

検査容易度判定システム (TRUE) とその評価尺度

西田隆夫 宮本俊介 小澤時典
(株) 日立製作所 中央研究所

1. 緒言

現在開発されている VLSI や、近い将来出現が予想される ULSI では、取り扱うべき回路規模の急激な増加により、診断データ作成が従来に比ますます困難になると予想される。それ故、論理設計の初期段階から診断容易化設計手法を採用し、診断データの検出率を向上させる試みが為されている。この診断容易化設計を支援する為の CAD システムとして幾つかのテストビリティ解析プログラムが提案されている。代表的なテストビリティ解析プログラムとしては SCOAP [1], CAMELOT [2], ITTAP [3] などが挙げられる。これらのシステムは対象論理回路の制御容易度 (CY: Controllability) と観測容易度 (OY: Observability) を計算する事を主な目的としている。

しかしながら、検査容易化設計の為には、検査容易化のための論理変更を実施するか否かを決定する重要な指標である検出率の推定が是非とも必要である [4]。CY 及び OY の最も重大な欠点は、それらが論理回路自身の特性のみを考慮して計算されており、診断システムの能力を考慮に入れていない事が挙げられる。従来開発されてきたテストビリティ解析プログラムでは検出率の推定が不可能であった。

TRUE (Testability Refinement by Undetectable fault Estimation) [5] はこの欠点を除去するために開発されたシステムであり、検査容易化設計の重要な指標である検出率を推定する事を主な目的としている。

本稿では、TRUE の概要を述べるとともに、TRUE の性能を評価する各種評価パラメータを提案し、テストビリティ解析プログラム自身の性能を解析する。

2. 検査容易化設計支援システムに対する要請

従来、各種の検査容易性判定指標が提案されてきたが、Keiner [6] による分類を採用すると、表 1 に示す 2 種類に大別できる。本質的指標は回路特性のみに依存した指標であるが、付带的指標は回路特性とテストパターン自動生成システム (ATG: Automatic Test pattern Generation system) の能力の両者に依存した指標である。

表1 検査容易性判定指標の分類

分類	指標	内容
本質的指標	制御容易度 (CY)	・ゲート論理値を0又は1に制御する容易さを示す指標
	観測容易度 (OY) 検査容易度 (TM)	・ゲート論理値を伝達させる容易さを示す指標 ・故障検出容易性を示す指標 CY及びOYの関数
付帯的指標	故障検出率 指摘分解能	・テストパターンの故障検出能力を示す指標 ・テストパターンの故障位置指摘能力を示す指標

CY : Controllability, OY : Observability, TM : Testability Measure

論理設計者にとっては、後者の付帯的指標が検査容易化設計の為の論理変更を実施するか否か判断する基準となっているため、より重要な指標となっている。

検査容易化設計支援システムを用いた論理設計の流れ図を図1に示す。検査容易化の為の論理変更は余分な工数と製造コストの増加を招くため、必要最小限の変更で最大の効果を挙げることが望まれる。このため、支援システムとしては表2に示す機能が必要であり、表1に示した両指標の計算が不可欠となる。TRUEはこれらの機能を提供した設計支援システムである。

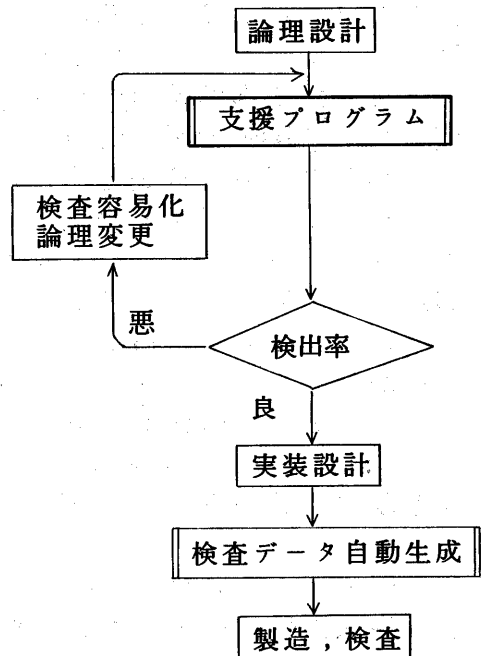


図1 設計，検査の流れ

表2 検査容易化支援システムの必要機能

機能	必要性
故障検出率推定	・検査容易化論理変更の必要性判定
未検出故障の指摘	・検査容易化論理変更必要箇所の指摘
制御容易度, 観測容易度の表示	・検査容易化論理変更補助情報

3. TRUE 概要

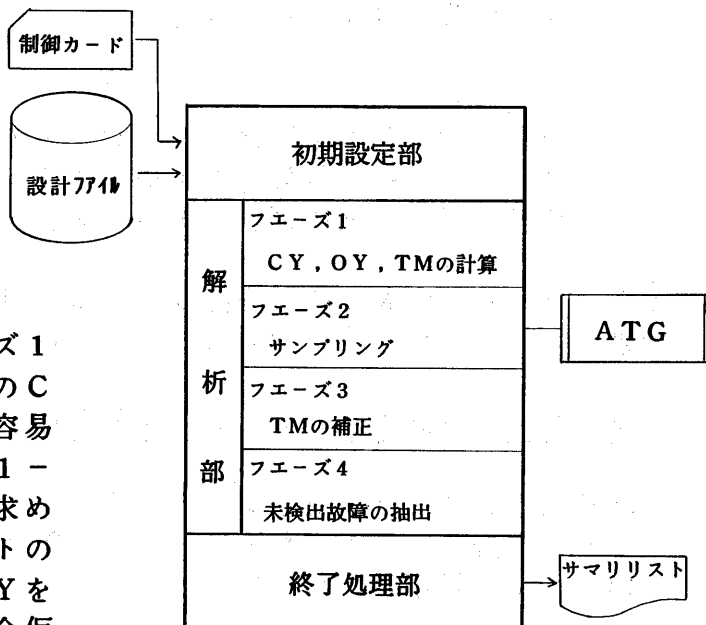
TRUE のシステム構成を図 2 に示す。以下、各処理について概要を述べる。

(1) 初期設定部

設計ファイルを入力し、内部情報に展開する。冗長故障の抽出、処理高速化の為にレベルソートも実施する。

(2) 解析部フェーズ 1

各ゲートの出力の CY0 (0 - 制御容易度), CY1 (1 - 制御容易度) を求める。次に各ゲートの入力について OY を求める。最後に全仮定故障にたいして CY0, CY1, OY を用いて TM を計算する。



ATG : AUTOMATIC TEST PATTERN GENERATION SYSTEM

図2 TRUE システム構成

(3) 解析部フェーズ 2

逐次サンプリング法により故障検出率を推定する。回路中に仮定された故障の中からランダムに幾つかの故障をサンプリングする。これらの故障にたいし、ATG を作動させ検出率を求める。全体の仮定故障に対する検出率は、この結果を用いて確率論から推定する。確率論から求めた推定誤差が、指定許容誤差以下に収まるまでこの過程を繰り返す。

(4) 解析部フェーズ 3

フェーズ 2 のサンプル故障に対する試行結果を用いて、TM の補正を行う。また、特殊な記憶素子による制御不能故障、観測

不能故障を抽出する。

(5) 解析部フェーズ4

フェーズ1～3で得られた情報を基に、境界TM値を決定し、この値よりTMの大きな故障を未検出故障と判定する。また過去の実績から、ATG実行時の全体テストパターン数と処理時間も同時に推定する。

(6) 終了処理

結果出力として推定検出率の範囲とその信頼度、推定テストパターン数、推定処理時間を出力する。また、各故障毎にCY, OY, TM, 検出/未検出表示を行う。

以下では、検査容易化設計支援システムに対する性能評価パラメータを定義し、それらを用いてTRUEにより得られた結果を評価する。

4. 検査容易化設計支援システムの性能評価

性能評価パラメータは支援システム全体をユーザ側から評価するパラメータと、支援システム内部の処理方式を評価する技術的パラメータとに大別される。以下各々について述べる。

4.1 ユーザ側からの評価パラメータ

(1) 評価パラメータ定義

ユーザにとって最も関心の深い性能とは、システムが如何に高速に精度良く検出率を推定可能かである。これを定量的に評価するため以下の処理速度比 ϕ 、推定誤差 ϵ 、適中率 θ の3つのパラメータを定義する。表3及び図3にその内容を示す。

表3 性能評価パラメータ

分類	NO.	パラメータ	定義	計算式
精 度	1	推定誤差(ϵ)	TRUEの推定検出率(r)とATGの診断結果の検出率(R)との差	$\epsilon = r - R = (C - B) / N$
	2	適中率(θ)	TRUEの推定が適中した故障数(n)の全故障数に対する比率	$\theta = n / N = (A + D) / N$
処理 時間	3	処理時間比(ϕ)	TRUEの処理時間とATGの処理時間の比率	$\phi = t / T$

N:全故障数

A-Dは図3参照

T:ATG処理時間

t:TRUE処理時間

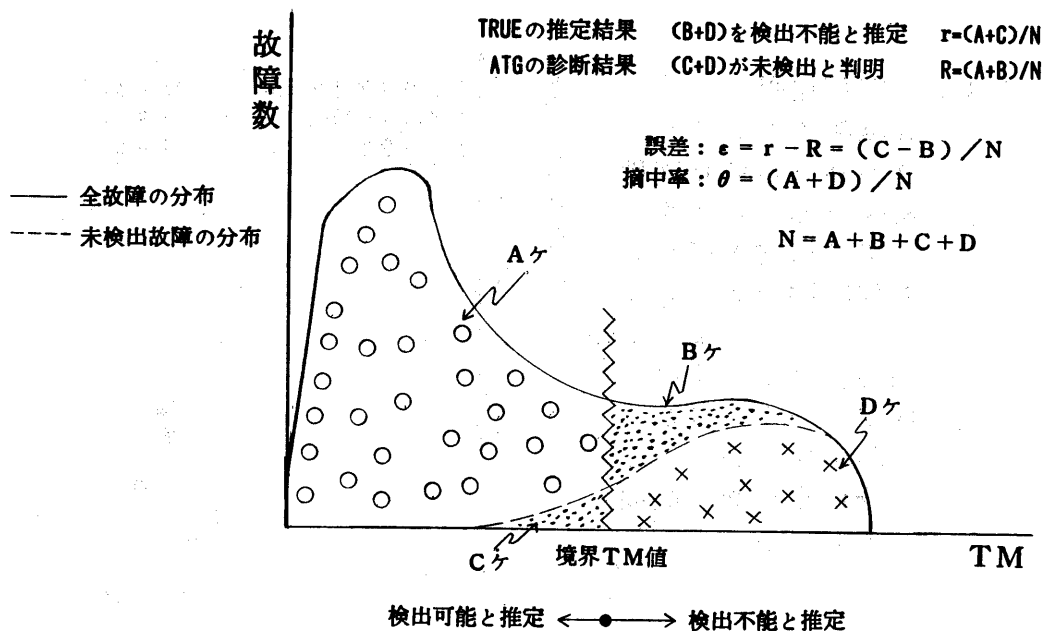


図3 精度の評価パラメータ

(2) パラメータ相互関係

性能評価の為に定義した3つのパラメータには相互の関係があり, ATGにより求められる真の検出率Rと推定誤差 ϵ , 適中率 θ の間には図4に示す関係が成立する. すなわち, Rが100%または0%に近づくほど, 推定誤差 ϵ と適中率 θ の関係は密接となり, Rが50%のとき, ϵ と θ の関係が最も弱くなる.

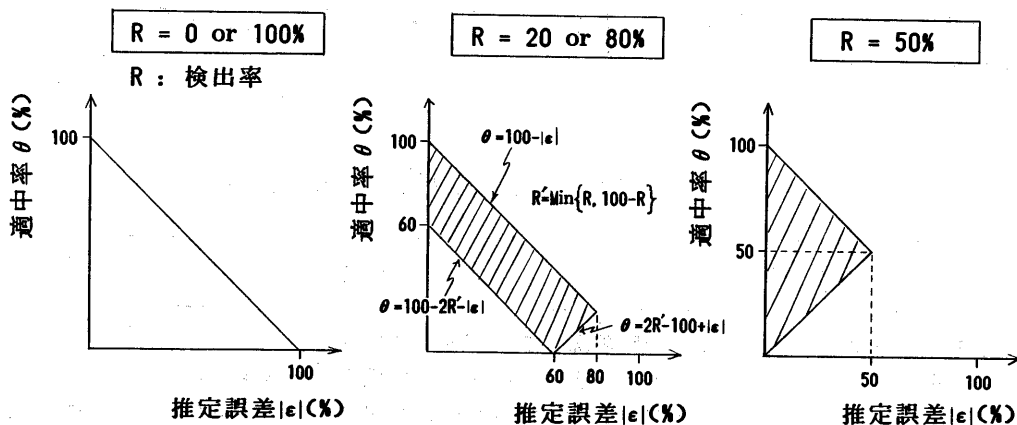


図4 検出率、推定誤差、適中率の関係

(3) 評価結果

8種類のベンチマーク回路を用いた評価結果を図5に示す。ATGの約1/6の処理時間で $\epsilon = 3.9\%$ 、 $\theta = 92.6\%$ の精度で検出率の推定、検出/未検出故障の判定ができ、充分実用になる範囲と思われる。

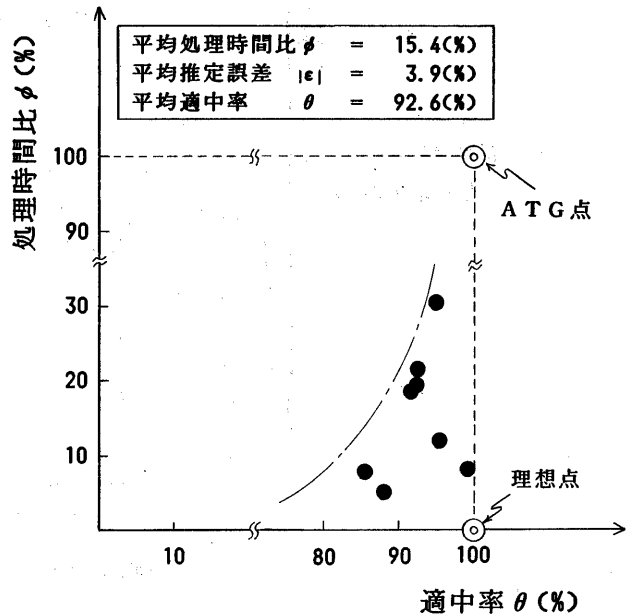


図5 TRUE評価結果

4.2 技術的評価パラメータ

本節では、TRUEで採用している、各種処理方式の果たしている役割を定量的に評価するためのパラメータについて考察を加える。

TRUEでは表4に示す2方式を採用して検出率の推定をしている。このサンプリング法とTM値利用法がTRUEの目的に対し寄与する度合いの計測、また今後の方式改善の方向を見定めるため新しいパラメータを定義する。

表4 TRUE検出率推定処理方式

	処理方式	内容
1	サンプリング法	・ 仮定故障をランダムにサンプリングし、ATGを用いてボタン生成を実施し全体検出率を推定 ・ サンプル故障は検出/未検出が判明するため適中率も向上
2	TM値利用法	・ 未サンプル故障に対し、TMを用いて検出/未検出を判定

一般に検査容易化設計支援システムの役割はATGの対象回路に対するテストパターン生成能力を正確に、かつ短時間で予測する事にある。正確さを示す量として精度ゲインを定義する。検査容易化設計支援システムの水準はこの精度ゲインGaと処理時間比 ϕ の2パラメータを使用して表現される。このGa- ϕ 平面には幾つかの特徴的な点があり、それを図6に示す。図中の各点について表5に説明する。

これらの特徴点を使って表現すると、検査容易化設計支援システムの役割は、ATG点から精度を犠牲にして処理時間を向上させる事により理想点に近づく、あるいは基準点から処理時間を費やして精度を向上させることにより理想点に近づく事であると言える。

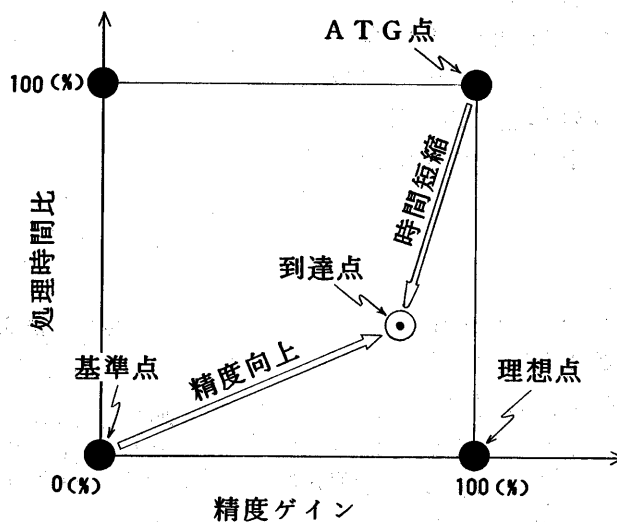


図6 精度と処理時間の関係

表5 精度ゲイン-処理時間比平面における特徴点

	特徴点	内容
1	ATG点	・実際にATGを作動させたさいに得られる 精度ゲイン100%，処理時間比100%の点
2	理想点	・精度ゲイン100%，処理時間比0%の点
3	基準点	・支援システムが全く無い場合にランダムに推定した結果， 得られるであろう仮想上の点 精度ゲイン0%，処理時間比0%の点
4	到達点	・検査容易化設計支援システムが到達した 精度ゲインx%，処理時間比y%の点

(1) 精度ゲインの定義

推定精度と適中率を用いて、図7に示す精度ゲインGaを定義する。精度ゲインは基準点とATG点間のマンハッタン距離に対する、基準点と到達点間のマンハッタン距離の比率を意味している。

推定誤差0%，適中率100%のATG点では精度ゲインは100%である。基準点では精度ゲインは0%である。基準点を横切る斜線Bより右下の領域では精度ゲインは負の値になる。TRUEの狙いは、サンプリング法やTM利用法などの処理方式を用いて、基準点からできる限り理想点に近づく事にある。

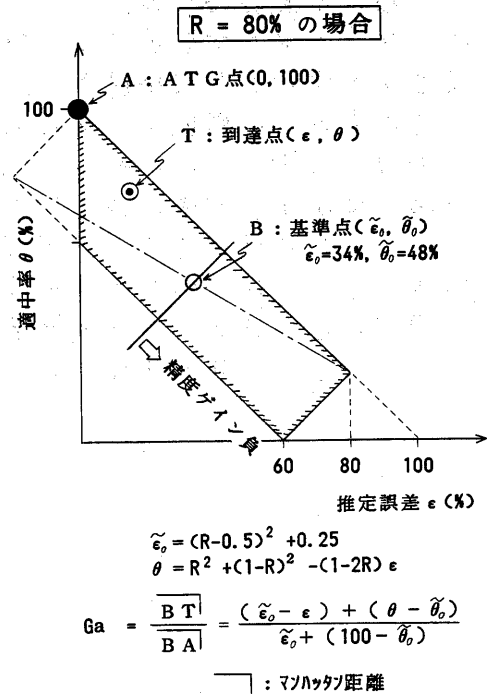


図7 精度ゲインGa

(2) 評価結果

8種類のベンチマーク回路を用いた評価結果を図8に示す。精度ゲインGa，処理時間比φの平均値はそれぞれ89.2%，15.4%である。またサンプリング法のゲインG1は62%，仕事効率W1は4，TM利用法のゲインG2は27%，仕事効率W2は90である。ゲインではサンプリング法が勝っているが仕事効率ではTM利用法が勝っている。サンプル故障数を変化させる事によりこれらの値も変化する。今後の課題としては処理時間増加を押さえつつ、精度ゲインを100%に近づけるべくTM利用法を改善するか、あるいは新しい処理方式を探求することが挙げられる。

	処理時間比	精度ゲイン	仕事効率
サンプリング法	G1=62%	φ1=15.1%	W1=G1/φ1=4
TM利用法	G2=27%	φ2=0.3%	W2=G2/φ2=90

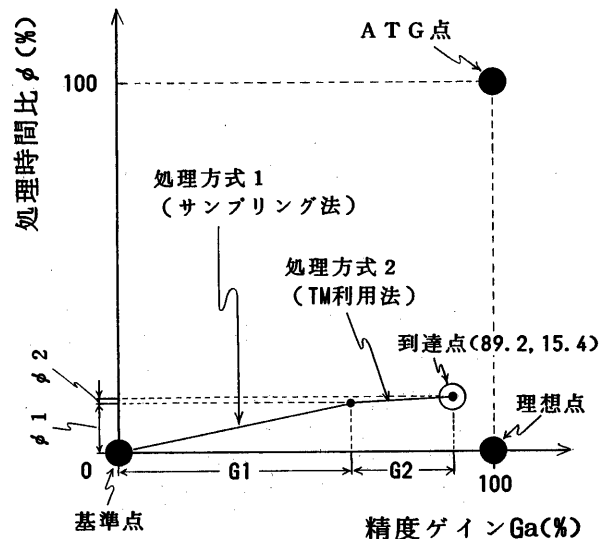


図8 評価結果のまとめ

5 . 結言

本稿では検査容易化設計支援システムTRUEの概要とその性能評価パラメータ，評価結果について述べた．従来の支援システム(Testability Analyzer)は回路特性のみに依存した本質的指標である制御容易度，観測容易度の計算のみを主目的としていた．TRUEは診断システムの能力をも考慮した付帯的指標である検出率を高速，高精度で推定することを目的に開発された．推定方法としてはサンプリング法，Testability Measure(TM)利用法を駆使し，検出率の推定と検出／未検出故障の判別を実施しており，検査容易化設計に有効なシステムとなっている．

性能評価パラメータとして2種類のパラメータを定義した．一方はユーザの立場からシステム性能を把握するパラメータであり，推定誤差 ϵ ，適中率 θ ，処理時間比 ϕ とからなる．8種類のベンチマーク論理回路を用いた実験結果の平均値では $\epsilon = 3.9\%$ ， $\theta = 92.6\%$ ， $\phi = 154\%$ であった．他方はシステム処理方式を評価する技術的パラメータである．システム全体の精度を示す精度ゲインを G_a とし，サンプリング方式の精度ゲイン G_1 ，TM利用方式の精度ゲイン G_2 を定義した．現状ではサンプリング方式による精度ゲインが大きい．しかし単位時間当たりの処理可能量はTM利用方式が遥かに大きい．今後，さらに処理時間の短縮が可能で，同時に高い推定精度をもつ処理方式の探求が必要である．

6 . 参考文献

- [1] SCOAP, Sandia controllability observability analysis program,
L. H. Goldstein et al., DAC, 1980, pp. 190-196
- [2] CAMELOT, a computer aided measure for logic testability,
R. G. Bennetts et al., ICCD, 1980, pp. 1162-1165
- [3] An Interactive Testability Analysis Program - ITTAP,
D. K. Goel et al., DAC, 1982, pp. 581-586
- [4] Testability measures what do they tell us?,
V. D. Agrawal et al., Test Conf., 1982, pp. 391-396
- [5] TRUE: A fast detectability estimation system,
S. Miyamoto et al., ICCAD, 1983, pp. 36-37
- [6] Testability Measures,
W. Keiner et al., Autotestcon, 1977, pp. 49-55