

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28日現在

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560465
 研究課題名（和文） 大規模複雑非線形系のRH制御に対する実時間アルゴリズムとその応用
 研究課題名（英文） Real-Time Algorithms and Its Applications for Receding Horizon Control of Large-Scale Complex Nonlinear Systems
 研究代表者
 大塚 敏之（OHTSUKA TOSHIYUKI）
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
 研究者番号：40272174

研究成果の概要（和文）：シミュレーション結果の特異値分解，縮小写像，線形相補性問題，可換環論をそれぞれ利用して，非線形 Receding Horizon 制御（RH 制御）の計算量削減と精度向上を達成した．従来は非線形 RH 制御の適用が不可能と考えられていた熱流体现象のような非線形分布定数系に対しても，実時間で非線形 RH 制御を実装できる可能性が高まった．解析的に解ける非線形 RH 制御問題の存在も示した．

研究成果の概要（英文）：Improvements in computational burden and accuracy of nonlinear receding horizon control (NRHC) have been achieved by exploiting singular-value decomposition of simulation results, contraction mappings, linear complementarity problems, and commutative algebra, respectively. As a result, real-time implementation of NRHC has been made within reach even for nonlinear distributed-parameter systems such as thermal and fluid phenomena, for which NRHC had been regarded impossible. The existence of a class of NRHC problems that can be solved analytically has also been shown.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論，非線形制御，最適制御，実時間計算，計算量低減

1. 研究開始当初の背景

非線形性や拘束条件など従来の制御理論で扱いづらい性質を持つシステムに対して，Receding Horizon制御（RH制御）またはモデル予測制御と呼ばれる制御手法の有効性が近年注目されている．RH制御は，各時刻で有限時間未来までの評価関数を最小化する最適制御を求め，その初期値のみを実際の制御入力として用いる制御手法である．各時刻の状態を初期状態とする最適制御問題を解いて制御

入力を決定するので，一種の状態フィードバック制御が実現できる．閉ループ系の安定性を保証することは一般に困難なものの，最適制御問題において状態や入力に対する拘束条件を陽に考慮することができ，汎用的な非線形制御手法として期待されている．一方で，サンプリング周期ごとに非線形最適制御問題を解くのは多大な計算量を要するため，ミリ秒単位のサンプリング周期を有する非線形系にRH制御を実装するのは困難だとされてきた．

その困難を解決するため、申請者は、非線形RH制御の高速アルゴリズムを研究してきた。そして、反復解法無しに最適解の微小変化を求めてオンラインで最適解の更新を行うアルゴリズム (C/GMRES) を開発した。このアルゴリズムの有効性は実験や産業応用を通じて確かめられている。そこで、さらに大規模で複雑な非線形系にも適用可能な実時間アルゴリズムの開発が学術的にも産業的にも重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来不可能だった大規模複雑非線形系の制御を実現するために、非線形Receding Horizon制御 (RH制御) の計算量を今まで以上に低減することである。非線形RH制御の実時間アルゴリズムであるC/GMRESでは、各サンプリング時刻で連立1次方程式を1回解くのみで最適制御入力更新ができる。したがって、計算の大部分を占める連立1次方程式のサイズを低減したり、計算を簡略化したりできれば計算量を減らすことができる。また、本研究では、改良したアルゴリズムの応用も目指す。応用の過程では、制御系のチューニング手法、外乱やモデル誤差の影響低減などにも適宜取り組み、実際的な制御手法の確立を目指す。

本研究は、数値最適化という工学の諸分野で広く用いられる問題を扱いつつも、実時間でのフィードバック制御という制御工学に固有の問題設定に立脚している点が特徴である。したがって、数理計画法の単なる応用ではなく、フィードバック制御に特化した数値最適化アルゴリズムという新しい制御工学の方向性をさらに発展させるものである。

本研究で期待される成果は、非線形RH制御の適用範囲拡大である。その結果、今まで不可能だった大規模複雑非線形系のフィードバック制御が視野に入ってくる。また、フィードバック制御のみならず、状態やパラメータの推定にも同様のアルゴリズムが適用できるので、研究成果の波及効果は大きい。アルゴリズムの応用によってさまざまな分野の制御が高度化されれば、産業発展および社会生活に対する寄与も大きい。

3. 研究の方法

本研究では、アルゴリズムの開発と応用を並行して進める。まずアルゴリズムに関しては、最適性条件を分解してその一部を近似で代用すること、システムを適切に分解してサブシステムの相互結合構造を利用すること、有理式など状態方程式の構造を利用すること、

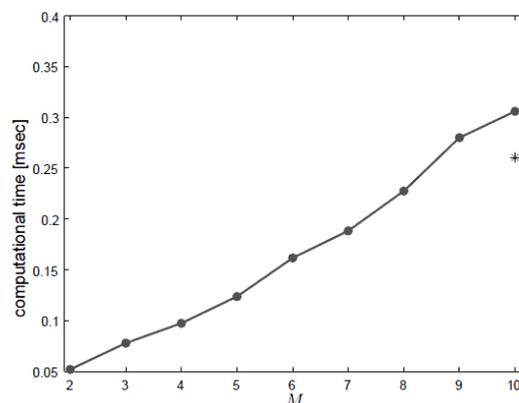


図1 基底の個数 M と入力更新 1 回の計算時間 (*は従来手法)

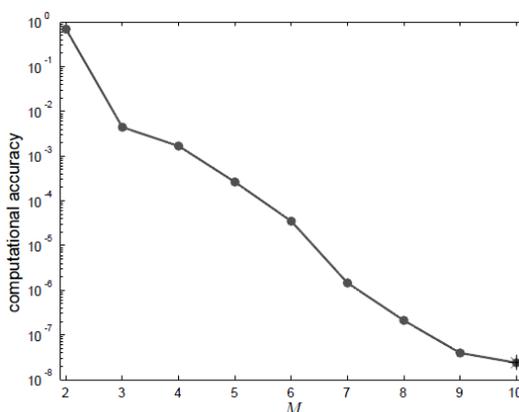


図2 基底の個数 M と最適性の誤差 (*は従来手法)

などを検討し、有効なアプローチを明らかにする。基本的に、適切な近似を導入して計算量の大幅な低減を目指す。また、大規模なシステムで実時間計算が不可能な場合、適切な分散処理によって実装を可能にする。さらに、有理式などの構造を利用して、可能な限り解析的に問題を単純化し、実時間計算の負荷を減らすことを検討する。

応用に関しては、鉄鋼プロセスのプラントワイド制御、大規模化学プロセス、環境システム、移動体群の運動制御、などを対象とする。たとえば、鉄鋼の圧延工程においては、塑性変形などの複雑な現象が介在するだけでなく、上流工程からの影響と下流工程への影響も存在し、最終品質を向上させるにはそれらすべてを考慮して制御することが望ましい。しかし、そのためには極めて複雑な大規模モデルを用いる必要がある。また、自動車など移動体の群を制御する際に個々のダイナミクスの非線形性を考慮する必要がある場合、群全体の非線形モデルは大規模なので集中処理で実時間最適化を行うのは困難となり、分散

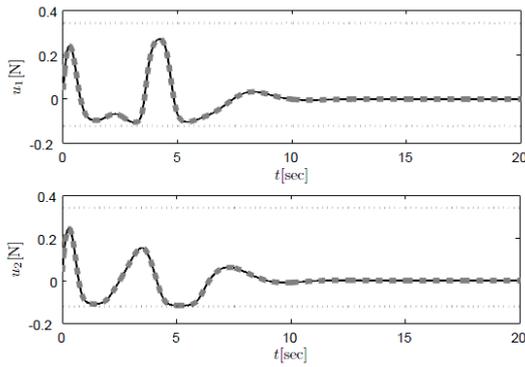


図3 制御入力の時系列履歴 (実線: 従来手法, 破線: 提案手法)

処理が必要となることも考えられる。

4. 研究成果

非線形RH制御の計算量を低減するために、解くべき非線形最適化問題の低次元化手法を開発した。オフラインでのシミュレーション結果の時系列を特異値分解して最適制御の主成分を取り出し、それを基底として用いることにより、数少ないパラメータで最適解を表す手法を開発した。その際、パラメータの数は減っても、元の問題における拘束条件が成り立つことは保証しなければならない。その方法としてバリア関数法やペナルティ関数法を用いて、実際の応用例で有効性を示した。

たとえば、6状態2入力の非線形ホバークラフト・モデルに提案手法を提案すると、基底の個数 M に対して、制御入力更新1回の計算時間と最適性条件の誤差ノルムは、それぞれ図1、図2のようになった。基底の個数を減らすほど計算時間が短くなり、誤差は増大することが分かる。したがって、計算時間と精度のトレードオフが可能になった。図3は $M=6$ の時の制御入力の時系列履歴である。少ない計算量でも十分な精度で制御入力が計算できている。

さらなる計算量低減化の手法として、最適解の実時間変化を追跡する際に用いる連立1次方程式の解法も検討した。従来はGMRESと呼ばれるクリロフ部分空間法を用いており、連立1次方程式の係数行列を陽に評価する必要

表1 最適性誤差と計算時間

	最適性誤差	計算時間[ms]
C/GMRES	1.51×10^{-4}	87.7
縮小写像法 ($k=1$)	4.03×10^{-4}	8.3
縮小写像法 ($k=2$)	5.66×10^{-4}	17.8

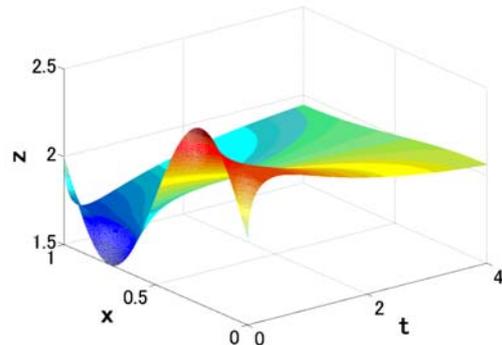


図4 開ループ系の応答

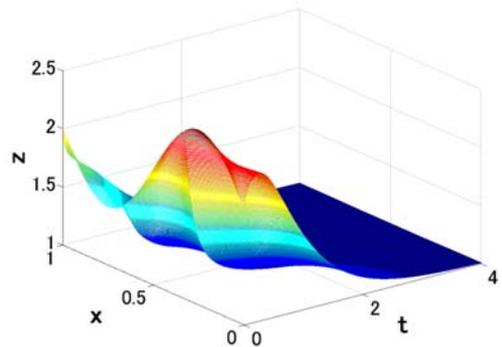


図5 閉ループ系の応答

がないという利点によって効率的な計算が可能になっているが、さらに、縮小写像の原理を利用して、ごく簡単な計算の反復で置き換えることを検討した。その結果、適用対象は若干限定されるものの、従来手法に比べて10倍程度高速なアルゴリズムを開発することができた。このアルゴリズムによって、従来は非線形RH制御の適用が不可能と考えられていた非線形分布定数系に対しても、実時間で非線形RH制御を実装できる可能性が出てきた。たとえば、非線形偏微分方程式で記述される熱流体現象が非線形分布定数系の例であり、そのような複雑な現象に対して非線形RH制御のシミュレーションを行い良好な応答を得た。表1は、非線形放物型偏微分方程式に対して非線形RH制御を適用した際の最適性条件における誤差の平均値と、入力更新1回あたりの計算時間とを示している。縮小写像法の反復を1回 ($k=1$) だけ行った場合、誤差のオーダーは変わらずに計算時間が1/10以下になっている。開ループ系と閉ループ系の応答をそれぞれ図4と図5に示す。閉ループ系では状態 z が目標状態である $z=1$ に収束している。鋼板の熱間圧延工程における冷却の非線形RH制御にも提案アルゴリズムを適用し、数値シミュレーションによって有効性を確認した。

また、不等式拘束条件をバリア関数法など

で近似的に扱おうと数値的困難に陥りやすく、高精度の解を得るには計算量が多くなってしまいうため、不等式拘束条件付きの問題に対する最適解の追跡を近似なしに線形相補性問題に帰着させ、内点法によって効率的に解くことも検討し、従来手法では計算に失敗する問題でも解けるようになった。

さらに、数値計算を補完する手法として、数式処理によって非線形RH制御問題を解く方法についても検討し、限られたクラスではあるが、解析的に解ける場合があることを示した。

本研究で開発したアルゴリズムの応用として、非線形4輪車両モデルの衝突回避問題や追跡回避問題、鉄鋼プロセス、大型粒子加速器の冷却装置、非線形熱流体システム、非線形拡散方程式などにRH制御を適用した。

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 23 件)

- ① 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 (accepted for publication).
- ② 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.
- ③ Kohei Ozaki, Toshiyuki Ohtsuka, Kenji Fujimoto, Akira Kitamura, and Makishi Nakayama, “Nonlinear Receding Horizon Control of Thickness and Tension in a Tandem Cold Mill with a Variable Rolling Speed,” *ISIJ International*, Vol. 52, No. 1, 2012, pp. 87-95.
- ④ Yu Kawano, and Toshiyuki Ohtsuka, “An Algebraic Solution Method for the Unsteady Hamilton-Jacobi Equation,” *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, FL, Dec. 12-15 (presented on Dec. 15) 2011, pp. 7741-7746.
- ⑤ Kohei Ohsumi, and Toshiyuki Ohtsuka, “Particle Model Predictive Control for Probability Density Functions,” *Reprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, Aug. 28-Sept. 2 (presented on Aug. 31), 2011, pp. 7993-7998.
- ⑥ Yu Kawano, and Toshiyuki Ohtsuka, “An Algebraic Approach to Local Observability at an Initial State for Discrete-Time Polynomial Systems,” *Reprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, Aug. 28-Sept. 2 (presented on Aug. 30), 2011, pp. 6449-6453.
- ⑦ Rafal Noga, Toshiyuki Ohtsuka, Cesar de Prada, Enrique Blanco, and Juan Casas, “Simulation Study on Application of Nonlinear Model Predictive Control to the Superfluid Helium Cryogenic Circuit,” *Reprints of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, Aug. 28-Sept. 2 (presented on Aug. 30), 2011, pp. 3647-3652.
- ⑧ Toshiyuki Ohtsuka, “Solutions to the Hamilton-Jacobi Equation with Algebraic Gradients,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 56, No. 8, August 2011, pp. 1874-1885.
- ⑨ Rafal Noga, and Toshiyuki Ohtsuka, “NMPC for Stiff, Distributed Parameter System: Semi-Automatic Code Generation and Optimality Condition Evaluation,” *Proceedings of the 18th International Conference on Process Control*, High Tatras, Slovak Republic, June 2011, pp. 415-418.
- ⑩ 橋本智昭, 吉岡佑輔, 大塚敏之, “非線形放物型偏微分方程式のモデル予測制御,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 5, May 2011, pp. 230-237.
- ⑪ Tomoaki Hashimoto, Yusuke Yoshioka, and Toshiyuki Ohtsuka, “Receding Horizon Control for Nonlinear Parabolic Partial Differential Equations with Boundary Control Inputs,” *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, GA, Dec. 2010, pp. 6920-6925.
- ⑫ Rafal Noga, Toshiyuki Ohtsuka, Cesar de Prada Moraga, Enrique Blanco Viñuela, and Juan Casas Cubillos, “Nonlinear Model Predictive Control for the Superfluid Helium Cryogenic Circuit of the Large Hadron Collider,” *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Control Applications*, Yokohama, Japan, Sept. 2010, pp. 1654-1659.
- ⑬ Masahi Nanao, and Toshiyuki Ohtsuka, “Nonlinear Model Predictive Control for Vehicle Collision Avoidance Using C/GMRES Algorithm,” *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Control Applications*, Yokohama, Japan, Sept. 2010, pp. 1630-1635.
- ⑭ Tomoaki Hashimoto, Yusuke Yoshioka, and Toshiyuki Ohtsuka, “Model Predictive Control for Hot Strip Mill Cooling

System,” *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Control Applications*, Yokohama, Japan, Sept. 2010, pp. 646-651.

- ⑮ Kohei Ohsumi, and Toshiyuki Ohtsuka, “Nonlinear Receding Horizon Control of Probability Density Functions,” *Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Bologna, Italy, Sept. 2010, pp. 735-740.
- ⑯ 尾崎昂平, 大塚敏之, 藤本健治, 北村章, 中山万希志, “板速可変な冷間圧延機における板厚と張力の非線形 Receding Horizon 制御,” *鉄と鋼*, Vol. 96, No. 7, July 2010, pp. 459-467.
- ⑰ Yuichi Shimizu, Toshiyuki Ohtsuka, and Moritz Diehl, “A Real-Time Algorithm for Nonlinear Receding Horizon Control Using Multiple Shooting and Continuation/Krylov Method,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 19, No. 8, May 2009, pp. 919-936.
- ⑱ Toshiyuki Ohtsuka, and Stefan Streif, “Commutativity of Immersion and Linearization,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 54, No. 4, April 2009, pp. 826-829; Correction: Vol. 54, No. 5, May 2009, p. 1176; Correction: *ibid.*, Vol. 54, No. 5, May 2009, p. 1176.

[学会発表] (計 48 件)

- ① 吉岡佑輔, 橋本智昭, 大塚敏之, “熱流体システムに対する Receding Horizon 制御の数値解法,” 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 奈良, 2012 年 3 月 16 日, P0193.
- ② 藤井信宏, 大塚敏之, “非線形適応モデル予測制御の血糖値制御問題への応用,” 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 奈良, 2012 年 3 月 15 日, P0089.
- ③ 内田健斗, 大塚敏之, “線形相補性条件に基づく非線形 Receding Horizon 制御のアルゴリズム,” 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 奈良, 2012 年 3 月 14 日, P0062.
- ④ Nobuhiro Fujii, and Toshiyuki Ohtsuka, “Input-Dependent Adaptive Immersion and Invariance Control,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2011 (SICE2011)*, Tokyo, Sept. 16, 2011, pp. 2200-2203.
- ⑤ Masashi Nanao, and Toshiyuki Ohtsuka, “Vehicls Dynamics Control for Collision Avoidance Considering Physical Limitations,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2011 (SICE2011)*, Tokyo, Sept. 14, 2011, pp. 688-693.
- ⑥ Yoshiaki Azuma, and Toshiyuki Ohtsuka, “Receding Horizon Nash Game Approach for Distributed Nonlinear Control,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2011 (SICE2011)*, Tokyo, Sept. 14, 2011, pp. 380-384.
- ⑦ Yu Kawano, and Toshiyuki Ohtsuka, “An Algebraic Approach to Hamilton’s Canonical Equations,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2011 (SICE2011)*, Tokyo, Sept. 14, 2011, pp. 370-375.
- ⑧ 大角洗平, 大塚敏之, 平田光男, 塩谷政典, “確率密度関数の非線形 Receding Horizon 制御とその鉄鋼プロセスへの応用検討,” 日本鉄鋼協会第 161 回春季講演大会, 東京, 2011 年 3 月 26 日, 材料とプロセス(CAMP-ISIJ) Vol. 24, pp. 25-28.
- ⑨ 丸谷淳, 大塚敏之, “非線形無限評価区間最適制御の実時間アルゴリズム,” 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 沖縄, 2011 年 3 月 18 日, 187-2-2.
- ⑩ 赤山慶太, 大塚敏之, “拘束条件を考慮したオフラインでの特異値分解に基づく非線形 Receding Horizon 制御の実時間アルゴリズム,” 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 沖縄, 2011 年 3 月 18 日, 187-1-4.
- ⑪ 加藤穂高, 大塚敏之, “衝突を含むシステムの簡易なモデル化～最適制御への適用を例として～,” 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 沖縄, 2011 年 3 月 17 日, 177-1-5.
- ⑫ 大角洗平, 大塚敏之, “確率密度関数に対する粒子モデル予測制御の定式化と数値解法,” 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 沖縄, 2011 年 3 月 17 日, 171-1-5.
- ⑬ Yusuke Yoshioka, Tomoaki Hashimoto, and Toshiyuki Ohtsuka, “A Numerical Solution Method to Receding Horizon Control for Nonlinear Diffusion Systems,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2010 (SICE2010)*, Taipei, Taiwan, Aug. 18, 2010, pp. 1092-1095.
- ⑭ Jun Marutani, and Toshiyuki Ohtsuka, “A Real-Time Algorithm for Nonlinear Receding Horizon Control,” *Proceedings of SICE Annual Conference 2010 (SICE2010)*, Taipei, Taiwan, Aug. 18, 2010, pp. 219-222.
- ⑮ 七尾真士, 大塚敏之, “四輪車両の性能

限界を考慮した衝突回避における実時間最適化,” 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 京都, 2010 年 5 月 21 日, pp. 595-596.

- ⑫ 吉岡佑輔, 橋本智昭, 大塚敏之, “非線形拡散系 Receding Horizon 制御の数値解法,” 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 京都, 2010 年 5 月 21 日, pp. 593-594.
- ⑬ 東良明, 大塚敏之, “非線形四輪車両モデルの Receding Horizon 微分ゲームに対する実時間解法,” 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 京都, 2010 年 5 月 19 日, pp. 151-152.
- ⑭ Kohei Ozaki, Toshiyuki Ohtsuka, Kenji Fujimoto, Akira Kitamura, and Makishi Nakayama, “Nonlinear Receding Horizon Control of a Tandem Cold Mill in Acceleration and Deceleration Conditions,” *Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE2009)*, Fukuoka, Japan, Aug. 19, 2009, pp. 2158-2163.
- ⑮ Hodaka Kato, and Toshiyuki Ohtsuka, “Walking Control of a Compass-like Biped Robot with a Constraint Mechanism,” *Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE2009)*, Fukuoka, Japan, Aug. 18, 2009, pp. 51-55.
- ⑯ Toshiyuki Ohtsuka, “An Algebraic Solution Method of the Hamilton-Jacobi Equation,” The 3rd Japan-China Joint Workshop on Control: Theory and Applications of Complex Systems, ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE2009), Fukuoka, Japan, Aug. 18, 2009.

[図書] (計 4 件)

- ① 大塚敏之, “最適制御,” 茨木俊秀, 片山徹, 藤重悟 監修, 太田快人, 酒井英昭, 高橋豊, 田中利幸, 永持仁, 福島雅夫編, 数理工学事典, 朝倉書店, 2011 年 11 月, pp. 251-258.
- ② 大塚敏之, 非線形最適制御入門, コロナ社, 2011 年 2 月.
- ③ Toshiyuki Ohtsuka, “An Algebraic Solution Method of the Hamilton-Jacobi Equation,” in J. Huang, K.-Z. Liu, and Y. Ohta (Eds.), *Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control*, Tsinghua University Press, Beijing, Aug. 2010, pp. 51-62.

- ④ Toshiyuki Ohtsuka, and Kohei Ozaki, “Practical Issues in Nonlinear Model Predictive Control: Real-Time Optimization and Systematic Tuning,” in L. Magni, D. M. Raimond, and F. Allgöwer (Eds.), *Nonlinear Model Predictive Control: Towards New Challenging Applications*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 384, Springer, Heidelberg, 2009, pp. 447-460.

[その他]
ホームページ等
http://www-sc.sys.es.osaka-u.ac.jp/~ohtsuka/research_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 敏之 (OHTSUKA TOSHIYUKI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：40272174

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし