OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Learning-Based Safe and Formal Control
Author(s)	橋本, 航
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105452
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　橋本 航　）	
論文題名	Learning-Based Safe and Formal Control（学習ベースの安全かつ形式手法に基づく制御）

論文内容の要旨

Achieving reliable, safe, and computationally efficient control of nonlinear and complex systems remains a central challenge in modern control engineering. Classical model-based approaches provide strong theoretical guarantees of stability and robustness, but depend on accurate models and well-characterized environments. In contrast, learning-based methods can flexibly adapt to data and changing conditions, yet reconciling their flexibility with rigorous guarantees and practical implementability remains challenging. This dissertation comprises three studies that address these challenges from complementary perspectives.

The first study develops a reference-free Learning Model Predictive Control (LMPC) framework that enhances control performance through iterative execution of MPC-based control. The proposed method employs Gaussian Process (GP) regression to model the uncertain components of the system dynamics and refines both the terminal set and terminal cost of the MPC optimization problem. These refinements are achieved using reachable sets computed from the reproducing kernel Hilbert space representation and the Lipschitz constants of the learned dynamics, accumulated over previous iterations. Theoretical analyses establish recursive feasibility of the MPC optimization problem and input-to-state stability (ISS) of the goal region, and a bound on the control performance of the closed-loop system at each iteration is also derived.

The second study addresses safe autonomous control in previously unseen environments by constructing Control Barrier Functions (CBFs) online from onboard sensor data. By combining Bayesian meta-learning with Bayesian surface reconstruction, the approach enables fast and data-efficient adaptation of the learned CBF to new environments and provides a probabilistic assessment of safety within a CBF-based quadratic program (CBF-QP) suitable for real-time implementation.

The third study focuses on control for temporal task specifications expressed in Signal Temporal Logic (STL). A learning framework is developed to train a single recurrent neural network (RNN) controller capable of handling multiple STL specifications. The proposed STL2vec embedding encodes STL formulas as vectors that capture their semantic relationships, allowing the controller to generate task-conditioned policies that generalize across different objectives with improved computational and memory efficiency.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（橋本　航　）

	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	髙井　重昌
	副 査　教授	舟木　剛
	副 査　教授	牛尾　知雄
	副 査　准教授	橋本　和宗

論文審査の結果の要旨

システム制御理論は従来、モデルベースト制御の理論体系の構築を目指して発展してきた理論であり、システムの安定性や最適性などを保証する制御系設計のための指針を与えることができる。しかしその一方で、モデルベーストであるが故に、制御対象であるシステムの正確な動作モデルが必要であり、システムの動作環境が一定であることも要求される。しかし、現実のシステムにおいては、その正確なモデルを作成することは一般に困難であり、予期せぬ動作環境の変化が起こりうる。そのため、必ずしも理論で保証された制御性能が得られないという実用上の問題点がある。この問題点を克服するためのアプローチとして、学習ベースの制御が近年、注目を集めているが、如何に制御性能の理論的保証を与えるか、如何に学習ベースト制御器を実装するか、といった点について、多くの未解決問題がある。そこで本論文では、学習ベースの安全かつ形式手法に基づく新たな制御系設計法を提案している。

本論文ではまず、未知の非線形システムに対する、学習ベースの反復モデル予測制御手法を提案している。提案手法では、システムダイナミクスの未知要素のモデリングにガウス過程回帰を用い、各反復において、以前の反復において得られたデータを利用し、モデル予測制御における最適制御問題の終端集合と終端コストの更新を行う。理論的成果として、各反復において最適制御問題の可解性が保証される条件、閉ループシステムが不変集合である終端制約に関して入力ー状態安定となる条件を明らかにしている。さらに、各反復における最適制御問題の評価関数値の上界を与えている。数値シミュレーションにより、反復に従って評価関数値が改善されることを示し、提案手法の有効性を確認している。

次に、オンボードセンサからの観測データを用いて制御バリア関数をオンラインで構成することにより、未知あるいは不確かな環境におけるシステムの安全性を保証する制御手法を提案している。制御バリア関数はシステムの安全性を保証するための制御系設計の有力なツールであるが、システムの動作環境が未知もしくは不確かな場合には、如何に制御バリア関数を構成するかが問題となる。提案手法では、異なる環境における過去のデータを利用するベイズメタ学習を用いることで、新しい環境下での制御バリア関数を少ないデータ量で効率的に構成することが可能となる。そして、構成された制御バリア関数を利用した、システムの安全性のためのオンライン制御アルゴリズムを導出している。この制御アルゴリズムには、二次計画問題を解くことで容易に実行することができる、という利点がある。さらに理論的成果として、導出した制御アルゴリズムがシステムの安全性を保証する確率を与えている。そして、数値シミュレーションにおいて、既存手法との学習に要する時間や制御性能に関する比較を行い、提案手法の有効性を確認している。

さらに、形式手法の分野で用いられる信号時相論理により記述された複数の仕様に対応可能な単一の制御器の設計手法を提案している。提案手法では、制御器としてリカレントニューラルネットワークを用いるが、信号時相論理を直接ニューラルネットワークには入力できないため、信号時相論理をベクトルに変換する手法を開発している。この変換手法は仕様の類似度を反映しており、それにより複数の仕様に対して効率よくニューラルネットワーク制御器の学習

を行うことが可能となる。また、提案手法では複数の仕様に対して単一の制御器を用いるため、仕様ごとに制御器を構成する場合に比べ、大幅に計算リソースを削減することができ、数値シミュレーションにより、提案手法のそのような有効性を確認している。

以上のように、本論文は学習ベースの安全かつ形式手法に基づく新たな制御系設計法を提案しており、学習ベースト制御のための新たなシステム制御理論の構築に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。