



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Practical Techniques and Applications of Binary Decision Diagrams in Property Verification Problems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	岩下, 洋哲
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11291号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55446
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Hiroaki_Iwashita_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 岩下 洋哲

審査担当者 主 査 教 授 湊 真一
副 査 教 授 有村 博紀
副 査 客員教授 白井 康之

学位論文題名

Practical Techniques and Applications of Binary Decision Diagrams in Property Verification Problems

(プロパティ検証問題における二分決定グラフの実用的な技術と応用)

大規模集積回路 (LSI) などのシステム設計支援・設計自動化の技術は、情報科学・計算機工学の中の重要な一分野を占める。中でも設計検証技術は最重要課題の一つであり、産業界からは常に技術革新が求められてきた。一方、二分決定グラフ (BDD) と呼ばれるコンパクトな論理関数のデータ構造は、LSI 設計における中心的なアルゴリズム技術の一つとして発展してきた。BDD は離散的な対象を効率良く列挙索引化できるため、様々な検証の分野に応用することができる。BDD を用いた検証技術で最も成功したものは、記号モデル検査と呼ばれる方法である。これは、与えられたシステムの全ての到達可能な状態において、論理式で表現されたプロパティ (設計仕様) が常に満たされるかどうかを判定する問題であるが、膨大な個数の状態を、BDD を用いて圧縮してコンパクトに表現して記号的に操作することにより、非常に高速な計算が可能となった。

著者は、記号モデル検査技術が注目を集めた 1990 年代前半より、BDD を用いたプロパティ検証問題に取り組んできた。本論文の前半 (3 章、4 章) は、実用的な LSI のプロパティ検証をさらに効率化するために、著者がこれまでに考案した技法をまとめたものである。3 章では、設計に対する網羅的な機能テストパターンを人手ではなく自動的に生成するために有限状態機械 (FSM) によるモデル化と BDD による状態空間探索を応用する方法を提案し、実設計規模のパイプライン仕様に対しても本手法が適用可能であることを示している。4 章では、検証に要する計算コストを削減するために、プロパティの限定と検証アルゴリズムの最適化について論じている。BDD を用いた記号モデル検査では、一般に、時間を遡って状態空間を探索する「逆像計算」が用いられるのに対し、時間に沿って計算する「像計算」を用いて計算する新しい手法を提案している。実設計で使用頻度の高いプロパティの多くは像計算のみで検証可能であることを示すとともに、それらを表現する仕様記述言語として ω 正規表現が適していることを見出している。さらに、グラフ表現したプロパティを深さ優先で処理することにより、設計誤り検出までの計算時間を大幅に短縮する検証アルゴリズムも提案している。

一方、2000 年以降、計算機の主記憶が大容量・安価になったことから、LSI 設計に限らず、データベース処理や人工知能応用など、幅広い用途に BDD が使われるようになってきた。著者は近年、一般的なグラフ構造に対して、所与のプロパティを満たす部分構造を全列挙する問題に取り組んでいる。本論文の後半 (5 章) では、LSI に限らずより広い意味でのプロパティ検証問題に対する BDD の応用技術として、与えられたグラフ上のパスや木などの高速な列挙索引化を行う共通の枠

組みについて述べている。この枠組みは D. E. Knuth が 2009 年に公表したアルゴリズムに基づくが、本研究では、再帰的な仕様記述を用いたプロパティ記述の一般化と定式化を提案し、共通部分の実装と組合せることにより様々な問題を処理することが可能な汎用的な処理系 (C++ ライブラリ) を開発している。著者はアルゴリズム実装にもいくつかの工夫を加えており、その結果、Knuth の実装を凌駕する処理性能を示している。さらに著者は、格子グラフ上のパス (自己回避歩行) の数え上げの問題を例に、個別の問題に対する最適な実装も追究し、その結果、世界でもこれまで解かれていなかった規模の問題を解くことに成功している。

本論文の成果は、次のようにまとめられる。

1. LSI 設計に対する網羅的な機能テストパターンを自動生成するための有限状態機械によるモデル化と BDD による状態空間探索を応用する方法を提案し、その有効性を示した。
2. 記号モデル検査において、一般的な「逆像計算」ではなく順方向の「像計算」を用いて計算する新しい手法を提案し、実用的な多くのプロパティが本手法で検証可能であることを示すとともに、その仕様記述言語として ω 正規表現が適していることを見出した。
3. LSI 設計に限らずより広い意味でのプロパティ検証問題に対する BDD の応用技術として、与えられたグラフに対する再帰的なプロパティ記述の定式化を提案し、特定の問題で世界記録を達成するような高性能な汎用処理系を開発した。

これを要するに、著者は、BDD を用いたプロパティ検証技術に関して、LSI 設計自動化に寄与する新しい手法、および LSI 設計以外にも利用可能な汎用的な問題記述とその解法を提案し、種々の問題に対して大幅な処理性能向上が可能であるという新知見を得たものであり、システム設計自動化とグラフアルゴリズムの理工学において貢献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ものと認める。