (大阪府・大阪市), 2015 年 5 月 20 日.
- ⑧ Ohtsuka, T., “Real-Time Optimization Algorithm for Nonlinear Model Predictive Control,” Plenary Talk, *The 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP 2014)*, メルパルク広島 (広島県・広島市), 2014 年 5 月 29 日. (招待講演)
- ⑨ 富山幸一郎, 河野佑, 橋本智昭, 大塚敏之, “モデル予測制御に基づいたリアルタイムプライシングによる再生可能エネルギーを含む電力系統の負荷周波数制御,” 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 東京電機大学 (東京都・足立区), 2015 年 3 月 7 日.
- ⑩ 羽田絢, 國分健太郎, 山田雅貴, 大塚敏之, “浮体式洋上風力発電のブレードピッチ角制御に関する  $H_{\infty}$  制御適用の基礎検討,” 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, 科学技術館 (東京都・千代田区), 2014 年 11 月 28 日.
- ⑪ 山田雅貴, 羽田絢, 國分健太郎, 大塚敏之, “浮体式洋上風力発電施設における浮体ピッチ角とロータ回転数の  $H_{\infty}$  制御に関する初期検討,” 第 57 回自動制御連合講演会, ホテル天坊 (群馬県・渋川市), 2014 年 11 月 12 日.
- ⑫ Ohtsuka, T., Kashima, K., and Hashimoto, T., “Real-Time Optimization for Integration Mechanism,” *Cooperative Distributed Control for Energy Management Systems - New Frameworks and Research Directions -*,

- Pre-Conference Workshop, The 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, フィレンツェ (イタリア), 2013 年 12 月 9 日。(招待講演)
- ⑬ 松永奈美, 石塚真一, 大塚敏之, “数式処理ツールによる非線形モデル予測制御の設計・シミュレーション環境の構築,” 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟大学 (新潟県・新潟市), 2013 年 11 月 16 日.
- ⑭ 橋本智昭, “モデル予測制御: 物理システムからのアプローチ,” 計測自動制御学会 関西支部 物理と情報をつなぐ次世代システム制御研究会, チュートリアル講演, 大阪大学 (大阪府・吹田市), 2013 年 8 月 10 日。(招待講演)
- ⑮ 川上哲志, 岩永明人, 井上弘士, 大塚敏之, “モデル予測制御のためのメニーコア投機実行の性能モデリング,” 情報処理学会第 198 回計算機アーキテクチャ研究発表会, 北九州国際会議場 (福岡県・北九州市), 2013 年 7 月 31 日.
- ⑯ Ohtsuka, T., “Nonlinear Model Predictive Control: Concepts, Algorithms and Applications,” *Symposium: Reinforcement Learning for High-Dimensional Systems based on Stochastic State Estimation, Neuro2013*, 京都国際会館 (京都府・京都市), 2013 年 6 月 22 日。(招待講演)
- ⑰ 佐藤竜太, 橋本智昭, 大塚敏之, “熱流体の物質輸送現象に対する非線形 Receding Horizon 制御,” 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, アクロス福岡 (福岡県・福岡市), 2013 年 3 月 6 日.
- ⑱ 梅津佑介, 加嶋健司, “走化性反応拡散方程式におけるパターン形成制御のための有限波数近似,” 平成 24 年度 SICE 関西支部・ISCIE 若手研究発表会, 常翔学園大阪センター (大阪府・大阪市), 2013 年 1 月 18 日.
- ⑲ Ohsumi, K., Ohtsuka, T., Hirata, M., and Shioya, M., “Particle Model Predictive Control of Temperature Dispersion in Steel Plate Cooling,” *IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries (IFAC MMM2012)*, 長良川国際会議場 (岐阜県・岐阜市), 2012 年 9 月 11 日.
- ⑳ Hashimoto, T., Yoshimoto, I., and Ohtsuka, T., “Probabilistic Constrained Model Predictive Control for Schrödinger Equation with Finite Approximation,” *SICE Annual Conference 2012 (SICE2012)*, 秋田大学 (秋田県・秋田市), 2012 年 8 月 22 日.
- ㉑ Tahir, F., and Ohtsuka, T., “Using Inverse Linear Quadratic Methods for Systematic Tuning of Performance Index in Nonlinear Model Predictive Control,” *SICE Annual Conference 2012 (SICE2012)*, 秋田大学 (秋田県・秋田市), 2012 年 8 月 22 日.
- ㉒ Hashimoto, T., Yoshioka, Y., and Ohtsuka, T., “Receding Horizon Control with Numerical Solution for Thermal Fluid Systems,” *SICE Annual Conference 2012 (SICE2012)*, 秋田大学 (秋田県・秋田市), 2012 年 8 月 22 日.
- [図書] (計 2 件)
- ① 大塚敏之 編著, 浜松正典, 永塚満, 川邊武俊, 向井正和, M. A. S. Kamal, 西羅光, 山北昌毅, 李俊黙, 橋本智昭 共著, 実時間最適化による制御の実応用, コロナ社, 2015 年 1 月, 243 ページ.
- [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  
[http://www.ids.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/index\\_j.htm](http://www.ids.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/index_j.htm)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
 大塚 敏之 (OHTSUKA, Toshiyuki)  
 京都大学・大学院情報学研究科・教授  
 研究者番号: 40272174
- (2) 研究分担者  
 加嶋 健司 (KASHIMA, Kenji)  
 京都大学・大学院情報学研究科・准教授  
 研究者番号: 60401551
- 橋本 智昭 (HASHIMOTO, Tomoaki)  
 大阪工業大学・工学部・講師  
 研究者番号: 90515115
- (3) 連携研究者  
 井村 順一 (IMURA, Junichi)  
 東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授  
 研究者番号: 50251474
- 木村 啓二 (KIMURA, Keiji)  
 早稲田大学・理工学術院・教授  
 研究者番号: 50318771
- 松尾 亜紀子 (MATSUO Akiko)  
 慶應義塾大学・理工学部・教授  
 研究者番号: 70276418