鉄道制御システムに特化した離散制御器合成における状態削減モデリング手法

桑名 賢吾[1] 鄭 顕志[1] 半田 隆信[2] 柳井 法貴[2] 西面 敦義[2] 深澤 良彰[1] 本位田 真一[1]

A Domain-Specific State Reduction Modeling Technique of Discrete Controller Synthesis for Train Control Systems

KENGO KUWANA[1] KENJI TEI[1] TAKANOBU HANDA[2] NORITAKA YANAI[2]
ATSUYOSHI SAIMEN[2] YOSHIAKI FUKAZAWA[1] SHINICHI HONIDEN[1]

1. はじめに

鉄道システムは，路線を複数の固定された区間 (閉そく) に分割し，同じ閉そくに存在する車両を一つに限定することで，車両間の衝突を防ぐ．ある閉そくに対する車両の有無を基本にした離散的な制御器を用いた列車制御を行う場合，複雑な路線上で制御要求を満たす動作仕様の人手での構築には膨大な時間を要する．

この問題の解決手段の一つが離散制御器合成 [1] である．これはシステムの外部環境を Labelled Transition System(LTS) と呼ばれる有向グラフでモデル化したものと Fluent Linear Temporal Logic と呼ばれる論理式で記述された要求を元に，与えられた要求を満たすことが保証されたシステムの動作仕様を自動生成するものである．

しかし，離散制御器合成は実用的な時間内に動作仕様を生成することができない問題がある．本研究で仮定した鉄道システムの模擬路線例に離散制御器合成を適用した場合の計算時間は閉そく数 4，5 の場合にそれぞれ 2[s]，16,353[s] となり，閉そく数 6 の場合は 1 日以上を要する．

これは，入力となる環境モデルの状態数が外部環境中の要素数に対して指数関数的に増加することに伴い，計算時間も指数関数的に増大することに起因する．

そこで本研究では，Directed Controller Synthesis(DCS) [2] アルゴリズム向けに鉄道システムを定式化し，離散制御器合成高速化の評価を行なった．DCS アルゴリズムとは，従来の離散制御器合成 [1] が抱える計算時間の問題を解決するべく近年発表されたアルゴリズムで，環境モデル全体ではなく部分的な探索を行うことで従来の離散制御器合成よりも 100 倍以上高速に動作仕様を生成可能である [2]．

評価の結果，従来の離散制御器合成より高速な動作仕様の生成を確認できたが，実用的な時間に収めるためにはさらなる高速化手法の開発が必要である事が分かった．

そこで，DCS 適用時の計算時間をより短縮するため，環境モデル中に含まれる無駄な制御に関する状態を省く制約を課すドメイン固有な状態削減モデリング手法を提案する．

本論文の構成は以下の通りである．第 2 章で DCS アルゴリズムの適用，第 3 章で提案した状態削減モデリング手法について述べる．そして第 4 章で評価を，第 5 章で議論を行い，最後に第 6 章でまとめと今後の課題を述べる．

2. DCS アルゴリズムの適用

DCS アルゴリズム向けに鉄道システムを定式化し，DCS アルゴリズムによる離散制御器合成高速化の評価を行なった際の計算時間のグラフを**図 1** に示す．従来の離散制御器合成 [1] では閉そく数 6 の場合に 1 日以上の合成時間を要したが，DCS アルゴリズム適用時は 12[s] で合成が完了した．このことから，DCS アルゴリズムは従来の離散制御器合成より 7000 倍以上高速に動作仕様を生成することが確認できた．

しかし，閉そく数の増加に伴う計算時間の指数関数的増大が発生しており，閉そく数 9 以上の場合には 1 日以上を要することが確認できたため，閉そく数が増加しても離散制御器合成時間を実用的な時間に収めるためにはさらなる高速化手法の開発が必要である事が分かった．

3. 状態削減モデリング手法の提案

DCS アルゴリズム適用により十分な高速化ができなかっ

1 早稲田大学
WASEDA University
2 三菱重工業株式会社
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

© 2019 Information Processing Society of Japan

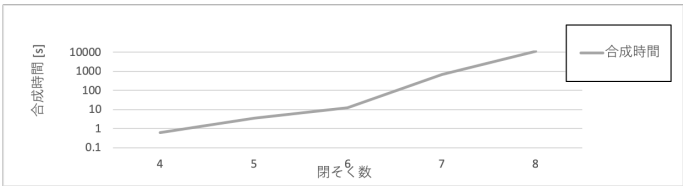

図 1　DCS による離散制御器合成時間 [s]

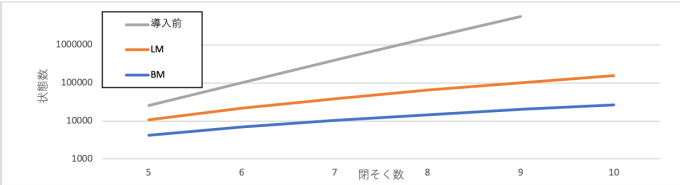

図 2　提案手法導入前後の状態数の比較

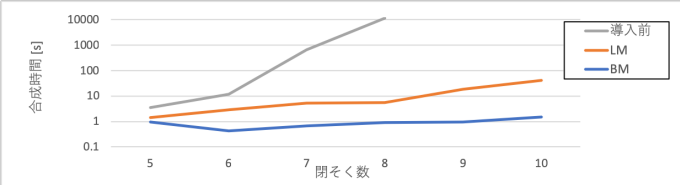

図 3　提案手法導入前後の離散制御器合成時間の比較 [s]

た要因は，閉そく数の増加にともなう状態数の指数増加であると推測される．そこで，DCS アルゴリズム適用時の計算時間をより短縮するために，環境モデル中の状態を削減する手法を提案する．

本研究で仮定した鉄道システムの模擬路線例では制御対象の列車が閉そくに侵入・通過する際には，対象の閉そくに対して予約を行う必要がある．この閉そくに対する予約は複数の閉そくに対して行うことができる．そのため，n 個の閉そくに対する予約の有無を単純化して考えると 2^n 通りの予約の組み合わせが考えられ，それが環境モデル中に反映されるため，状態数の指数関数的増加の一因となる．

しかし，実際には制御対象の列車が存在する閉そくと移動先となる閉そくの連続する 2 つのみを予約すれば十分であり，2^n 通りの組みわせの中には，過剰な閉そくの予約，連続しない閉そくの予約などの無駄な状態が含まれる．

そこで，予約操作に関する制約の導入による状態削減モデリング手法を開発した．まずはじめに，制御対象の列車が存在する閉そくと移動先となる閉そくの 2 つのみを予約すれば十分であることから，閉そくの予約上限を 2 に定める制約 (Limit Manager [LM]) を定めた．

次に，連続する 2 つの閉そくを予約しなければ列車は移動できないことと，列車の進行方向側に予約をしなければ列車が前進できないことから，LM に予約方向の制約を加える制約 (Block Manager [BM]) を定めた．

これらは LTS によって表現され，parallel composition という操作で環境モデルに合成することで導入される．

4.　評価

本章では，提案手法を環境モデルに導入し，状態削減および計算時間短縮の有効性を評価した．

環境モデルの状態数と閉そく数の関係を，提案手法導入前後で比較した結果を**図 2** に示す．図 2 から LM の導入により状態数が最大 1/10 程度に削減されたこと，BM の導入により最大 1/100 程度に削減されたことが確認できる．

また，提案手法導入前後の離散制御器合成時間の比較結果を**図 3** に示す．図 3 から LM 導入後は最大で 1/1000 程度，BM 導入後は最大で 1/10000 程度に合成時間が削減できたことが確認できる．

5.　議論

鉄道システムドメイン固有な状態削減モデリング手法により環境モデルの状態削減と離散制御器合成時間短縮が確認できたが，本手法の他ドメインへの適用可能性を考える．

今回の提案手法では，閉そく数の増加に伴う冗長な予約状態の指数関数的な増加に着目した．同様の状態増加が発生しうるシステムとして，区画や設備，資源等の予約・開放を行うようなシステムが想定される．このようなシステムに対しては，本研究の提案手法と同様に冗長な予約操作に対する制約の導入による状態数の削減が期待される．

また，上記の特徴を持たないシステムに対しては提案手法を直接適用できないが，システム中に冗長な操作が含まれる場合，それらを制限する状態削減モデリング手法の開発が期待される．

6.　おわりに

鉄道システムの動作仕様を従来の離散制御器合成技術 [1] を用いて生成する場合，実用的な時間内に計算を終えることができないという問題があった．そこで，本研究では DCS アルゴリズム適用による離散制御器合成高速化の定量評価，及び，ドメイン固有な状態削減モデリング手法による DCS 適用時の計算時間短縮手法開発を行なった．DCS アルゴリズムの適用により，1/7000 以下へと計算時間が短縮されたことを確認できた．また，状態削減モデリング手法の導入によって DCS アルゴリズム適用時と比較して最大で 1/10000 程度までの計算時間の短縮を達成した．

今後の課題として，鉄道システムドメインに限らない状態削減モデリング手法の開発が挙げられる．

参考文献

[1] N. D'Ippolito, D. Fischbein, M. Chechik, and S. Uchitel. Mtsa: The modal transition system analyser. In *2008 23rd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*, pages 475–476, Sept 2008.

[2] D. Ciolek et al. Directed controller synthesis of discrete event systems: Taming composition with heuristics. In *2016 IEEE 55th CDC*, pages 4764–4769, Dec 2016.

© 2019 Information Processing Society of Japan