



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Model Reduction and Control of Boolean Networks Using Binary Decision Diagrams [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	本山, 風馬
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16518号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95206
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Fuma_Motoyama_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(情報科学) 氏名 本山 風馬

審査担当者 主査 教授 小林 孝一
副査 教授 山下 裕
副査 特任教授 金井 理

学位論文題名

Model Reduction and Control of Boolean Networks Using Binary Decision Diagrams

(二分決定グラフを用いたブーリアンネットワークの低次元化と制御)

本学位論文では、ブーリアンネットワークのモデル低次元化と制御に関する新しい方法を提案し、その有効性を示している。ブーリアンネットワークとは、システムのダイナミクスをブール関数で表現する数理モデルであり、遺伝子ネットワークへの応用が盛んに研究されている。しかしながら、多くの解析・制御手法の計算では、状態数(遺伝子ネットワークの場合は遺伝子数)に対して指数関数的に計算時間が増大する課題がある。ブール関数の計算を効率的に実行する方法として、二分決定グラフ(BDD)が知られているが、ブーリアンネットワークのモデル低次元化や制御にはこれまで利用されていない。そこで著者は、モデル低次元化問題と有限時間制御問題に対して、BDDを用いた効率的な計算手法を開発した。また、計算機実験により、既存手法では解くことができなかった大規模システムに対しても、実用的な計算時間で計算できることを明らかにした。

第1章では、研究の背景、研究の目的について述べている。

第2章では、準備として、ブーリアンネットワーク、BDD、およびフィードバック頂点集合に基づくモデル低次元化手法についてまとめている。

第3章では、BDDを用いたモデル低次元化手法について述べている。本章で考えるフィードバック頂点集合に基づくモデル低次元化は、与えられているブーリアンネットワークの定常状態を保存することが保証されている。この性質を満足するために、ブール関数の代入を繰り返し実行し、状態数を削減していく。提案手法では、どのようにブール関数を代入すればよいかを、状態間の相互作用に基づいて明らかにしている。代入操作の停止性についても証明している。計算機実験により、幅広く用いられているセミテンソル積解析に基づく方法では計算できない大規模システムに対して計算可能であることを明らかにした。

第4章では、モデル低次元化手法の改良について述べている。フィードバック頂点集合に基づくモデル低次元化では、得られる低次元化モデルの状態数が最小とは限らず、定常状態を保存しながらさらに状態数が削減できる場合がある。本章では、ブール代数の補元則および吸収則を利用したモデル低次元化手法を提案している。提案手法はBDDを用いて実装可能であり、大規模システムにも適用可能である。計算機実験により、フィードバック頂点集合に基づくモデル低次元化により得られる低次元化モデルよりさらに低次元のモデルが得られることを明らかにした。

第5章では、有限時間制御問題とその解法について述べている。有限時間制御問題とは、指定した時刻に状態が目標値となる制御入力列を求める問題である。基本的な制御問題の一つである。本章では、BDDを用いて、初期状態と制御入力列を列挙する方法を提案している。提案手法を用いること

で, 与えられている初期状態に対して, 状態が目標値に到達する制御入力列が存在するかを検証できる. また, 任意の初期状態に対して, 状態が目標値に到達する制御入力列が存在するかも検証できる. 計算機実験により, 大規模システムに対して初期状態と制御入力列を高速に列挙できることを明らかにした.

これを要するに, 著者は大規模なシステムの制御を可能とするブーリアンネットワークのモデル低次元化手法と制御手法を提案した. さらに著者は計算機実験により提案手法の有効性を示している. 著者による本研究は, 情報科学に寄与するところ大なるものがある. よって著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格ある者と認める.