

## 論理シミュレーションの精度に関する考察

5N-3

淡海功二 安浦寛人 田丸啓吉

京都大学工学部

## 1 はじめに

論理シミュレーションの性能は、主として速度と精度の2つに大別される。速度性能に関しては、従来から単位時間当りのイベントやゲートの処理数などの定量的な指標が利用されてきた。一方、シミュレーションの精度も重要な性能の1つであるが、一般的な定義が確立しているとはいえない。その原因は、精度を議論するための基準が不明確であったからと考えられる。つまり人によって曖昧に実際の回路そのものの動作を基準として思い浮かべ、それを基準にして「精度」を感覚的に議論していたからである。基準となる回路動作をどのような形で定義するかが明確でなければ、精度を定量的に議論することはできない。しかし現在まで、基準を明確にしたシミュレーションの精度に関する議論はきわめて少ない。

本稿では、精度を定量的に議論するための一手法について述べる。

## 2 シミュレーションの精度を決定する要因

一般的に、シミュレーションの精度を決める要因は、以下のように分類できると考えられる。

## (a) 回路のモデリングの違い

## (1) 回路素子のモデリングの違い(階層の違い) [1]

デジタル/アナログ, 回路/論理/機能レベル, 双方向信号の扱いなど

## (2) 信号値の種類 [2][3]

不定値  $x$  を用いた3値論理や多値論理など

## (3) 遅延モデルの違い(=時間の扱い) [2]

0遅延, 単位遅延, 標準遅延, 最大/最小遅延, 立ち上がり・立ち下がり遅延, 慣性遅延など

## (4) 時間の刻み幅

## (b) シミュレーションアルゴリズムの違い

イベントハンドリングの手法など

(a) は回路のモデリングの違いに起因するものである。(b) は、シミュレーションアルゴリズムに起因するものであり、言い換えればシミュレータに依存するものである。

## 3 精度の定式化

## 3.1 基本方針

ここでは、精度を与える手法の基礎となる考え方について述べる。1節で述べたように、シミュレーション精度について議論するためには、対象とする回路の動作の基

準を明確にしなければならない。しかし、基準を実際の回路の動作とすることは、現実的とは言えない。これは、物理量の測定誤差や、現実の世界とモデル化された世界の比較(解釈)の方法が多様であるからである。そこで、基準の選び方について、次の2つの方法が考えられる。

(a) 既存の回路モデルどうして、各々のモデル間の相対精度を定義する

(b) 基準となる回路モデルを厳密に決定し、それに対する絶対精度を定義する

本節では、より一般的な手法である(a)によって定義を行い、次節でUDL/Iを基準とした(b)について説明する。

次に、基準モデルと対象モデルの比較法について、

(1) アルゴリズムを解析的に比較する

(2) 特定の回路(ベンチマーク回路)に対する入出力関係を比較する

があるが、(2)が現実的だと思われる。

次に、精度を定式化するにあたり要求される事柄を、以下にまとめる。

- ・一般性のある定義になっている
- ・そのシミュレーションの特徴が反映されるような定義
- ・2節の精度を決定する要因による違いが現れる方が望ましい
- ・言語/シミュレータの設計者/ユーザの直感に近い方が望ましい

## 3.2 一般的な精度の定義

ここでは、前節の議論より、精度の基準を任意に選ぶ一般的な方法について議論する。基本的な考え方は、基準側と対象側のシミュレーション出力の意味を、それぞれ論理値の変化を並べた一次元のイベント系列の集合として表し、その集合の比較によって精度を定義するものである。シミュレーション出力は、一般にイベントの半順序集合(順序はイベントの生起順序に対応)と考えられる。シミュレーション出力を一次元イベント系列の集合で表す変換規則は、この半順序関係を、それと矛盾しない全順序関係(一次元系列)の集合におきかえるものである。例えば、2つのイベント  $a, b$  の同時発生は集合  $\{ab, ba\}$  で表される。 $n$  単位時間連続する不定値  $x$  は  $2^n$  個の系列集合で表されると解釈する。次に定式化に移る。

$c$ : ある回路

$i:c$  に対するある入力系列 (の集合)

$O(BAS, c, i)$ : 基準モデル  $BAS$  において  $c$  に  $i$  を加えたときに得られるイベント系列集合

$O(SIM, c, i)$ : 比較対象となるシミュレーションアルゴリズム  $SIM$  で  $c$  に  $i$  を加えたとき得られるイベント系列集合

としたとき、回路  $c$  と入力系列  $i$  に関する  $SIM$  の精度は  $f(O(SIM, c, i), O(BAS, c, i))$

で与えられる。  $f$  として、集合の要素数の比、集合の包含関係などが考えられる。  $f$  を変えることで、異なった側面から見た精度の定義が可能である。 一般には、  $O_{SIM} \subset O_{BAS}$  のとき楽観的、  $O_{SIM} \supset O_{BAS}$  のときは悲観的と言われるため、いずれの性質も反映するような  $f$  の定義が必要である。 そこで次のように、2種の定義ができる。

(1) 過小評価精度

$$A_u = \frac{|O(BAS, c, i) - O(SIM, c, i)|}{|O(BAS, c, i)|} \quad (1)$$

(2) 過剰評価精度

$$A_o = \frac{|O(SIM, c, i) - O(BAS, c, i)|}{|O(SIM, c, i)|} \quad (2)$$

ただし、  $A - B = A \cap \bar{B}$ ,  $|A| = \text{num}(A)$  である。

#### 4 例題

##### 4.1 UDL/I を基準とした精度

本稿では、より具体的な精度の定式化のために、基準モデルを標準化言語 UDL/I[4][5] とした絶対精度の定義を議論する。これは、以下のような理由によるものである。

1. シミュレータの回路情報としての入力は、一般にハードウェア記述言語であることを考えると、ある言語で記述されたときの意味としての回路動作を基準として、精度を考えるのが自然である。
2. 既存の回路モデル間での相対的定義では、厳密さに欠ける恐れがある。UDL/I では言語の意味論が厳密に定義されている。
3. UDL/I では、言語の意味は物理現象（対象回路の動作）をどのようにモデル化しているかに対応するものであり、シミュレータなどのツールのテクノロジーに束縛されない。
4. UDL/I では、より自然な意味付けを行うために、非決定性を導入している。これにより、回路内の原理的に予測できない不確定動作、設計の上位レベルで決定されていない don't care にあたる動作や遅延に幅がある場合の動作などが厳密に表現されている。

この観点から言えば、シミュレーションとは、（対象回路の基準言語によるモデル化としての）記述の表す動作を模擬することである。これは必ずしも基準言語の意味を完全にシミュレートするものではなく、ある近似によってシミュレートすることであってもよい。この近似の度合いが精度を表し、近似が近いほど精度が良いといえる。この近似度すなわち精度は処理速度と大きく関係し、一般に処理速度を上げると精度は落ちる。用いるシミュレーションアルゴリズムは、必要とされる精度と速度のトレードオフによって決定される。

##### 4.2 例題

図1に回路例とタイミングチャートを示す。これは、D-FF のデータ入力とクロックが同時に変化する場合、この場合に動作が異なる3つのモデルによるアルゴリズムが示されている。  $D$  と  $CK$  の同時変化が生じたときに、

$D$  を先に処理するモデル、  $CK$  が先のモデル、エラーであると解釈して  $x$  を出力するモデルを考え、それぞれ順に1~3の添え字を与える。UDL/I の意味においては、集合  $\{out_1, out_2\}$  が出力として得られる。

出力だけに着目して1,2式より過小評価精度、過剰評価精度を求める。モデル1(2)については、  $A_{u1(2)} = \frac{1}{2}$ ,  $A_{o1(2)} = 0$  である。モデル3では、  $A_{u3} = 0$  つまり正しい解を含んでいない割合が0であり、  $A_{o3} = \frac{2^{11}-2}{2^{11}} = 1 - 2^{-10}$  で解の内正しくないものの割合がほぼ1である。このように、UDL/I を基準にすることにより、過小評価性、過剰評価性いずれもが一般の実感に近い形で表されていると言える。逆に言えば、精度の定義には基準の選択が非常に重要な問題である。

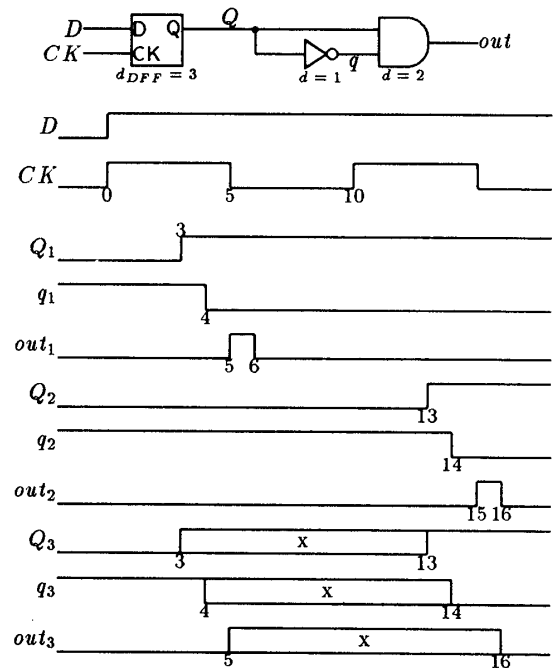


図1. 3種のモデルによるタイミングチャート

#### 5 おわりに

本稿では、論理シミュレーションの精度を定式化する一般的な手法を提案し、それに基づいてUDL/Iを基準とした場合の精度について述べた。今後の課題としては、ベンチマーク回路の吟味が挙げられる。これには、精度によって何を調べるのかを更に明確にし、方針を決めて行かなければならない。

#### 参考文献

- [1] E.Ulrich, D.Herbert, "Speed and Accuracy in Digital Network Simulation Based on Structural Modeling", 19th DAC, IEEE 1982
- [2] M.A.BREUER, A.D.FRIEDMAN, "DIAGNOSIS & RELIABLE DESIGN OF DIGITAL SYSTEMS", COMPUTER SCIENCE PRESS, INC.
- [3] H.P.Chang, J.A.Abraham "The Complexity of Accurate Logic Simulation", ICCAD, 1987
- [4] "LSI 設計用記述言語仕様" (UDL/I マニュアル), LSI 設計用記述言語標準化委員会
- [5] 安浦寛人, "LSI 設計用記述言語の標準化における意味の統一について", 信学技報, VLD88-96 (Feb.1989)