

ケアビット分散指向テスト生成法に対するテスト圧縮評価

日大生産工(学部) ○平井 淳士 日大生産工(院) 山崎 紘史 日大生産工 細川 利典

1. はじめに

近年、半導体微細化技術の進歩により、大規模集積回路(Very Large Scale Integrated circuits : VLSI)が大規模化、複雑化し、かつ、故障モデルの多様化に伴い、テストコストの増加が問題となっている。テストコストはテストパターン数と比例関係にあるため、テスト圧縮を用いてテストパターン数を削減することにより、テストコストの削減が期待できる。テスト圧縮とは、自動テストパターン生成(Automatic Test Pattern Generator : ATPG)により生成されたテストパターン集合のテスト品質を維持したままテストパターン数を削減する技術である。テスト圧縮には、テスト生成の過程で圧縮を行う動的圧縮[1,2]と、生成後のテストパターンに対して圧縮を行う静的圧縮[1,2,3,4]がある。また、静的圧縮にはドントケアを利用する手法[1,3]と、故障の被覆関係に基づく手法[2]がある。ドントケアを利用するテスト圧縮では、テストパターン中のドントケアを利用して複数のテストパターンを1つのテストパターンに併合する。故障の被覆関係に基づくテスト圧縮では、故障シミュレーションを利用して冗長なテストパターンを削減する。故障の被覆関係に基づくテスト圧縮としては逆順故障シミュレーション[4]や二重検出法[2]などが存在する。また、テストパターン集合において各外部入力のカラビット数の分散値が小さいほど、静的テスト圧縮において高い圧縮率が得られることが文献[5]で報告されている。本論文では、静的テスト圧縮に有効なテスト集合の生成を目的とした外部入力カラビット分散指向のテスト生成法を提案する。また、提案手法で生成したテスト集合に対してテストパターン併合法[1,3]と二重検出法を用いてテスト圧縮を行った結果について考察する。本論文の構成は次のとおりである。第2章では従来のテスト圧縮手法としてテストパターン併合法と二重検出法について説明する。第3章では、提案手法であるケアビット分散指向テスト生成法について説明する。第4章では提案手法で生成したテスト集合に対して静的テスト

圧縮を行った実験結果を示し、第5章ではまとめと今後の課題について述べる。

2. 静的テスト圧縮

本章では、従来のテスト圧縮手法について説明する。

2.1 節ではドントケアを利用するテスト圧縮手法であるテストパターン併合法[1,3]について説明する。2.2 節では故障の被覆関係に基づくテスト圧縮手法である二重検出法[2]について説明する。

2.1 テストパターン併合法

本論文ではテストパターン併合法を解くために、頂点彩色問題[6]を解く貪欲法のアルゴリズムを用いた。頂点彩色問題を解くテストパターン圧縮では、グラフの頂点をテストパターンとし、併合不可能なテストパターンの頂点間に辺を結ぶことによりテストパターンの圧縮不可能性を無向グラフで表現している。頂点彩色問題では、そのグラフの隣接する頂点が異なる色になるように頂点に色を塗るとき、最小となる色の数を求める問題である。図1は頂点彩色問題の例である。図1の例では、テストパターンTP1とTP2が併合不可能であり、TP2とTP3も併合不可能であり、TP3とTP4も併合不可能であることを示している。図1のグラフは彩色後のグラフである。図1では、グラフの隣接する頂点を異なる色になるように彩色すると、

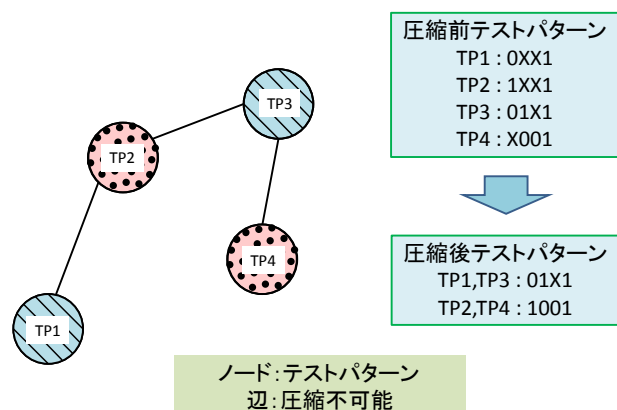


図1. 頂点彩色問題

An Evaluation of Test Compaction for
a Care Bit Distribution Oriented Test Generation Method

Atsushi HIRAI, Hiroshi YAMAZAKI and Toshinori HOSOKAWA

2色で彩色ができた．そのためテストパターン TP1～TP4 の4つのテストパターンは，TP1 と TP3 を併合したテストパターンと，TP2 と TP4 を併合したテストパターンの2個に圧縮可能であることを示す．本論文では頂点彩色問題の貪欲法アルゴリズムのひとつである Dsatur アルゴリズム[6]を用いて実験を行った．

2.2 二重検出法

二重検出法とは，各テストパターンの必須故障[2]情報を基にしたテスト圧縮法である．必須故障とは，テストパターン集合内で，1つのテストパターンでしか検出できない故障である．二重検出法では，故障シミュレーションを用いて，冗長なテストパターンを削減する．二重検出法を用いることにより，テストパターン併合法では削減できなかったテストパターンを削減できる可能性がある．表1に二重検出法で使用する二重検出故障表の例を示す．二重検出故障表は各テストパターンに対して検出可能な故障と，そのテストパターンで検出可能な必須故障数を備えている．表1の例では，テストパターン t1 で検出可能な故障は f1, f2 である．また，故障 f2 と f5 は，それぞれテストパターン t1 と t4 でのみ検出可能であるため，必須故障である．そのためテストパターン t1 と t4 の必須故障数は，ともに1となる．必須故障を検出できる極小テストパターン集合である {t1, t4} を優先して故障シミュレーションを実行することで故障 f1, f2, f4, f5 を検出することが可能である．次に，t2 で故障シミュレーションを実行した場合，故障 f3 も検出可能となる．テストパターン t3 で検出可能な故障 f3, f4 は既にほかのテストパターンで検出済みであるため，テストパターン t3 は削除可能となる．表1の例では，二重検出法を利用することで，テストパターンを3個に圧縮することが可能である．

3. ケアビット分散指向テスト生成法

本章では，提案手法であるケアビット分散指向テスト生成法について説明する．提案手法では，故障影響を伝搬する外部出力を指定してテスト生成を行うことにより，生成するテスト集合のケアビット分散値を小さくする．3.1 節で提案手法の全体アルゴリズムについて説明し，3.2 節で故障影響を伝搬する外部出力を選択する指標に用いる外部出力故障伝搬コストの関数について説明する．

表 1. 二重検出故障表

テストパターン	検出故障	必須故障数
t1	f1,f2	1
t2	f1,f3	0
t3	f3,f4	0
t4	f4,f5	1

3.1 提案手法全体アルゴリズム

本節では，ケアビット分散指向テスト生成法の全体アルゴリズムについて説明する．図2に提案手法の全体アルゴリズムを示す．

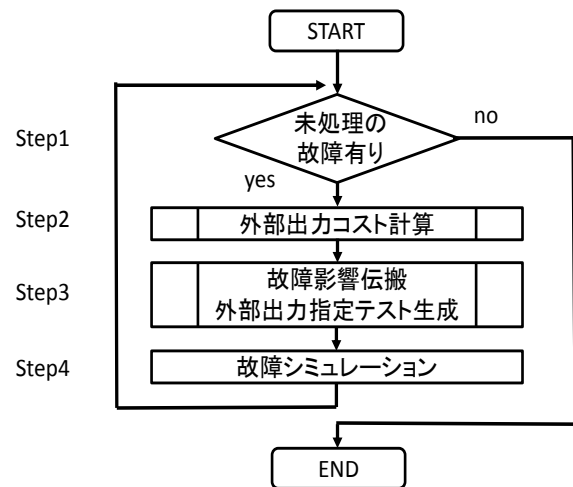


図 2. 提案手法全体アルゴリズム

(Step1)

故障テーブル内の全故障に対してテスト生成を行ったか否かを判断する．全故障に対してテスト生成が終了した場合は処理を終了し，それ以外の場合は Step2 へ進む．

(Step2)

故障影響を伝搬可能な全外部出力に対して故障伝搬コストを計算する．故障伝搬コストの関数については 3.2 節で詳細に説明する．

(Step3)

Step2 で算出した故障伝搬コストをもとに，故障影響伝搬外部出力を指定してテストパターンを生成する．

(Step4)

Step3 で生成したテストパターンで故障シミュレーションを実行し，故障テーブルを更新する．

3.2 外部出力故障伝搬コスト

本節では、図2のStep2の処理である外部出力故障伝搬コストの算出方法について説明する。外部出力故障伝搬コストとは、テスト生成時、故障影響を伝搬する外部出力を選択する際に用いる指標である。外部出力故障伝搬コストは外部入力ケアビット分散の見積りにより与えられる。提案手法では、外部出力故障伝搬コストの小さい外部出力に故障を伝搬するテストパターンを生成することで、外部入力ケアビット分散を小さくする。以下に外部入力ケアビット分散を求める式を示す。

$$s^2 = \frac{1}{n_pi} \sum_{j=1}^{n_pi} (C_i - \bar{C})^2 \quad (1)$$

上記(1)の式において、 n_pi は外部入力の数であり、 C_i は外部入力 i に割当てられたケアビットの数である。 $\bar{C}$ は、テスト集合中の各外部入力に割当てられたケアビット数の平均値である。以下に、各外部入力のケアビット数の平均を求める式を示す。

$$\bar{C} = \frac{1}{n_pi} \sum_{i=1}^{n_pi} C_i \quad (2)$$

ケアビット数の平均 $\bar{C}$ は、各外部入力のケアビット数の総和を、外部入力数で割った相加平均である。また、ある外部出力から構造的に到達可能な外部入力は、その外部出力に故障影響を伝搬するようテストパターン生成を行うとケアビットになる可能性が高いと考えられる。そのため提案手法では、故障を伝搬する外部出力から構造的に到達可能な外部入力にケアビットが割当てられると見積り、故障伝搬コストを求める。以下に、外部入力のケアビット数の見積りを求める式を示す。

$$CE_i(PI_j) = \begin{cases} C_j + 1 & : PO_i \text{ から } PI_j \text{ は到達可能} \\ C_j & : \text{その他} \end{cases} \quad (3)$$

ケアビット数の見積り $CE_i(PI_j)$ は外部出力 i に故障影響を伝搬するテストパターンを生成した際の各外部入力 j のケアビット数の見積りである。 C_j は既に生成済みのテストパターンにおける外部入力 j のケアビット数である。 $CE_i(PI_j)$ は外部出力 i から外部入力 j が構造的に到達可能である場合には C_j に1を足した値となり、それ以外の場合には C_j の値になる。式(4)に外部出力故障伝搬コスト $COST(PO_i)$ を求める式を示す。

$$COST(PO_i) = \sum_{j=1}^n \{CE_i(PI_j) - \bar{CE}\}^2 \quad (4)$$

外部出力故障伝搬コスト $COST(PO_i)$ は外部出力 i を選択してテスト生成を行った際のケアビット分散の見積りである。提案手法では、全外部出力に対し外部出力故障伝搬コストを求め、できるだけコスト値が小さい外部出力に故障影響を伝搬するようなテスト生成を行う。

4. 実験結果

提案手法を用いて生成したテスト集合に対して静的テスト圧縮を実行し、ケアビット分散指向テスト生成法の有効性について考察する。テスト生成対象の回路にはISCAS89ベンチマーク回路の組合せ回路部を用いた。対象とする故障は単一縮退故障である。表2に実験結果を示す。実験結果において「初期テスト集合」はテスト生成後の初期テストパターン集合である。「テストパターン併合法」は、初期テストパターンに対してテストパターン併合法を用いてテスト圧縮を実行した結果である。「二重検出法」は、テストパターン併合法を用いて圧縮後のテストパターン集合に対して二重検出法を用いてテスト圧縮を実行した結果である。

「TP数」はテストパターン数、「分散」は外部入力ケアビット分散、「ドントケア数」はテスト集合中のドントケアの総数を示している。また、「POランダム選択」は、故障伝搬外部出力をランダムに選択してテスト生成を実行した結果を、「TetraMAX」はSynopsys社のテスト生成ツールTetraMAXを用いてテスト生成を実行した結果を示している。実験結果から、提案手法で生成したテスト集合は、ほとんどの回路においてケアビット分散値が他のテスト生成法と比べて低い値となっている。このことから、一部の回路を除いて、提案手法を用いることで外部入力ケアビット分散が小さいテスト集合を生成できることがわかる。しかし、圧縮後のテストパターン数においては、TetraMAXで生成したテスト集合が最も少なく、提案手法とPOランダム選択の結果はほぼ同数である。これは、TetraMAXで生成した初期テスト集合中のドントケアの数が、他の手法と比べて明らかに多いことが原因であると考えられる。提案手法では、外部入力ケアビット分散の値を小さくすることだけを考慮してテスト生成を実行するため、生成後のテスト集合でドントケアの数がTetraMAXと比べて少なくなったと考えられる。

5. おわりに

ケアビット分散指向のテスト生成法を提案し、他のテスト生成法と圧縮率の比較を行った。その結果、提案手法を用いることにより、外部入力ケアビット分散の値が小さいテスト集合を得られた。静的テスト圧縮率では、TetraMAXで生成したテスト集合に及ばなかった。その原因として、提案手法がケアビット分散を小さくすることだけを考慮しているため、生成後のテスト集合におけるドントケアの数が少なくなってしまうことが考えられる。今後は、どのようなテスト集合が静的テスト圧縮で高い圧縮率を得られるのかについて外部入力ケアビット分散と、テスト集合中のドントケアの数などの観点から解析し、新たな静的テスト圧縮指向のテスト生成法について提案していきたい。

参考文献

- 1) P.Goel and B.C.Rosales, “Test Generation and Dynamic Compaction of Tests”, Digest of Papers 1979 Test Conf., pp.189-192, 1979
- 2) S. Kajihara, I. Pomerantz, K. Kinoshita, and S.

M. Reddy, “Cost-Effective Generation of Minimal Test Sets for Stuck-at Faults in Combinational Circuits, ”IEEE Transaction On Computer-Aided Design Of Integrated Circuits And System , Vol. 14, No. 12, pp1496-1504, 1995.

- 3) 八木澤圭, 山崎浩二, 細川利典, 玉木久夫, “テストパターンの静的圧縮における厳密解と貪欲解の比較” 電子情報通信学会, 107, pp.77-82, 2008.
- 4) 樋上喜信, 梶原誠司, 市原英行, 高松雄三, “論理回路に対するテストコスト削減法”, 電子情報通信学会論文誌, pp291-307, 2004.
- 5) H.Yamazaki, M.Wakazono, T.Hosokawa, M.Yoshimura, “A Test Compaction Oriented Don’t Care Identification, ” IEEE Workshop on RTL and High Level Testing 2011, pp69-76
- 6) D.Brelaz, “New methods to color the vertices of a graph”, Communications of the ACM, 22, pp.251-256, 1979.

表 2. 実験結果

回路名	初期テスト集合									テストパターン併合法(TP数)			二重検出法(TP数)		
	提案手法			POランダム選択			TetraMAX			提案手法	POランダム選択	TetraMAX	提案手法	POランダム選択	TetraMAX
	TP数	分散	ドントケア数	TP数	分散	ドントケア数	TP数	分散	ドントケア数						
s27	12	5.4	24	11	5.9	15	12	5.4	39	9	9	7	6	6	6
s208	65	99.2	381	67	95.8	319	87	570.3	1083	51	62	35	36	39	28
s298	104	636.1	1093	82	1280.9	966	115	1019.3	1372	36	38	28	27	30	26
s344	80	441.1	1308	77	551.5	1456	105	706.4	1996	37	37	24	22	23	20
s349	79	346.9	1284	71	534.1	1220	105	693.0	1999	39	39	24	22	27	19
s382	97	326.0	1630	79	460.5	1530	121	584.0	2312	42	35	29	34	31	29
s386	100	585.7	301	92	712.2	403	129	2089.0	627	84	86	77	66	70	69
s400	97	425.0	1628	88	454.7	1730	120	575.8	2297	42	39	27	31	33	25
s420	128	154.7	1623	124	131.2	1320	166	1344.1	4336	89	105	58	66	70	48
s444	98	304.2	1652	77	470.5	1540	113	513.9	2148	40	32	27	31	28	26
s510	94	453.8	882	88	615.2	920	133	2185.8	2478	86	85	68	60	60	61
s526	156	1028.9	2311	131	1502.9	2340	194	1738.0	3343	75	70	61	60	61	53
s641	182	2180.4	7040	149	2786.1	6883	216	794.1	10312	105	104	39	58	65	37
s713	178	1926.9	6901	143	2653.7	6750	217	801.1	10348	115	105	39	63	64	37
s820	169	1347.6	1024	183	1348.0	940	229	7097.7	3236	150	162	111	107	109	102
s832	168	1476.1	969	189	1414.1	678	240	7863.9	3412	147	156	113	106	107	103
s838	243	209.6	6343	247	146.3	5827	348	3780.2	18959	160	191	93	115	122	80
s953	125	1013.3	948	119	1573.6	1002	217	4512.5	2838	113	112	97	88	89	84
s1196	243	4355.7	2938	211	9640.7	2886	320	8671.4	6804	206	207	165	157	159	139
s1238	252	5813.7	3121	235	10128.1	3289	344	10041.5	7318	242	232	175	163	165	145
s1423	318	2237.9	20158	210	4951.6	19293	542	2763.3	45811	167	153	57	68	75	48
s1488	200	429.8	299	194	600.1	195	291	9598.5	1746	189	180	122	126	127	108
s1494	195	377.6	313	190	667.4	267	322	12115.6	1971	181	182	118	130	122	107
s5378	961	7043.6	186932	668	8068.3	190232	1327	8150.3	268947	241	266	157	188	199	152
s9234	1251	41644.0	260408	995	47000.2	256829	1919	13959.3	448900	588	626	190	325	355	177
s13207	2600	20795.4	1641046	1918	53486.6	1653042	3008	20108.3	1927420	355	530	260	287	362	254
s15850	2684	42903.3	1509063	1840	50140.9	1404389	3414	9555.8	2020277	535	587	150	323	388	131
s35932	6519	42567.3	11429805	6016	42593.0	12378533	8690	72914.8	15277142	48	64	20	41	53	20
s38417	5075	10486.8	7565652	4311	10535.1	7527345	8962	10842.7	13562611	290	289	249	259	269	238
s38584	9792	66275.9	14130179	7461	98493.6	13487936	13026	113668.9	18950403	614	606	158	298	304	151