

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：32621

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630178

研究課題名(和文)連続域動的システムの論理化制御手法に関する研究

研究課題名(英文)Logical Control Approach for Continuous Dynamical systems

研究代表者

申 鉄龍 (SHEN, Tielong)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：70245794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、連続時間域における動的システムを離散時間論理遷移システムとしてモデル化する手法を提案し、論理状態の関数として与えられる目標関数に対して、最適化制御則の設計手法を構築し、遷移行列に確率特性を有する場合の統計的最適制御手法を構築した。さらに、提案したモデリングと最適制御手法の実システムへの応用検証例として、ガソリンエンジンの残留ガス割合制御問題とハイブリット自動車の燃料消費最小化のためのリアルタイムパワートレイン制御問題に適用し、それぞれ実験ベンチにおける実験検証とシミュレーション検証によってその有効性と産業技術への発展の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：A logical control approach for continuous domain dynamical systems is developed in this research. First, a method to model a dynamical system in continuous domain as logical transient system is proposed that presents a mathematical representation of continuous system with logical variables and transient probability matrix. Then, optimal control problem with respect to logical variable cost function is solved by algebraic iterative algorithm. The solution is also extended to the systems involving stochastic behavior. Moreover, the proposed logical control approach is applied to residual gas fraction control of combustion engine and hybrid electric vehicle as benchmark practical control examples. Experimental validation conducted on full-scaled engine testbench is demonstrated.

研究分野：制御理論及び応用

キーワード：制御理論 エンジン制御 論理システム

1. 研究開始当初の背景

電子情報処理技術やパワーエレクトロニクス等リアルタイム計装技術の飛躍的な発展に伴って、自動車や家電のような大量生産製品にもアドバンスな制御アルゴリズムが搭載されるようになってきているが、このような大量に生産される製品にとって、個々の対象に対する最適性よりも数十万単位のそれぞれの単体のばらつきや経年変化及び環境変化に対するロバスト性が求められる。しかし、現代制御理論によって提供される制御系設計手法は、制御対象の高精度のモデルに依存するところが大きく、制御アルゴリズムそのものも複雑になりがちである。その結果、産業現場において、制御器の開発にかかる工数が指数的に増加し、個々の制御器適合コストも上がってしまい、先進制御理論の実用化を妨げる結果になってしまう。

論理変数を用いるシステム状態の記述手法は観測ノイズや外乱に対するロバスト性が強く、論理システム論の枠組による制御ロジックの導出がシンプルで、その実現が簡単になるという工学的にありがたいメリットがある。例えば、制御対象の変数を連続的に評価するのではなく、「優」、「良」、「可」、「不可」のような有限個のカテゴリに分けて評価する場合、それぞれのカテゴリを変数の論理値として表現し、その状態の遷移を動的論理遷移システムとしてとらえることが出来る。一方、近年動的論理システムの制御に関する研究が注目され、論理システム制御に関する研究論文が IFAC の Journal Best Papers Award を受賞されるなど、制御理論研究の分野においても論理システムの関する関心が高まっている。ただし、実際のシステムにおいて、連続域において変化するシステムを論理システムとして扱い、連続系に対して論理制御を適用する設計理論の研究はまだ報告されていなかった。本研究は、このような背景のもと、連続域における動的システムを論理システムとして扱うための基礎理論研究とその産業応用の可能性を模索するための研究として提案されたものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、連続域における動的システムを離散時間動的論理システムとしてモデル化し、そのモデルに基づいて連続域動的システムの論理化制御を行う新しい制御手法を確立することである。具体的には、まず連続域変数のダイナミクスを論理値域において挙動する離散時間論理遷移システムとして表現するモデリング手法を構築し、その論理システムの最適制御問題の定式化及び解法の確立する。さらに、状態遷移の確率特性に着目した動的論理システムの統計的最適化問題に挑戦する。最後に、理論研究成果を自動車エンジンにおける燃焼バラツキ抑制制御問題とプラグインハイブリッドパワートレインにおけるエネルギーマネジメ

ント問題へ適用し、実験室レベルのテストベンチにて論理制御器を実装して検証実験を行うことによって、信頼性の高い制御理論の産業基盤技術への貢献を目指す。

3. 研究の方法

研究目的達成のために、本研究は基礎理論研究と応用技術検証の二つのフェーズにおいて実施された。

(1) 基礎理論研究

まず、連続域における状態方程式に基づいて、離散化する際の状態遷移の量化処理に確率評価を導入することによって論理変数化するモデリング手法を構築した。状態遷移確率の確定には連続域における逆写像の測度論的アプローチをとることにした。

つぎに、論理値域における離散時間確率遷移モデルに基づく最適化制御問題を解く。論理状態変数が有限次元であることに着目し、最適解の導出アルゴリズムを代数的逐次算出形式として導出された。実際、ディスカウント付き目標関数にとって、最適制御則の導出は代数的操作によって得られることが示された。これらの結果をもとに、一般化手法として連続時間システムの論理制御設計手法が確立された。

(2) 応用技術研究

基礎理論研究において得られたモデリングと論理制御系設計手法を自動車動力システムに適用し、その有効性を検証した。

ガソリンエンジンのメカニズムは四行程によって構成されるサイクルの繰り返しであるが、そのサイクル間の遷移を離散時間モデルによって記述できる。ただし、残留ガスのようなエンジンの燃焼品質に大きく影響する変数は連続域において変化するものである。バルブタイミングを制御入力とし、残留ガスの割合を論理変数化することによって、動的論理システムとして表現し、ばらつき抑制制御器を構築してエンジン制御ベンチにおいて実験検証を行った。

一方、ハイブリッド自動車のエネルギーマネジメント問題を論理システムの枠組で挑戦した。パラレル型ハイブリッド動力システムにおいて、ギア比の選択とモータへの動力分配率はエネルギー消費に大きく影響する。しかもギア比自体は離散的な値域において変化するので、論理変数化が容易である。ギア比と動力分配率を制御入力とし、バッテリーの状態を論理化することによって燃料消費最適化のための制御則を開発し、シミュレーション検証を行った。

4. 研究成果

本研究では、連続域における動的システムを離散時間論理遷移システムとしてモデル化する手法を提案し、与えられた目標関数に関して最適化制御則を導出する代数的アルゴリズムを構築した。さらに構築した制御系設計理論手法を自動車エンジンの制御問題

とハイブリット自動車のエネルギーマネジメント問題にそれぞれ適用し、基盤産業技術への貢献への可能性を示した。

具体的には、まず多値論理変数を状態変数とする動的システムモデリング手法として、サンプルタイミング間の状態遷移確率行列を基本とするモデルを提案し、連続時間域における変数のサンプリング間の状態遷移確率を連続時間微分方程式に基づいて算出アルゴリズムを提案した。このモデルによって論理システム論の枠組で論理制御入力の設計が可能になり、有限区間最適制御則の導出は代数的逐次操作によって可能であることを明らかにした。この結果は、論理システムとして状態間遷移に確率性を持つシステムの統計的最適化のための制御入力は行列の乗算のみによって求められることを意味し、実際の工学的問題への適用の際、アルゴリズムの実現が容易であることが示された。

実際、この研究で得られた設計手法をガソリンエンジンのサイクル間残留ガス割合の遷移特性のモデル化に適用し、そのばらつきを抑制するための最適なバルブタイミング決定問題に適用し、フルスケールのエンジン制御実験環境において検証を行った。同様にハイブリット自動車のギア比と動力分配決定問題においても提案した論理システム制御手法を適用し、総合燃費最小化のためのリアルタイム論理変数決定問題を解いて、GT-Power の環境においてシミュレーション検証を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- [1] Yuhu Wu, Madan Kumar, and Tielong Shen, A stochastic logical system approach to model and optimal control of cyclic variation of residual gas fraction in combustion engine, Applied Thermal Engineering, Vol. 93, pp 251–259, 2016(査読有).
- [2] Yuhu Wu, and Tielong Shen, Reach control problem for linear differential inclusion systems on simplices, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 61, Issue 5, pp. 1403-1408, 2016 (査読有)
- [3] Yuhu Wu, and Tielong Shen, An algebraic expression of finite horizon optimal control algorithm for stochastic logical dynamical systems, Systems and control letters, Vol. 82,

pp. 108-114, 2015 (査読有)

- [4] Yuhu Wu, Tielong Shen, A Matrix Expression of Infinite Horizon Optimal Control Problem for Stochastic Logical Dynamical Systems, Proceedings of 19th IFAC World Congress, Cape Town(South Africa), Aug. 24-29, pp. 6965-6970, 2014 (査読有).
- [5] Yuhu Wu and Tielong Shen, A logical dynamical systems approach to modeling and control of residual gas fraction in IC engines, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Tokyo(Japan), Sep.4-7, pp.495-500, 2013(査読有)

〔学会発表〕(計 4 件)

- [1] Yuhu Wu, Kumar Madan, and Tielong Shen, Stochastic logical transient model-based RGF regulation of gasoline engines, Proceedings of the IEEE Information and Automation , Lijiang(China), Aug. 8-10, pp.1727-1732, 2015 (査読有).
- [2] Yuhu Wu, Tielong Shen, Choongsik Bae, Control design for residual gas fraction in engine based on stochastic logical dynamics, Proceedings of the 54th SICE Annual Conference, Hangzhou(China), July 28-30, pp. 1271-1275, 2015 (査読有)
- [3] Yuhu Wu and Tielong Shen, A matrix expression of finite horizon optimal control algorithm for stochastic logical dynamical systems, the 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Okinawa University(Okinawa), Nov. 1-2, 2014(査読無)
- [4] Yuhu Wu and Tielong Shen, Set-valued map based description and stability of multi-valued logical evolution systems, 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟大学(新潟), Nov. 16-17, 2013 (査読無)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者：

申 鉄龍 (SHEN Tielong)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号：70245794