

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2006～2008
課題番号：18500037
研究課題名（和文） 論理設計誤りの自動修正とLSI設計変更コスト削減への応用
研究課題名（英文） Rectification of Logic Design Errors and Its Application to Reduce Costs for Engineering Change Orders
研究代表者
沼 昌宏（NUMA MASAHIRO）
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60188787

研究成果の概要：

論理回路に含まれる論理設計誤りを自動的に修正する論理診断手法を考案・実現するとともに、それに基づいてLSIに対する設計変更要求に対して最小限の修正で対応することを可能とする論理再合成手法を考案・実現した。ドントケア条件や修正箇所情報を利用した論理診断手法を提案することで、より少ない箇所の修正によって設計変更に対応する解を、より多く求めることが可能となり、設計変更コスト削減に大きな効果が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学

キーワード：設計自動化，論理設計，設計変更，インクリメンタル合成

1. 研究開始当初の背景

LSI の大規模化にともない、設計期間の長期化、およびコストの増大が問題となっている。大規模なシステム LSI においては、マスク 1 枚あたりの費用が 300 万円程度、チップ全体では 1 億円程度に及ぶとも言われている。大規模な回路においては、システムの仕様変更や設計ミスによる設計変更（論理修正）を避けることは困難である。とくに仕様設計段階における設計ミスは、各設計工程間の検証では発見できないため、マスク製造後に仕様変更が行われることも少なくない。そのため、仕様設計段階のミスを、物理設計レベルの修正で吸収する技術が強く望まれている。この技術がもし実用化されれば、修正に必要な時間および費用に関するコストを飛躍的に削減することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、回路に含まれる設計誤りを自動的に修正する論理診断手法に対して、大規模な回路に含まれる多数の誤りに対応する手法を考案するとともに、それを応用することで、LSI の設計変更コスト削減を目的とした論理再合成システムの開発を行うことを目的とする。具体的には、大規模回路に対応するために、論理検証および論理診断の対象とする回路を絞り込む同時に、ドントケアを考慮することで変更を最小限に抑える論理診断手法を提案する。さらに、その手法に基づいて、設計変更が発生した場合に変更が必要となるマスク数を最小化するような論理回路の変更を自動的に行うための手法を考案する。

さらに、その手法に基づいて、設計変更が発生した場合に変更が必要となるマスク数を最小化するような論理回路の変更を自動

的に行うための手法を考案する。

3. 研究の方法

研究代表者は、全体の総括と論理診断に基づく論理再合成システムの構築、さらにドントケアに対応した論理診断手法の考案・実現を担当した。研究分担者は、診断対象回路とドントケア抽出手法、およびマスク再利用手法の考案・実現を担当し、考案・実現した手法の評価については両者が協力して行った。具体的には、下記に従って研究を進めた。

(1) 論理再合成システムの構築

本研究のベースとなる実験システムのフレームワークをソフトウェアで構築した。

(2) 診断対象回路とドントケア抽出部作成

論理再合成システムにおける回路抽出部を作成した。設計変更発生時に、回路全体の中から修正する必要がある部分を組合せ回路として抽出する。ここで抽出された回路が、論理診断の対象となる。もとの回路から診断対象回路だけでなく、ドントケア条件も抽出することで、回路規模を削減しつつ修正解の品質を保つ方法について考案・実装した。

(3) 論理診断部作成

(2) で抽出したドントケア条件を利用するため、論理再合成システムで採用する論理診断手法を改良した。ドントケアは仕様の曖昧さを表現しているため、回路修正の自由度が大きくなる。具体的には、ドントケアを含む仕様が与えられた場合に、実回路における修正箇所の特定制と修正方法の提示を行う手法を考案・実装した。

さらに、部分回路単位で修正解を求め、その修正解に含まれる箇所の情報を利用して、それらの組合せに対して設計誤りを想定することで、変更を最小限に抑える論理診断手法を提案した。

(4) 論理再合成手法の考案

論理診断の結果に基づいてスペアセルの割当てを行うことで、もとの回路から最小の修正によって設計変更を満足する論理再合成手法に関して、余剰セルと置き換えることで不用となったセルを再利用する手法を考案するとともに、タイミングを考慮した論理再合成手法を考案・実現した。

4. 研究成果

(1) ドントケアに対応した論理診断手法

ドントケア条件を考慮することが可能な論理診断手法を考案・実現した。実験の結果、得られる修正解の数を 74% 増加させることが可能となり、ドントケア条件を考慮することで部分回路単位の修正に対応するとともに、より多くの解を得ることが可能となるため、より少ない変更で修正可能な解が得られることを確認した。

(2) 部分回路に対する修正箇所情報を利用した論理診断手法

大規模な回路に対する論理診断を実現するために、不一致を生じている外部出力を頂点とする部分回路を単位とした論理診断・修正を繰り返す手法が提案されていた。しかし、必ずしも適切な修正方法を選べるとは限らず、部分的な修正を繰り返すために修正箇所数が増加する点、処理順序によっては解が存在していても発見できない場合がある点に問題があった。

そこで、部分回路単位で修正解を求めるが、すぐには修正を行わず、得られた修正解に含まれる箇所の情報を利用して、それらの組合せに対して設計誤りを想定することで、変更が必要となる箇所数を最小限に抑える論理診断手法: EXL_{LS} (Extended X-algorithm for LUT-based circuits based on Location sets to rectify Subcircuits) 法を提案した。修正が必要となりそうな箇所の候補を抽出した上で、それらの組合せを考慮した論理診断を行うことで、より少ない箇所の変更で、回路全体の修正を実現する点を特徴とする。ベン

チマーク回路を用いた実験の結果、修正に必要な箇所増加量が、従来手法と比べて 95%削減される高い効果を確認した。

(3) タイミングを考慮した論理再合成手法

各セルおよびクリティカルパスにおける遅延余裕を用いて、論理診断により得られた解の中から最大遅延制約を満足する可能性の高い解を選択するとともに、遅延時間増加の原因となるセルを論理機能が等価な他のセルと配置を交換することでタイミング収束を図る手法を提案した。本手法を評価するために、ベンチマーク回路に機能変更箇所を挿入して実験を行った。その結果、遅延余裕の比較による解の選択処理において、92%の回路例において再レイアウト後の遅延余裕が最大となる解、もしくは最大の解との遅延時間の差が 0.1 ns 未満の解が選択できた。また、論理等価セルとの交換処理によって、35.2%の回路例において遅延時間の短縮が得られた。

(4) 不用セルを再利用する論理再合成手法

論理診断に基づく論理再合成手法では、設計変更部分の回路を、レイアウト上にあらかじめ配置された余剰セルにより実現するが、変更箇所が多くなると余剰セルが不足してレイアウト不能となる場合がある点に問題があった。そこで、あらかじめ配置された余剰セルに加えて、設計変更により不用となるセルを用いて変更部分の回路を実現する論理再合成手法を提案した。不用となるセルを再利用することで、従来法と比べて付加回路のセル数を約 26%減少させる効果があることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件※)

※条件付き採録 1 件あり。

[学会発表] (計7件)

- ① K. Shioki, N. Okada, T. Ishihara, T. Hirose, N. Kuroki, M. Numa, "An error diagnosis technique based on location sets to rectify subcircuits," 15th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI 2009), pp. 119-124, Mar. 2009. 3. 9, 沖縄県 (査読あり)
- ② 塩木講輔, 岡田匠史, 石原俊郎, 黒木修隆, 沼 昌宏, "部分回路の修正箇所情報を利用した論理診断手法," 情報処理学会 DAシンポジウム 2008, pp. 133-138, 2008年8月26日, 静岡県
- ③ N. Okada, T. Iida, T. Ishihara, N. Kuroki, M. Numa, "An error diagnosis technique based on specifications with don't cares," 14th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI 2007), pp. 389-396, 16th Oct. 2007, 北海道 (査読あり)
- ④ T. Ishihara, R. Arai, N. Okada, N. Kuroki, M. Numa, "An LUT-based error diagnosis technique extended for multiple missing line errors based on iterative diagnosis procedure," 14th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI 2007), pp. 397-404, 16th Oct. 2007, 北海道 (査読あり)
- ⑤ 石原俊郎, 温水真一, 岡田匠史, 新居良祐, 黒木修隆, 沼 昌宏, "部分回路の修正解に含まれるドントケアを考慮した論理診断手法," 情報処理学会 DAシンポジウム 2007, pp. 73-78, 2007年8月30日, 静岡県
- ⑥ 岡田匠史, 石原俊郎, 新居良祐, 黒木修隆, 沼 昌宏, "タイミングを考慮した論理再合成手法," 情報処理学会 DAシン

ポジウム 2007, pp. 205-210, 2007年8月30日, 静岡県

- ⑦ 石原俊郎, 新居良祐, 飯田貴行, 沼 昌宏, "不用セルを再利用する論理診断に基づく論理再合成手法," 情報処理学会 DAシンポジウム 2006, pp. 31-36, 2006年7月12日, 静岡県

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼 昌宏 (NUMA MASAHIRO)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60188787

(2) 研究分担者

黒木 修隆 (KUROKI NUBUTAKA)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90273763

(3) 連携研究者