

教材としてのコンピュータグラフィックス

釈氏孝浩・松原康夫

Computer Graphics as Teaching Materials

Takahiro Shakushi, Yasuo Matsubara

The development of technology has allowed the computer to express more than numerical information. In the near future, the computer is going to play an important role as an expressive tool for users to present information. The capability resulting from the combination of this expressive ability and the interaction of computer and user is called multi-media or media integration. The computer is now changing its role from just a tool for reduction of labor to a medium for human communication.

In this paper, first, the general situation of computer graphics (CG) and their possibility in education are described. From the educational viewpoint, it is necessary to pursue the ways to cultivate students who are able to participate in our highly visual-oriented society.

As a specific example, the course of CG at Bunkyo University is discussed. In this discussion, an educational CG system is introduced. It is implemented using computer network technology. This system gives the students an opportunity to get experience of making CG with simple operations. As an evaluation of CG course, the results of a student opinion survey are analyzed by way of SS (Semantic Structure) analysis. The SS analysis provides ideas for considering various factors behind the responses of the students by revealing the hierarchical structure of the questions.

Finally, the efficient use of CG technology in education is discussed. In this discussion, the use of CG in general education is not restricted in computer scientific subjects. After considering some technological restrictions which come from existing computer capability, in order to pursue the ideal use of CG in education, the authors forecast the future of CG technology, especially CG animation.

1. はじめに

コンピュータの能力の進歩に伴い、その応用分野は、最初の数値計算から文字情報を含む記号

処理へと発展し、最近では音声や画像へと広がりつつある。特に最近ではコンピュータは単に計算能力を提供するものではなく、各種の媒体を提供する環境としての役割を果たしつつある。その中でも、とくにコンピュータの容量と処理能力を必要とするのが画像の処理であるが、これにも二つの分野がある。一つは外部からの計測データなどをコンピュータで処理する、いわゆる画像情報処理であり、もう一つはコンピュータの内部にモデルを構築し、それにしたがって画像をつくり出すコンピュータ・グラフィックス（以下 CG）である。

CG はいままで視覚化し得なかったものを目で見えるようにする事が出来る。そのため従来数値や記号でのみ計算結果を表示していたものを、人間が直観的にその内容を把握することが出来るように視覚化することにも用いられつつある。しかし現在ではむしろ、現実には存在しない世界を構築して視覚化する為に用いられる事が多い。単に情報を伝えるよりは直感や感性に訴えるアートとしての一面を持つ。最近 TV の番組のロゴなどに CG が使われるのはこうした面を利用している。

今後ダウンサイジングが進展するのに伴って、さらに CG が普及するものと考えられる。それはこれまでの概念の CG に留まらず、ヴァーチャル・リアリティや、広い意味での計算機と人間の間のマン・マシン・インターフェースを含むものとなるであろう。

大学教育の中で、CG を考えるとき、いくつかの視点を考える事が出来る。

一つは CG をつくり出す側の視点であり、如何にしてコンピュータ内部にモデルを構築し、如何にしてモデルから画像を計算するかを問題とする。そのためにはデータ構造やアルゴリズムなど、コンピュータサイエンスの知識が要求される。

もう一つは CG を利用する側の視点であり、計算機以外の科目においても、提示内容を如何に視覚的に分かりやすく示すかが問題となる。もちろんコンピュータの科目に於いても、同様の利用法が考えられる。例えばプログラミングの教育に於いて、ポインタを使ったプログラミングは理解させるのが困難な物であるが、これは動画を使って理解の助けとする可能性がある。

本研究では、以上のようないくつかの視点から、CG を教育上に利用する為の研究を行なった。CG にも、品質の上でいくつかの段階がある。最も簡単なレベルではパソコンで描画出来る程度の物である。これは現在では直線または楕円を基本とした線と同じ色による塗りつぶしを含む。このような図形は計算時間が短く、手軽に使えするという利点はあるものの残念ながらこれではリアリティがないため、訴える力に欠ける。そこで本研究ではおもに、光線追跡法と言われる方法でレンダリングした画像を使った。

光線追跡法（ray tracing）は非常にリアリティに富む画像をつくり出すことができる反面、CPU パワーを必要とし、計算時間が長くなる。そのためパソコンだけで学生に光線追跡法を実行させることは現実的ではない。情報学部では、ワークステーションとパソコンをつないだ LAN が構築してあり、これを有効に使うことによって学生に光線追跡法の実習を行なわせることができた。

本稿では、まず 3 次元 CG 画像作成のアルゴリズムの実状に関して概観し、続いて集団教育における CG 活用へ向けての予備実験について述べる。さらに、そこでの結果を踏まえ、1992 年度文教大学情報学部において実践された CG 教育の実践例に関して報告する。最後に、更に未来的な展望として、CG 動画像の現状とその教育への活用に伴う可能性と問題点に関して議論する。

2. 3次元図形の表示法

教材としてCGを考えるとき、二つの方向があり得る。一つは画像そのものを表示するための手法[1]を学び、それをプログラミングするものである。もう一つは、出来合いのソフトないしはハードを使って、表示する画像を別の目的に応用するものである。またこの両者を兼ねるものもあるであろう。

また広い意味では2次元画像もCGに入るが、表示のリアリティを考えて、ここでは3次元画像を主な対象としてかんがえる。

2. 1 表示の手法

3次元画像を、あたかも目で見るときのように2次元画面に表示するレンダリングにはいろいろな手法がある。ここではそのいくつかについて得失を論じる。

(1) もっとも簡単な手法が線画である。物体の輪郭を線で表現し、透視投影を行なう。全ての物体が輪郭だけで透明に表示されるため、物体の数が少ないときはよいが、多いと重なりが一つ一つの物体が識別しにくくなる。

(2) 上の手法に隠線消去を施す方法。単なる線画では物体の前後関係が判別出来ず、立体感が損なわれる。そこで手前の物体によって隠される物体の輪郭線を表示しないようにする。

パソコン等で手軽に行なわれる手法としては一つ一つの稜線について、他の多面体によってさえぎられる部分を計算する方法がある。しかし物体の数がある程度大きいと計算時間は膨大なものとなる。

(3) 隠面処理を行なう方法。物体を線ではなく面で表わす。そのため手前にある物体によってさえぎられる面の部分を表示しないようにする必要がある。

隠面消去にはzバッファ法がよく使われる。これは各画素ごとに一番手前にある面上の点を保持するものである。つまり一つの面ごとにつぎのような処理を行なう。画素ごとに、すでに登録してある点よりも、いま登録しようとする点が手前にあるときにのみ、それまで登録してあった点を消去して新しい点を登録する。これをすべての表示面ごとに行なって、各画素ごとに一番手前にある点を保持しそれを表示する。

実際には物体の連続性等を利用して計算量の軽減を図っている。

(4) レイトレーシング法(光線追跡法)

zバッファ法では隠面処理は完全に出来るが、光の反射や屈折等の現象を表現することは出来ない。このような点を克服してリアリティを追求したのが光線追跡法である。

光線追跡法では、人間の視点から逆に、画素ごとに視線を辿って行くものである。画素ごとに処理する点ではzバッファ法に似ている点もあるが、光線追跡法では一度物体に辿りついてそこで終わるとは限らない。その表面が反射または透過、屈折などの性質を持つ場合には、今までの視線に光線が来る可能性は複数となる。そのためそれらの複数の光線の軌跡をさらに逆に辿って行くのである。さらにその先にも分岐の可能性があるので、一つの画素についてもその計算量は莫大なものとなる。追跡も適当なところで打ち切らないと発散してしまう。

しかしハードウェアが急速に安価になっていくことから、計算量を多く必要とする点はいずれ解決されるものと考えられる。そしてアルゴリズムの単純性と各画素ごとに独立な計算をするのでハードウェアで並列処理を行なうのにも適している。

光線追跡法で一番処理に時間がかかるのは各光線が最初にどの物体に（面に）ぶつかるかを判定する処理である。これを軽減するために大きく分けて二つの方法が使われる。一つはバウンディングボリュームを用いるものである。これはいろいろな形をもつ物体を直方体などの扱い易い形で囲むものである。光線は最初にこのバウンディングボリュームとの交差を判定され、交差するときのみさらにその内部の物体との交差を判定する。ただしバウンディングボリュームは通常予め人間が与える。

もう一つは、空間を一定の形に階層的に分割して行く方法である。空間を十分小さく分割すれば一つ一つのボクセルに含まれる物体（の部分）が少なくなり、交差の判定がしやすくなる。これにも同じ大きさに分割する方法と異なる大きさに分割する方法があるが、全体を自動化出来るところに特徴がある。

以上のような考え方はデータ構造やアルゴリズムの、格好の実験材料であり、いろいろと工夫の余地があるためこれらをプログラミングすること自体よい教材となる。

2. 2 物体のモデル化

前節において、物体を2次元画面上に表示する手法について述べたが、実際にはこのまゝに、表示したい物体を如何にしてコンピュータの中に表現保持するかというモデリングの問題がある。これには大きく分けて3つの方法がある。

(1) ワイヤフレームモデル

これは、物体を点の集合と、それらを結ぶ線で表現するものである。これは面のデータを持たないので、隠線消去や隠面消去は不可能である。

(2) サーフェイスモデル

さらに面の情報をもつもので、隠線消去や隠面消去が可能となる。曲面等は微小な平面の集まりで近似する。表現上はこれで十分であるが、容積のデータがないので、例えば二つの物体の重なりや、ある物体から別の物体の部分を取り除いた部分によって物体を表わすことができない。

(3) ソリッドモデル

点、線、面及び体積のデータが保持されている。そのため二つ以上の物体の和、差、積等を定義できる。

また、表示物体を計算機の中にデータ構造として用意する場合、全てを数値データで与えることは煩雑である。そこで何種類かのプリミティブを用意して置き、簡単なものは一つのプリミティブのパラメータを指定することで表現し、複雑なものはいくつかのプリミティブを論理演算子で組み合わせて表現する（CSG: Constructive Solid Geometry）。

以上のように、物体を計算機内に表現する時点ですでにデータ構造の問題や、それをどう処理するかといった問題が多く存在する。そのためこれ自体がよいデータ構造の教材となるのである。

また、実際に表示画像を別の目的に使うためには、プリミティブを組み合わせる方法だけでは限界があり、画面上でインタラクティブに行なうシステムが使われることが多い。

3. 予備実験

我々の目的には、3次元グラフィックス画像をいろいろな教育上の目的に応用することにあった。そのためには全てのシステムを自ら構築することは現実的ではない。そこでわれわれはパソコンをベースとした3次元画像表示システムを使ってアニメーションを作成する実験を行なうこ

とした。以下そのためのシステムについて述べる。

3. 1 3次元画像表示システム

前章で述べたように、3次元画像表示法にもいろいろな手法があるが、われわれは画像の品質を考えて光線追跡法を採用した。当初予備実験に用いた機器は以下のとおりである。

フレームバッファ	image maker	IM 9800
レンダリング用コンピュータ	日本電気製	PC 9801 RA

このフレームバッファは、 1024×512 画素あり、1画素当たりRGB各8ビット、したがって同時に $2^{24} \approx 1600$ 万色を表示でき、またNTSC信号を出力するため家庭用のテレビ画面に表示することができる。

当初PC 9801を用いてレンダリングを行なうのに、RAY-TREK IIというソフトウェア[2]を用いた。その後、レンダリング処理時間の短縮のためにトランスピュータを用いた専用のアクセラレータを導入し、基本的に同じ機能を持つSUPER TREKというレンダリングソフトウェアを用いた。

以下このレンダリング用のソフトウェアの使い方について述べる。このソフトを使うためには、始めに表示物体空間を表現するコマンドファイルを作成しておく必要がある。これは数種類のプリミティブを組み合わせて物体を表現するものである。

そしてこれを以下のようにtraceプログラムにかけてやると表示データを出力してくれるものである。

```
A > trace test. dat test. pic
```

このtest. picファイルをフレームバッファに転送するために

```
A > disp test. pic
```

を行なう。

traceプログラムは最初にコマンドファイルを読み込み、これを解釈して、表示すべき物体の空間を構成し、それから光線追跡法で1画素づつ計算を行なう。コマンドファイル上に書くコマンドは、グローバルコマンド、テクスチャコマンド、物体の定義、位置付けコマンドの4種類に分けられる。

グローバルコマンドは、視界の大きさを決めたり光源の位置や強さなどの全体の環境を設定するものである。

テクスチャコマンドは曲面上の点の色や輝度を設定するものである。

物体の定義は以下のような8種類のプリミティブにパラメータを指定し、それらを組み合わせて行なう。

- (1) 球体 パラメータは半径を指定する。
- (2) 楕円 x, y, z の各軸方向の半径をパラメータとする。
- (3) 一葉双曲面体

双曲線を回転して出来る面をもつ鼓の形、4つのパラメータを指定する。

- (4) 放物面体
放物線を回転して出来る面を持つ物体、3つのパラメータを指定する。
- (5) 円錐体

高さで二つの半径をパラメータとして指定。

- (6) 直方体 縦、横、高さをパラメータとする。
- (7) 円柱体 高さと二つの方向の半径を指定。
- (8) 長方形 縦と横の長さを指定。

これらのプリミティブにパラメータの具体的な値を指定して、ある名前に代入することで物体を定義する。またより複雑な物体はすでに定義された物体の名前を以下のような論理演算子で組み合わせることで定義する。

- (1) 論理和 二つの物体のいずれかに属する点を物体の点とする。
- (2) 差 ある物体から別の物体に重なる部分を取り除く。
- (3) 論理積 二つの物体の重なった部分を物体とする。

この他にこのシステムではグループ化というコマンドも用意している。

最後に位置付けコマンドについて述べる。以上のプリミティブは基本的に原点のところに存在する。これに並行移動 (move)、回転 (rotate)、拡大縮小 (scale) を施してやる。これはプリミティブだけでなくすでに定義されている物体にも適用でき、またこれを適用した物体をさらに論理演算子で組み合わせることが出来る。

3. 2 フレーム撮影の実験

前節で述べたような設備を用いて動画を作成することを試みた。ゼミの学生の卒論のテーマとして、「文教大学」というロゴマークを立体的に構成し、これが回転するような動画を作ることにした。最初にロゴマークは、前節のプリミティブの中で主に直方体を組み合わせることで構成した。動画は視点の位置を数度ずつ変更することでフレーム毎の動きとした。

問題は一つ一つ作成した画面を如何にして連続した動画に構成するかである。商用の動画では一度フィルムに撮ってからビデオテープに変換したり、または1フレームずつ録画可能なVTRを用いる。いずれにしても大変高価であり、この段階では入手できない。そこで、精度は落ちるが家庭用8ミリビデオカメラ (SONY CCD V 88) を用いた。この機械では、ポーズ状態においてRECボタン押すと約3フレームずつ録画をすることができる。

テレビ画面に表示されたものを、さらにビデオカメラの光学系を通して録画するのと、フレーム・バッファからのNTSC信号を直接録画するのと両方を行なったが、必ずしも後者の画質が良いとは言えなかった。

以上のような方法でロゴマークが回転する動画を作成することができた。約30秒間の動画を作成するために学生が夏休みの間を費やすことになった。

3. 3 予備実験に関する結論

予備実験を通して言えることは、何よりも計算時間がかかることである。これはパソコンを使っていることから来る限界であるが、その後トランスペアレントを使ったシステムに増強してからも、CPUパワーは不足している。とくに光線追跡法は計算時間を要求する方法であるため、これらを多数つなげて動画を作成するためには莫大な計算量を必要とする。このことから、動画を作ることにそのものが目的ではなく動画を他の目的に応用するためには少し画質が落ちてでも光線追跡法以外の方法を使うべきかも知れない。とくに、ユーザの入力または動作に、リアルタイムで応答することが要求される応用 (バーチャルリアリティ) については、現在のパソコンにおいて高画質の画像を表示することは絶望的であろう。

4. CG 教育の必要性

従来、コンピュータの基本的な能力は、

- (1) 高速処理能力
- (2) 大容量記憶能力

とされてきた。これらに加え、現在では、

- (3) 通信能力
- (4) 表現能力
- (5) 対話能力

が注目されている [3]。もちろん、(3)、(4)、(5)の能力は、(1)、(2)の進歩によって実現されたもので、新たに付加されたものではない。このうち、(3)は、ビジネス局面を中心に活用環境の整備が進行中である。(4)は、CG、DTP、DTP_r、また(5)とともにマルチメディアとかメディア・インタグレーションなどといった用語で耳目を集めている。しかし、(4)、(5)の具体的活用事例としては、製品等のデモンストレーションや、テレビ番組のタイトル、ジングル、また、映画作品での特殊効果等、限定された局面での活用のみである。これは、個人ユーザにおける(4)、(5)の実現のために要求されるコンピュータの基本能力(1)、(2)が、現状では未だ不十分であること、また、活用の際のノウハウの蓄積が少ないこと等に起因している。しかし、コンピュータを取り巻く各種技術の進歩の速度を考えると、コンピュータが、個人レベルでの情報表現に質的变化の可能性をもたらす日は近いと言えよう。その時、従来のモノクロ／モノカラーのテキストや線画を中心とした情報表現に、フルカラー画像、動画像、音声等を加える、より豊かな表現ツールとしてのコンピュータの果たす役割は大きい。また、技術進歩によってもたらされる可能性を、単なる可能性のままにとどめず、そのような変革に即応できる意識を持った人材の育成は重要である。[3]。

以下の章では、このような技術動向の背景を踏まえ、1992年度、文教大学情報学部において実践された CG 教育の実践事例報告を行う。

5. 教科「CG」について

1992年度、「CG」は、以下のように開講された。

開設学科：情報システム学科（選択科目）

開設学年：第2学年

開設学期：前期（2単位）

時 間 数：週1時限（90分）

担当教員：釈氏孝浩

受講者数：119名

経営情報学科	2 年生	1 名	3 年生	2 名
情報システム学科	2 年生	77 名	3 年生	39 名

なお、当科目は、前年度開講しておらず、1990年度のカリキュラム改訂以降の入学者中の2年生以上、すなわち1992年度の2、3年生が履修可能である。

6. 教材アルゴリズムの選択

CG 画像の作成には、各種のアルゴリズムが存在するが、今回はレイ・トレーシング・アルゴリズム（光線追跡法）を教材として採択した。以下 6. 1 で、今回の CG 教育における指導上の留意点を述べ、そこでの要請と対応づけながら、6. 2 で、教材としてのレイトレーシングに関して議論する。

6. 1 指導上の留意点

今回実践した教科「CG」では、特に以下の点に留意した。

- ① 数学的内容やプログラミング技法の詳細に立ち入りすぎない
- ② 表現メディアとしてのコンピュータの可能性に気づかせる
- ③ 実習を通して、CG 作成に伴う処理コストを実感させる

①は、対象とする学習者の属する情報学部性格、卒業後の進路の傾向等を考慮したもので、CG 技術の詳細に関する工学的なアプローチよりも、その全体像の把握、可能性の認識に重点を置いた。

②は、CG ならではの画像表現の可能性を認識させることを企図する。例えば、鏡のある風景を、写真以外の方法で描くのは難しいが、[作品 1] のように、CG を用いれば比較的容易に作成できる。[作品 1] は、中学校数学の単元「空間図形」の教材であり、立体の多角的な観察のために、立体の背後に鏡面を配置している。また、立体内部の観察を容易にするために、立方体に内接する 2 球は有色透明で異なる色彩（赤と青）を持ち、かつ光の屈折の無い材質としている。このような模型を現実には作成することは事実上不可能である。また、[作品 2] は、その内面が鏡面反射をする球体の内部に、3 個の異なる色（赤・青・緑）を持つ光源を、透明な 3 球体に包んで正三角形の 3 頂点上に配置した状況を、3 光源の中央に当たる座標に視点を置き、3 光源によって張られる平面の法線方向に視線を設定して観察している画像である。このような状況を現実には体験することは困難であり、また、想像することも、特殊な訓練を受けた者でなければ難しい。このように、現実には存在しなかったり、体験の難しい世界が、CG を用いて映像化できることを実感させるのが②のねらいである。

③は、学習者の CG に対する認識と、現実の CG 作成との間に存在するギャップに配慮したものである。学習者の多くは、テレビ番組等で、高品質な CG 動画像を見慣れており、ともすると、CG 作成に伴う膨大な計算量や、画像の持つ多大な情報量を認識していない。事前の聞き取り調査によると、ほとんどの学習者は、商用の CG 動画像の多くが、静止画像のフレーム撮影によってダイナメート（動画像化）されていることを知らない。③は、このような現実を踏まえ、アルゴリズムの解説とともに、実際に CG 画像の作成を経験させることにより、その処理の大きさを実感させることをねらいとする。

6. 2 レイトレーシング・アルゴリズム

レイトレーシング・アルゴリズムは、以下の点を特徴とする。

- (a) アルゴリズムが比較的単純である

- (b) 現実感の高い画像が得られる
- (c) 計算量が膨大である
- (d) 原則的に画像面積に比例して計算量が増大する。
- (e) 並列処理に好適である

(a)は、6. 1の①に直接的に関連する。処理の高速化、結果の高品質化を指向する各種の技法に立ち入らなければ、前提となる背景知識は数学及びプログラミングの初歩的理解で十分である。数学に関しては、高等学校の2年生程度の内容（ベクトル及び三角関数の初歩）しか必要としない。また、プログラミングに関しては、実際のインプリメントに際し再帰的プログラミングやデータ構造の概念が必要となるものの、アルゴリズムの概要把握には不要である。

(a)は、(c)、(d)とともに、6. 1③への対応においても重要である。実習における処理待ち時間の長さは、③に対する体験的な学習効果を期待できるが、処理の遅い理由を、理論的に納得した上で体験が無ければ単なる苦痛でしかない。アルゴリズムの単純さは、この点での学習者の納得を容易にする。実際、処理時間の長さに期待される学習効果も程度問題で、画像計算に実習時間の全てを費やしてしまったのでは実習が成立しない。このことに関しては後述する。

(b)は、6. 1②にとって重要である。6. 1で指摘した仮想現実的画像の作成に好適性を備えているのも、このアルゴリズムの特徴である。具体的には、画像内に配置する各種物体の光学的特性（透明度・屈折率・反射係数等）を自在に操作することができる。事実、この特徴を活用して幻想的な画像を作成する学習者も見受けられた [作品3]。

(e)の特徴は、今回の実践では活用することができなかったが、処理速度の向上を指向してのコンピュータ・ネットワーク上での分散処理は、すでに一部の市販ソフトウェアで実現されている。また、複数CPUを搭載した専用ハードウェアや、対応ソフトウェアも存在する。しかし、特に初心者教育において、6. 1③のような見地からは、高速な処理系が教育的とは必ずしも言い難い面もある。そのような処理系を用いる場合、複数CPUでの分散処理の状況を、各々のCPUの性能に関する情報と共に、学習者に明示的に与えるような工夫が必要であろう。

以上の観点から、レイトレーシング・アルゴリズムは今回のニーズを十分満たしているものと判断し、教材アルゴリズムとして選択した。

7. 実習システム

本章では、実習用CG作成システムの開発に関して述べる。まず、使用した機器環境と、その概要、続いて、システムの設計方針と、その動作について詳説する。

7. 1 機器環境

本システムの構築において使用した機器は以下の通りである。

① NEC PC 9801	120台
② NEC EWS 4800/230	1台
③ NEC EWS 4800/220	4台
④ NEC EWS 4800/210	3台
⑤ SPARC Station 2	1台
⑥ Apple Macintosh Quadra 900	1台

⑦ キヤノン カラーレーザーコピー 300 1台

これらの機器は、Ethernet を物理層とした TCP/IP ネットワークによって結合されており [図 1], ②, ⑤は, それぞれ, NIS サーバおよび, データ・サーバとして, ネットワーク管理機能を司る。学習者の人数から, ①をフロントエンド及び画像表示系とし, ③の 1 台を NFS サーバに設定した。実習に用いるフロントエンド用ソフトウェア群は, ①から NFS サーバへのアク

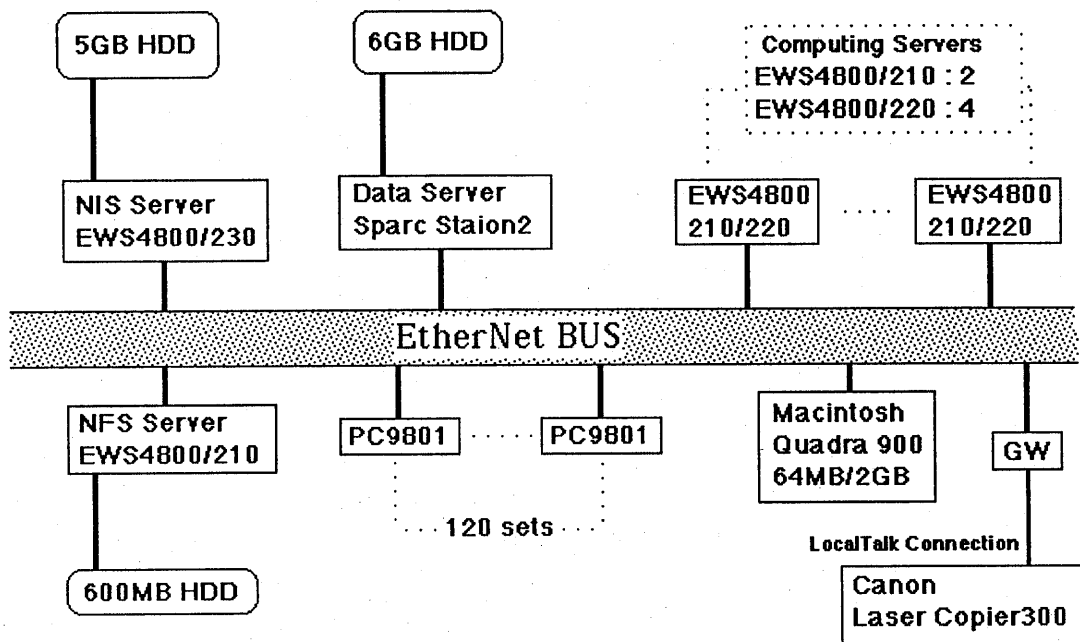


図 1 機器環境

セスによって提供される。また, 完成画像データの教師への提出も, NFSサーバを経由して行なうよう指導する。⑥, ⑦は, 画像の印刷用システムである。⑦は, カラーポストスクリプト・プロセッサを内蔵したインターフェース・ユニットとプリンタ専用ゲートウェイにより, ⑥に AppleTalk (EtherTalk) プロトコルで結合する。①から⑥へのデータ転送は NFS サーバを利用する。

①を画像表示系として用いる場合, 表示可能色数が少ない点が問題となる。完成画像データは, 1 ピクセル当り 3 バイトの情報量を持ち, 理想的には約 1600 万色/ピクセルの発色能力が必要となる。これは, ①にしかるべき容量のフレーム・バッファを搭載することにより可能となるが, この台数の全ての機器にフレーム・バッファを実装するのは現実的ではない。また, 学習者が個人的に所有するコンピュータ上で画像表示が可能な方が望ましい。そこで, 今回は, 先行事例 [4] に倣い, オーダード・ディザリングによって①を擬似的に多色化した表示系を採用した。

6. 2 で触れたように, ①をスタンドアロンで用いた場合, その膨大な計算時間は, 実習において大いに問題となる。例えば, [作品 4] (解像度 399×399) のような一般的な画像で, その計算処理には約 200 分が必要となる。試行錯誤の多発する CG 画像作成において, このような処理

速度は、処理コストの大きさを実感させる以前に、作業に対する嫌悪感や忌避を招いてしまう。そこで、今回は、③、④の計7台のUNIXワークステーションを計算サーバとして用いることを試みた。この結果、極端な混雑時や、解像度の非常に高い画像、また、光線の反射・透過等を用いた画像の作成の場合を除けば、許容可能な処理速度（[作品4]の計算で約45分）が得られた。試行錯誤の段階では解像度を落とし、最終計算で、必要な解像度を指定するよう指導している。

7. 2 設計上の留意点

本システムの設計に当たり、下記の点に留意した。

- ① UNIXオペレーションに関する知識が不要なこと
- ② 計算サーバを用いていることを認識させること

対象とする学習者は、MS-DOSオペレーションならば、ある程度の理解を前提とすることができる。しかし、UNIXオペレーションに対する事前教育は受けていない。①はこの点に配慮したもので、PC 9801をUNIX端末として使用させることは行なわない。

①により、学習者は、MS-DOSの基本操作だけで本システムを使用することが出来る。しかしながら、6. 1で述べたように、本科目では、CG作成に伴う処理量の大きさを体感させることもねらいとしている。操作上、UNIXワークステーションの存在を隠すことは望ましいが、実際に処理を行なっているのが、より高速なマシンであることを気づかせないのは好ましくない。そこで、本システムでは、計算サーバのボーリング状況、割り当て、計算経過等を教育的に配慮した表現でメッセージ出力する（図2）明らかにこのメッセージ群は、一般利用者にとって価値のある情報ではないが、学習者へのフィードバック情報としては必要である。

```
ワークステーションの出席をとります。返事が聞こえないので静かにして下さい。
akakura : Yes, Sir !
iwatake : Yes, Sir !
niseko : Yes, Sir !
teine : zzz.....zzz.....
appi : Yes, Sir !
manza : Yes, Sir !
kuriko : zzz.....zzz.....
5台のワークステーションからお返事がありました。
あなたの計算は appi が担当します。
appi へファイルを転送しています。
appi が計算しています。応援してあげましょう。
```

図2. 実行画面例

7. 3 システムの動作

本システムでは、学習者1名に対し、フロントエンドとなるPC 9801の他に、NFSサーバ、計算サーバの3台のコンピュータが関与する。各マシン間のデータの流れを図3に示す。本システムの処理の流れは以下の通りである。以下、①～⑩に沿って、システムの動作について詳説する。

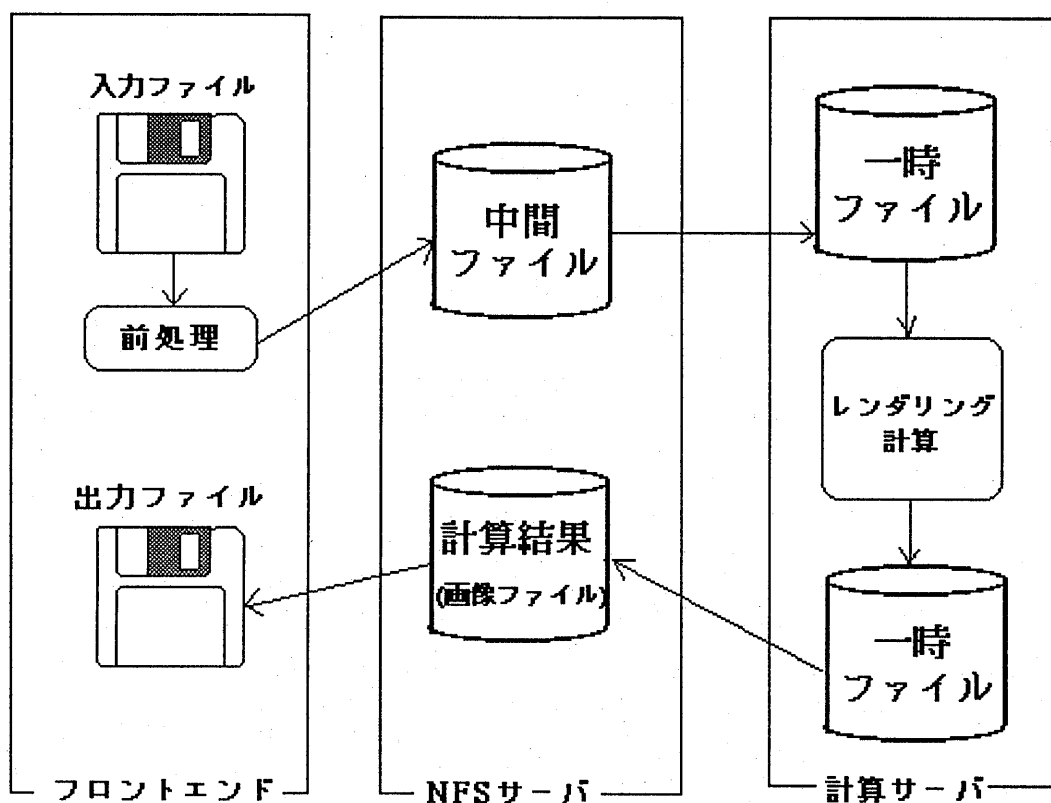


図3 マシン間のデータの流れ

- ① 学籍番号の入力
- ② 入力ファイル, 出力ファイルの指定
- ③ 前処理/処理結果の転送 (フロントエンド→NFSサーバ)
- ④ 計算サーバの決定
- ⑤ 中間ファイルの転送 (NFSサーバ→計算サーバ)
- ⑥ レンダリング計算
- ⑦ 画像ファイル (計算結果) の転送 (計算サーバ→NFSサーバ)
- ⑧ 計算サーバ上の一時ファイルの削除
- ⑨ 画像ファイルの転送 (NFSサーバ→フロントエンド)
- ⑩ NFSサーバ上のファイルの削除

これらのうち, 学習者の関与する処理は, ①, ②のみであり, 後はすべて自動的に実行される。

①で入力される学籍番号は, ③以降で作成される各種ファイル群の名前として用いられる。これは, レンダリング計算が計算サーバ上マルチタスクで行われるために, 排他処理の必要が生じるため, ここでは学籍番号としたが, 学習者に関して一意性の保証された文字列であればよい。

②は、学習者がMS-DOS上のテキストエディタで作成したコマンドファイルを入力ファイルとして指定し、計算結果を格納する画像ファイル名を出力ファイルとして指定する。これらのファイルはMS-DOS上のファイルである。画像ファイルは規模が大きいため、共用ボリューム上に作成するには不適當であるので、実習時には、学習者の個人用フロッピーディスク上にこれらのファイルを指定するよう指導した。

③では、コマンドファイルを解析し中間ファイルを作成する。中間ファイルはNFSサーバ上に作成され、⑤以降の処理でUNIXファイルとして扱われる。ここで、何らかの原因によって解析に失敗した場合は、その箇所を学習者に指摘して終了する。

③で、コマンドファイルの解析に成功した場合、④で、計算サーバ（7台）に対して問い合わせを行い、現在動作可能なサーバの中から計算サーバを決定する。

⑤は、④で決定された計算サーバにNFSサーバ上のファイルを転送する。これは、PC 9801上のフロントエンド用ソフトウェアが、計算サーバ上のUNIXコマンドを起動する事によって行われる。

⑥が処理の大半を占める部分で、フロントエンドによって起動された計算サーバ上のレンダリング・ソフトウェアが画像計算を行う。この間、フロントエンドでは、計算の進捗状況を示す、計算サーバからの出力メッセージを表示する。

計算結果の画像ファイルは、計算サーバ上の一時ファイルとして作成される。最終的な出力ファイルをMS-DOSファイルとして扱うために、計算結果は、⑦でNFSサーバ上に転送される。転送方法は⑤と同様である。

⑧～⑩は、後処理で、NFSサーバからの画像ファイルのダウンロード（⑨）と、各種不要ファイルの削除（⑧、⑩）を行う。

ここで用いられる各種ファイル群の名前は、MS-DOSファイル、UNIXファイルともに、①で入力される学習者の識別文字列と、フロントエンド用ソフトウェアの発生する擬似的なプロセス識別子によって管理され、ネットワーク上でのファイル名の一意性を保っている。これらにより、同一学習者が複数のフロントエンドから計算サーバを利用した場合に発生するファイル名の重複を回避している。

8. 評価

本授業の終了時（前期末定期試験時）に、学習者に対し評定尺度法によるアンケート調査を実施した。試験時に実施したため、回収率は100%で、回答者数は94名であった。このアンケート結果を集計し、意味構造分析（SS分析 Semantic Structure Analysis）[5][6]によって結果の解析を試みた。以下で、SS分析の概要と、解析結果について述べる。

8. 1 アンケート項目と平均評定値

学習者に配布したアンケート票を図4に示す。学習者は図4の各質問項目に対して5段階の定評定を行う。全ての質問項目は、肯定的な評価ほど好ましいように質問内容を設定してある。各質問項目の評定に対して「そう思う」に評定値5点を与え、以下「そうは思わない」まで4点～1点の評定値を与えて数値化した（評定尺度法）。単純に各項目の平均評定値を求めたものが表1(a)である。表1(a)を見る限りにおいて、極端に高い（低い）平均評定値を示す質問項目は無い。項目18「新しいものが好きだ」が最高で4.293、項目12「試験結果には自信がある」が最低

で2.130となっている。表1(a)の各項目を平均評定値の降順に並べ替えたものが表1(b)である。

これから、全体としては中間的な評価をしているものの、学習者の授業に対する意識・態度は比較的高く、その一方で、授業内容の理解という点ではやや自信が持てない様子がうかがえる。

コンピュータ・グラフィックスの授業に関するアンケート

各質問に対して、適当な目盛りをマークして下さい。目盛りの間をマークしないこと。

	そう 思う				そうは 思わない
1 授業はわかりやすかった					
2 きちんと出席した					
3 きちんとノートをとった					
4 講義内容は面白かった					
5 実習は面白かった(出席者のみ)					
6 教師は十分準備している					
7 半期よりも通年授業の方がよい					
8 受講者数は適当である					
9 実習用コンピュータの処理速度は十分だ					
10 実習に用いたシステムは使いやすい					
11 不合格だったら来年また受講したい					
12 試験結果には自信がある					
13 数学は得意な科目だ					
14 数学は好きな科目だ					
15 数学では計算より証明の方が好きだ					
16 プログラミングは得意だ					
17 プログラミングすることが好きだ					
18 新しいものが好きだ					
19 講義/実習内容は将来役に立つ					
20 写真を撮るのが好きだ					
21 絵を描くのが好きだ					
22 図画より工作(造形)が好きだ					

試験終了時、答案と共に提出すること。

授業に対する意見等あれば、裏面に記入して下さい。

図4. アンケート票

表1 (a)平均評定値（項目順）

項目1：授業はわかりやすかった	2.859
項目2：きちんと出席した	3.554
項目3：きちんとノートをとった	3.380
項目4：講義内容は面白かった	2.989
項目5：実習は面白かった（出席者のみ）	3.804
項目6：教師は十分準備している	3.728
項目7：半期よりも通年授業の方がよい	3.870
項目8：受講者数は適当である	2.652
項目9：実習用コンピュータの処理速度は十分だ	2.478
項目10：実習に用いたシステムは使いやすい	2.880
項目11：不合格だったら来年また受講したい	3.261
項目12：試験結果には自信がある	2.130
項目13：数学は得意な課目だ	3.000
項目14：数学は好きな課目だ	3.652
項目15：数学では計算より証明の方が好きだ	2.348
項目16：プログラミングは得意だ	2.848
項目17：プログラミングすることが好きだ	3.359
項目18：新しいものが好きだ	4.293
項目19：講義／実習内容は将来役立つ	3.370
項目20：写真を撮るのが好きだ	2.913
項目21：絵を描くのが好きだ	3.185
項目22：図画より工作（造形）が好きだ	3.543

表1 (b)平均評定値（評定値順）

項目18：新しいものが好きだ	4.293
項目7：半期よりも通年授業の方がよい	3.870
項目5：実習は面白かった（出席者のみ）	3.804
項目6：教師は十分準備している	3.728
項目14：数学は好きな課目だ	3.652
項目2：きちんと出席した	3.554
項目22：図画より工作（造形）が好きだ	3.543
項目3：きちんとノートをとった	3.380
項目19：講義／実習内容は将来役立つ	3.370
項目17：プログラミングすることが好きだ	3.359
項目11：不合格だったら来年もまた受講したい	3.261
項目21：絵を描くのが好きだ	3.185
項目13：数学は得意な課目だ	3.000
項目4：講義内容は面白かった	2.989
項目20：写真を撮るのが好きだ	2.913
項目10：実習に用いたシステムは使いやすい	2.880
項目1：授業はわかりやすかった	2.859
項目16：プログラミングは得意だ	2.848
項目8：受講者数は適当である。	2.652
項目9：実習用コンピュータの処理速度は十分だ	2.478
項目15：数学では計算よりも証明の方が好きだ	2.348
項目12：試験結果には自信がある	2.130

8. 2 意味構造分析 (SS 分析)

意味構造 (Semantic Structure) 分析は、評定尺度データに対する分析法で、項目の評定値の大小関係に基づき項目間の順序関係を求め、全項目の階層構造グラフ (SS グラフ) を構築する [5]。本アンケート調査結果に基づいて作成した各項目間の順序係数表を表 2 に示す。

表 2 順序性係数表

	(12)	(15)	(9)	(8)	(16)	(1)	(10)	(20)	(4)	(13)	(21)	(11)	(17)	(19)	(3)	(22)	(2)	(14)	(6)	(5)	(7)	(18)
12	0.0	90.5	88.9	92.7	94.0	95.1	91.8	92.7	94.6	93.7	94.0	94.6	96.5	95.9	96.7	95.7	97.3	96.7	97.8	98.6	94.8	99.2
15	85.1	0.0	86.4	89.4	95.4	94.8	91.3	92.1	93.2	92.1	94.8	94.6	96.2	94.6	92.7	96.2	94.6	97.0	97.6	97.0	95.4	99.5
9	80.2	83.2	0.0	90.2	86.4	91.8	94.6	92.1	91.0	89.9	91.3	92.9	92.1	94.3	90.2	93.7	91.8	94.0	95.7	98.1	96.2	98.6
8	79.6	81.8	85.9	0.0	88.0	89.7	89.9	89.1	89.9	90.8	89.4	91.8	91.3	92.9	89.1	92.7	90.5	93.2	94.3	95.7	94.8	98.9
16	76.1	82.9	77.2	83.2	0.0	87.5	88.3	85.3	90.8	87.0	89.4	88.0	98.6	92.7	88.9	91.0	91.3	92.1	95.7	94.8	95.1	99.5
1	76.9	82.1	82.3	84.5	87.2	0.0	89.9	87.2	94.0	88.3	89.1	92.1	90.8	94.8	90.5	93.5	92.4	94.0	97.0	96.2	93.2	97.8
10	73.1	78.0	84.5	84.2	87.5	89.4	0.0	87.2	89.7	86.4	87.5	90.5	92.1	93.7	89.4	91.6	90.8	91.3	96.5	97.3	95.7	98.4
20	73.1	78.0	81.2	82.6	83.7	85.9	86.4	0.0	88.0	85.1	93.2	91.0	91.3	92.4	88.9	94.0	89.7	91.0	96.7	94.6	94.6	98.6
4	73.1	77.2	78.3	81.5	87.2	90.8	87.0	86.1	0.0	85.9	87.8	90.8	91.3	92.9	91.0	91.8	93.2	93.2	97.8	97.0	94.0	97.8
13	72.0	75.8	76.9	82.1	83.2	84.8	83.4	82.9	85.6	0.0	85.3	88.6	88.0	88.9	86.1	91.3	87.2	98.1	92.9	93.2	93.5	97.6
21	67.7	73.9	73.6	76.1	81.0	81.0	79.9	86.4	82.9	80.7	0.0	87.5	89.1	89.7	87.0	91.3	87.5	88.0	92.7	92.1	93.2	98.1
11	66.3	71.7	73.4	76.6	77.7	82.1	81.0	82.3	84.0	82.1	85.6	0.0	86.4	89.1	84.2	88.6	85.9	90.8	92.4	91.3	93.2	97.8
17	65.8	70.9	70.1	73.6	85.9	78.3	80.2	80.2	82.1	79.1	84.4	84.0	0.0	87.2	83.2	87.0	86.1	88.0	92.4	91.3	93.7	98.9
19	64.9	69.0	72.0	75.0	79.6	82.1	81.5	81.0	83.4	79.6	85.1	86.4	87.0	0.0	86.4	88.0	87.2	87.8	92.9	92.4	91.0	98.6
3	65.5	66.8	67.7	70.9	75.5	77.4	76.9	77.2	81.2	76.6	82.1	81.2	82.6	86.1	0.0	86.4	94.6	86.1	90.8	91.3	88.3	95.4
22	60.3	66.3	67.1	70.4	73.6	76.4	75.0	78.3	78.0	77.7	82.3	81.5	82.3	83.7	82.3	0.0	84.2	85.9	88.6	88.6	89.4	97.3
2	61.7	64.4	64.9	67.9	73.6	75.0	73.9	73.6	79.1	73.4	78.3	78.5	81.2	82.6	90.2	84.0	0.0	83.4	88.3	90.5	85.9	93.7
14	58.7	64.4	64.7	68.2	72.0	74.2	72.0	72.6	76.6	81.8	76.4	81.0	80.7	80.7	79.3	83.2	81.0	0.0	88.6	87.5	87.2	95.4
6	57.9	63.0	64.4	67.4	73.6	75.3	75.3	76.4	79.3	74.7	79.1	80.7	83.2	84.0	82.1	84.0	84.0	86.7	0.0	91.3	89.1	94.8
5	56.8	60.6	64.9	66.8	70.9	72.6	74.2	72.3	76.6	73.1	76.6	77.7	80.2	81.5	80.7	82.1	84.2	83.7	89.4	0.0	88.0	94.3
7	51.4	57.3	61.4	64.4	69.6	67.9	70.9	70.7	72.0	71.7	76.1	78.0	81.0	78.5	76.1	81.2	78.0	81.8	85.6	86.4	0.0	94.3
18	45.1	50.8	53.3	57.9	63.3	62.0	63.0	64.1	65.2	65.2	70.4	72.0	75.5	75.5	72.6	78.5	75.3	79.3	80.7	82.1	83.7	0.0

8. 3 SS グラフ

表 2 のデータをグラフ化したものが図 5 の SS グラフである。グラフ中の点線は、因子分析によって 3 因子に分解された質問項目のカテゴリーの境界を表す。グラフ中左から、

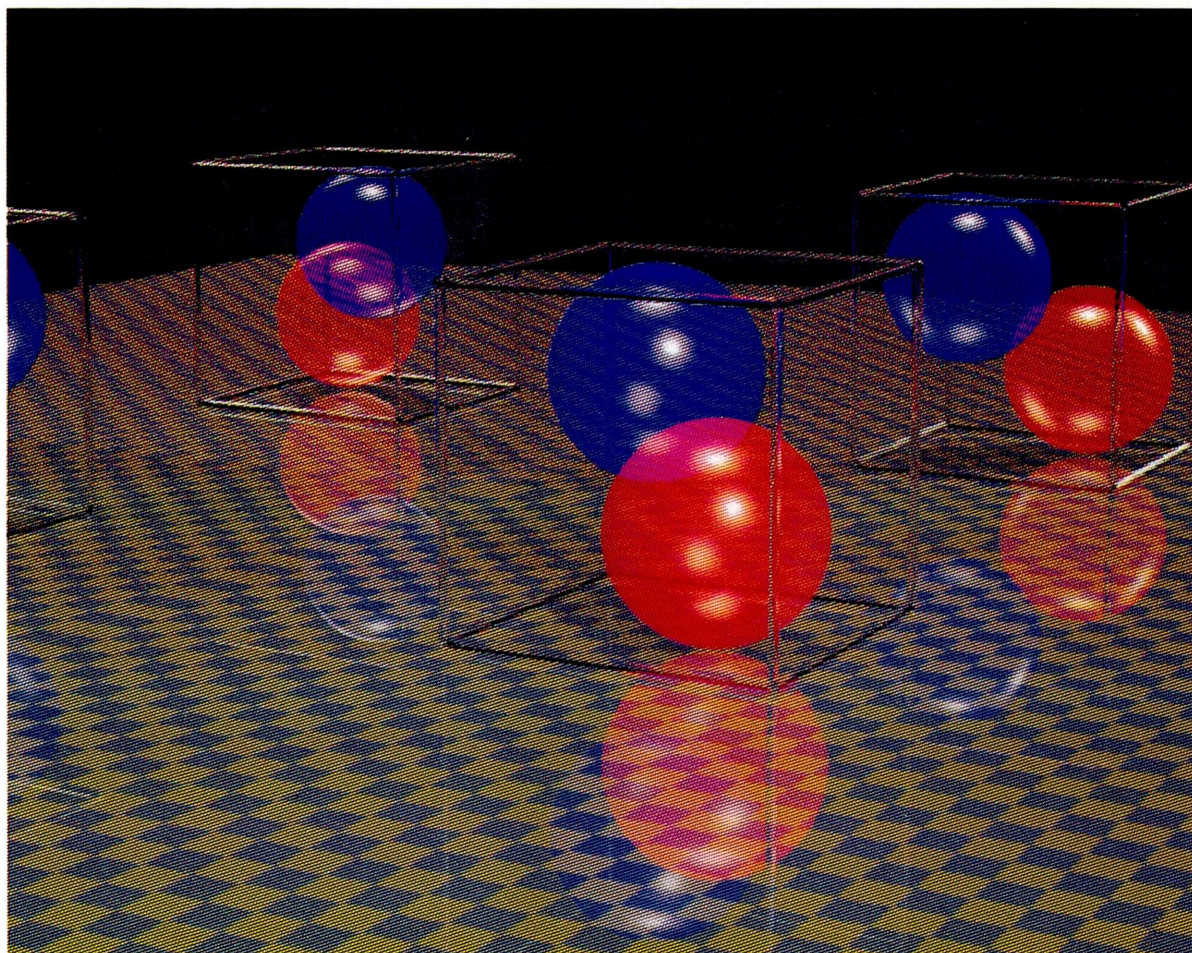
第 1 因子：学習者の授業に対する意識・態度に関する因子

第 2 因子：学習者の興味に関する因子

第 3 因子：学習者の能力に関する因子

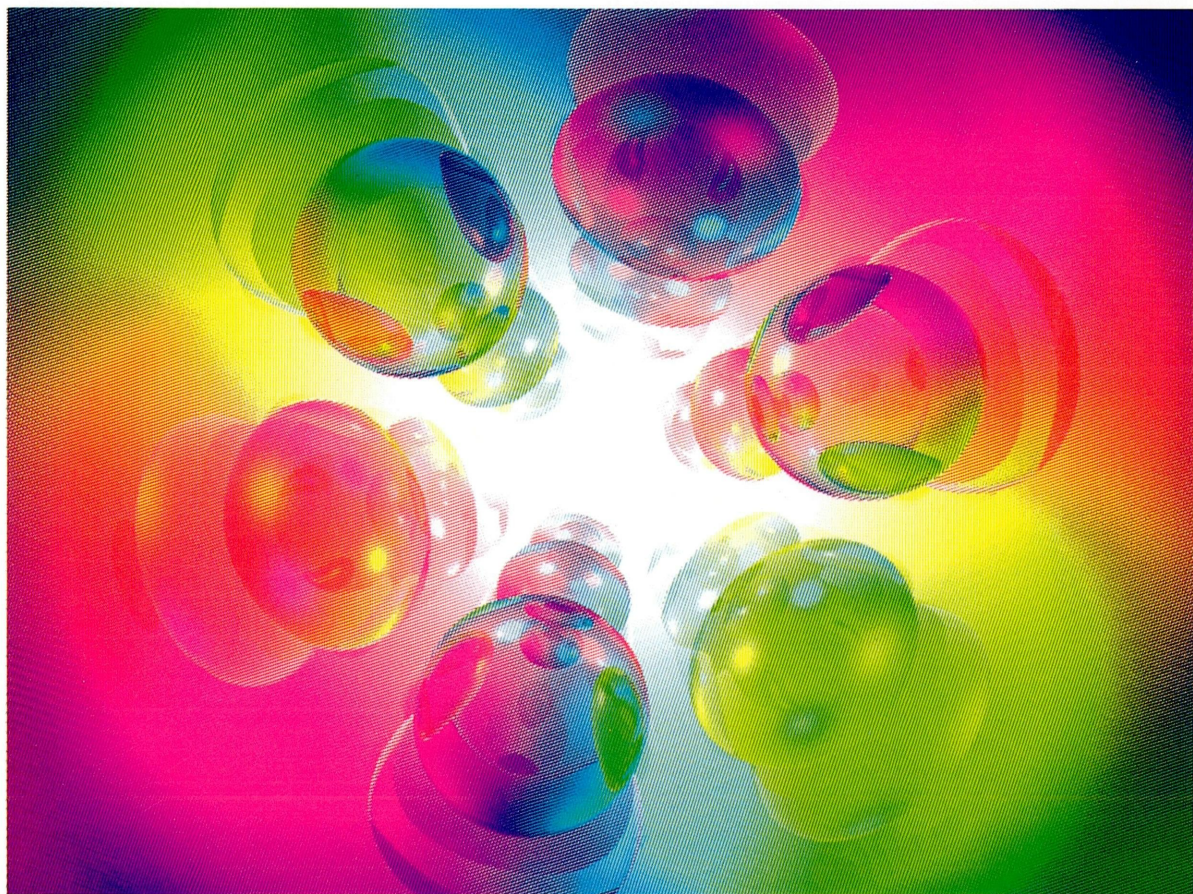
を意味している。

以下、この SS グラフの観察をもとに、質問項目間の関連について考察する。



作品1

Hardware:PC9801RA+IM9800SE(2CPU)
Software:IM-SuperTrek Resolution:640*480(24bits/pixel)
Printing Hardware:MacintoshIcx+CLC300+PS-IPU
Printing Software:Adobe PhotoShop
Created by T.Shakushi, Bunkyo University



作品 2

Hardware:PC9801RA+IM9800SE(2CPU)

Software:IM-SuperTrek Resolution:640*48(24bits/pixel)

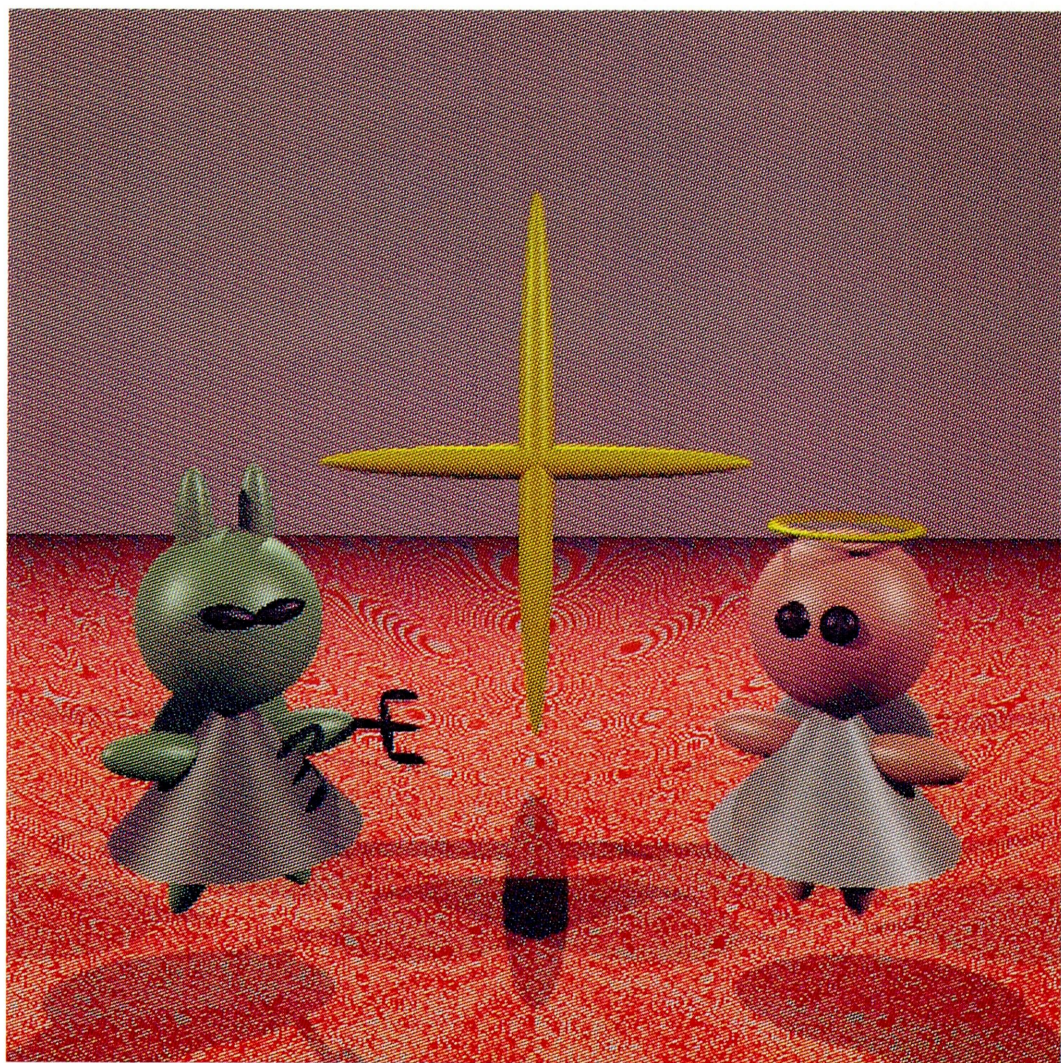
Printing Hardware:MacintoshIIfx+CLC300+PS-IPU

Printing Software:Adobe PhotoShop

Created by M.Tanae, Bunkyo University



作品 3



作品4

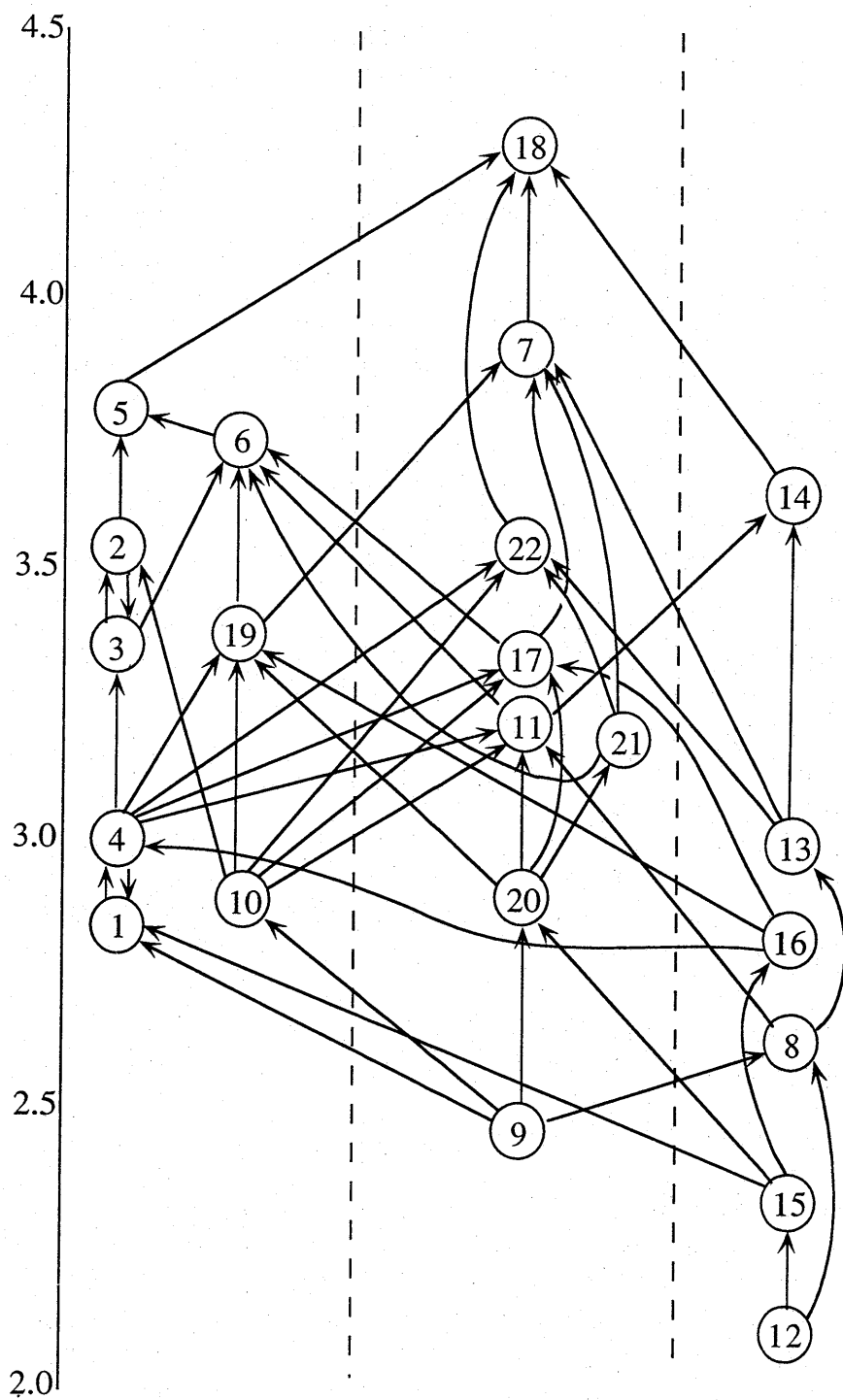


図5 SSグラフ

8. 3. 1 等価関連項目

等価関連項目は2項目ずつの組が以下の2組現れている。

- ① 項目2「きちんと出席した」と項目3「きちんとノートをとった」
- ② 項目1「授業は分かりやすかった」と項目4「講義内容は面白かった」

①の2項目の平均評定値は比較的高く、「出席すれば必ずノートをとる」学習者が多数存在することがうかがえる。②に関しては、平均評定値はやや低く、授業内容は難解な印象があったと考えられる。しかし、「わかりやすさ」または「面白さ」の印象を持った学習者に関しては、この両者の間に良循環が起こっていると考えられる。6. 1で述べた通り、本教科はそれほど高度な予備知識を必要とする内容ではないので、学習者の持つ難解な印象は、既得の知識の定着度に対する自信の無さや、単なる先入観に起因している可能性があり、更なる調査と対応を考察する必要がある。

8. 3. 2 順序関連項目

(1) 以下の8項目間には、順序的に強い関連がみられる。

- 項目1「授業はわかりやすかった」
- 項目2「きちんと出席した」
- 項目3「きちんとノートをとった」
- 項目4「講義内容は面白かった」
- 項目5「実習は面白かった」
- 項目6「教師は十分準備している」
- 項目10「実習に用いたシステムは使いやすい」
- 項目19「講義／実習内容は将来役立つ」

これは、学習者の参加意識（項目2, 3）や動機づけ（項目19）の心理的要因が、授業内容に対する興味への肯定的評価（項目1, 4, 5）と一体不可分であることを示していると考えられよう。また、それらは教師への評価（項目6）のみならず、設備に対する肯定的評価（項目10）へも反映してきている。

(2) 以下の4項目は順序的に1系列をなしている。

- 項目20「写真を撮るのが好きだ」
- 項目21「絵を描くのが好きだ」
- 項目22「図画より工作（造形）が好きだ」
- 項目18「新しいものが好きだ」

この系列は、学習者の映像に対する興味に関するものである。項目間の順序からみて、学習者の映像に関する興味は、2次元から3次元へ、また、より自由度の高い創造へ向かっているものと考えられる。そして、それらの方向が、「新しいもの」へ向かっている点は、個人レベルでの映像表現の変革を予感している可能性がある。今回は事後調査のみであるので判然としないが、このことが本教科の事後における反応の特徴であれば、コンピュータによる情報表現に関するリテラシー涵養の目的は成功していることになる。この点に関しては、事前調査の計画を含め今後の有意義な課題である。

(3) 以下の3項目は順序的に1系列をなしている。

項目13「数学は得意な科目だ」

→項目14「数学は好きな科目だ」

→項目18「新しいものが好きだ」

これだけのデータから、数学と創造性を論じるのは早計であろう。ここから見いだせることは余り多くなく、諺「好きこそものの上手なれ」が部分的に否定されていることぐらいだろうか。プログラミングに関する同様の項目(16, 17)でも順序性は「得意」→「好き」の方向に向かっており、これらの能力に関する限り、基本的に「上手(得意)だから好き」であることがわかる。ただ、数学に関する質問項目とプログラミングに関する質問項目の間に、やや興味ある結果が得られた。これに関しては8. 3. 3で論じる。

(4) 項目6「教師は十分準備している」へ、以下の項目から全て順序性がある。

項目3「きちんとノートをとった」

項目21「絵を描くのが好きだ」

項目11「不合格だったら来年また受講したい」

項目17「プログラミングすることが好きだ」

項目13「数学は得意な科目だ」

これは、(1)とも関連するが、学習者の積極性や、前提知識への得意意識という、教科内容と直接関係のない要因が、教師の肯定的評価へ反映している例と考えられる。逆に言うと、学習者の意識調査の結果だけで教師の力量を判定することの危険性を示唆しているとも言えよう。

(5) 項目7「半期よりも通年授業の方がよい」へ以下の項目から全て順序性がある。

項目19「講義／実習内容は将来役立つ」

項目17「プログラミングすることが好きだ」

項目11「不合格だったら来年また受講したい」

項目21「絵を描くのが好きだ」

項目13「数学は得意な科目だ」

今回のような概観的な講義内容では満足できない学習者の存在と、その傾向が現われていると言えよう。前提知識に対する得意意識(項目17, 13)、動機づけ(項目19)が反映していると考えられる。このような学習者には、文献の紹介等によって、学習の継続を促すような指導が必要である。ただ、否定的な見方すれば、教科内容の理解に自信が持てず、何らかの後悔に基づいているともとれる(項目11)。

8. 3. 3 数学的論証に対する好みとコンピュータ・プログラミング

今回のCG教育とは直接関係が無いが、本調査の結果から、やや興味深い知見を得たので指摘しておく。

今回の調査で、数学に関する質問項目は以下の3項目である。

項目14「数学は好きな科目だ」

項目13「数学は得意な科目だ」

項目15「数学では計算より証明の方が好きだ」

また、プログラミングに関する質問項目は以下の2項目である。

項目17「プログラミングすることが好きだ」

項目16「プログラミングは得意だ」

項目14と項目13、及び項目17と項目16の間に「得意」→「好き」の順序性が見られることは、8. 3. 2(3)で指摘した通りである。十分予想される結果であるが項目15に対する平均評定値は低く(2.348)、これを下回るのは項目12「試験結果には自信がある」(2.130)のみである。調査対象とした学習者は、情報学部2、3年生であるので、1年以上のプログラミング経験を有する。

興味深いのは、項目15から項目13への順序性は希薄である(順序性係数0.921)のに、項目15から項目16へ比較的高い順序性(順序性係数0.954)が見いだせる点である。本調査だけで、結論を出すのは早計に過ぎるが、数学的論証を好む学習者が必ずしも数学に得意意識を持っていないこと、また、そうした学習者がむしろプログラミングにおいて適性を感じている傾向があるように思われる。直感的には、多くのプログラミング作業は、論理構築という意味で数学の論証に似ている。従って、納得できる結果とも言える。ただ、調査対象が選択科目CGの受講者であり、あまり一般的ではないので、より一般的な学習者群を対象にした調査を行なってゆくこととし、ここではこれ以上の考察は試みない。

9. CG 動画像

以下では、更に未来的な観点に立ち、CG動画像の個人レベルでの作成に伴う技術的問題を現状を俯瞰することで述べる。さらに、専門教育以外の、初等中等教育などをも含めた全般的な教育の中で、CG動画像のより一般的な活用の可能性に関して展望する。

9. 1 CGの動画化の現状

3. でも触れたように、CGの動画化には以下のような技術的困難が伴う。

- ① 計算量
- ② 記憶容量
- ③ フレーム撮影に伴う周辺機器の制御

①、②は、純粋にコストの問題であって、資源が十分にあれば解決できる。しかしながら、1分間のCG動画像を作成するために必要となる計算量と記憶量は、単純計算で静止画像の1800倍になる。様々な高速化・データ圧縮手法が考案されているが、ここでいう「十分な資源」を個人レベルで入手するのは現状では難しい。

③は、CGのフレーム撮影での使用を前提として設計された録画機器が少なかったために、これまででは困難であった。しかし、最近では、ニーズに支えられてその種の機器が廉価で入手可能となってきている。また制御用ソフトウェアも充実してきており、将来の教育活用へ向けて、現在実験的な使用を進めている。

また、コンピュータの補助記憶装置の高速大容量化を受けて、フィルムやビデオテープ等を使用せず、コンピュータ上で音声付動画を再生する事も可能になり、デジタルムービーとして、記憶形式の標準化が進んでいる。ただ、この種のデジタルムービーの場合、画像ソースはビデオカメラから入力した短時間のライブ画像がほとんどで、長時間のCG動画像は希である。つまり、再生系の充実に対してCG作成系における①、②の問題が未解決なのである。著者らの目的は、CGそのものの研究ではなくその教育活用であるから、これらの問題解決には現在以上の高速

化・大容量化を待つしかないが、現在可能な技術での教育活用は追求するべきである。著者の一人は、デジタルムービーによる音声付ライブ動画像を活用したマルチメディア学習支援システムを開発している [7] [8] [9]。

9. 2 CG 動画像の教育への活用可能性

6. 1で指摘したように、CGを活用することによる教材の質的变化の可能性が存在する。しかし、9. 1で述べたような技術的問題の多い現状では、静止画像の提示や、作成済みCG動画像の再生という。いわば教師用の教材提示の道具としての活用 [3] が現在の限界であろう。そのような活用であっても、コスト面や画像作成の労力を考えると現状では未だ現実的ではない。そのようなCG教材が廉価で市販されたとしても、単に提示するのみであるならばビデオ教材と何ら変わるところはない。

理想的には学習者の行動に対してリアルタイムに反応するようなCG教材が望まれる。例えば、[作品1]のような空間幾何の教材において、学習者の指定する任意の平面で立体が切断される様子をリアルタイムで計算・提示したい。さらに切断面を中心として立体が開いて行くような動画像が即時に生成できれば理想的である。現在、このような学習支援をモノクロのワイヤフレーム画像で実現しているものは存在する。これをレイトレーシングCG画像のような高現実感の説得力豊かな画像表現によって実現できるようになったとき、CGの教育に与える質的な変化が期待できる。

今後、このような可能性を探りつつ、映像情報化時代に対応した教育の方法も模索して行きたい。

なお、本研究の一部は、1989年度及び1990年度文教大学共同研究費によって支援された。

謝 辞

今回の実習システムを開発するにあたり、レンダリング・ソフトウェア及び、画像表示系の作成には、文献 [4] のソース・コードを大変参考にさせて頂きました。先行的教育事例としても示唆に富む内容で、厚く御礼申し上げます。また、早稲田大学理工学部情報学科の松井辰則助手には、アンケート・データの分析に快く協力して頂き、心から感謝致します。そして、授業の一環とはいえ、美しいCG作品を多数作成してくれた文教大学情報学部の学生諸君にも、ここに御礼申し上げます。

[参考文献]

- [1] 電子情報通信学会編、中村栄八郎著「コンピュータグラフィックス」オーム社 (1987)
- [2] RAY-TREK マニュアル ヴィーアイ社
- [3] Terada, F., Shakushi, T., Matsui, T. "MATHEMATICAL EDUCATION TOWARDS THE NEXT CENTURY", 科学教育研究 Vol. 15, No. 3 (1991), pp. 101-109
- [4] 千葉則茂, 村岡一信「CによるCGレイトレーシング」サイエンス社 (1991)
- [5] 竹谷 誠: 評定尺度データの意味構造分析法, 行動計量学会誌, Vol. 14, No. 2 (1987), pp. 10-17
- [6] 竹谷 誠: 意味構造分析の利用法と授業評価への応用, 日本教育工学雑誌, Vol. 12, No. 1, (1988), pp. 1-8
- [7] Nakamura, N. Takeya, M., Shakushi, T., Terada, F., Matsui, T. "Multiple Learning Environments Using THE

multimedia CAI system", Proc. fo the IFIP TC 3, 5 th World Conf. on Computer in Education WCCE 90 (1990), pp. 587-592

- [8] Nakamura, N., Takeya, M., Shakushi, T., Terada, F., "The THE CAI system with Learning Environment for Enhancing Problem Solving", Aspects of Education and Training Technology, Kogan Page, London, Vol. 24 (1991), pp. 117-121

- [9] 沢田孝浩, 恩田善行: 自主的問題解決を支援するマルチメディア Exploration 学習環境, 日本科学教育学会 年会論文集16 (1992)