

性能や電力とのトレードオフを考慮できる信頼性指標

林田隆則[†] 安浦寛人[‡] 佐藤寿倫[†] 小川貢[†] 吉永亮太[†] 矢野憲[†]

1. はじめに

半導体製造技術における微細化の進展により、ソフトエラー率 (SER: Soft Error Rate) が増大しつつある [1,2,3]。トランジスタサイズの縮小に伴い、ビットあたりの面積が小さくなっている。また高電界による破壊を防ぐために、電源電圧も縮小している。これらの結果ノードの電荷が小さくなり、宇宙線やアルファ粒子などにより容易にビットセルが反転する。一方でビットセルの面積が小さくなれば、中性子などの粒子がそこに衝突する確率も小さくなる。したがって両者の影響を考慮すると、ビットあたりの SER は世代間でほぼ一定であると言われている。しかしチップあたりのトランジスタ数は指数的に増大しているのであるから、チップあたりの SER も爆発的に増大することがわかる。

ソフトエラーのような過渡故障の対策として有効な対策の一つに、冗長性の利用がある。空間的な冗長化は、同じ回路を複製し、その出力に対して多数決を取る方法で、一部の回路にフォールトが生じたとしても多数決によってエラーに至らせない。空間的な冗長化を行う代わりに時間的な冗長化を行うことによって同様の対策を行うことも可能である。この場合、同じ入力に対する処理を複数回行い、その複数回の処理結果に対して多数決を行うことで、過渡的なフォールトを除去する。

これらの手法はいずれの場合も、回路規模や消費電力、あるいは性能といった面でデメリットを持っており、信頼性のためにコストを払う方法であるといえる。これらのコスト増が信頼性に対してどの程度影響を与えるのか、逆に信頼性を担保するためにはどの程度コストをかける必要があるのかを知るには、これらのトレードオフを考慮できる評価指標が必要である。そこで、本論文では信頼性と性能や電力との間のトレードオフを考慮できる評価指標を検討する。

2. 冗長化利用時の信頼性

信頼性を向上させる手法の代表的なものとして、冗長化の利用が挙げられる。空間的な冗長化では、同じ機能を持ったブロックを複数搭載して多数決によって過渡故障の影響を取り除く。空間的な冗長化を行う代わりに、同じ機能ブロックに同じ入力を繰り返し与えてその結果の多数決をとることで同様の効果を得る時間的な冗長化を行うことも可能である。冗長化を施しているブロックの半数未満でフォールトが発生した場合は多数決によってエラーを顕在化させない。そのため、過半数のブロックでフォールトが発生した場合のみ外部にエラーが伝搬する。従って、冗長化を考慮した場合の故障確率 FP は次式で求めることができる。

$$FP = {}_N C_{n+1} p^{n+1} q^n + {}_N C_{n+2} p^{n+2} q^{n-1} + \dots + {}_N C_N p^{2n+1} q^0$$

ここで、 $N (=2n+1)$ は冗長度、 p が冗長化ブロック 1 個におけるフォールトの発生率、 $q (=1-p)$ はそのブロックが正常な確率である。上式において故障の確率がそもそも低く $p \ll q$ であるとするると第 1 項が支配的となり、さらにスターリングの公式を用いると次式で近似できる [4]。

$$\begin{aligned} FP &> {}_N C_{n+1} p^{n+1} q^n = \frac{(2n+1)!}{(n+1)!n!} p^{n+1} q^n \\ &\approx \frac{(2n+1)^{2n+1} e^{-(2n+1)}}{(n+1)^{n+1} e^{-(n+1)} n^n e^{-n}} p^{n+1} q^n = \frac{(2n+1)^{2n+1}}{(n+1)^{n+1} n^n} p^{n+1} q^n \\ &> \frac{(2n+1)^{2n+1}}{(n+1)^{2n+1}} p^{n+1} q^n > (1.5)^{2n+1} p^{n+1} q^n \end{aligned}$$

つまり、 FP が n に対して指数的に変化する。

3. $\log FP$ を用いる信頼性指標

故障率 FP が n に対して指数的に変化する一方で、

[†] 福岡大学, [‡] 九州大学

面積や消費電力は n に対してほぼ線形に変化するから、これらと信頼性との間でトレードオフを考慮することは困難である。図 1 に $p=0.01$ と仮定して $1 \leq N \leq 9$ の範囲で (横軸), 故障率 (FP)・電力 (Power)・故障率と面積との積 (FP*Power) をそれぞれ相対値でプロットした (縦軸)。FP*Power が小さいほど良いトレードオフとなることを期待している。容易にわかるように故障率が支配的で電力の影響を考慮出来ていない。現実的な故障率 p はもっと小さい値になると考えられるため, FP の振れ幅はさらに大きくなり, FP の支配力も増す。

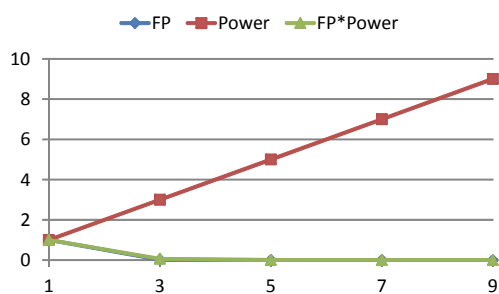


図 1 : 冗長度 vs 故障率・電力

そこで, 信頼性の評価指標が N に対して線形に変化できるように FP に対して対数を取り, $\log FP$ を信頼性指標として提案する[4]。

4. 使用例

図 2 に $\log FP$ の使用例を示す。文献[5]で提案されている 2 つのソフトウェア対策に使用した。Case 1 ではスレッドを複製し, 2 コアでの実行結果を比較してソフトウェアを検出する。Case 2 では命令を複製し, コア内の 2 つの機能ユニットでの実行結果を比較して検出する。4 本の棒グラフは左から, FP, $\log FP$, エネルギー FP 積, そしてエネルギー $\log FP$ 積である。それぞれ, 対策を施さない場合の値で正規化している。MITF (Mean Instructions To Failure : 故障に至るまでの実行命令数) の逆数を FP として採用した。ただし動作周波数は指定していない。

容易にわかるように, FP を指標に用いると Case 1 が著しく信頼度を改善しており, 2 コアを使うことによるエネルギーのオーバーヘッドは観測できない。文献[5]では, エネルギーあたりの信頼度改善度が高いため Case 1 が好ましいと結論されている。 $\log FP$ を指標に用いると, Case 1 は信頼度で Case

2 に優れるが, エネルギーを考慮すると優劣が逆転している。今回はあくまで使用例を示しただけであり, これが正しい評価であるのかどうかの考察は将来の課題である。

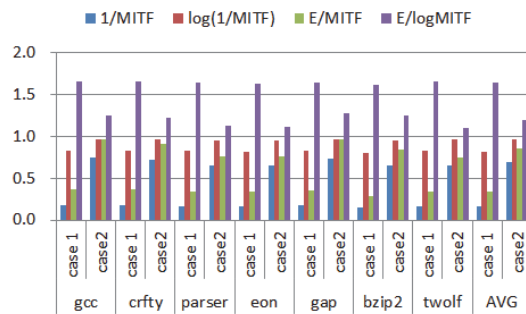


図 2 : $\log FP$ 指標の使用例

5. おわりに

本稿では, 近年その重要度を増している過渡エラー対策に対する, 信頼性の評価指標について検討を行った。冗長度 N で冗長化すると, 故障率 FP が N に対して指数的に変化するのに対し, 面積や消費電力の評価指標が N に対して線形に変化するため, これらの間のトレードオフを考慮できる評価指標として $\log FP$ の活用を提案した。

しかし, まだ $\log FP$ が評価指標としてどの程度有用かを十分には検討できていない。今後, $\log FP$ の有用性を示せるように実験を行い, 指標自体の評価を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構 CREST プロジェクト「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」の支援によるものである。

参考文献

- [1] S. Borker: Designing Reliable Systems from Unreliable Components, IEEE Micro, **25**(6) (2005)
- [2] T. Karnik et al.: Characterization of Soft Errors Caused by Single Event Upsets in CMOS Processes, IEEE Trans. Dependable and Secure Computing, **1**(2) (2004)
- [3] R. C. Baumann: Soft Errors in Advanced Computer Systems, IEEE Design & Test of Comp., **22**(3) (2005)
- [4] 林田, 安浦, 矢野, 佐藤: LSI の信頼性評価指標の提案, 情処研報, Vol. 2012-ARC-199, No. 6, (2012)
- [5] T. Funaki and T. Sato: Formulating MITF for a Multicore Processor with SEU Tolerance, Euromicro Conference on Digital System Design (2008)