

推論とプローブによる組合せ回路の故障診断

Fault Diagnosis Based on Deducing and Probing for Combinational Circuits

山田 輝彦 濱田 周治 松本 竜男 高橋 利彦 中山 尊雄

Teruhiko Yamada, Shuji Hamada, Tatsuo Matsumoto, Toshihiko Takahashi and Takao Nakayama

明治大学理工学部

School of Science and Technology, Meiji University

あらまし VLSIの開発期間を短縮しコストを低減するために、効率のよい故障診断の手法を開発することが必要である。本稿では、大規模な組合せ回路における多重縮退故障を効率よく診断するために、推論とプローブを併用した手法を提案する。この手法に基づき診断システムを試作し、予備実験を行なったところ、全信号線の約15%をプローブするだけで最大分解能を達成できることが分かった。

Abstract An efficient fault diagnostic method should be developed to reduce the turnaround time and cost for developing VLSIs. In this paper, an approach composed of deducing and probing is proposed for efficiently locating multiple stuck-at faults in large combinational circuits. Based on this approach, a pilot system was developed. Preliminary experimental results show that the maximum resolution may be achieved by probing about 15% of the signal lines.

1. はじめに

多品種少量生産の傾向が強くなるにつれ、VLSIの開発時における設計期間の短縮やコストの低減のために故障診断の効率向上が重要になっている。

これまでにいくつかの診断法が提案されているが、それぞれに実用上の問題点を持っている[1][2][3][4]。各故障に対する異常出力を予め辞書に登録しておき観測された出力と照合する故障辞書法[1]は、回路の規模が大きくなると辞書が膨大となり、実用的ではない。単一縮退故障に限定すれば、大規模回路に対しても実用的な手法[2]が提案されているが、多重故障の診断はできない。出力の観測値から故障を推論する結果原因分析法[3]は、辞書を必要とせず、多重故障の診断も可能ではあるが、バックトラッキ

ングのため計算時間は信号線の数に対して指数的に増大する。従って、大規模回路をこの方法で診断することは困難である。電子ビームでチップ内部の値を直接観測する方法[4]は、表層以外の信号線の観測が容易ではなく、一度に観測できる部位が限られている等の問題点がある。

ここでは、結果原因分析に基づく推論と電子ビームによるプローブを併用し、大規模な組合せ回路の多重縮退故障を診断するアルゴリズムを提案する。また、二つの診断法を組み合わせることにより計算時間の短縮、プローブ点の削減がどの程度可能かを計算機実験により明らかにする。

2. 結果原因分析法

結果原因分析法[2]では、信号値の推論に次の

二つの操作が用いられる。

水平含意: テスト t_i における信号線 k の既知の値を用いて同一テストにおける他の信号線の値を推論する。

水平含意には図 1 に示すような 2 種類がある。(a) はゲートの出力からその入力を決定するものであり、(b) はゲートの出力と一方の入力から、他方の入力を決定するものである。但し、このときゲートの出力が縮退してはならない。

垂直含意: 信号線 k のテスト t_i における既知の値を用いて他のテストにおける k の値を推論する。

例えば、図 2 に示すような外部入力につながる AND ゲートについて考える。テスト t_1 における水平含意で信号線 A, B に 1 が推論されたとする (A, B は 0 に縮退していない)。テスト t_2 は信号線 A に 1 を印加しようとしているので、その値は 1 でなければならない。テスト t_1 は、信号線 B に 0 を印加しようとしているにもかかわらず、前述のようにその値は 1 である。従って、B は 1 に縮退している。

外部入力以外でも垂直含意を可能にするために、次の概念が導入されている。

強制値: テスト t_i で信号線 k が強制値 $v \in \{0, 1\}$ を持つならば、 k の値は、テスト t_i で v であるか、全てのテストにおいて \bar{v} である。

図 3 (a) の回路に (b) のテスト入力を加えた場合を考える。外部入力 A, B が (c) に示すようにテスト入力と同じ強制値を持つことは、上記の定義より明らかである。また、(c) に示すように、AND ゲートでは入力の全てが強制値 0 (1) を持つときに限り、出力 C が強制値 0 (1) を持つ。このように、回路内部の信号線の強制値は外部入力の強制値から順に計算できる。

[例 1] 図 4 (a) の回路に (b) のテスト入力が印加された場合を考える。(c) は前もって計算された強制値、(d) は外部出力の観測値である。出力の観測値から、D は縮退しておらず正常であることが分かる。D は正常かつ AND ゲートの出力であるので、(e) に示すように $t_1: D = 1$ から $B = C = 1$ を含意できる (出力のみを用いた水平含意の例)。 t_1 における B, C の強制値 ($B = 1, C = 1$) より、(f)

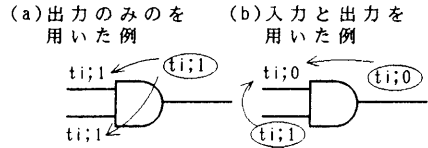
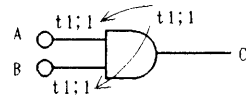


図 1 水平含意の例



	A		B	
	テスト入力	含意	テスト入力	含意
t1	1	1	0	1
t2	1	1	1	1
t3	0		0	1

図 2 垂直含意の例

(a)回路	(b)テスト入力	(c)強制値
	AB	ABC
	t1 00	t1 000
	t2 01	t2 01
	t3 10	t3 10
	t4 11	t4 111

図 3 強制値の計算例

(a)回路	(b)テスト入力
	AB
	t1 01
	t2 11
	t3 00

(c)強制値	(d)観測値	(e)水平含意
ABCD	ABCD	ABCD
t1 0111	t1 1	t1 111
t2 110	t2 0	t2 0
t3 001	t3 1	t3 1

(f)垂直含意	(g)水平含意	(h)水平含意
ABCD	ABCD	ABCD
t1 111	t1 111	t1 0111
t2 10	t2 100	t2 1100
t3 11	t3 111	t3 0111

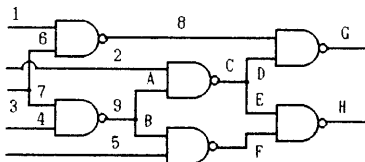
図 4 結果原因分析法による診断例

に示すように $t2; B = 1, t3; C = 1$ を含意できる (垂直含意の例). 更に, (g) に示すように $t2; B = 1, D = 0$ から $C = 0$ を, また, $t3; C = 1, D = 1$ から $B = 1$ を含意できる (入力と出力を用いた水平含意の例). ここで B が 1 縮退故障であることが判明する. また, C に 0 と 1 の両方の値が推論されたので, C は正

常である. 最後に, (h) に示すように C からインバータの入力 A の値が含意される. 以上で, 全ての信号線の値が推論された. ■

[例 2] 次にバックトラックを生じる例として, 図 5 (a) の回路に (b) のテスト入力 that 印加された場合を考える. (c) は前もって計算された強制値, (d) は外部出力の観測値である. 含意だけでは (e) のように推論が途中で停止してしまう. このとき, 例えば (e), (g) の網掛け部に示すように $t3; G = 1$ を正当化するために, 信号線 8 に 0 を仮定して含意を進める必要がある. この操作がバックトラックを生じさせる. この例では (g) に示すような木を生成し, 1 つの矛盾 (図中の \times) と (f) に示す 9 つの解を得て推論は終了する. なお, (g) の楕円形は正当化を必要とする点を, 長方形は値の仮定を, 正方形は解または矛盾を示している. (f) の $n, 0, 1, z, e, x$ は, それぞれ, 正常, 0 縮退故障, 1 縮退故障, 非 1 縮退故障, 非 0 縮退故障, 未知を意味する. ■

(a)回路



(b)テスト入力

	12345
t1	00111
t2	00011
t3	11100
t4	10010
t5	11111
t6	01000

(c)強制値

	123456789ABCDEFHG
t1	0011111 000111
t2	00011001
t3	11100110
t4	1001000
t5	11111110000
t6	01000001111000

(d)観測値

	GH
t1	00
t2	00
t3	11
t4	00
t5	10
t6	11

(e)初期含意

	123456789ABCDEFHG
t1	1 111100
t2	1 111100
t3	1 11
t4	1 111100
t5	1 1110
t6	1 1 00 11

(f)診断解

	123456789ABCDEFHG
1	nnnnxnennnxxnnenn
2	nennxnlnnnxnennenn
3	nnnnlnlnnnennennenn
4	nennlnlnnnnnnnennenn
5	nnnnxnennnxxnnennenn
6	nennxnlnnnxnennennenn
7	nnnnlnlnnnennennennenn
8	nennlnlnnnnnnnennenn
9	xnxxlnlxlenlnnnennenn

(g)診断木

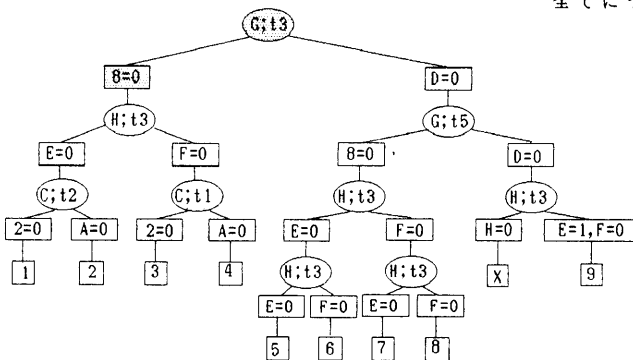


図5 バックトラックを生じる例

3. 診断アルゴリズム

3. 1 プローブによるアルゴリズムの改善

前記のように, 小さな回路でもバックトラックがかなりの数になるので, 推論だけでは大規模回路を扱うことは困難である. そこで, 正当化を必要とするゲートの入力に値を仮定するかわりにプローブで実測する. なお, ここでは一回のプローブでその信号線の値をテスト入力の全てについて測定するものとする.

[例 3] 図 5 (e) の状態で値の仮定が必要になったときを考える. 信号線 8 のプローブにより, 図 6 (a) の網掛け部に示す値が観測されたとする. プローブにより実測された信号線は外部出力と見なせる. 従って, 信号線 8 から含意を再開することができる. 推論は (b) の状態で再び停止するので, 更に信号線 E と 2 をプローブすることにより (c) に示す診断解を得る. 信号線 5, 7, B, F は判定不能であり, 他の信号線

は正常である。ここでは、60回の含意操作と3回のプローブが必要であった。 ■

推論のみによる方法では、一般に、複数の診断解が存在するのに対し、含意とプローブを繰り返せば、唯一の診断解を求めることができる。また、この手法はバックトラックを生じないため、大規模な回路の取り扱いが可能となる。

(a)プローブ		(b)推論表	
	123456789ABCDEFGH		123456789ABCDEFGH
t1	1 111100	t1	0 1 1 1 111100
t2	1 111100	t2	0 0 0 1 111100
t3	1 0 11	t3	111 1 0 11
t4	1 111100	t4	1 0 0 1 111100
t5	1 0 1110	t5	111 1 0 1110
t6	1 00 11	t6	010 0 1 1 00 11

(c)診断解	
	123456789ABCDEFGH
t1	0011 11100 111100
t2	0001 0 1 111100
t3	1110 11011 000 11
t4	1001 0 1 111100
t5	1111 11000 111110
t6	0100 0 111 000 11
解	nnnnxnennnxxxxnn

図6 プローブによる改善例

3. 2 最大分解能を得るためのプローブ

上記の手法によって得られた診断解には、一般に、状態の分からない信号線(e, z, x)が含まれるので、故障箇所を特定するのは困難である。そこで、上記の手法が終了した後、次の処理を行なう。

手順:

- (1) 出力側から入力側に向かってe, x, zを検索
- (2) 見つければ(3)へ、なければ(4)へ
- (3) プローブ、推論(3.1に示した手法)、(1)へ
- (4) 終了

これによって、与えられたテストパターンで達成できる最大分解能を得ることができる。推論は出力から入力に向かって進むので、ここでは、プローブ点を出力から入力に向かって検索する。

[例4] 例3では図7に示す初期診断解が得られた。ここで、上記の手順により最大分解能を求める。

- ・ 状態がeである信号線Fをプローブ
→ Fは1縮退と判明
- ・ 状態がxである信号線5をプローブ
→ 5は正常と判明
- ・ 状態がxである信号線Bをプローブ
→ B, 7は正常と判明

初期診断解では、状態の分からない信号線が4本あったが、3回のプローブで最大分解能が得られた。この例では、合計81回の含意と6回のプローブが必要であった。 ■

プローブと推論とを交互に繰り返すことにより、一般に、状態の分からない信号線よりも少ないプローブ回数で、最大分解能が得られる。

	123456789ABCDEFGH
初期診断解	nnnnxnennnxxxxnn
Fのプローブ後の解	nnnnxnennnxxxxinn
5のプローブ後の解	nnnnnannennnxxxxinn
Bのプローブ後の解	nnnnnnnnnnnnnnnninn

図7 最大分解能を得るためのプローブ例

3. 3 診断アルゴリズムの改善

プローブした信号線は外部入力とも見なせるので、これまではテスト入力から計算するだけであった強制値を再計算することが可能である。そこで、推論を始める前に、次の手続きに従ってプローブを行ない、強制値の表をある程度埋める。これによって、垂直含意の可能性を増大させられる。

手順:

- (1) 入力側から出力側に向かって、強制値を一つも持たない信号線(外部出力を除く)を検索
- (2) 見つければ(3)へ、なければ(4)へ
- (3) プローブ、強制値の再計算、(1)へ
- (4) 前処理としてのプローブ終了

[例5] 上記の手順を3.2で示した手法に追加し、図5(a)の回路の診断を行なう。テ

スト入力、観測値は、それぞれ (b), (d) である。

前処理

- ・信号線 F をプローブ
- ・強制値の再計算 (図 8 (a) の網掛け部)

診断 (3. 2 の手法)

- ・信号線 2 のプローブにより (b) の上段に示す初期診断解を得る。
- ・信号線 5, B のプローブにより (b) の下段に示す最大分解能を得る。

前もってプローブをしない場合は、最大分解能を得るまでに 81 回の含意と 6 回のプローブが必要であったが、この手法を用いると 69 回の含意と 4 回のプローブで最大分解能が得られた。

(a) 前処理後の強制値

	123456789ABCDEFGH
t1	0011111 0001111 0
t2	00011001 1
t3	11100110 1
t4	1001000 1
t5	11111110000 1
t6	010000011110001

(b) 初期診断解及び最大分解能

	123456789ABCDEFGH
初期診断解	n n n n x n e n n n n x n l n n n n
最大分解能をもつ解	n n n n n n n n n n n n n l n n

図 8 前処理としてのプローブによる改善例

4. 実験結果

- 次の各手法を計算機実験により評価した。
- 手法 1: 値の正当化が必要なゲートの入力のみをプローブする (3. 1)
 - 手法 2: 手法 1 に最大分解能を得るためのプローブを追加 (3. 2)
 - 手法 3: 前処理としてのプローブを手法 2 に追加 (3. 3)

実験結果を表 1 に示す。前処理としてプローブを行なう手法 3 により、含意回数、プローブ数及び診断時間がかかり改善されることが分かる。手法 1 と比較しても、含意回数、プローブ数及び計算時間が平均して、それぞれ約 20, 30, 70% も減少している。これは、再計算された強制値が有効に利用されていることを示している。診断時間の著しい短縮は、含意回数の減少に加え、プローブすべき信号線を探す時間の減少による。

手法 3 を用いて、多重度の異なる故障に対する評価を行なった。その結果を表 2 に示す。多重度の増大による、分解能の悪化、プローブ数と診断時間の増分は僅かである。

表 1, 2 から明らかかなように、手法 3 は、信号線数の約 15% のプローブで最大分解能を達成しており、多重故障に対する有効的な診断手法であると考えられる。

ここでは、FAN [5] によって生成された単一縮退故障検出用テストパターンを用いた。手法 2 及び 3 で得られた分解能は、このテストパターンでの最大分解能である。なお、強制値の準備に要する時間は、C3540 でも 40 秒程度である。また、Abramovici の結果原因分析法では、これらの回路の解を得ることは不可能である。

5. むすび

推論とプローブを併用した組合せ回路の診断アルゴリズムを提案し、その有効性を示すために計算機実験を行なった。推論を併用せず多重故障の診断を行なう場合は、信号線の全てをプローブする必要がある。しかし、手法 3 を用いれば、信号線数の 15% 程度のプローブ数で最大分解能が得られている。従って、手法 3 は多重故障の診断に有効であると考えられる。

分解能は、必ずしも十分でなかったが、これはテストパターンに依存する。従って、多重故障診断用テストパターンの生成についての検討が必要である。また、前処理及び、最大分解能を得るためのプローブ戦略についても更に検討していきたい。

表1 各手法の評価

回路名	c880		
信号線数	880		
手法	手法1	手法2	手法3
含意回数	5845.7	5952.0	4197.2
プローブ回数	161.9 18.4%	175.9 20.0%	116.5 (64.2) 13.2%
分解能	25.4	8.9	8.9
時間(s)	152.9	155.1	72.7

回路名	c1908		
信号線数	1908		
手法	手法1	手法2	手法3
含意回数	11352.9	11655.1	9238.2
プローブ回数	392.1 20.6%	438.4 23.0%	239.4 (134.0) 12.5%
分解能	66.7	17.4	17.4
時間(s)	1400.2	1417.2	340.4

回路名	c3540		
信号線数	3540		
手法	手法1	手法2	手法3
含意回数	22244.2	23136.4	18405.8
プローブ回数	837.3 23.7%	909.6 25.7%	651.0 (297.6) 18.4%
分解能	146.1	14.8	14.8
時間(s)	5559.8	5549.3	1412.3

注:

回路: ISCAS'85ベンチマーク回路
 サンプル数: 100
 故障多重度: 2重
 プローブ数: 手法3の()内は、前処理としての
 プローブ数
 下段は信号線数に対する百分率
 分解能: 正常と判断されない信号線の数
 計算機: sun3/60(4MIPS)

表2 多重度の異なる故障に対する評価(手法3)

回路名	c880			
信号線数	880			
故障の多重度	3重	4重	5重	10重
含意回数	4173.1	4157.0	4132.6	4034.4
プローブ数	121.7 (64.3) 13.8%	126.5 (64.5) 14.4%	129.9 (64.8) 14.8%	150.3 (65.2) 17.1%
分解能	13.5	17.1	21.1	40.0
時間(s)	73.1	73.4	73.9	74.4

謝辞

テスト生成プログラムFANおよび評価回路を提供していただいた本学藤原秀雄助教授に感謝します。

参考文献

- [1] H.Y.Chang, E.Manning and G.Metz: "Fault diagnosis of digital systems", Jahn Wiley & Sons, Inc. (1970).
- [2] 山田, 中村: "述語論理を用いた組合せ回路の故障診断手法", 情報研報 Vol.89, No.56, DA-48-7(1989年7月).
- [3] M. Abramovici & M. A. Breuer: "Fault Diagnosis based on Effect-Cause Analysis: an Introduction", Proc. 17th DAC, pp.69-76(June 1980).
- [4] T. Tamama and N. Kuji: "Integrating an Electron-Beam System into VLSI Fault Diagnosis", IEEE Design & Test, 3, 4, pp.23-29 (August 1986).
- [5] H. Fujiwara & T. Shimono: "On the acceleration of test generation algorithms", IEEE Trans. Comput., C-32, pp.1137-1144(Dec. 1983).