

確率的回路寿命予測手法の計算安定性と 確率取り扱いの妥当性に関する考察

佐藤 雅紘^{1,a)} 増田 豊¹ 飯塚 翔一¹ 尾上 孝雄¹ 橋本 昌宜^{1,b)}

概要：製造ばらつきや環境変動への対策として、電源電圧調整などによる適応的な速度制御への期待が高まっているが、遅延故障発生の見逃しや、電圧調整ミスによる故障の発生が懸念される。そこで、回路の動的な振る舞いを離散マルコフ過程とモデル化することで、低確率のエラー発生が考慮可能な確率的回路寿命評価手法が提案されている。しかし、この評価手法は計算過程とばらつきを持つ回路への適用において、検証が必要な課題を持つ。前者の課題は(1)数値計算の不安定性の改善、(2)遷移確率算出方法の正当性評価である。後者の課題は(3)時間的、空間的事象を同時に確率的に扱う妥当性評価である。本稿では、これらの課題に対して行った実験的評価や理論的な考察、改善方法について述べる。

Validating stochastic error rate estimation and improving its numerical stability

SATO MASAHIRO^{1,a)} MASUDA YUTAKA¹ IIZUKA SYOICHI¹ ONOYE TAKAO¹ HASHIMOTO MASANORI^{1,b)}

Abstract: Adaptive speed control with voltage scaling is effective for manufacturing variations and environmental variation. However, there is a possibility that failures occur by missing delay faults or giving inappropriate voltage. Our previous work proposed a stochastic error rate estimation method which can cope with very low failure probability. However, this method has problems in numerical calculation process and application to circuits with variability. The calculation process needs to (1) improve numerical stability and (2) validate transition probability computation. The application to circuits with variability needs to (3) validate the stochastic simultaneous treatment of temporal events and spatial variability. This paper discusses the improvement and validation for these three problems.

1. 研究背景, 目的

近年の半導体プロセスの微細化に伴い、温度変化、電源ノイズ等の動作環境変動、製造ばらつきや経年劣化に伴う回路性能のばらつきが顕在化している。また、NBTI (Negative Bias Temperature Instability), HCI (Hot Carrier Injection), TDDB (Time Dependent Dielectric Breakdown) といったトランジスタの経年劣化が予期せぬ遅延故障を発生させる。そのため、従来設計では環境変化、製造ばらつき、及び経年劣化による遅延故障が回避できる十分高い電源電圧を供給してきた。一方で、遅延ばらつき要因ごとにマージン求め、それらを積算して電源電圧を求めると、多くのチップで消費電力が不必要に大きくなるという問題を招く。

性能ばらつきに対するマージンを削減し、遅延故障発生を防止する手法として、適応的な速度制御が広く研究され

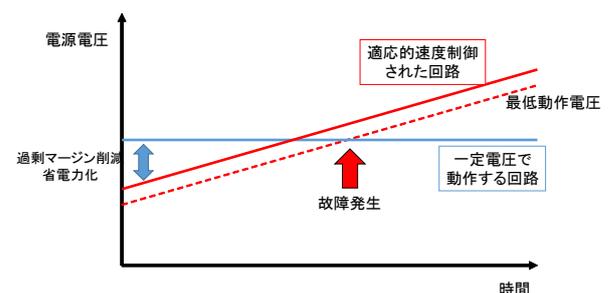


図1 適応的速度制御の動作の推移

ている [1], [2]. 図1に示すように、適応的速度制御では、各チップが自身の速度余裕を動的に見積もり、適応的に電源電圧もしくは基板電位を調整する。適応的速度制御を適用することで、一定電圧で動作する回路に比べ、過剰なマージンを削減できると期待される。

一方、予期せぬ電源ノイズによって遅延故障が起こる可能性は依然として残っている。そのため故障発生頻度を高めることなく過剰なマージンを削減する制御が理想的である。適応的に回路の動作速度を制御するためには、遅延故

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Dept. Information Systems Engineering, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{a)} sato.masahiro@ist.osaka-u.ac.jp

^{b)} hasimoto@ist.osaka-u.ac.jp

障を予期/検出するためのテスト機構が必要となる。しかし、全ての遅延故障の検出/予期を、限られたハードウェア・時間資源内では実現できないため、速度制御で回路のどの部分を観測し、制御すべきかを入念に検討する必要がある。さらにテスト機構の搭載に必要な面積オーバーヘッドや実装コストも考慮して、所望の性能を満足する回路設計を行う必要がある。

適応的速度制御の最適実装を行うためには、MTTF(Mean Time To Failure: 平均故障発生時間)、消費電力、面積、コストなどを設計時に評価する必要がある。しかし、経年劣化や動作環境変動により起こる遅延故障の発生頻度は極めて低く、故障発生までに要するシミュレーション時間は非常に長い。そのため、論理シミュレーション等を用いて、回路の寿命や消費電力を現実的な時間で評価することは非常に困難であった。そこで、先行研究 [3] において適応的速度制御時の確率的故障発生時間見積もり手法が提案された。この研究は、動的な回路挙動を離散マルコフ過程として表す。[3] では、(動作電圧、遅延変動量) の組で状態が定義されたマルコフ過程を定義した。状態間の遷移確率を表現する遷移確率行列を求め、解析的に回路の寿命や平均動作電圧を算出することで、現実的な時間での評価を可能とした。しかし、先行研究 [3] には、解析手法上の課題点と、ばらつきを持った実回路に適用が難しい、という問題点が残っている。

解析手法として改善や検証が必要な課題は二つある。第一の改善が必要な課題は妥当な計算結果が得られない場合があり、評価結果の信頼性が低いことである。この問題の原因は、コンピュータによる計算誤差と行列の性質である。第二の課題は、離散マルコフ過程の状態間遷移確率の算出方法の妥当性確認、ならびに計算結果の精度評価を行うことである。

ばらつきを持つ回路に [3] の解析手法を効率的に適用する手法が [4] で提案されている。時間的な確率と空間的な確率を同時に取り扱うことで解析の効率化を図っているが、この取り扱いの妥当性を評価する必要がある。ここで、時間的な確率とは、[3] で導入した回路の挙動が時間と共に変動することを離散マルコフ過程を用いて確率的に表したものである。空間的な確率とは、[4] で新たに導入した製造ばらつきを持つチップの回路挙動の違いを確率的に表したものである。

本稿では、解析手法として改善や検証が必要であった課題の解決、ならびに製造ばらつきを持った回路への適用妥当性を評価する。解析手法上の課題点は、有効桁数の増加による計算精度の向上と、乱数を用いた行列成分の変更により解決する。遷移確率算出手法の妥当性は、シミュレーションによって求めた MTTF と、確率的に算出した MTTF を比較することで検証する。ばらつきを持つ回路への適用妥当性は、複数の仮想的なチップを作成し、それぞれのチップに対して個別に求めた MTTF と、全てのチップを一括して求めた MTTF を比較することで評価を行う。

2章では離散マルコフ過程で、適応的速度制御回路の故障率を確率的に評価する手法とその計算上の課題について

説明する。3章では、2章で説明した課題の解決手法について議論する。4章では離散マルコフ過程の遷移確率行列の算出方法について説明する。5章ではばらつきを持った回路の取り扱い手法を説明し、その妥当性を議論する。最後に6章で議論をまとめる。

2. マルコフ過程を用いた確率的故障率評価手法

本章では先行研究 [3] で提案されている連続時間マルコフ過程を用いた確率的故障率評価手法を説明する。回路速度に余裕がない場合に電源電圧を高く、回路遅延に余裕が十分ある場合に電源電圧を低く変更する適応的速度制御を考える。回路内で発生する現象は回路遅延の変動と電源電圧の制御の二つである。

2.1 節では離散マルコフ過程の状態定義と遷移確率を詳しく説明する。2.2 節では連続時間マルコフ過程を用いた回路の MTTF の算出手法について説明する。2.3 節では評価手法の課題とその解決手法について説明する。

2.1 離散マルコフ過程の状態定義と遷移確率

先行研究 [3] では、離散マルコフ過程の状態定義を電源電圧の高さ(速度レベル)と回路遅延の大きさの組で定義している。図2に、正常状態と故障状態からなる離散マルコフ過程の状態空間を示す。遅延量と電源電圧の組で定義される状態を正常状態と定義し、別に故障状態を一つ追加する。故障状態は、回路が遅延故障を起こした場合に遷移する状態として定義する。また故障状態から正常状態に遷移することは考慮に入れないため、この遷移確率は0とする。

状態間の遷移確率として、図3に示すように、エラー確率、エラー予告確率、モニタ時間経過確率、動的な遅延変動確率を用いる。エラー確率はエラーが発生する確率、エラー予告確率はエラーの発生を予期し、電源電圧を高くする確率、及びモニタ時間経過確率はエラーとエラー予告が共に一定時間(モニタ時間)発生しない確率を示す。モニタ時間は設計者が設定するものとする。動的な遅延変動確率は遅延量が増減する確率を表す。

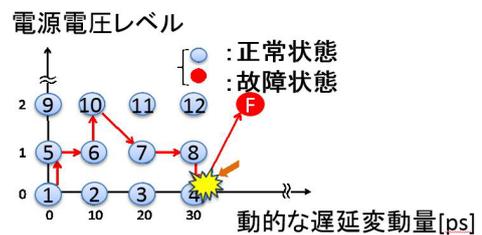


図2 回路挙動を表現する離散マルコフ過程

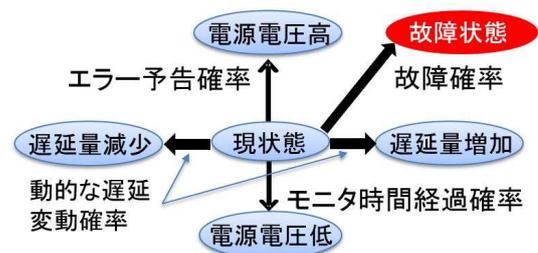


図3 状態間の遷移確率

2.2 連続時間マルコフ過程による解析手法

次に [3], [5], [6] 等で用いられる, 離散マルコフ過程の遷移確率行列を利用し, 連続時間マルコフ過程として回路を解析する手法を説明する. 本手法の長所は, 遷移確率行列から, 各状態の存在確率を連続な時間 t の関数として, 解析的に算出できる点にある. 換言すれば, 遷移確率行列から, MTTF 等の回路評価指標を常に一定の計算式で算出できる. 離散マルコフ過程が, 離散化された時間でイベントの発生を考える確率過程であることに対して, 連続時間マルコフ過程は $T = [0, \infty)$ を集合とする連続時間でイベントの発生を考える確率過程である. 離散時間マルコフ過程において, 状態 i から j に遷移する確率 $p_{i,j}$ を成分として持つ行列を遷移確率行列と呼び \mathbf{P} と定義する.

遷移確率行列から, 連続時間で回路を解析する手法と MTTF を算出する計算式を説明する. 状態遷移確率 $p_{i,j}(s, t)$ を, システムが時間 s のときに状態 i にあり時間 t のときに状態 j に滞在している確率と定義する.

$$p_{i,j}(s, t) = P(X(t) = j | X(s) = i) \quad (1)$$

今回の離散マルコフ過程は, $s = 0$ として解析するため, より単純な $p_{i,j}(t)$ という形で表現出来る. さらに, 状態 i を離れる速度 (推移速度) q_i を以下のように定義する.

$$q_i = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1 - p_{i,i}(h)}{h} = -\frac{dp_{i,i}(0)}{dt}, \quad (2)$$

また i から j の推移密度 $q_{i,j}$ は以下のように定義される.

$$q_{i,j} = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{p_{i,j}(h)}{h} = \frac{dp_{i,j}(0)}{dt}, \quad (3)$$

以上をまとめると, 単位行列 \mathbf{I} を用いて遷移速度行列 \mathbf{Q} は以下の式のように表される.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -q_1 & q_{1,2} & \cdots & q_{1,N_{state}} \\ q_{2,1} & -q_2 & \cdots & q_{2,N_{state}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N_{state},1} & q_{N_{state},2} & \cdots & -q_{N_{state}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

次に \mathbf{Q} により決定される時間変数 t の微分方程式を解く.

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = -q_j p_{ij}(t) + \sum_{\nu \neq j} p_{i\nu} q_{\nu j} \quad (6)$$

\mathbf{P} の固有ベクトル行列 \mathbf{U} と \mathbf{P} の固有値を対角成分とする行列の指数関数 $\mathbf{\Lambda}(t)$ を用いると, 連続時間マルコフ過程の遷移確率行列は以下のように表される.

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} p_{1,1}(t) & \cdots & p_{1,N_{state}}(t) \\ p_{2,1}(t) & \cdots & p_{2,N_{state}}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N_{state},1}(t) & \cdots & p_{N_{state},N_{state}}(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}(t)\mathbf{U}^{-1} \quad (8)$$

初期状態 $init$ を与えると, 時間 t において状態 i に遷移す

る確率 $p_{init,i}(t)$ が計算出来るため, その連続時間の遷移確率行列 $\mathbf{P}(t)$ から MTTF が算出できる. $p_{init,fail}(t)$ を初期状態から故障状態に遷移する確率と定義すると MTTF は以下の式で計算される.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{dp_{init,fail}(t)}{dt} dt \quad (9)$$

同様に, その他の各状態への遷移確率も計算できるため, 回路がどのような挙動をするかを解析できる.

2.3 解析過程で発生する数値の不安定性への対応

今回取り扱う離散マルコフ過程は吸収故障状態を持つ. 故障する確率が 0 より大きい場合に, $t \rightarrow \infty$ とすると, 累積故障確率は必ず 1 に収束する. しかし, 離散マルコフ過程から MTTF を解析する際に, 故障確率が 1 に収束せず, MTTF が正しく算出できない場合がある. 離散マルコフ過程が正しく解析できない原因は以下の二つである.

(1) 計算精度上の問題

遷移確率行列内の成分のオーダー差が大きく, 微小な値は丸め時に 0 として処理される. この丸めによる計算誤差が無視できない大きさになっている.

(2) 式 8 の \mathbf{U}^{-1} が算出できない問題

計算過程で現れる固有ベクトル行列 \mathbf{U} のランクが低下することがある. ランク低下により, \mathbf{U} の逆行列が算出できず, MTTF 計算を行えない.

上の二つの問題を解決する方法を次章で提案する.

3. 計算上の課題の解決

3.1 計算精度の問題

matlab に実装されている的可変精度機能を用いて計算精度の向上を行う. 設定する計算精度は所望の MTTF の大きさを元に決定する. MTTF は累積故障確率が 1 に収束するまでの時間により決定される. そのため収束するまでの期間の逆数が行列内に現れる最小の故障確率に相当する. 一例として, 100 年以下の MTTF を評価する場合を考えると, 有効桁数は 23 桁あれば充分である. 一方有効桁数を増加させると, 計算時間も増大する. 図 4 に離散マルコフ過程の状態数, 有効桁数と MTTF 算出に要した CPU 時間の関係を示す. 離散マルコフ過程の状態数が 133 のときは初期設定の倍精度の場合の計算時間と比較して約 5 倍になっていることが分かった.

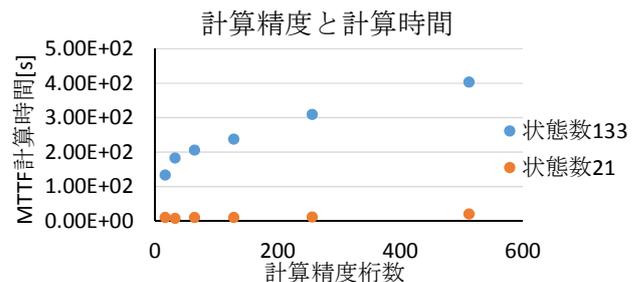


図 4 計算精度桁数と計算時間の関係

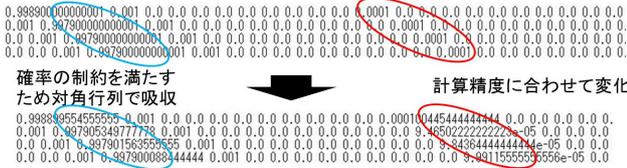


図5 乱数による成分の変更

3.2 式8の U^{-1} が算出できない問題

行列の性質上解析できないものに対して、図5に示すように乱数を用い、同じ値を持つ行の成分を変更する。変更する箇所は、各行の中で、最小の正の値を持つ部分とする。乱数による変化量は、設定した精度で計算可能な範囲とする。また遷移確率行列の制約を満たすため、行成分の合計が1になるよう対角成分で調整する。

以下に解析できない行列に対する成分変更の一例を挙げる。

例：式10の場合はMTTFが計算できない。一方で乱数を用いて成分を変更後の式11の場合、MTTFが計算可能となる。

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 & 0 \\ 0 & 0.48 & 0.52 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

成分変更によるMTTFへの影響を評価した。成分変更をせずにMTTFを評価できる行列に対して、乱数の成分変更を行い繰り返しMTTFを計算することで成分変更の影響を確かめた。元々MTTFが7.73E+07となる行列に対して成分変更を150回行ったところ、平均誤差は約1%だった。このように乱数による成分変更は本来のMTTFに近い値を推定できることが分かった。

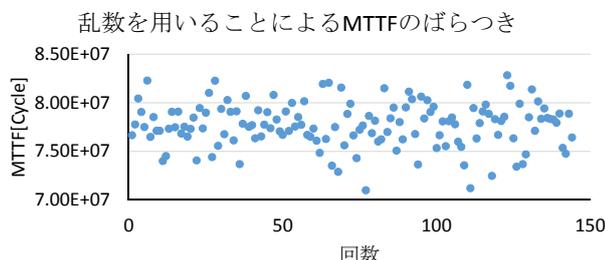


図6 乱数による成分の変更の影響

4. 遷移確率算出手法の妥当性評価

次に実際に離散マルコフ過程の遷移確率を算出する手法とその妥当性の評価について説明する。確率の算出手法は先行研究[3]で用いられていたものを、確率分布を用いて拡張した。4章ではエラーやエラー予告等のイベントの発生頻度を確率化する手法と、その妥当性について議論する。

4.1 イベント発生確率化

極稀かつランダムに起こる現象を確率化するため本稿ではポアソン分布を用いて、状態間の遷移確率を算出する。以下で議論するイベントはエラーやエラー予告を指す。

- $\lambda = (\text{平均イベント発生数}) = (\text{イベント数}) / (\text{時間 [cycle]})$
- $f(\lambda) = \lambda e^{-\lambda}$

$\lambda = (\text{平均イベント発生数})$ を代入することで、単位時間当たりのイベント発生確率が算出される。本研究では単位時間を1クロックサイクルとする。以上のポアソン分布を用いて、各状態間の遷移確率を以下の通りに算出する。

(1) エラー確率 (P_{er})

$$\lambda_{error} = (\text{エラー数}) / (\text{プログラム動作時間})$$

(2) エラー予告確率 (P_{tep})

$$\lambda_{tep} = (\text{エラー予告数}) / (\text{プログラム動作時間})$$

(3) モニタ時間経過確率 ($P_{monitor}$)

モニタ時間経過確率はモニタ時間内にエラーやエラー発生が起こらない確率である。エラーとエラー予告は同時に起こることはないため、発生頻度を用いて重みづけすることで、以下の式のように表すことができる。

$$1 - \frac{\lambda_{error}}{\lambda_{error} + \lambda_{tep}} P_{er} - \frac{\lambda_{tep}}{\lambda_{error} + \lambda_{tep}} P_{tep}$$

これらの確率算出手法が適応的速度制御を適用した回路の挙動を表現するうえで妥当なものかどうか、検討されていない。そのため、次節でシミュレーションを基に求めたMTTFと、確率的な評価手法を用いて算出したMTTFを比較することで、確率算出手法の妥当性を検証する。

4.2 遷移確率算出手法の妥当性評価

遷移確率算出手法の妥当性を評価するために、後述する高速シミュレーションから算出したMTTFと確率的に算出したMTTFを比較する。

高速シミュレーションを説明する。まず論理シミュレーションにより、各(電源電圧レベル、遅延変動パターン、実行プログラム)組でワークロードを実行し、各組のエラー/エラー予告のタイミングを算出する。次に算出した情報を基に、エラー/エラー予告の発生するタイミングを保存したデータベースを構築する。その後構築したデータベース内のデータを毎ワークロード毎に問い合わせて、イベントの発生を確認・処理し、長時間のシミュレーションを模擬する。図7に高速シミュレーションのフローを示す。

以上で説明した高速シミュレーションの結果と離散マルコフ過程の解析結果を比較することで、確率的モデル化の妥当性を評価した。図8に示すように同一のワークロードのデータベースからそれぞれのMTTFを算出する。

発生頻度の低い現象の生起確率を正しく算出するためには、十分な量のサンプル数(ワークロード数)が必要であると考えられる。そのため、ポアソン分布に従って疑似的に生成した、エラーやエラー予告を記録したデータベースを作成し、ワークロードの数を増加させることとMTTF評価誤差の関係性について評価した。

図9に示すように、ワークロードの数が増えると、確率行列から求めたMTTFと高速シミュレーションより求めたMTTFがほぼ一致している。この結果より、ワークロー

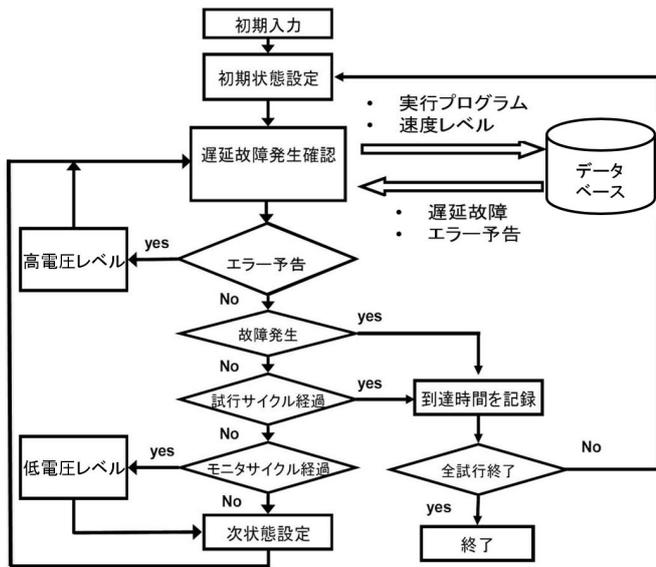


図7 高速シミュレーションフロー

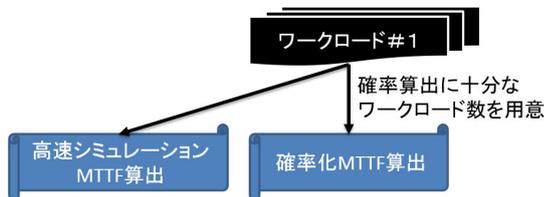


図8 同ワークロードからそれぞれ MTTF を算出

ド数は 30 以上用意すれば、前節の遷移確率算出により、5%以内の誤差で MTTF の評価が行えることを実験的に確認した。

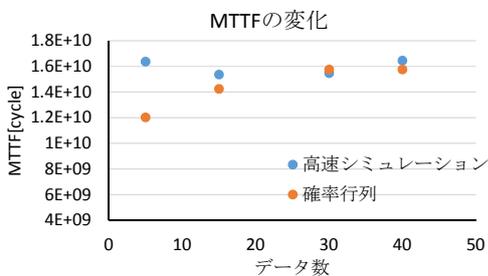


図9 MTTF の平均の比較

5. 回路のばらつきを考慮した評価手法

研究背景で説明したように、製造ばらつき等が要因で、各チップは異なるの素子特性を持つ。つまり、各チップは同じ使用年数や動作環境であっても、異なる挙動を示す(異なる故障確率を持つ)。様々な素子特性を持つチップ毎に、逐一、遷移確率行列を作成し MTTF を評価することは、計算時間の観点から好ましくない。本章では、これらのチップ群を代表する遷移確率行列を作り、性能を評価する手法 [4] の妥当性を評価する。

本章ではまず、チップ毎のばらつきを考慮する手法について説明する。次に、その手法の妥当性を評価するために、複数の仮想チップを用意し、各チップに対する遷移確率行列から算出した MTTF と全てのチップを一括して評価した MTTF を比較する。

5.1 チップ特性のばらつきを考慮した遷移確率行列計算

チップの製造ばらつきや NBTI を考慮して、離散マルコフ過程で故障発生率を評価する手法 [4] を説明する。離散マルコフ過程の状態数が爆発的に増やすことなく、製造ばらつきや NBTI 劣化等のばらつきの考慮を可能としている。

図 10 に示すように、各ゲートの持つ遅延量を一意の値ではなく、ばらつきを持った確率分布として表現する。この確率分布を用いて回路の故障確率を算出し、離散マルコフ過程の故障状態に移行する確率として利用することで、チップ特性のばらつきを考慮に入れた評価が可能となる。

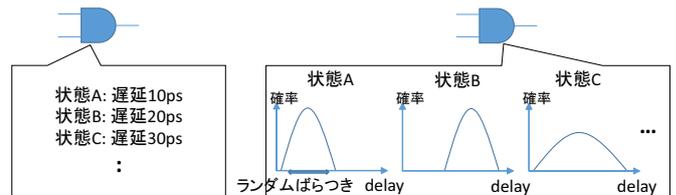


図10 各状態に対応する遅延の例

5.2 時間的、空間的事象を同時に確率的に扱うことの影響

前節で説明した手法は時間的な回路の振る舞いに空間的なばらつきを取り込んでいる。時間的、空間的なばらつきを同時に取り扱う影響を評価する。

[4] では、図 11 に示すように、各チップの故障確率を加算平均し、ばらつきを考慮した故障確率を算出している。この計算によって時間的確率空間である離散マルコフ過程内に空間的な確率であるチップ間のばらつきを取り込んでいる。

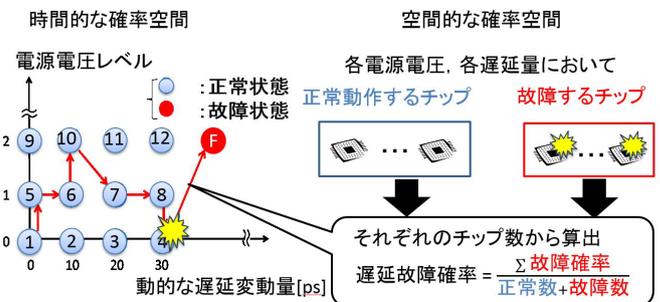


図11 時間的な確率空間と空間的な確率空間

図 12 に示すように、ばらつきを持ったチップを仮想的に 100 個用意し、それぞれの MTTF を算出し、また 100 個のチップから平均的な故障確率を算出した。その故障確率から MTTF を算出した。それぞれのチップから求めた MTTF を比較検討することで、確率を取り込むことの影響を評価する。評価環境の回路は OpenRISC、プロセッサで実行するプログラムは、MIBenchmark[8] から選択した、CRC32, SHA1, Dijkstra の 3 つを OR1200 OpenRISC Processor 用に書き換えたもので、入力データは各プログラムについて 30 個ずつ用意した。これらのシミュレーションには商用の論理シミュレータを用いた。

100 個の仮想的なチップと、各チップの故障時間の平均値と遷移確率行列から求めた MTTF を比較した結果を図 13 に示す。平均化には、加算平均と調和平均を用いてい

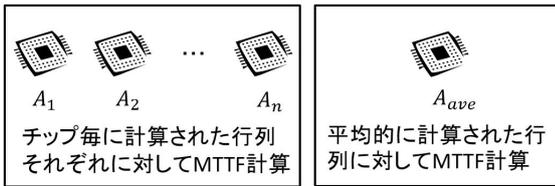


図 12 各チップと平均的チップ

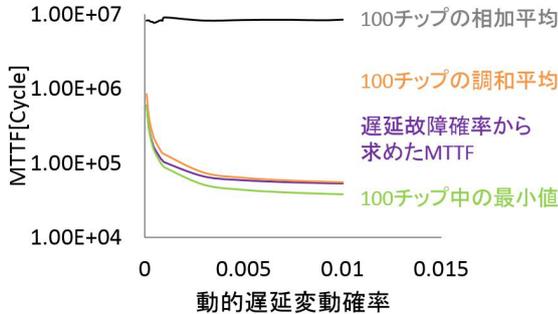


図 13 MTTF の最小値と平均値

る。調和平均は次の計算式で表される平均化手法である。

$$(\text{調和平均}) = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$$

図 13 から、各チップの故障時間の調和平均と遷移確率行列から求めた MTTF の値が極めて近いことが分かる。調和平均は値が小さいサンプルの影響を強く受ける平均化手法である。今回用いられている確率の平均化手法は、各回路の MTTF を個別に評価することなく、適度に悲観的な寿命を評価できるものである。次に調和平均に近い値が算出される理由を、状態数が二つの吸収状態を持つ離散マルコフ過程を例に説明する。

吸収状態に遷移する確率が a の離散マルコフ過程と、 b の離散マルコフ過程を定義する。各マルコフ過程は、遷移確率行列 A, B でそれぞれ表現される。各行列を元に、両マルコフ過程での MTTF を算出する。

$$A = \begin{pmatrix} 1-a & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$MTTF_A = \frac{1}{a} \quad (13)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1-b & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$MTTF_B = \frac{1}{b} \quad (15)$$

次に A, B 二つの遷移確率行列を平均化した遷移確率行列から MTTF を算出する。

$$A, B_{ave} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{a+b}{2} & \frac{a+b}{2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$MTTF_{\frac{A+B}{2}} = \frac{2}{a+b} \quad (17)$$

二つの遷移確率行列の平均から算出した MTTF と、それぞれの MTTF の調和平均は等しくなる。

$$\frac{1}{MTTF_A} + \frac{1}{MTTF_B} = 2/MTTF_{\frac{A+B}{2}} \quad (18)$$

以上のように、故障確率をまとめて取り扱うことによる MTTF 計算結果は、理論的にも調和平均を算出していることが分かる。

6. 結論

本稿では、確率的故障率見積り手法 [3] における解析手法上の課題を解決し、その発展手法 [4] を用いて回路のばらつきを取り扱えるか実験的に評価した。解析手法上の課題点は、計算精度の向上と、乱数を用いた行列成分の変更により解決した。確率の算出手法について、ワークロード数を 30 以上用意すれば 5% 以内の精度で MTTF を評価できることを確かめた。

ばらつきの取り扱いに関しては、複数の仮想的なチップを作成し、それぞれのチップを確率的に評価したものと全てのチップをまとめて評価したものを比較評価した。故障確率をまとめて取り扱うことによる MTTF 計算結果は調和平均を算出していることを確かめ、適度に悲観的な寿命を評価できるものであることを示した。

謝辞

本研究は STARC との共同研究による。

参考文献

- [1] A. Raychowdhury, J. Tschanz, K. Bowman, Shih-Lien Lu, P. Aseron, M. Khellah, B. Geuskens, C. Tokunaga, C. Wilkerson, T. Karnik, V. De, "Error Detection and Correction in Microprocessor Core and Memory Due to Fast Dynamic Voltage Droops," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol.1, no.3, pp.208-217, Sept. 2011.
- [2] D.Bull, S.Das, K.Shivashankar, G.S.Dasika, K.Flautner, D.Blaauw, "A Power-Efficient 32 bit ARM Processor Using Timing-Error Detection and Correction for Transient-Error Tolerance and Adaptation to PVT Variation," *JSSC*, vol.46, no.1, pp.18-31, Jan. 2011.
- [3] S. Iizuka, M. Mizuno, D. Kuroda, M. Hashimoto, and T. Onoye, "Stochastic Error Rate Estimation for Adaptive Speed Control With Field Delay Testing," *Proc. ICCAD*, pp.107-114, Nov. 2013.
- [4] S. Iizuka, Y. Masuda, M. Hashimoto, and T. Onoye, "Stochastic Timing Error Rate Estimation under Process and Temporal Variations," *Proc. ITC*, pp.1-10, 6-8 Oct. 2015.
- [5] J. V. Bukowski, and W. M. Goble, "Defining Mean Time-to-failure in a Particular Failure-state For Multi-failure-state Systems," *IEEE Trans. Reliability*, vol.50, no.2, pp.221-228, Jun 2001.
- [6] J. Brcsk, E. Ugljesa, and D. Machmur, "Calculation of MTTF Values with Markov Models for Safety Instrumented Systems," *Proc. ACS*, pp.30-35, 2007.
- [7] H. Fuketa, M. Hashimoto, Y. Mitsuyama, and T. Onoye, "Adaptive Performance Compensation with In-Situ Timing Error Predictive Sensors for Subthreshold Circuits," *IEEE Trans. VLSI Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 333-343, Feb. 2012.
- [8] M.R. Guthaus, J.S. Ringenberg, D. Ernst, T.M. Austin, T. Mudge, and R.B. Brown, "MiBench: A free, commercially representative embedded benchmark suite," *Proc. Workload Characterization*, pp.3-14, 2001.