

テスト容易な P L A の設計アシスタントシステム

牧田智弘 大島典幸 山田輝彦

明治大学理工学部情報科学科

あらし VLSIの回路設計者にとって、数あるテスト容易化設計法の中から、設計時の制約や目標の下で、個々のPLAに適した手法を選択することは容易ではない。このような過程において、設計者を支援するためにPLA-ESSというエキスパートシステムが既に提案されている。しかし、多種多様な評価項目の属性値を評価する点や、設計者の要求を明確にする点において問題があるように思われる。本稿では、この問題を解決するために新しい評価方法を提案する。また、これに基づくアシスタントシステムのプロトタイプについても簡単に述べる。

TESTABLE PLA
DESIGN ASSISTANT SYSTEM

Tomohiro Makita Noriyuki Ohshima Teruhiko Yamada

Department of Computer Science, Meiji University

1-1-1 Higashimita, Tamaku, Kawasaki-shi, 214, Japan

Abstract It is a difficult problem for VLSI designers to select the suitable one for a particular PLA from numerous DFT techniques, under a set of design constraints and goals. To assist designers in this process, PLA-ESS expert system has been developed. However, method of specifying designer's requirements and evaluating various attribute values globally seem to be inadequate. Therefore, in this paper, new evaluation functions are proposed and a prototype of assistant system based on the functions is described briefly.

1 はじめに

集積化技術の進歩により、LSIの製造費用が低減するに従い、テスト費用の低減がこれまで以上に重要になってきた。PLAはその物理的、論理的な構造の単純さから、高密度集積化しやすく、大規模な回路を実現する有効な手段となっている。これは、主として論理ゲートやフリップフロップを用いた従来の方法に比べ、設計の自動化が容易であり、仕様の変更にも柔軟に対処できるからである。したがって最近では32ビットマイクロプロセッサなどのVLSIに多用されているが、これらチップの内部に組み込まれたPLAのテストは非常に困難である。そこで、設計の段階からテストを考慮することが必要となっている。

現在までに数十のテスト容易化設計法(DFT: Design For Testability)が提案されているが、どの手法にも一長一短があり、任意の要求に応えられる方法は残念ながら存在しない[1]。そのため、設計時の制約を考慮したDFTの選択が必要となってくる。しかし、考慮する評価項目が多岐にわたっているため、専門的な知識が必要となり、設計目標や制約が与えられたときに、多数の手法の中から最適な方法を決定することは、それほど容易なことではない。また、回路設計者自身が専門家であることは稀である。そのため、最適なDFTの選択に際し、設計者の意志決定を支援、補助するアシスタントシステムが有用であると考えられる。

そのような役割を果たすものとして、PLA-ESSが提案されているが、DFTのすべての評価項目に対し希望値を与えることが必要であり、また各DFTの評価・比較のために用いられる各属性値を正規化する方法にも問題がある[2]。

そこで、本稿では、DFTの評価・比較のために、メンバシップ関数を基に正規化された達成度及び満足度という二つの尺度を提案する。達成度とは、希望値の与えられた項目に対する評価値のことである。満足度とは、希望値が明確でない項目に与えられた重要度に対する評価値である。また、これらの尺度を基にして、与えられた設計目標と制約を満たすDFTを探索するアシスタントシステムの概要についても述べる。

2 システムの概要

システムの仕事は、設計時の制約条件の下で回路設計者の要求を満たすDFTを見つけ出すことである。

図1にシステムの大まかな流れを示す。ユーザは表1に示す各評価項目に対し、以下の値を入力する。

- ・希望値(x_i): ユーザが各項目に対し、明確な希望値を持つ場合に入力を行う。ただし、単位は各項目ごとに異なる。
- ・重要度(x_i): ユーザが各項目に対し、どの程度重要視しているかを入力する。

$$0 \leq x_i \leq 100 (\%)$$

重要度の入力、希望値の入力が行われていない属性に対してだけなされる。こうすることによって、いくつかの、あるいは全評価項目に対し希望値を持たないユーザにも対応することができる。

実際問題として、設計者の要求が非現実的なものであったり、すべての要求を満たすようなDFTが存在しないという状況がしばしば起こる。このようなとき、システムは設計者が妥協可能範囲内のDFTを発見できるように導くことが必要である。そのため、本システムではメニューを用いて設計者と対話形式でDFTの探索を行う。

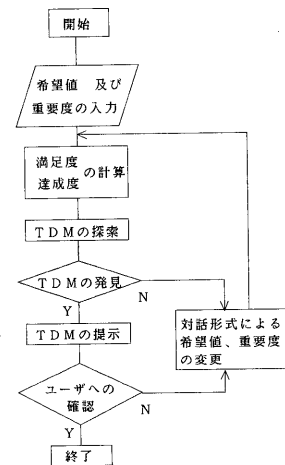


図1 システム全体の流れ

表1 DFTの評価項目

<ul style="list-style-type: none"> ・故障モデル ・自己テスト方式 ・面積オーバーヘッド ・遅延の増分 ・余分な電力の増分 ・テスト時間 	<ul style="list-style-type: none"> ・故障検出率 ・同時テスト方式 ・付加I/Oピンの数 ・テスト生成方法 ・周辺回路への影響 ・応答評価回路
---	--

3 達成度及び満足度の算出法

各DFTの総合的な評価・比較をするにあたって問題となることは、各項目ごとに単位が異なることである。たとえば故障検出率とテスト時間では、大きさも単位も異なる。すなわち、前者の最大値が100(%)であるのに対して後者の最大値はたかだか数秒であり、両者を同等の基準で比較することは不可能である。

この問題を解決するために、本システムでは各評価項目の属性値に関するメンバシップ関数、重要度に関するメンバシップ関数を導入し、すべての属性値を0から1までの間に正規化している。正規化された属性値を基に達成度及び満足度を求め、これらをDFTの評価・比較の基準として用いる。以下に、各値の算出方法等について述べる。

3.1 達成度の算出

各項目ごとに異なる属性値を比較可能にするために、次のようにメンバシップ関数を用いて正規化を行う。

$$Y = \mu_i(X) \quad (0 \leq Y \leq 1)$$

X: 各評価項目の属性値を0から1に正規化した値

$\mu_i(X)$ は、属性値に対する相対的な望ましさの度合いを表すものであり、専門家が各項目ごとに個々の特徴が現れるように設定する。この式より、各属性値は0から1までの間に正規化され、DFTの総合的な評価・比較が可能となる。ただし、 $\mu_i(X)$ は状況の変化に柔軟に対応できるように変更可能にすることが肝要である。

図2にその例として、故障検出率とテスト時間のメンバシップ関数を示す。

”達成度”とは、ユーザの入力した希望値をどの程度満たしているかを示す度合いであり、正規化した希望値及び正規化した各DFTの属性値をそれぞれ x_r ,

x_s としたとき、次のように定義する。

《達成度の定義》

- ・属性値がユーザの希望値を満たしている場合
達成度 = 1
- ・属性値がユーザの希望値を満たしていない場合
達成度 = $1 - \{ \mu_i(x_r) - \mu_i(x_s) \}$
- ・希望値が与えられなかった場合
達成度 = 0

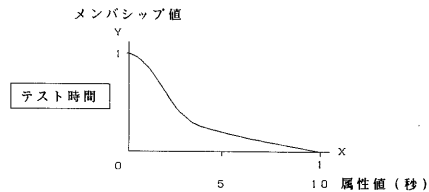
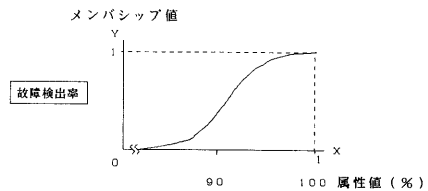


図2 属性値に対するメンバシップ関数の例

3.2 満足度の算出

ユーザの入力した重要度Jを基にメンバシップ関数 $\mu_i(X)$ を次のように定義する。

$$\mu_i(X) = \frac{1}{1 + 8 \frac{(X - \lambda)^2}{J^2}} \quad (0 < X \leq 1, 0 \leq \mu_i(X) \leq 1)$$

ただし、

$$\mu_i(0) = 0 \rightarrow \lambda = J$$

$$\mu_i(0) = 1 \rightarrow \lambda = 100 - J$$

図3は、 $\mu_i(0) = 0$ である属性に対して $J = 60$ (%)の場合を例示するものであり、3.1で述べた $\mu_i(X)$ と共に満足度を算出するために用いる。

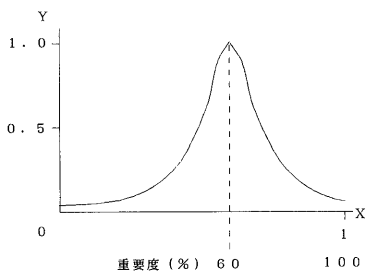


図3 重要度に対するメンバシップ関数の例

”満足度”とは、ユーザの入力した重要度に対する評価値であり、以下に述べるように、満足度指数と重みを用いて算出する。

図4に例示したように $F(x)$ を次のように定義し、

$$F(x) = \min\{\mu_a(x), \mu_i(x)\}$$

$F(x)$ と X 軸で囲まれた図形 F_s の重心を、満足点 X_s とする。また、 $F(x) = 0$ となる x を限界点 X_l とする。ただし、このような x が複数存在する場合、 $\mu_a(x)$ の小さいほうを限界点とする。

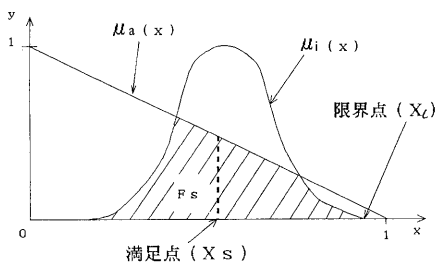


図4 満足点と限界点の例

上記の満足点・限界点を用いて、各設計法の実現可能な値 x_s に対する満足度指数を次のように求める。

《満足度指数 T_s の定義》

- $\mu_a(x_s) \geq \mu_i(x_s)$ の場合
 $T_s = 1 + \mu_i(x_s)$
- $\mu_a(x_s) > \mu_a(x_s) \geq \mu_i(x_l)$ の場合
 $T_s = 0.5 + \mu_i(x_s)$
- $\mu_a(x_l) > \mu_a(x_s)$ の場合
 $T_s = 0$

T_s は個々の項目に対する評価値であり、重要度が低い程大きな値となり得る。したがって、このままでは異なる項目間の相対的な重要性を反映させることができない。そこで、図5に示すように重み係数 ω を導入し、各 T_s に重み付けをして各項目の満足度 S_d を算出する。

$$\omega = 10 \times 10^1 \log_2 \left(\frac{J}{100} \right)$$

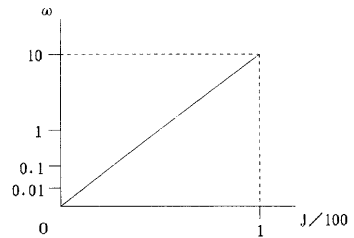


図5 重み

《満足度 S_d の定義》

$$S_d = \omega \times T_s$$

4 最適 DFT の探索法

ユーザの希望値が実現不可能、つまり現在システムに登録されている DFT 中の最良値を越えている場合やユーザの希望値をすべて満たす手法が存在しないときには、システムはユーザとの対話形式によって希望値及び重要度の変更を促し、ユーザが妥協できる範囲内の属性値を持つ DFT を発見できるようにユーザを導くことが必要である。その際、システムとユーザとの対話が自然で、かつ人間的であることが重要になる。そのため本システムでは、ユーザとの対話にメニューを用いて探索を進めている。表2、表3にその概要を示す。

表2 探索用メニュー

- 《1》 DFT の決定 (終了)
- 《2》 提示 DFT の説明
- 《3》 他の DFT の探索
- 《4》 入力した希望値及び重要度の表示
- 《5》 希望値及び重要度を変更、再検索
- 《6》 提示された全 DFT の表示

表3 再探索用メニュー

- 《1》希望値の変更が不可能な属性が存在する
 - 《2》希望値の変更が可能な属性が存在する
 - 《3》システムに最適DFTの探索を任せる

システムの動作例

上記の各メニューを用いて、システムはユーザの意志を反映させながら動作する。まず、選択されたPLAを表示し、評価項目が示される。以下DISPLAYとあるのは表示画面を意味する。

DISPLAY:

```

Number of Input  : 8
                  Output  : 8
                  Product : 19
ファイルの内容を表示します。

```

```

and_array  or_array
-----1-----1-----
-0-----1-----1-----
-0-----0-----1-----
-0-----1-----1-----
-0-----1-----1-----
0-----1-----1-----
-----1-----1-----
-----0000-----1-----
-----0000-----1-----
-----1-----1-----
-----0-----1-----1-----
0-----0-----1-----
-0-----0-----1-----
-----0-----1-----1-----

```

DISPLAY:

- 1: Fault_Coverage
- 2: Test_Pattern
- 3: Extra_Pins
- 4: Extra_Delay
- 5: Self_Test
- 6: Area_Overhead
- 0: 終了

上記の項目に対しユーザは希望値を入力する。終了の選択、もしくは全項目に希望値が入力されるまでの課程を繰り返す。ユーザからの入力があった項目について次のようなプロセスを起動する。全項目の希望値を入力した場合、このプロセスはパスされる。

DISPLAY:

以下に示す項目に対し、その重要性を最大100%として、1から100の数値で入力してください。

***** Extra_Delay *****

Please Input The Importance => 90

Extra_Delayの重要度を90%で登録します。

このように、希望値入力を省いた残りの項目について重要度の入力を行う。この時点で、すべての評価項目について希望値、あるいは重要度がユーザにより入力される。初期段階におけるユーザからの入力は以上である。

次いでシステムによる最適なDFTの探索にはいる。ここで希望値と重要度を用いて、満足度及び達成度を計算し、各DFTに得点付けを行う。この得点の善し悪しでユーザに提示するDFTをシステム側で決定する。つまり、希望値から算出する達成度の総和を基に、DFTの提示順位を決定する。希望値の入力がない場合は、重要度から算出する満足度の総和を用いてDFTの順位付けを行う。ただし、システムの提示は達成度による方を優先する。このように達成度による順位と満足度による順位を総合的に比較し、DFTの提示順位がユーザの意志を反映するように操作する。

ここで、探索に失敗した場合には、その原因を提示する。例えば、ユーザの要求がシステム内に登録されているDFTにおける最良値よりも高いときは、これを通知し変更を促す。

DISPLAY:

以下の希望は属性の最良値を越えています。

そのため、手法の探索が行えません。

Extra_Pins | 0 ---> 1

上記のように、希望値を変更できますか？

- 1. 変更できる
- 2. 変更できない

ここでユーザが妥協しなければ、事実上DFTの探索は不可能になりシステムは終了する。妥協した場合は、上記のようにその項目における最良値を知らせ更新する。ここまでのプロセス終了後、システムは最初の探索結果をユーザに提示する。このとき同時に、全

評価項目に対する希望値と重要度の入力状況を一覧表にして以下のように示す。

DISPLAY:

残念ですが、あなたの希望を満たすDFTはありません。

属性名	希望値	重要度
1: Fault_Coverage	100	—
2: Test_Pattern	—	70
3: Extra_Pins	1	—
4: Extra_Delay	—	90
5: Self_Test	—	80
6: Area_Overhead	150	—

ここでは、三つの評価項目について希望値が入力されているが、全希望値を満足するDFTが存在しないため上記のような結果を生じる。ユーザの意志を受け取るために、表3に示した再探索用メニューが表示される。

例えば表3における《1》を選択した場合、システムは希望値を入力した項目の中で最も重要視するものを探し、その属性値を重視し、新たに最適なDFTを探索する。ユーザの要求を満足するDFTを発見したとき、以下のようにそのDFTを提示し、ユーザの意志確認、あるいは反映のため、表2に示した探索用メニューが表示される。この例は希望値を入力した項目の内、故障検出率100%をユーザが重視したときのものである。

DISPLAY:

Name	SYD	希望値
Fault_Coverage	100.00	100
Testing_Time	0.00530	NONE
Extra_Pins	2	1
Extra_Delay	2	NONE
Self_Test	NO	NONE
Area_Overhead	157.43	150

システムが提示したDFTに満足しないとき、あるいは単に他のDFTを参照したいときなどに、表2に示した探索用メニューの《3》を選択する。このときシステムは受け入れられない属性をユーザに尋ね、そこに重点を置きDFTの探索を開始する。こうした課程において、連鎖的に他の属性が希望値を満たさなくなったときなどは、その手法の提示と共に各属性値が要求と異なることを指摘し、ユーザの意志を表2の探索用メニューにより再確認する。また、本システム起動中に、随時希望値や重要度の変更が可能であり、変更ごとに新たに最適DFTの探索を行うことができる。以上を示したような作業を繰り返し、最終的にユーザが満足のできるDFTを決定する上での支援・補助を行う。

5. むすび

テスト容易化設計法の評価・比較の基準として、達成度及び満足度を提案した。また、これらを用いたアシスタントシステムのプロトタイプを構築した。

今後は、尺度の算出法の妥当性の検討と、ユーザインタフェースの拡充を進める予定である。

参考文献

- [1] Xi-An.Zhu and Melvin.A.Breuer. "Analysis Of Testable PLA Design", IEEE Design & TEST OF COMPUTERS. Vol.5, pp.14-28(1988).
- [2] M.A.Breuer. and Xi-An.Zhu. "A Knowledge Based System For Selecting A Test Methodology For PLA", Proc.22nd DAC, pp.259-265(1985).