

## 近似回路を用いた耐故障設計の評価

日大生産工(学部) ○齋藤 晴樹

日大生産工 新井 雅之

### 1. はじめに

近年, 多重系多数決構造を用いた TMR (Triple Modular Redundancy) や 2 重系比較構造を用いた手法など, 様々耐故障設計手法が注目されている[1]. 本稿では論理回路の耐故障設計として近似回路を用いた設計 [2][3][4] について検討する. 固定故障とソフトウェアを対象故障として近似回路設計における 2 通りの構成法について評価・比較を行った.

### 2. 近似回路

ある与えられた論理回路の構造の一部分を複製した回路を近似回路と呼ぶ. 近似回路は元の論理回路と同一の入力を持つ. 元の論理回路の出力と近似回路の出力に対して, 出力が 0 の場合は論理積を, 1 の場合は論理和を取る構造を設計することで, 故障をマスクすることができる. 図 1 に近似回路を用いた耐故障構造を示す.

ここで, 4 入力 1 出力の論理回路  $F = a + \bar{b} + cd + \bar{c}\bar{d}$  に対して, 近似回路を用いた耐故障設計例を示す. 論理回路  $F$  を 2 入力 1 出力のゲートを用いて設計する場合, NOT ゲート 3 個, AND ゲート 2 個, OR ゲート 3 個の合計 8 個のゲートが必要になる. この論理回路  $F$  に対して TMR を用いて冗長化を行うと, 合計 24 個のゲートと多数決器分の追加ゲートが必要になる. それに対し, 近似回路は元の論理回路の一部分のみを複製する. 例えば, 論理回路  $F$  に対して近似回路  $G = a + \bar{b}$  が与えられると

する. 図 2 に論理回路  $F$  と近似回路  $G$  における故障マスク例を示す. 図 2 より  $a, \bar{b}$  が 12/14 の出力の値を決定していることが分かる. そのため, 近似回路  $G$  は NOT ゲート 1 個, OR ゲート 1 個, 及び元の論理回路  $F$  と  $G$  の論理和をとる OR ゲート 1 個の合計 3 個の追加ゲートによって 12/14 の論理値 1 出力に対して故障をマスクすることができる.

しかし, 多出力の論理回路では複数の出力で同じゲートを共有する場合が考えられる. そのため, 単一の出力のみを考慮し近似回路を設計すると, 故障カバレッジと面積オーバーヘッドのトレードオフを満たさない場合がある. そのため, どのような構成法で近似回路を設計するかが重要である.

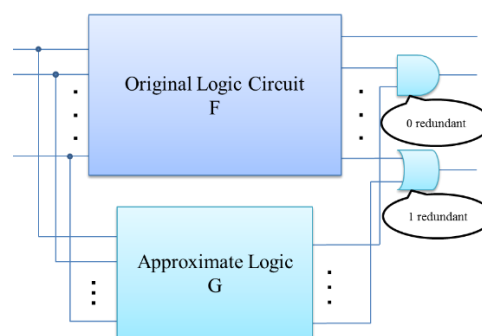


図 1. 近似回路を用いた耐故障構造

|    |    |    |   |   |   |
|----|----|----|---|---|---|
|    |    | ab |   |   |   |
| cd | 00 | 1  | 1 | 1 | 1 |
|    | 01 | 1  | 0 | 1 | 1 |
|    | 11 | 1  | 1 | 1 | 1 |
|    | 10 | 1  | 0 | 1 | 1 |

Covered by G

図 2. 論理回路  $F = a + \bar{b} + cd + \bar{c}\bar{d}$  の近似回路  $G = a + \bar{b}$  による故障マスク例

### 3. 種々の指標に基づく近似回路構成法

近似回路の構成の決定法には様々な手法が考えられる。本稿では、タイプ割り当てに基づく手法と共通項に基づく選択手法の 2 通りの近似回路構成法について評価を行う。

#### 3.1. タイプ割り当てに基づく構成法

タイプ割り当てに基づく構成法は主加法標準形の各最小項に対して、論理値 0, 1 の伝播のしやすさを示すタイプを割り当てる構成法である。この伝播のしやすさ(タイプ)を元にゲートを選択することで、全体のゲート数を減らし、オーバーヘッドを少なくできることが知られている[4]。割り当てるタイプは Type EX, Type 1, Type 0, Type DC の 4 種類となる。ここで、Type EX は論理値 0,1 がどちらも伝播しやすいこと、Type 1(0)は論理値 1(0)が伝播しやすいこと、Type DC は論理値 0,1 がどちらも伝播しにくいことを示す。以下に、各ゲートに対してタイプを割り当てるアルゴリズムについて説明する。

まず、あるゲートのファンインからの 0 の伝播のしやすさを示す確率的 0 可観測性  $P_{co0}$  と、1 の伝播のしやすさを示す確率的 1 可観測性  $P_{co1}$  を導出する。 $P_{co0}$  は、 $P_{co1}$  と同様のやり方で導出できるため、本節では  $P_{co0}$  の導出方法について述べる。 $P_{co0}$  は、確率的 0 可制御性  $P_{cc0}$ 、及び確率的可観測性  $P_{co}$  の 2 値の積として計算される。式(1)に  $P_{cc0}$  と  $P_{co}$  の導出式を示す。ここで、 $CC0$  は 0 可制御性、 $CO$  は可観測性、 $MAX\_CO$  は可観測性の最大値を示しており、 $SCOAP$  尺度から計算される[5]。

$$\begin{aligned} P_{cc0} &= \frac{MAX\_CO - CC0}{MAX\_CO}, \\ P_{co} &= \frac{MAX\_CO - CO}{MAX\_CO}. \end{aligned} \quad (1)$$

次に、あるゲートに対する各ファンインに対して確率的 0 可観測性平均  $P_{co0\_ave}$  および確率的 1 可観測性平均  $P_{co1\_ave}$  を求める。そして、各ファンインの  $P_{co0}$  と  $P_{co1}$  の座標をプロットする。そのプロットが  $P_{co0\_ave}$  および  $P_{co1\_ave}$  を通る、ある傾き  $\alpha$  の式と  $\alpha$  の逆数の傾きの式により分割されるどの領域に存在するかによりタイプが決定される。タイプと領域の関係を図 3 に示す。

これらの処理を論理回路の出力から各入力方向へ順に行うことで、全てのゲートに対してタイプ割り当てが行われる。

#### 3.2. 共通項に基づく構成法

多出力の論理回路では、複数の出力で最小項が重複することが考えられる。共通項に基づく構成法は、各出力別に主加法標準形展開を行い、各出力の最小項のうち重複する最小項数を計算する。重複する最小項数が多いほど、その最小項が多くの出力に対して有効性があると考えられる。共通項の選択は、重複数に閾値を与えることで行われる。今回は、閾値を全出力数の 75%とした。

本稿では主加法標準形の導出を、Espresso[6]を実装した Logic Friday[7]を用いて行った。そして、各最小項に対して冗長な最小項数を計算する処理を行い、本構成法を用いた。

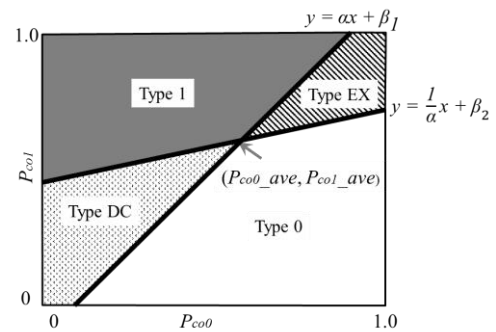


図 3. タイプ割り当て領域例

## 4. 評価

### 4.1. 評価環境

本稿ではISCAS'89 ベンチマーク回路 s27 に  
対して 5 個の近似回路を設計し、比較・評価を  
行った。なお、今回は故障挿入箇所として PI  
(Primary Input) は考慮せずに評価を行った。  
今回設計した近似回路は以下の通りである。

Comp1:  $\alpha = 0.95$  としてタイプ割り当てに基  
づく構成法を利用。Type 0 の最小項を  
選択

Comp2:  $\alpha = 0.95$  としてタイプ割り当てに基  
づく構成法を利用。Type 1 の最小項を  
選択

Comp3:  $\alpha = 0.6$  としてタイプ割り当てに基  
づく構成法を利用。Type EX の最小項を  
選択

Comp4: Comp3 に対してゲート数が少なく  
なるように論理最適化

Comp5: 共通項に基づく構成法を利用。全  
出力の 75%以上に重複がある最小項を  
選択し、その後、論理最適化

### 4.2. 結果

まず、固定故障を対象として評価を行った。  
元の論理回路、及び 5 個の近似回路を付与し  
た論理回路における、可能な全パターンを印  
可した際の故障カバレッジとゲート数とのトレ  
ードオフを図 4 に示す。ここで、故障カバレー  
ジは故障が検出される割合を示しているため、  
故障がマスクされる確率は 1 との差で求めるこ  
とができる。

固定故障を対象とした場合、元の回路はど  
の故障に対しても有効ではないことを示した。  
しかし、面積オーバーヘッド約 110%の近似回路  
を付与した論理回路 comp1 において最高で  
約 27%の故障をマスクできることを示した。

次に、ソフトウェアを対象として評価を行っ  
た。元の論理回路、及び 5 個の近似回路を付  
与した論理回路における、1 パターン印可時の  
平均故障カバレッジとゲート数とのトレードオ  
フを図 5 に示す。ソフトウェアを対象とした場合  
も、固定故障の場合と同様にゲート数が多くな  
るほど、故障カバレッジが低くなる結果を示し  
た。

さらに、各ゲートの故障率を  $p$  と仮定し信頼  
度の評価を行った。図 6 に固定故障に対する  
故障率と信頼度の評価結果、図 7 にソフトエラ  
ーに対する故障率と信頼度の評価結果を示  
す。信頼度  $R$  は式(2)より求めた。ここで、 $n$  は  
ゲート数、 $FC$  は故障カバレッジを示している。

$$R = (1 - p)^n + np(1 - p)^{n-1}(1 - FC) + \frac{n(n-1)}{2}p^2(1 - p)^{n-2}(1 - FC)^2. \quad (2)$$

固定故障・ソフトウェアどちらを対象にした場  
合も、元の回路の信頼度が一番高く、ゲート数  
が一番多い comp1 の信頼度が一番低い結果  
となった。固定故障では、 $p = 0.05$  において約  
15%の差が存在した。また、ソフトウェアでは  $p$   
 $= 0.01$  において約 28%の差が存在した。固定  
故障・ソフトウェアどちらにおいても、ゲート数  
が多くなるにつれて信頼度が低くなる結果を  
示した。

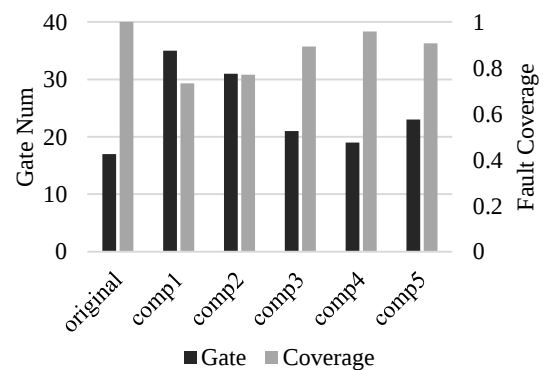


図 4. 固定故障を対象としたゲート数と故障カ  
バレッジトレードオフ

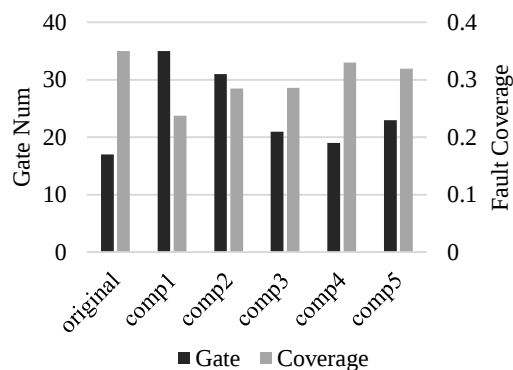


図 5. ソフトエラーを対象としたゲート数と平均故障カバレッジトレードオフ

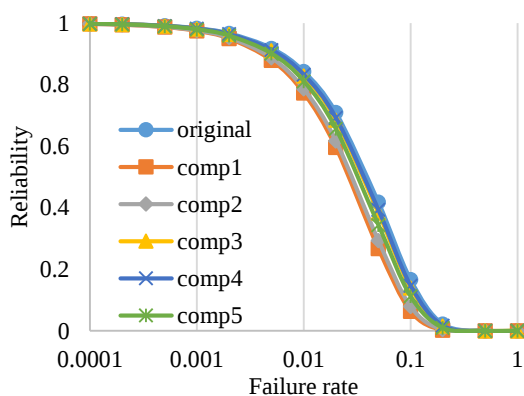


図 6. 固定故障を対象とした故障率と信頼度

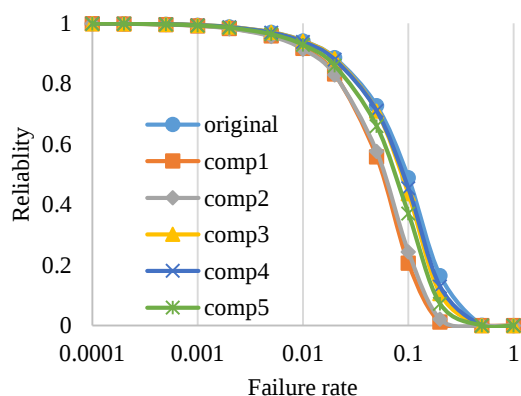


図 7. ソフトエラーを対象とした故障率と信頼度

## 5. まとめ

本研究では固定故障とソフトエラーを対象故障とした近似回路設計における指標について

評価・比較を行った。近似回路を用いることで、全体の故障カバレッジ減少を期待できる。しかし、ゲート数を増やしてしまうことで、全体の信頼度は向上しないという結果が得られた。

今後の研究として、タイプ割り当て、共通項選択以外の指標を用いて比較することが挙げられる。また、今回は ISCAS'89 の s27 のみで近似回路を設計した。そのため、近似回路がより大規模な回路に対して有効かどうかについても検討していきたい。

## 参考文献

- [1] 米田友洋, 梶原誠司, 土屋達弘, ディペンダブルシステム, 共立出版, 2005 年.
- [2] Hao Xie, Li Chen, Adrian Evans, Shi-jie Wen, Rick Wong, "Synthesis of Redundant Combinatorial Logic for Selective Fault Tolerance," IEEE 19th Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, pp. 128-129, 2013.
- [3] Mihir R. Choudhury, Kartik Mohanram, "Low Cost Concurrent Error Masking Using Approximate Logic Circuits," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, pp. 1163-1176, 2013.
- [4] Mihir R. Choudhury, Kartik Mohanram, "Approximate Logic Circuits for Low Overhead, Non-intrusive Concurrent Error Detection," Design Automation and Test in Europe, pp. 903-908, 2008.
- [5] Lawrence H. Goldstein, Evelyn L. Thigpen, "SCOAP: Sandia Controllability/Observability Analysis Program," IEEE-ACM Design Automation Conference, pp. 190-196, 1980.
- [6] Richard. L. Rudell, "Multiple-Valued Logic Minimization for PLA Synthesis," Master's thesis, University of California, Berkeley, Memorandum UCB/ERL M86/65, 1986.
- [7] Logic Friday, <http://www.sontrak.com/>