

インクリメンタルシミュレーションにおける

イベント保存/評価効率の改善

7N-2

羽毛田 卓哉 新井 浩志 深澤 良彰 門倉 敏夫

早稲田大学 理工学部

1 はじめに

デジタルシステムの設計/検証サイクルを短くするための手法として、インクリメンタル機能シミュレーションアルゴリズム [1] (以下ではインクリメンタルアルゴリズムと呼ぶ) が提案されている。このアルゴリズムは、機能コンポーネントの入力信号線に関するシミュレーション結果を保存し、設計変更により影響を受ける部分だけを再シミュレーションすることによって、シミュレーション時間を短縮するための手法である。

本稿では、このインクリメンタルアルゴリズムを、ゲートレベルで記述された回路の論理シミュレーションに適用するための手法を提案する。ゲートレベルで全ての信号線のイベントを保存することは現実的に不可能であるため、できるだけ少ないイベント保存量で、できるだけ多くのイベント評価を削減することを考える。本手法では、このイベント保存/評価効率を改善するために、設計変更後のシミュレーションにおいて評価される可能性が高い信号線から優先的に選択し、イベントを保存しておく。さらに、デマンドドリブンアルゴリズム [2] を用いることにより評価量を最小限に抑え、イベントスケジューリングを行なうべき信号線の検出を省略する。

2 概要

本手法によるシミュレーションは、以下の手順で行なう。

1. 保存信号線を選択
2. 設計変更箇所の検出
3. 設計変更により影響を受ける部分の検出と、保存されたイベントの破棄
4. 観測要求の伝搬と信号値の評価

保存信号線を選択は、一つの回路につき一回だけ行ない、2~3の操作はその回路に対して設計変更が発生する度に繰り返し行なう。保存信号線を選択に関しては、第3章にて詳細に述べる。2. および 3. の処理は従来のインクリメンタルアルゴリズムと同等である。ただし、従来の手法では、設計変更の影響範囲を機能コンポーネント単位での接続関係に基づいて決定していたのに対して、本手法ではゲートレベルでの接続関係に基づいて決定している。これによって、設計変更の影響範囲を正確に見積り、再シミュレーションされる部分を最小限に抑える。また、

4. の処理では、デマンドドリブンアルゴリズムを用いることにより、イベントスケジューリングを排除し、評価量をさらに削減する。このアルゴリズムは、設計者によって要求された信号線の論理値を求めるために必要な評価だけを行なう手法であり、観測者が出した観測要求を入力側に向かい伝搬させ、その要求が回路の入力端子に伝搬したら、入力から観測要求のある信号線に向かって、再帰的に信号線の論理値を求める。本システムでは、このアルゴリズムを応用し、設計変更の影響を受けておらず、かつイベントが保存された信号線にたどりつくまで観測要求を伝搬させ、その保存されたイベントを用いて、観測要求の出た信号線のための評価を行なう。これにより、必要最小限の評価のみを行なうシミュレータの実現が可能になると同時に、従来のインクリメンタルアルゴリズムで必要であったイベントスケジューリングを行なうべき信号線の検出が不要になる。

3 保存信号線を選択

設計変更後のシミュレーションに有用な信号線を選択するための評価関数として、ある信号線のイベントを保存しておくことによって削減されるイベント評価量の期待値を用いる。この評価関数の値が大きい信号線から順に選択する。大規模な回路の全信号線のイベントを保存することは現実的に不可能であるため、信号線数があらかじめ定めた基準値に達するまで保存信号線を選択する。この評価関数は、以下に述べる各信号線に対する要求確率、 F 集合、 B 集合を用いて求める。

3.1 要求確率、 F 集合、 B 集合

設計変更後のシミュレーションにおいて、ある信号線が直接論理値を要求される確率を要求確率と呼ぶ。要求確率の概念を図1に示す。ある信号線 a_1 の要求確率 p_{a1} は、設計変更が各信号線で同一の確率で起こると仮定して、次のようにして求める。 a_1 の論理値に影響を与える信号線の集合を S とする。また a_1 を入力としているゲートの、 a_1 以外の入力信号線 $a_2 \sim a_n$ のいずれかに影響を与える信号線の集合を T とする。回路全体の信号線の集合を U とした場合に p_{a1} は以下の様に表される。

$$p_{a1} = \frac{|T-S|}{|U|}$$

信号線の集合 $T-S$ に含まれる信号線において設計変更が起きた場合、信号線 a_1 は設計変更により影響を受ける部分と受けない部分との境界信号線になる。この境界信号線の論理値がシミュレーション時に要求され、この論理値が保存されていれば不必要な評価を抑えることができる。

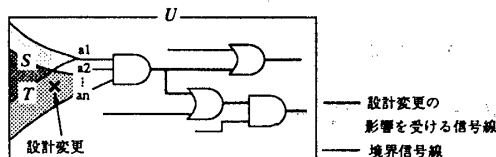


図1 要求確率の概念

また、ある信号線 a が影響を与える信号線で、保存信号線として選択されていない信号線の集合を、その信号線の F_a 集合と呼び、 F_a で表す。また、信号線 a が影響を受ける信号線で、保存信号線として選択されていない信号線と自分自身を含めた信号線の集合を B_a 集合と呼び、 B_a で表す。 F_a の要素の信号線の論理値を決定するには、 a の論理値が必要になり、 a の論理値を決定するには B_a の要素の信号線の論理値が必要になる。ただし、 B_a 集合にはシミュレーション対象回路全体の入力信号線は含まない。

3.2 評価関数

ある信号線 a に対する評価関数 h_a は、 a のイベントを保存しない時の a に関する計算量の期待値と保存した時の a に関する計算量の期待値の差を表す。評価関数の値が大きいくほど、イベントの保存が有効な信号線になる。評価関数の考え方を図2に示す。

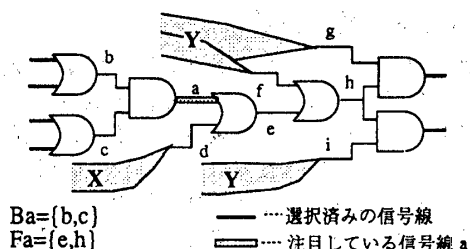


図2 評価関数の考え方

評価関数 h_a は次の様に表される。

$$h_a = \underbrace{(p_a \times |B_a| + \sum_{i \in F_a} (p_i \times (R_i + |B_a|))) + \frac{(R_i + |B_a|) \times |F_a|}{|U|}}_{(1)} - \underbrace{(\sum_{i \in F_a} (p_i \times R_i) + \frac{R_i \times |F_a|}{|U|})}_{(2)}$$

$$= |B_a|(p_a + \sum_{i \in F_a} p_i + \frac{|F_a|}{|U|})$$

上式の (1) は信号線 a のイベントを保存しない時の計算量の期待値であり、(2) は信号線 a のイベントを保存した時の計算量の期待値を表している。この式において R_i は F_a の要素の信号線 i から、 a までの信号線数を表す。信号線 a の論理値が要求される場合には、(a) 信号線 a が境界信号線になる場合、(b) F_a の要素の信号線が境界信号線となり、その要素から a に観測要求が伝搬する場合、そして、(c) F_a の要素において設計変更が起き、その要素から a に観測要求が伝搬してくる場合の3通りが存在する。信号線 a に関する計算量の期待値は、この3つの期待値の和をとることにより求める。(a),(b),(c) は、それ

ぞれ図2における X, Y, F_a の部分で設計変更が起きる場合に対応しており、式 (1) の第1項から第3項によって表される。信号線 a のイベントを保存した場合の計算量の期待値は (1) の $|B_a|$ を0とすることによって式 (2) で表される。

この評価関数に基づき、1つの信号線を保存信号線として選択すると、まわりの信号線の F 集合、 B 集合が変化する。どちらかの集合の要素が1つでも変化した信号線について、評価関数の値を求め直し、次の保存信号線を選択する。

4 評価

総ゲート数 19, コンポーネント数 4 の回路に対し、本手法、従来のインクリメンタルアルゴリズム、及び全信号線のイベントを保存した場合の保存/評価効率を表1に示す。表1における削減信号線数は、入力パターンまたはゲート種の変更が1箇所のみで起こると仮定した場合、各設計変更後のシミュレーションにおいて再評価の必要がなかった信号線数の総和である。ただし、本手法の評価においては、出力信号線全てに観測要求を出した場合を想定している。また、効率は、削減信号線数を保存信号線数で割った値であり、この値が大きいくほど、保存/評価効率が良いことを表す。

表1: 保存/評価効率

	保存信号線数	削減信号線数	効率
本手法	6	340	56.7
従来の手法	6	257	42.8
全信号線保存	19	369	19.4

表1より本手法における保存/評価効率がよいことが分かり、全信号線のイベントを保存できないような大規模な回路においては本手法の有効性がさらに増すと考えられる。また、観測要求を分割して出すことにより、さらにシミュレーションの効率を上げることが可能になる。

5 おわりに

以上、インクリメンタルシミュレーションにおけるイベント保存/評価効率の改善について述べた。実際のシミュレーション性能は、1つの回路につき設計/検証をどのくらい繰り返すか、また、設計変更により影響を受ける部分が回路全体に対しどの程度であるかなどの要因に左右される。特にフィードバックループがある場合、設計変更の影響が広がりやすい。本稿で述べた手法により、必要最小限の評価のみを行なうシミュレータの実現が可能になり、この問題は改善できると考えられる。

参考文献

- [1] Sun Young Hwang, Tom Blank, Kiyong Choi, *Incremental Functional Simulation of Digital Circuits*, IEEE Computer Aided Design(1987).
- [2] Steven P.Smith, M.Ray Mercer, Bishop Brock, *Demand Driven Simulation: BACKSIM*, IEEE Design Automation Conference(1987).