

ゲート素子の過剰／欠落に対応する論理診断手法

2 B - 6

梅畠 浩, 沼 昌宏, 平野 浩太郎

神戸大学大学院 自然科学研究科

1. はじめに

論理回路の大規模化、複雑化に伴い、論理回路の自動設計が必要不可欠となっている。しかし、回路規模や性能に対する要求が厳しい場合は、人手設計に頼らざるを得ない。人手の加わった部分については、論理検証が不可欠であり、誤りの存在が確認された際の誤り追跡・修正の自動化が求められる。

そこで本稿では、論理診断手法としてすでに提案されている拡張X-伝搬法 [1]において、その処理の煩雑さから従来対応していなかったゲート素子の過剰と欠落の二つの誤りに対応する手法を提案する。網羅的な処理を可能な限り回避しながら、検出率の向上を目指した。

2. 拡張X-伝搬法

2.1 誤り追跡入力

n 入力 p 出力の機能記述を満たす回路（理想回路）から導かれたブール関数ベクトルを f_s 、機能記述を満たさない実回路から導かれたブール関数ベクトルを f_g とする。それらの回路の j 番目の出力関数 f_{sj} 、 f_{gj} において、条件

$$f_{sj}(\alpha) = X \text{かつ } f_{gj}(\alpha) = a \quad (1)$$

を満たす入力ベクトル $\alpha = (a_1, \dots, a_{i-1}, X / \bar{X}, a_{i+1}, \dots, a_n)$ を誤り追跡入力という。ただし X / \bar{X} はブール変数 X または、その補 \bar{X} の一方を表し a_k ($k = 1, \dots, n$; $k \neq i$) および a は定数（0 または 1）を表す。

2.2 拡張X-伝搬法の処理

拡張X-伝搬法に基づく論理診断の処理手順は、以下の通りである。

- (1) 誤り追跡入力の生成
- (2) 誤り可能性の指標 EPI の設定
- (3) 誤り可能性の指標 EPI を用いた組合せ箇所の抽出
- (4) 6 値シミュレーションを用いた組合せ箇所の削減

表 1 冗長なゲートとなる組合せ

出力先のゲート機能	AND か NAND	OR か NOR
冗長なゲート素子	AND	OR

- (5) 誤り候補の生成（誤り種類の対応付け）
- (6) 論理診断結果に基づく論理修正・検証

3. ゲート素子の過剰に対応する手法

ゲート過剰誤りに対応するために、冗長なゲートを用いた手法を提案する。冗長なゲートとは、表 1 に示す関係を満たすゲートで、論理的には意味をもたないゲートである。

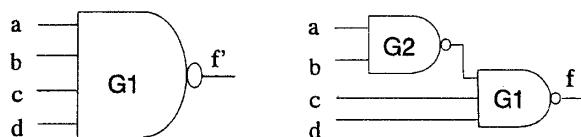
拡張X-伝搬法によるゲート機能修正によって正しい回路が得られたとき、修正を加えたゲートが表 1 の関係を満たしていれば、そのゲート論理的には意味をもっておらず、過剰なゲートであると判定できる。よって、修正法の提示方法の変更のみで対応可能であり、100% 検出可能である。

4. ゲート素子の欠落に対応する手法

図 1 に示すようなゲート欠落誤りに対応するためには、次の 3 項目が特定されなければならない。

- i) ゲート欠落誤りの箇所 (G1)
- ii) 欠落ゲートの入力信号線 (a と b)
- iii) 欠落ゲートの機能 (NAND)

これら 3 項目のうち、もし i), ii) について特定が可能となれば、iii) 欠落ゲートの機能については拡張X-伝搬法により特定が可能である。しかし、従来法では i) と ii) に関しては特定不可能であった。よって、3 入力以上の誤り箇所候補のすべてに対し、ゲートの欠落を想定する必要があった。そのための欠落ゲートの入力線



a) 実回路

b) 理想回路

図 1 ゲート欠落誤りを含む回路の一部分

の組合せは、欠落箇所候補が n 入力ゲートであると仮定すると、 $2^n - n - 2$ 通り存在する。入力数の多いゲートが組合せ箇所に複数含まれる場合は、組合せが爆発的に増加することになる。そのために処理時間の大幅な増加が予想され、従来法では対応していなかった。

本稿ではこれら二つの項目を特定するための手法として、誤り追跡入力による不一致ゲート入力パターンを用いた手法を提案する。ここで不一致ゲート入力パターンとは、誤り箇所であるゲートにおいて、実際の出力値と出力が期待される値（期待出力値）が一致しない、ゲートの入力パターンを指す。以下、不一致ゲート入力パターンのことを単に不一致ゲート入力と呼ぶ。手法の処理手順を次に示す。

- (1) 誤り追跡入力の伝搬
- (2) 期待出力値の検出
- (3) 誤り箇所の入力パターンに含まれる (X, \bar{X}) に 1 または 0 を代入し、不一致ゲート入力を検出
- (4) 不一致ゲート入力より欠落ゲートの信号線を特定
- (5) 冗長なゲートをゲート欠落箇所に挿入し、拡張 X-伝搬法により修正

図 1 のゲート欠落を含む回路例に対する、不一致ゲート入力を用いた信号線特定手法の例を以下に示す。

図 1 の部分に全入力パターンを与えることが可能な場合、図 2 に示す 4 種類の不一致ゲート入力が発生する。これら 4 種類から、欠落したゲートの入力信号線である (a, b) の信号値のみが変化していることがわかる。この性質を用いると、欠落ゲートの信号線と機能の両方の特定ができる。しかし、そのためには誤り箇所の全入力パターンに対して不一致ゲート入力であるかの判断が必要となる。全外部入力パターンを与えて調べれば確実であるが、処理時間が外部入力数に対して指数的に増加することになる。

そこで本手法では処理時間を短縮するために、限られたパターン数で誤りの限定に高い効果を上げている誤り追跡入力を用いることにより、欠落ゲートの信号線特定までを行い、ゲートの機能の特定を従来の拡張 X-伝搬法により行う。

$$\begin{aligned} (a, b, c, d) = & (0, 0, 1, 1), \\ & (0, 1, 1, 1), \\ & (1, 0, 1, 1), \\ & (1, 1, 1, 1) \end{aligned}$$

図 2 不一致ゲート入力の例

表 2 想定誤り数別の検出率

想定した誤りの数	1	2	3	平均
検出率 (%)	100	89	83	88

表 3 組合せ候補箇所数別の検出率

組合せ候補 箇所数	1	2~9	10~50	51~100	101 以上
検出率 (%)	94	92	81	71	82

5. 実験と考察

ISCAS ベンチマーク回路 C432, C499, C880, C1355, C1980, C2670, C3540, C5315 にゲート欠落を想定した回路 725 例を対象として実験を行った。拡張 X-伝搬法の処理過程すでに生成されている 100 個の誤り追跡入力を適用した。また、検出効果を表す指標として、想定したゲート欠落箇所を検出が可能となった回路例の、全回路例に対する割合を用いる。

表 2 に示す実験結果から、本手法により従来法では修正が不可能であった回路例のうち、ゲート欠落誤りのみが回路中に単独で存在する場合には、100 % 修正可能となった。また、全体としても約 88 % の例で修正可能となった。

表 3 に、拡張 X-伝搬法による誤り箇所と仮定された箇所の組合せの候補数別に整理した結果を示す。この表から、候補が絞り込まれると検出率が向上することがわかる。このことから、検出率の向上には組合せ候補の箇所数の絞り込みが有効であると考えられる。

6. まとめ

本稿の提案手法により、ゲート過剰誤りに関してはわずかな変更のみで 100 % 検出可能となった。また、単独ゲート欠落誤りに対して 100 % 検出可能となり、全回路例に対しては約 88 % という高い検出率が得られた。

今後の課題としては、多重誤りにゲート欠落が含まれる場合についても、検出率 100 % を目指すことが挙げられる。そのためには、組合せ箇所候補数の絞り込みと複数の不一致ゲート入力の確保の両方を同時に実現する、誤り追跡入力の生成が必要と考えられる。

参考文献

- [1] M. Tomita, T. Yamamoto, F. Sumikawa, K. Hirano, "Rectification of multiple logic design errors in multiple output circuits," 31st DAC, pp. 212-217, June 1994.