

解説

コンピュータ・グラフィックスの基本的テクノロジーと最近の話題

1. コンピュータ・グラフィックスの基本的テクノロジー

Basic Technology of Computer Graphics by Takayuki ITOH(IBM Japan Ltd., Tokyo Research Laboratory) and Mitsunori MAKINO(Faculty of Science and Engineering, Chuo University).

伊藤 貴之¹ 牧野 光則²

¹ 日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所

² 中央大学理工学部

1. はじめに

かのインベーダー・ゲームがブームになったのは、もう15年以上も前の話である。今から思えば、白黒画像の平たい角ばった異星人がノロノロ動くだけの単純なゲームであったが、それでも筆者は子供心に大変な衝撃を覚えたものである。

かたや現在では、市場に出回るわずか数万円の家庭用TVゲームのCGで、生身の人間のような立体的なキャラクタによる格闘シーンが楽しめるようになった。平たい白黒の異星人が立体的な生身の人間に変わるまでの、飛躍的な技術の進歩は、非常に多くのCGの研究者や開発者の努力のたまものによるものといえるであろう。

さて、CGの広義は、「コンピュータで画像を生成する技術、または生成された画像」である。その意味では、インベーダー・ゲームはもちろん、パソコンのウィンドウシステムやWWWブラウザも、CGの一技術である。本稿では、CGの技術の中でも、立体的な画像表示を実現する昨今のTVゲームに用いられるような、3次元物体を描画するCG、いわゆる「3次元CG」の技術を中心に、その歴史と概要を紹介する。

なお、紙面の都合により、第4章までの内容に関する参考文献を割愛した。詳しくは文献1)～3)を参照していただきたい。また、第5章では、国際会議SIGGRAPHの内容を中心に掲載した。SIGGRAPHの予稿集は、論文誌ACM Computer Graphicsに包括されている。

2. 3次元コンピュータ・グラフィックス

コンピュータによる最初の図形表示システムは、1963年にSutherlandが発表した対話型2次

元図形表示システム、「Sketchpad」であるといわれている。当時の表示装置(XYプロッタやラシダムスキャン型CRTなど)では立体的な図形表示は困難であったが、自動車や航空などの分野で2次元製図などの目的で用いられた。

1970年代に入り、現在と同じ方式のラスタスキャン型CRTが普及し、物体の色彩や濃淡の表現が容易になると、物体を立体的に、写實的に画像表示する手法の研究が急速に進んだ。現在の3次元CGの技術の多くは、この時期の研究成果を基礎としている。

この時期の研究者が、立体的な、写實的な画像を生成するために着目した課題は、具体的には以下の内容に大別することができる。

1. 3次元座標系で、物体の形状を正確に表現する手法

2. 3次元座標系で記述された物体を、仮想の2次元スクリーンに投影する手法

3. 物体の輝度や色彩を求める手法

近年では、物体の形状を処理する1.をモデリングと呼び、2次元画像座標系で処理をする2.および3.をレンダリングと呼ぶことが多い。本稿では、これ以降の3次元CGの研究の経緯を、モデリングとレンダリングにわけて紹介する。

3. 物体のモデリング

本章では、3次元座標系で物体を表現するモデリング手法について紹介する。

3.1 プリミティブ

後述するレンダリングの過程では、物体と視線の交点計算が頻繁に必要なことになる。ここで、4次以下の多項式で記述される図形は、交点計算を解の公式に帰着することができるので、計算時間の点

で非常に有利である。とくに、2次式で記述される形状には、球、円柱、円錐など直観的に理解しやすいものが多い。そのため、3次元CGでは、2次以下の数式で表現される図形（平面や2次曲面など）を、高速画像生成のコンテンツとして用いることが多い。また、これらの図形をプリミティブと呼ぶことが多い。

プリミティブを用いた最もポピュラーな形状表現の手法は、多数の多角形（ポリゴン）の集合を用いる手法である。ポリゴンの集合による物体表現は、専用ハードウェアを用いた高速画像表示が容易であるうえに、WWWを介して3次元形状を表示するVRMLの普及などの影響もあって、現在でも非常によく用いられている。

そのほかに、多数のプリミティブの論理和や論理積で複雑な形状を表現するCSG法などが知られている。図-1は、球や直方体などの論理和や論理積で表現された物体を表示した例である。また、多数の楕円球の集合で物体を表現する「メタボール」も、美術系のデザイナーなどに人気がある。

3.2 パラメトリック曲面

2次以下の面などで表現できない曲面を表現する手法として、パラメトリック変数を用いた数式で表現される曲面、とくに「双3次パラメトリック曲面」を用いることが多い。双3次パラメトリック曲面は、16個の3次元ベクトル情報（位置ベクトル、接線ベクトルなど）を制御点として与え、4点を2変数の3次式で補間して得られる小領域（パッチ）を、多数連結して得られる曲面である。

パラメトリック曲面の代表例として、1964年に発表されたCoons曲面、1966年に発表されたBezier曲面、1973年に発表されたB-Spline曲面などが知られている。このうちB-Spline曲面は、物体を曲げるときの歪みエネルギーが最小となる状態を定式化したものであり、形状が自然であるうえに、局所性や制御性に優れているなど、多くの利点をもつ。近年では、制御点に重みをつけて数式を有理化したNURBS（Non Uniform-Rational B-Spline）曲面が多く用いられている。

3.3 ポリウム・データ

プリミティブやパラメトリック曲面のような、数式で表現される形状のほかに、離散点に与えられた数値データの集合を対象とするグラフィック

ス表示手法も、近年では活発に議論されている。とくに、CTスキャナなどから得られる医療測定結果や、境界の不明瞭な物体の写実的な表現、あるいは有限要素法などの数値解析結果の仮想的なグラフィックス表示に用いられることが多い。これらの目的で用いられる数値データを、ポリウム・データと呼ぶことが多い。

3.4 自然物体のモデリング

前節までに述べた汎用的な物体モデリングに対して、特定の自然物体や物理現象に限定したモデリング手法も、1980年頃から非常に多く報告されている。その多くの手法は、自然物体の複雑な形状を写実的に表現するために、簡潔な入力データから複雑な形状の生成を実現している。図-2は、成長や経年変化の過程をモデル化して生成された植物の画像例である。図-3は、フラクタルを適用して自己相似な形状を生成することによって生成された雲の画像例である。図-2、図-3と同様な手法による樹木や山岳の画像例も報告されている。そのほか、パーティクル（粒子）のシミュレーションにより、粒子密度などの簡単な入力から、境界の不明瞭な物体（炎、煙、雲、滝など）を表現する手法も報告されている。

また、人体のモデリングはとくに長い期間にわたって活発に議論されている。主な研究課題は、表情や動作の表現を意識した顔および全身の形状モデリング、頭髪のモデリングなどである。

3.5 アニメーションのモデリング

写実的なアニメーション画像生成を目的とした、3次元空間上の物体の変形や動作のモデリングに関する研究も進んでいる。

人物や動物の歩行などの動作のモデリングとして、関節の回転角と運動の関係を解析する運動学を適用した手法、重力や加速度の影響を加味した動力学を適用した手法などが報告されている。また、人物の表情変化などの動作についても、モーフィングなどの画像上の処理のほかに、形状モデリングによって表現する手法が報告されている。

物体の変形モデリングは、1986年にSederbergらによって報告されたFree-Form Deformationを機に、急速に研究が進んだ。とくに1988年のSIGGRAPHでは、柔軟物体の外力による変形、振り子状の剛体の動作、剛体の衝突による移動、非弾性体の破損など、さまざまなモデリング手法

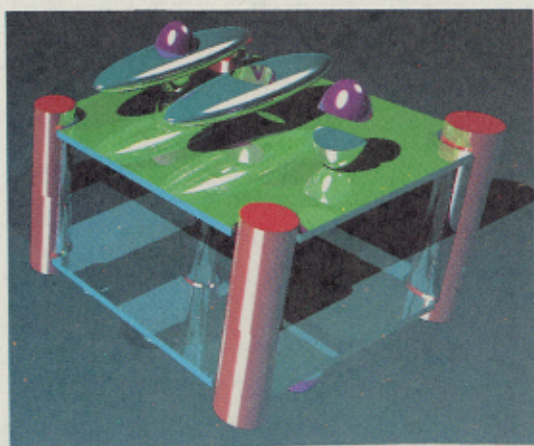


図-1 CSG法を用いた形状表現の例



図-2 植物の画像例



図-3 雲の画像例

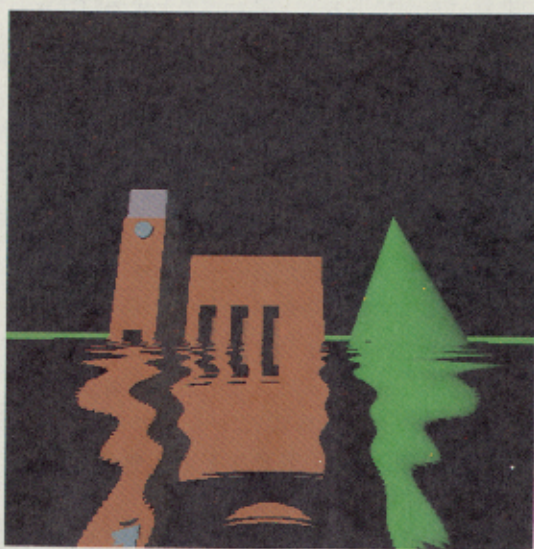


図-4 鯉気楼の画像例



図-5 虹の画像例



図-6 石垣の画像例

が報告されている。

そのほかにも、水流、風、波、布地などの特定物体のアニメーションを目的としたモデリング手法も、継続的に研究が進んでいる。

4. レンダリング

本章では、3次元物体を2次元スクリーンに投影する隠面消去アルゴリズムと、写実的な画像生成のための輝度計算モデル、そのほかの諸手法について紹介する。

4.1 隠面消去アルゴリズム

3次元座標系で記述された物体を、仮想の2次元スクリーンに投影し、視点から可視である部分だけを画像に表示する処理を、隠面消去という。隠面消去は、3次元CGの根幹となるアルゴリズムとして、研究が進められてきた。

1970年には、Watkinsによってスキャンライン法が発表された。スキャンライン法では、走査線ごとに物体どうしの距離判定を行い、可視である物体の輝度値を算出して表示する。この手法は多角形を高速に画像を生成する半面、曲面を含むモデルへの適用が難しい。

1974年には、CatmullによってZバッファ法が発表された。Zバッファ法では、各画素ごとに視点と物体との距離を算出し、距離が最小である物体の輝度値と距離値を、各画素ごとにメモリに保持する。Zバッファ法は曲面を含むモデルの表現に適しているが、発表当時はメモリが高価であったために、実用化が進まなかった。

1980年には、Whittedによってレイ・トレーシング法が発表された。レイ・トレーシング法では、視点に到達する光線を視点から逆方向に追跡する。レイ・トレーシング法は曲面を含むモデルにも対応し、大量のメモリを要さないうえに、金属的な反射や、屈折性をもつ透明物体を写実的に表現することができる。しかし、他手法に比べて処理時間が非常に大きい。

4.2 輝度計算モデル

3次元CGでは、放射された光線を全方向に一様に反射する「拡散反射」、光線を特定方向（正反射方向）に強く反射する「鏡面反射」、物体の微小凹凸がつくる「光沢反射」などを考慮して物体の輝度を算出する。紙やプラスチックのような、視線方向を変えても同様な色彩がみられる物

体は、光線を拡散反射する割合の高い物体である。逆に、鏡や金属のような物体は、光線を鏡面反射する割合の高い物体である。

拡散反射の輝度計算モデルにはLambertの余弦則を適用したモデルが、鏡面反射の輝度計算モデルにはPhongの提案したモデルが知られている。また、物体の微小凹凸を考慮したBlinnの反射モデル、反射光のスペクトルを考慮したCook-Torranceの反射モデル、金属の加工などによって生じる方向性を考慮した異方性反射モデルなどが報告されている。

4.3 光源と陰影

写実的な画像生成には、輝度算出だけでなく影の存在も不可欠である。1977年には、Crowによって平行光源や点光源に対する影多面体の概念が発表され、それを用いたスキャンライン法やZバッファ法のための影の表示アルゴリズムがいくつか発表された。平行光源とは、無限遠方から平行に光線を放射する光源である。点光源とは、1点から全方向に光線を放射する光源である。影多面体とは、光線が遮蔽される領域を半無限な多面体で表す手法である。

一方、面積をもつ光源がつくる不明瞭な影を表現する手法も発表されている。1983年に西田らは、面光源や線光源によってつくられる不明瞭な影を表現するために、輝度計算モデルに面積分や線積分を適用する手法を提案している。

4.4 グローバル照明モデル

計算機能力の進歩とともに、反射モデルや陰影表現に限らず、よりグローバルに光エネルギーの振舞いをシミュレートすることで、画像の写実性を高める手法が注目を集めた。

グローバル照明モデルの代表例として、レイ・トレーシング法のほかに、1984年にGoralらが発表したラジオシティ法も広く実用されている。ラジオシティ法は、物体の光エネルギーの相互反射による平衡状態を算出することで物体の輝度値を算出し、非常に写実的な画像を生成する手法である。

4.5 自然現象の輝度計算モデル

1980年代の後半以降には、特定物体に焦点を絞った輝度計算モデルも多く報告されている。たとえば、物体内部における光の反射・屈折を考慮することで、布地や皮膚の質感を表現する手法が

報告されている。また、透明体の透過率を不均一に設定することで蜃気楼を表現する手法（図-4参照）や、透明体の屈折率の波長依存性を利用して虹や宝石を表現する手法（図-5参照）、薄膜の干渉をモデル化してしゃぼん玉や油膜の色彩を表現する手法なども報告されている。そのほかに、大気による光の散乱・吸収をモデル化することで、霞などの効果や、ヘッドライト効果、天空の色彩などを表現する手法が報告されている。

4.6 マッピング

前節までに示した多様なレンダリング手法を用いても、物体の写実的な表現には限界がある。そこで、別手法でつくられた2次元情報、たとえば物体の凹凸や模様、あるいは実写画像などを物体表面に貼りつける「マッピング」という手法が、広く実用されている。マッピングの代表例として、模様や画像を物体表面に貼りつけて、その色彩を拡散反射率とみなして輝度を算出する「テクスチャ・マッピング」と、凹凸の情報を物体表面に貼りつけて、その情報から物体の法線方向を算出して輝度を算出する「バンプ・マッピング」が知られている。図-6は、バンプ・マッピングを応用して生成された石垣の画像例である。また、最近では、3次元のデータ構造で模様などをもつ「ソリッド・マッピング」や、3次元のデータ構造で輝度計算のパラメータをもつ「テクセル」なども知られている。

4.7 アンチ・エイリアシング

エイリアシングとは、画像の解像度不足により物体の境界上の画素が明瞭に現れ、物体がジグザグ状にみえる現象のことである。Zバッファ法のためのアンチ・エイリアシング手法として、1978年にCatmullが発表した面積計算法や、1984年にCarpenterが発表した「Aバッファ法」などが知られている。レイ・トレーシング法のためのアンチ・エイリアシング手法として、1984年頃に相次いで発表されたCone Ray Tracing, Beam Ray Tracing, Distributed Ray Tracingなどが有用である。近年では、区間解析法という数値解析手法を利用した手法も報告されている。

5. 近年のコンピュータ・グラフィックス技術

本章では、ここ数年で多くの研究や開発が報告されており、現在も高く注目されている諸技術の

いくつかを紹介する。

5.1 ハードウェア

近年の3次元CGのためのハードウェア技術では、高速画像表示のハードウェアや、仮想現実（Virtual reality）を体感するためのハードウェアなどに、とくに注目が集まっている。

グラフィックス処理を高速化するボードや専用ワークステーションでは、ポリゴンなどのプリミティブを2次元スクリーンに投影する「ジオメトリエンジン」や、Zバッファ法を用いて画像を生成する「レンダリングエンジン」がハードウェア化されていることが多い。また、そのハードウェアの特性を生かすために、PHIGSやGLなどのグラフィックスAPIの開発も活発に進んでいる。

一方、現実非常に近い操作手段と画像表示によって、アプリケーションの操作性を高める「仮想現実（Virtual reality）」を実現するためのハードウェアも、活発に開発が進んでいる。入力デバイスの代表例として、球状物体を操作する3次元マウスや、人間の動作を検出するデータグローブやモーションキャプチャなどの開発が進んでいる。また、画像表示デバイスの代表例として、各種の立体表示ディスプレイの開発が進んでいる。

5.2 ポリゴンで表現された形状の単純化

第3章で述べたとおり、ポリゴンの集合による形状表現は、非常に幅広く用いられている。近年では、ポリゴンの細かさで同一物体を数段階にわけて表現し、その数段階を状況によって使い分ける、Level of detailという考え方が広く用いられている。Level of detailを実現するために、同一形状から複数段階の細かさのデータを生成する技術の研究も、1992年のSIGGRAPHでのTurkやSchroederなどの報告をはじめとして、活発に進められている。その多くの技術では、まず細かいポリゴンで形状データを生成し、曲率変化の小さい部位などにおけるポリゴン数を段階的に減少させている。

Level of detailは、視点移動などの操作に対する対話的な連続画像表示（Walkthrough）を実現するアプリケーションに用いられることが多い。視点から遠い位置にある物体など、大きな解像度を必要としない物体には、ポリゴン数の少ない形状データを用いることで、画像表示の速度を向上し、視点操作に対する操作を向上することが

できる。また、VRML などを用いてネットワーク環境で形状データを転送するシステムなどにも有用である。数段階の同一形状データを保持する大規模なサーバから、画像の解像度やネットワークの転送能力に応じて、形状データを選択して転送することができる。

5.3 画像処理と CG の融合技術

従来の 3 次元座標系での物体モデリング技術には、形状表現に非常に手間がかかるうえに、写実性にも限界がある。そこで近年では、画像をコンテンツとした CG 手法も活発に議論されている。

1995 年の SIGGRAPH では、パノラマ画像を入力データにして、視点などの指定にしたがって画像を合成する、いわゆる「イメージ・ベースド・レンダリング」が話題を呼んだ。1996 年の SIGGRAPH では、特定物体の 2 方向から撮影した画像を入力データにして、簡易な 3 次元形状データを構築することによって、少ない入力画像データから 3 次元 CG を実現する手法も報告されている。

また、物体が異なる物体に変形する過程を画像表示する、いわゆる「モーフィング」という技術も、1992 年の SIGGRAPH で 1 セッションを構成する活発な研究課題となった。モーフィングには、画像合成処理をする 2 次元的手法と、3 次元座標系で変形処理をする手法があり、両面からの研究が進んでいる。

6. おわりに

本稿では、3 次元 CG の研究の歴史を追いながら、主要な技術のいくつかについて概観した。現在では TV やパソコンなどですっかり日常的に接するようになった CG 技術の多くは、本稿で紹介した数々の研究成果が発展した結果であることがいえるであろう。逆にいえば、近年の CG の研究成果も同様に、近い将来には TV やパソコンで楽しめるようになっているかもしれない。モデリング技術が発展すれば、ペン入力したイラストのキャラクタがポリゴン化されて、ゲームに登場できるようになるかもしれない。画像処理技術が発展すれば、自分自身を画像にして着せ替え人形を楽しめるようになるかもしれない。Virtual

reality の技術が進めば、野球のバッティング練習やゴルフの打ちっぱなしも自宅でできるようになるに違いない。いや、CG 基礎技術に携わる者の想像を超える方向に CG が発展し、私たちを楽しませてくれるに違いない。夢はいくらでも膨らみそうである。

なお、著者の研究室では、レンダリングとしてレイ・トレーシング、モデリングとしてプリミティブを使用した CG 画像作成を、WWW にて試験的に公開している (<http://hawk.ise.chuo-u.ac.jp/student/person/anagano/ez-ratels/ez-ratels.html>) ので、お試しいただきたい。

謝辞 画像をご提供いただいた、日本アイ・ピー・エム(株)青野雅樹氏、宮田一乗氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 大石, 牧野: グラフィックス, 日本評論社 (1994).
- 2) 中嶋: 3 次元 CG, オーム社 (1994).
- 3) 中前: ここまできたリアリズム—四半世紀の進展—, PIXEL, No. 114, pp. 133-142 (1989). (平成 8 年 10 月 31 日受付)



伊藤 貴之 (正会員)

1968 年生。1990 年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1992 年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム(株)入社。現在、同社東京基礎研究所にて、計算機による形状処理および画像生成に関する研究に従事。



牧野 光則 (正会員)

1964 年生。1987 年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1992 年同大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1991 年～1992 年同大学助手。1992 年より中央大学勤務。現在同大学理工学部助教授。非線形システムの数値解析およびコンピュータ・グラフィックスに関する研究に従事。平成 3 年度電子情報通信学会論文賞、第 3 回 NICOGRAPH 論文コンテスト佳作ほか受賞。電子情報通信学会、日本応用数理学会会員。