

総論

論理装置 CAD の最近の動向



1. 総論：論理装置の設計支援システム†

元 岡 達††

1. はじめに

VLSI 技術の発展がコンピュータを中心とする論理装置の技術に大きな変化を及ぼそうとしている。LSI RAM の出現だけでも記憶容量の有効利用を中心としたコンピュータ技術の基本思想に大きな変革を生んだし、マイクロプロセッサの普及と高度化は、パーソナルコンピュータや組込みコンピュータの発展、普及を介して大きな社会的影響を生み出そうとしている。

しかし冷静に VLSI 技術の本来持っている機能・性能面での可能性を考えてみると、RAM とか、マイクロプロセッサは VLSI の少品種大量生産によって得られる製造技術上の利点を生かした第 1 世代的製品として位置付けることができよう。第 2 世代の VLSI 技術としては、VLSI の論理設計技術を確立して、コンピュータを初めとする各種の論理装置を VLSI 化することである。第 1 世代の VLSI がプロセス技術に主眼をおくのに対して、第 2 世代の VLSI は設計技術に主眼をおく必要がある。

換言すれば、本特集でとり上げた論理装置 CAD の今日の最大の課題は、VLSI-CAD の技術を確立することであり、これによって VLSI の応用分野を広範囲に拡大することができ、次の第 3 世代 VLSI である新しい論理装置の誕生につながることになる。

本稿では、VLSI-CAD の問題を中心に、論理装置 CAD の設計思想といったものを歴史的にふりかえって眺めるとともに、今後の方向についての思想の流れについて論じてみたいと思う。技術の細部については本特集の中で多くの論文によって詳述されているので、本稿ではそれらの個別技術の相互関係や、位置付けといったものを明らかにすることができれば幸いである。

† Introduction: Design Tools for Logic Systems by Tohru MOTO-OKA (Faculty of Engineering, The University of Tokyo).

†† 東京大学工学部

2. 論理装置設計自動化の歴史と将来

コンピュータや電子交換機などの論理装置の設計にコンピュータを利用することは、論理図のシミュレーションによる検証や論理図から自動結線機などの入力を作ることに始まる古い歴史を持っており、実装設計の各段階に次々に導入されていった。DA システムとしての一貫した体系を目指した初期の代表的なシステムとして 20 年以上前に IBM がシステム 360 の設計に使った DA システムをあげることができる。当時の DA システムの特徴は、大量のデータに対して比較的単純な演算を段階的にほどこす点にあったと言えることができる。

大量のデータを取り扱い、誤りの混入をふせぐために人手の介入を最小限に抑えることが重視された。このことが CAD 化が遅れた理由の一つである。したがって DA 化の対象として、アルゴリズム化の容易なプロセスから始められた。また大量データを対象とするから入力データの作成に困難があり、誤りが混入しやすい。したがって、段階的に行われる設計プロセスの計算機による自動化が切れ目なく行われる一貫性のあるシステムにすることが、重要であった。一つの設計プロセスの処理結果が、次の設計プロセスの入力データとしてそのまま使えることが理想であった。またこのための設計データのデータベース管理も重要な課題であった。

良い設計のためには人手の介入はさけ難い。このための人手の介入を許し、かつ人手による誤りの介入を最小限におさえる DA システムの構築とその運用法とが重視された。この思想は今日でもなお大形コンピュータの設計システムには生きているが、CAD の利点である良好なマンマシンインタフェースの導入も人手が介入する部分に積極的に取り入れられようとしている。

CAD システムは集積回路のレイアウト設計のよう

に基本的には人手で行う作業を、コンピュータが支援するような場面から導入されていった。初期の集積回路設計では素子の数も余り多くなかったため、ミニコンピュータのスタンドアロンシステムが手頃な使いやすいシステムとして普及した。しかし LSI 化が進むにつれて、取り扱う素子数が増加し、人手に頼る部分を減らしたいという希望が増してきた。設計手法も規則性を導入してかなりの部分を自動化する傾向にある。しかし一方では設計とは本来創造的な仕事であり、設計者が自らのアイデアを設計に反映させるためには、人手による設計を主とし、コンピュータはあくまで支援の立場をとるべきであるという考えもある。また集積回路を例にとって説明すると製造プロセスが変るごとに設計手法は大幅に変わり、設計プロセスのアルゴリズム自体の変更をせまられることが多く、絶えず新しい設計の道具が必要になり設計システムの寿命は短いことが多い。このことも人手による設計を強調する一つのよりどころになっていると言える。

4章で述べるように、集積度が増し VLSI を対象とするようになると、個々のデータの取扱いを人手で行うことは困難になり、たとえコンピュータを用いるにしても素子数の3乗に比例するような処理時間を必要とするアルゴリズムを採用することはできなくなる。そこで、人間が通常の設計で行っているような発見的手法をコンピュータに実行させる VLSI 設計用エキスパートシステムが、DA と CAD とを止揚した技術として大望されることになる。

今後の行き方として、まったく新規に理想的な VLSI 設計用エキスパートシステムを追求する道もあるが、従来の DA システムや CAD システムに人工知能技術を徐々に取り入れて知能化をはかる道もある。最終目標は同じでも途中の経路はかなり異なる開発努力が並行して進められよう。

いずれにせよ、人工知能的手法を導入することによって、柔軟性とみ、設計者にとって使いやすく、しかも大きなシステムを設計対象にできる高性能な設計システムを実現するための努力が、これから始められようとしていると言える。

3. 論理装置 CAD の重要性

近代製造業は製鉄業や自動車製造業に代表されるように、人類の要求する物資や各種の道具を提供するために、大量生産方式を導入し、低価格化に成功して、少なくとも西欧先進国においてはあり余るほどの物資

を製造するにいたった。半導体技術も、RAM やマイクロプロセッサを見る限りではこの範疇の技術とすることができる。

一方システムという言葉に代表されるもう一つの近代工学技術がある。鉄道や通信という形で巨大なシステムが社会に存在して、人類の社会活動に製造業に劣らぬ大きな影響を及ぼしている。コンピュータをはじめとする論理装置は物理的な大きさこそ、上述のシステムほどではないが複雑さについては同程度あるいはそれ以上とすることができる。

論理装置の CAD はこのように複雑なシステムの設計を対象とする CAD である。前述したようなシステムは多年の経験を反映させながら徐々に大規模なシステムに作り上げられていったものであり、論理装置の設計の場合のように、一挙に大規模かつ複雑なシステムを作り上げたものではない。

論理装置は、人間の知的活動を支援するという点でも従来の機械やシステムと大きな差がある。従来のほとんどすべての機械が人間の労働を支援することに用いられる道具であったのに対して、論理装置は人間の知的活動を支援する道具とすることができ、人間の知能の強化に、より直接的な貢献をする可能性を持った装置と位置づけることができる。

論理装置としてどのような機能を持ったマシンが今後設計されるかは、将来の設計者にゆだねられた夢とすることができるが、その無限の可能性をより現実のものに近づけるために論理装置 CAD の役割の重要性は強調しても強調しすぎることはない。

VLSI のプロセス技術の進歩は複雑大規模な論理装置の基本的な可能性を保証したのと言える。しかしこれを現実のものとし、多くの可能性を実現するためには、克服しなければならない多くの障害がある。それらの障害の内ももっとも重要であり、もっとも困難なものの一つとして論理装置の CAD システムをあげることができよう。

論理装置の CAD システムの中心をなすものは当面 VLSI の CAD システムとすることができる。論理装置としては多数の VLSI チップを組み合わせて構成するシステムも含まれるが、VLSI チップを相互接続するレベルの CAD システムの重要性は将来の課題と言えよう。その理由は次章で詳述するように一つの VLSI チップの中に現在の大形プロセッサ程度の複雑さを持った論理装置を格納することが可能であり、それ自体の設計が非常に困難な仕事であることがまず第

一にあげられる。次に現在対象としている論理装置は未だそれほど複雑なものではないから、RAMを除けば、余り多くのVLSIを結合したシステムがCADの対象にはならない。現状ではむしろソフトウェアの開発の方が、そのレベルでは重要な課題と言える。

論理装置はマイクロプロセッサとRAMの組合せによって原理的には実現できる。しかし性能のよいシステムを普及させるためには、そのような汎用システムに依存することなく、それぞれの応用分野に適した専用のVLSIチップを実現し、それを用いることが、今後の高度情報社会実現のキーであると言える。そして、それを実現するため道具として論理装置のCAD、換言すればVLSIのCADを位置づけることができる。

従来技術で専用コンピュータでなく、汎用コンピュータが開発された理由に、ソフトウェア技術の問題、保守技術の問題、設計技術の問題があげられていた。これらの問題のうち、後の二者はVLSI CADシステムの成功により多くの部分が解消されるはずである。

4. VLSI 設計の問題点

VLSIの高密度化が進み、複雑度が高まるにつれて設計の面にも多くの隘路が生じることが予想されるため、これに対する対策を今から準備しておく必要がある。予想される隘路の主なものを以下に列挙する。

1) 1チップ当りのゲート数が $10^4 \sim 10^6$ 個に達するとチップのシステム設計・論理設計およびその正当性の検証が非常に大変な仕事になり、これが高集積化の最大の隘路の一つになる恐れがある。

2) 実装設計とその検証の作業も大変になり、配置の決定が難しくなる。図面が大きくなるだけでなく、書くのに膨大な時間がかかることになる。

3) テスト生成も、ゲート/ピン比の増加や故障の波及範囲の増大などの影響で一層困難になる。

これらの問題をもう少し詳細に論じてみよう。

ある予測によれば1990年にはチップ当り $10^5 \sim 10^6$ ゲートのVLSIを作ることができるようになる。記憶については $10^7 \sim 10^8$ ビット/チップである。 $10^5 \sim 10^6$ ゲートと言えば今日の大形コンピュータのプロセッサ部のゲート数に匹敵することは前にも述べた。このような大規模システムを一本の線の誤りもなく人手だけで設計することはほとんど不可能であり、すぐれた論理設計用CADシステムの助けを借りる必要があることは言うまでもない。設計段階では完全に誤

りを抽出するにはシミュレータだけでは不十分で設計の自動検証システムが重要になってくる。

マイクロプロセッサ用LSIの開発に要した時間とLSIの規模との関係のみをみると、素子数が増加し複雑なシステムを対象とするようになるにつれて、システム設計に要する時間と再設計に要する時間との増加の割合が著しくなっている。このことからシステム設計から論理設計にいたる高次の設計段階を支援するCADシステムや設計の検証・評価を行うためのシステムの重要性が増すことは明らかである。

VLSI化にともなって計算量の増加が、設計の隘路の一つになる。たとえば、

1) 論理設計に要する設計の手間は設計手法によってもちろん変ってくるが、次式のような経験則が発表されている。

$$\frac{N_G(N_G-1)}{2} + \frac{1}{2} \alpha n_f(n_f-1) \Rightarrow N_G^{4/3}$$

N_G : チップ上のゲート数

n_f : チップ上のブロック数 $n_f = N_G^{2/3} / (2\alpha)^{1/3}$

ゲート数の4/3乗程度で増加するということであり線形より少し大きい程度であるから納得できる値と言える。

2) 配置に用いられているアルゴリズムには次式に示すように回路数 C の1.2乗に比例するCPU時間を必要とするものがある。

$$T_P = kC^{1.2}$$

また経路決定アルゴリズムの例では1.1乗に比例している。

$$T_R = k'C^{1.1}$$

3) 回路数の増加にともなって記憶容量を増加できず、分割して設計する必要のあるとき、必要なCPU時間が急増する例が報告されている。分割して設計したものを接続して試験する必要があることからCPU時間が増すといっている。

4) テスト生成は次式に示すように、ゲート数 N の1.5~2.5乗に比例するだけでなく、状態数に対して指数関数的に増加するという。

$$T_T = K(FF) \times N^y$$

$$1.5 < y < 2.5$$

$K(FF)$: 状態数の指数関数

このことから検査容易な回路設計の重要性がよくわかる。故障診断システムの作成に要する費用はこのため膨大なものになる。たとえば並列方式の故障シミュレーションに要する費用はゲート数 N の3乗 N^3

に比例し、演繹方式やコンカレント方式では N^2 に比例する。パターン生成に要する費用は N^2 に比例し、故障リストの長さは $N^{1.6}$ に比例するという。

5. DA システムの高度化と専用システム

VLSI 化が進むと、CPU 時間の問題が設計の隘路になることは前章で述べたとおりである。これに対する解決法として専用シミュレータや専用ラウタなどが研究され、商品化されている。シミュレーションは論理設計の検査だけでなく、テスト生成にも用いられることが多い。専用シミュレータは多数のプロセッサによる並列処理によって性能向上をはかっている例が多い。

DA システムの問題点は、論理シミュレーション以下の実装設計レベルのように、DA 化がすでに確立している部分では、規模の巨大化にともなう処理性能の向上であり、システム設計から論理設計にいたる上位レベルではシミュレータや検証システム、合成システムによる設計自動化の実用化である。

前者の解決法は、すぐれたアルゴリズムの研究や先に述べた専用システムの活用のほか、回路分割・配置・経路決定などの各分野にエキスパートシステム的な考えを導入することが考えられる。

後者の上位レベルの設計では、システム記述言語の問題が、検証や合成アルゴリズムの問題とともに重要である。ハードウェア記述言語については多くの提案があり、CONLAN¹⁾ のように標準化を目指した研究もあるが、ADA のような汎用プログラム言語でシステムを記述し、記述レベル間の変換に適当なトランスレータを用意する傾向にある。ハードウェア記述に汎用プログラム言語を用いる傾向になってきた理由としては、

- 1) 汎用プログラム言語に並列処理記述能力が付加されるようになり、ハードウェアの記述に支障が少なくなったこと。
- 2) データを与えて直接処理することにより、システム記述の正当性の検査が可能であること。
- 3) システム設計時点でソフトウェア/ファームウェア/ハードウェア相互間のインタフェースを意識しなくてよいこと。
- 4) 通常プログラム言語が持つエディタなどのソフトウェア支援環境を利用できること。

5) 設計システム自体の言語と、システム記述言語が同一であることは、システムの柔軟性がますこと、などがあげられる。

また最近のプログラム言語はソフトウェア工学の研究成果を生かし、モジュラリティに対する考慮がよくなされていることもその理由の一つにあげられよう。

スタンフォード大学で開発中の回路設計システム Palladio²⁾ では LOOPS というプログラム言語を用いているが、この言語にはルールベース指向、データ指向、オブジェクト指向といった多くの側面があり、いろいろな側面からのシステム記述と、それらの統合的な処理を可能にしている。

システムを記述するには機能面からの記述、構造面からの記述、図形面からの記述が必要であり、かつそれぞれの表現形式の中で設計の階層がある。図-1 は記述レベルの相互関係を表すために提案された三枝図表現である。図-1(a) は代表的なシステム表現の関係を表わし、図-1(b) は Palladio で目指している設計システムを三枝図表現の上に表わしたものである。各種の設計システムの特徴を簡潔に表現するうまい方法である³⁾。

シリコンコンパイラはシステム記述からマスク設計までを完全に自動化したトップダウン設計を理想としているが、良質の設計が可能になるまでにはなお多くの歳月を必要としよう。

6. CAD システムとマンマシンインタフェース

CAD システムの思想には、設計者の独創性が自由に発揮でき、しかも効率よく作業が進められることがある。DA システムは人手の介入を最小限におさえる

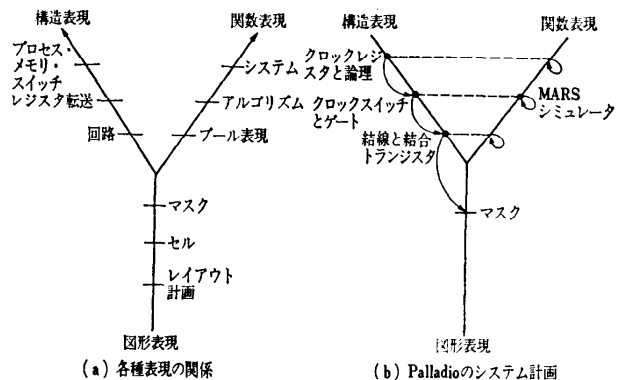


図-1 設計レベルの三枝図表現

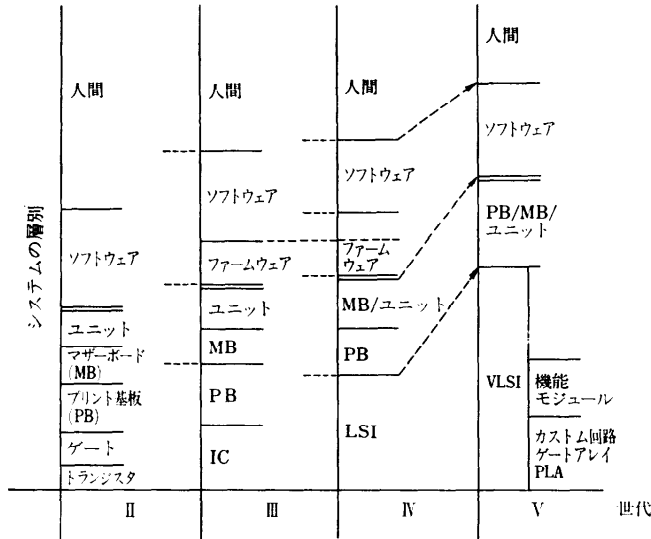


図-2 階層化設計手法の世代変化

ことを目標にしているから、システムに対する設計思想は一見かなり違ったものになる。本特集では“論理装置 CAD”という表現で、論理装置の設計に対するコンピュータ利用全体を包含しようとしており、その意味で CAD をかなり広義に用いている。

DA システムが自動的に設計するといっても DA システムの設計者の意図に従って設計することになり、DA システムの利用者は真の設計者の補助者であると考えれば、設計者の独創性は発揮できていることになる。ただし DA システムが巨大なものになり、単一のシステム設計者に全体が見通せなくなったり、変更の柔軟性が失われると問題が生じる。現実の DA システムでは、製造プロセスの変化に合わせて、絶えず試作を繰り返しているのが実状だから、今のところこの心配は比較的少ない。製造プロセスが成熟し、技術全体が安定期に入ったときに、システムの変更は事実上不可能になるといった恐れが生じるかもしれない。

本章では CAD システムを狭義の意味で使い、VLSI 化にともなう問題点を考えてみることにする。対象が大規模になれば、効率よく処理するために、抽象化のレベルを高めるか、対象をマクロ化する必要が生れてくる。前者の例としてはシンボリックレイアウトの手法があげられ、後者の例としては、IBM の EDS システムがあげられよう。後者では RAM や PLA のようなマクロをゲートアレイの中に組み込めるように

して、ゲートアレイの持つ制限は強いが設計が容易である特色と、マクロの内部を制限なしに設計することを許して高性能回路の設計を許す特色とを両立させることを目指している。

大規模システムを手手によって手際よく処理するためには階層化設計手法の導入が必要であり、コンピュータ技術が今日のような隆盛をみるにいたった大きな原因の一つとして先人が設定した上手な階層化があげられる。図-2 はコンピュータ技術の各世代における階層化技術を表わしたものであるが、VLSI の導入は、VLSI の内部にいくつかの設計階層を設定することの重要性を示唆している。上手な階層の設定が VLSI 技術の今後の発展に大きな影響を与えるものと思う。

CAD システムで大切なことは設計者にとって使いやすいマンマシンインタフェースの実現である。マルチウインド方式の導入などが最近の代表例であろう。充実した図形処理機能を持ったワークステーションの開発が各社で活発に進められているようであるが、マンマシンインタフェースのインテリジェント化と標準化とが使いやすさを目指して精力的にすすめられるものと思う。手書き図形入力システムなどの実用化もこのような流れの一つと位置づけることができよう。

7. 知的 CAD システムと AI 手法

設計の計算機化に人工知能的手法を導入することが、一つの時代の潮流になりつつあるといて差し支えなからう。人工知能的手法とは、定式化の困難な業務に対して解を探索する手法と言うことができよう。探索のトリーを与えるものが論理にもとづく問題の仕様であり、効率化の手法は探索順序の制御と位置づけることができる。論理装置の設計の仕事は、その大部分をほとんどそのまま人工知能の問題として定式化でき、設計の仕様や制約条件をルールとして与え、それを満たす解を探索すればよい。その際探索の効率を向上するために、いろいろな制御条件を付加することがシステムの性能向上をもたらす。

解を求めるための論理と制御とを分離して与えることができると、新しい設計を開始するときに、まず論理を与え、次に設計効率を向上させるための条件を順

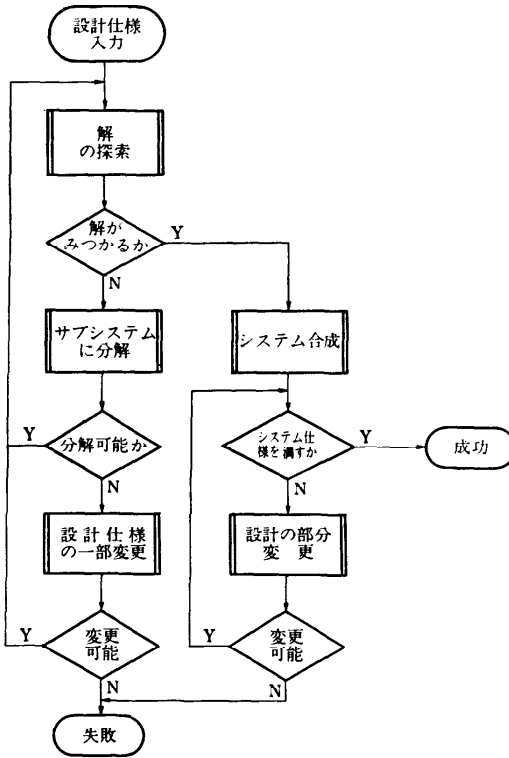


図-3 AI手法を用いた設計システム

次付加してゆくことが可能になる。これで柔軟性に富む設計システムを実現でき、しかも十分高い性能を維持できる可能性がある。このことはAI手法の導入によって従来のDA技術とCAD技術とが止揚されてきた知的CADシステムの可能性を意味し、多くの研究者がいろいろな角度から研究を開始しだした目標である。

設計の常套手段は過去の経験の利用であり、熟練した設計者は、過去に行った設計例を憶えていて、それらを組み合わせたり、それらにちょっとした変更を加えて、利用することが多い。これらの手法は設計の生産性向上に大きく貢献するとともに、設計の質をも一般的には良くする。

この手法を設計援助システムに導入するとき、一番大きな障害となる点は、類似の設計をライブラリから検索する効率よい手法を確立する点であろう。このようなシステムを実現するために、開発する必要がある手法を明らかにするために、システムの流れ図を示すと図-3のようになる。

すなわち設計仕様を満たす解が過去の設計経験を蓄

積したライブラリの中に発見できれば、これを利用すればよい。適当な解が直接見つからないときは設計仕様で与えられたシステムをサブシステムに分解し、それぞれのサブシステムの仕様を満たす解をライブラリの中から探すことになる。その結果サブシステムの仕様を満たす解が見つかる場合には、これらのサブシステムの解を組み合わせ設計したいシステムの解を満足するか否かの検査をすることになる。それぞれのサブシステムが持つ制限条件の間に矛盾がなく、システムの解を満たせばよいが、制限条件の間で矛盾が生じた場合には、これを解消するために他のサブシステムを探すか、部分的設計変更をサブシステムにほどこすことになる。

システムの分解がうまくできないときにも、他の分解法を探索するか、システム設計仕様の一部を変更して、新しい設計仕様を満たす解をライブラリから探すことになる。これが見つければ、これをもとに部分的設計変更をほどこすことになる。

このようなシステムを実現するためには、(1)システムをサブシステムに分解する手法、(2)仕様の一部を変更する手法、(3)同一仕様のをライブラリから検索する手法、(4)部分的に設計変更をして仕様を満たす手法などを開発する必要がある。これらの手法に関して効率よいアルゴリズムを発見することは困難であり、発見的手法を採用し、熟練した設計者の持つ経験をルール化するエキスパートシステムの手法が有利であろう。部分的設計変更をプログラムにおけるデバッグに位置付けてAI手法の導入を試みている例にPSBDARP(Problem Solving by Debugging Almost-Right Plan)がある⁵⁾。

8. おわりに

論理装置のCADは、VLSI技術をとり込むことの必要性から、大きな転換期を迎えようとしている。VLSIの導入によって大規模システムを一挙にしかも誤りなく設計することが要求されることになった。この困難な課題に対してわれわれが明解な答を与えることができれば、VLSIの応用分野を急速に広範囲に拡大することが可能になり、輝やかな未来を約束することができることになる。

専用システムの導入やAI手法の利用など、多くの試みが展開されつつあり、これらの手段によって上述の課題が徐々に解決されてゆくものと期待して筆を措く。

参 考 文 献

- 1) Piloty, R. et al. : CONLAN Report, Springer Verlag (1983).
- 2) Brown, H. et al. : Palladio : An Exploratory Environment for Circuit Design, Computer, Vol. 12, No. 12, pp. 41-56 (Dec. 1983).
- 3) Gajski, D.D. and Kuhn, R.H. : New VLSI Tools, *ibid.*, pp. 11-14.
- 4) Donze, R.L. and Sporzynski, G. : Master-image Approach to VLSI Design, *ibid.*, pp. 18-25.
- 5) Sussman, G.J. : Electrical Design, A Problem for Artificial Intelligence Research, Proc. of IJCAI-77, p. 894 (1977).

(昭和59年8月13日受付)