

到達不能状態に基づく順序回路の冗長信号線の同時除去法

四柳浩之

橋爪正樹

為貞建臣

樹下行三[†]

徳島大学工学部電気電子工学科
〒770-8506 徳島市南常三島町2-1

{yanagi4,tume,tamesada}@ee.tokushima-u.ac.jp

[†] 大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻
〒565-0871 吹田市山田丘2-1

kozo@ap.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし 本論文では、いかなる状態からの遷移も存在しない強到達不能状態に着目した冗長除去法を提案する。強到達不能状態における出力と状態遷移だけが正常回路と異なる縮退故障は検出不能故障であり、故障回路においてもその状態が強到達不能状態であるならば、対応する信号線は冗長信号線である。本研究では、強到達不能状態から得られた検出不能故障は、その一部に冗長除去を行った後の回路においても検出不能となることを示し、同時除去可能な冗長信号線について考察する。ベンチマーク回路に対する実験結果により、同時除去可能な冗長信号線があることを示す。

キーワード 到達不能状態, 順序回路, 冗長信号線, 冗長除去, 検出不能故障

A Method for Removing Sequentially Redundant Lines Simultaneously Based on Unreachable States

Hiroyuki Yotsuyanagi, Masaki Hashizume, Takeomi Tamesada and Kozo Kinoshita[†]

Faculty of Engineering
University of Tokushima
Minami-Josamjima 2-1
Tokushima 770-8506 JAPAN

[†] Graduate School of Engineering
Osaka University
Yamadaoka 2-1
Suita 565-0871 JAPAN

Abstract We propose a redundancy removal method based on strongly unreachable states, which are states that have no incoming transition from any state. If a fault affects the output sequence or the state transition only when the circuit starts from strongly unreachable states, then the fault is undetectable. Moreover, if the unreachable states are also strongly unreachable in the faulty circuit, the line corresponding the fault is redundant. In this paper, we present the theorem that the undetectable faults obtained from a strongly unreachable state remain undetectable for the circuit after removing the redundant lines corresponding to one of the faults. We also consider the condition for removing redundant lines simultaneously. Experimental results for benchmark circuits are shown.

key words unreachable state, sequential circuit, redundant line, redundancy removal, undetectable fault

1. はじめに

論理回路の設計においては、回路に設計者の意図しない冗長部分が含まれることがある。回路の冗長部分を判定し、除去することで回路面積を小さくすることができる。また、冗長除去により検出不能故障が少なくなれば、回路のテストビリティを向上できる。したがって、冗長除去は論理再合成に有効な手法の一つとなっている[1,2,5,6,7]。

組合せ回路に対しては、縮退故障のテスト生成手法を用いた冗長信号線の判定法が提案されている。組合せ回路では、検出不能な単一縮退故障をもつ故障回路の外部出力関数は正常回路の外部出力関数と等しく、検出不能故障に対応する信号線は冗長信号線である。

順序回路に対しては、内部状態の遷移を含めた出力系列を考慮する必要があり、テスト生成は組合せ回路に比べて困難である。さらに順序回路の検出不能故障の中には故障回路の一部の状態における出力系列が正常回路で得られない出力系列になるものがあるため、検出不能故障に対応する信号線が冗長信号線であるとは限らない。順序回路の冗長判定手法としては、状態遷移表を用いてすべての状態遷移を考慮した手法が提案されている[2]。状態遷移表が与えられていない回路の検出不能故障の判定手法には、回路の組合せ部分を数時刻分つなぎ合わせた時間展開回路に対して、組合せ回路の冗長除去手法を適用するものがある[3]。またテスト生成のような探索を行わずに、設定不能な複数の信号値から、各信号値の含意関係を調べることで検出不能故障を求める手法も提案されている[4]。

本論文では、文献[5,6]で提案した到達不能状態に基づく冗長判定手法における、冗長信号線の同時除去の可能性について考察する。到達不能状態とは、他の状態から遷移させることのできない状態である。設定不能な信号値の組合せに到達不能状態を用いると、得られる検出不能故障の冗長性が容易に判定できる。

複数の冗長信号線が回路に存在しているとき、一つを除去することで、残りの冗長信号線が冗長でなくなる場合のあることが知られている。したがって、複数の冗長信号線を除去するときには、冗長除去によって回路の内部信号線の関数は変化することを考慮しなけ

ればならない。

組合せ回路については、テスト生成手法を応用した同時除去可能な冗長信号線の判定法が提案されている[7]。この手法は順序回路においても、回路の組合せ部分に対して適用可能である。しかし順序回路的に冗長である信号線の同時除去については、これまでにあまり考察されていない。

本論文では、ある到達不能状態を用いて得られる検出不能故障の集合について、その一部に対応する信号線を除去した後も、残りの故障は除去後の回路において検出不能のままであることを証明し、冗長除去を効率化する手法を提案する。

2. 順序回路の冗長信号線

順序回路においては、検出不能故障に対応する信号線の全てが冗長であるとは限らず、また冗長の定義も回路の内部状態がどのように使われるかにより異なる。本論文では回路が未知の内部状態から用いられるとし、リセット信号が存在する場合はリセット信号も入力系列の一部として考える。

ここでは、信号値を $\alpha \in \{0,1\}$ に固定しても、元の回路の入力系列に対する出力系列の関係が変化しないならば、その信号線を α -冗長信号線であるという。

さらに、信号値を $\alpha \in \{0,1\}$ に固定したとき、回路に数時刻分の任意の入力系列を印加することで、その後の入力系列に対する出力系列の関係が、元の回路の入力系列に対する出力系列の関係と等しくなるならば、その信号線も α -冗長信号線であるという。

α -冗長信号線は、信号線の論理値を固定値 α に置き換えて信号線やゲートを除去することができる。この処理を冗長除去とよぶ。

3. 到達不能状態を用いた冗長信号線の判定

順序回路には、通常動作において遷移させることのできない状態が存在する。それらの状態のうち、他の状態からの遷移が存在しない状態を到達不能状態という。さらにその中で、自身も含め、いかなる状態からの遷移も存在しない状態を強到達不能状態と呼ぶ。

【定義：強到達不能状態】いかなる状態からの遷移も存在しない状態を強到達不能状態という。

図1に示す回路では、状態(0,0)が強到達不能状態である。回路の状態遷移図が得られていない場合でも、フリップフロップの入力関数を用いて設定できない信号値の組合せとして求めることができる[6]。

強到達不能状態への遷移は存在しないため、回路の状態を強到達不能状態には設定できない。したがって、ある縮退故障の検出に必須な信号値の中に、フリップフロップの出力値として到達不能状態の値が含まれるならば、その故障は検出不能故障である。

強到達不能状態に基づく検出不能故障の判定法を以下に示す[5,6]。強到達不能状態ベクトルを $s_u = (s_u(1), s_u(2), \dots, s_u(n))$ ($s_u(j) \in \{0,1,X\}$, X はドントケア値を表す) とする。

強到達不能状態ベクトルの0, 1の論理値を持つ要素 $s_u(j)$ に対応するフリップフロップの出力信号値 $v[q_j]$ に対して、以下に定義する制御不能信号線, 観測不能信号線を求める[4]。ここで信号線 L の信号値を $v[L]$ と表し, $\alpha \in \{0,1\}$, $\beta \in \{0,1\}$ とする。

【制御不能信号線】信号値 $v[L] = \alpha$ を割り当てなければ、信号値を β に設定できない信号線を, $v[L] = \alpha$ に対する β -制御不能信号線という。

【観測不能信号線】信号値 $v[L] = \alpha$ を割り当てなければ、

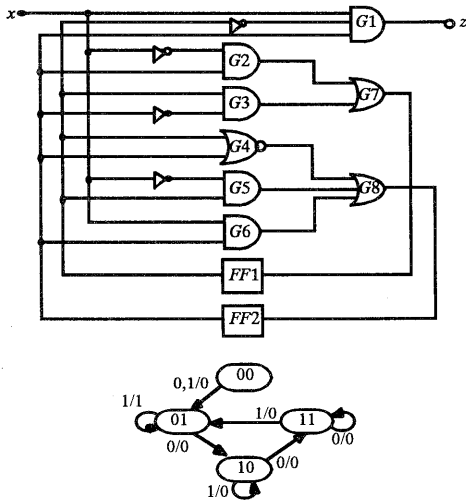


図1 強到達不能状態の例

ば、信号値の変化を出力で観測できない信号線を, $v[L] = \alpha$ に対する観測不能信号線という。

図2に制御不能信号線と観測不能信号線の概念図を示す。 $v[q_j]=1$ に対する制御不能信号線は, $v[q_j]=\bar{1}(=0)$ を割り当てたとき、一意的に信号値が定まる信号線であり、図中では太線で示されている。 $\bar{0}$ が記されている信号線が0-制御不能信号線, $\bar{1}$ が記されている信号線が1-制御不能信号線である。

観測不能信号線は、制御不能信号線を出力に持つゲートの入力線のうち、制御不能信号線以外の信号線とその信号線から入力側の分岐点、外部入力、またはフリップフロップの出力線までの経路上のすべての信号線である。図中では斜線の部分回路(これは分岐を含まない部分回路である)に含まれる信号線が観測不能信号線である。

制御不能信号線, 観測不能信号線と検出不能故障には次に示す関係がある。

【補題1】信号線 M が信号値 $v[L] = \alpha \in \{0,1\}$ に対する β -制御不能信号線であるとき、信号線 M の $\bar{\beta}$ 縮退故障が検出可能であるための必要条件は、信号値 $v[L] = \alpha$ が設定できることである。

【補題2】信号線 M が信号値 $v[L] = \alpha \in \{0,1\}$ に対する観測不能信号線であるとき、信号線 M 上の縮退故障が検出可能であるための必要条件は、信号値 $v[L] = \alpha$ が設定できることである。

これらの補題より、強到達不能状態に基づき検出不能故障を求めるための定理が得られる。

【定理1】強到達不能状態ベクトル $s_u = (s_u(1), s_u(2),$

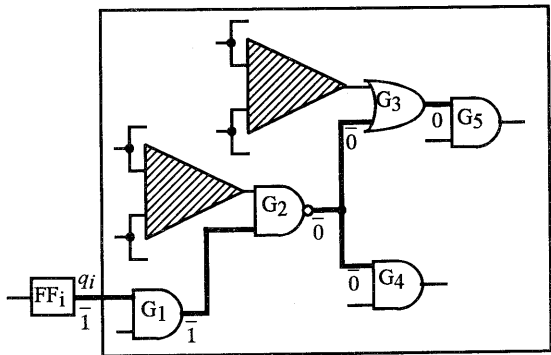


図2. 制御不能信号線と観測不能信号線

..., $s_{u(n)}$ の各要素 $s_{u(i)}$ のうち, $s_{u(i)} \in \{0,1\}$ に対する0-制御不能信号線の集合を $UC0i$, 1-制御不能信号線の集合を $UC1i$, 観測不能信号線の集合を UOi とする. このとき各 i に対して信号線 M が必ず $UC0i$ か UOi に含まれているならば, 信号線 M の1縮退故障は検出不能故障である. 同様に各 i に対して信号線 M が必ず $UC1i$ か UOi に含まれているならば, 信号線 M の0縮退故障は検出不能故障である.

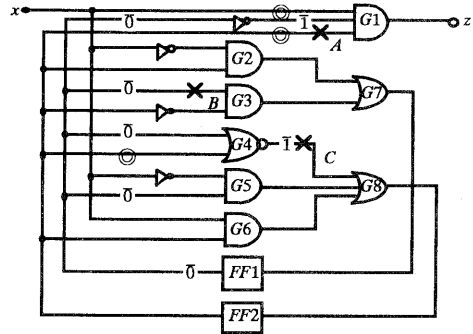
【証明】補題1, 補題2より, 各 i に対して信号線 M が必ず $UC0i$ か UOi に含まれているならば, 信号線 M の1縮退故障が検出可能であるための必要条件は, $s_{u(i)} \in \{0,1\}$ であるすべての i に対して, フリップフロップの出力 q_i の論理値 $v[q_i]$ を $s_{u(i)}$ に設定することである. 状態ベクトルは到達不能状態を表すため, この条件は満たされない. よって信号線 M の1縮退故障は検出不能故障である.

図3に図1の回路において強到達不能状態(0,0)から得られる検出不能故障の例を示す. 図3(a)の $\bar{0}$, $\bar{1}$ で示している信号線はそれぞれ $v[q1]=0$ に対する $\bar{0}$ -制御不能信号線, $\bar{1}$ -制御不能信号線を表し, \odot で示されている信号線は $v[q1]=0$ に対する観測不能信号線である. 図3(b)は同様に $v[q2]=0$ に対する制御不能信号線と観測不能信号線を示す. この回路例では, 信号線Aの1縮退故障, 信号線Bの1縮退故障, 信号線Cの0縮退故障が検出不能故障であることが, 到達不能状態(0,0)から求められる.

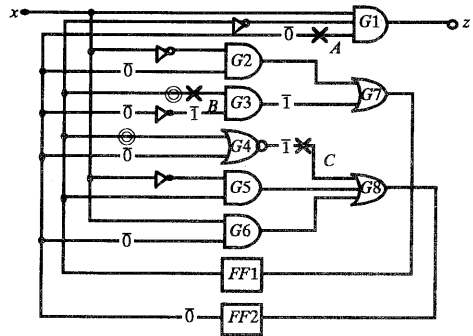
このようにして得られた検出不能故障の冗長性は次の定理を用いて判定できる[5,6].

【定理2】定理1により信号線 M の α 縮退故障が検出不能と判定されたとき, 故障回路においても状態ベクトル s_u が到達不能状態を表すならば, 信号線 M は α -冗長信号線である[5,6].

【証明】故障回路において状態遷移および出力関数が正常回路と異なるのは, s_u に含まれる状態のときのみである. したがって, 故障回路においても s_u が到達不能状態であれば, 1時刻分の入力を印加したあとは, 元の回路の入力系列に対する出力系



(a) $v[q1]=0$ に対する制御不能信号線と観測不能信号線



(b) $v[q2]=0$ に対する制御不能信号線と観測不能信号線

図3. 強到達不能状態から得られる検出不能故障

列の関係と等しくなるため, 信号線 M は α -冗長信号線である.

4. 同時除去可能な冗長信号線

複数の冗長信号線が回路に存在するとき, そのうち一つについて冗長除去を適用して得られた回路において, 除去されなかった他の冗長信号線が, 除去後の回路でも冗長であるとは限らない. したがって, 複数の冗長信号線を除去しようとするときには, 冗長除去によって回路の内部関数が変化することを考慮しなければならない.

文献[5,6]では, 1つの冗長信号線を除去することにより, 得られた検出不能故障の集合を破棄して, 再度定理1に基づく検出不能故障の判定を行った. しかし, 定理1で得られた検出不能故障は, 冗長除去により対応する信号線が除去されない場合, 除去後の回路にお

いても検出不能である。

【定理3】 定理1, 定理2の条件を満たす冗長信号線を除去するとき, 定理1により検出不能と判定された残りの縮退故障は, 対応する信号線が除去されずに残っていれば, 除去後の回路においても検出不能である。

【証明】 制御不能信号線が除去される場合と観測不能信号線が除去される場合の2つを考える。まず制御不能信号線が除去された場合は, 冗長除去により, 制御不能信号線を先頭とし, 外部入力または分岐点までの部分回路が除去される。このとき, 除去される部分回路の先頭の信号線を入力に持つゲートの出力値は, 除去される信号線の値とは関係なく, 他の入力値によって決定される。したがって, 除去後の回路においてこのゲート出力値が新たに制御不能信号線とはなることはない。

例として, 図2のゲートG3の出力信号線が1-冗長信号線として除去される場合を考える。除去される部分回路は図4の斜線部で示される部分である。信号値 $v[q_i]=\bar{1}$ を割り当てたときのゲートG5の信号値は, 冗長除去の前後で変化しないことがわかる。

観測不能信号線が除去される場合は, 図5に示すように元の回路の制御不能信号線を先頭とする部分回路の一部が除去されることになる。このとき冗長除去により新たに制御不能や観測不能になる信号線は存在しない。また, 元の回路の制御不能信号線, 観測不能信号線は, 除去後の回路でもそれぞれ制御不能, 観測不能となる。

したがって, 定理1を適用して得られる検出不能故障は, 対応する信号線の制御不能, 観測不能の性質が冗長除去により変化しないため, 除去後の回路においても検出不能故障である。

このことより, 定理2と同様に, ある到達不能状態ベクトル s_u から得られた複数の検出不能故障は, それらの多重故障を考えたときの故障回路において, 状態ベクトル s_u が到達不能状態を表すならば, それらの故障に対応する信号線を同時除去可能である。

5. アルゴリズム

文献[6]の手法で求めた回路の到達不能状態ベクトルを用いて, 順序回路の冗長除去を行う。以下に冗長除去の手順を示す。

到達不能状態ベクトルを $s_u = (s_u(1), s_u(2), \dots, s_u(n))$, $s_u(i) \in \{0, 1, X\}$ とする。得られたそれぞれの到達不能状態ベクトルに対して以下の冗長除去手順を適用する。

【冗長除去手順】

- 1) 各信号線に未処理を表すラベルUをつける。
- 2) 0または1である各 $s_u(i)$ について,
 - 2-1) 信号値 $v[q_i]=s_u(i)$ を割り当て, $v[q_i]=s_u(i)$ に対する制御不能信号線, 観測不能信号線を求める。
 - 2-2) 制御不能でも観測不能でもない信号線のラベルを冗長除去の対象外を表すラベルNに変更する。その他の信号線のラベルは表1に示すように変更する。

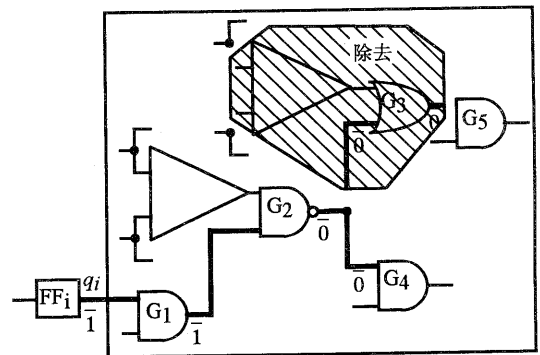


図4. 制御不能信号線の除去

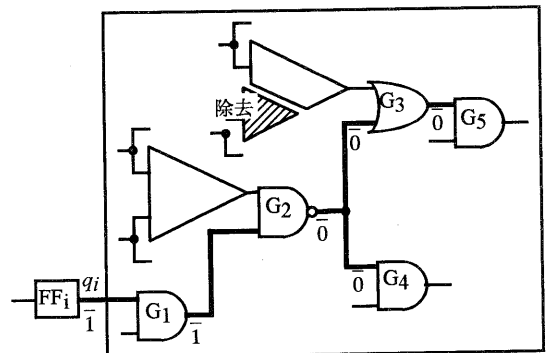


図5. 観測不能信号線の除去

- 3) $UC\alpha$ ($\alpha \in \{0,1\}$) または UO のラベルを持つ信号線 M の $\bar{\alpha}$ 縮退故障の故障回路において、状態 s_u へ遷移する状態、入力値の組合せがなければ、信号線 M を $\bar{\alpha}$ -冗長信号線とし冗長除去を行う。 s_u へ遷移する状態、入力値の組合せが存在する(すなわち故障回路で状態 s_u が到達不能状態ではない)ならば、信号線 M のラベルを N とする。
- 4) すべての信号線のラベルが N であれば終了。 N 以外のラベルを持つ信号線があれば 3 へ。

文献[5,6]においては、冗長除去が行われたならば得られた検出不能故障の集合を破棄し、検出不能故障の判定をやり直していた。ところが定理 3 より、この手順の 2 で検出不能と判定された故障は、他の検出不能故障に対応する信号線を除去した後の回路においても検出不能であることがわかる。よって手順 3 において冗長除去が行われても、元の回路に対して得られている検出不能故障について繰り返し冗長判定を行うことができる。よってこの手順では文献[5,6]の手順より検出不能故障の判定を行う回数が少なくなる。

6. 実験結果

提案手法を C 言語で記述し、ISCAS89 ベンチマーク回路[7]に対して適用した。

表 2 に実験結果を示す。到達不能の欄には文献[6]の手法で得られた強到達不能状態ベクトルの数を示している。この強到達不能状態ベクトルを用いて冗長信号線の判定を行った。故障数の欄には回路の縮退故障数を示している。検出不能の欄には検出不能故障と判定された縮退故障の総数を示している。表に示した回路以外のベンチマーク回路に対しても実験を行った

表 1. 信号線のラベルの変更表

ラベル	0-制御不能	1-制御不能	観測不能
u	UC 0	UC 1	UO
UC 0	UC 0	N	UC 0
UC 1	N	UC 1	UC 1
UO	UC 0	UC 1	UO
N	N	N	N

が、強到達不能状態が得られなかった回路と強到達不能状態が得られていても検出不能故障が得られなかった回路は結果を省いた。

次の 3 つの欄は、得られた検出不能故障の内訳を示している。除去可能 A の欄には検出不能故障のうち、除去可能であると判定され、冗長除去が行われたものの数を示している。除去可能 B の欄には除去可能 A に含まれる故障の冗長除去で対応する信号線が除去された故障数を示している。除去不能の欄には検出不能故障であるが除去可能ではない故障の数を示している。この故障は冗長除去手順の 3 において、正常回路の到達不能状態が故障回路で到達不能ではないために、除去可能ではないと判定された故障である。検出不能と判定された故障に対応する信号線のほとんどが除去可能であった。

文献[5,6]では、冗長除去を行う度に検出不能故障の集合を繰り返し求めていたが、提案手法では冗長除去後に同じ検出不能故障の集合を用いるため、1 つの強到達不能状態ベクトルに対して検出不能故障の判定は一度しか行わない。除去可能 A の欄に示されている数は冗長除去を行った回数と等しくなっている。

同時除去の欄には、冗長除去が行われた強到達不能状態ベクトルの数を示している。同じ強到達不能状態ベクトルから得られた検出不能故障のうち、除去可能 A、除去可能 B に分類された故障については、それらの多重故障を持つ故障回路において、正常回路の強到達不能状態が保たれているため、同時除去可能である。冗長除去手順 3 において多重故障を考慮した除去可能故障の判定を行うことで、冗長除去回数を減らすことが可能である。

表 3 にベンチマーク回路と冗長除去を行って得られた回路の信号線数、ゲート数、フリップフロップ数を示す。s208, s218, s420, s838, s5378 では、制御不能信号線を入力に持つフリップフロップがあり、冗長除去によりフリップフロップが除去された。また s5378 には観測不能信号線を出力に持つフリップフロップも存在していた。

7. まとめ

本論文では、順序回路の簡単化手法である到達不能状態に基づく冗長除去法[5,6]の効率化について提案した。強到達不能状態から得られる検出不能故障は、その一部の故障に対応する信号線を除去しても、除去後の回路において検出不能となることを示した。

提案手法では冗長除去手順で得られた検出不能故障の集合を冗長除去後に破棄せず用いることで、検出不能故障の判定処理を行う回数を減らすことができた。

ベンチマーク回路に対する実験では、検出不能と判定された故障のほとんどが除去可能であった。同じ強到達不能状態ベクトルから得られる検出不能故障については、故障の影響が状態遷移に関係しないものをあらかじめ調べることで同時除去が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] M. Abramovici, M. A. Breuer, and A. D. Friedman, Digital Systems Testing and Testable Design, Computer Science Press, 1990.
- [2] I. Pomeranz and S. M. Reddy, "On Identifying Untestable and Redundant Faults in Synchronous Sequential Circuits," Proc. 12th VLSI Test Symp., pp. 8-14, 1994.
- [3] V. D. Agrawal and S. T. Chakradhar, "Combinational ATPG Theorems for Identifying Untestable Faults in Sequential Circuits," Proc. European Test Conf., pp. 249-253, 1993.
- [4] D. E. Long, M. A. Iyer and M. Abramovici, "Identifying Sequential Untestable Faults Using Illegal States," Proc. 13th VLSI Test Symp., pp. 4-11, 1995.
- [5] 四柳浩之, 梶原誠司, 樹下行三, 到達不能状態に基づく順序回路の冗長除去手法, 電子情報通信学会論文誌D-I, vol. J81-D-I, no. 2, pp. 204-212, Feb. 1998.
- [6] H. Yotsuyanagi and K. Kinoshita, "Undetectable Fault Removal of Sequential Circuits Based on Unreachable States," Proc. 16th IEEE VLSI Test Symp., pp. 176-181, 1998.
- [7] S. Kajihara, H. Shiba, and K. Kinoshita, "Removal of Redundancy in Logic Circuits Under Classification of Undetectable Faults," Proc. 22nd Intl. Symp. on Fault-Tolerant Computing, pp. 263-270, July 1992.
- [8] F. Brglez, D. Bryan, and K. Kozminski, "Combinational Profiles of Sequential Benchmark Circuits," Proc. Intl. Symp. on Circuits and Systems, pp. 1929-1934, 1989.

表 2. 冗長除去の実験結果

回路名	到達不能	故障数	検出不能	除去可能A	除去可能B	除去不能	同時除去
s208	16	219	21	11	10	0	5
s218	16	219	21	11	10	0	5
s344	47	364	1	1	0	0	1
s349	47	374	1	1	0	0	1
s386	10	398	40	34	2	4	10
s400	63	460	7	1	0	6	1
s420	48	434	48	28	20	0	10
s444	63	486	9	1	2	6	1
s820	4	888	23	22	0	1	4
s832	4	908	31	25	5	1	7
s838	112	861	104	64	40	0	22
s953	130	1125	4	2	0	2	2
s1488	5	1524	11	11	0	0	4
s1494	5	1544	11	11	0	0	4
s5378	300	4701	240	57	133	50	15
s13207	235	10075	1	1	0	0	1

表 3. ベンチマーク回路と本手法適用後の回路の各要素数

回路名	ベンチマーク回路			除去後の回路		
	信号線	ゲート	FF	信号線	ゲート	FF
s208	210	96	8	129	66	5
s218	210	96	8	129	66	5
s344	346	160	15	345	161	15
s349	351	161	15	346	162	15
s386	393	159	6	353	155	6
s400	406	162	21	398	162	21
s420	422	196	16	158	83	6
s444	450	181	21	433	181	21
s820	839	289	5	798	280	5
s832	851	287	5	794	276	5
s838	840	390	32	153	78	6
s953	976	395	29	974	395	29
s1488	1507	653	6	1496	653	6
s1494	1513	647	6	1489	646	6
s5378	5344	2779	179	4980	2636	174
s13207	13300	7951	669	13299	7952	669