

# On-the-fly を用いた制御器の直接導出による 制御効率を考慮した離散制御器合成の計算空間削減手法

都竹 佑季 (22B30490) 指導教員：鄭 顕志

## 1 概要

離散事象システムの制御において、動作コストを最小化する制御器 (制御戦略) の合成は重要である。従来の制御戦略の合成手法は、制御戦略を合成するために中間生成物を經由しており計算空間の無駄が生じるという課題が存在する。本研究では、この課題を解決するため、全体モデルを構築せずに制御器を合成する手法である Directed Discrete Controller Synthesis (DDCS)[2] を拡張する。具体的には、コストの比較情報を考慮した新たなヒューリスティックを導入して、制御戦略を直接合成する手法を提案する。

## 2 スーパーバイザ制御のための制御効率の良い制御器の設計

離散事象システムとは、離散的な状態集合を持ち、事象の発生によって状態が変化する事象駆動型のシステムの総称である。通信システム、オペレーティングシステム、データベースシステム、生産システム、交通システムなど、さまざまな分野のシステムがこの性質を備えている。

離散事象システムを安全かつ信頼性の高い形で運用するためには、安全性、到達可能性といった制御仕様が確実に満たすことが求められる。この課題に対し、スーパーバイザ制御と呼ばれる手法が広く研究されてきた。

スーパーバイザ制御は、動作仕様の充足が保証された制御器に基づいてシステムを制御することで、その振る舞いが常に制御仕様を満たすように導く制御手法である。この手法では、まず開発者が、実際のシステムが運用される動作環境を形式的にモデル化し、Labelled Transition System (LTS) として表現する。これは、制御対象となるシステムと、システムに関与するすべての環境の振る舞いを、状態遷移モデルである LTS で明示的に記述する。次に、この環境の中で保証すべき安全性や到達可能性などの制御仕様を定義し、それを監視するための監視モデルを、同様に LTS として構築する。こうして得られた環境モデルと監視モデルを入力とし、制御仕様が満たされるか否かを検証するためのゲーム空間を並列合成を用いて自動構成する。その後、構築されたゲーム空間において二人型対戦ゲームを解くことによって、制御器と呼ばれる動作仕様が保証される環境モデル上の全状態空間が導出される。このようにして合成された制御器に基づいてシステムをスーパーバイザ制御することで、システムの振る舞いにおいて安全性を保証することが可能となる。

一方で、制御器上で選択する制御の内容によっては、実行時間や実行料金といったシステムの性能に差異が生じる。このため、スーパーバイザ制御においては、システム上で発生する各事象に対応する実行コストを考慮して、制御器から非効率な制御を排除した制御効率の良い制御器を導出する研究が進められてきた [1]。

## 3 制御器の合成における課題

しかし、制御器の導出過程で構築されるゲーム空間は指数関数的に増加する課題があり、スーパーバイザ制御を実践的な規模のシステム開発への適用を困難にしている。ゲーム空間は、事象の同期を考慮した環境モデルと監視モデルの全状態の直積により状態を構築するため、各モデル数の増加に伴って状態数が指数関数的に増加する。このゲーム空間の指数関数的増加に伴って、要求される計算空間、計算時間、必要主記憶量も指数関数的に増加するため、制御器を導出するにあたって計算空間の状態削減は重要な課題となっている。

## 4 提案手法

本研究では、制御器導出過程における計算空間爆発の問題に対処するため、On-the-fly 探索を用いて制御効率を考慮した制御器の直接合成に取り組む。

On-the-fly 探索 [2] は、環境モデルと監視モデルに加え、目標状態が与えられた上で、動作仕様を違反しない状態遷移を初期状態から目標状態に向けて逐次的に探索・構築する手法である。本手法では、動作仕様を満たす目標状態への状態遷移がひとつでも見つければ探索を終了するため、ゲーム空間全体を網羅的に構築・探索する必要がない。このような性質により、On-the-fly 探索に基づく制御器の導出は、計算空間を大幅に削減できるという利点がある。一方で、目標状態に到達する経路がひとつだけ導出されるため、探索方針に依存して制御器の内容が変化するという欠点がある。

そこで本研究では、各事象に対する実行コストを考慮しつつ On-the-fly 探索を実行することで、環境モデル・監視モデル・実行コストの情報から、制御効率の高い制御器を直接導出する。このような制御効率を指標とした制御器の導出において、On-the-fly 探索は従来扱われてこなかった分野であり、制御効率の低い制御器に対応する状態の構築を避けられるという点で、On-the-fly 探索の「ひとつの制御のみ導出する」という制約を、状態空間削減の観点から積極的に活用する点で非常に有効であると考えている。

## 5 研究計画

現在までに、提案手法の実装は概ね完了している。今後は、8 月中に本手法の有効性を検証するための評価実験を実施する予定である。評価結果をもとに、9 月にはソフトウェア工学分野の研究会である SIG-KBSE への論文投稿を目指す。論文が採択された場合、11 月に開催される同研究会において研究成果の発表を行う。12 月から翌年 1 月にかけては、これまでの研究内容を取りまとめ、卒業論文の執筆を進める計画である。

## 参考文献

- [1] E. Castellano, V. Braberman, N. D'Ippolito, S. Uchitel, and K. Tei, Minimising Makespan of Discrete Controllers: A Qualitative Approach, in 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC), Nice, France, 2019, pp. 1068-1075..
- [2] D. Ciolek, M. Duran, F. Zanollo, N. Pazos, J. Braier, V. Braberman, N. D'Ippolito, and S. Uchitel, On-the-fly informed search of non-blocking directed controllers, Automatica, vol. 147, No. C (2023).