

教育用 3 次元 CAD の開発と図学教育への実践

新津 靖

東京電機大学 情報環境学部 (〒270-1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200)

図学教育を意識したコンピュータ教育を一年次に行うには、初心者でも操作できる図学教育用ソフトウェアを開発および導入する必要がある。著者は、使いやすく教育的にも配慮された図学教育やコンピュータグラフィックス教育などに応用できる 3 次元ソリッドモデラーを開発した。開発したソフトウェアは 13 種類の基本立体を組合せて目的の立体を作ることができ、集合演算やアフィン変換などの機能を有している。表示には陰線処理による稜線表示とコンピュータグラフィックスに近い面表示が可能である。このソフトウェアを用いて、1 年次生の図学教育を行った。その結果、学生は図形に興味をもちながら学習を進め、最終課題では高度な立体モデルを作るまでになった。

Development of 3D-CAD System for Educational Use and Practice on Descriptive Geometry

Yasushi NIITSU (yniitsu@sie.dendai.ac.jp)

(School of Information Environment, Tokyo Denki Univ., 2-1200, Muzai-Gakuen, Inzai, 270-1382)

ABSTRACT. An 3D solid modeling software has been developed for the education of the descriptive geometry and computer graphics. The boundary representation and the winged-edges method have been adopted as a description method of solid model. The developed solid modeler can create a 3D solid model by executing the command lines of text format. Combining the 13 kinds of primitive models, the solid model is constructed. The developed software has several kinds of display modes more than 140, such as the edge-type, the surface-type, the perspective and parallel views, three faces and so on. The practice of descriptive geometry with the software had been carried out in Tokyo Denki Univ. The students were interested in the geometry and their geometric ability was improved.

1. 緒言

東京電機大学工学部機械工学科では、10 年前、1 年次生のコンピュータ教育の充実を機に、1 年次の図学授業を廃止し、コンピュータ授業の中で図学教育を行う方向でコンピュータ教育のカリキュラムを組み、2 次元および 3 次元グラフィックスのプログラムおよびデータ作成を行った。3 次元グラフィックスでは投影法、ワイヤフレームモデル、サーフェイスモデル、陰線処理、相貫線表示を行っていた。しかし、教育システムの環境が MS-DOS から Windows に変わるのに伴い、ワープロや表計算、数式処理などのリテラシー教育に多くの時間が割かれるようになり、プログラミング教育に使える時間が減少してきた。その結果、プログラミングによる図学教育を実施することが困難になってきた。このような現状から、図学教育を意識したコンピュータ教育を一年次に行うには、初心者でも操作できる図学教育用ソフトウェアを開発および導入する必要がある。

そこで著者は、使いやすく教育的にも配慮された図学教育やコンピュータグラフィックス教育などに応用できる 3 次元ソリッドモデラーを開発した。開発したソフトウェアは、図学教育に援用することを考慮し、3 次元 CAD に近い機能を付加した。すなわち、集合演算と陰線処理を充実させた。さらに現在、表面積計算や体積計算、重心計算などの CAD 的機能の充実を図るため開発を進めている。

開発したソフトウェアは「Solid Interpreter」と名づけ販売を開始している。また、東京電機大学工学部機械工

学科では 1999 年と 2000 年に本ソフトウェアを使用したコンピュータ図学教育を行った。その結果、十分な教育効果が認められた。現在、その授業を受けた学生たちは上級学年で設計製図などの授業を終えているが、その担当教員からも教えやすいという意見をj得ている。

2. 教育用 3 次元 CAD ソフトウェア

開発した教育用 3 次元 CAD 「Solid Interpreter」は、テキスト形式の独自のスクリプト言語を解釈してモデルの構築、演算、表示を行うソフトウェアである。このソフトは、基本立体と呼ばれる 13 種類の立体に移動や回転、アフィン変換、集合演算^[1]などを施して希望とする 3 次元立体を構築することができる。ソフトウェアの開発で留意した点は、初心者でも楽しく使えることと、図学教育が目的とする「空間把握能力」を高める効果が得られることである。

2.1 ソリッドモデルのデータ構造

コンピュータ内部のデータとして 3 次元立体を表現する方法には 2 種類の方法がある。一つは立体の境界条件である面や稜線、頂点を用いて立体を表す B-Reps 法 (Boundary Representation) であり、もう一つは円柱や直方体など直感的にわかりやすい基本的な立体の組み合わせで目的の立体を表現する CSG 法 (Constructive Solid Geometry) である。CGS 表現は直感的に理解しやすい表現方法であるが、集合演算や投影表示の容易さや、市販のほとんどの 3 次元 CAD と有限要素解析用プリポストプロセッサが B-Reps 法を採用していることを考慮

し、本ソフトウェアも内部形状表現に B-Reps 法を採用した。^{[1],[2],[3]}

開発したソフトウェアは3次元立体の生成、表示、管理を行うもので、ソフトウェアが扱うデータには、名前を付けて管理するものと、名前を付けずにポイント操作で管理するもの2種類がある。名前を付けて管理するデータ構造としては、表1に示す4種類のものがある。

視線情報は、立体を表示するときの条件を設定するためのものである。表示モードには、面表示^[2]と稜線表示モードがあり、陰線の表示・非表示を指定することができる。^[6] また、3面図表示により通常の2次元設計図面に対応した表示を行うことができるように設計した。このため、非常に多様な表示モードが指定可能であり、その数は140種類以上にもなる。表示モードは4つのパラメータで表現される。グループ構造は立体や子グループをまとめて扱うためのものであり、コンピュータのファイル構造に似せて設計した。たとえば、2つのグループを作り、その中に同じ名前の立体を作ることができる。あるグループを表示コマンドで表示する場合、グループ内部のすべての立体とすべての子グループさらに孫、ひ孫グループが表示される。軸構造体は、立体やグループに動作を定義するためのものである。たとえば、飛行機のプロペラを考えて見ると、プロペラは飛行機に接続して回転するが、このような動作を軸構造により表現することができる。

立体は基本的に多面体として表現され、そのデータ構造には、Winged-edge データ構造を採用している。^{[3],[4],[5]} すなわち立体の境界を表す面の構造体と稜線の構造体のリスト構造により立体の位相関係を表現する方法である。立体を構成する要素である「頂点」、「稜線」、「面」、「ループ」は名前を持たないデータ構造である。高速処理を実現するため、位相データの検索・操作はポイント操作により実現している。

2.2 3次元立体の形状表現

立体は内部にその立体を構成する面構造体のリストを情報としてもっており、面を順次表示することで、立体を表示させることができる。面、稜線、頂点、Loop は立体を表現する位相データであるが、これらは名前で管理せず、ポイントのリスト構造により管理されている。

コンピュータ内での立体の表現方法は、構造体のリスト構造を用いている。Body (立体) はすべての Face (面) へのポイントを持っており、各 Face は最初(外側)の Loop へのポイントとすべての Loop を結ぶ一方方向リストを持っている。Loop は最初の Edge へのポイントを持っており、Edge (稜線) は左右の Face と Loop へのポイントおよび始点・終点の頂点へのポイントを持っている。^{[2],[4],[5]} これにより、1つの Edge を2つの Face と Loop で共有することができる構造になっている。このように、Face が複数の Loop (親 Loop と複数の子 Loop) を持つことができ、この位相構造により穴の空いた面を表現することができる。

2.3 プリミティブ(基本)立体の種類と形状

B-Reps 法による立体表現は、コンピュータにとっては処理しやすい方法であるが、人間が直接データを入力するのは不可能である。このため、図1に示すように、

6種類(直線、多角柱、多角錐、2種類の回転体、螺旋体)の立体生成コードを用いて生成できる13種類(直線、直方体、円柱、円錐、球、回転楕円体、トーラス、多角柱、多角錐、2種類の回転体、2種類の螺旋体)の基本立体を考え、12の立体生成コマンドとパラメータ指定により簡単に基本立体が生成できる方法を取った。基本立体のうち、直線は面を持たない特殊な立体である。図1の矢印は、上の基本立体と同じ生成プロセスで下の基本立体を生成していることを示している。実際にはこれに加えて正12面体、正20面体、32面体、80面体など、合計で37種類の基本立体を図1の13種類のコマンドとオプション指定で生成することができる。

2.4 表示モードと表示効果

「Solid Interpreter」の特徴はその表示機能にある。CAD や図学教育を意識して開発されたため、陰線処理や3面図表示、リアルな面表示など140種類以上の多彩な表示方法を有している。図2は、トーラスを集合演算により組合せた立体の表示例であるが、陰線処理を施したものと、サーフェイスモデルによる簡易陰線処理の違いが

表1 名前を持つ Object のデータ構造

Object	Object が有する主な情報
視線情報	視線名、視点座標、注視点座標、表示モード、表示効果
グループ	グループ名、子グループリスト、子立体リスト、内包軸ポイント
軸	軸名、関連立体/グループ名、軸方向ベクトル、移動量、上下リミット
立体	立体名、面色、稜線色、親グループ、境界面・稜線・頂点 Class 等へのポイント、面数・稜線数・頂点数等

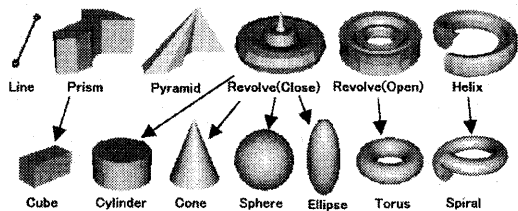
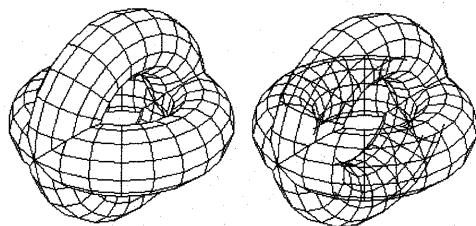


図1 基本立体の種類と形状



(a) 完全陰線処理 (b) 簡易陰線処理
図2 完全陰線処理と簡易陰線処理

示されている。図3は3面図表示と陰線処理の例である。本ソフトウェアの開発においては、図学や設計の教育での応用を念頭に考えているため、陰線表示と3面図表示は充実させている。表示モードと表示効果は、視線情報を生成するとき4つのパラメータで指定する。それぞれのパラメータの分類を下記に示す。

- (1) 表示効果 : 全稜線表示, 簡易陰線処理, 陰線処理, 面表示(3タイプ)
- (2) 表示モード : 透視投影, 平行投影, 3面図(2タイプ)
3面図と透視投影・平行投影の組合せ
- (3) 陰線表示 : 表示 ON・OFF 制御
- (4) 曲面上稜線 : 表示 ON・OFF 制御

これらのパラメータの組み合わせにより原理的には192種類のパターンが設定可能であるが、面表示と陰線表示のように機能しないものもある。

グラフィックス表示は Windows の API を使用して実現しており、OpenGL や DirectX は使用していない。その理由は OpenGL 等では陰線処理ができないためである。しかし、本ソフトウェアの表示エンジンでは、面表示を Z ソート法で行っており、正確な面表示や滑らかな曲面表示ができない。このため、最新版では OpenGL 等を利用した表示モードを追加している。立体のデータ構造は OpenGL に十分対応できるように設計されており、技術的には面表示の OpenGL 化は比較的容易であった。図4に本ソフトウェアで作成した立体モデルの OpenGL 表示例を示す。滑らかな面が表示できていることがわかる。

3. コマンド群と3Dプログラミング

3.1 ソリッドインタープリタのコマンド群

ソリッドモデルの生成と表示はコマンドスクリプトを実行することで実現させることができる。コマンドは47種類あり、変数や繰返し処理、条件分岐処理など言語的な機能も備えている。CAD 機能として、立体のグループ処理や立体の動作表現も可能である。表2,3に、47種類のコマンドの内、代表的な20種類のコマンドの機能を示す。コマンド群は大きく分けて以下の7種類に分類できる。

- (1) 立体生成コマンド : 基本立体の生成
- (2) 立体操作コマンド : コピー, 移動, 回転, 集合演算
- (3) 表示機能コマンド : 視線情報生成, 表示制御
- (4) 実行制御コマンド : 繰返し・条件分岐, 変数・定数
- (5) ファイル操作コマンド : ファイル実行, DXF, VRML
- (6) グループ・軸コマンド : グループ化, 動作設定
- (7) その他のコマンド : 初期化, 実行停止, コメント

例として、表2,3にそれぞれ立体生成コマンドと立体操作コマンドの名前と書式を示す。ほとんどのコマンドはオプション指定によりその機能を変化させることができ、たとえば、表3の Rotate コマンドは立体やグループを回転させるだけでなく、オプション指定により「視点」や「注視点」を回転させることもできるように設計されている。

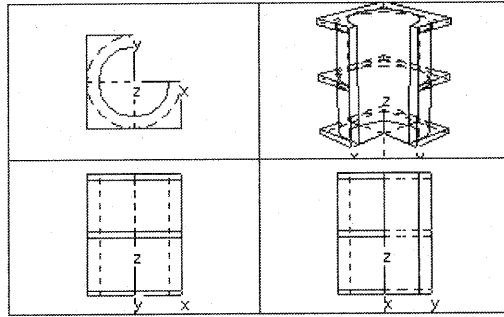


図3 3面図表示と陰線処理

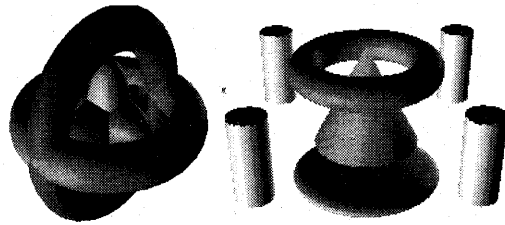


図4 OpenGL を用いた表示例

表2 基本立体の生成コマンド

生成立体	コマンド	主なパラメータ
円錐	Cone	立体名, 半径, 高さ
直方体	Cube	立体名, X,Y,Z 長さ
円柱	Cylinder	立体名, 半径, 高さ
楕円体	Ellipse	立体名, XY 半径, XZ 半径
直線	Line	立体名, 始点座標, 終点座標
多角柱	Prism	立体名, 高さ, 座標点列
多角錐	Pyramid	立体名, 高さ, 座標点列
回転体	Revolve	立体名, 座標点列
球	Sphere	立体名, 半径
円環体	Torus	立体名, 大半径, 小半径
螺旋体 1	Spiral	立体名, 大半径, 小半径, ピッチ
螺旋体 2	Helix	立体名, 座標点列, ピッチ

表3 立体操作コマンド

機能	コマンド	書式または主なパラメータ
立体のコピー	=	複写先立体=複写元立体
集合演算	=,+,*	立体3=立体1(op) 立体2
アフィン変換	Affine	立体名, 中心, 変換行列
消去	Delete	立体/グループ名
平行移動	Move	立体名, 相対変位
複数コピー	Ncopy	立体名, コピー方向, 数
回転移動	Rotate	立体名, 回転中心, 軸方向
カラー設定	Xcolor	立体名, 表示色(R,G,B.)

3.2 3Dプログラミング

簡単な例として、以下に円柱と円柱の集合演算からできる立体のプログラム例 (13行) と実行例 (図5) を示す。

```
New # 初期化
Eye eye0 100,100,82,0,0,0,3,1,4,0,0 # 視線生成
Cylinder y0 32,10,30 # 円柱 y0 の生成
Move y0 0,0,-15 # 円柱の移動
y1 = y0 # 円柱のコピー
Rotate y1 0,0,0,1,0,0,90 # 円柱 y1 の回転
Xcolor y0 255,255,255 # 着色 (白)
Xcolor y1 255,128,0 # 着色 (青)
XObj1 = y0 + y1 # 集合演算 (和)
XObj2 = y0 - y1; Move XObj2 -25,-25,0 # 集合演算
XObj3 = y0 * y1; Move XObj3 -25,30,0 # 集合演算
Display eye0 XObj1,XObj2,XObj3 # 表示
```

Solid Interpreter のコマンドには、繰り返しや条件分岐などの実行制御をコントロールすることができるコマンドが用意されている。さらに、変数を使用できるため、プログラミングにより立体のパラメータが変更できる「拡張パラメトリック表現」が可能である。たとえば、次の3Dプログラムのように、変数により、羽根の枚数を指定してプロペラを生成することができる。通常のパラメトリック表記は、立体のサイズを数値として指定するものであり、基本的な形態を変化させるものではない。次の3Dプログラムの実行により生成される立体像を図6に示す。

```
Eye eye0 100,100,82,0,0,0,3,1,4,0,0
N = 5 # Variable N is the number of wings
R = 360 / N # Variable R is the angle of wings
Group Propeller {
  Ellipse e0 12,8,20
  Cube q0 30,20,20
  Move q0 -15.00,-10.00,-24.0
  e0 = e0 - q0
  delete q0
  Ellipse e1 12,5,25
  Affine e1 0,0,0;0.20,0.00,0.00;
  0.00,1.00,0.00;0.00,0.00,1.00
  Move e1 0 0 20
  Rotate e1 0 0 0, 0 1 0 90
  Rotate e1 0 0 0, 1 0 0 -15
  Ncopy -s e1 0,0,0, 0,0,1,R,0,N
  delete e1
}
```

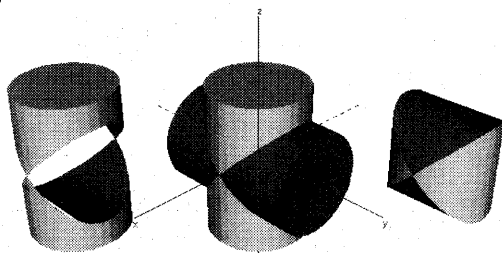


図5 集合演算の例 (和, 差, 積集合)

```
clear; display eye0 Propeller
Dispcord -a eye0 20,0x80ffff
```

4. 3Dプログラミングのための GUI 環境

開発したソフトウェア「Solid Interpreter」は、立体生成やコマンド生成をサポートする次の5種類のツールを備えている。

- (1) **メイン Window :**
3Dプログラミング用のマルチテキストエディタを持ち、実行制御、ファイル管理を行う。
- (2) **Primitive 生成 Window :**
基本立体生成コマンドを GUI 環境で自動的に生成するツールで、他のツールを呼び出す機能も持つ。
- (3) **Command 生成 Window :**
基本立体生成以外のコマンドを生成するためのツールで、色設定などビジュアルに指定することができる。
- (4) **状態表示 Window(Object Inspector) :**
実行時のグループ関係を Tree 表示や、メモリの使用状況を調べたりするためのツールである。
- (5) **グラフィック Window :**
立体を表示するだけでなく、ビットマップ画像の保存やクリップボードへの転送機能を持っており、表示画像の再利用を支援する機能を有する。(この報告書のグラフィックス画像はこの機能を利用してワープロに貼り付けている。)

これら以外にも、初期設定を行うためのフォームや数値パラメータを入力するためのフォームなど多くのプログラム機能を有している。

これらのツールを使用することで、GUI 環境下でビジュアルに立体を生成したり、コマンドを生成することができる。図7に基本立体を生成するためのツールである「プリミティブ生成 Window」(任意対称断面の螺旋体生成時の表示例)を示す。このツールにより37種類の基本立体を確認しながら生成することができ、さらに、パラメータが多い視線情報も確認しながら設定することができる。

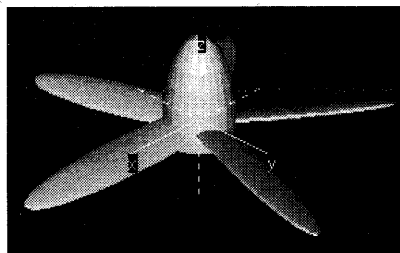


図6 拡張パラメトリック表記によるプロペラの生成

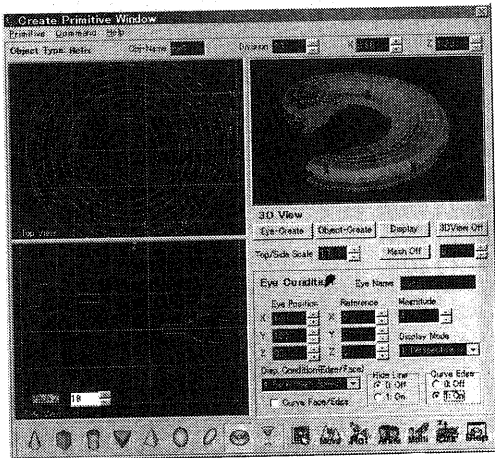


図7 プリミティブ生成Window

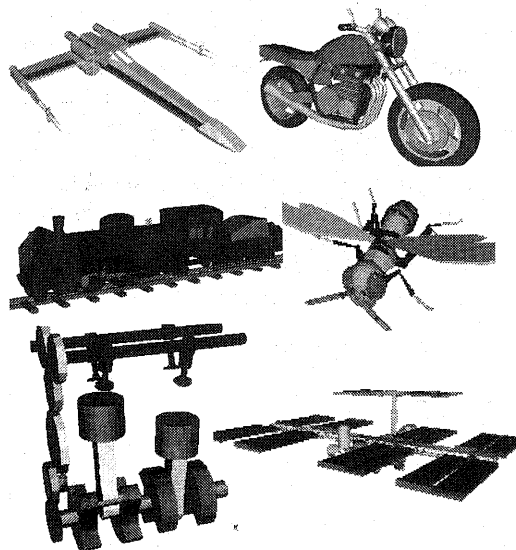


図8 3次元立体の製作例

5. 教育事例と学生作品例

5.1 授業計画と授業内容

開発したソフトウェアは東京電機大学工学部機械工学科1年生約130名を対象にしたコンピュータ基礎および演習1(90分2コマ13~14週)において教育に使用した。この授業は新入生が最初に受けるコンピュータの授業であり、ワープロ、表計算、電子メール、数式処理などを実習を通して習得するためのものである。この授業の後半の第7週から第11週の5週(90分2コマ×5:計10コマ)を使用して、コンピュータ図学教育を行った。下記の教育は1999年のものであるが、2000年もほぼ同様のスケジュールで授業を実施した。教育内容は、

- (a) 3次元図形の表示, 3面図, 投影図, 陰線
- (b) ベクトル, 特に回転ベクトルの概念の理解
- (c) プログラムの操作方法
- (d) 基本立体の作り方と表示方法
- (e) 最終課題の作成と発表会

である。担当教員は著者の新津で、講師の竜田氏、助手の若井氏に加えて3名のTA(院生)が支援する態勢で授業は進められた。上記の(a), (b)では方眼紙に鉛筆で書きながら演習を行った。なお、4月中旬の最初の授業でデモプログラムを見せ、5月中旬に学生にプログラムを配布したときに約1時間基本的な使用方法を説明している。実際の各週の授業内容を以下に示す。カッコ内は前後の週の実習内容である。

- (第6週 5/27 中間試験)
- 第7週 6/3 3面図, 投影図, 回転ベクトルの理解
- 第8週 6/10 基本立体の作り方とコマンドの習得
- 第9週 6/17 基本立体の作り方とコマンドの習得
- 第10週 6/24 PowerPointの使い方, 最終課題テーマ
- 第11週 7/1 最終課題発表会
- (第12週 7/8 ホームページ作成)

課題提出は方眼紙での提出が3件、プログラムファイルの提出が3件である。そのうちの図面とプログラムの計2件が最終課題である。最終課題は各自でテーマを決めた立体を作るというもので、第5週目に発表会を行った。

5.1 最終課題作品

図8に、大学生たちが製作したソリッドモデルの例を示す。これらのモデルは動作するようにプログラミングされている。授業では図学を意識して稜線表示の課題を多く取り入れていたが、作品はほとんどが面表示のグラフィックスであった。また、このようなモデルを週2時間、4~5週で作れたということに、著者だけでなく担当教員全員が驚いた。学生が熱心に課題に取り組んだ理由は、ソフトウェアが使いやすかったこともあるが、最終課題の評価をもって期末試験結果としたことで学生のやる気を引き出したものと考えられる。

5.3 アンケート結果

発表会終了後に授業に関するアンケートを実施した。アンケートの主な質問内容は、

- (a) ソフトウェアについて
- (b) 課題を実施した場所
- (c) 学習効果についての認識
- (d) 最終課題に費やした時間と満足度
- (e) 3Dモデラーを使った授業についての感想

である。約72%の学生が自宅でコンピュータが使える環境にあり、ソフトウェアの配布は学生から非常によい評価を得ていた。また、授業の目的である空間把握(認識)能力の向上については、図9に示すように、半数以上の学生がはっきりと向上した(よくなったと思う)と答えており、主観的ではあるが、短期間の授業にもかかわらず教育効果があったものと考えられる。

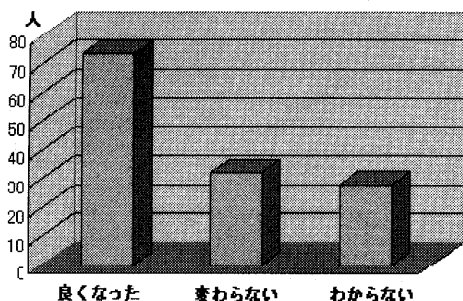


図9 空間把握能力についてのアンケート結果

6. 結言

東京電機大学の機械工学科では1999年前期より1年次生のコンピュータ教育で開発したソフトウェア(Solid Interpreter Version2.0)を、コンピュータ図学教育に使用し、教育効果を上げている。2000年度もほぼ同様のカリキュラムで授業を実施し、最終発表会では前年にも勝る作品を見ることができた。2001年度は著者が「工学部」から新設の「情報環境学部」に異動した関係で、この授業は実施していない。しかし、情報環境学部の1年次生に対して、「ワークショップ」授業において約10名の学生とモデル製作をいっしょに行い、非常にユニークなソリッドモデルを作ることができた。また他大学では、拓殖大学工学部、山梨大学工学部でも授業支援に使用しており教育効果を上げている。

今後は、(1): 作図機能、寸法線表示、曲線表示機能を充実させた簡易3次元CADの開発、(2): STEP,IGES等のファイル入出力機能の強化、(3): GUI環境を整備した小中学生でも直感的に使用できるソリッドモデラーの開発、(4): 数式表示機能・数式処理機能の取り込み^[5]、(5): 音楽機能の取り込み、(6): 外部入出力装置と入出力機能の開発、(7): 3次元立体表示装置との連携などを進める予定であり、将来的には教育分野だけでなく、設計や計測、エンターテインメントなど、より多くの分野で利用できるソフトウェアに発展させていきたい。なお、開発されたソフトウェアは機能限定版ではあるが、<http://www.cyber-solid.com/>または<http://www.n-plus.co.jp/>からダウンロードすることができる。多くの教育機関で是非教育に利用していただきたい。

参考文献:

- [1] 山口富士夫: コンピュータディスプレイのよる図形処理工学, 日刊工業新聞社, pp.6-45 (1981)
- [2] 千代倉弘明: ソリッドモデリング, 工業調査会, pp.12-22 (1985)
- [3] 鳥谷浩志・千代倉弘明: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版, pp.16-142 (1991)
- [4] 新津 靖: 図学およびコンピュータグラフィックス教育のための3次元立体生成ソフトウェアの開発, 私立大学情報教育協会論文集, Vol.2, No.1, pp.7-12 (1999)
- [5] Yasushi Niitsu: "Solid Modeling with Polygon Data of Mathematica", Proc. of 4th Int. Mathematica Symp., pp.369-374 (2001).