

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420440

研究課題名(和文) 実時間最適化制御システムのロバスト安定性解析・設計に対する包括的アプローチ

研究課題名(英文) A unified approach to robust analysis and synthesis of online optimization based control systems

研究代表者

和田 信敬 (WADA, NOBUTAKA)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50335709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、実時間での最適化演算を活用することにより、従来の線形時不変制御器では達成困難な性能を実現する様々な制御アルゴリズムが提案されている。本研究では、従来提案されている制御アルゴリズムに共通する構造を抽出した。さらに、その結果に基づき、従来用いられてこなかった調整自由度を活用する新たな制御アルゴリズムを提案した。その有効性を、数値例および実機実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：Recently, various types of control algorithms that exploit the online optimization have been developed. In this research project, we have extracted the common structure of such control algorithms. Then, based on the result, we have developed control methodologies that exploit extra degree of freedom that has not been used in the existing methods. It has been shown that the proposed control methods can achieve much higher control performance by numerical examples and experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学

1. 研究開始当初の背景

近年、実時間での最適化演算を活用することにより、従来の線形時不変制御器では達成困難な性能を実現する様々な制御アルゴリズムが提案されている。これまでのところ、このクラスの制御器が用いられたシステムについては、実時間最適化演算が制御器内部で行われていることに起因する解析の見通しの悪さから、外乱や制御対象の不確かさに対してシステムのロバスト性を保証する制御器を設計することは一般に困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、実時間最適化を活用する制御器に共通に現われる構造を抽出し、最適化演算が行われるモジュールの入出力特性を解析する。さらに、これらの結果に基づき、様々な実時間最適化制御器に適用可能な、包括的なロバスト制御器設計法を構築することを目的とする。さらに、提案手法を電気自動車の耐故障制御系設計問題に適用する。

3. 研究の方法

まず、実時間最適化モジュールの入出力特性の解析を行い、大域的セクタ条件、領域的セクタ条件を導出し、さらに、スローブ解析を行う。つぎに、従来提案されている各種の実時間最適化制御器を包含する一般的な制御器構造を導出する。さらに、この結果に基づき、一般化された構造を持つモデル予測制御器を導出する。さらに、実時間最適化モジュールの入出力特性解析の結果を活用し、モデル予測制御器のロバスト設計法および漸近安定領域設計法を構築する。つぎに、制御分配器を用いた耐故障制御システムの構成問題を採り上げ、外乱およびパラメータ変動に対してロバストな制御分配器の設計法を構築する。さらに、これらの結果を、小型電気自動車の耐故障制御問題に適用し、動力学シミュレータ、並びに、実験装置により、その有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究課題に関連して、雑誌論文[1]～[14]の成果を発表した。以下では、その主要成果について説明する。

(1)モデル予測制御器の最適化モジュールの抽出とこれに基づく動的 Anti-windup 補償：モデル予測制御は、入力や状態の制約を扱うことの可能な制御手法の一つであり、化学、製鉄等の産業界で幅広く用いられている。この制御手法は、入力・状態の制約の下で、あるコスト関数が最小化されるように有限時間区間の開ループ最適制御問題を解き、得られた入力列の第一点目のみを制御対象に加える。これを毎時刻繰り返しながら制御を実行する。標準的なモデル予測制御では、毎時刻解く最適化問題は凸二次計画問題に帰着される。本研究では、オブザーバ併合型の出力フィードバックモデル予測制御系が、線形

時不変ダイナミクスとセクタ条件を満たす非線形要素とのフィードバック結合として表現出来ることを示した (Fig.1 参照)。さらに、この結果に基づき、閉ループ系の大域的漸近安定性を保証する動的 Anti-windup 補償器の構造と設計法を示した。補償器の設計問題は、線形行列不等式 (LMI) 制約下における凸最適化問題に帰着される。さらに、閉ループ系の大域的安定性を保証する補償器が、予測ホライズンやコスト関数の重み行列の値と無関係に必ず存在することを示した。なお、本研究で示した制御器は、従来のモデル予測制御器には含まれない構造的自由度を活用するものとなっている。以上の結果については、雑誌論文[1]にまとめられている。

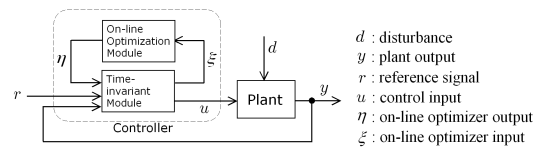


Fig.1 実時間最適化制御系の構造

(2)制御器内部状態の最適初期化を活用したオンライン最適化制御アルゴリズムの開発：

本研究では、様々な制約の下で制御出力を目標信号に素早く追従させるモデル予測サーボ制御器の新しい構成法を示した。ここで構築した制御手法では、開ループ入力列に加え、サーボ補償器の内部状態を、コスト関数が最小となるように毎時刻最適に初期化する。これにより、内部状態の初期化を含まない標準的なモデル予測制御と比較して、追従性能が著しく向上することを示した (Fig. 2 参照。詳細については雑誌論文[5])。さらに、この手法は、仮想的目標信号を導入し、コスト関数を修正することで、時変目標信号への追従制御器へ拡張出来ることを示した。さらに、オンライン最適化問題を効率よく解く手法を整備し、ソフトウェアに実装した。これを用い、共振機械系に対して提案法を適用し、その有効性を検証した (学会発表[2])。

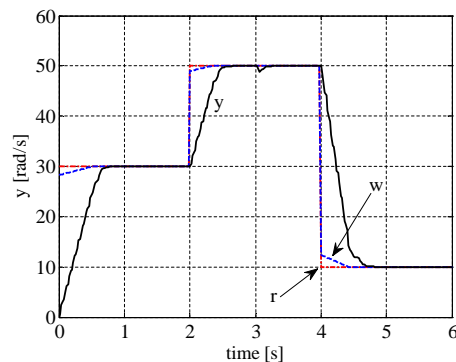


Fig.2(a) 提案法による目標値追従制御数値シミュレーション結果 (y: 制御出力, r: 目標信号, w: 仮想目標信号)。積分 Windup を生じることなく素早く目標信号に追従している。

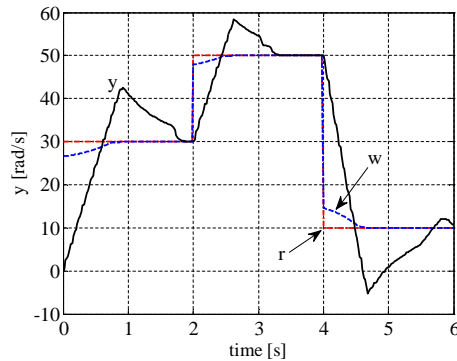


Fig.2(b) 従来法による目標値追従制御数値シミュレーション結果 (y : 制御出力, r : 目標信号, w : 仮想目標信号). 目標信号への追従は達成しているものの, 過渡的にオーバーシュートが生じている.

(3) アクチュエータ故障に対する耐故障制御アルゴリズムの構築:

本研究では, 左右輪を独立に制駆動可能であり, かつ, Steer-by-wire が取り付けられた4輪車両に対する耐故障制御手法を構築した. この車両は, 旋回モーメントを複数の方法で発生させることが可能である. すなわち, 旋回運動に関して冗長なアクチュエータを有していると言える. このことは, 何れかのアクチュエータが故障あるいは飽和制限に達した場合に, 残りのアクチュエータを適切に用いることで, 旋回性能を維持することが可能であることを意味している. ここでは, 冗長なアクチュエータに対し, 故障, 飽和制限等の下で, 制御性能の劣化が最小化されるように制御信号を最適に分配する手法を構築した. 最適分配は, 凸二次計画問題に帰着される. 提案制御系は, セクタ条件を満たす非線形要素と線形時不変ダイナミクスのフィードバック結合となっていることを示した. さらに, この事実に基づき, 閉ループ系の安定性を保証する制御系の設計法を示した. 制御系の設計問題は, LMI 最適化問題に帰着される. この成果については雑誌論文 [12] にまとめられている.

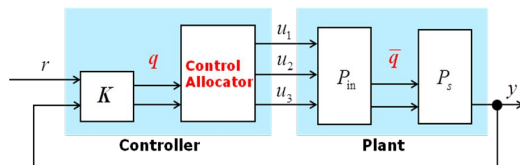


Fig.3 耐故障制御系の構造

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 14 件)

[1] Nobutaka Wada and Masami Saeki, Anti-windup synthesis for a model predictive control system, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic

Engineering, 査読有, to appear

[2] Nobutaka Wada, Naoki Kawaoka, and Masami Saeki, A gain-scheduled control algorithm for input constrained systems to track time-varying references using controller state resets, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, to appear

[3] Masami Saeki, Nobutaka Wada and Satoshi Satoh, Stability analysis of feedback systems with dead zone nonlinearities by circle and Popov criteria, Automatica, 査読有, Vol. 66, 2016, pp.96-100, doi:10.1016/j.automatica.2015.12.020

[4] Nobutaka Wada, Katsuya Satoh and Masami Saeki, An LMI based controller design method for a discrete-time linear system with time-varying state delays, IMA Journal of Mathematical Control and Information, 査読有, 2015, doi:10.1093/imanci/dnv052

[5] Nobutaka Wada, Model predictive tracking control for constrained linear systems using integrator resets, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol.60, No.11, 2015, pp.3113-3118, doi:10.1109/TAC.2015.2411915

[6] Nobutaka Wada, Masami Saeki and Izumi Masubuchi, A constrained tracking control algorithm for linear systems based on a spline-type parameter-dependent Lyapunov function, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 査読有, Vol. 25, No.12, 2015, pp.1877-1896, doi: 10.1002/rnc.3183

[7] 佐伯正美, 黒坂友亮, 和田信敬, 佐藤訓志, ボリュームレンダリングによる非線形フィルタのパラメータ空間設計, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.10, 2015, pp.419-425, <http://doi.org/10.5687/iscie.28.419>

[8] Nobutaka Wada, Constrained tracking control by continuous resets of the state of a gain-scheduled controller, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol. 1, No. 3, 2014, pp.DR0012, <http://doi.org/10.1299/mej.2014dr0012>

[9] 佐伯正美, 山成真輝, 和田信敬, 佐藤訓志, モデルマッチングによるデータ駆動制御器設計のための参照モデルの選定, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, No.3, 2014, pp.73-79, <http://doi.org/10.5687/iscie.27.73>

[10] Masami Saeki, Assi Mouhammad and Nobutaka Wada, Robust performance design of a state predictive controller on parameter space, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.9, No.1, 2014, pp.24-30, doi:

10.1002/tee.21932

[11] Takuma Iwamoto, Masami Saeki, Satoshi Satoh and Nobutaka Wada, Speeding up of calculation for mu-synthesis of low order H-infinity controllers, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.6, No.3, 2013, pp.202-207,

<http://doi.org/10.9746/jcmsi.6.202>

[12] Nobutaka Wada, Kosuke Fujii and Masami Saeki, Reconfigurable fault-tolerant controller synthesis for a steer-by-wire vehicle using independently driven wheels, Vehicle System Dynamics, 査読有, Vol.51, No.9, 2013, pp.1438-1465, DOI:10.1080/00423114.2013.806671

[13] Nobutaka Wada, Hiroyuki Tomosugi and Masami Saeki, Model predictive tracking control for a linear system under time-varying input constraints, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 査読有, Vol.23, No.9, 2013, pp.945-964, DOI: 10.1002/rnc.2806

[14] 佐伯正美, 和田信敬, 佐藤訓志, 過渡応答データを用いたフィルタバンクによるゲイン推定と Extension 定理, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.49, No.4, 2013, pp.425-431,

<http://doi.org/10.9746/sicetr.49.425>

〔学会発表〕(計 14 件)

[1] 和田信敬, 鶴島誠也, 佐伯正美, モデル予測制御における積分リセットの活用について, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015 年 5 月 22 日, 大阪

[2] 鶴島誠也, 和田信敬, 佐伯正美, 時変目標信号に対するモデル予測追従制御, -積分リセットの活用による高性能化-, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2015 年 11 月 28 日, 岡山

[3] 李易, 和田信敬, 三宅大地, 佐伯正美, 永久磁石同期モータのためのサーボ制御システム設計-状態リセットを伴う可変ゲイン制御を用いる方法-, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.46-48, 2015 年 11 月 28 日, 岡山

[4] 松井優治, 和田信敬, 依藤大和, 佐伯正美, 車輪型移動体のための駆動力制御アルゴリズムの開発 - スリップ率制限を考慮する方法 -, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.28-29, 2015 年 11 月 28 日, 岡山

[5] Masami Saeki, Yusuke Kurosaka, Nobutaka Wada, Satoshi Satoh, A parameter space design method using simulation, Proceedins of the 10th Asian Control Conference, June 2, 2015, pp.1 - 6, Kota Kinabalu, Malaysia

[6] Nobutaka Wada, Hidekazu Miyahara, Masami Saeki, Constrained tracking

control by continuous resets of the state of a gain-scheduled controller and its experimental verification, Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, August 10, 2014, pp.89 - 94, Kumamoto

[7] 和田信敬, 宮原英和, 佐伯正美, 制御器内部状態のリセットを活用した入力拘束システムの追従制御, 計測自動制御学会第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 7 日, CD-ROM, 東京

[8] 和田信敬, 宮原英和, 河岡直樹, 佐伯正美, 制御器内部状態の連続的リセットに基づく入力拘束システムに対する追従制御-周期的目標信号への拡張と実験的検証-, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, 2014 年 8 月 28 日, CD-ROM, 東京

[9] 和田信敬, 制御器内部状態のリセットを活用したリファレンスガバナの構成, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2014 年 11 月 29 日, pp.74-75, 福山

[10] 藤原敬尚, 和田信敬, 佐伯正美, ドライバの動特性を考慮した車両制御システムの設計, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2014 年 11 月 29 日, pp.54-55, 福山

[11] Masami Saeki, N. Yamanari, Nobutaka Wada and Satoshi Satoh, Reference model selection for a model-matching data-driven control design, Proceedings of SICE Annual Conference, September 15, 2013, pp.955 - 960, Nagoya

[12] 和田信敬, 佐伯正美, 入力拘束システムに対する過渡応答を考慮した目標信号追従制御-ツインロータヘリコプタによる実験的検証-, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月 17 日, CD-ROM, 新潟

[13] 佐藤克哉, 和田信敬, 佐伯正美, 時変な状態遅延を有するシステムに対する制御系設計, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.36-37, 2013 年 11 月 30 日, 山口

[14] 和田信敬, 佐伯正美, 制御器内部状態の連続的リセットに基づく入力拘束システムの追従制御, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp.20-21, 2013 年 11 月 30 日, 山口

〔その他〕

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/nwada/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 信敬 (WADA NOBUTAKA)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 50335709