

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：14501  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21500054  
 研究課題名（和文） SATソルバを利用した論理診断手法とLSI設計変更コスト削減への応用  
 研究課題名（英文） An Error Diagnosis Technique Based on SAT-Solver and Its Application to Incremental Synthesis to Reduce Costs Needed for ECO's  
 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（和文）： SAT ソルバを用いて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。診断対象回路の部分回路に対して修正を繰り返すことで、より大きな回路に含まれる多くの設計変更に対応する解を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。

研究成果の概要（英文）： We have proposed and implemented an error diagnosis technique based on SAT-solver and have applied it to an incremental synthesis system to reduce costs needed for ECO's (Engineering Change Orders). By iterating the error diagnosis procedure for each subcircuit with incorrect primary output function, we are able to obtain solutions even for larger circuits with many ECO's. The experimental results have shown that the proposed system is effective to reduce costs needed for ECO's.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011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，SATソルバ

## 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300～500万円程度、チップ全体では数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

充足可能性問題を解く SAT ソルバを利用することで、大規模な回路に含まれる多数の誤りを自動的に修正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、論理診断において、修正を施す箇所（修正箇所）の組合せに関して、その妥当性を判定する際に SAT ソルバを利用することで、大規模回路に含まれる多くの設計誤りを自動的に修正可能な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、本システムの中核となる論理診断手法については、より広範な設計変更に対応するために、i) 診断対象回路の部分回路に着目し、その部分回路に対する修正を繰り返す方法、ii) 既存回路の再利用手法、を考案する。

### 3. 研究の方法

研究代表者は、全体の総括と SAT ソルバを用いた論理診断手法の考案と改良を担当し、研究分担者は、設計変更に対応した論理再合成部、およびマスク再利用手法の考案・実現を担当した。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) SAT ソルバを用いた論理診断手法の考案・実現と改良

本研究の核心部分である論理診断処理に関して、新たに充足可能性 (SAT) 問題による定式化を行った。従来は BDD (二分決定グラフ) によって表現された論理関数に基づいて行っていた処理を、定式化された充足可能性問題を解く SAT ソルバを用いて実現可能となるように工夫した。また、処理時間短縮と多様な修正解を得ることを目的として、充足可能性問題としての定式化方法や、SAT ソルバに与える CNF 式記述方法について改良を加えた。

さらに、この論理診断手法について、より広範な設計変更に対応するために、診断対象回路の部分回路に着目し、その部分回路に対する修正を繰り返す方法を用いることで、既存回路を再利用しつつ修正を行う手法についても考案・実現した。

#### (2) 設計変更に対応した論理再合成部作成

(1) で考案・実現した手法に基づき、もともになる機能仕様に変更された際に、すでに合成された回路に対する可能な限り少ない修

正によってその変更を満足させる、仕様変更に対応した論理再合成手法を考案し、ソフトウェアとして実現した。変更前の仕様に基づいて合成された回路が誤りを含むと考え、変更後の仕様を正しい機能とみなして論理診断・修正を行う。その結果、回路に対する最小の修正で、変更された仕様を満足することを可能とした。

#### (3) マスク再利用部作成

マスク製造後の設計変更に対して、再設計コストの削減を目的として、マスクを再利用する手法を考案した。チップ上にあらかじめ埋め込まれている余剰セルを用いて回路修正を行うことで、配置用のマスク、すなわち拡散層やポリシリコン層の形成に用いるマスクの再利用を実現した。さらに、余剰セルに関して、種類、個数、チップ上の挿入位置に関する検討を行うことで、論理再合成システムをより実用的なものとした。

### 4. 研究成果

#### (1) SAT ソルバを用いた論理診断手法の考案・実現と改良

本研究の核心部分である論理診断処理に関して、新たに充足可能性 (SAT) 問題による定式化を行った。従来は BDD (二分決定グラフ) によって表現された論理関数に基づいて行っていた修正解の適合性判定処理を、定式化された充足可能性問題を解く SAT ソルバを用いて実現可能となるように工夫した。また、定式化の結果をもとに、充足可能性問題を解く SAT ソルバを用いて論理診断処理を行う手法を考案・実現した。

さらに、処理時間短縮を主たる目的として、部分回路に対する診断を繰り返すことで、診断対象回路全体の修正を実現する手法を考案・実現した。ゲート数 3,513~21,061 の 4 種類のベンチマーク回路に対して、それぞれ 4, 6, 8, 10 箇所の素子機能誤りを無作為に挿入した回路を各 50 ずつ、合計  $4 \times 4 \times 5 = 80$  例について実験を行った。その結果、従来手法では 80 例中 10 例に対してしか修正解が得られなかったが、改良した提案手法では、54 例について修正解を求めることが可能となり、新たに従来法では対応不可能であった 44 例の回路について修正解を求めることが可能となった。従来手法、提案手法ともに修正解を求めることが可能となった回路例についても、処理時間を  $1/2 \sim 1/8$  程度に短縮する効果を確認した。

#### (2) 設計変更に対応した論理再合成部作成

(1) で考案・実現した手法に基づき、もとなる機能仕様が変更された際に、すでに合成された回路に対する可能な限り少ない修正によってその変更を満足させる、仕様変更に対応した論理再合成手法を考案した。変更前の仕様に基づいて合成された回路が誤りを含むと考え、変更後の仕様を正しい機能とみなして論理診断・修正を行う。その結果、回路に対する最小の修正で、変更された仕様を満足することを可能とした。

### (3) マスク再利用部作成

マスク製造後の設計変更に対して、再設計コストの削減を目的として、マスクを再利用する手法を考案した。チップ上にあらかじめ埋め込まれている余剰セルを用いて回路修正を行うことで、配置用のマスク、すなわち拡散層やポリシリコン層の形成に用いるマスクの再利用を実現した。さらに、余剰セルに関して、種類、個数、チップ上の挿入位置に関する検討を行うことで、論理再合成システムをより実用的なものとした。

### (4) 提案手法の評価と研究成果発表

開発した実験システムを用いた設計実験、ならびに実態調査によって得られた実際の設計誤りや設計変更に関する記録をもとに、種々の回路に対する設計誤りの自動診断・修正能力を評価した。その結果、SAT ソルバを用いることで、従来の BDD による手法では扱えなかった 2 万ゲート規模の回路に対する論理診断が行えることを確認した。通常、実際に設計された順序回路から抽出した組合せ回路の規模は、概ね数千ゲート程度であり、実用に耐えうることを確認した。

## 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 2 件)

- ① K. Shioki, N. Okada, K. Watanabe, T. Hirose, N. Kuroki, and M. Numa, "An error diagnosis technique based on clustering of elements," *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol. E93-A, no. 12, pp. 2490-2496, Dec. 2010.
- ② K. Shioki, N. Okada, T. Ishihara, T. Hirose, N. Kuroki, M. Numa, "An error diagnosis technique based on location sets to rectify subcircuits," *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol. E92-A, no. 12, pp. 3136-3142, Dec. 2009.

[学会発表] (計 9 件)

- ① H. Senzaki, T. Matsuyama, K. Watanabe, T. Hirose, N. Kuroki, and M. Numa, "Reconfigurable cells for post-mask ECO," *The 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI 2012)*, pp. 199-204, Mar. 2012. (査読あり)
- ② T. Matsuyama, H. Senzaki, K. Watanabe, T. Hirose, N. Kuroki, and M. Numa, "An error diagnosis technique based on SAT solver," *The 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI 2012)*, pp. 544-548, Mar. 2012. (査読あり)
- ③ 松山友紀, 渡辺浩介, 千崎弘人, 廣瀬哲也, 黒木修隆, 沼 昌宏, "修正可能な外部出力数に着目した部分修正に基づく論理診断手法," *DA シンポジウム 2011*, pp. 69-74, 2011 年 8 月.
- ④ K. Watanabe, H. Senzaki, K. Shioki, T. Hirose, N. Kuroki, and M. Numa, "An incremental synthesis technique for ECO based on iterative procedure for error diagnosis and spare cell assignment," *Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies 2010 (SASIMI 2010)*, pp. 214-219, Oct. 2010. (査読あり)
- ⑤ H. Senzaki, K. Watanabe, K. Shioki, T. Hirose, N. Kuroki, and M. Numa, "An incremental synthesis technique based on error diagnosis and technology remapping for clusters," *Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies 2010 (SASIMI 2010)*, pp. 272-277, Oct. 2010. (査読あり)
- ⑥ 千崎弘人, 渡辺浩介, 塩木講輔, 廣瀬哲也, 黒木修隆, 沼 昌宏, "クラスタ単位のセル割当てを用いた論理再合成手法," *DA シンポジウム 2010*, pp. 15-20, 2010 年 9 月.
- ⑦ 塩木講輔, 渡辺浩介, 岡田匠史, 石原俊郎, 廣瀬哲也, 黒木修隆, 沼 昌宏, "回路構造を考慮した修正箇所候補抽出に基づく論理診断手法," *情報処理学会研究報告*, vol. 2009-SLDM-142, no. 33, 2009 年 12 月.

- ⑧ 塩木講輔, 岡田匠史, 渡辺浩介, 廣瀬哲也, 黒木修隆, 沼 昌宏,  $\delta$ 素子のクラスタリングを用いた論理診断手法 $\delta$ , 情報処理学会 DA シンポジウム 2009, pp. 37-42, 2009 年 8 月.
- ⑨ 渡辺浩介, 塩木講輔, 岡田匠史, 廣瀬哲也, 黒木修隆, 沼 昌宏,  $\delta$ 信号線欠落に対応した論理診断における変更箇所数削減 $\delta$ , 情報処理学会 DA シンポジウム 2009, pp. 43-48, 2009 年 8 月.

## 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