

Title	確率ハイブリッドシステムの離散抽象化に関する研究
Author(s)	福井, 康仁
Citation	
Issue Date	2013-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/11323
Rights	
Description	Supervisor:平石邦彦, 情報科学研究科, 修士

確率ハイブリッドシステムの 離散抽象化に関する研究

福井 康仁 (1110052)

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

2013 年 2 月

キーワード: 有界双模倣, 離散抽象化, 確率ハイブリッドシステム.

科学技術の発展と共に, 生産工程や一つのロボットに求められる能力は高度化している. それに伴い, より複雑なシステムを制御する手法の開発が求められている. 複雑なシステムの振る舞いを表現する手法の一つに, ハイブリッドシステムによるシステムのモデル化が知られている. ハイブリッドシステムとは, 微分/差分方程式に代表される連続ダイナミクス, 有限オートマトンに代表される離散ダイナミクスが混在した動的システムのクラスである. 表現能力の高さから盛んに研究が行われている. 近年とくに, ハイブリッドシステムの解析や制御の枠組を確率ハイブリッドシステムへ拡張する研究が盛んに行われている. 確率ハイブリッドシステムは通信ネットワークや遺伝子ネットワークのモデルとして知られており, 解析や制御問題を考えることは, 理論面および応用面から重要である. 一般的な確率ハイブリッドシステムのクラスを考えることは難しいことから, 簡単なクラスを考える場合が多い. とくに, 決定性の連続ダイナミクスに制限された確率ハイブリッドシステムのクラスはよく扱われている. このクラスに確率ハイブリッドシステムを制限したとしても, 故障を考慮したシステムなどさまざまな応用が考えられる.

しかしながら, クラスを限定した確率ハイブリッドシステムであっても実際の制御に用いられることは少ない. 理由の一つに, 到達可能性問題や

最適制御問題の計算量が、連続ダイナミクスの数に応じて指数的に増加することが挙げられる。そのため、解析や制御の計算が困難となる場合が多い。この問題を解決する方法として、離散抽象化が注目されている。離散抽象化とは、システムの状態空間を有限個の集合に分割し、これらの集合間の遷移によって、システムの振る舞いを表現する方法である。なお、分割した集合の代表点間の遷移を用いる場合もある。離散抽象化から得られた遷移システムを用いると、到達可能性問題などを離散ダイナミクスと同様に議論可能となる。元のシステムの振る舞いを何らかの意味で保存する離散抽象化システムを用いることで、解析や制御の計算は容易になる。

離散抽象化の方法としては、3種類の方法が知られている。まず、状態空間の分割が与えられている場合は述語抽象化と呼ばれている。このとき、集合間の遷移は元のシステムの振る舞いの上近似となるが、安全性の検証を考えることができる。次に、状態空間を双模倣性に基づき分割する方法が知られている。この方法では、双模倣の意味で元のシステムと等価な離散抽象化システムが得られ、安全性だけでなく、可到達性の検証や制御への応用が可能である。しかしながら、離散抽象化システムの計算手続きの停止性が保証されていない。最後に、状態空間の分割が与えられ、かつ各集合の代表点が与えられている場合において、近似双模倣性の概念が提案されている。なお、確率ハイブリッドシステムに対しては、双模倣性または近似双模倣による離散抽象化の方法がこれまでに提案されている。

本論文では、確率ハイブリッドシステムの有界モデル検査を行う方法として、双模倣性に基づく確率ハイブリッドシステムの離散抽象化の方法を提案する。双模倣性に基づく方法では、計算手続きの停止性が保証されていないことから、本論文では確定的なハイブリッドシステムに対して提案されている、有界双模倣性の概念を確率ハイブリッドシステムへ拡張することを考える。有界双模倣性では、システムの振る舞いを有限時間区間のみで考えることから、計算手続きの停止性が保証される。なお、本論文では、確率ハイブリッドシステムのクラスとして、決定性の連続ダイナミクスに制限されたクラスを考えるとすることとする。確率ハイブリッドシステムに有界双模倣による離散抽象化を行うと到達可能性と遷移確率を保存した離

散ダイナミクスが得られる．得られた離散ダイナミクスからは，現在の状態から到達可能な状態空間の分割と，それぞれの分割への遷移確率が求められる．これによって，提案手法を用いると危険な状態へ陥る確率や目標状態への到達確率などを考慮した制御方針の決定が離散ダイナミクスから行えるようになる．

本論文ではまず，研究で用いた確率ハイブリッドシステムと有界双模倣の定義を行う．次に，提案した確率ハイブリッドシステムの有界双模倣による離散抽象化の計算アルゴリズムについて説明を行う．最後に，いくつかの例題を用いてアルゴリズムの実装や，提案手法の有用性について説明する．

計算アルゴリズムの説明ではまず，アルゴリズムを構成する4つの計算手続きの概要や，それぞれの入出力関係について述べる．次に，それぞれの計算手続きを概念図や計算例を示し，説明を行う．

本論文では，4つの例を用いて提案手法の有用性を確認する．1つ目の例では，本研究で考える確率ハイブリッドシステムのクラスを限定した確定的なハイブリッドシステムに対して離散抽象化を行う．また，これによって実装と計算手順の確認を行う．得られた遷移関係や，状態空間の分割を表す連立不等式を示し，有界双模倣によって得られる離散ダイナミクスについて詳しい説明を行った．2つ目の例では，1つ目の例とした確定的なハイブリッドシステムに連続ダイナミクスを加えた確率ハイブリッドシステムを離散抽象化する．得られた結果を1つ目の例の結果と比較することで，提案手法から得られる離散ダイナミクスの確率的な振る舞いについて説明する．3つ目の例では，異なる確率ハイブリッドシステムに対してそれぞれ離散抽象化を行い，状態空間の分割数を比較する．単位時間に対して状態空間の分割数が指数的に増加することを確認し，確率ハイブリッドシステムの離散抽象化として，停止性のある抽象化手法である有界双模倣を適用することの有用性について説明する．最後に，実際の制御への応用例として，遺伝子トグルスイッチの探索を行う．離散抽象化から得られた離散ダイナミクスの遷移関係を調べることで，目的とした機能を実現する状態と入力組を導出する．これによって，確率ハイブリッドシステムの解析

や制御に本研究の提案手法が有用であることを説明する.

提案手法では, 有界双模倣を用いた離散抽象化を行っているため, 有限時間で離散ダイナミクスが導出できる. しかし, 拡張状態空間の分割数は時間に対して指数的に増加するため, 対象とするシステムや, 必要ステップ数によっては計算が困難となることが考えられる. そのため, 近似双模倣による離散抽象化や枝狩りといった近似手法の検討は今後の課題となる.