

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11877

研究課題名（和文）アダプティブ故障診断における故障診断時間の短縮に関する研究

研究課題名（英文）Study on Adaptive Fault Diagnosis for Reducing Fault Diagnosis Time

研究代表者

樋上 喜信 (higami, Yoshinobu)

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：40304654

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、LSI（大規模集積回路）において故障位置を推定する故障診断に関する手法を開発した。具体的には、故障辞書を圧縮する手法、テストポイントを挿入する手法、機械学習に基づく故障診断手法を開発した。故障辞書とは、仮定する故障が存在した場合の外部出力値を記録したもので、故障診断時間は短い、大量のメモリ容量を必要とする。そこで、本研究では故障辞書を圧縮することによって、メモリ容量を削減した。また、故障辞書圧縮によって故障診断性能が低下する場合があります、テストポイントを挿入することによって、故障診断性能を向上させた。さらに、機械学習によって故障辞書を用いず短時間で故障診断を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LSIの故障診断の結果は、2通りの活用法がある。1つは、故障診断位置や原因を解析することで、LSI設計・製造上の問題を発見し、それを改善することで歩留まり向上を実現することができる。もう1つは、実稼働中のシステムにおいて、故障位置から故障の影響する外部出力を推定することによって、故障影響のない外部出力のみを用いてシステムを稼働させることができる。これによって、故障が発見されても、システムを停止させることなく、縮小した機能でシステムを稼働させることができる。以上のように、本研究は、LSIの生産性向上、コンピュータシステム信頼性向上などに貢献する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed fault diagnosis methods, which deduce fault sites in Large-Scale Integrated Circuits (LSIs). The methods include compaction of fault dictionary, test point insertion and machine learning based diagnosis methods. Fault dictionary stores output responses of faulty circuits. By using a fault dictionary, fault diagnosis time becomes short, but it requires large amount of memory requirement. The developed method compacts fault dictionary and results in reduction of memory requirement. Also test insertion method enhances the ability of fault diagnosis, and machine learning based method reduces fault diagnosis time without using a fault dictionary.

研究分野：信頼性工学

キーワード：故障診断 テスト容易化設計 故障辞書 機械学習

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LSI(大規模集積回路)設計・製造技術の進展により、LSIの微細化・高密度化が進んでいる。しかしながら、LSIの故障検査、故障診断が益々困難かつ高コストなものとなってきている。故障検査とは、LSIの故障の有無を判定することであり、故障診断とは、故障位置や故障原因を推定することである。LSIの故障診断においては、故障位置や故障原因をできるだけ絞り込むこと、かつ低コストでそれを実現することが求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点である。

- (1) 故障診断性能を低下させることなく故障辞書を圧縮する手法の開発
- (2) テストポイント挿入と故障辞書圧縮による故障診断性能向上手法の開発
- (3) 機械学習に基づく故障診断手法の開発

3. 研究の方法

- (1) 故障診断性能を低下させることなく故障辞書を圧縮する手法の開発

故障辞書とは、回路内に想定する各故障について、それが存在した場合の回路の出力応答を記載したデータファイルであり、これを元に、実際の故障回路に存在する故障を推定する。大規模回路においては、故障数が非常に多いため、故障辞書を保存するために大きなメモリ容量を必要とする。そこで本研究では、故障辞書を圧縮する手法を開発する。その際、圧縮によって、故障診断性能が低下しないような手法を導入する。

- (2) テストポイント挿入と故障辞書圧縮による故障診断性能向上手法の開発

この研究では、故障診断性能を向上するためにテストポイント挿入手法を導入する。テストポイントとは、テストのためだけに、回路内部の信号線の値を観測できるような出力信号線を付加することである。テストポイントを付加することによって、テストポイントなしの場合には、区別できない故障を区別することができるようになり、故障回路に存在する故障をより絞り込めるようになる。しかしながら、多数のテストポイントを挿入した場合、テスト装置の制約からそれらを観測できない場合が考えられる。そこで、テストポイントと元の外部出力を圧縮する手法を導入する。

- (3) 機械学習に基づく故障診断手法の開発

人工知能に用いられる機械学習の手法を用いて故障診断を行う手法を開発する。今後利用される多くのコンピュータシステムでは、機械学習を行う専用ハードウェアが搭載されることが予想される。そこで、機械学習を行い、故障候補を推定する手法を開発する。機械学習を行うことによって、故障辞書が不要となり、必要なメモリ容量を削減できる。また、故障シミュレーションを行う手法と比較して、短時間で故障候補を推定できる。

4. 研究成果

- (1) 故障診断性能を低下させることなく故障辞書を圧縮する手法の開発

提案法を実装しベンチマークとなる回路に対してコンピュータ上においてシミュレーション実験を行った結果を表1に示す。ランダムに選択した単一縮退故障を挿入し故障回路を1000個生成し、故障候補が1個に絞り込めた故障回路数を調べた。表1中の各列は、左から順に、回路名、外部出力線数、圧縮後の出力ビット数、ネットリストに掲載された順に圧縮した手法により故障候補が1個になった故障回路数、提案法により故障候補が1個になった故障回路数を示す。実験の結果、ネットリスト順に従った圧縮法では、790~985個の回路でしか、故障候補を1個

に絞り込めなかったが、提案法では、ほとんどの回路で故障候補を 1 個に絞り込むことができ、1 個に絞り込めなかった場合 (S35932 や S38417) でも、そのような回路は 3~4 個であった。

表 1 ゲート信号線とクロック信号線のブリッジ故障に対する診断の結果

回路	外部出力数	ビット数	ネットリスト	提案法
S5378	228	32	901	998
S9234	250	32	971	999
S13207	790	32	790	999
S15850	684	32	975	1000
S35932	2048	32	985	996
S38417	1730	32	935	997

(2) テストポイント挿入と故障辞書圧縮による故障診断性能向上手法の開発

提案法により、回路内の信号線全体の 5%の信号線にテストポイントを挿入し、故障診断の実験を行った結果を表 2 に示す。表の左列から順に、回路名、テストポイントの全信号線に対する割合、テストポイントと元の外部出力を圧縮する際の圧縮後のビット数、テストポイントなしの場合の故障診断率、提案法によりテストポイントを挿入した場合の故障診断率を表す。故障診断率 DC は、

$$DC = \frac{N_G}{N_F}$$

で表される。 N_G は区別された故障グループの数、 N_F は仮定する全故障数を表す。実験の結果、テストポイントなしの場合より故障診断率が向上しており、6 回路中、4 回路で 90%以上の故障診断率を達成することができた。

表 2 テストポイント挿入による実験結果

回路	TPI(%)	ビット数	故障診断率(%)	
			TPI なし	TPI あり
S5378	5	32	89.8	91.5
S9234	5	32	75.8	89.4
S13207	5	32	80.5	95.1
S15850	5	32	79.9	91.8
S35932	5	32	63.2	73.6
S38417	5	32	89.8	97.7

(3) 機械学習に基づく故障診断手法の開発

提案法により故障診断を行った結果を表 3 に示す。実験では、ランダムに 30 個の縮退故障と 30 個のブリッジ故障を選択し、故障を生成し故障診断を行った。表中には、縮退故障とブリッジ故障の平均故障候補数を示す。縮退故障は、平均 4 個から 14 個程度、ブリッジ故障は 7 個から 16 個程度の故障候補に絞り込むことができた。

表3 機械学習による故障診断の実験結果

回路	故障候補数	
	縮退	ブリッジ
s344	11.2	13.3
s382	11.0	16.0
s510	6.1	8.0
s641	5.8	17.0
s1196	4.9	7.1
s1238	4.7	7.5
s1423	11.2	8.8
s1488	14.4	13.2
s1494	13.3	16.7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshinobu Higami, Takaya Yamauchi, Tsutomu Inamoto, Senling Wang, Hiroshi Takahashi, Kewal K. Saluja	4. 巻 -
2. 論文標題 Machine Learning Based Fault Diagnosis for Stuck-at Faults and Bridging Faults	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 477-480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9894966	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tsutomu Inamoto, Tomoki Nishino, Senling Wang, Yoshinobu Higami and Hiroshi Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Preliminary Study on Noise-Resilient Artificial Neural Networks for On-Chip Test Generation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics	6. 最初と最後の頁 561-565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCCE56475.2022.10014218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshinobu Higami, Tomokazu Nakamura, Tsutomu Inamoto, Senling Wang, Hiroshi Takahashi, Kewal K. Saluja	4. 巻 -
2. 論文標題 Compaction of Fault Dictionary without Degrading Diagnosis Ability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 51-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITC-CSCC52171.2021.9501474	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tsutomu Inamoto, Kazuki Ohtomo, and Yoshinobu Higami	4. 巻 -
2. 論文標題 Preliminary Evaluation of Artificial Neural Networks as Test Pattern Generators for BIST	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 307-310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITC-CSCC52171.2021.9501263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsutomu Inamoto and Yoshinobu Higami	4. 巻 E103-A
2. 論文標題 Formulation of a Test Pattern Measure that Counts Distinguished Fault-Pairs for Circuit Fault Diagnosis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Trans. on Fundamentals	6. 最初と最後の頁 1456-1463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transun.2020VLP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinobu Higami, Tsutomu Inamoto, Senling Wang, Hiroshi Takahashi, Kewal K. Saluja	4. 巻 -
2. 論文標題 Reduction of Fault Dictionary Size by Optimizing the Order of Test Patterns Application	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Int. Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 131-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsutomu Inamoto, Yoshinobu Higami	4. 巻 -
2. 論文標題 Regeneration of Test Patterns for BIST by Using Artificial Neural Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Int. Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 137-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinobu Higami, Tomokazu Nakamura, Tsutomu Inamoto, Senling Wang, Hiroshi Takahashi, Kewal K. Saluja	4. 巻 -
2. 論文標題 Compact Dictionaries for Reducing Compute Time in Adaptive Diagnosis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 525-528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITC-CSCC.2019.8793429	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsutomu Inamoto and Yoshinobu Higami	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of Convolutional Neural Networks to Regenerate Deterministic Test Pattern for BIST	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications	6. 最初と最後の頁 523-524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITC-CSCC.2019.8793374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲元 勉, 樋上 喜信	4. 巻 -
2. 論文標題 畳み込みニューラルネットワークを用いたテストパターンの再生	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第32回 回路とシステムワークショップ (KWS 32) 論文集	6. 最初と最後の頁 234-239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 濱野郁也, 稲元勉, 樋上喜信
2. 発表標題 圧縮優先度の近似的計算による故障辞書の圧縮処理時間の短縮
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山内崇矢, 稲元勉, 王森レイ, 樋上喜信, 高橋寛
2. 発表標題 機械学習を用いた複数故障モデルの故障診断
3. 学会等名 令和3年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	稲元 勉 (Inamoto Tsutomu) (10379513)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・講師 (16301)	
研究 分担者	高橋 寛 (Takahashi Hiroshi) (80226878)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授 (16301)	
研究 分担者	王 森レイ (Wang Senling) (90735581)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・講師 (16301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------