

空間図形ビューアを用いた教育環境の開発

上 窪 真 一

NEC 関西C&C研究所

空間概念の把握を支援する教育ツールである「空間図形ビューア」を提案し、試作システムの開発およびその利用について報告する。空間概念の把握には空間図形の直観的理解が必要であり、それを支援するためのインタフェースとして、視点の変更をキーボードやマウスから行うのではなく、ディスプレイを直接手で移動する具体的操作に近い教育ツールが必要であることを提唱する。

The Development of Educational Environment using 3-D Graphics Viewer

Shin'ichi UWAKUBO

Kansai C&C Research Laboratory, NEC Corporation
4-24, shiromi 1-chome, chuo-ku, Osaka 540, Japan
(e-mail: uwakubo@obp.ci.nec.co.jp)

We propose the educational tool for spatial concept formation in solid geometry education, and develop a prototype system. It is necessary for spatial concept formation to understand intuitively. Therefore direct manipulation interface that students move LCD panel by their hand for viewpoint shift is better than interface using a keyboard or a mouse.

1. 教育とコンピュータ

従来は教育の場として学校が唯一の知識伝達機関として機能していたが、社会の情報化が進むにつれ塾やテレビ、ラジオなどさまざまなメディアを通じて知識を習得する機会がある。さらに社会の変化が激しいため学校で習う知識はすぐに古くなってしまいうため、学校は知識伝達の間から情報化社会に対応した主体的で創造的な活動能力の育成の場へと変化しつつある。このような創造的な活動能力の育成にはコンピュータの利用が有効と考えられる。

学校教育とコンピュータの関係を考えると、コンピュータ自身を学習対象としてとらえた「コンピュータを学ぶ」側面とコンピュータを単なる道具としてとらえた「コンピュータで学ぶ」側面がある。

「コンピュータを学ぶ」側面では、中学校の技術家庭科に平成5年度より取り入れられた「情報基礎」のようにコンピュータそのものを学習し、単なる操作法に留まらずコンピュータによって成り立つ社会のあり方や技術の意味、情報の背後にある現実やその情報から予測される事柄を考え、必要な情報の取捨選択を行う「情報リテラシー」の育成を目指している。

一方、「コンピュータで学ぶ」側面としては、次の3つが考えられる。

- (1) 分析の道具
- (2) 運営の道具
- (3) 学習の道具(教具)

(1)「分析の道具」としてのコンピュータは、教育情報の構造分析や教材分析、授業分析などにおいて主に統計的な処理を行う。(2)「運営の道具」としてのコンピュータは、CMI(Computer Managed Instruction)といわれ、テストの得点のような学習者にかかわる情報や、時間割のような教育管理運営にかかわる情報などを総合的に検討するために利用される。学級レベルから学校、地域レベルまでさまざまなシステムが考えられるが、基本的にはデータベースシステムである。そして、(3)「学習の道具(教具)」としてのコンピュータは、一般にCAI(Computer Assisted Instruction)といわれ、多少意味合いは異なるがCAL(Computer Assisted Learning)や知的CAI、ITS(Intelligent Tutoring System)ともいわれ、学習者の学習活動を支援するのが目的である。

いずれにしても人間の思考活動、表現活動、創作活動という側面を支援することが可能となったコンピュータ

が学校教育に限らず、教育に果たす役割はますます重要になっていく。

ここで、創造的活動能力の構成要素とコンピュータの関係を示したのが図1である。基本知識や技能の獲得には「伝統的CAI」(解説やドリルを中心としたCAI)が利用され、論理的な思考力の育成のため「知的CAI」(学習者の理解状況を推定するCAI)が研究されている[1]。しかし、「直観力を育成するCAI」は存在しない。これは直観的な見方や考え方が瞬間的に生じるため、直観力を育成する教育ツールのインタフェースは直接操作性を重視しなければならないのに対し、マウスやタブレットなどの既存インタフェースでは必ずしも対応できないためである[2]。

ここで用いる「直観力」とは解決すべき課題の全体像を把握する全体把握力とも考えられる。そしてこの「直観力」は単なるおもいつきや第六感などではなく論理的思考に裏打ちされていることが必要である。「直観力」は数学だけで育成されるものではないが、数学、とりわけ幾何学の影響が大きいと考えられる。

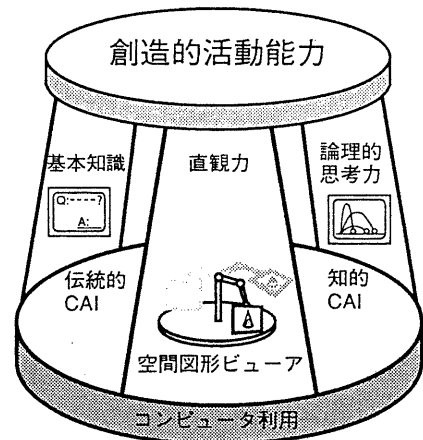


図1 創造的活動能力とCAIの関係

2. 幾何学教育でのコンピュータ利用

前章で述べたように我々は「直観力」の育成のために、幾何学とくに空間図形の教育を取り上げコンピュータで支援することを検討しているが、ここでは学校教育に限らず他の分野も含めた、空間図形を中心とした幾何学教育の必要性を示す。

(1) 学校教育

数学教育は代数、幾何、微積分、統計、数理モデリングに分類できるが、幾何学領域の問題解決の過程は、

- ・ 的確な図示 = 直観力、全体把握力
- ・ 解決方法の模索 = 洞察力、想像力
- ・ 論証 = 論理的な思考力

であり、各過程で数学的な見方、考え方に必要な直観力、想像力、論理的な思考力を伸ばすものと考えられる。なかでも特に直観力が要求される。

また、幾何学領域は黒板や教科書などの平面的で静的な図示では説明が難しい。例えば平行移動や回転などの変換は変換前後の図示だけでは分かりにくく、概念を教えた後の図解としてならばビデオやアニメーションが利用できるが、学習者が試行錯誤する環境としては不十分である。さらに、「物体の運動と衝突」のように物理世界と数学的抽象概念を結ぶ教材にはより柔軟でダイナミックな幾何学的実験室としてのマイクロワールドが必要である。ここで、普段我々が出合う幾何学的体験は3次元空間内であることから平面ではなく空間幾何学から入るのが自然であろう。

(2) 造形・デザイン教育

立体のイメージを表現するには模型や透視図、三面図を作成しなければならないが、模型は作成までに費用と時間がかかるため、簡単に作っては壊すという試行錯誤には向いていない。また、透視図はある方向からの見えかたのみを示しているため、正確にその形を伝えることはできない。三面図は立体を正確に表現できるが、立体としての認識には慣れが必要である。

(3) 新メディア利用教育

CGやコンピュータアニメーションはコンピュータの普及に伴い、新しい表現メディアとして定着しつつある。しかし、複雑でダイナミックな幾何学的対象を扱うにはコンピュータの知識だけでなく、幾何学的知識の習得と理解が必要である。

以上のことを踏まえ我々は、幾何学の中でも主として空間図形から取り扱うことにした。その中でも最も基本となる空間概念の把握の支援を行うこととした。

3. 「空間図形ビューア」の開発

3-1 空間概念把握の支援

空間概念の把握とは、

- ・ 対象の空間的特性（広がり、奥行、方向）
- ・ 平行、垂直、ねじれの位置など相互の空間関係
- ・ 自己と対象との空間関係
- ・ 自己の空間への位置づけ

を認識することと考えられるが、このような空間概念は、

① 基礎的で具体的な段階

具体的な物を操作、対応させて空間的な特性を比較し、空間概念の把握の基礎となる経験を豊かにする。

② 空間的特性や関係を抽出できる段階

位置や大きさに関係なく空間図形の形を独立に認め判断でき、ことばでまとめて定義できる。

③ 概念の意味内容を理解し、その概念の位置づけができる段階

空間概念相互の関係が明らかになり、図形の特徴や性質をまとめてより高い概念にできる

を経て把握、形成される。①の段階では身近な物や模型を実際に手で触れることが有効であり、③の段階では基本的な概念がことばで定義されているため、ことばで表現し理解することが可能である。しかし、②の段階は明確にことばとして定義できていない抽象的な事柄を扱い、しかも空間概念はノートや黒板などの平面で説明することが難しい。さらに、この段階はじっくり考えることで理解できるわけではなく、直観的な見方や考え方が重要となる。

この直観的な見方や考え方は瞬間的起こりそして消えていくため、空間概念を把握するためには、直観的な見方や考え方を学習者自身が簡単にそして納得できるまで確かめる環境が必要となる。これらのことから空間概念の把握を支援するために、教具としてのコンピュータは次の条件を備えなければならない。

・ 直接操作性

概念を把握、形成していくには空間図形のイメージを頭の中に描き、念頭で操作し、確認することの繰り返しを行う必要があるが、確認するための教具の操作が難しいと、教具の操作に意識が向いてしまいイメージを描くことに集中できない。このことは瞬間的に起こる直観的な見方や考え方の確認にはとくに問題であり、操作方法を意識せずに使えるインタフェースが必要となる。

- ・リアルタイム性

空間図形のイメージを頭の中に描き、念頭で操作し、確認することの繰り返しは連続的に行われなければならないため、操作-確認のループを妨げないスピードで操作結果を表示する必要がある。操作が連続的な場合、確認すべき結果も連続的に表示しなければならない。

- ・相互作用

学習者に単なる受動的な観察の機会を与えるだけでなく、対象に対して働きかけることは、モチベーションを促進し、より深い理解に結びつく。しかし、対象となる世界にのめり込み過ぎると教育目標が見失われ、教具として利用されるのではなく単なる遊具として利用される可能性がある。そのため学習者に客観的な立場を絶えず意識させる必要がある。

- ・評価

方程式を解くような論理的な思考であれば、その途中経過がことばや計算という形で残り評価の対象となる。一方、空間概念はことばで表現しにくくしかも直観的、瞬間的に生じるため、これらの評価を行うには、定量的な記録を継続し学習者の認識過程を形に残して行かなければならない。

以上のことから、空間概念の把握を支援するために「直接操作性」、「リアルタイム性」、「相互作用」、「評価」の条件を満たす教具である「空間図形ビューア」を提案する[3][4]。

3-2 システム構成

「空間図形ビューア」の外観を写真1にハードウェア構成を図2に示す。写真1に示すように、液晶ディスプレイが複数関節をもつアームからなる支持部の先に取り付けられており、ディスプレイが空間図形を見るための窓に相当する。この窓を通して利用者は空間図形を視点を変えて観察することができる(写真2)。ディスプレイの位置は超音波センサーにより検出しているため、ディスプレイが十分軽量になればディスプレイ支持部は不要となる。

「空間図形ビューア」は基本的に一人一台を想定しているが、ディスプレイが13インチと大型のため2、3人で同時に見ることが可能である(写真3)。さらにディスプレイは複数接続可能なため、多人数を対象とした

演示用ツールとしても利用可能である。

図2のハードウェア構成において、視点位置データ設定部と空間図形データ処理部は1台のパソコンで構成することも可能だが、汎用性および今後の拡張性を考慮してそれぞれ別のパソコンで構成している。したがってより複雑で大規模なデータを扱う場合はグラフィックワークステーションを利用し、ゲームなど特定の用途には専用機を利用することも可能である。

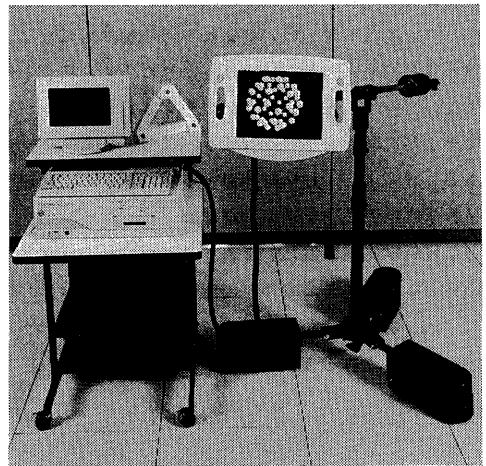


写真1 外観

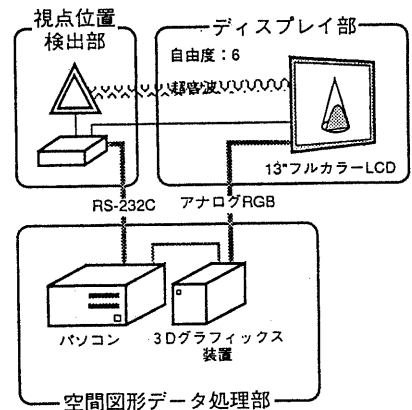


図2 ハードウェア構成

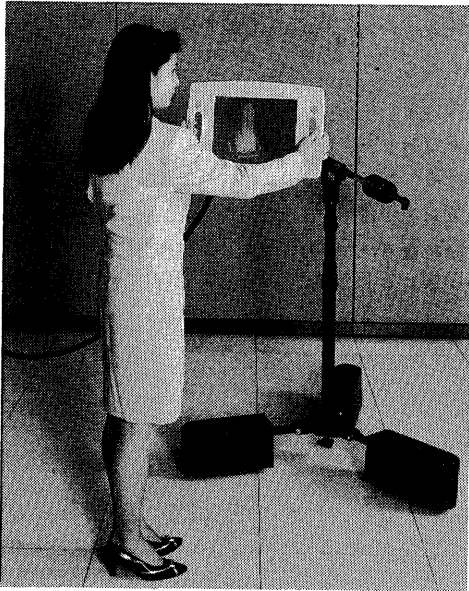


写真2 「空間図形ビューア」の操作



写真3 「空間図形ビューア」の利用

3-3 機能

(1)空間図形のリアルタイム生成

空間図形を観察するために、視点を自由に移動する「直接操作性」をもつインタフェースとして、視点の移動をキーボードやマウスから間接的に行うのではなく、空間図形が表示されているディスプレイを直接手で移動

することにより行う。このような身体動作を伴う観察は、記憶の定着を促進するものと考えられる。

また、学習者による視点の移動は連続的に行われ、その結果としての空間図形の見え方をわかりやすく示すために「リアルタイム性」を重視し、利用者に時間差なく連続的に操作結果を提示することができる。

「空間図形ビューア」は6自由度をもち、アームの可動範囲内で任意の位置に利用者自身が手でディスプレイを移動することで視点を指定できる。ディスプレイの移動にともないその位置で見える空間図形をリアルタイムで生成するため、利用者には運動視差が生じ、ディスプレイに表示された図形が空間図形として認識される。

(2)拡大・縮小機能

空間図形の位置関係、形を理解するために、対象となる空間図形の一部分に注目したり、全体との関係を観察するために拡大・縮小が可能である。

表示対象である空間図形を拡大したい場合、あるいは全体を俯瞰したい場合にディスプレイ部のボタン操作によりビデオカメラのズーム機能と同じ感覚で空間図形の拡大・縮小が可能となる(図3)。

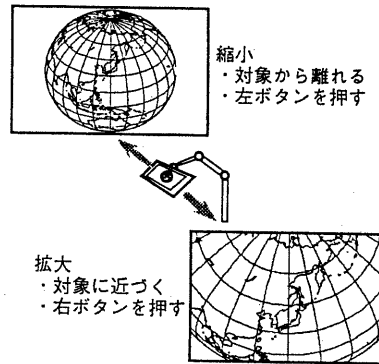


図3 拡大・縮小機能

(3)空間図形の切断

「相互作用」という点で視点の移動だけでも十分と思われるが、より学習者の積極的な空間図形への操作として、空間図形の切断を可能とした。

空間図形の切断するにはディスプレイを切断したい位置に移動させるだけでよい。ここで、ディスプレイそのものが「平面カーソル」[5]として機能しており、従来のようにマウスやタブレットで複数の点を指定する場合に

比べ簡単で直観的な断面の指定が行える。「平面カーソル」により模型では不可能な断面の連続変化が表示可能となり、断面に対する直観的な思いつきをより自由に試行することができる。この断面の生成は空間図形の形を認識する上で重要なばかりでなく、学習者に空間図形との位置関係を意識させることができる。「空間図形ビューア」による立方体の切断の様子を図4に示す。

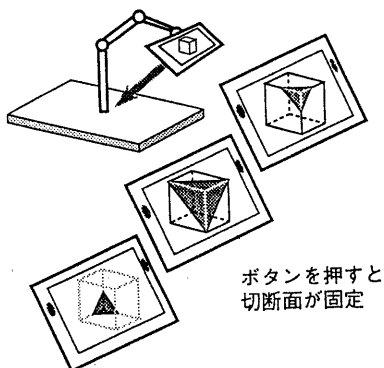


図4 立方体の切断

(4) 視点位置記録・再生機能

空間概念の把握状況を「評価」するには、従来は学習者による空間図形の操作状況を観察するか、ペーパーテストで評価する方法であったが、観察に時間がかかるばかりでなく客観的・定量的な評価が難しく、ペーパーテストでは空間概念がことばとして明確に定義された段階でなければ正しく評価できない。

そこで、同じ課題に対する学習者の視点位置を記録・再生する機能を実現することにより、空間概念の把握状況を客観的・定量的に知る手がかりとして利用できるばかりでなく、空間図形の典型的な見方や特徴的な見方を提示するツールとして利用することが可能となる。

3-4 VRとしての「空間図形ビューア」

VR (Virtual Reality 仮想現実感) システムが近年、3次元立体視とデータグローブなどの指示入力デバイスの応用を中心として脚光を浴びている。ハードウェア面から分類すると、HMDなどのデバイスを身につけ仮想世界の情報以外の感覚を遮断する「没入型」と、特殊なデバイスを身につけず、日常生活において違和感のない

「開放型」がある。この分類では「空間図形ビューア」は「開放型」とくに観察を重視したVRシステムと位置づけられる。

「没入型」システムの利用者はコンピュータが作り出す仮想空間の中に入り込み、物理的な制約のない世界を体験することができる。しかし、空間概念の把握が不十分な利用者にとり、自己と対象との空間関係や自己の空間への位置づけの認知に失敗し、仮想空間の中で迷子になるおそれがあるため、「開放型」システムの方が適していると考えられる。また、学校での利用を考えるとデバイスの着脱の煩雑さや生徒の多くが利用するというコスト面、CG酔いが起こりにくいなどから「開放型」が有効であろう。

4. 「空間図形ビューア」のソフトウェアの特徴

学校での利用を想定すると生徒にとっての使いやすさだけでなく、教材を実際に作成する先生にとっても使いやすいシステムなければならない。そこで、「空間図形ビューア」の試作機に触れて頂いた先生方の意見を反映し、次のような特徴をもつソフトウェアを実現した。

4-1 オーサリング機能

空間図形ビューアのオーサリング機能により、設定されたカリキュラムに沿って問題を提示し、利用者によるディスプレイ部の操作(ボタン操作、メニュー選択)により次の問題あるいはメニューに移ることが可能となる。

カリキュラムの設定は問題手順、表示する図形ファイル名および表示パラメータをスクリプトファイルに記述することにより行う。このスクリプトファイルに従いディスプレイ部に空間図形を表示し、ディスプレイ部の移動位置で空間図形表示と切断を行い、問題に対する解答を行う。解答は選択肢からの選択と図形切断による2つの方法のいずれかで行い、解答結果によって次問題へ移る。表示図形、解答方法、解答結果による次問題の設定もスクリプトファイルに記述することができる。

4-2 対話インタフェース

視点の変更や断面の指定においては、利用者はディスプレイ部を移動あるいはボタンを押すだけであったが、カリキュラムの内容に沿って空間図形ビューアを操作するには単元や解答の選択が必要となる。そこで、教具としての簡便さを重視して学習者はキーボードを使用せず

に、ディスプレイ部のボタンによるメニュー選択とした。さらに、空間図形ビューアがもつ直接操作性を生かし、メニュー項目を空間上に配置している(図5)。また、どのタイミングでもメニューを呼び出せるように配慮した。

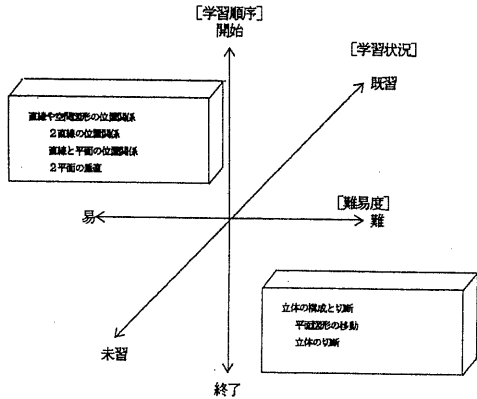


図5 メニュー項目の空間配置

4-3 データ作成

地形や建築物などの複雑な空間図形のデータ作成や既存のデータの利用を考え、標準フォーマットであるDXFファイルからのコンバータを用意した。これにより使い慣れたCADソフトや市販のCADソフトを利用することができる。

4-4 プレゼンテーションに有効な機能

「空間図形ビューア」は、空間概念の把握を支援するために利用者一人につき一台が理想だが、現在の集合教育という形態をとる学校教育での利用は時間的にも予算的にも困難である。しかし、空間図形を提示するというプレゼンテーションの用途については集合教育での利用が可能である。以下の機能は先生が生徒達に空間図形を説明するために特に有効な機能である。

(1) アニメーション機能

空間図形の動きをスクリプトファイルに記述することができるため、空間図形の動きを任意の視点あるいは視点を移動しながら観察することができる。利用者が視点の変更という操作によりシステムに働きかけるという点からシミュレーションの一種とも考えられる。

(2) 頂点-切断点近似機能

空間図形の切断において、断面をディスプレイ部と連動して連続的に表示するのは空間図形の切断を理解する上で効果的だが、空間図形の頂点を通る平面で切断する場合、丁度頂点を通るように切断するのは難しい。そこで、頂点-切断点近似を行うことでディスプレイ面を切断面とするのではなく、ディスプレイ面に近い空間図形の頂点を結んで新しい切断面を生成する機能を実現した。これにより頂点を通る切断面を容易に指定することができる。

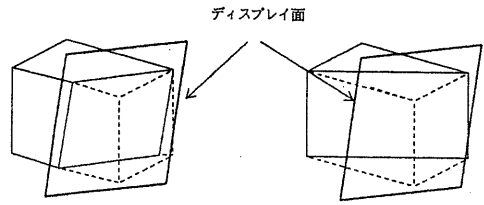


図6 頂点-切断点近似例
頂点-切断点近似指定なし 頂点-切断点近似指定あり

図6 頂点-切断点近似例

(3) 視軸固定機能

ある視点からの空間図形の見え方を他の人たちに示すために、視軸を固定しディスプレイ部の位置に関係なく空間図形を表示する機能を実現した。単に画面を静止させるためならば画面のハードコピー装置を利用すればよいが、視軸固定機能では拡大・縮小機能および切断の機能が有効なため、視軸を固定した空間図形の拡大・縮小を提示することが可能である。

5. 「空間図形ビューア」の効果

「空間図形ビューア」の効果について教育利用およびプレゼンテーション利用の側面について以下に述べる。

(1) モチベーションの維持

コンピュータの指示通りに操作するのではなく、学習者の操作に対してコンピュータが適切な応答を返す場合、学習者はその操作対象の世界への影響感、操作感からモチベーションを維持することが可能である。このような主体的学習を促進することによって、教科書中心の受動的学習からの脱却し、より創造的な活動が可能となる。

(2)新しい教育および評価手法への可能性

学習者は五感をフルに使って学習しており、最近のCAIのマルチメディア化も情報の伝達経路を文字だけではなく、音声や動画を加えた複数の伝達経路から情報提示を受けたほうが学習効果が大きいと考えられる[6]。これを逆に考えると複数経路で学習した成果をペーパーテストという単一経路で評価することは、ほんとうに学習した成果より幅の狭い可能性が強い。現在の教育は主としてペーパーテストで評価されることが多く、これは抽象的な言語操作レベルで評価を行うため、リアリティのあるイメージを持たずに言葉つまりシンボルの上だけでわかったつもりになりやすい。

また、直観力は課題が与えられた瞬間に生じるものであって、直観力はそのリアルタイム性が評価されるべきであり、この評価をペーパーテストで行うのは困難である。さらに、我々が「空間図形ビューア」を用いて育成しようとしている空間概念の把握状況を評価する場合でも、平面であるペーパーテストで空間概念の評価を行うのは困難である。したがって「空間図形ビューア」の教育効果を評価するには従来のペーパーテストではなく、「空間図形ビューア」を使って教育し「空間図形ビューア」を使って評価すべきである。つまり、言語によらないイメージによる教育、そして学習した状況に近い状況で評価する手法が必要となる。

(3)3-Dマイクロワールド

「空間図形ビューア」が扱う立体幾何学は平面幾何学の一般化としてとらえられるが、学習者にとってこの一般化は難しく、コンピュータグラフィックスを用いた中間的表現が2次元と3次元との橋渡しとなっている。このようにコンピュータを利用することで、はじめて実世界の事物と抽象概念の橋渡しとなる「マイクロワールド」を利用者に提供できる。勿論、現実の世界を完全に表現することが目的ではなく、その現実を構成している要素を見つけだし、制御することが目的でありLOGO[7]のような論理的な試行錯誤環境を「空間図形ビューア」の直接操作性を維持したまま拡張できれば、立体幾何学に留まらずより広い領域を対象とした学習環境を提供できる。

(4)情報視覚化ツール

「空間図形ビューア」は教育用インタフェースとしての利用に留まらず、4-4 で示したようなプレゼンテー

ションツールとしての可能性をもつ。「空間図形ビューア」は立体情報を平面化を行わずに立体のまま伝達する手段とも考えられ、建築やデザイン分野での利用が期待できる。また、計算機内部のようにデータやプログラムが空間的世界ではなく論理的な世界を構成している場合でも、距離という尺度が定義できれば空間的に配置することが可能となる[8]。これによりソフトウェア全体の振る舞いの把握が可能となる。さらに、従来のデータ分析は平面で行われる場合がほとんどであり、空間的にデータを配置するという新しい視点の提供は発想支援にもつながる可能性をもつといえよう。

(5)造形ツール

空間概念の把握支援から直観力の育成、さらに創造的活動能力の育成は造形という芸術の領域に近づいていく。「空間図形ビューア」による空間図形の観察や切断だけでなく、造形ツールへ向けて、空間図形の生成・加工が可能な「空間図形マニピュレータ」へと発展させて、新しい造形材料としての可能性を示して行きたい。

6.おわりに

以上、空間図形教育における空間概念の把握を支援する教育ツールである「空間図形ビューア」を提案し、試作システムの開発およびその有効性について述べるとともにプレゼンテーションツールとしての可能性を示した。

今後は、「空間図形ビューア」の実践評価として教育機関等と共同で実際に教育の場で利用するために、「空間図形ビューア」の機能の付加およびカリキュラムの検討を進めていく。

参考文献

- [1] 上窪：“コンピュータは教育に何をもたらしたのか—コンピュータ利用教育の光と影—”，情処人文科学とコンピュータ研究報告，CH-11-3(1991)
- [2] Gunnvald B. Svendsen：“The Influence of Interface Style on Problem Solving”，Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 35, pp. 379-397(1991)
- [3] 上窪：“教育用空間図形ビューアの開発”，情処第44回全国大会講演論文集 分冊6, pp. 245-246(1992)
- [4] 上窪：“空間概念の把握を支援する教育ツールの試み—空間図形ビューアの開発—”，電子情報通信学会教育工学研究会，ET92-50(1992)
- [5] 関根、寺嶋：“平面カーヴを用いた対話的な形状モデリング”，情処グラフィックスとCAD研究報告，28-2(1987)
- [6] 三宅なほみ編：“教育とコンピュータ 新しい学びの創造をめざして”，新曜社(1987)
- [7] 名井、甘利、廣瀬ほか：“視覚表現を活用した大規模制御システムの一設計法”，電気学会論文誌C，No. 5(1991)
- [7] Papert, S.：“Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas”，BASIC BOOKS(1980)