

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：20K04548
研究課題名（和文）実時間モデル化機能を有するモデル予測制御論の確立とその予測型耐故障制御への応用

研究課題名（英文）Establishment of model predictive control theory with real-time modelling capabilities and its application to predictive fault-tolerant control

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本申請課題では、制御実行時の観測情報を基に、制御対象の特性変動を高精度に推定・予測し、制御システムの安定性を保ちつつ、制御性能の最適性を保持し続けることを可能とするモデル予測制御アルゴリズムを構築することを目的とする。まず、線形パラメータ可変（LPV）システムとして記述されたシステムについて、パラメータ変動の下で閉ループ系の安定性を保証でき、かつ、比較的計算量の低いモデル予測制御アルゴリズムを構築した。つぎに、LPVシステムとして記述されたシステムについて、入出力データから状態と可変パラメータを推定する手法を構築した。構築した推定アルゴリズムは、凸二次最適化の反復計算に帰着されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究の成果を活用することにより、事後データを活用することで、モデル変動が生じた際にも、制御系の安定性を保持しつつ高い制御性能を維持することを可能とするシステム制御論を構築することが可能となる。この方法はモデル予測制御を基礎としていることから、入力や状態の制約を考慮した制御性能の最適化を図ることが可能である。また、提案する推定手法単体でも、制御対象の入出力データから状態や物理パラメータを高精度に推定することが可能であり、実用上有用である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project is to construct a model predictive control algorithm that can accurately estimate and predict the time-variation of a controlled object based on the measurement in real time, and maintain stability and optimality of the control system. First, for a system described as a linear parameter variable (LPV) system, a model predictive control algorithm has been constructed that can guarantee stability of the closed-loop system under parameter variation and is relatively computationally inexpensive. Next, for the system described as an LPV system, we have developed a method for estimating the state and time-varying parameters from the input-output data. The constructed estimation algorithm is reduced to the iterative computation of convex quadratic program.

研究分野：制御工学

キーワード：モデル予測制御 耐故障制御 状態推定 パラメータ推定

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

モデル予測制御は、有限時間区間の最適制御問題をサンプル時刻毎に解くことにより制御信号を算出する制御手法である。この制御手法では、入力・状態制約、外部信号の予測情報、制御対象の非線形性などを考慮した制御を実行できる。これらの特徴のため、従来の線形制御では達成困難な性能や機能を有する制御システムを構築できる。1990年代以降、モデル予測制御システムの安定性やロバスト（頑健）性について盛んに研究が行われ、多くの知見が得られている。しかしながら、モデル予測制御では、制御対象の数式モデルを用いて状態軌道の予測が行われるので、モデル化誤差や制御対象の経時変化が存在する場合、制御性能の劣化は避けられない。そのため、事前に与えられたモデル集合や外乱集合に対してロバストであるのみならず、制御対象の経年変化や稼働中に加わる外部信号に関する情報を積極的に活用し、制御性能が常に最適に保たれるように制御器の可調整パラメータをオンラインで調整する制御手法を構築することが強く求められている。近年、これに関連する取り組みが始まっており、具体的には、部分空間同定法や機械学習などにより制御対象をオンラインで同定し、制御器内の予測モデルを更新するといったアプローチが採られている。これにより、制御対象の特性変化に適応することが可能になると期待できる。しかしながら、このような制御アルゴリズムが用いられたシステムは、モデル予測制御器が実時間最適化演算を含むことに加え、予測モデルが時変であることに起因する解析の見通しの悪さのため、安定性や性能の解析、並びに、最適設計に関する系統的な手法は、現在のところ確立されていない。

2. 研究の目的

前述の背景を踏まえ、本研究課題では、制御実行時の観測情報を基に、制御対象の特性変動を高精度に推定・予測し、制御システムの安定性を保ちつつ、制御性能の最適性を保持し続けることを可能とするモデル制御アルゴリズムを構築することを目的とした。具体的には、以下の課題に取り組んだ。

- ①可調整パラメータを含む予測モデルの構造、並びに、可調整パラメータの実時間決定法
- ②制御システムの安定性と制御性能の最適性を維持する制御器の構造とその設計条件
- ③②を実時間実装するためのオンライン最適化手法
- ④②提案推定・制御手法の実機検証

3. 研究の方法

前述の研究目的を達成するために取り組んだ研究項目について述べる。

(1-a) 制御対象のモデル化手法の構築：本研究では、制御器の内部で用いられる予測モデルを、オフラインで構築しておくノミナルモデルと、制御対象の入出力データから得られる入出力データモデルとの結合形式で表現する。ノミナルモデルとしては第一原理モデルを用いる。入出力データモデルとしては高精度なデータフィッティングが可能な多層ニューラルネットワーク(NN)を用いることにする。結合形式として線形分数変換を用いた統一的なモデル構造を導出する。さらに、入出力データから逐次的に荷重係数を決定する手法を構築する。このようにして構築される予測モデルは、非線型かつ時変な動的モデルとなる。

(1-b) 制御器の構造の決定：(1-a)で導出した非線型時変予測モデルを、準線形パラメータ可変(quasi-LPV)システムとして記述し、これに対するモデル予測制御器を構成する。これにより、各時刻で解く有限時間最適制御問題を、時変係数を含む凸二次計画問題に帰着する。

(2-a) 安定条件の導出：線形モデル予測制御で用いられる凸二次計画問題は、ある入出力についてセクター条件を満たす。本申請課題では、この結果を、quasi-LPV形式のモデル予測制御に対して拡張する。具体的には、quasi-LPVモデルに対するモデル予測制御で表れる最適化問題を、セクター条件を満たす時変非線形要素として記述する。この結果に基づき、制御システム全体の安定条件を導出する。

(2-b) 制御器設計法の構築：項目(2-a)で導出した安定条件を満たす制御器の設計条件を導出する。具体的には、LPVモデルに対するロバスト正不変集合を終端集合として用いる。このとき、パラメータ依存リアプノフ関数を導入することで保守性の低い設計条件を導く。また、各時刻で更新され精度が向上した予測モデルを用い、不確かさの範囲を正確に推定することで保守性の低減を図る。

(3-a) 故障予測機能付き制御系の構築：項目(2-b)で構築した制御手法を基に、制御対象の故障を事前に予測し、制御方を事前に修正する制御手法を構築する。具体的には、機械学習により制御対象の将来の経時変化を予測し、この予測情報に基づきquasi-LPVモデルの可変パラメータの将来の値を予測する。そして、この予測モデルに対し、項目(2-b)の手法を用いて制御系を構成する。

(3-b) 車両モデルによる有効性の検証：近年の自動車は、高い安全性や運動性能、省エネルギー化を実現することを目的として、電動モータによる車輪駆動やアクティブ前輪操舵など、電動化が急速に進んでいる。しかしながら、その結果として、制御系が複雑化している。耐故障性を如何に確保するかが重要な課題となっている。ここでは、項目(3-a)の制御手法を適用し、電動

車両に対する耐故障制御手法を構築する。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果の概要を以下に示す。

(1) LPV システムに対するロバストモデル予測制御アルゴリズムの設計

本研究項目では、以下の LPV システムとして記述される制御対象について考える。

$$x(k+1) = A(\theta(k))x(k) + B(\theta(k))u(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

$\theta \in \Theta$ は時変パラメータでありその上下限値は既知とする。また、 $A(\theta) = \sum_{i=1}^l \alpha_i A_i, B(\theta) = \sum_{i=1}^l \alpha_i B_i$ とする。このようなシステムは、自動車や航空機、産業用ロボットなど、実システムにおいて幅広く現れる。例えば、自動車の場合、その動的な振る舞いは車両の速度に応じて大きく変化する。そのため、 θ としては車両速度を選ぶことが考えられる。ここでは、このシステムについて、制約 $\Psi_u u(k) \leq \omega_u, \Psi_x x(k) \leq \omega_x$ の下で、目標信号 r に出力 y を追従させるモデル予測制御アルゴリズムを設計する問題について考察した。その結果、N-Step Stabilizable Set (図1) と Maximal Admissible Set に基づくモデル予測制御アルゴリズムを構築した。提案法は、凸二次計画問題に帰着されており、効率的に解を得ることが可能である。これにより、パラメータ変動の下で、入力・状態制約を満たしつつ、制御出力の目標信号への追従を達成することが可能となった。

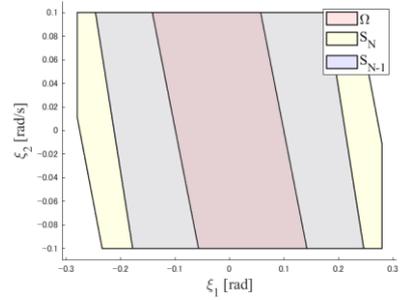


図1 N-Step Stabilizable Set

(2) LPV システムに対するモデル予測制御の NN を用いた実装と安定性解析

LPV システムに対する MPC を実装する際には、多くの制約条件を含む最適化問題をサンプル時刻毎に解くことが必要となる。この問題は凸二次計画問題ではあり効率的に解くことは出来るが、近年のパーソナルコンピュータを用いた場合でも数ミリ秒程度の計算時間を必要とする。ここでは、多層ニューラルネットワークにより項目(1)の MPC を近似し(図2)、得られた制御器(NN-LPV-MPC)を用いたシステムの安定性解析条件を導出した。まず、MPC の入出力データを用いて MPC の入出力関係を近似的に表す NN-LPV-MPC を構築した。その後、NN-LPV-MPC と制御対象から構成されるフィードバックシステムの安定条件を導出した。安定条件は、定数スケール行列付きのセクター条件を用いて導出されており、線形行列不等式条件として記述されている。いくつかの数値例で、安定性の解析を行えることを確認した。

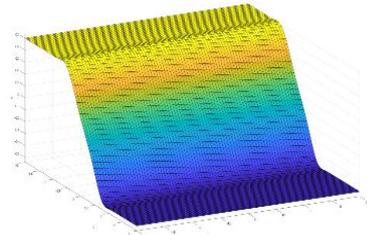


図2 NN-LPV-MPC

(3) LPV システムに対する状態・パラメータ推定法の構築

本研究項目では、LPV システム(1),(2)として記述されたシステムについて、有限時間区間の入力信号と出力信号から、状態と可変パラメータの値を推定する方法について考察した。本推定問題は、状態あるいは可変パラメータを固定すると、もう一方に関する凸最適化問題となる。そこで、この性質を利用した簡易な求解アルゴリズムを構築した。さらに、4輪車両について、ヨー角速度と横加速度、および、操舵角の観測値から、車両滑り角と前後輪のコナリングステイフネスを推定する問題に対し、提案法を適用し、数値例および小型車両実験装置によりその有効性を検証した。図3に、自動車の前後輪コナリングステイフネスおよび車両横滑り角の推定結果を示す。推定値(破線)は速やかに真値(実線)に収束している。また、提案法は、拡張カルマンフィルタ(EKF)やUKFと比較して、高精度に車両の状態および物理パラメータを推定できることを確認している。以上の成果については、電気学会C部門大会2022にて発表済みである。

(1)と(3)の手法を併用することで、本申請課題の目的である、パラメータ変動の下で、高い性能を維持する制御システムを構築できる。

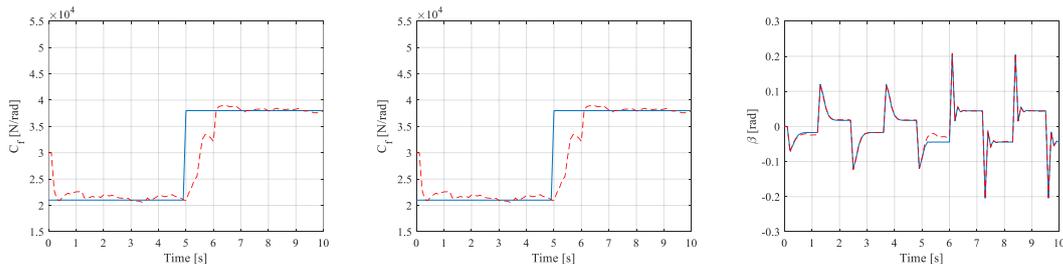


図3 前輪後輪コナリングステイフネス C_f, C_r および車両横滑り角 β の推定結果

(4) LPV システムに対する故障推定法の構築

本項目では、LPV システムとして記述されたシステムについて、入出力データから、センサ故障の推定を行う方法について考察した。特に、システムの係数行列が、可変パラメータに多項式状

に依存する場合について考察した。このようなシステムは現実の制御問題でしばしば現れる。本研究ではディスクリプタ形式と呼ばれるシステム表現を用いることで、保守性の少ないセンサ故障推定オブザーバの設計条件を導いた。提案法を用いることで、幅広いパラメータ変動の下で、外乱抑圧を達成しつつ、高精度にセンサ故障を検出するオブザーバを設計することが可能となった。この成果の一部は日本機械学会中国四国支部学術講演会 2024 で発表済みである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nobutaka WADA	4. 巻 16
2. 論文標題 Regional Performance Analysis of Control Systems with Quadratic Programming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1642-1646
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23476	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 藤井聖也, 宮腰穂, 脇谷伸, 和田信敬, 足立智彦, 矢野康英, 山本透	4. 巻 58
2. 論文標題 スマートモデルベース開発 (S-MBD) アプローチに基づく制御系の一設計と その自動車のヨーレート制御への応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 186-193
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.58.186	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 and Takuya MATSUMOTO	4. 巻 8
2. 論文標題 Driver steering assistance for collision avoidance and turning performance optimization by constrained MPC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.20-00361	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 堀内潤, 宮腰穂, 和田信敬, 河野佑, 矢野康英, 足立智彦
2. 発表標題 乗員の快適性を考慮した操舵トルク支援制御
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 2023年

1. 発表者名 藤原直人, 和田信敬, 澤田康輔, 井上浩孝
2. 発表標題 ゲインスケジュールド車両ヨーレート制御器のデータ駆動設計
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤裕介, 河野佑, 和田信敬
2. 発表標題 ルーリエ系へのp-dominance 化出力フィードバック制御
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 2023年

1. 発表者名 榊颯馬, 和田信敬
2. 発表標題 多項式パラメータ依存システムに対するゲインスケジュールドオブザーバの設計
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第62期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 南條駿介, 和田信敬, 河野佑, 宮腰稔, 矢野康英, 足立智彦
2. 発表標題 不確かな線形時不変システムに対する制約付きロバストMPC
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 2022年

1. 発表者名 鎌野憲秀, 和田信敬, 河野佑, 宮腰穂, 矢野康英, 足立智彦
2. 発表標題 LPVシステムに対する移動ホライズン推定法
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮腰穂, 藤井聖也, 足立智彦, 矢野康英, 脇谷伸, 和田信敬, 山本透
2. 発表標題 スマートモデルベース開発 (S-MBD) アプローチに基づく 制御系の一設計とその車両運動制御への応用
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉崎佑志, 和田信敬
2. 発表標題 制約を有する可変速システムに対する最適繰り返し制御
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shunsuke Nanjo, Nobutaka Wada
2. 発表標題 Active fault-tolerant lane keeping control of an automated vehicle
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiya Fujii, Minoru Miyakoshi, Shin Wakitani, Nobutaka Wada, Tomohiko Adachi, Yasuhide Yano, Toru Yamamoto
2. 発表標題 Vehicle Yaw Rate Control System Design Based on Smart MBD
3. 学会等名 IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宗藤真裕, 川内真, 和田信敬
2. 発表標題 モデル予測制御による外乱抑圧
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 2021年

1. 発表者名 伊藤魁人, 和田信敬
2. 発表標題 ヘキサコプタの耐故障制御
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 2021年

1. 発表者名 日置智則, 和田信敬
2. 発表標題 慣性計測装置とスキャンマッチングの融合による自己位置推定 - 小型車両実験装置による検証 -
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 2021年

1. 発表者名 杉田佑介, 和田信敬
2. 発表標題 コントロールモーメントジャイロを搭載した宇宙機の姿勢制御 - quasi-LPV NMPCによる方法 -
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 2020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
---------	---------