

解説



# フライトシミュレータにおける コンピュータグラフィックス†

梶原 景範††

## 1. はじめに

航空機の操縦訓練や新しい航空機の開発に、フライトシミュレータが重要な役割を果たしている。フライトシミュレータとは一言でいうと、コンピュータ技術やメカトロニクス技術を用いて、航空機の操縦時にパイロットが体験する視聴感覚や加速度感覚を実飛行しながらに模擬する装置である。

図-1 は大型輸送機用フライトシミュレータの典型的な外觀図である。模擬操縦席が6自由度の動揺装置の上に設置され、操縦席の窓外には模擬視界装置の表示装置が取り付けられ、操縦席の後部には教官席が配置されている。これらを制御するためのデジタルコンピュータと特殊なエレクトロニクスからなる演算処理部が、後方のコンピュータ室に設置されている。

図-2 はフライトシミュレータの構成概念である。実航空機と全く同じように作られた模擬操縦室、実飛行と同様な感覚を発生させる操舵反力発生装置、機体運動の方程式を実時間で解くための演算処理装置、訓練問題を設定したり飛行状況をモニターするための教官用コンソール、機体運動による加速度感を模擬する動揺装置、エンジン音や各種警報音を電子的に合成する擬音発生装置、窓外光景の映像を発生する模擬視界装置、持続加速度感を模擬する G シート/G スーツ（これは主に戦闘機用シミュレータに用いられる）などから構成される。

模擬視界装置はビジュアルシステムとも呼ばれ、現在ではコンピュータグラフィックス (CG) 技術を用いて実界（たとえば、空港やその周辺の地形）の数値モデルからリアルタイムでその映像を発生している。

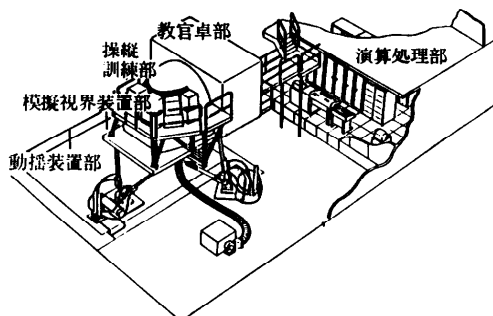


図-1 大型輸送機用フライトシミュレータ

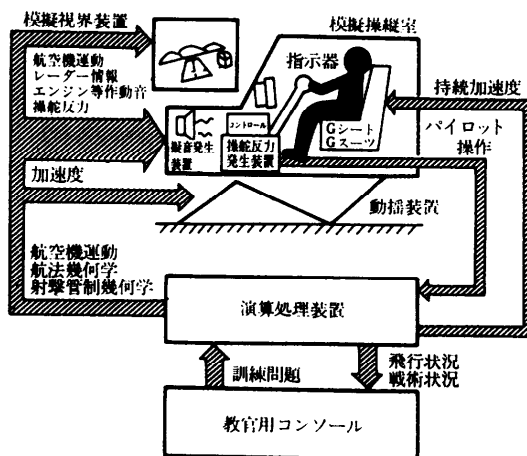


図-2 フライトシミュレータの構成概念図

## 2. ビジュアルシミュレーション

離着陸、編隊飛行、超低空飛行など高い技量を必要とする飛行において、操縦士は操縦に必要な情報の多くを窓外視界から得ているので、ビジュアルシステムはフライトシミュレータに不可欠である。

まず実用化されたビジュアルシステムは CCTV (Closed Circuit Television) 方式といわれる箱庭方式であった。すなわち、空港周辺の地形、地物、滑走

† Computer Graphics in Flight Simulator by Kagenori KAJI-HARA (Mitsubishi Precision Co., Ltd.).

†† 三菱プレジジョン(株)

路、空港施設などのミニチュアモデルを、模擬航空機の飛行に応じてサーボ機構により制御されたテレビカメラで撮影し、その映像を操縦士に表示する方式である。

この方式は比較的実感的な映像が得られる反面、大きな設置面積を必要とするにもかかわらず1空港しか模擬できないこと、広い視野を得るのが困難なこと、模型の照明のための電力消費が大であることなどの欠点があった。

1970年代になって、デジタルコンピュータおよびデジタル回路技術を用いて電子的に映像を合成するCGI (Computer Generated Imagery) 方式が実用化され、これらの問題は解決された。この方式はCG技術の進歩と相まって、今日のビジュアルシミュレーションの主流となっている。

しかし、当初はデジタルコンピュータの処理能力や集積回路の性能が低かったので、処理が比較的簡単な夜間映像発生専用であった。夜間の視覚対象は進入灯、消走路灯、誘導路灯などの航空管制のための灯火や街の灯などの光点が主であるので、ポリゴンの塗りつぶしや隠面消去の処理がほとんど不要である(図-3) [1146頁掲載]。

1970年代後半になって数百面のポリゴンと数千の光点の発生が可能となり、夜間および薄暮用へと発展した。エアラインの訓練用フライトシミュレータには、基本的にこの種のものが主に用いられている。

1980年代に入って数千面のポリゴンの発生が可能となり、昼間映像用のビジュアルシステムが実用化された。これによって軍用、開発研究などに用途が広がっていった。

CGI方式は、多数の空港または場面を容易に模擬できること、広い視野が容易に得られること、自航空機

の運動に制限がないこと、移動物体の模擬が容易なこと、アニメーションによる種々の特殊効果を比較的容易に発生できることが利点である。欠点としては、映像が比較的直線的、平面的で、物体の質感または自然のもつ不規則さが欠け現実感に乏しいことであるが、これも近年急速に改善されつつある。

### 3. ビジュアルシステムの例

ビジュアルシステムは映像発生装置と映像表示装置から構成される。いくらかリアルな映像を生成してもCRT上の映像を直接見たのでは、臨場感は得られない。実際と同様な視覚環境(物体の見える方向、その見込み角、運動視差、両眼視差など)を作り出すよう各シミュレータに適合した種々の表示方法が考案されているが、紙面の都合で表示装置については割愛する。

CGI方式の映像発生装置について、まず筆者の属する三菱プレジジョン(株)の三菱ビジュアルシステムについて少し具体的に説明する。次にエアラインの訓練用フライトシミュレータに主に使用されている、Singer社のIMAGE III Tについて説明する。最後に軍用フライトシミュレータに主に使用されているSinger社のATACDIGについて説明する。

#### 3.1 三菱ビジュアルシステム

三菱ビジュアルシステムは昼間、夜間および薄暮の映像を発生でき、離着陸のみならず編隊飛行、艦艇へのヘリコプタの着着などの比較的複雑な窓外視界情報を必要とする飛行の訓練にも使用されている。

##### (1) 構成

ブロック図を図-4に示す。視界計算装置、幾何計算装置、ビデオ信号発生装置および電源制御装置から構成される。視界計算装置は汎用のスーパーミニコンと保

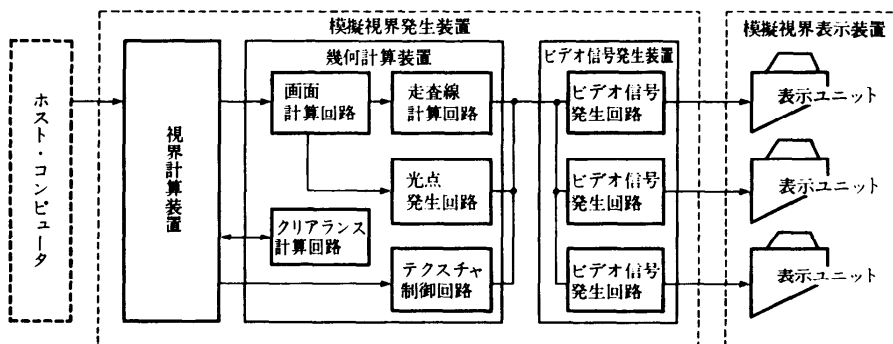


図-4 三菱ビジュアルシステムのブロック図

守整備用の制御パネルから構成される。幾何計算装置は、画面計算回路、走査線計算回路、テキスト制御回路、およびクリアランス計算回路から構成される。ビデオ信号発生装置は複数のチャンネルのビデオ信号発生回路を実装でき、各チャンネルはそれぞれ独立した方向の窓の映像を発生することができる。

### (2) 機能および性能

この装置では視覚対象物を多角形、多面体および光点の組み合わせとして数値モデル化して模擬する。モデルデータの構造はモデル化の詳細度に応じて階層状に構成されている。機体（視点）が位置および姿勢を高速に変化させても、時々刻々と視野に入ってくる物体を全モデルデータから選択し、物体までの距離に応じて適当な詳細度でその物体の映像を発生する機能を有する。この機能により模擬領域全体を記述する大量のモデルデータから常時最適な4,000エッジ（多角形の辺または多面体の稜）の映像を発生させることができる。

30画面/秒の画像更新レートで4,000エッジ+2,000光点の表示能力を有する。平行光によるフラットシェーディングおよびグローシェーディングをダイナミックに計算し、物体の立体感、方向感、曲面物体などを模擬している。滑走路面、地表、海面、空などにそれらに固有の不規則な模様（テキスト）をマッピングすることによって現実感、特に低高度における高度感や速度感を向上させている。奥行きに関する遠方をかすませ（フェーディング）、遠近感および気象状況の模擬を行っている。また、着陸灯による照明効果の模擬機能を有する。出力映像は1,000×1,300画素/画面の分解能を有する。指定された方向の物体表面までの距離を計算する機能（クリアランス計算機能）を有し、衝突の検知ならびに電波高度計、レーザ測距儀などの模擬を行うことができる。

視界計算装置には最大4台の幾何計算装置を接続することができ、その場合は全体で16,000エッジ+8,000光点の表示容量を実現することができる。また、映像の高速の応答を必要とする場合は画像の更新レートを60Hzで動作させることが可能である。ただし、この場合は表示容量は半分となる。この装置の出力映像例を図-5 [1146頁掲載]に示す。

### (3) 動作原理

基本的な作画方式は、隠面消去法としてリストプライオリティ法を用いたスキャンラインアルゴリズムである。リストプライオリティ法は大表示容量のビジュ

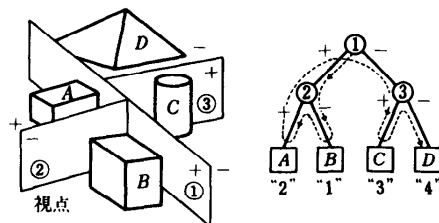
アルシステムに用いられている一般的な隠面消去法で、隠面消去のための処理の大半をオフラインで実施しておくことで高速の隠面消去が可能である。

このアルゴリズムの要点は視覚対象物を凸多面体に分割し、それらをすべて架空のセパレートプレーンで分離しておくことである（図-6(a)）。それらのセパレートプレーンをデータベース構造のツリーのノードに対応づける（図-6(b)）。一つのセパレートプレーンで分離された二つの物体に対して視点を与えられたとき、セパレートプレーンに関して視点と同一の側にある物体が他方の物体に対して隠面に関する優先順位がより高い。この性質を利用してツリー構造をソートすることによって高速に各物体へ優先順位を付すことができる（図-6(b)）。優先順位の高い物体に遮られたポリゴンまたはその部分を消去することによって、容易に隠面消去を行うことができる。次に各ブロックの機能について説明する。

視界計算装置は、外部記憶装置に複数のシーンデータを格納しておき、ホストコンピュータを経由して送られてくる教官の指令に従って、訓練地域の選択、昼夜間および薄暮の選択、気象状況の設定を行う。すなわち、モデルデータの選択および幾何計算装置への転送、カラーテーブル、フェードテーブル、テキストパターンなどのテーブル類のビデオ信号発生装置へのロードを行う。

また、時々刻々とホストコンピュータで計算されて送られてくる自航空機の位置および姿勢に従って、データベース座標から各チャンネルへの座標変換マトリクスを計算して、幾何計算装置における射影幾何の計算を制御する。この計算はCRTのフレームに同期して毎秒30回の割合で実行される。他の処理は非同期で実行される。さらに、視界計算装置はオフラインでデータベースの作成および変更にも用いられる。

幾何計算装置の画面計算回路は、視野のなかに入る



(a) セパレート・プレーン (b) データベース構造とプライオリティの計算

図-6 セパレート・プレーンとデータベース構造

表示対象物の選択、それらの物体に対する隠面消去のための優先順位の計算、ポリゴンまたは頂点の明るさの計算、物体を構成するポリゴンのスクリーン座標への変換、クリッピング、透視変換などの計算を行う。結果をエッジの集合として走査線計算回路に出力する。光点に関しては、優先順位をつけて光点発生回路に出力する。これらの計算はすべてフレームに同期して毎秒 30 回実行される。

走査線計算回路は、走査線とエッジの交点の位置、交点における明るさおよびかすみ具合（フェード）、明るさおよびフェードの走査線方向の変化率の計算、ならびに隠面消去の処理を行う。これらの計算は CRT の走査に同期して、毎フレーム 1,000 回実行される。

光点発生回路は、光点に関する座標変換、透視変換、光点輝度の計算などを行い、結果を優先順位とともにビデオ信号発生装置に出力する。これらの計算はフレームに同期して毎秒 30 回実行される。

テクスチャ制御回路は、テクスチャパターンをポリゴンにマッピングするための座標変換などのパラメータを計算し、各ビデオ信号発生回路に転送する。この計算はフレームに同期して毎秒 30 回実行される。

クリアランス計算回路は、指定された位置から任意の方向の物体表面までの距離を計算する。

ビデオ信号発生装置のビデオ信号発生回路は、1 視線方向（チャンネル）の映像のビデオ信号を発生する。物体を構成するポリゴンの画素ごとの色や輝度を計算し、ポリゴンと光点の隠面処理を行う。画素の色や輝度の計算においては、シェーディング、テクスチャマッピング、フェーディング、スポットライティング、エッジスムージングが行われる。計算結果は D/A 変換され同期信号と一緒に CRT に出力される。

### 3.2 IMAGE III T

この装置と同じクラスの装置として Rediffusion 社の SP3 T, McDonnell Douglas 社の Vital IV がある。これらの装置の描画方式の特徴は、ポリゴンはラスタスキャンで、光点はストロークスキャンで描画することである。この方法によって光点をラスタの分解能に影響されることなく精度よく（位置および大きさ）表示することができる。

IMAGE III T の特徴の一つはメインフレームのコンピュータがなく、多数のマイクロコンピュータで構成され、モジュール化されていることである。

この装置の概略の性能は次のとおりである。表示容量 250 サーフィスおよび 4,800 光点/チャンネル、画像

更新レート 50 フィールド/秒、隠面処理レベル 32/チャンネル、ポリゴン画像分解能 1,024×1,024 画素/画面、光点位置分解能 6,000×8,000、テクスチャの発生、霧などの気象の模擬などである。

この装置の構成を図-7 に示す。Database Processor Unit (DPU) とチャンネルの数だけの Image Processor (IP), Image Generator (IG) および Texture Generator (TG) から構成される。表示装置はキャリグラフィックシャドウマスク CRT (またはキャリグラフィックプロジェクタ) が使用される。IMAGE III T の出力映像例を図-8 [1147 頁掲載] に示す。

DPU はホストコンピュータから自機の位置および姿勢情報を入力し、その情報を基に各チャンネルに関して、視野の内部で視点に近いデータベースの選択、座標交換マトリックスの計算などを行って、その結果をそれぞれのチャンネルの IP に送る。また気象現象や特殊効果のための計算を行う。

IP は座標変換、クリッピング、透視変換などの幾何計算を行う。IG はビデオ信号の発生およびディスプレイの制御を行う。TG はサーフィスへのテクスチャマッピングを行う。

最近 IMAGE IV T という新バージョンが発表され、表示容量、テクスチャ (IMAGE III T は水平面にのみマッピング可であるのに対して IV T では任意のサーフィスにマッピング可)、半透明物体の表示能力などが強化または追加された。

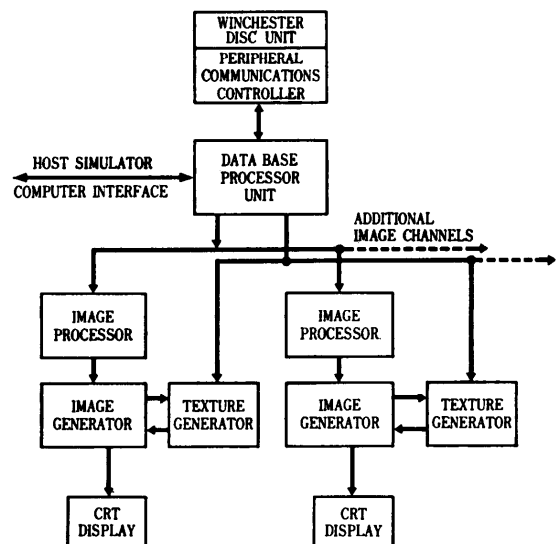


図-7 IMAGE III T のブロック図

### 3.3 ATACDIG

この装置は軍用ヘリコプタの超低空飛行の訓練用フライトシミュレータなどに使用されている高性能のビジュアルシステムである。この装置の描画方式はスキャンラインアルゴリズムによる純粋なラスタスキャン方式である。

この装置の概略の性能は次のとおりである。表示容量 12,000 エッジ/画面、画像更新レート 30 フレーム/秒、画像分解能 1,024×1,024 画素/画面、隠蔽処理レベル 1,024 レベル、任意ポリゴンに対するテクスチャの付与などである。ATACDIG の出力映像例を図-9 [1147 頁掲載] に示す。

この装置の構成を図-10 に示す。DIG Controller はスーパーミニコンピュータで構成され、ホストコンピュータとの間のデータ授受、データベース検索、オーバーロード処理などのシステム全体の制御を行う。

Priority Sectoring Processor は視野内の物体の選択およびプライオリティ付け、モデルの詳細度の選択などを行う。

Scanline Computer/Video Generator はエッジとスキャンラインの交点を計算し、その交点データを基に、シェード/フェードの計算を行って各画素の色および輝度を決定する。

Texture Generator はポリゴンへのテクスチャマッピングを行う。

### 4. 映像発生に関する最近の技術動向

CGI 方式のビジュアルシステムの性能が向上し、その有用性が明らかになるに従って、単に滑走路への離着陸のみではなく、ヘリコプタや戦闘機による対地攻撃のような航空機の高度な運用（ミッション）に関する訓練をもフライトシミュレータに期待するようになってきた。このような訓練を行う地域の景観を模擬するには、複雑な地形・地物、地表の状態、樹木、構造物、土煙など膨大な視覚情報を発生する必要がある。また、航空機はそのミッションを安全に効率的に遂行

するために、電波高度計、赤外線カメラ、レーダなどの地形や映像関係のセンサを装備しているので、窓外視界だけでなくそれらの装置の映像をも模擬する必要がある。

1980年代の後半に入って、このような目的の高性能なビジュアルシステムが相次いで発表された。Singer 社の MODDIG, Evans & Sutherland 社の CT-6, General Electric 社の COMPUSCENE IV などがそれである。これらは 10,000 ポリゴン（更新レート 30 画面/秒において）程度の表示容量、全ポリゴンに対するテクスチャの付与、半透明物体の表示、映像関連センサの模擬などの能力を有している（図-11, 12）[1147 頁掲載]。

これらの装置の作画方式は、前述のスキャンラインアルゴリズムに対してフレームアルゴリズムともいふべき方式である。すなわち、リストプライオリティ法により優先順位を付されたポリゴンを、順にフレームバッファに書き込んでいく方法である。優先順位の低いポリゴンから順に書き込む方が隠面除去の処理は単純であるが、高速処理とオーバーロード処理の点から優先順位の高い順にフレームバッファに書き込む方法がとられる。この場合、先にフレームバッファに書き込んだ優先順位の高いポリゴンを、後から書き込む優先順位の低いポリゴンが書き換えてしまわないように、マスクメモリが用意されていて、すでに書き込みが行われた画素に対してマスクが掛かるようになっている。

この作画方式の特徴は、並列処理に適していること、アンチエイリアシング処理が容易であること、半透明物体の処理が容易であること、作画方式と表示装置のスキャンが独立になることなどである。半透明物体の処理能力は、単に煙や土ほこりが発生できるというだけにとどまらず、表示物体の詳細度の遷移を自然にしたり、樹木のような輪郭線の複雑な物体を写真映像との合成によって発生するのに重要な機能である。この機能は、前述のマスクビットを拡張して透明度を表すようにすることによって可能である。

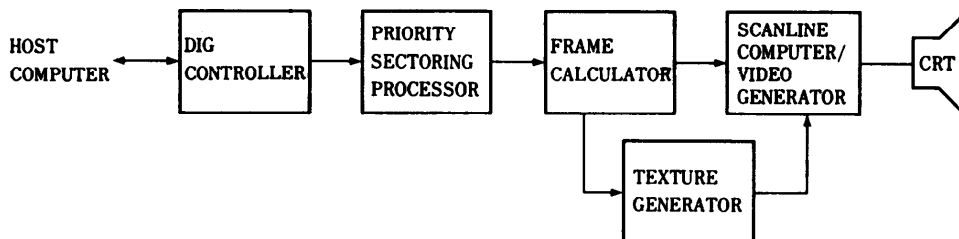


図-10 ATACDIG のブロック図

この方式は、並列処理技術、高性能のマイクロプロセッサおよび高速の大容量メモリの進歩にともなって、今後の映像発生主流になると考えられる。

## 5. おわりに

以上、フライトシミュレータにおけるCG技術の応用であるビジュアルシステムについて述べた。箱庭方式で始まったビジュアルシステムは、CG技術の進歩により現在ではCGI方式が主流となった。CGI方式は本来の汎用性、柔軟性に加えて、従来欠点とされていたリアリティにおいても箱庭方式に劣らないものが実現されるようになってきた。

では、CGすなわちCGI方式ビジュアルシステムかということ必ずしもそうではない。CGIの最大の特徴はリアルタイム性である。CGIはその必須条件下でシェード、フェード、テクスチャマッピング、トランスルーゼンシなどの技術を用いて、立体感、遠近感、方向感、時刻、気象状況、物体の視認性などをできるかぎり忠実に模擬することである。

ビジュアルシステムでは実界を模擬する膨大なデータベースのなかから、時々刻々と変わる状況に応じて、限られた処理能力で最適な映像を発生できるようにモデルデータを選択、制御するシーンマネジメントが重要である。映像の時々刻々の変化が自然であること（空間的かつ時間的なアンチエイリアシング）も特に重要である。

また忠実な視覚環境模擬のための膨大なデータベ

スを効率的に作成することが、ビジュアルシステムが高性能になればなるほど重大な問題となり、地図データからデータベースを自動的に作成する方式が研究され、一部実用化されている。写真からのデータベースの作成または実界の写真画像データとCG画像との合成などが実用化されていくと考えられる。

## 参考文献

- 1) Schachter, B. J.: Computer Image Generation, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York (1983).
- 2) Yan, J. K.: Advances in Computer-Generated Imagery for Flight Simulation, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 5, No. 8, pp. 37-51 (1985).
- 3) 梶原景範, 藤野 勝: フライト・シミュレータにおけるリアルタイム・イメージ生成, PIXEL, 8, 9, 11月号 (1985).
- 4) Singer Link-Miles 社プロローシャ: Image Production description.
- 5) Singer 社プロローシャ: Link Digital Image Generation Visual Systems.
- 6) Singer 社プロローシャ: Visual and Sensor Simulation from Link and Link-Miles.
- 7) Rediffusion 社プロローシャ: NOVOVIEW SP 3 and NOVOVIEW SP 3 T Visual Simulation Systems.
- 8) McDonnell Douglas 社プロローシャ: Vital IV CGI Visual Simulation.

(昭和63年6月7日受付)