

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420429

研究課題名(和文) 数値最適化に基づくテーブルルックアップ型切替制御系設計に関する研究

研究課題名(英文) Table Look-Up Switching Control Design Based on Numerical Optimization

研究代表者

市原 裕之 (Ichihara, Hiroyuki)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：70312072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では数値最適化に基づくテーブルルックアップ型制御系設計を目指して、現実の多くのシステムに現れる飽和、量子化、不感帯などの非線形要素の取り扱いについて研究を進めた。飽和入力に関しては、フォーメーション制御において入力を切り換える制御則を提案した。量子化入力に関しては、量子化誤差を多項式非線形システムに対する有界外乱と考え、二乗和条件に帰着することを提案した。また、不感帯については、量子化入力を応用することを提案した。

研究成果の概要(英文)：This research aims to construct a table-lookup control design method for systems including nonlinear elements such as saturation, quantization and dead-zone. We first investigate formation control of mechanical systems whose actuators have saturation driving. The proposed controller has a switching structure. Secondly we consider invariant set analysis of nonlinear polynomial systems with input quantization. Since the quantization error we are considering is bounded, invariant sets with bounded disturbances are introduced to investigate the system. Finally, we apply quantization input for dead-zone nonlinearity in mechanical systems. We obtained a perspective to treat dead-zone nonlinearity in model predictive control.

研究分野：制御工学

キーワード：数値最適化 量子化 飽和 不感帯

1. 研究開始当初の背景

制御系設計において非線形特性を系統的に取り扱う試みは、従来から行われてきた。飽和要素を含む制御系に対する系統的な制御系設計法では、飽和要素を線形モデル+不確かさとして表現し、LMI 最適化問題へと帰着している。しかしながら、飽和以外の非線形要素に関して、この試みは必ずしも成功していない。その理由は、摩擦やヒステリシス等の非線形要素を線形モデル+不確かさで表現すると達成可能な制御性能が保守的になり過ぎること、制御器のクラスを切換えない形に限っていた。

2. 研究の目的

本研究では、近年研究が進展している数値最適化に基づく非線形制御系設計法をさらに進め、これらの非線形特性を数値最適化のもとで統一的に取り扱うと共に、実装が比較的容易なテーブルルックアップ切替型制御器の設計法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

非線形要素をモデル化し、それに対応した最適化手法を適用することで問題を解決していく。まず、切換を含まない「非線形要素のモデル化」に基づいて「非線形要素を含む制御系の吸収領域解析および制御系の設計」を行い、モデル化の妥当性を検証していく。また、このモデルの有効性を「テーブルルックアップ切換型線形制御系の設計」で検証する。同様に、切換を含む「非線形要素のモデル化」に基づいて「制御器に切換を含む制御系の吸収領域解析および制御系の設計」を行い、切換条件を実用的なテーブルルックアップ型制御器に近づけることで目的を達成する。その結果、系統的な設計法の確立を目指す。

非線形システムにおける可到達集合の上界の計算方法を入力状態安定性の観点から考慮し、多項式最適化の枠組に帰着できることを示す。研究時には、理論的成果はもちろんのこと、ロボットや搬送システムの機械システムやネットワークルータなどの情報システムへの産業応用を踏まえたものになっている。

4. 研究成果

(1)アクチュエータの実入力に飽和を有する移動ロボットのフォーメーション制御について考えた。移動ロボットは非ホロノミック特性を有する独立二輪駆動である。実入力の飽和を有する場合、一般的な合意プロトコルのもとで移動ロボットに設定した固定点は必ずしも合意するとは限らない。飽和を考慮しない場合の合意プロトコルを、時変ゲインが含まれる形に設計しなおし、実入力が飽和しないように変化させることで、位置と姿勢角の合意問題を解決した。

(2)多項式の共正値性を検証するために二乗和を用いたアプローチを提案した。得られた結果は二次形式の共正値性を二乗和緩和で検証する手法の自然な拡張になっている。得られた手法を非負の動特性を有する多項式システムに適用した。ロトカ・ポルテラ競争システムの平衡点の安定性解析に多項式リアプノフ関数と拡張したシステムに対する線形リアプノフ関数による解析を行った。

(3)離散時間多項式非線形 SISO システムに対する不変集合を用いて、動的量子化器を有するフィードバック制御系の解析を行った。量子化誤差は有界であるため、動的量子化器をもつシステムの解析は不変集合の解析に帰着される。システムが安定となるための十分条件を数値最適化問題に帰着することができた。

(4)移動ロボットはしばしばその駆動源に不感帯があり制御性能の低下につながる。本研究では、このような移動ロボットに対してモデル予測制御を次のように考えた。まず、移動ロボットの移動速度を一定として、区分線形な離散時間モデルで表した。次に、入力信号を量子化した。最後に、不感帯の幅を超えるような量子化入力を設定しモデル予測制御問題を解いた。以上で、不感帯のある移動ロボットに対するモデル予測制御の見通しが得られた。

(5)多項式非線形システムに対するモデル予測制御問題は、しばしば線形行列不等式条件や二乗和条件を含んでいる。そのようなモデル予測制御問題は大規模な半正定値計画問題をオンラインで解く必要がある。本研究では、優対角行列やスケールド優対角行列を用いて半正定値行列を近似することで、線形計画や二次錐計画を解く問題に帰着する。実際には、新たに優対角二乗和行列、スケールド優対角二乗和行列を導入し、モデル予測制御問題の定式化を行った。

(6)目標値誤差モデルに基づいた参照軌道の生成をオンラインで行い、同時に滑りを考慮した軌道追従誤差モデルに基づいた tube-based MPC を別に行うことで移動ロボットが動的障害物を回避する手法を提案した。軌道追従誤差モデルには時変項が現れるため、この時変項を本研究では、有界な外乱として取り扱い、ロバスト正不変集合として可到達集合を用いて厳しい制約条件を導入する。このようにすることで、軌道追従誤差モデルと対応するノミナルモデルとのミスマッチを保証する設計を簡素にすることができる。この軌道追従誤差モデルに対する tube-based MPC を実行することで、滑りを考慮した移動ロボットの動的障害物回避が期待できるようになった。

(7)連続時間入力離散値系に対してモデル参照型の追従型制御系の設計方法を提案した．不変集合解析を利用することにより，状態フィードバック型の設計問題をLMI最適化問題に帰着している．本研究の要点は，モデル参照型における量子化誤差を参照モデルと静的量子化器から構成される「動的量子化誤差システム」で表現したことにある．また，連続時間システムにおいて離散値入力を適用したときに発生するフリポフ解特性を，サンプル値表現を利用することで回避している．サンプル値表現を利用した離散値入力系の安定判別条件もLMI最適化問題に着目している．

(8)搬送システムの最適化問題の解法を状態量子化の観点から与えた．特に数値最適化時における計算高速化に着目している．搬送システムのペトリネットによるモデリングの最適性を分枝限定法の初期値設定の観点から検討した．結果として，最適化計算の向上が実現された．また，決定性有限オートマトンを利用することで，状態圧縮を実現し，さらなる最適化計算の向上を達成した．この結果はペトリネットと決定性有限オートマトンにおける相違点に着目したものとなっている．

(9)入出力に量子化要素のあるシステムに対して，モデル追従型制御系の設計条件を提案した．出力フィードバック型の設計問題をLMI最適化問題に帰着している．本研究の要点は，制御器構造を状態フィードバックとオブザーバによるものに明示的に考慮している点にある．これにより，量子化誤差を参照モデルと静的量子化器から構成される「動的量子化誤差システム」で表現することができ，解析条件と設計条件を簡潔に表現することが出来ている．また，提案した設計条件は既存の入力に量子化要素のあるシステムの設計条件を包含するものとなっている．

(10)既存の離散値入力系のシステム表現が微分型や差分型に限定されているのに対し，別のシステム表現を模索するために，積分型や和分型のシステム解析に着手した．LMI最適化レベルでの解析・設計条件の検討は既存研究でされているので，本研究ではほぼ扱われていない適応制御系に着目している．これにより，和分型・差分型特有の問題を洗い出す．適応制御に適用したときの結果として，パラメータ推定器に適用するモデル表現が差分型のものとは比べて自由度があることがわかった．

(11)ネットワーク輻輳の解析問題を量子化の観点から検討した．ネットワークルータを交通流のモデル(ASEP)で近似的に表し，輻輳状態をルータへのパケット入力・出力確率

の観点から検討できる可能性を示した．この結果は渋滞学と制御工学の融合の可能性も示すものである．また，輻輳状態からの離脱を実現するために，パケットの入力確率をモデル規範型のPIフィードバックによって制御する一手法を提案した．

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3件)

K. Sawada and S. Shin: Model following control for continuous-time discrete-valued input systems, 査読有, Artificial Life and Robotics, vol.19, 2014, pp.277-285

DOI 10.1007/s10015-014-0169-6

R. Nakamura, K. Sawada, S. Shin, K. Kumagai and H. Yoneda: Model reformulation for conflict free routing problems using Petri Net and Deterministic Finite Automaton, 査読有, Artificial Life and Robotics, vol.20, 2015, pp.262-269

DOI 10.1007/s10015-015-0215-z

市原裕之，中野晃平：駆動源に飽和を有する移動ロボットのフォーメーション制御，査読有，システム制御情報学会論文誌(掲載決定)

[学会発表](計12件)

澤田賢治，新誠一：入出力量子化システムに対するモデル追従型制御，第57回自動制御連合講演会 2014

澤田賢治，新誠一：和分型状態方程式に基づく適応オブザーバの構成，第57回自動制御連合講演会 2014

市原裕之：共正値性に基づく二乗和緩和と制御問題への応用，第58回自動制御連合講演会 2015

H. Ichihara and A. Kiyotani: Virtual Reference Feedback Tuning for MIMO Plants by Subspace Identification, European Control Conference 2015

H. Ichihara and K. Sawada: Invariant Set Analysis for Discrete-Time Polynomial Nonlinear Systems with Dynamic Quantizers, Asian Control Conference 2015

太田雄貴，市原裕之：不感帯を有する移動ロボットのモデル予測制御，第3回制御部門マルチシンポジウム 2016

深澤紀大，市原裕之：一般化優対角二乗和を用いた非線形システムのモデル予測制御，第3回制御部門マルチシンポジウム 2016

藤司純一，市原裕之：非負結合行列の切替えによるクアッドロータのフォーメーション制御，第60回システム制御情報学

会研究発表講演会 2016

中野晃平, 市原裕之: 駆動源に飽和を有する移動ロボットの合意制御, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会 2016

J. Toji and H. Ichihara: Formation Control of Quadrotors Based on Interconnected Positive Systems, European Control Conference 2016

J. Toji and H. Ichihara: Formation Control of Quadrotors with Extended Feedback Linearization Based on Consensus Problem, IEEE TENCON 2016

藤田雅貴, 市原裕之: Tube-based モデル予測制御による移動ロボットの障害物回避, 第 59 回自動制御連合講演会

S. Tanabe, T. Sakaguchi and H. Ichihara: Development of Communication System in Indoor Environments for Multi-Robots and Formation Control, SICE Annual Conference 2016

H. Suzuki, K. Miyata and H. Ichihara: Development of Mobile Robots in Indoor Environment for Model Predictive Control, SICE Annual Conference 2016

J. Toji and H. Ichihara: Formation Switching of Quadrotors Based on Interconnected Positive Systems, SICE Annual Conference 2016

渡井翔太, 澤田賢治, 市原裕之: 自己駆動粒子モデルによる輻輳モニタリングルータのモデル化と制御, 第 4 回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム 2017

山本将史, 市原裕之: 状態および入力に関する誤差評価に基づく準最適事象駆動制御, 第 4 回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム 2017

田邊翔也, 市原裕之, 蛭原義雄: 離散時間結合非負システムの定常特性解析と設計, 第 4 回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム 2017

鈴木遥, 市原裕之: 動的障害物を考慮した複数ロボットの分散モデル予測制御, 第 4 回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム 2017

〔図書〕(計 1 件)

川田昌克, 東俊一, 市原裕之, 浦久保孝光, 大塚敏之, 甲斐健也, 國松禎明, 澤田賢治, 永原正章, 南裕樹, 森北出版株式会社, 倒立振子で学ぶ制御工学, 2017, 240

〔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.messe.meiji.ac.jp/~cel/>

<http://www.sawada.iperc.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市原 裕之 (ICHIHARA, Hiroyuki)

明治大学・理工学部・准教授

研究者番号: 70312072

(2) 研究分担者

澤田 賢治 (SAWADA, Kenji)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・

i-パワードエネルギー・システム研究セン

ター・准教授

研究者番号: 80550946