TUTORIAL
SERIES

コンピュータグラフィックス(I)

講座

横井茂樹 安田孝美

横井茂樹, 安田孝美: 正員 名古屋大学工学部
情報工学科Computer Graphics [I]. By Shigeki YOKOI and Takami YASUDA, Members (Faculty of
Engineering, Nagoya University, Nagoya-shi, 〒464 Japan).

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) は過去 20 年くらいの間に急速に進歩・普及し、我々にとって身近なものになった。現在では、TV のコマーシャルやゲームなどで一般の人々の間にもコンピュータグラフィックスが浸透している。これは、CG 技術の着実な積み上げと計算機技術自体の進歩により実現されてきたと思われる。CG が物珍しさで人の目をひく時代は終わって、現在は情報処理の一つの重要なツールとして定着してきているように思われる。CG の技術はこれまでにかなりの蓄積が得られており体系化や標準化も進められている。本講座では、3 回に分けて、CG 技術の現状を総括的に述べると共に研究・開発の動向について解説する。今回は、まず第 1 回目として CG の研究の流れ、原理、装置および標準化の現状について解説する。続いて、2 回目には CG の基本手法全般について解説を与え、3 回目には CG 技術と応用分野の最近の動向について述べ、これからの展開について展望する予定である。

2. コンピュータグラフィックスの歴史

CG の研究、開発は自然発生的に行われるようになったため、正確にはいつから始められたかは明確ではないが、最初のまとまった研究がアメリカの MIT のグループで行われた。MIT では NC 工作機械の制御を行うための言語である APT- II を 1957 年に開発したが、この制御のためには、コンピュータによる図形処理が必要であった。MIT では更に 1959 年ごろより、CAD (Computer Aided Design) の概念を提唱として研究・開発を始めた、このグループの研究の中で CG の可能性を鮮明にした特筆すべき研究として、I.E. Sutherland の SKECHPAD システムの研究がある⁽¹⁾。これは、ディスプレイ上で対話的に図形を描くことができるシステムであり、コンピュータが図形を描く道具として使えることを実証した点で注目を集めた。この時期はディスプレイあるいはプロッタを利用した線画によるコンピュータグラフィックスあるいは CAD システムの研究が進み、1967 年には、MIT の S.A. Coons により自由曲面の生成の基礎となる Coons パッチの理論が表されている⁽²⁾。

1960 年代の後半から、ハーフトーン画像 (面画表現) の生成技術が模索され始めた。1966 年に K. Knowlton らは、写真の濃淡をラインプリンタの文字や記号で表現した作品 "nude" を発表している。同じ年に Sutherland は CG による 10 の未解決の問題を述べている⁽³⁾が、そ

予 定 目 次

- 〔I〕 コンピュータグラフィックス (3月号)
- 〔II〕 コンピュータグラフィックス (5月号)
- 〔III〕 コンピュータグラフィックス (6月号)

の中でもハーフトーン画像の生成の問題を提示している。1968年には初めて、IBMのA. Appelがレイキャスティング法によりハーフトーン画像の生成を行った⁽⁴⁾。この面画生成の技術は写真のようなリアリスティックな画像を生成できるため、CGの応用領域を大きく広げ、映画やTVのCF、アート作品制作など新しい分野を開く革新的な技術であった。このことは、広く研究者の注目を集め、1970年代には面画表現の研究におおくの努力がなされ、基本的な手法はほぼこの時期に確立された。なお、1969年に設立されたACM（アメリカの計算機関係の学会）の部会としてSIGGRAPH（Special Interest Group on Graphics）はCGに関する論文発表やアニメーション作品、CG機器のデモの場としてCGの普及に大きく貢献した。

このような基礎技術をもとに、1980年代にはCGが急速に進歩・普及し、映画やTVのコマーシャルなどにしばしば利用されるようになり一般の人々にもポピュラーになっていったのは周知のことと思う。しかしながらこれでCGの研究が終了したというわけではなく、80年以降もより複雑な対象やより精密な表現手法の研究が進められ、フラクタルによる自然物形状の生成、レイトレーシング手法、物体の精密な反射モデルの開発などますます高度な映像表現が開発されていった。また、ハードウェアの進歩により高速な画像生成が可能となったことも一因でコンピュータアニメーションに関する研究も活発化し、特に、人間の表情や動きの表現、物理法則に基づいた物体の動きの表現などにおける研究が盛んになった。

3. コンピュータグラフィックスの 応用分野

CGはゲーム、映画など娯楽的な応用が注目されがちであるが、情報の視覚化の手段としてさまざまな応用分野が存在し、社会の情報化の進展に伴い情報の把握において不可欠のツールになりつつある。以下に主な分野を紹介する。

(1) ビジネス応用

ビジネスに用いられるさまざまな数値・系列データを図・グラフの形で表現する。これは、ビジネス情報の効率的把握のためには不可欠になっている。CGは、商品の説明図や企業のプレゼンテーション映像などにも応用される。

(2) 設計 (CAD)

機械、プラント、ファッション、商業、建築、インテリア、都市計画などさまざまなものを設計するために用いる。設計図、完成予想図などを作る。

(3) シミュレーション

航空機の操縦訓練のためのフライトシミュレータ、流体、核融合などの数値シミュレーション結果の表示、分子構造の合成モデルの表示など各種のシミュレーションの結果を人間に提示する。

(4) 医学

種々の医用画像を医師が見やすい形で提示する。特に断層像（X線CT、MRI（核磁気共鳴画像）など）の系列から3次元情報を抽出し、医師の診断・治療に役立てるシステムの開発が最近盛んである。また、基礎医学分野では、顕微鏡画像、連続切片画像など3次元情報を含んだ画像が多く存在し、それらの解析における有用な道具としてCGは期待されている。

(5) 教育

直接的には、造形、色彩、幾何、図形などの教育に有用であるのは当然であろう。さまざまな物理現象を動画で示すことも人間の理解の大きな助けとなろう。また、一般的なCAI（コンピュータ支援教育システム）の中で、人間と機械との対話部分でCGは大きな役割を果たすと思われる。

(6) アニメーション

アニメーション映画、コマーシャルフィルム、番組タイトルなどの動きのある画像を作る。人間が制作する場合の補助を行う目的のシステムと、完全に画像全体を計算機で生成する目的のシステムの両方が用いられる。

(7) ビジュアルデザイン・芸術

従来、絵筆で描かれていたデザインをブラウ

ン管上でライトペンなどにより行うペイントシステムが開発され、普及しようとしている。文字のデザイン（タイポグラフィ）などにも計算機が活用されようとしている。更に、非常にリアルで純粋な人工画像が生成できる点を利用して、全く新しい芸術（スーパーリアリズムなど）に挑戦しようとしているアーティストもいる。

(8) 娯楽

各種のテレビゲームが花盛りだが、これらにおいてもCGが重要な役割を果たしている。最近では2次元的なものから3次元へ進展してきている。博覧会やテーマパークなどで人気のある大型映像、体感映像に関してもCG映像の利用の比重が高まっている。

(9) ニューメディア関連

知的映像通信において符号化した画像データからCGを利用して画像生成が行われる。また、ビデオテキストなどの画像データの作成に利用される。

4. コンピュータグラフィックスの原理

CGの装置としては、CRT（ブラウン管）に2次元メモリ（フレームバッファメモリ）を持たせたグラフィックディスプレイ装置が通常利用される（図1）。この装置は、CRT画面をメッシュに分割し、各メッシュに表示させるための色、明暗の情報をフレームバッファに記憶するものである。フレームバッファを高速に読み出しながら画面に順次表示することにより、画面全体に色・明暗のついた画像が表示できる。つまり、表示したい色、明るさをメッシュごとに数値でフレームバッファに与えればそれが実際に画像として観察されるわけである。色を表現できるディスプレイ装置は、RGB三色のフレームバッファを備えており、それぞれの色成分の値を同時にバッファから読み出しながら、その値に応じて画面上のRGB3種の蛍光体を光らせることにより任意の色を表現できる。

このディスプレイ装置を用いて3次元物体を表示するのは次のようにして行われる。表示すべき3次元物体に対し、ある視点から仮想的な

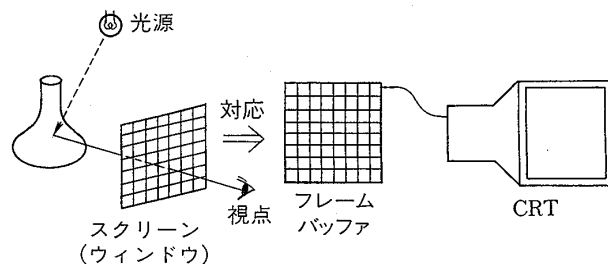


図1 コンピュータグラフィックスにより3次元物体を表示する原理

スクリーンを通して観察することを想定する。このスクリーンを細かいメッシュ（画素）に分割して、各メッシュごとに観察される明るさを計算する。この明るさはちょうどそのメッシュの位置に観察される物体表面の点で視点の方向に反射される光線の強さに比例したものになる。そこで、どこかの位置に光源をおいたと想定して光が物体表面で反射してくる強さを計算すればよいことになる。このようにして、スクリーン上の各メッシュの明るさを（色も含めて）計算すると、スクリーン上に観察される物体のイメージが数値として与えられることになる。従って、この数値データをディスプレイ装置のフレームバッファに与えてやれば、それが実際にイメージとして画面上に表示される。

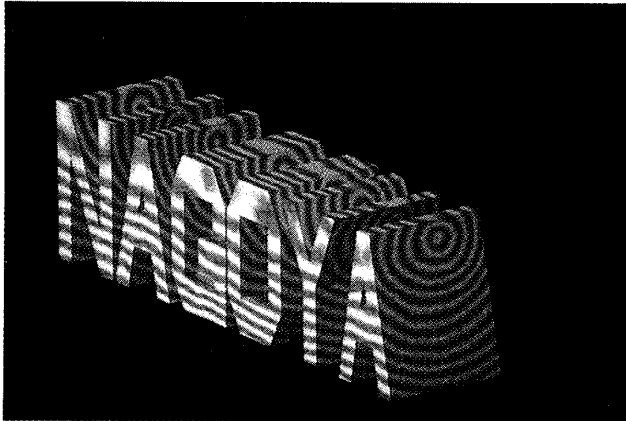
このとき、物体の性質（材質）に応じて反射の仕方が異なるので、その性質を組み込んだモデル（レンダリングモデル）に基づいて反射計算をすれば異なった特徴をもつ物体を表示できることになる。なお、3次元シーンのリアルなイメージを生成するためには、このほか、さまざまな光源の状態（点光源、線光源、面光源など）や影の発生や空中での光の減衰効果などのモデル化も必要である。

コンピュータグラフィックスによる生成画像の例を図2に示す。

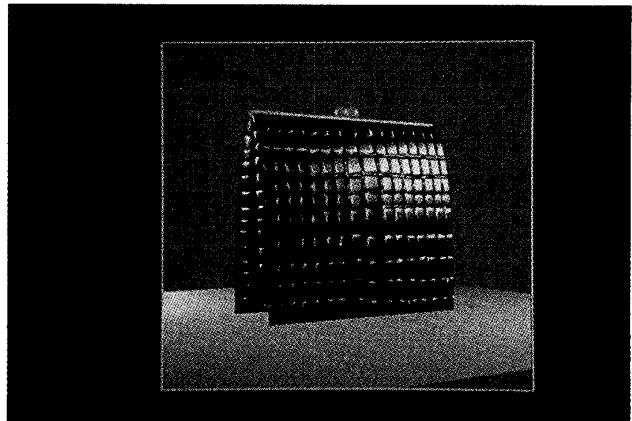
5. コンピュータグラフィックスのための装置

画像表示装置を中心として以下のような装置が用いられる。

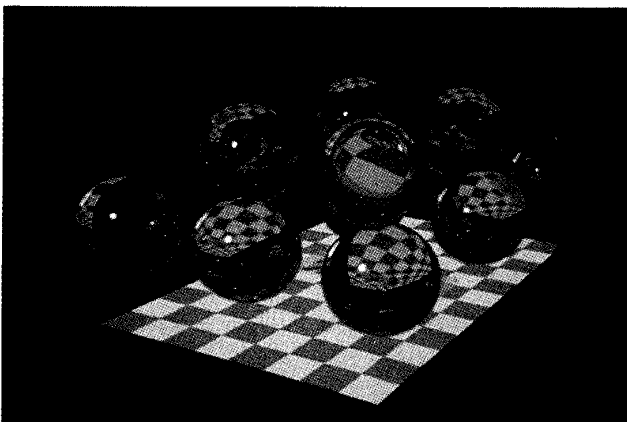
- (1) 図形（座標）入力装置



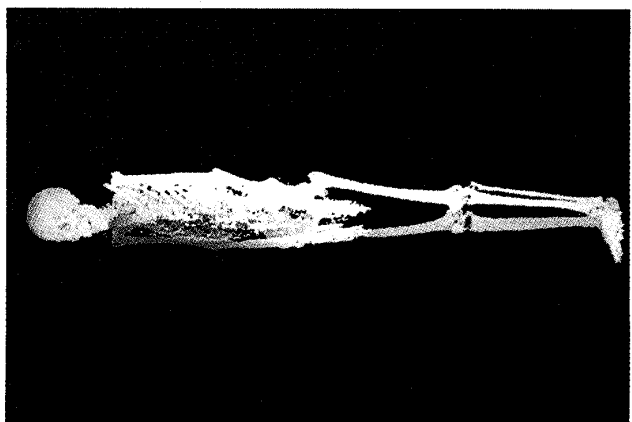
(a) フラクタルを応用した木目パターンの生成



(b) ポロノイ分割を応用したワニ皮パターンの生成



(c) レイトレーシングによるダイヤモンド球とガラス球(中央)の表示



(d) CT装置により計測した古代エジプトミイラの3次元像

図2 コンピュータグラフィックスによる生成画像の例

線図形を入力する装置としてはマウスのほか、より精度の高い入力装置としてディジタイザ、タブレットがある。例えば、電磁誘導方式のディジタイザでは X 軸と Y 軸のセンスラインが平面状に並べられている。これにコイルが内蔵されたスタイラスペンで位置を指定すると、その位置にあるセンスラインに電磁誘導により電流が流れる。この電流が発生したラインの起電力が X 、 Y 走査回路を通じて演算回路によりデジタル値に変換され X 、 Y 座標値が求められる。磁気ひずみ方式、静電結合方式、光学方式などもある。このほか、ジョイスティック、トラックボール、ダイヤルなどがアナログ量を入力するのに用いられる。

最近では3次元座標を入力する装置も実用化されつつある。磁気センサにより3次元の位置と方向を入力するディジタイザや手袋にセンサを

とりつけて手の位置や動きを入力するデータグローブなどの製品が利用できるようになっている。

(2) 画像入力装置

直接3次元のシーンをイメージとして入力するTVカメラや、写真や印刷物を画像として入力するイメージスキャナなどが用いられる。

(3) 画像表示装置

前述のグラフィックディスプレイ装置によりCG画像が表示されるが、最近ではコンピュータとディスプレイ、ネットワーク機能をまとめたワークステーションが普及し、CGの装置として一般化しつつある。また、リアルタイムインタラク션을可能にする非常に高速な画像生成を行うグラフィックスプロセッサの開発が盛んである。これらの装置はパイプライン方式や並列処理を利用して画像生成の高速化を計

ている⁽⁵⁾。

(4) 画像出力装置

紙面などに画像を出力するためのハードコピー装置にはいくつかの方式がある。まず、感熱紙や放電破壊紙、電解記録紙など、紙に特殊な処理をしたものを用い、これに化学変化を起こさせて、色や濃度の変化を表現するものがある。これに対し、普通紙を利用して画像を出力するものは用途が広い。電子写真方式では、光導電性材料の層をもつ感光板にコロナ放電によって一様な帯電を施し、出力するイメージの光学像を与えて光の当たった部分の放電を行い電荷による像を形成する。これにトナーを吸着させて感光板上に像を作り記録紙に転写する。インクジェット方式は、液体状のインク粒子をノズルから噴出し、これを電界を制御して偏向させ小さい穴をとおして紙に吹き付ける。

6. コンピュータグラフィックスの標準化

CGの普及につれて各種のグラフィックス機器やシステムが開発されつつある。それらのためのソフトウェアが無秩序に開発されたのでは利用者にとって大変不便になるため基本的な部分の標準化を行い、ソフトウェア、機器間の互換性を保つことが重要になってきた。1970年代中ごろから、アメリカのACMのSIGGRAPHや西ドイツの標準化組織のDINなどがグラフィックスの標準化について検討を始めた。1976年に開かれた国際情報処理連盟(IFIP)がフランスで開催した標準化に関する会議において標準化の方向性について合意が得られ、それを基にして国際標準化機構(ISO)においてCGに関する国際標準規格の作成作業が行われ、GKSが国際規格として定められた⁽⁶⁾。更に、GKSの規格が固まってくると共に周辺や拡張に関する標準化が進められてきた。標準規格には大きく以下に示す3種類のものが考えられている。

(1) 応用プログラムインタフェースの標準
GKSやPHIGSなどの利用者向け(応用)プ

ログラムの標準化。これは中核系標準ともよばれる。

(2) 周辺インタフェースの標準

中核系標準と実際の装置とのインタフェースを規定したり、図形データのファイル形式を規定することによって異機種間でのデータ転送を可能にする。

(3) 基盤標準

多くの標準インタフェースの間の関連性や位置づけを行ったり各標準の適合試験(検証)を行うメタ(より高いレベルの)標準。

6.1 GKS (Graphical Kernel System)

2次元グラフィックスの国際標準としてISOが1985年に規定したグラフィックスの中核部分の標準である。GKSの機能としては制御、出力、変換、セグメント、入力、メタファイル、問い合わせ、ユーティリティ、エラー処理を備えている。これらのうち主要ないくつかの機能を以下に紹介する⁽⁷⁾。

(1) 図形出力機能

図形出力のための機能である。これは出力要素とその属性によって定義される。基本図形としては折れ線(polyline)、マーカ列(polymarker)、テキスト(text)、図形塗りつぶし(fill area)、画素列(cell array)、一般作画要素(generalized drawing primitive)から構成されている。各々の出力要素は図形的要素を表す幾何属性とそれ以外の非幾何属性とをテーブルで記述する形で表現される。例えば、折れ線プリミティブは、線種、線幅、カラーインデックスなどをまとめて束にしたバンドルテーブルとして表現し、これに色の要素を記述したテーブルをつなげて表現するようになっている。これらのテーブルの内容を自由に変更することにより自由な図形の表現が可能となっている。

(2) 図形入力機能

図形を入力する装置を機能の内容によって分類し、その機能を表す名前をつけて利用できるようになっている。論理デバイスとしてはLOCATOR(カーソル、タブレット)、STROKE(タブレット)、VALUATOR(ダイヤル、キー

ボード), CHOICE (ファンクションキー), PICK (ライトペン), STRING (キーボード) が用意されている。

(3) セグメント機能

出力要素をグループ化してセグメントとして定義することにより, まとまった図形を単位として, 生成, 変換, 属性データの変更を可能にしている。

(4) 座標変換機能

ワールド座標系で定義された図形は, 表示ウィンドウの座標系である正規化デバイス座標系に変換され, 表示画面に対応するデバイス座標系に変換される。これらの座標系間の相互変換を行う機能である。

6.2 GKS-3D (GKS-3D extension)

GKS の 3 次元拡張版で, 1988 年に規定された。主な拡張機能は以下のとおり。

(1) GKS における各種座標系を 3 次元に拡張している。更に, 隠線・隠面処理, 透視変換のために正規化投影座標系とよばれる座標系が用意されている。

(2) 隠線・隠面処理のための機能が付加されている。

(3) GKS で座標値を返す LOCATOR と STROKE が 3 次元入力へ拡張されている。

6.3 PHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System) と PHIGS

PHIGS は 3 次元グラフィックス標準で 1989 年に ISO が制定。図形の階層的構造化や動的表示機能の強化が主な目的である。主な特徴を以下に示す。

(1) 図形の階層的データ構造

図形データはストラクチャ (構造体) とよばれるデータ単位の階層的ネットワーク構造となっている。ストラクチャには図形の出力基本要素や属性などを含み, 先頭のストラクチャ要素から順に表示していく。ネットワークにおけるストラクチャの関係を解釈して表示することにより, 物理的に関連性のある 3 次元物体の動的な表示を容易に行うことが可能となる。

(2) 図形データ編集

ストラクチャのデータはすべて中央ストラクチャ領域に格納されて構造の変更や内容の更新, 検索などの処理を受ける。GKS ではセグメント単位でのみ編集可能であったが, PHIGS ではストラクチャ内の要素単位で自由な編集ができる。

(3) ストラクチャの保管

ストラクチャネットワークを外部ファイルに保管することにより, 図形のデータベース化を実現できる。

PHIGS+ は PHIGS にシェーディング (陰影づけ) やライティング (照明) などのレンダリング機能を付加したものである。

6.4 CGM と CGI

CGM (Computer Graphics Metafile) はグラフィックス情報をファイルの形で表現し, データの記録, 異機種間でのデータ交換を可能にする符号化を目的に, 1987 年に国際標準として制定された。符号化法としては, 2 進符号化 (効率がよい), 文字符号化 (ファイル転送や通信に適する), テキスト符号化 (内容が可読である) の 3 種類がある。

CGI (Computer Graphics Interface) は GKS, PHIGS などの応用プログラムとグラフィックスシステムの装置依存部との周辺インタフェースを規定する標準規格である。

6.5 言語統合

GKS, PHIGS などの応用プログラムの各機能をプログラミング言語からよぶために必要な仕様 (関数名, パラメータの定義, マクロ定義など) を定めたものである。対象となる標準には GKS, GKS-3D, PHIGS, CGI などがあり, プログラミング言語には FORTRAN, Pascal, Ada, C がある。

6.6 基盤標準

GKS や CGM などはグラフィックスにおける概念体系と機能の集合を定めるものであり意味標準と呼ばれる。これらの意味標準の作成と運用を支援するための標準として基盤標準が検討されている。

(1) 検証システム

あるグラフィックス標準に基づいて実現されたシステムやソフトウェアパッケージが実際にその標準に適合しているかどうか検証できれば、利用者が安心してパッケージを利用できることに加え、開発者にとってもテスト作業の軽減などのメリットがある。検証方法や検証ツールの検討が行われている。

(2) 参照モデル

グラフィックス標準系全体に関し、各標準の関連性や位置づけを行い標準全体の大局的な枠組みを与えるための参照モデルが検討されている。

文 献

- (1) Sutherland I.E. : "SKECHPAD : A Man-machine graphical communication system", Proc. 1963 AFIPS Spring Joint Computer Conference. pp.329-346 (1963).
- (2) Coons S.A. : "Surfaces for computer aided design of space forms", MIT Project MAC, TR-41 (1967).
- (3) Sutherland I.E. : "Ten unsolved problems in computer graphics", Datamation 12, 5, p.22 (1966).
- (4) Appel A. : "Some techniques for shading machine-

rendering of solids", Proc. 1968 AFIPS Spring Joint Computer Conference, pp.37-45 (1968).

- (5) 吉田, 成瀬 : "コンピュータグラフィックス用プロセッサの動向", 情報処理, 29, 10, pp. 1109-1114 (1988-10).
- (6) 川合 慧 : "コンピュータグラフィックスにおける標準化とその動向", 情報処理, 29, 10, pp. 1214-1222 (1988-10).
- (7) 花村義久 : "コンピュータ・グラフィックス国際標準規格GKS", CAD/CAM キーワード, 図形処理情報センター, pp.140-145 (1983).



よこい しげさき
横井 茂樹 (正員)

昭46名大・工・電気卒。昭52同大学院博士課程了。同年同・工・情報・助手。昭53三重大・工・電子助教授。昭57名大・工・情報・助教授。現在に至る。画像処理、コンピュータグラフィックスの基礎手法とその医学応用に関する研究に従事。日本ME学会、日本形成外科学会、情報処理学会、コンピュータグラフィックス学会各会員。



やすだ たかみ
安田 孝美 (正員)

昭57三重大・工・電気卒。昭62名大大学院博士課程了(情報工学専攻)。同年同工学部情報工学科助手。この間、日本学術振興会特別研究員(昭和61年)。コンピュータグラフィックス、医用画像の3次元表示とその応用に興味をもつ。情報処理学会、日本ME学会各会員。