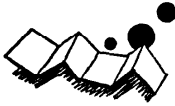


解説



CAD の研究†

沖野 教郎††

1. まえがき

CAD (Computer Aided Design) は最近著しい関心の高まりの中にあり、実務への利用例も多数にのぼっている。しかしながら CAD は真に工場の生産を左右するほどの重要な役割を果たしているか、あるいは CAD なしでは設計が不可能なほどに、CAD が浸透しているかと云えば一部を除いて、現実はそのような状態にほど遠いと云わざるを得ない。もっとも、CAD への関心は急速に進展する生産システムのコンピュータ化の核となる重要技術としての認識に基づいている。したがって理想と現実のギャップはそのまま CAD の研究への期待に他ならない。

そのような意味から本稿では CAD において何が問題であり、いかにそれを解決して来たか、そして現在話題の研究や未解決の問題は何かに焦点を合わせて解説を試みる。

なお、CAD には機械系 (土木、建築、造船を含む) の CAD と電気系の CAD がある。前者が形状をもつ対象を扱うのに対して、後者は回路あるいはネットワークを主たる対象としている。ここでは筆者の専門の関係から機械系の CAD を主として扱うこととする。

2. CAD の研究分野

まず、CAD の全貌を俯瞰し、その中にどのように各研究分野が位置づけられているかを 図-1 に示す。この図は CAD システムの研究を中心に置き、システムを実現するためのいくつかの基本技術に関する研究分野を放射状に配したものである。

このうち内部のブロックに示したモデリングやアナライザなどの分野は CAD そのものの研究であり、外周に配したコンピュータグラフィックスの分野は

CAD のために必要不可欠な基礎技術である。いずれも項を改めて述べる。

右下方の CAD データベースは、形状、図形を含む CAD 情報を扱う個有のデータベースが必要との観点から行われている研究分野である。しかし、一般の DBMS を利用できないような特別な違いが CAD データベースに存在するかどうかは議論の分かれるところである。左下方のアプリケーションインタフェースはグラフィックスやエンジニアリングアナライザを含め、CAD/CAM 全体のアプリケーションの入力となるデータの標準化が研究の中心課題であり、CAM-I や NBS によって IGES (Initial Geometric Entry System) が具体化しつつある。これはデータベースの研究とも直接関連しており、アプリケーションインタフェースの標準化によって、データ一元化を実現できる道が開かれると期待されている。下辺の CAD 周辺のアプリケーションとは、自動作図、CAM の各アプリケーションを意味しており、広範な研究分野が存在している。ただ紙面の余裕の範囲内ではこれらのすべてには到底触れられないので、図-1 の A, C, E を中心に述べる。

3. CAD システムの研究

発展期にある CAD システムを体系化することはかなり難しいが、あえてこれを 図-1 のように 4 種類に分けた。このうち、インタラクティブシステムとシミュレーションシステムが現在の CAD システムの柱である。

CAD における対話システム構成の重要性は CAD スタートの最初から認識されていた。1959 年の MIT-CAD プロジェクトの主目標が図形情報を含むインタラクティブシステムの実現であった。これは 1973 年の Sketchpad¹⁾ や DAC-1 としてセンセーショナルな反響を惹き起した。しかし CAD のための対話システムは簡単ではなく、その後の長い地味な研究を経て最近漸く実用になりつつある状態である。研究面から

† Research on CAD by Norio OKINO (Faculty of Engineering, Hokkaido University).

†† 北海道大学工学部精密工学科

A. CAD システム構成の研究	インタラクティブシステムの研究 問題向き専用 CAD システムの研究 シミュレーションプロセスによる CAD システム構成の研究 シンセティックプロセスによる CAD システム構成の研究
B. 構造モデリングの研究	
C. 形状モデリングの研究	形状の定義法の研究 インタラクティブ入力の研究 ワイヤモデル } の研究 サーフェースモデル } ソリッドモデル } 形状データのデータ構造に関する研究
D. 自由曲面のモデリングの研究	形状定義式の研究 インタラクティブ入力、修正の研究 曲面処理の研究
E. コンピュータグラフィックスの研究	2Dドラフティング処理の研究 ワイヤモデルのグラフィックスと1次変換の研究 サーフェースモデルのグラフィックスの研究 ソリッドモデルのグラフィックスの研究 面画、濃淡図形の研究 隠線処理の研究 シャドウイングの研究 インテリジェントグラフィック端末の研究
F. エンジニアリングアナライザの研究	マスプロパティ計算法とその適用法の研究 FEM, BEM 解析法とその適用法の研究
G. 問題向きエンジニアリングノウハウのプログラム化に関する研究	
H. CAD 周辺へのアプリケーションの研究	
I. アプリケーションインタフェースの研究	
J. CAD データベースの研究	図形データベースの研究 プログラムベースの研究 CAD 用 DBMS の研究

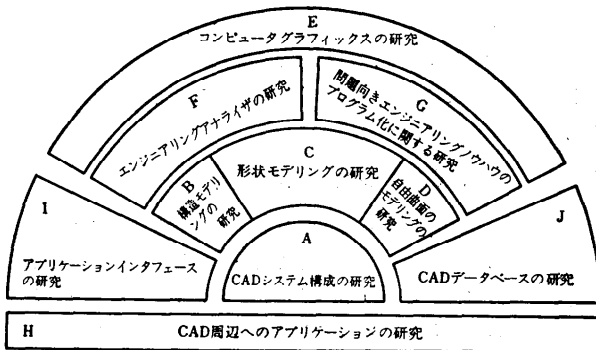


図-1 CAD 研究の全貌

の関心も最近一層高まりつつあり、1980年には IFIP, CAD 部門の WG 5.2 の国際会議がこの問題を主題にして日本で開かれた。CAD は決して無人による設計が最終目標ではなく、あくまで設計者主体の設計の過程で道具として利用されるための高機能化に目標がある。したがってこれは CAD の永遠の課題であるかも知れない。

インタラクティブシステムにはコンパイラの代りにインタプリタを使う方が好ましい。これに対話言語や Q&A 方式、タブレット入力などを組み合わせていかにきめ細かくシステム設計するか、いかにレスポンスタイムを短くするかがこのシステムの決め手だと云われている。CADAM や CADANCE に代表される 2 次元ドラフティングシステムではこの 2 点を追及して成功をおさめている。確かにこのシステムが人間との接点を問題にしている以上この考え方は間違っていない。しかし、現在のインタラクティブ CAD システムは CAD と云うには余りに不十分である。より一層 CAD らしい機能を持たせようとするとなんともレスポンスについて犠牲を払わねばならないであろう。

実際 CAD インタラクティブシステムが必要とする機能は多い。まず 3 次元図形処理機能である。いわゆるターンキー CAD システムはワイヤ線図についてはほぼ完全にインタラクティブ性を満たしているが、サーフェースやソリッド形状に関してはほとんど機能していない。CAD として必要な連動修正やバックトラッキング機能(会話プロセスの元に帰って修正する機能)なども CAD システムとしては今後の課題である。ほかに CAE (Computer Aided Engineering) 化する段階でインタラクティブシステムを構成することも大きな問題として残されている。

次にシミュレーションプロセスとして CAD システムを構成する方式を展望しよう。従来設計者によってなされた設計の大部分が、モデリングとアナリシの繰り返しによって進めるシミュレーションプロセスであったことから、これをコンピュータ化することによって、CAD システムを構成することは極めて自然である。現在の商用化された

CAD システムが CA ドラフティングの域を出ていないことから、最初の本格的 CAD システムがこのシミュレーション方式であると期待されている。具体的方法としては 1973 年の PROLAMAT において提案された形状モデラと汎用アナライザを組み合わせる 図-2 に示す方式が一応の合意を見ているように思える。

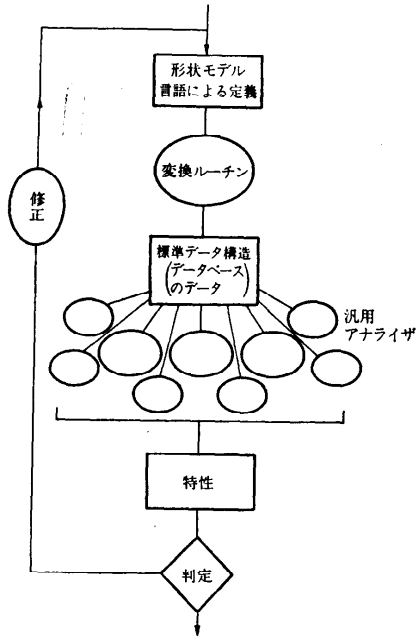


図-2 形状モデルと汎用アナライザによって構成するシミュレーション型 CAD システム

このシステムが成立するための必要条件是形状モデルの情報完備性と十分機能する汎用アナライザの存在である。しかもそれらがシステムのインタラクティブ性を損なわない程度の操作性に富んでいなければならない。しかし、現在の段階ではその性能は決して十分でない。まず情報完備性を満たすモデルとしてソリッドモデルでなければならないが、次節に述べるように研究開発は盛んであるが、これが CAD として実用になるにはなお 2~3 年を要するであろう。

汎用アナライザについては 2 種類がある。体積、重量、重心、慣性モーメントなどのマスプロパティについては区分積法とモンテカルロ法が、その他のエンジニアリングアナリシスについては FEM (有限要素法) と BEM (境界要素法) が利用されている。これらの手法そのものは十分精練され実用に耐えるものになっているが、これを CAD システムの中で活用するには使い勝手を良くするためのプロセッサが十分機能する必要がある。例えば FEM のためのオートメッシュジェネレータは数多く出現しているが、3次元ソリッド用、更には非均等分割などの機能についてまだ不十分である。

図-2 のシステムは部品の形状設計に対してであり、CAD が対応すべき更に多くの対象がある。図-2 の形

状モデルの部分を構造モデルに置きかえれば、そのまま構造設計用の CAD システムができ上がるが、実際に構造の特性をシミュレートする汎用アナライザが存在しない。構造設計用に筆者はモデロンと呼ぶ構造要素を組み合わせてシンセティックに設計を進めるシステムを提案している³⁾。これは、過去に蓄積された問題向きのエンジニアリングノウハウを、基本的なものについてプログラム化し、これを組み合わせて、設計式付きの構造モデルを構築する方法である。

いずれにしても CAD システムそのものの研究は少ない。先述の形状モデリングも CAD システムとして完成させる方向よりも、3次元コンピュータグラフィックスへ向けてアプローチされている。もっとも、これはシステムを完成させる最初の段階と考えれば納得できる。次節において、現在最も活発に研究の進展しているこの分野の研究を展望する。

4. 3次元形状モデリングの研究

形状モデリングには二つの顔がある。一つは設計者側を向いた顔で、いかに人間にとって取り扱い易い方法で形状を入力するかという形状定義問題が研究課題となる。もう一つはアプリケーションプログラムの方を向いた顔で、モデルのデータ構造をこれらのアプリケーションにとっていかに取り扱い易くするか、いわゆる形状を表現するためのデータ構造やアプリケーションインタフェースに関する研究課題があり、CAD の根幹をなす重要問題である。

更に形状モデル自体に、ワイヤモデル、サーフェースモデル、ソリッドモデルの 3 種が存在することは良く知られている。すでに述べたように情報の完備性の観点からソリッドモデルでなければならないが、実際にはワイヤモデルがいわゆるターンキー CAD システムとしてまず最初に実用化している。ワイヤモデルは稜線によって形状を表現してきた設計者に抵抗なく受け入れられるし、1次代数の適用範囲内でグラフィックスアプリケーションを処理できるという意味で二つの顔のいずれにも都合がよいからである。

しかし、ワイヤモデルはその持てる情報の不足のゆえに機能上の不足が目立ち、ドラフティングに限っても隠線処理すら自動的にはできないし、交線や輪郭線も正確には出るわけではない。そこでサーフェースモデル更にはソリッドモデルへと移行し、実用ソリッドモデルもぞくぞくと商用化されている。

ただし、ここで注意すべきはワイヤモデルとグラフ

ック出力としてのワイヤフレーム図は別物だということである。ソリッドモデルからワイヤフレーム図を出力することはできる。ただし、ワイヤモデルからは特別な入力をしないうりワイヤフレーム図しか出力できない。

ここでソリッドモデルのデータ構造について触れておきたい。Rochester 大学の Requicha は CSG (Constructive Solid Geometry) と B-Reps (Boundary Representation) の二つに分けて考えている⁴⁾。前者はソリッドのプリミティブ(基本形状要素)の集合演算オペレータによる組み合わせを基にしており、TIPS-1²⁾ 2層構造、PADL⁵⁾ のトリー構造が代表的なデータ構造である。後者の B-Reps は形状を構成するサーフェスパッチの結合関係をネットワーク状あるいはリレーション型データ構造として構成し、ソリッドの境界と実体の存在側を定義している。

CSG の特徴は構造が簡単で、読解が容易なことである。設計者が直接修正することもできる。したがって形状入力やデータベース用データとして適している。一方、B-Reps は構造は複雑でその処理はコンピュータによってのみ可能であるが、面の交線と稜線を持っているので、アプリケーション、特にグラフィックス関連の処理に好都合である。すなわち、どちらかと云えば CSG は設計者に向けた顔を持ち、B-Reps はアプリケーションプログラム側に向けた顔を持つ。

したがって形状の入力方式に関する研究において、初期のモデラ TIPS-1, BUILD, SHAPES などはプリミティブの組み合わせ結合方式で入力し、CSG を直接作成する方式をとった。その後 B-Reps のデータ構造が開発される一方、ターンキー CAD システムにおけるワイヤフレーム入力方式をそのまま活かして、ワイヤフレーム間に面を張り、これをスイープして 2½ ソリッドを定義するとかスピンして回転体を作る定義法が現れ、これと集合演算(ブーリアンオペレータと呼ばれている)を組み合わせる入力方式が開発された。この場合興味ある点は、インタラクティブ入力の 1 ステップごとに B-Reps を組み上げていくことができることである。これによって B-Reps 作成に要する処理時間を見掛け上軽減している。

この他にも、例えば三面図を入力して立体形状のデータを作るなど、3D 形状の入力方式に関する研究は少なからず存在するが、実際に使われるには至っていない。現在形状入力には実用部品に対して簡単なものでも数時間を要するのが普通であり、今後の研究の

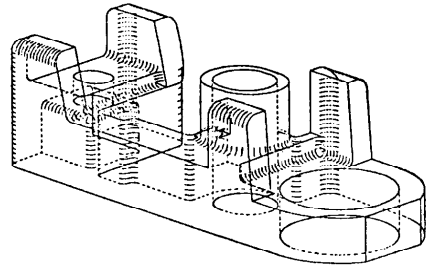


図-3 フィレット処理を行った図形

進展が待たれている。

CSG においては構造が簡単であるため余り大きな問題はなくプリミティブを直方体、円筒、円錐などの単体とするか、半空間とするか、自由曲面を境界とするプリミティブをいかに扱うか、などが課題となっている程度であるが、B-Reps においては Solid-Surface-Edge-Vertex となる結合関係のデータ構造がかなり複雑であり、かつ数学的にも興味ある対象であるところから多くの研究者を惹きつけ、活発な展開が見られる。Baumgart の提案した Winged Edge¹⁹⁾ と呼ぶデータ構造は図形データ構造研究の基本になるものであった。現在は 2 曲面の交わり部のフィレットをいかにデータ化するか(図-3 参照)、グラフィックスアプリケーションとのマッチング、2次元から3次元へのスムーズな移行など多くの問題が検討されている。一般に B-Reps では①多面体近似、②B-Spline または Bezier 曲面近似、③厳密に円筒面や円錐面として定義する方法の 3 種類がある。面を一種類の表現形式で統一することは処理を容易にするが、近似になるので厳密性に欠けるおそれがある。

最近の各形状モデラがデータ構造に関してとらうとしている方向は、CSG と B-Reps の両者を持ち、厳密な定義と面の近似定義についても両者を持ち、アプリケーションの目的に応じて使い分けようとしている。

表-1 は主な形状モデラと主としてグラフィックスアプリケーションのための基礎になるデータ構造についてまとめている。

5. 3次元コンピュータグラフィックスの研究

最近までコンピュータグラフィックスの研究と云えば、稜線、交線、輪郭線となる形状の特徴線の抽出と、隠線処理の問題が主であった。しかし、新しく出現した安価なラスタスキャン型のカラーディスプレイの出

表-1 ソリッドモデラー一覧

システム名	開発組織	実行言語	データ構造	面の定義	入力の基礎	文献
SHAPES	DRAPER 研究所 (米)	BAL/360	CSG	2次曲面	CSG	6
TIPS-1	北海道大学 (日)	FORTRAN	CSG, B-Reps	1次, 2次, 任意曲面	CSG	2
GEOMAP	東京大学 (日)	FORTRAN	B-Reps	B-Spline	CSG	7
GDP	IBM (米)	Assembler	CSG	多面体	CSG	8
PADL-2	ROCHESTER 大学 (米)	FLECS/FORTRAN	CSG, B-Reps	2次曲面	CSG	9
SYNTHAVISION	MAGI (米)	FORTRAN	CSG	2次曲面, 自由曲面	CSG	10
GMSOLID	General Motors (米)	PL/1	CSG, B-Reps	2次曲面	CSG, Sweep	11
BUILD-2	CAMBRIDGE 大学 (英)	ALGOL 68	B-Reps	2次曲面	CSG, オイラ式	12
COMPAC	BERLIN 大学 (西独)	FORTRAN	B-Reps	2次曲面, 自由曲面	CSG, Sweep	13
EUCLID	MATRA/OATAVISION (仏)	FORTRAN	B-Reps	多面体	CSG, Sweep	14
MEDUSA	CIS (英)	FORTRAN	B-Reps	多面体	CSG, Sweep	15
PROREN-2	RUHR 大学 (西独)	FORTRAN	B-Reps	多面体	Sweep	16
ROMULUS	SHAPEDATA (英)	FORTRAN	B-Reps	2次曲面	Sweep	17

注) この表は A. A. G Requicha による文献 (4), (18) に記載の表から主に引用した。ただ筆者の見解と異なる部分を修正し、一部重要性の少ないと思われるモデルを削除、我が国の GEOMAP を追加した。

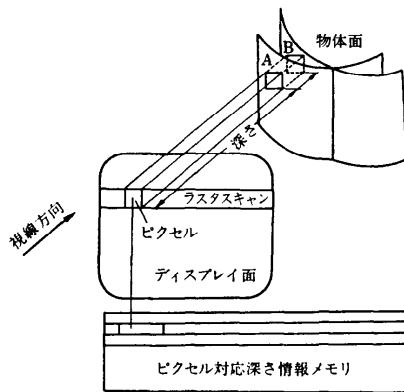


図-4 面画における隠面処理

現とそのインテリジェント化はコンピュータグラフィックスの世界に濃淡面画の作成という新しい課題をもたらした。CAD において我々が利用する図形は線図か面画かなどという論争をよそにカラー濃淡面画が着実に身近なものとなりつつある。

濃淡面画は線画に比べて情報の絶対量が違うため、その作成は容易でないと考え勝ちであるが実際はその反対で、ソリッド→サーフェース→ワイヤの順で情報の抽出を行うと考えると、線画は面画に比して1ステップ余分の処理を要する。すなわち、ワイヤモデルから直接線図を出力するような場合と違って、ソリッドを扱うときには面画は意外に簡単に扱え、計算時間も思ったほど長くならないのが普通である。線画抽出のアルゴリズムがほぼ出つくしたのに対し、面画の研究はこれからである。

濃淡面画において隠面処理のないアルゴリズムはあり得ないが、基本的な方法として 図-4 のようにディス

プレイ面の1ピクセル(画素)に対応する形状の表面の点の画面からの距離を深さ情報メモリに蓄え、二つ以上の表面がある時、各々の深さを比較して手前にあるものを残す方法がとられている。

線画の場合の隠線処理に比べて処理は極めて単純であり、その単純性を利用して、ハードウェア化し、端末のインテリジェンシの中に組み込める可能性も出ている。

近い将来、少なくとも斜視図、透視図についてはカラー濃淡面画が線画を駆逐すると思われるが、三面図のような線図でなければならぬものも当分は存在する。

図画が設計者と製造現場のコミュニケーションであり続けることは将来できないであろう。CAD/CAM システムにおいて、アーター一元化は絶対の必要条件であるから、図画のようなあいまいなデータの受け渡しを途中の段階で行うことは有り得ない。図は製造現場へではなく、逆に設計者にかえすことに使われることになる。すなわち、設計者が設計する対象を確認するために図を必要とするのである。

必然的に図画は大きく変質せざるを得ないであろう。濃淡面画はその場合重要であることは明らかであるが、同時にまた稜線、交線、輪郭線は形状の特徴線であり、人間の形状認識にとって不可欠である。したがって両者が適当に組み合わせられて、CAD/CAM のための新しい図形出力が考えられねばならない。

ここで3次元コンピュータグラフィックスにおいて何が困難であるかについて触れておこう。これは例えて云えば、多元1次連立方程式を解く場合、解法そのものよりも、不定、不能あるいは多重解などの処理にはるかに手間をかけねばならないのに似ている。一般

に1つの部品を構成する面の数は平均すれば100を超えると云われている。したがってまず稜線や交線を求める際の面の組み合わせの数が極めて多くなるのが問題点である。形状を平面で近似する方法が幾つかの商用システムで採用されているが、処理は単純化されるものの、面の数が極端に多くなる。

二つの曲面が接する場合、コンピュータの丸め誤差との関係で離れているか、接しているかあるいはブリーアンオペレータで交わりを持っているのかを区別することが難しい。誤って判定した場合、存在不可能な形状が発生したりするので、これをチェックする別のルーチンによりエラーとされたりする。この辺が3次元コンピュータグラフィックスの最も“いや”な部分である。

このような問題を完全に解決するよりは、このような問題が起っても差し支えないようなデータ構造にすべきであるかも知れない。図形の問題はある方策をとれば、それに固有の新しい問題が発生し、しかもそれは結構深みのある内容を伴うのである。

6. あとがき

コンピュータ応用の研究の宿命ではあるが、CADの技術開発には処理速度とメモリ容量を少なくすることを目標の一つに加えねばならない。コンピュータの発展のスピードは同じ速さでこの目標のために努力した多くの研究が無意味にしている。

その意味でCADの研究は常に新鮮であり、常に繰り返さねばならないといえる。換言すれば小手先のコンピュータテクニックよりも、基本になるCADの方法論や設計論²⁰⁾について論議を深める時期にきている。

参考文献

- 1) Sutherland, I. E.: Sketchpad, A Man-Machine Graphical Communication System, Proc. SJCC, p. 305 (1963).
- 2) Okino, N. et al.: TIPS-1 Technical Information Processing System for Computer Aided Design, Drawing and Manufacturing, Proc. of PROLAMAT '73 (1973).
- 3) 沖野: 自動設計の方法論, p. 47, 養賢堂, 東京 (1982).
- 4) Requicha, A. A. G.: Representations for Rigid Solids, Theory, Methods, and Systems, Computer Surveys, Vol. 12, No. 4, p. 437 (1980).
- 5) Voelcker, H. B.: An Introduction to PADL: Characteristics, status, and rationale, Tech. Memo. 22, Production Automation Project, Univ. Rechester (1974).
- 6) Laning, H. J.: Capabilities of the SHAPES System for Computer Aided Mechanical Design, Proc. First Ann. Conf. Computer Graphics in CAD/CAM Systems, Cambridge Mass., p. 223 (1979).
- 7) Hosaka, M. et al.: A Unified Method for Processing Polyhedra, Information Processing '74, p. 768, North-Holland, Amsterdam (1974).
- 8) Fitzgerald, W. F. et al.: GRIN, Interactive Graphics for Modelling Solids, IBM J. Research and Development, Vol. 25, No. 4, p. 281 (1981).
- 9) Brown, C. M.: PADL-2, A Technical Summary, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 2, No. 2, p. 69 (1982).
- 10) Goldstein, R.: 3D Modelling with the Synt-havision System, Proc. First Ann. Conf. Computer Graphics in CAD/CAM Systems, p. 244 (1979).
- 11) Boyse, J. W. et al.: GMSolid, Interactive Modeling for Design and Analysis of Solids, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 2, No. 2, p. 27 (1982).
- 12) Hillyard, R. C.: The Build Group of Solid Modelers, IEEE Computer Graphics and Applications Vol. 2, No. 2, p. 43 (1982).
- 13) Spur, G. et al.: Processing of Workpiece Information for Producing Engineering Drawings, Proc. 16th Int'l Machine Tool Design and Research Conf., p. 17 (1975).
- 14) Bernason, Y. J. et al.: Automated Aids for the Design of Mechanical Parts, Tech. Paper MS 75-508, RME (1975).
- 15) MEDUSA User's Manual, PRIME COMPUTER Inc.
- 16) Seifert, H. N. et al.: Different Ways to Design Three-Dimensional Representation of Engineering Parts with PROREN, Proc. Interactive Techniques Computer Aided Design, p. 335 (1978).
- 17) Veenman, P.: ROMULUS-The Design of a Geometric Modeller, in Geometric Modelling Seminar, W. A. Carter, ed., P-80-GM-01 CAM-I, p. 127 (1979).
- 18) Requicha, A. A. G. et al.: Solid Modeling A Historical Summary and Contemporary Assessment, IEEE Computer Graphics & Application Vol. 2, No. 2, p. 9 (1982).
- 19) Baumgart B. G.: Geometric Modelling for Computer Vision, Rep. STAN-CS-74-463, Stanford Artificial Intelligence Lab. (1974).
- 20) 吉川: 一般設計過程, 精密機械 47 巻 4 号 p. 405 (1981). (昭和 57 年 9 月 27 日受付)