

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06497

研究課題名(和文) 制御器状態の最適リセットに基づく拘束システム制御論の構築

研究課題名(英文) Constrained control based on optimal resets of the controller state

研究代表者

和田 信敬 (Wada, Nobutaka)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：50335709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：制御器の状態をサンプル周期毎にリセットし、その際に生じる状態の瞬時変化を新たな制御自由度として活用する新たな拘束システム制御論を構築することを目的として研究を実施した。その結果、状態リセットの導入により、外乱抑圧性、目標値追従性の向上を実現する制御アルゴリズムを構築することに成功した。提案法を、永久磁石同期モータのトルク制御、および、車両の障害物回避運転支援制御問題に適用し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、外乱抑圧性能やロバスト性の向上など、リセット制御に関する新たな可能性が拓かれた。また、本研究では、制御対象のクラスは線形システムあるいは線形時変系について検討を行ったが、ここで構築したリセット制御手法は、非線形システムやハイブリッドシステムに対しても拡張出来ると予想される。そのため、広いクラスの拘束システムに適用可能な、体系的リセット制御論の確立に寄与出来るものと予想され、その学術的意義は大きいと言える。また、提案法は、極めて短いサンプル周期での実機実装が可能であり、実用上の意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：I have developed novel control algorithms which utilize state resets to enhance tracking performance and/or disturbance attenuation performance under state/input constraints. The effectiveness of the methods have been evaluated by experiments of a torque control problem of a permanent magnet synchronous motor and a collision avoidance assistance control problem of a vehicle.

研究分野：制御工学

キーワード：モデル予測制御 状態リセット 外乱抑圧 最適サーボ

1. 研究開始当初の背景

モデル予測制御 (MPC) は、有限時間の最適制御問題を実時間で解きながら制御を実行する手法であり、拘束システムに対する有効な制御手法である。この手法における制御器は、オンライン最適化モジュールと線形時不変 (LTI) モジュールから構成され、LTI モジュールにはサーボ補償器やオブザーバ等が含まれる。MPC は一般にデジタル計算機上にソフトウェアとして記述される。そのため、LTI モジュールの状態はダイナミクスとは無関係に瞬時に書き換え可能である (これを状態リセットと呼ぶことにする)。状態リセットの導入による制御性能向上については、1950 年代の Clegg Integrator 以来、様々な試みが続けられている。近年では、ハイブリッドシステムに対するリアプノフ安定論に基づく解析法の発展を背景として、そのリセット制御系設計への適用が試みられている。しかしながら、この方法に基づくリセット則の設計問題を凸最適化問題に帰着するには、リアプノフ関数の構造を 2 次形式に限定する必要がある。そのため、達成できる制御性能は保守的なものとなる。これに対し、研究代表者は、Wada: Model predictive tracking control for constrained linear systems using integrator resets, IEEE transactions on automatic control, Vol.60, No. 11, 2015 で、拘束付き MPC に基づくリセット制御系の新たな構成法を示した。この方法では、サーボ補償器の状態は、制御入力列とともに、コスト関数が最小となるようにサンプル時刻毎に最適決定される。この方法による状態リセットを導入することにより、コスト関数の減少レートの著しい向上を実現でき、その結果、目標値追従性能を飛躍的に向上させることが可能となった。これにより、状態リセットは、コスト関数の減少レートの向上に非常に有効であることが明らかになった。しかしながら、これは外乱やモデル化誤差が存在しない理想的環境下における結果であり、これらに対してロバストなリセット制御系の設計問題は未解決の課題である。

2. 研究の目的

実用的なリセット制御系の設計法を構築するためには、外乱やモデル化誤差の影響を考慮することが不可欠である。その方法として、Wada (2015) の手法を一般化し、制御器の状態リセットを、制御対象のパラメータ変動や外乱の存在下における、コスト関数最小化のための制御自由度として積極的に用いることが考えられる。これにより、単に制御対象の変動や外乱に対してロバストであるだけでなく、MPC のロバスト制御性能の向上を実現出来るものと期待出来る。そこで、本研究では、ロバスト制御性能の向上のための自由度として、状態リセットを積極的に活用する新たな拘束システム制御論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

前述の研究目的を達成するため、以下の事項 (1)~(5) を明らかにする。

- (1) 線形時変係数系として記述される制御対象について、ミニ・マックス最適化問題を、入力・状態制約の下で、サンプル時刻毎に解く MPC アルゴリズムを構築する。ここで最適化の決定変数は、制御器状態と制御入力列である。これにより、最悪ケースの係数変動の下で、コスト関数を最小化する制御器状態と制御入力列を算出する。
- (2) 外乱がシステムに及ぼす影響を、状態リセットにより低減させるリセット MPC アルゴリズムを構築する。ここでは、最悪ケースの有界外乱の下で、コスト関数を最小にする制御器状態と制御入力列を算出する方法を構築する。
- (3) 現実の制御問題の多くにおいては、制御対象の出力を目標信号へ追従させることが求められる。本研究項目では、項目 (1), (2) の制御系構成法を、目標値追従制御問題へ拡張する。
- (4) リセット MPC における状態リセット動作は、制御器のダイナミクスに対するある補助入力の印加として等価表現可能である。この表現を用いることで、リセット動作を含まない標準的な MPC の形式に帰着でき、その結果、マルチパラメトリック二次計画問題を經由して陽的解が得られる。この手法を上述のロバストリセット MPC に適用し、ロバストリセット MPC に対する陽的解を算出する方法を構築する。
- (5) 実機による有効性の検証：上記で構築した制御手法を、各車輪の駆動トルクと操舵角を制御出来る 4 輪車両の運動制御問題へ適用する。ここでは、各車輪で発生出来る摩擦力、操舵角に関する限界を考慮した操縦支援制御システムを構築し、実機によりその有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究の主な成果を以下にまとめる。

- (1) 入力・状態制約の存在下で、閉ループ系の安定性を保証し、かつ、外乱から評価出力への L_2 ゲインをサンプル時刻毎に最小化するモデル予測制御アルゴリズムを構築することに成功した。提案制御系の構成を Fig. 1 に示す。提案アルゴリズムでは、制御器がダイナミクスを含んでいる場合には、その状態を最適な値にリセットすることで、 L_2 ゲインをより小さな値に抑えることが可能である。この成果については、Khonjun, Wada and Inoue: Online optimization of l_2

gain performance for constrained linear systems by model predictive control with state resets, IEEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, pp.1359-1363, 2019 に掲載されている。

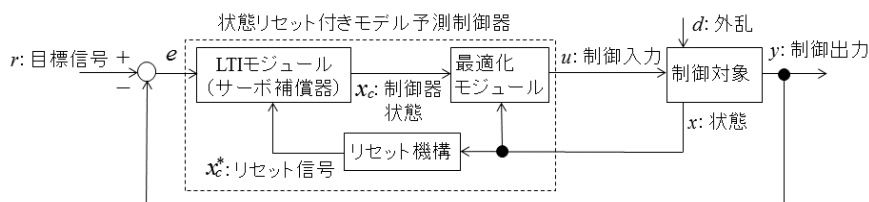


Fig.1 提案制御系の構造

(2) 線形パラメータ可変システムに対するサーボ型 MPC アルゴリズムを構築した。提案法では、制御対象のパラメータ変動および入力制約の下で、制御器内の積分器を最適にリセットすることにより、高い目標値追従性能を達成することが可能となっている。また、具体的な例として、永久磁石同期モータのトルク追従制御に適用し、その有効性を検証した。永久磁石同期モータの数式モデルは、ロータの回転角速度に依存する線形パラメータ可変システムとして記述できる。これに対し、提案するサーボ制御法を適用した。その結果、角速度変化および入力電圧制約の下で、従来型の分散 PID 制御器と比較して、極めて高速な応答を実現出来ることを確認した。なお、永久磁石同期モータのトルク制御を行う際には、一般にサンプル周期を 0.1ms 以下に設定することが必要となる。これを実現するため、制御器の構造をスカラ変数に関する可変ゲイン形式とすることでオンラインでの最適化変数の削減を行った。Fig. 2 に示す実験装置に対してサンプル周期 0.1ms で実装し、その有効性を確認した。これらに関する理論的成果については、Wada, Li, Miyake and Khonjun: Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control by Gain-Scheduled Feedback with State Resets, IEEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, Vol. 12, pp. 744-752, 2017 に、実験結果については、Khonjun, Miyake and Wada, Proceedings of SICE Annual Conference 2019 に掲載されている。



Fig. 2 永久磁石同期モータ実験装置

(3) サーボ型 MPC を自動車の障害物回避運転支援制御問題に適用し、ドライビングシミュレータ (Fig. 3) によりその有効性を検証した。提案法では、ドライバがハンドル操舵を介してコントローラに与える目標ヨーレートに対し、車両ヨーレートが追従するようにサーボ系が構成されている。その上で、ドライバの操舵に従った場合に障害物への衝突が避けられない場合には、最小限の操舵介入により障害物回避が実現されるように制御系が構成されている。車両の軌道予測、並びに、最小限の操舵修正量を算出する際に、操舵角およびタイヤ摩擦力の制限値を考慮している。提案法の有効性は、複数の被験者によるシミュレーション実験により検証した。これに関する成果は、Wada and Matsumoto: Driver steering assistance for collision avoidance and turning performance optimization by constrained MPC, Mechanical Engineering Journal, Vol. 8, No. 1, 2021 に掲載予定である。



Fig. 3 ドライビングシミュレータ

(4) 項目(3)の車両全体の運動制御を行うためには、各タイヤで発生する摩擦力を高精度に制御することが必要となる。そこで、車両の駆動力制御系を線形パラメータ可変システムとしてモデル化し、車両速度の変化、および、タイヤ摩擦力の飽和特性に対し、ロバストに目標駆動力を達成可能な制御系の設計法を構築した。この成果については、Wada and Matsui: Driving force control for a vehicle considering slip ratio limitation, IEEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, Vol. 19, pp. 297-302, 2019 に掲載されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nobutaka Wada and Yuji Matsui	4. 巻 14
2. 論文標題 Driving force control for a vehicle considering slip ratio limitation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 297-302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22809	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Surajet Khonjun, Nobutaka Wada and Kotaro Inoue	4. 巻 14
2. 論文標題 Online Optimization of I2 Gain Performance for Constrained Linear Systems by Model Predictive Control with State Reset	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1359-1363
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobutaka Wada	4. 巻 12
2. 論文標題 On the improvement of I2-performance by controller resets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 S189-S190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobutaka Wada, Yi Li, Daichi Miyake, Surajet Khonjun	4. 巻 12
2. 論文標題 Permanent magnet synchronous motor torque control by gain-scheduled feedback with state resets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 744-752
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22461	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobutaka Wada, Naoki Kawaoka, Masami Saeki	4. 巻 12
2. 論文標題 A gain-scheduled control algorithm for input constrained systems to track time-varying references using controller state resets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 87-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobutaka Wada, Katsuya Satoh, Masami Saeki	4. 巻 34
2. 論文標題 An LMI-based controller design method for a discrete-time linear system with time-varying state delay	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IMA Journal of Mathematical Control and Information	6. 最初と最後の頁 405-424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/imamci/dnv052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 高嶮大樹, 和田信敬
2. 発表標題 MPCによる車両旋回性能の最適化と障害物回避支援
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本隼也, 和田信敬
2. 発表標題 quasi-LPV NMPCによるロボットマニピュレータの追従制御
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuho Yamamura, Nobutaka Wada
2. 発表標題 Robust drift control of a vehicle with lateral tire force saturation
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Surajet Khonjun, Daichi Miyake, Nobutaka Wada
2. 発表標題 Torque control of a PMSM using a reference governor with integrator resets
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Surajet Khonjun and Nobutaka Wada
2. 発表標題 Online optimization of disturbance attenuation performance of input constrained systems by gain-scheduled control with state resets
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Satoh, Toshiro Tasaka and Nobutaka Wada
2. 発表標題 Bounded stability of stochastic mechanical port-Hamiltonian systems under both deterministic and stochastic disturbances
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川内真, 和田信敬
2. 発表標題 状態リセット制御の振動抑圧制御への応用
3. 学会等名 2018年度計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本拓也, 和田信敬
2. 発表標題 モデル予測制御による車両の障害物回避支援-ドライビングシミュレータによる実験的検証-
3. 学会等名 2018年度計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田信敬, 松本拓也, 佐伯正美
2. 発表標題 制約付きモデル予測制御による障害物回避支援制御
3. 学会等名 計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川直人, 和田信敬, 佐伯正美
2. 発表標題 MPCによるPilot-Induced Oscillation の抑制
3. 学会等名 計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森本達哉, 佐伯正美, 和田信敬
2. 発表標題 ヒートシーラーの温度制御系設計
3. 学会等名 計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobutaka Wada, Takuya Matsumoto
2. 発表標題 Driver assistance for collision avoidance by constrained MPC
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関