

故障診断のための観測性の定量化について

On Quantifying Observability for Fault Diagnosis of VLSI Circuit

豊田 直哉[†] 温 暁青[†] 梶原 誠司[†] 真田 克[‡]
Naoya Toyota Xiaoqing Wen Seiji Kajihara Msaru Sanada

[†]九州工業大学 大学院情報工学研究科

[‡]高知工科大学 工学部電子・光システム工学科

[†]Graduate School of Computer Science and System Engineering, Kyusyu Institute of Technology

[‡]Electronic and Photonic Systems Engineering Course, Kochi University of Technology

要約: 故障診断は通常外部出力とスキャン FF を観測点として行う。しかし、LSI の高集積化と微細化により故障診断の故障分解能は低下している。一般に、故障分解能は対象回路に観測ポイントを挿入することで向上するが、その挿入した観測点の有効性と評価が議論されていない。それは、故障診断のための観測性の定量化がなされていないためである。そこで本論文では故障と観測点の関係、及び故障の独立性から故障の分解困難性について議論し、組合せ回路あるいはフルスキャン順序回路における故障診断のための観測性の定量化を試みる。そして、ベンチマーク回路を用いて定義した観測性について評価を行う。

Abstract: Fault diagnosis is conventionally conducted with primary outputs and scan flip-flops as observation points. Its diagnostic resolution, however, is increasingly becoming insufficient as circuit sizes increase and feature sizes shrink. Generally, diagnostic resolution can be improved by inserting additional observation points into the circuit under diagnosis. However, there is no efficient method available for evaluating the effectiveness of observation points due to lack of a quantitative measure of observability for the purpose of fault diagnosis. In this paper, we address this problem by discussing and defining the quantity issue on the diagnostic observability of combinational or full-scan circuits by taking faults and observation points, as well as fault pairs of fault dependency, into consideration. We also evaluation results with benchmark circuits.

キーワード: 故障診断、観測点挿入、故障の独立性、観測性

Keywords: fault diagnosis, observation point insertion, fault dependency, observability

1. はじめに

故障診断とは故障モデルを通じて不良回路内の被擬欠陥箇所を特定する作業である。故障診断は不良解析の一環で、高精度の故障診断ほど物理解析においてコストを削減できるため非常に重要な処理である。故障診断には処理時間と処理データ量を抑えて高い故障分解能を得ることが求められる。これまで故障辞書を用いる手法[1]や故障診断用テスト生成を用いる手法[2]が提案され、これらの手法により高い分解能が得られることが分かっている。ところがこれらの手法は短時間、少データ量で高い分解能を得るには至っていない。

そこで、故障分解能を向上させるためには、診断容易化設計(DFD: Design for Diagnosability)として、テストポイントの挿入が有効であると考えられる。特に現在の微細化された LSI では配線の欠陥による故障の割合が増加しており、テストポイントの挿入はそのような欠陥の診断に有効と考えら

れる。

テストポイント挿入は故障検出の容易化設計(DFT: Design for Testability)として様々な手法が提案され実用している[3]-[6]。故障検出におけるテストポイント挿入手法は、より少ないテストベクトル数でより多くの故障を検出できるようテストポイントを挿入する手法である。本研究では故障診断において故障分解の困難さを緩和するために観測点を挿入することを想定しており、近年ではゲートレベルおよびレイアウトレベルにおける挿入手法が提案されている[7][8]。

ところが、観測点挿入による改善度を表す尺度がないため、故障診断に対する効果が不明瞭になりその評価が困難になっている。そこで本論文では組合せ回路、及びフルスキャン順序回路における観測性を、観測点と故障の関係と、故障の独立性を用いて分解容易性を定義し、診断向けの回路の観測性を定量化することを試みる。なお、本論文でいう観測点とは回路の外部出力、スキャ

ンチェーンによる擬似外部出力, 及び挿入した観測点を表している.

本研究の前提条件として, 定義する観測性は, 故障検出におけるテスト容易性尺度の SCOAP[9] のように使用するテスト集合に依存しないで, 回路構造のみから計算するものとする. テストパターンに非依存の尺度とすることで, 設計フローに対する負担を軽減できる. さらに将来は, BIST (Built-In Self-Test) を発展させた BIRD (Built-In Self-Diagnosis) に利用できると考えられる.

本論文では, まず故障の分解, 分解能及び, 一般的な故障診断手法について説明する. 次に, それらと回路構造から故障の分解が困難な要因を議論し, 議論に基づいた観測性について議論する. それから, その観測性を求める手法について説明し, 最後にベンチマーク回路を用いて定義した観測性を評価の実験結果を示す.

2. 故障診断手法と故障分解

本節では故障分解の困難性を議論する前提となる一般的な故障診断手法と故障分解について説明する.

2.1 ソフトウェアによる故障診断

ソフトウェアによる一般的な故障診断処理を図 1 に示す. 故障診断は与えられた故障集合について, テスト集合による観測点での応答を用いて実際に引き起こされている可能性のある故障集合 (故障候補集合) を絞り込む処理である.

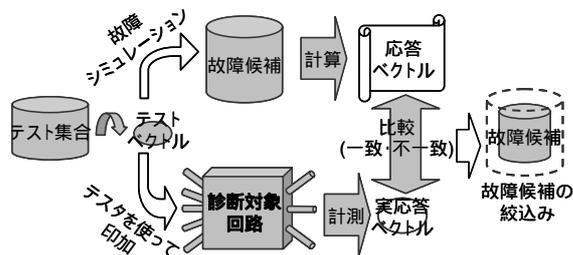


図 1 一般的な故障診断の流れ

まず, 各故障候補に対して, テストベクトルを診断対象回路に印加したときに予想される出力応答を故障シミュレーションにより求める. 次に, 同じテストベクトルに対する実故障回路の応答を観測する. そして, シミュレーションで求められた応答と実観測応答を照合し, 一致する故障の集合を新

たに故障候補集合とする. 一致しなかった故障集合はその振る舞いが異なるため実際に引き起こされている故障とはみなさない. このとき, 故障の影響による応答の差異や一致/不一致によって故障集合を分ける処理を故障の分解という. このような処理を全てのテストベクトルについて繰り返すことで, 故障候補集合を絞り込むことができる.

全てのテストベクトルについてこれらの処理を行った後に残った故障候補集合の示す被擬箇所について詳細な物理解析が行われる.

2.2 良い診断結果を得るために

前節から, 故障解析の時間やコストを削減するには故障診断において, より故障候補集合を絞り込むこと, 言い換えればより精度の高い故障候補集合を生成することが有効である. なぜなら物理解析の対象領域が小さくなり, それだけ解析時間そして解析コストを抑えることができるからである.

従って, 良い診断結果を得るためには故障集合ができるだけ多くかつ小さく分解されなければならない. そのためのアプローチには, 故障候補集合を小さく絞り込むことのできるテスト集合を用いるアプローチと多様な応答を出力するように観測点を増やすアプローチがある. 本研究における観測性の定義化は回路構造のみに依存するものと考えられるため, 以降では観測点を増やすアプローチについてのみ議論する.

3. 故障の分解困難性

本節では回路構造における分解を困難にしている要因として考えられる観測点と故障の関係と, 故障の独立性について述べる.

3.1 観測点と故障の関係

ある故障がより小さな故障候補集合に分解されるには, その故障自体が観測点において多様な応答を持つことが可能であること (性質 1), および他の故障と異なる応答を多く持つことが可能であること (性質 2) が挙げられる.

3.1.1 単一故障の応答

性質 1 については, その故障の影響が到達可能な観測点を多く持つことが考えられる. ある故障がその故障の影響が到達可能な観測点を n 個持っているなら, その故障が存在する場合に出現可

能な応答ベクトルの組合せは 2^n-1 となる。従って、故障の影響の到達する観測点数が少ないほど出現可能な応答ベクトルの組合せが少なくなり、故障の応答の多様性が損なわれ、故障の分解が困難になると考えられる。

3.1.2 複数の故障の応答

性質2については2つの側面から考えられる。

1つは同じ観測点に到達可能な故障数である。

図2を用いて説明する。

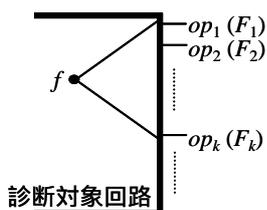


図2 故障と観測点の関係 (I)

図2にある故障 f は回路の観測点 op_1, op_2, \dots, op_n に到達可能であり、観測点 op_1, op_2, \dots, op_n にはそれぞれ故障集合 F_1, F_2, \dots, F_n が回路構造上到達可能であることを表している。このときの f と同じ応答ベクトルを観測する可能性のある故障集合は観測点を共有する故障集合 F_1

$F_2 \dots F_n$ となる。よって、ある故障の影響が到達可能な観測点に到達可能な他の故障が多ければ、テストベクトルを印加したとき同じ応答ベクトルを出力する可能性のある故障数が多くなり故障の分解が困難になると考えられる。

もう一つは故障対の共有する観測点数である。故障集合を分解することはその集合を構成する任意の故障対を分解することと同義である。従って、故障集合の分解困難性は集合を構成する任意の故障対の分解困難性に直結する。図3を用いて説明する。

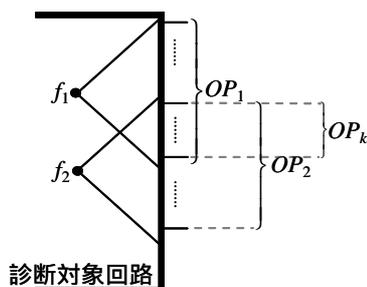


図3 故障と観測点の関係例 (II)

図3では、故障対 (f_1, f_2) はそれぞれ観測点集合 OP_{n1} と OP_{n2} の到達可能な観測点集合を持ち、その内 OP_k の観測点集合を共有している。性質1の議論から故障 f_1 と f_2 はそれぞれ $2^{|OP_{n1}|-1}$ と $2^{|OP_{n2}|-1}$ の出現可能な組合せを持つが、その内観測点集合 OP_k のみにフェールが現れる $2^{|OP_k|-1}$ 通りのフェールの組合せが観測された場合、 f_1 と f_2 で同じ応答ベクトルを観測している可能性があり、分解が困難であると考えられる。よって、故障対の共有する観測点数が大きいほど故障の分解は困難であると考えられる。

3.2 故障の独立性

テスト生成の高速化手法の1つに故障の独立性[10]を利用した手法[11]がある。故障の独立性とは、ある故障対のそれぞれの故障を検出するテスト集合に、同じテストベクトルが含まれないことを意味する。

故障診断の見地から議論すると、故障対のテスト集合が独立していれば、その故障対は同じテストベクトルで検出できないため、両方の故障を検出できれば結果的に分解できるので、これらの故障は分解容易といえる。本研究では、検出できるテスト集合の独立な故障を入力パターン独立ということにする。

ある故障対が検出されるとき観測点集合で観測できる応答ベクトルが必ず異なるとき、このような故障対も検出されれば結果的に分解できるので分解容易といえる。本研究で、はこのような故障を入力パターン独立に対して、応答パターン独立ということにする。

入力パターン独立な故障や応答パターン独立な故障を持たない故障はそれだけ分解しなければならない故障が多くなるので分解困難といえる。

4. 観測性の定義化

本節では、前節までで議論した観測困難性を考慮して故障診断における観測性の定義化を行い、その定義式について説明する。

まずある故障対 (f, f_i) の分解困難性 $Rev(f, f_i)$ について考えると、3.1節から、故障 f と f_i が到達可能な観測点数が少なく、その中の多くの観測点を共有していれば分解は難しいと考えられるため、 $Rev(f, f_i)$ を次のように定義する。

$$Rev(f, f_i) = \frac{|OP_f \cap OP_{f_i}|}{|OP_f \cup OP_{f_i}|}$$

OP_f は故障 f の到達可能な観測点集合を表している。 $Rev(f, f_i)$ は分解が困難なほど値が大きくなる。これに 3.1 節と 3.2 節の故障の独立性を考慮して、故障 f の分解困難性を次のように定義する。

$$Obv(f) = \sum_{f_i \in F(f)} Rev(f, f_i)$$

$Obv(f)$ は故障 f の観測性を表し、 f_i は故障集合 $F(f)$ の要素の故障である。 $F(f)$ は入力・応答パターン独立な故障を除いた故障集合、言い換えると、故障 f と同じテストベクトル故障が検出され、そのときに同じ応答ベクトルを観測する可能性のある故障集合である。この故障集合 $F(f)$ を f の分解対象故障集合とする。 $F(f)$ のサイズが大きいと (2-1) の分解困難な要因から、分解が困難となると考えられる。よって、 $Obv(f)$ は 3 節で議論した故障の分解困難性をすべて考慮している。

5. 故障の独立判定

4 節で定義した観測性を求めるには、分解対象故障集合 $F(f)$ を計算する必要がある。しかし論理的にすべての独立な故障を求める難しさは、入力パターン独立な故障の判定だけでも NP 困難となり [10] 現実的ではない。そこで、本論文では回路構造から比較的高速に独立性を判定できる手法で判定できる故障対についてのみ判定し $F(f)$ を計算する。故障モデルは単一縮退故障のみ対象としている。

5.1 独立判定手法の概要

まず、回路の FFR (Fan-out Free Region) の内部の故障対の入力パターン独立判定法について説明する。論理ゲート入出力信号線上の縮退故障については等価、支配、独立の 3 つの関係のいずれかが存在する。論理ゲートの入出力信号線における入力パターン独立な故障対は次の 2 つのいずれかの条件を満たしている。

- (i) 同一信号線上の 0 縮退故障と 1 縮退故障
- (ii) 同一ゲートの入力信号線の非制御値 [12] を縮退値とする縮退故障

(i) と (ii) の条件を満たす例を図 4 に示す。図 4

の故障対 (f_a, f_b) は独立な故障対である。それに加えて独立な故障対について一方を支配しているあるいは等価である故障ももう一方の故障と独立である。図 4 を用いると、 f_b を支配している故障、あるいは等価である故障と f_a は独立の関係にあるといえる。このような関係の計算処理は FFR 内部の故障対であれば容易に行え、かつ全て求めることができる。

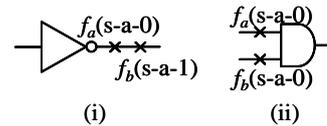


図 4 ゲート入出力線における独立な故障の例

次に、FFR の異なる故障対の入力パターン独立判定について説明する。ここでは、テスト生成に用いられる含意操作を利用する。含意操作は、ある信号線に論理値を与えたとき一意的に他の信号線の論理値を決定する操作である。たとえば、信号線 a の論理値を 0 にしたとき、含意操作により、信号線 b の論理値が 0 になったとする。 a の値 0 は、 a の 1 縮退故障の検出に必要なが、そのとき b の値 0 になることで、 b の 0 縮退故障は a の 1 縮退故障と同じパターンで検出できないことがわかる。含意操作により判定できる入力パターン独立判定の具体例を図 5 に示す。

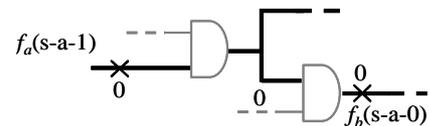


図 5 含意による入力パターン独立判定

図 5 では、故障 $f_a(s-a-1)$ を仮定する信号線に論理値 0 による含意操作を表している。このとき別の故障 $f_b(s-a-0)$ が仮定される信号線の論理値は 0 となる。この結果、故障 f_a が活性化されると故障 f_b は決して活性化されないため故障対 (f_a, f_b) は入力パターン独立であることがわかる。故障の活性化に相当する含意操作を利用することで、FFR の異なる故障についても独立な故障対を判定できる。

同じテストベクトルで観測点に故障の影響が到達不能であることによる独立な故障の判定は、伝搬阻止情報の獲得を伴う静的学習により行える [14]。伝搬阻止の学習による故障の独立の判定を図 6 に示す。

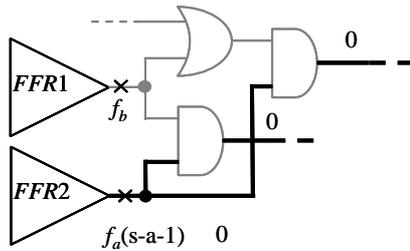


図 6 阻止による入力パターン独立判定

図 6 では、 $f_{a(s-a-1)}$ は FFR2 の出力の故障であり、 f_b は FFR1 の出力の故障である。 f_a と f_b はそれぞれ単一縮退故障である。 f_a が活性化されるようなテストベクトル、つまり図 6 の AND ゲートの太線で示す入力値が 0 になるパターンでは、伝搬阻止の学習処理から f_b の故障の影響の伝搬が阻止されることがわかる。よって、 f_a と f_b が同じテストベクトルで検出することはできない。したがって、故障対 (f_a, f_b) は独立である。同様の理由で、 f_a が活性化されるようなテストパターンでは f_b のみならず FFR1 内のすべての故障の影響の伝搬が阻止される。つまり、FFR1 にある全ての故障と f_a は故障独立である。さらには、FFR 内部の故障の入力パターン独立を用いることで FFR2 にある故障と、 f_a を支配している FFR2 内部にある故障も独立であることが分かる。

応答パターン独立な故障の判定は、ある故障対のそれぞれの故障の影響が到達可能な観測点集合に同じ観測点を含まない(独立)ならば、応答パターン独立と判定できる。

5.2 判定処理手順

まず、入力パターン独立判定の前処理として伝搬阻止情報の獲得を伴う静的学習処理を行う [13],[14]。分解対象故障集合 $F(f)$ は f に対して入力パターン独立でもなく、応答パターン独立でもない故障集合である。従って、本手法では $F(f)$ は、 f と応答パターン独立でない故障から f と入力パターン独立と判定された故障を取り除き、残った故障集合として求めている。

6. 実験

本節では ISCAS'89 ベンチマークのフルスキャン順序回路に対して 4 節で定義した観測性を評価した実験結果を報告する。

6.1 実験方法

与えられたテスト集合により診断木を構成すると、回路に仮定した故障集合または故障候補集合がどのように分解されたか視覚的にわかる。診断木の葉の部分故障集合は用いたテスト集合で分解できなかった故障集合である。よって診断木を構成したとき回路構造的に分解困難な故障は用いるテスト集合によらず大きな葉に属する可能性が高いといえる。

そこで、定義した観測性の評価をするためランダムに回路にテストパターンを印加し、診断木を構成する処理を繰り返すことで各故障の属する葉の大きさの平均値を計算し、それらと定義した観測性の関係を用いて評価を行った。

しかし、この実験方法だけではランダムなテストベクトルでは検出困難な故障について評価が困難なので、テスト生成により生成したテスト集合を用いた診断木を構成する実験も併せて行った。

6.2 実験結果

ランダムなテストベクトルを用いた実験では、検出可能な未検出故障の割合が 10% 以下になるまでランダムパターンを印加し、診断木を構成する処理を 10 回繰り返した。その結果を図 7 に示す。X 軸は診断木を構成したときの葉の大きさの平均であり、(検出されたときの葉の大きさの和)/(診断木を構成したときに検出された回数)として求めている。Y 軸は定義した観測性 $F(f)$ である。

テスト生成により得られたテスト集合による実験では、n-detection 法 [15] を用いて $n=1 \sim 10$ の時に得られたテスト集合を用いた。結果を図 8 に示す。図中のドットが回路に仮定された故障を表している。

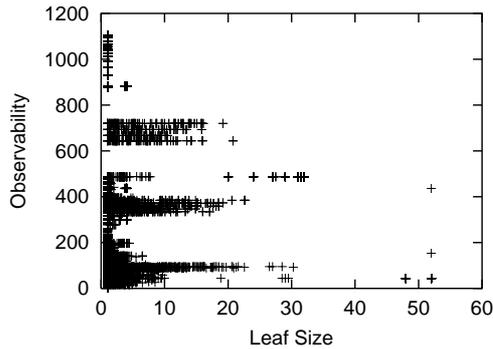


図7 ランダムパターンによる評価結果

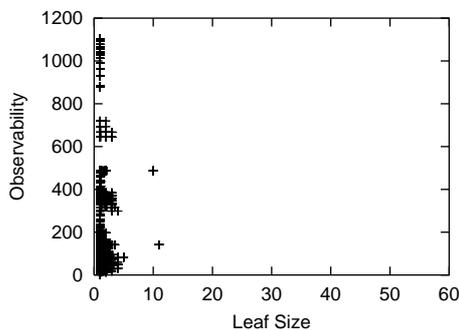


図8 ATPG テストパターンによる評価結果

グラフから観測性値が大きいにも関わらず葉の平均の大きさの小さい故障が多く存在するため、本論文で定義した観測性は故障診断のための観測点挿入のための尺度としてはまだ十分ではなく、更に改良を重ねる必要があることがわかった。

7. まとめ

本論文では故障診断のための観測点挿入を想定した観測性の定義を試みた。実験の結果、考慮した性質の一部を確認することができたが、定義した観測性の尺度に関しては更に改良する必要があることも分かった。

今後は故障の分解困難な要因をさらに検討し、実用に耐えうる観測性を定義して、それに基づいた故障診断用観測点挿入手法を提案する予定である。

参考文献

- [1] I. Pomeranz and S. M. Reddy, "On Dictionary-Based Fault Location in Digital Logic Circuits," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 46, no. 1, pp. 48-59, 1997.
- [2] T. G. Runing, U. Mahlstedt, and H. Koopmeiners, "DIATEST: A Fast Diagnostic Test Pattern Generator for Combinational Circuits," *Proc. ICCAD*, pp. 194-197, 1991.
- [3] M. Geuzebroek, J. der Linden, and A. van de Goor, "Test Point Insertion for Compact Test Sets," *Proc. ITC*, pp.292-301, 2000.
- [4] T. Hosokawa, M. Yoshimura, and M. Ohta, "Novel DFT Strategies Using Full/Partial Scan Designs and Test Point Insertion to Reduce Test Application Time," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E84-A, no.11, pp. 2722-2730, 2001.
- [5] M. Yoshimura, T. Hosokawa, and M. Ohta, "A Test point Insertion Method to Reduce the Number of Test Patterns," *Proc. ATS*, pp. 298-304, 2002.
- [6] M. Nakao, S. Kobayashi, K. Hatayama, K. Iijima, and S. Terada, "Low Overhead Test Point Insertion for Scan-based BIST," *Proc. ITC*, pp. 486-497, 1999.
- [7] I. Pomeranz, S. Venkataraman, and S. M. Reddy "Z-DFD: Design-for-Diagnosability Based on the Concept of Z-detection," *Proc. ITC*, pp.489-497, 2004.
- [8] N. Kujii, T. Ishihara, and S. Nakajima, "EB-Testing-PAD Method and Its Evaluation by Actual Devices," *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, vol. E85-D, No.10, pp. 1558-1563, 2002.
- [9] L. H. Goldstein, and E. L. Thigpen, "SCOAP: Controllability/Observability Analysis Program," *Proc. DAC*, pp. 283, 1980.
- [10] S. B. Akers, and C. Joseph, "On the Role of Independent Fault Sets in the Generation of Minimal Test Sets," *Proc. ITC*, pp. 1100-1107, 1987.
- [11] I. Pomeranz, L. N. Reddy, and S. M. Reddy, "COMPACTEST: A Method to Generate Compact Test Sets for Combinational Circuit," *Proc. ITC*, pp. 194-203, 1991.
- [12] M. Abramovici, M. A. Breuer, and A. D. Friedman, *Digital Systems Testing and Testable Design*, Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 1990.
- [13] M. Schulz, E. Trischler, and T. Sarfert, "SOCRATES: A Highly Efficient Automatic Test Generation System," *IEEE Trans. on CAD*, pp. 126-137, 1988.
- [14] C. Wang, I. Pomeranz, and S. M. Reddy, "REDI: An Efficient Fault Oriented Procedure to Identify Redundant Faults in Combinational Logic Circuits," *Int'l Conf. on CAD*, pp. 370-374, 2001.
- [15] S. M. Reddy, I. Pomeranz, and S. Kajihara, "Compact Test Sets for High Defect Coverage," *IEEE Trans. CAD*, vol. 16, no. 8, pp. 923-930, 1997.

連絡先

連絡先氏名 豊田 直哉
 所属機関 九州工業大学 大学院情報工学研究科
 情報システム工学専攻
 所在地 〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4
 電話番号 0948-28-7685
 FAX 番号 0948-29-7665
 E-mail toyota@aries30.cse.kyutech.ac.jp