

活性化入力系列を用いた 順序回路の故障診断に関する一考察

柳田 宣広 高橋 寛 高松 雄三

愛媛大学 工学部 情報工学科
〒790-77 松山市文京町3

あらまし 活性化入力対を含む入力系列の対（以下、活性化入力系列という）を利用した順序回路の多重縮退故障に対する診断法を提案する。まず、順序回路の単一縮退故障のテスト系列から活性化入力系列を生成し、その活性化入力系列を順序回路の診断用テスト系列として導入する。次に、この診断用テスト系列を用いて、部分回路に分割した順序回路の多重縮退故障を診断する方法を述べる。この診断法は組合せ回路の診断法 [8] を順序回路へ拡張したものであり、観測される外部出力値のみに基づいて、活性化入力系列が生成する活性化経路と部分回路との関係から故障候補を部分回路ごとに推論する。最後に、提案する診断法をベンチマーク回路に適用してその有効性を考察する。

キーワード 順序回路, 故障診断, 活性化入力系列, 部分回路

A Study for Fault Diagnosis in Sequential Circuits using Sensitizing Sequence Pairs

Nobuhiro Yanagida, Hiroshi Takahashi and Yuzo Takamatsu

Department of Computer Science, Faculty of Engineering
Ehime University, Matsuyama, 790-77 JAPAN

Abstract This paper presents a new approach to multiple fault diagnosis in sequential circuits by using input-sequence pairs having sensitizing input pairs. We call such the input-sequence pair the sensitizing sequence pair in this paper. First, we generate sensitizing sequence pairs from a test sequence detecting a single stuck-at fault in a sequential circuit and use a set of sensitizing sequence pairs to diagnose multiple faults in the sequential circuit. Next, we describe a method for diagnosing multiple faults in sequential circuits partitioned into subcircuits. This represents an extension of our previous work dealing with combinational circuits[8]. From a relation between a sensitizing path generated by a sensitizing sequence pair and a subcircuit, this method deduces the suspected faults for the subcircuits, one by one, based on the responses observed at primary outputs. Finally, we study the efficiency of the method from experimental results for benchmark circuits.

key words sequential circuit, fault diagnosis, sensitizing sequence pair, subcircuit

1. まえがき

VLSIの大規模・高集積化に伴い、その故障診断は、ますます困難かつ時間のかかる処理となっている。

組合せ回路に対する故障診断は古くから研究されており [1]、多くの故障診断法が開発されている [2]-[8]。一方、テスト容易化設計が行われていない順序回路（以下、順序回路という）に対する故障診断法として、組合せ回路の診断法 [2] を順序回路に拡張した診断法がある [9]。この診断法はテスト系列に対する外部出力の観測結果から故障候補を推論するものであるが、実用回路に対する具体的な評価はなされていない。また、組合せ回路に対する故障解析法 [3] を順序回路に応用した結果が報告されているが [10]、十分な診断結果は得られていない。

また、順序回路のテスト系列に対する故障シミュレーションの結果から故障診断を行う手法も報告されている [11]-[13]。これらの診断法は故障辞書法に基づくものであり、診断結果は用いるテスト系列の能力に依存する。従って、検出できない故障は診断できない。また、順序回路の診断のためのテスト系列を生成する方法 [14]、順序回路の故障辞書の圧縮法 [15] などの研究もなされている。しかしながら、これらも故障辞書あるいは診断木 [14] を用いる方法であるため、実用的には単一故障の診断法である。

一方、電子ビームテストを用いる順序回路の診断法として、ゲート故障を対象とした診断法 [16] や、通常のフリップフロップをセット・リセット可能なフリップフロップに置き換えた順序回路に対して、電子ビームテストによる観測と故障解析を併用する多重縮退故障の診断法 [17] が提案されている。

一般に電子ビームテストで内部信号線を観測することは、多くの時間と労力を必要とする。従って、電子ビームテストを用いない順序回路の多重故障の診断法を開発することは重要である。ところが筆者らの知る限りでは、順序回路の多重故障を外部出力の観測結果のみから診断する実用的な方法およびその具体的な評価はないようである。

そこで、本稿では、順序回路の多重縮退故障を外部出力の観測結果のみから診断する方法を提案する。まず 2. で、順序回路の単一縮退故障のテスト系列から活性化入力系列を生成し、その活性化入力系列を順序回路の診断用テスト系列として導入する。次に 3. で、この診断用テスト系列を用いて、部分回路に分割した順序回路の多重縮退故障を診断する方法を述べる。この診断法は、組合せ回路の診断法 [8] を順序回路へ拡張したものであり、部分回路に分割した

順序回路に対して、部分回路ごとに活性化入力系列が生成する活性化経路と部分回路との関係から、観測される外部出力値のみに基づいて故障候補を推論する。最後に 4. で、本手法を ISCAS'89 ベンチマーク回路に適用した計算機実験の結果を示す。

2. 活性化入力系列

ここでは活性化入力系列と診断用テスト集合について述べる。本稿の診断対象とする回路は AND, OR, NAND, NOR, NOT ゲートおよび D フリップフロップから構成される同期式順序回路であり、対象とする故障は、組合せ回路部分の全信号線上の 0 および 1-縮退故障である。

[定義 1] (活性化入力系列) 活性化入力系列は、初期化入力系列、活性化入力、および伝搬入力系列からなる入力系列の対である。回路に初期化入力系列 $V_{init} = \{v_1, \dots, v_{i-1}\}$ 、活性化入力 v_i 、伝搬入力系列 $V_{prop} = \{v_{i+1}, \dots, v_{leng}\}$ を与え、得られる出力系列を O とする。次に、回路に初期化入力系列 V_{init} 、活性化入力 v'_i 、伝搬入力系列 V_{prop} を与え、得られる出力系列を O' とする。ここで、 v'_i は v_i と 1 ビットだけ異なる m ビットの入力であり、 m は順序回路の外部入力数、 $leng$ は入力系列長を表す。 O と O' が、活性化入力を与えてから最大 $frame_width$ 時刻間に、1 ビット以上異なる出力系列であるとき、入力系列 $V = V_{init} // v_i // V_{prop}$ と $V' = V_{init} // v'_i // V_{prop}$ を活性化入力系列と呼ぶ。ここで、 $//$ は接続を表す。また、 v_i と v'_i を活性化入力対と呼び、異なるビットを変化信号値 $D(\bar{D})$ で表す。ここで、 D は 0 から 1、 \bar{D} は 1 から 0 への変化信号値を表す。□

定義 1 の活性化入力系列は、単一縮退故障のテスト系列から生成することができる。

今、順序回路を時間展開した長さ $leng$ の反復回路を考える。この反復回路に活性化入力系列 V, V' を回路に与えると、時刻 T_i における変化信号値 $D(\bar{D})$ は回路内を伝搬し、 T_i 以後の時刻で外部出力において観測される。本手法では、 $\{0, 1, D, \bar{D}\}$ の 4 値を用いて、活性化入力系列によって活性化された経路に基づいて故障診断を行う。

次に、順序回路の検査点、活性化入力系列の活性化率および診断用テスト集合を定義する。

[定義 2] (検査点) 順序回路における次の信号線を回路の検査点とする。

- 外部入力線
- 分岐先信号線

- フリップフロップの出力線 □

[定義 3] (活性化率) 活性化入力系列を評価する尺度として、活性化率を次のように定義する。ここで、活性化された検査点とは活性化経路上の検査点を表す。

$$\text{活性化率 (\%)} = \frac{\text{活性化された検査点の数}}{\text{検査点の総数}}$$

[定義 4] (診断用テスト集合) 単一縮退故障のテスト系列 $\{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\}$ から生成する次の活性化入力系列の集合を診断用テスト集合という。

$$\begin{aligned} V_1 &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_1^1 &= \{v_1^1, v_2, \dots, v_{leng}\} \\ V_1 &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_1^2 &= \{v_1^2, v_2, \dots, v_{leng}\} \\ & \vdots & & \vdots \\ V_2 &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_2^m &= \{v_1^m, v_2, \dots, v_{leng}\} \\ V_2 &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_2^1 &= \{v_1, v_2^1, \dots, v_{leng}\} \\ & \vdots & & \vdots \\ V_2 &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_2^m &= \{v_1, v_2^m, \dots, v_{leng}\} \\ & \vdots & & \vdots \\ V_{leng} &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_{leng}^1 &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}^1\} \\ & \vdots & & \vdots \\ V_{leng} &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}\} & V_{leng}^m &= \{v_1, v_2, \dots, v_{leng}^m\} \end{aligned}$$

ここで、 m は回路の外部入力数、 v_x^y はテスト v_x の y 番目 ($y=1 \sim m$) の入力値を反転させたテストである。生成される活性化入力系列の最大数は $leng \times m$ である。 □

図 1 に $frame_width = 4$ の場合の活性化入力系列の例を示す。ここで、 $\{V_1, V_1^y\}$ などは m 個の活性化入力系列からなることを表している。

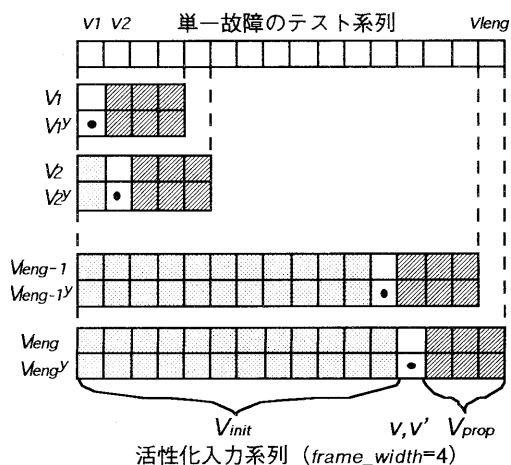


図 1. 診断用テスト集合.

3. 活性化入力系列を用いた故障診断

ここでは順序回路の故障の推論法について述べる。

[定義 5] (部分回路) 回路の外部出力線、分岐元信号線、およびフリップフロップの入力線を出力とし、検査点を入力とする樹状回路を部分回路と呼ぶ。 □

[定義 6] (部分回路のレベル) 部分回路 S_k のレベルを $l(k)$ で表す。

- S_k の出力が外部出力のとき、 $l(k) = 1$
- S_k の出力がフリップフロップの入力のとき、 $l(k) = 2$
- それ以外のとき、 $l(k) = 1 + \max(l(k1), \dots, l(kn))$. ただし、 S_{k1}, \dots, S_{kn} は S_k の出力の分岐先信号線をそれぞれ入力とする部分回路である。 □

本手法では、被検査回路に対して診断用テスト集合 (活性化入力系列) を与え、得られた観測値に基づいて故障の推論を行う。組合せ回路の故障診断アルゴリズム [8] を順序回路に応用するため、被検査回路を $frame_width$ 時刻間時間展開した反復回路として扱い、組合せ回路的に処理する。

診断はレベルの低い部分回路から順に、部分回路ごとに行う。各部分回路の診断は出力の正常値と観測値*に基づいて行われる。ここで、観測値*は、レベル 1 の部分回路に対しては外部出力での観測値、レベル $k (k > 1)$ の部分回路に対しては後述のアルゴリズムによって推定した値である。故障の推論は以下に述べる推論規則と推論手続き (G) に従って行う。

推論規則

[規則 1] 正常値が D または \bar{D} で、観測値*が 0 または 1 の場合、正常値と同一の変化信号値の伝搬を妨げる故障が存在する。 □

[規則 2] 正常値と観測値*が D または \bar{D} で一致する場合、正常値と同一の変化信号値の伝搬を妨げる故障は存在しない。 □

[規則 3] 正常値が 0 または 1 の固定値で、観測値*が D または \bar{D} の場合、観測値*と同一の変化信号値を伝搬させる故障が存在する。また、観測値*と同一の変化信号値の伝搬を妨げる故障は存在しない。 □

[規則 4] 正常値が $D(\bar{D})$ で、観測値*が $\bar{D}(D)$ の場合、観測値と同一の変化信号値を伝搬させる故障が存在する。また、観測値*と同一の変化信号値の伝搬を妨げる故障は存在しない。 □

[規則 5] 観測値* D または \bar{D} が多重経路で伝搬している場合、多重経路の再取れんゲートの出力に故障は存在しない。 □

推論手続き (G)

推論手続き (G) は、ゲート G の出力からそのゲートの入力線上の α 縮退故障と出力線上の β 縮退故障を推論する。 G のタイプ、 α および β の値を表 1 に示す。

□

表 1. 推論手続き (G).

type of G	output value of G	α	β
AND	0	0	0
	1	1	1
OR	0	0	0
	1	1	1
NAND	0	1	0
	1	0	1
NOR	0	1	0
	1	0	1
NOT	0	1	0
	1	0	1

これらの推論規則と推論手続き (G) を用いた部分回路の故障診断法を以下に示す。

部分回路 S の故障診断手順

一つの活性化入力系列に基づく部分回路に対する故障診断の手順を次に示す。

- (1) 部分回路 S の出力の観測値*と正常値を決定する。観測値*と正常値の少なくともどちらか一方が変化信号値であれば (2) へ、そうでなければ終了する。
- (2) S の出力に伝搬し得る変化信号値をもつ S の入力を調べる。
- (3) 観測値*と正常値の組合せから、
 - 1) 観測値*が 0 または 1 で、正常値が D または \bar{D} なら (4) へ進む。
 - 2) 観測値*と正常値が等しければ (5) へ進む。
 - 3) 観測値*が D または \bar{D} で、正常値が 0 または 1 である、もしくは、観測値*が正常値の否定値であれば (6) へ進む。
- (4) 規則 1 に基づいて、故障の推論を行う。
 - 1) S の出力ゲート G に対して、観測値*を基に、推論手続き (G) を行う。
 - 2) G の入力から S の入力に至るすべてのゲート G' に対して、 G' の出力で推論された縮退値を基に、推論手続き (G') を行う。
 - 3) 推論されたすべての故障を故障候補に加える。
- (5) 規則 2 に基づいて、故障の推論を行う。
 - 1) S の出力ゲート G に対して、 G が AND または NOR であれば出力値は 0, OR または NAND であれば出力値は 1 として、推論手続き (G) を

行う。

- 2) G の入力から S の入力に至るすべてのゲート G' に対して、 G' の出力で推論された縮退値を基に、推論手続き (G') を行う。
 - 3) 推論されたすべての故障を故障候補から取り除く。
 - 4) 規則 5 に基づいて、多重伝搬経路の再収れんゲートの出力線上の故障を故障候補から取り除く。
- (6) 規則 3 または規則 4 に基づいて、故障の推論を行う。
- 1) (2) で求めた S の入力線をもつゲート G に対して、 G が AND または NAND であれば正常回路において 0 が割り当てられているすべての入力線の 1 縮退故障, OR または NOR であれば正常回路において 1 が割り当てられているすべての入力線の 0 縮退故障を推論する。
 - 2) G の出力から S の出力に至るすべてのゲート G' に対して、 G' の出力で推論された縮退値に基づいて、同様の推論を行う。
 - 3) 推論されたすべての故障を故障候補に加える。
 - 4) S の出力ゲート G に対して、 G が AND または NOR であれば出力値を 0, OR または NAND であれば出力値を 1 として、推論手続き (G) を行う。
 - 5) G の入力から S の入力に至るすべてのゲート G' に対して、 G' の出力で推論された縮退値を基に、推論手続き (G') を行う。
 - 6) 推論されたすべての故障を故障候補から取り除く。
 - 7) 規則 5 に基づいて、多重伝搬経路の再収れんゲートの出力線上の故障を故障候補から取り除く。

□

次に、被検査回路全体の診断手順を示す。以下、 fw は *frame_width* を、 cf は *current_frame* をそれぞれ表す。

回路全体の故障診断法

- (1) すべての活性化入力系列に対して、(2)~(7) を繰り返す。
- (2) 被検査回路に V_{init} を与える。
- (3) 被検査回路に v_i, v_i' を与える。このときの時刻を T_1 とする。
- (4) 被検査回路に V_{prop} を時刻 T_2 から T_{fw} まで与える。
- (5) 時刻 T_1 から T_{fw} まで時間展開した反復回路を考

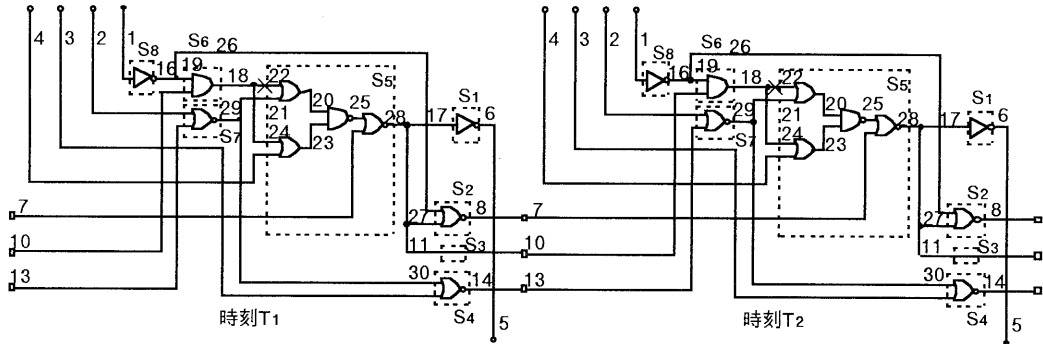


図 2. 反復回路例.

える。cfを1とし、cfの値がfwと等しくなるまで(6),(7)を繰り返す。

- (6) 時刻 T_{cf} における被検査回路の外部出力値に基づいて、レベル1の部分回路から順に各部分回路について前述の部分回路Sの故障診断手順により故障診断を行う。
- (7) これまでに得られた診断結果の積をとる。 T_{cf} を次の時刻に進める。 □

レベル $k(k > 1)$ の部分回路の出力は、直接観測することができないので、その出力を次に述べる方法で推定する。

レベル $k(k > 1)$ の部分回路の出力推定法

部分回路Sの出力の分岐先信号線において、

- (1) 1つ以上の分岐先信号線が正常であると診断されていれば、出力値を正常値とする。
- (2) 1つ以上の分岐先信号線が0縮退故障していると診断され、かつ、それ以外のすべての分岐先信号線が0縮退故障していないと診断されなければ、出力値を0とする。
- (3) 1つ以上の分岐先信号線が1縮退故障していると診断され、かつ、それ以外のすべての分岐先信号線が1縮退故障していないと診断されなければ、出力値を1とする。
- (4) (1)-(3)以外の場合、出力値は推定しない。 □

故障診断の例

図2に示すS27回路[19]の長さ2の反復回路を用いて、これまで述べた故障診断法を説明しよう。ここで信号線1,2,3,4は外部入力(PI)、5は外部出力(PO)、7,10,13はフリップフロップの出力である。S27は点線で囲まれている8個の部分回路に分割される。S27の単一故障のテスト系列[18](系列長94)を用いて $376 = (94 \times 4)$ 個の活性化入力系列を生成した。こ

の活性化入力系列の集合の活性化率は100%である。

今、 $fw = 2$ 、回路をリセット可能とし、信号線22に0縮退故障が生じている回路の故障診断を行う。

- (1) すべての活性化入力系列に対して、以下の処理を行う。
- (2) 初期化入力系列 $V_{init} = \{v_1\} = \{0011\}$ を与える。内部状態は $\{010\}$ となる。
- (3) 活性化入力対 $v_2, v_2^1 = \{0000\}, \{1000\}$ を与える。このときの時刻を T_1 とする。
- (4) 時刻 T_2 に伝搬入力系列 $V_{prop} = \{v_3\} = \{0101\}$ を与える。
- (5) T_1 から T_2 までの2時刻間時間展開した反復回路を考える。時刻 T_1 および T_2 で外部出力において変化信号がそれぞれ観測される。
- (6) $T_{cf} = 1$ として、反復回路の T_1 時刻目を考える。時刻 T_1 におけるPOの値は正常値、観測値ともに $\{1, 0\} = D$ となる。ここで、 $\{1, 0\}$ の1および0は、それぞれ活性化入力系列 $V_{init} // v_2$ および $V_{init} // v_2^1$ を与えたときの時刻 T_1 におけるPOの値である。

1) 外部出力の正常値 D と観測値 D に基づいて、部分回路 S_1 の診断を行う。診断結果 $\{\overline{6_0} \vee \overline{6_1} \vee \overline{17_0} \vee \overline{17_1}\}$ を得る。ここで、 F_α は信号線 F の α 縮退故障を表し、 $\overline{F_\alpha}$ は信号線 F の α 縮退故障が存在しないことを表す。

2) (6-1)の診断結果から観測値*を \overline{D} と推定し、正常値 \overline{D} と観測値* \overline{D} に基づいて、部分回路 S_5 の診断を行う。診断結果 $\{28_0 \vee 28_1 \vee 25_0 \vee 25_1 \vee \overline{7_1} \vee \overline{20_0} \vee \overline{23_0} \vee \overline{24_0}\}$ を得る。

3) 観測値*の推定ができないので、時刻 T_1 においてこれ以上の部分回路の診断を行わない。

- (7) $T_{cf} = 2$ として、反復回路の T_2 時刻目を考える。

時刻 T_2 における PO の値は正常値が $\{1, 0\} = D$ 、観測値が $\{1, 1\} = 1$ となる。

- 1) 外部出力の正常値 D と観測値 1 に基づいて、部分回路 S_1 の診断を行う。診断結果 $\{6_1 \vee 17_0\}$ を得る。
- 2) (7-1) の診断結果から観測値*を 0 と推定し、正常値 \bar{D} と観測値*0 に基づいて、部分回路 S_5 の診断を行う。診断結果 $\{28_0 \vee 25_1 \vee 7_1 \vee 20_0 \vee 23_0 \vee 22_0\}$ を得る。
- 3) (7-2) の診断結果から観測値*を 0 と推定し、正常値 \bar{D} と観測値*0 に基づいて、部分回路 S_6 の診断を行う。診断結果 $\{18_0 \vee 19_1 \vee 10_1\}$ を得る。
- 4) 観測値*の推定ができないので、時刻 T_2 においてこれ以上の部分回路の診断を行わない。
- 5) (7-2) の診断結果から観測値*を 0 と推定し、正常値 \bar{D} と観測値*0 に基づいて、部分回路 S_3 の診断を行う。診断結果 $\{11_0\}$ を得る。
- 6) (7-5) の診断結果から観測値*を 0 と推定し、正常値 \bar{D} と観測値*0 に基づいて、部分回路 S_5 の診断を行う。診断結果 $\{28_0 \vee 25_1 \vee 7_1 \vee 20_0 \vee 23_0 \vee 24_0\}$ を得る。
- 7) 観測値*の推定ができないので、時刻 T_1 においてこれ以上の部分回路の診断を行わない。

同様の診断をすべての入力系列を与えて行くと、被疑故障候補として $\{22_0\}$ を得ることができ、故障箇所を指摘することができる。 □

表 2. 活性化入力系列の生成実験の結果.

circuit name	#patrn	#cp.	#s.cp.	s.rate (%)
s27	94	16	16	100
s208	277	112	67	59.8
s298	535	179	160	89.3
s349	695	179	168	93.8
s382	499	224	199	88.8
s386n	281	227	166	73.1
s400	499	239	207	86.6
s420	260	224	68	30.3
s444	267	263	220	83.6
s526n	894	332	268	80.7
s641n	747	260	203	78.0
s713n	748	320	224	70.0
s820	977	531	425	80.0
s832	763	545	431	79.0
s838	393	448	58	12.9
s1196	973	667	604	90.5
s1238	892	740	653	89.4
s1423	1786	766	681	88.9

4. 実験結果

4.1 活性化入力系列の生成実験

ここでは、先にわれわれが生成した順序回路の単一縮退故障のテスト系列 [18] から、活性化入力系列を生成した。その生成実験の結果を表 2 に示す。実験は $frame_width = 32$ 、回路の初期状態におけるフリップフロップの値がすべて 0 であるとして、活性化入力系列を割り当ててから最大 31 時刻間伝搬入力系列を与えるという条件で生成を行った。表 2 は左から、回路名 [19]circuit name, テスト系列長 #patrn, 検査点の数 #cp.(checkpoint), 活性化経路上に含まれた検査点の数 #s.cp.(sensitized checkpoint), および活性化率 s.rate(%)(sensitizing rate)を表す。この活性化率は単一縮退故障のテスト系列の検出率にほぼ等しい。

4.2 活性化入力系列の診断能力

表 3. 活性化入力系列の診断能力.

circuit name	#a.f.	#d.f.	#ud.f.	d.rate (%)
s27	52	52	0	100
s208	416	246	170	59.1
s298	596	524	72	87.9
s349	680	632	48	90.5
s382	764	547	217	71.6
s386n	772	553	219	71.6
s400	800	515	285	64.4
s420	840	309	531	36.8
s444	888	504	384	56.8
s526n	1052	497	555	47.2
s641n	1278	1063	215	82.9
s713n	1426	1109	317	77.8
s838	1676	271	1405	16.2
s1196	2392	2220	172	92.8
s1423	2846	2148	698	75.5

4.1 で生成した活性化入力系列の診断能力を表 3 に示す。実験は、 $frame_width = 16$ 、回路の初期状態におけるフリップフロップの値がすべて 0 であるという条件で行った。正常回路に活性化入力系列を与え、3. の診断法に基づいて、観測された正常出力の下では存在しないと推論される故障を調べた。表 3 は左から、回路名、全故障数 #a.f.(all faults), 観測された正常出力の下では存在しないと推論された故障の数 #d.f.(diagnosable faults), 観測された正常出力の下では存在の有無を識別できなかった故障の数 #ud.f.(undiagnosable faults), および $d.rate(\%)(diagnosable\ rate) = (\#d.f. \div \#a.f.) \times 100$ を表す。この d.rate は文献 [3] で提案されている

る unconditional falut coverage に相当する。従って、表 3 の観測された正常出力の下で存在の有無を識別できない故障 (undiagnosable faults) は、4.1 の活性化入力系列を用いる本稿の診断法では診断できない故障となる。

4.3 故障診断の実験

表 4. 単一縮退故障の診断実験の結果.

circuit name	#s.f.	#c.f.	CPUtime (sec.)
s208	12	22	56.6
	1	10	61.3
	9	7	57.3
	1	0	60.5
	3	0	56.6
s298	4	26	43.1
	4	36	43.3
	4	45	44.4
	4	36	45.0
	4	33	43.2
s349	1	1	194.0
	1	7	187.2
	1	8	192.8
	1	7	185.1
	1	9	190.0
s386n	1	0	65.5
	2	0	68.8
	22	9	67.6
	8	0	68.8
	11	0	68.8
s420	15	28	186.3
	13	40	174.8
	1	0	192.1
	12	3	185.7
	7	0	186.9
s641n	5	10	1464.1
	60	58	1520.3
	18	4	1529.8
	1	1	1521.2
	2	0	1496.0
s713n	6	9	1735.3
	18	1	1743.2
	21	21	1751.0
	1	0	1756.0
	34	35	1746.3
s1196	40	20	1636.4
	63	61	1619.3
	9	13	1608.2
	12	12	1616.4
	21	3	1621.8
s1423	5	68	4284.3
	7	64	4227.1
	20	129	4293.5
	12	49	4151.3
	1	59	4149.8

単一および 2 重縮退故障に対する故障診断の実験

結果を表 4 および 5 にそれぞれ示す。実験は、縮退故障をランダムに挿入した 5 つの故障回路に対して故障診断を行った。このとき、*frame_width* = 16、回路の初期状態におけるフリップフロップの値がすべて 0 であるとし、また、4.2 で求めた *diagnosable fault* を診断の対象とした。表 4,5 は左から、回路名、被疑故障数 #s.f.(suspected faluts)、故障候補数 #c.f.(candidate faluts)、および処理時間 CPUtime(sec. sun SPARC station10) をそれぞれ表す。ここで、被疑故障とは、3. で述べた診断法により、存在すると推論された故障であり、また、故障候補とは、故障の影響で存在の有無が識別できなかった故障である。

表 5. 2 重縮退故障の診断実験の結果.

circuit name	#s.f.	#c.f.	CPUtime (sec)
s208	21	21	65.2
	12	22	63.8
	25	47	63.6
	3	0	69.3
	12	41	68.2
s298	8	54	51.0
	8	56	51.6
	8	94	51.8
	8	96	51.2
	8	69	51.6
s349	2	28	227.6
	2	26	228.3
	2	32	220.6
	2	35	218.8
	2	25	228.2
s641n	6	9	1826.9
	37	157	1808.2
	125	212	1810.2
	61	63	1806.3
	19	9	1807.8
s1196	77	64	1937.6
	98	44	1946.3
	87	92	1976.3
	76	61	2005.0
	25	16	1992.2

実験を行った故障回路に対しては、挿入した故障を被疑故障の範囲内に指摘することができた。例えば s349 の回路に対しては、単一および 2 重縮退故障に対して、それぞれ 1 および 2 個の被疑故障に絞ることができた。しかしながら、例えば、s208 では単一および 2 重縮退故障に対して、それぞれ 1~12 および 3~69 個の範囲にまでしか被疑故障を絞ることができなかった。なお、被疑故障における等価故障を考慮していないので、それを考慮するとさらに少なくなる。例えば、s298 の単一故障に対して 4 つの被疑故障を得ているが、これらはすべて等価故障で

あった。

故障の影響が数時刻間経て外部出力に伝搬するような故障に対しては、外部出力のみに基づく本診断法では、挿入した故障を被疑故障の範囲内に指摘することができなくなり、故障候補の範囲内に指摘される場合がある。

5. まとめ

本稿では、まず順序回路の故障診断に用いる活性化入力系列を提案しその生成法を述べた。次に、その活性化入力系列を診断用テスト系列として用いた順序回路の多重縮退故障の一診断法を提案した。3重故障以上の実験および被疑故障数をより少なくするアルゴリズムの改良などを行う予定である。

参考文献

- [1] Chang, H.Y., Manning, E. and Metz, G.: "Fault diagnosis of digital systems", John Wiley & Sons (1970).
- [2] Abramovici, M. and Breuer, M. A.: "Multiple fault diagnosis in combinational circuits based on an effect-cause analysis", IEEE Trans. Comput., Vol.C-29, No.6, pp.451-460 (June 1980).
- [3] Cox, H. and Rajski, J.: "A method of fault analysis for test generation and fault diagnosis", IEEE Trans. CAD, Vol.CAD-7, No.7, pp.813-833 (July 1988).
- [4] 山田輝彦, 濱田周治, 松本竜男, 高橋利彦, 中山尊雄: "組合せ回路における多重縮退故障の診断法", 信学論 (D-I), Vol.J74-D-I, No.1, pp.50-57 (Jan. 1991).
- [5] 山田輝彦, 中村芳行: "組合せ回路における単一縮退故障の一診断法", 信学論 (D-I), Vol.J74-D-I, No.11, pp.774-780 (Nov. 1991).
- [6] Takahashi, H., Yanagida, N. and Takamatsu, Y.: "Multiple stuck-at fault diagnosis in combinational circuits based on restricted single sensitized paths", Proc. ATS'93, pp.185-190 (Nov. 1993).
- [7] Itazaki, N., Sumioka, T., Kajihara, S. and Kinoshita, K.: "Automatic fault location using E-beam and LSI tester", Proc. ATS'93, pp.255-260 (Nov. 1993).
- [8] 柳田宣広, 高橋 寛, 高松雄三: "活性化入力対を用いた組合せ回路の多重縮退故障の診断に関する一考察", 信学論 (D-I), Vol.J77-D-I, No.4, pp.318-327 (Apr. 1994).
- [9] Abramovici, M. and Breuer, M. A.: "Fault diagnosis in sequential circuits based on an effect-cause analysis", Proc. FTCS-10, pp.313-315 (Oct. 1980).
- [10] Kuo, T.Y., Wang, J.F. and Lee, J.Y.: "A fault analysis method for synchronous sequential circuits", Proc. 27th DAC, pp.732-735 (1990).
- [11] Rundnick, E.M., Fuchs, W.K. and Patel, J.H.: "Diagnostic fault simulation of sequential circuits", Proc. ITC, pp.178-186 (1992).
- [12] Jou, J.M. and Chen, S.C.: "A fast and memory-efficient diagnostic fault simulation for sequential circuits", Proc. 31st DAC, pp.723-726 (1994).
- [13] Jou, J.M. and Chen, S.C.: "Efficient diagnostic fault simulation for sequential circuits", Proc. ATS'94, pp.94-99 (Nov. 1994).
- [14] Cabodi, G., Gamurati, P., Corno, F., Prinetto, P. and Reorada, M. S.: "Sequential circuit diagnosis based on formal verification techniques", Proc. ITC, pp.187-196 (1992).
- [15] Ryan, P. G. et al.: "Fault dictionary compression and equivalence class computation for sequential circuits", Proc. ICCAD, pp.508-511 (1993).
- [16] Wen, X., Kinoshita, K., Tamamoto, H. and Yokoyama, H.: "Efficient guided-probe fault location method for sequential circuits", IEICE Trans. Inf.&Syst., Vol.E78-D, No.2, pp.122-129 (Feb. 1995).
- [17] 板崎徳禎, 井戸本康孝, 樹下行三: "セットリセット付きフリップフロップを用いた順序回路に対する電子ビームテストを用いた故障位置自動指摘手法", 日本学術振興会第132委員会, 第128回研究会資料, pp.61-70 (Dec. 1994).
- [18] 東 功, 高松雄三: "故障シミュレーションを利用する順序回路の一テスト生成法", 平成6年度電気関係学会四国支部連大公演論文集, 10-16 (Oct. 1994).
- [19] Brglez, F., Bryan, D. and Kozminski, K.: "Combinational profiles of sequential benchmark circuits", Int. Sympto. Circuits & Systems, pp.1929-1934 (May 1989).