

## 幾何モデルの生成と処理について

木村文彦 (電総研) 穂坂 衛 (東大宇宙研)

### Ⅱ. はじめに

本研究の目的は、空間を占める物体、あるいは存在するであろう仮想の物体のデータや記述を直接、間接に入力して、計算機内部に(存在するならば)実体に対応する幾何学的制約を持った内部モデルを生成すること、およびそのモデルの分析や、引き続き処理が可能なソフトウェアシステムを作ることである。このような内部モデルのことを「幾何モデル」と呼ぶことにする。

この研究の目標は次のとおりである。

- (1) 人と計算機との通信を改善し、入力の面倒さを取り除くこと。また各種型式の出力図を少ない指令で画けること。
- (2) 人の漠然と意図する対象が、計算機とのインタラクティブなプロセスによって明確に定まり、その対象を調べることができること。これの直接の応用は創造的設計より生産に至るまでの一貫した情報生成・制御方式を作ることにある。

さらに、次のようなことも最終的な目標になっている。

- (3) 外部の入力により、幾何モデルを生成し、修正して、比較のプロセスによって、外界および入力対象を識別できること。
- (4) エ学や工業の各分野における製図の作業、機械の組立、運動学等の空間や形状を取扱う問題の処理及び教育に関して新しい考え方と方式を導入すること。

このような問題に関して、従来の方法は、予じめなすべき仕事が確定している場合がほとんどであった。目的の仕事にそって人が略図を作り、その図形の意味を人が解釈して、topologicalやgeometricalなデータを作りあげる。そして、そのデータの納まるべきデータ構造を予じめ予定して、それを意識して処理のプログラムを作る。したがって作業のできる範囲は人があらかじめわかる範囲に限定されるし、処理作業の中間の状態の変更や、引き続き起る作業の要求は受け取れない。

また、従来の方法では、内部モデルが限定されているため、画法幾何学(図学)の手法にも達していない。図学では、モデル作成と処理の操作は、人が目前の図を用い、解釈しながら、個別的なアルゴリズムをもってその図に働きかける。このすぐれた方式は人にとっては面倒であるし、また高精度を要求されると困る。しかし、従来の方法を用いたのでは、計算機は人の代りとはなり得ない。計算機は図の各部の認識ができないし、対象の名前が必ずしも付けられていないため、処理のアルゴリズムを書けないからである。

人の操作あるいは記述をとってみても、図形が対象となる時は、非常に手間がかかる。わずかばかりの仕事は計算機にかけるまでもなく、複雑な仕事は計算機ではできない、ということになってしまう。

設計作業は人の創造的作業と機械的操作が入りまじった試行錯誤の過程を含む故に、一貫した計算機援助方式はとれなかった。たとえ人によって設計図が作られても、図面を解釈するための多くの仕事があり、また生産設計、素材の設定、工具の選定等々、多くの仕事があつて、APTに代表されるようなカットパスを決める作業はほんの一部でしかないが、それでも人が図面の解釈と記述をする必要

がある。しかし、設計の初期から内部モデルが作成されていれば、計算機は設計図面を見る代りに、作るべきものを見ていることになるので、一貫した設計自動化の可能性が出てくる。

物体認識においても、従来は、特徴抽出、識別といったことは、対象によってそれぞれ異った手法を考えねばならなかった。ここで考える方式は、モデル形成と分析、推測、さらにフィードバックによるモデル修正という learning の方式をうたてることによって、一般的に通用する手法を作ろうとするものである。

以上のような考察にもとずいて幾何モデルの生成と処理のためのソフトウェアシステムを作成したが、そのシステムの特徴は次のようである。

- (1) 人の直観にあうデータの内部表現形式を採用し、実体に良く対応するモデルを構成できる。
- (2) 入出力の手段も含めて、人はあたかも実体を扱っているかのようにモデルを操作できるように配慮した。
- (3) システム全体のモジュール化にも意を用い、種々の応用システムの作成に利用できる。

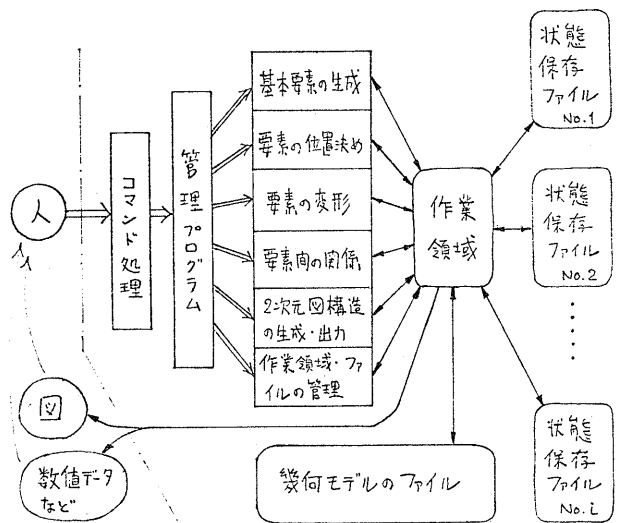
このシステムにより多数の例を扱い評価を行った。その過程でいくつかの意図しない分野への応用の可能性も明らかとなった。

以下、②ではシステムの概要を述べ、③でコマンド体系を説明し、④では各種の出力方法を例により示す。⑤ではシステムの内部構成を簡単に説明する。⑥には処理例を示してある。

## ②. 幾何モデルの生成・処理システム

システム全体は Fig.1 のような構成となっている。人はコマンドを用いて計算機内に幾何モデルを生成していく。処理の途中経過を適当な外部表現 — 透視図や三面図、展開図あるいは展開図より作られた実体モデル、またはデータ構造を表わす記号表現 — により出力させてみる。その出力を見て、自分の意図と異なる部分を修正する、というふうにインタラクティブに仕事を進めていく。この際、人はシステムの内部でのデータの表現形式を全く知らなくて良く、形状だけを意識して仕事を進めてゆける。

立体生成手順のあらましは次のようになる。まず用意された基本立体のモデルを作業領域内に生成し、回転や平行移動により希望の位置に設置する。基本立体を用いずにもっと簡単な要素、例えば面から始ると、面同士の関係を規定してやることにより立体を構成することもできるが、一般には柱体、錐体などの基本立体から



⇒ 制御の流れ, → データの流れ, □ 処理手順表, ○ 図

Fig.1 幾何モデル生成・処理システム

始める方が便利である。それらの立体間の和, 差, 共通部分などを生成したり, 切断や反転などの操作で立体を変形していく。例えば, Fig. 2 の立体は Fig. 3 に示すようなコマンド列により生成された。生成された立体は各種の出力方法で表示することができ, 展開図を用いて, 実際に3次元の形状を構成することもできる。このようにして, 作業領域内に生成された立体は幾何モデルのファイルに保存して後に他の立体を構成する際の構成要素とすることができ, あるいは対応する生成コマンド列を登録して, 新たな一つのコマンドとすることもできる。システム全体の制御のために, 状態保存ファイルなるものがあり, 作業領域全体の退避, 回復のために用いて, システムの大局的状态を使用者が管理できる。

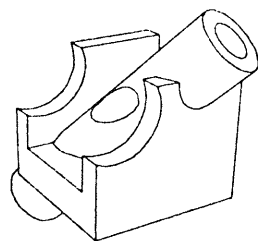


Fig. 2 立体の生成例

以上のような操作に対応して計算機内部には幾何モデルを表わすデータ構造が生成され, 処理されていく。使用者はこの構造を意識する必要はないが, 必要とあれば, データ構造を表示し, 任意の部分にアクセスして, 操作することが可能である。データ構造中には, geometrical あるいは topological なデータ, 要素の生成過程や形状の特徴を表わすデータなどが含まれている。必要な時期に必要なデータを決定することができ, 例えば一部の寸法が未定のままで立体を表わすデータ構造を生成することも可能である。原則として実在する幾何学的要素には対応するデータ構造の要素が存在している。現在備っている要素を列挙すれば, 3次元空間内の頂点, 線分(曲線も含む), 面分(曲面も含む), 立体, 立体間の関係, 3次元空間の見方を定めるためのカメラ, 座標系, 以上の要素を含む3次元空間自身, 2次元空間内の点, 線分, 面分, 立体への投影図, これらの集まり, などである。必要に応じて拡張される。特に, 3次元空間に対応して, 2次元空間も構造化されており, 3次元立体に対応して, 2次元の投影図に対しても処理が可能となっている。

```

*PCUBE
*B1 8 0.8 0.7 0.
*PCUBE
*B2 5 6.10 0.7 0.
*GTRNS
*B2 0 0.0 0.2 0.
*MSUB
*B1 B2
*PCCVLM
*B3 32.1 75.15 0.
*GROT
*B3 0 0. -45 0.
*GROT
*B3 30 0.
*MUNI
*B1 B3
*PCCVLM
*B4 16.1 0.20 0.
*GROT
*B4 0 0. -45 0.
*GROT
*B4 30 0.
*MSUB
*B1 B4
*PCCVLM
*B5 32.2 20.20 0.
*GROT
*B5 0 0.90 0.
*GTRNS
*B5 0 0.3 0.2 50.
*MSUB
*B1 B5

```

支持台の生成。

円管を付加。

円柱形を除去。

Fig. 3 コマンド例

以上システムの概要を述べたが, このシステムは他のシステムから利用することもでき, あるいは使用者が主管理ルーティンを書けば, バッチ処理的に用いることもできる。このシステムは FORTRAN で書かれ, 電総研の TOSBAC-5600 モデル 170 の TSS 上で稼働している。

### 3. 幾何モデル生成コマンド

#### 3-1. コマンド形式

本システムでは, 人がコマンドを入力するとシステムが必要なパラメータの入力を要求してくるという単純な形式のコマンドを用いているが, いくつかの工夫がなされている。まず, コマンド列のファイルを生成し, 実行することができ, 繰返し用いるコマンド列をファイル化しておく手間が省ける。また, 作業領域全体を状態保存ファイルに保存しておき, 指定した状態保存ファイルを回復することにより, 以前の状態に直ちにもどることができ, 操作の失敗の回復, システムの状態の大局的管理などに使用できる。さらに, 既存のコマンドをもとにして,

新たにコマンドをプログラムにより合成することもできるので、コマンド体系自体を拡張していくことが容易である。コマンドの形式や制御能力についてはさらに検討が必要であるが、これについては別の機会に報告したい。

### 3-2 基本コマンド

3-2-1 基本要素の生成：基本的な立体や面及び座標系などの要素を生成する。立体としては、正多角形または任意の多角形を底とする角柱、角錐、及び円柱、円錐がある。また多面体の指定した稜線を滑らかにするコマンドもあり、多面体による近似曲面体も生成できる。

3-2-2 要素の位置決め：立体や座標系などの要素を平行移動や回転により所定の位置に設置する。本システムでは空間内にいくつでも座標系を設定することができ、さらに立体や面などには全て固有の座標系が任意個付属している。基準座標系を任意に選んで、これに対して要素を動かすことができ、その時、要素に固有の座標系も付随して動く。したがって固有座標系間の関係を調べることにより要素間の位置関係を知ることができる。同一要素に対して任意個の座標系を設定することができるので、適切に座標系を設定することにより、紐立指示や位置決定が楽になる。3-2-4に示すように要素間にトリ-関係やネットワーク関係を付けることができ、そのような関係で結ばれている要素のどれだけの範囲を動かすかも指定できる。回転の指定には、Euler角を与えるか、又は回転軸とそのまわりの回転角を指定する。平行移動量、回転量のいずれも、他の要素との相対位置関係を利用して与えることもできる。例えば、「ある面がある面に含まれるようにある要素を回転せよ」というような指定が可能である。

3-2-3 要素の変形：与えられた2個の要素の和、差、共通部分に相当する要素を生成する。指定された要素の内部と外部を反転することもできる。2要素の和は常に単一の要素を生成するが、差、共通部分は、空を含めて任意個の要素を生じるので、生じた要素の個数や名前などがわかるようになっている。要素の変形は行なわずに、与えられた2要素間の位置関係（含まれる、交わるなど）を調べることもできる。この機能は要素の運動を扱う時に有用である。

3-2-4 要素間の関係：要素間には使用者が任意に関係をつけることができる。関係の形式としてはトリ-関係、ネットワーク関係があるが、関係の具体的内容は個々の使用者が決めて用いる。拘束を受けながら運動する機構（リンク機構）や物体の空間的配置などを表現するのに有用である。

3-2-5 2次元構造の生成及び出力：3次元空間内の要素を見方を指定して2次元空間内へ射影して2次元の構造を生成する。視点の指定はカメラモデルを設定して、そのパラメータを指定することによる。隠線消去を指定すれば、隠線を消去された2次元構造が生成される。2次元構造は単に出力のみでなく、図を仲立ちとして人と計算機が通信するときには有効に用いられ、図による入力、物体やスケッチの認識などの問題で活用される。生成された2次元構造は指示に応じて4で述べるような各種の方法で出力される。

3-2-6 作業領域とファイルの管理：作業領域の空き具合や個々のデータ構造の内容などを知るためのコマンドがいくつかあり、使用者はインタラクティブに作業領域を管理できる。必要と思う時点で、使用者は作業領域全体を状態保存ファイルへ格納し、作業領域の状態を別の状態に切り換えることができる。さらに、個々の要素を指定して、データ構造のバックを行い、幾何モデルのファイルに格納することもできる。このファイルは幾何モデルを生成する時の基本構成要素の

倉庫の役割を果たすことになる。

### 3-3 生成記述

立体が生成されると、その立体の生成に用いられたコマンド群がトリ-状のデータ構造となつて、geometrical や topological なデータと共に保存される。例えば Fig. 2 の立体については、Fig. 12 のようなコマンドの構造ができる。Fig. 3 のコマンド列と対照して見れば意味はわかるであろう。このトリ-構造は立体の生成過程を表わしているもので、立体の形状を直接表わすデータより高次の表現形式である。例えば試行錯誤により生成された立体の生成過程には多くの無駄が含まれているので、その無駄を省き、能率のよい生成コマンド列をつくる時や、生成手順を逆転させて以前の状態にもどす時など様々に利用できる。ここで示した生成過程記述は、立体の高次記述の最も簡単な一例であり、この方面に関して今後多くの検討が必要であろう。

#### 4. 幾何モデルの出力

人の理解と通信のために、多くの出力手段を用意しておくことは重要なことである。Fig. 2 の立体を例として各種の出力形式を説明する。

4-1 投影図：透視図や、正投影図などの出力手段があるが、任意の投影図を必要に応じて導入するのは容易である。透視図出力例を Fig. 4、正投影による3面図の出力例を Fig. 5 に示す。

4-2 断面図、切断図やレンダリングなど：形状をより人にわかりやすくするため簡単なレンダリングを施し、断面にハッチを入れた図を Fig. 6 に示す。立体を中空の緻細工構造と見て切断することもでき、その一例を Fig. 7 に示す。光源が視点と一致している時の面の明暗を表示した例が Fig. 8 である。

4-3 展開図：立体の展開図に対応する2次元図構造を構成することができ、その展開図を紙上に出カして、切り抜き、貼り合わせることにより、3次元の実体モデルを容易につくることができ、入がどの稜線を切り開くかを指示して、インタラクティブに次々と展開しながら、最もコンパクトで組み立てやすいように展開図が構成される。切り開かれた稜線同士には対応する印が付けられ、組み立ての際助けとなる。Fig. 9 に展開図の一部を示し、Fig. 10 にこの展開図から作られた実体モデルの写真を示す。3次元形状を把握するにはやはり実体モデルが最も優れており、有用な出力法である。

4-4 データ構造の表示：人は通常はデータの内部表現を気にする必要はないが、状況により調べたいこともあるので、データ構造を見やすく表示することも必要になる。Fig. 11 はその一例で面の接続関係を示している。その他、直接の形状表示でないものとして、3-3 に述べた生成過程トリ- Fig. 12 などがある。これらもまた、形状の正確な把握のために不可欠のものである。

#### 5. 幾何モデルの内部表現と処理

##### 5-1 幾何モデルの内部表現

幾何モデルは計算機内部では Fig. 13 に示すようにネットワーク状のデータ構造として表現されている。すなわち計算機の8語をまとめてセルと名づけ、セルが幾何学的実体、たとえば、立体、面、線などを表わすこととし、各セル間の関係はポインタにより表わされるようにした。特定のセルはスタックと双方向ポインタで結ばれている。使用者は通常はスタックを見てデータの管理を行い、必要な時は、スタックから始めて、ネットワーク構造の中を自由に参照することができる。スタックとセルを合せたものが2で述べた作業領域に相当する。

このようなデータ構造を採用した理由は次のとおりである。① 個々のセルに印を付けてあるので、そのセルが何を表わしているかがわかり、複雑な構造でも局所的に判断できて処理しやすい。② 既存セルの変更や新たなセルの追加が容易でデータ構造の拡張性に優れている。③ 処理に伴うデータ構造の変更が容易で、他要素との関係も調べやすい。④ セルの中に短いベクトルが格納できる。幾何モデルの処理では、長さが2又は3程度の短いベクトルの扱いが頻繁に起るので便利である。⑤ ポインタを介さずに直接アクセスしたいセルはスタックと関係づけおけば、直接アクセスできる。スタックの要素には任意に名前もつけられる。

幾何モデルの表現という観点から見た時のデータ構造の特徴は、人の直観と合うようにモデルが表現されているということである。幾何学的要素は1セルないし2セルで表わされ、名前、属性値、他の要素との関連などが記入されている。幾何学的形状以外のデータを必要に応じて追加することもできる。現在までに、幾何学的特徴や、生成記述などの構造が追加された。さらに、2次元構造があるので、線画の扱いが3次元構造と一体にできるのも特徴である。

特に大量のデータを処理せねばならない場合には、データを分割すればよい。分割の方法としては、Fig.18のように小部分の組合せとして大構造を構成するか、立体の変形処理時に構造を分割してしまう。4であげた例についていえば、Fig.14のように分割される。これは単なる例であって実際には、Fig.14程度のものは十分処理できるので分割の必要はない。

## 5-2 処理の基本

データ構造に関係情報が十分表現されているので、処理手続きは簡潔になる。詳細は文献<sup>(1)</sup>に譲り述べないが、基本的考え方をまとめる。① 細部の処理に入る前に、大局的な形状から明らかに処理しないで良い部分を落とす。② 処理が空間的に連続的に進むように配慮し、無駄な探索をへらす。③ データ構造に出来るだけ多くの情報を残すようにし、各処理手続き間の独立性を高める。④ ポインタ形式のデータ構造と共にアレイを作業エリアとして用い処理の効率化を計る。

全体的に処理手続きは比較的単純であるにもかかわらず、データ構造にあらかじめ多くの情報が含まれているため、高速処理が実現できた。

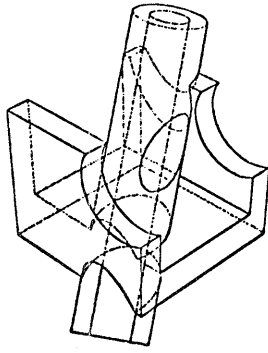
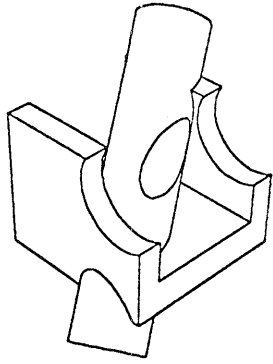
## 6. 幾何モデルの生成・処理例

Fig.15は、3本の六角柱から成る基本立体を4個作り、さらに1本の棒を付加して、人の指示によらずに空間のランダムな位置に配置して干渉を生じさせたものである。3次元の物体がどのように配置されているか人にはわかりにくい例である。Fig.16も類似の方法で生成されたものである。Fig.17は機械部品の設計例である。この方式では、設計図を作っているのではなく、設計すべき物を作っているものであり、計算機が設計図を解釈できるのと同等の効果をもつことになる。Fig.18は建物の設計の一例で、この種のものは形状の規則性を失かして能率良く処理することができる。

## 7. まとめ

幾何モデルの生成・処理に関する基本的問題はほぼ解決したと考えられ、今後は形状創成や認識などの各分野の仕事の土台として用いられるであろう。本研究を基礎として形状記述法をさらに発展させることも重要な課題である。

[文献] (1) 穂坂・木村・柗下: A Unified Method for Processing Polyhedra, IFIP 74, p.768



← Fig.4 透视图

Fig.6 断面图

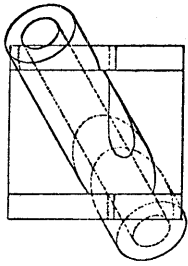


Fig.5 三面图

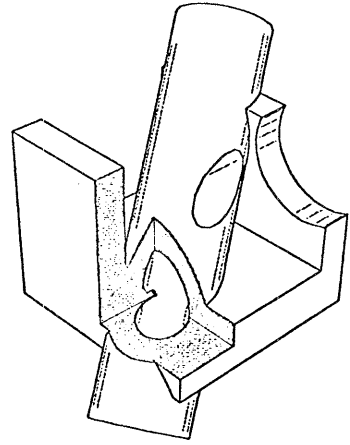
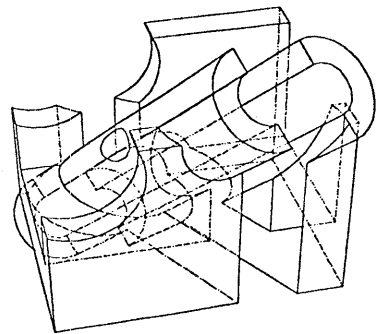
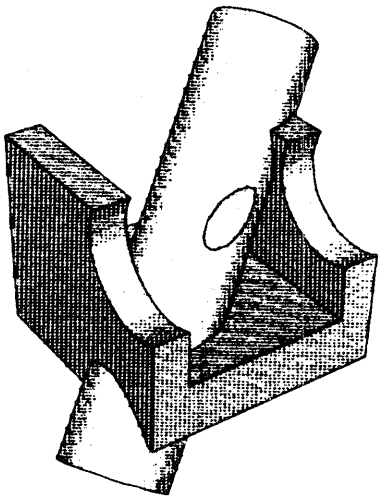
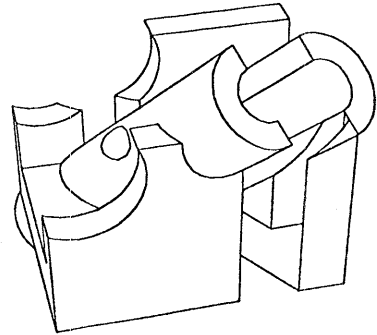
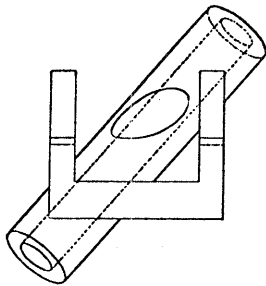
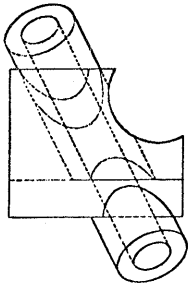


Fig.7 切断图



← Fig.8 面の明暗表示の一例

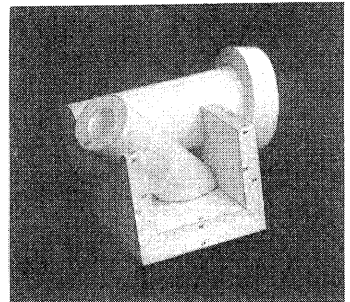
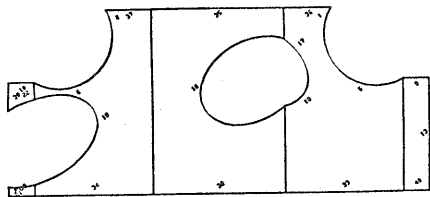
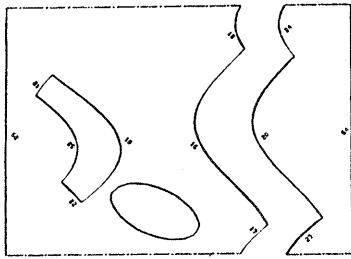
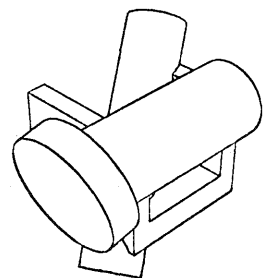
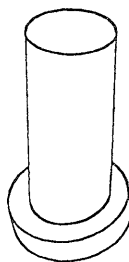
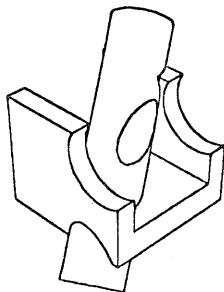
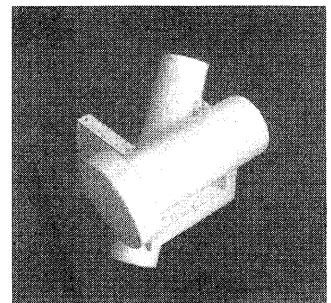
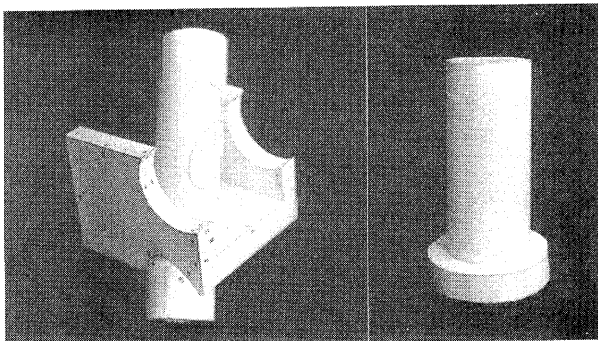
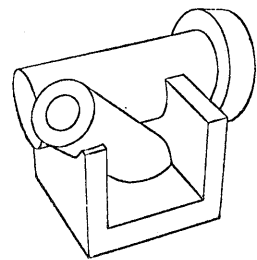


Fig.9 展開図(一部分)

Fig.10 展開図より構成された立体の写真  
及び対応する透視図







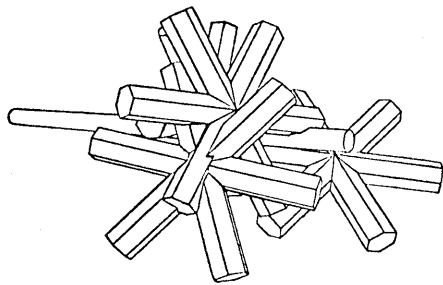
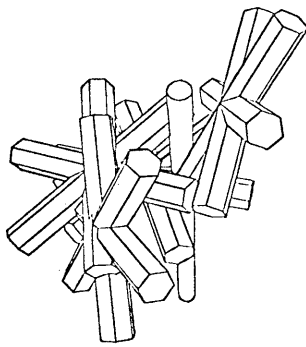


Fig.15 ランダムに配置された立体の干渉

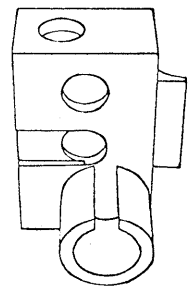
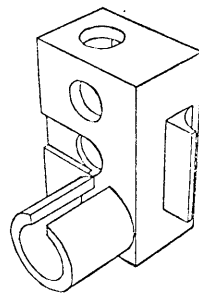
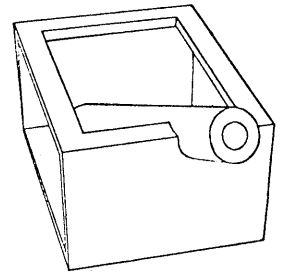
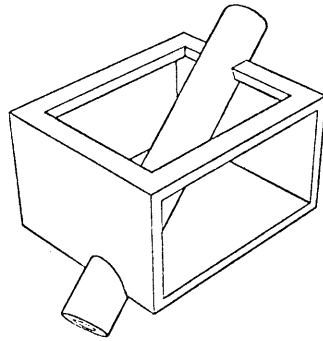


Fig.17 機械部品の設計例

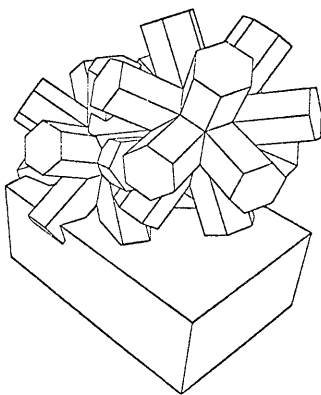


Fig.16 六角柱を用いた立体の生成例



Fig.18 建物の設計例