インクリメンタルシミュレーションを高速化するための回路分割手法について

2H−6

森 達也[†]　新井 浩志[‡]　深澤 良彰[†]
[†]早稲田大学理工学部　[‡]千葉工業大学工学部

概要

順序回路のシミュレーションを高速に行うアルゴリズムとして，インクリメンタル・イン・タイム（以下IIT）アルゴリズムが提案されている[1]. IITのシミュレーション対象は，複数のコンポーネントに分割された論理回路である．そして，設計変更後の再シミュレーションにおいて，前回のシミュレーション時と異なる入力信号を持つコンポーネントだけを再評価する．しかし，任意のコンポーネントに分割された大規模回路にIITを適用した場合，必ずしも多くのコンポーネントの入力信号が前回と同じになるとは限らないため，大幅に再評価を削減できるとは限らない．本論文では，設計変更後の再シミュレーションにおいて，コンポーネントを再評価しなければならなくなる確率を定義し，その確率が小さくなる様に，回路全体をコンポーネントに分割する．これにより再評価の回数を抑え，IITの有効性を増す．

1.はじめに

IITの基本的概念を図1に示す．IITではまず，従来のイベント駆動方式を用いて回路全体を一度シミュレーションし，すべてのコンポーネントの境界信号線のイベントと内部状態を保存する．次に×印の部分が変更された後の再シミュレーションでは，この影響を受けるコンポーネントだけを再評価する．この際に，影響を受けるコンポーネントと受けないコンポーネントの境界の保存イベントを入力信号とする．

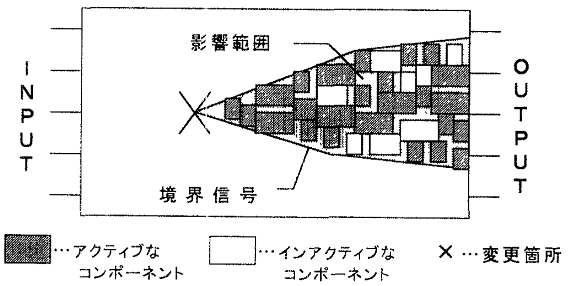

図1:IIT シミュレーション

ただし，設計変更の影響範囲であっても，そのコンポーネントの入力信号と内部状態が同じ(インアクティブと呼ぶ)であれば，出力信号も前回のシミュレーション時と同じである．それゆえインアクティブであるコンポーネントは再評価する必要はない．よってIITの特徴は，この影響範囲の再シミュレーションの際に，入力イベントか内部状態が前回とは異なっている(アクティブと呼ぶ)コンポーネントだけを，再評価することにある．あるコンポーネントはシミュレーション時刻によってインアクティブがアクティブに，アクティブがインアクティブに変化する．また，フィードバックループを含む回路において，あるコンポーネントの入力がアクティブとなり，再評価されたとしても，出力が前回と同一であるならば，その出力からフィードバックされたコンポーネントはインアクティブのままであり，再評価する必要はない．この様に，IITはフィードバックループを含む回路において特に有効である．

IITでは，回路全体がどのようなコンポーネントに分割されているかによって，どれだけ設計変更影響範囲が縮小され，再評価量を削減することができるかが決まる．しかし，一般には，回路設計時の機能によるコンポーネント分割がそのままシミュレーション時にも用いられるため，必ずしもアクティブになり難いコンポーネントに分割されているとは限らない．よって，いかに効率よく最適なコンポーネントに分割できるかが問題となる．

2.コンポーネント分割アルゴリズム

2.1 従来分割方法

我々はまず，従来一般的な回路分割で用いられる手法として，レベル付け手法，クラスタ分割法，深さ優先探索法を利用して分割を行い，IITの有効性を評価した．

これらの一般的な分割手法の中では，深さ優先探索法が，コンポーネントがアクティブになる回数を最も抑えることができた．しかし，深さ優先探索の過程では，ファンアウトがある場合に探索する信号線の選択がランダムにおこなわれており，ヒューリスティックな判断は用いていない．そこで，以下では，アクティブ確率を用いた分割手法を提案する．

2.2 アクティブ確率を用いた分割手法

本分割手法では，信号確率[2]を用いてコンポーネントのアクティブになり易さを計算し，回路の全コンポーネントに対しアクティブになる確率の総和が，最も低くなるような分割を行うことを考える．ここで，信号確率とはある一定時間内において信号線の論理値が1になる確率であり，シミュレーションのテストベクトルから計算する事ができる．以下では信号線の信号確率から，信号線毎のアクティブ確率を求め，これをもとに，コンポーネントのアクティブ確率を求める．

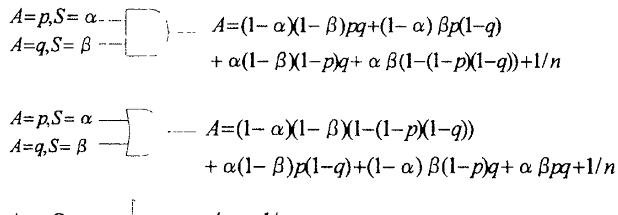

図2:アクティブ確率計算

信号線のアクティブ確率とは，一定時間においてその信号線がアクティブになる確率と定義する．入力信号線のアクティブ確率は，それ自体が変更される確率1/nとする．こ

An Effective Partitioning Method of Logic Circuits for Incremental-in-Time simulation algorithm
Tatsuya Mori[†], Hiroshi Arai[‡] and Yoshiaki Fukazawa[†]
[†] School of Science & Engineering, Waseda University
[‡] Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology

こでnは，対象回路に含まれるゲートの総数である．内部の信号線のアクティブ確率は，図2の計算式を用いて逐次計算する．ここで，Aはアクティブ確率，Sは信号確率を示す．例えば，2入力ANDゲートの場合を考える．入力が0と0の時，出力が以前と変化するのは，入力が両方ともにアクティブ(変化)になった時である．信号線の論理値が両方共に0になる確率は(1−信号確率1)＊(1−信号確率2)であり，これに両方の入力線のアクティブ確率を掛けることによって，入力が両方とも0の場合の出力信号線のアクティブ確率を求めることが出来る．入力信号が0と1の時，1と0の時，1と1の場合も同様に計算し，これらの総和に，そのゲート自身が設計変更される確率1/nを加えてANDゲートの出力信号線のアクティブ確率とする．また，フィードバックループを含む回路では，各信号線のアクティブ確率の初期値として1/nを与え，図2のアクティブ確率計算を規定回数おこなうことによって収束した値を，各信号線のアクティブ確率とする．

このアクティブ確率が低い信号線は論理値が変化し難いと言えるので，この信号線を入力に持つコンポーネントはアクティブになり難いということができる．

さらに，各コンポーネントのアクティブ確率を求める．IITでは，少なくとも1つの入力信号線がアクティブなコンポーネントはアクティブとなり，再評価する必要がある．したがって，入力信号線のアクティブ確率をA_1〜A_nとした時に，コンポーネントのアクティブ確率Kは次式で求められる．

$$K = 1 - (1 - A_1)\cdot(1 - A_2)\cdots(1 - A_n)$$

回路全体に対してコンポーネントのアクティブ確率の総和を最小にするためには，ゲートをコンポーネントに分割するすべての組み合わせを調べる必要がある．これは，多大な計算量を必要とする．よって，ここでは，深さ優先探索でつながりのあるゲートを多く1つのコンポーネントに取り入れることにより計算量を低減するため，次のようなアルゴリズムを用いてコンポーネント分割を行う．

1. 各信号線のアクティブ確率を求める．
2. 深さ優先探索で既定値個数のゲートを含むコンポーネントを作成する．
3. そのコンポーネントに接続しているゲートのうちコンポーネントのアクティブ確率が最小になるように順に追加する．
4. 最終既定値個数になるまで3を繰り返す．

3.評価

3.1 アクティブ確率の妥当性

図4は，図3を対象回路として，ランダムに選択した信号線1本に設計変更を加え，信号線のアクティブ確率と，実際のアクティブ回数の関係をグラフにしたものである．これによると，アクティブ回数はアクティブ確率にほぼ比例していることが分かり，アクティブ確率が高いと実際にアクティブになり易いと言える．

3.2 IITの高速化

本分割手法と，深さ優先探索法の有効性を比較するため，次の評価を行う．

比較回数：再シミュレーション時において，コンポーネントの入力信号線のイベントを保存されている情報と比較し，アクティブかどうかを判定する回数．

評価回数：再シミュレーション時において，アクティブとなったコンポーネント内で再評価されたゲート数．

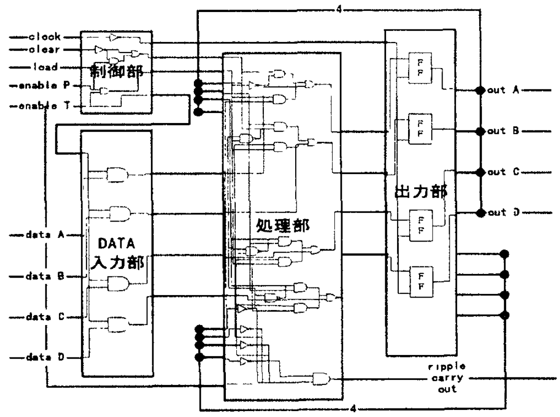

図3：評価対象回路(74L136Aカウンタ)

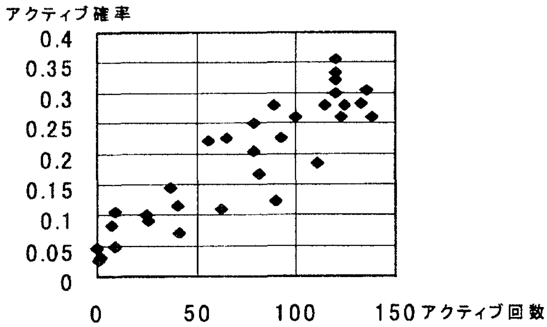

図4：アクティブ確率とアクティブ回数の関係

比較回数と評価回数が少ないほど，再シミュレーションの際に，作業効率が上がり，IIT有効性が増していると考えられる．表1は各回路において，本分割手法と深さ優先探索による分割法の比較回数，評価回数を示したものである．表1によると比較回数・評価回数共に，深さ優先探索手法より本分割手法が少なくなっていることが分かる．

表1：各回路のコンポーネントのアクティブ確率比較

評価回路	深さ優先分割		本手法による分割	
	比較回数	評価回数	比較回数	評価回数
74L163A	17010	23321	13755	18723
C880	146657	133544	110136	99633
S298	19880	12806	10143	9164
S444	94833	76095	22585	11878
S1238	232307	203146	208804	187845

1000フレームタイム．各評価回路共，同一コンポーネント数．

4.おわりに

本分割手法と深さ優先探索による分割手法において，1コンポーネント当たりのゲート数は人手で指定している．今後はコンポーネントの大きさを自動的に求める手法を考察していく必要がある．

参考文献

[1]Kiyoung Choi, Sun Young Hwang, and Tom Blank. *Incremental-in-Time* Algorithm for Digital Simulation. Stanford University IEEE Design Automation Conference(1988)

[2]玉本，成田，ランダムテスト法における入力確率の一選定方法，電子通信学会論文誌 Vol.J65-D no.8, pp.1057-1064(1982)