

〔特別講演〕

コンピュータ・アニメーション

NHK放送技術研究所画像研究部部長

沓 沢 淳之助

1. まえがき

コンピュータ・アニメーションは、さまざまな動きを表現する数多くの絵をコンピュータの力を借りて発生する技術である。これを実現するには表示対象の形、動きの情報をコンピュータに入力し多数の計算をしなければならない。コンピュータ・アニメーションの技術は幅広く利用されているが、次のような分野が代表的である。

- ・シミュレーション：例えば、地震波に対するビルディングの動特性をシミュレーションによって計算し、その結果を動画として表示する。数値だけでは判断の難しい現象を把握するのに有効である。
- ・シミュレータ：飛行機のパイロットなどの訓練装置を意味する。実際の操縦席を模擬したシミュレータの席に座ってパイロットが操作すると、目の前の光景が高速に変化する。実際の飛行機を使わないで種々の状況の訓練ができる。
- ・映画、テレビ：この分野でも日常的にコンピュータ・アニメーションの技術が利用されている。映画では、「トロン」や「ゴルゴ13」などが有名である。テレビでは、番組のタイトル、コマーシャルに多用されているが、番組の中でもいろいろな場面で利用されている。ここでは特に放送分野におけるコンピュータ・アニメーションの利用について述べる。
- ・テレビゲーム（ビデオゲーム）：絵柄や動きに制約があるとはいえ、これらもアニメーションの一種と考えられる。リアルタイム動作が特徴である。

放送の立場から見たとき、映像の新鮮さと省力化がコンピュータ・アニメーションの魅力といえる。コンピュータが規則的に発生する絵は、手では描き表せない形や色を持っており、新鮮な印象を我々に与える。さらに、滑らかな動きや形状の変化は人手では実現できないものがある。また、電子的に発生される色は極めて美しく衝撃的で、芸術の分野への影響も大きい。

コンピュータは各種のデータを短時間にグラフ化することができる。国会議員選挙の開票速報番組では、時々刻々変化する開票状況を即座にグラフ化して放送している。各種の状況を数値の表ではなく、グラフで表現することは状況の把握を容易にする常套手段であるが、データの変化が速い場合にはコンピュータに頼らざるを得ない。番組の中で質問を出し、電話線を通じて解答を収集し、結果を集計してグラフに表すアンケート番組も実施されている。さらに、従来のアニメーション制作過程の中で、線画の内部に着色する作業や、一コマコマの絵を撮影する機械的な作業の自動化が進められている。このような自動化によって、アニメーションの制作を少人数で行うことができる。また、表示対象の形や動きの情報をデータベース化し、再利用することによって、退屈で時間のかかるデータの入力作業を省略することもできる。

2. コンピュータ・アニメーション・システム

コンピュータ・アニメーション・システムの概念的な構成を図1に示す。コンピュータとしては、小さなパーソナル・コンピュータから超大型コンピュータCRAY-1まで多種種類の機械が使用されている。

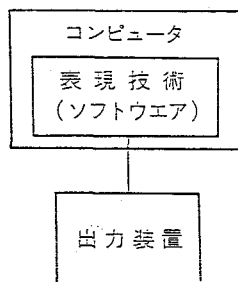


図1 コンピュータ・アニメーション・システムの概念図

直線、曲線、曲面など図形要素の表示、これらの表面の材質感の表現、或いは時間的な変化は主にソフトウェアによって実現される。新しい表現効果や処理時間の短縮を目指して次々に新しい方法が提案されている。

さまざまな図形或いは画像出力装置があるが、線画表示装置と面画表示装置が代表的である。また、CRT（ブラウン管）に表示する装置が多く使用されている。初期のコンピュータ・グラフィックスでは、線画表示装置が優勢であった。直線は2個の端点の座標で、円は中心座標と半径で指定するなど、少数のデータで複雑な形状を表すことができる。したがって、コンピュータの負担は少なく、コンピュータから出力装置に転送するデータ量もわずかであり、表示内容を高速に変更することが容易である。精密な図面を対話方式で入力したり修正する場合に適している。しかし、濃淡や色を持った図形の表示は難しい。

表示画面の1点1点の明るさや色を自由に指定できれば、テレビカメラで撮影したと同様な面画を表示することが可能である。このような面画表示には膨大なデータ量を必要とし最近までは実現が困難であった。しかし、LSI技術の進歩により、高速大容量のメモリを安価に利用できるようになった結果、パーソナル・コンピュータにいたるまで面画表示が常識となってきた。

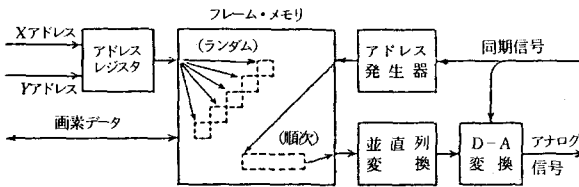


図-2 フレーム・メモリ

1画面分の画像データを記憶するメモリを、フレーム・メモリ(frame memory)と呼んでいる(図2)。放送の分野で使用しているフレーム・メモリは512×512画素以上の容量を持っているものが多く、テレビ・カメラの画像に匹敵する高品質の表示が可能である。1画素を構成するビット数によって、表現できる濃淡のレベルや色の種類が決まる。1ビットでは2種類、3ビットでは8種類、そして8ビットでは256種類の濃淡や色を表現できる。自然の色を違和感なく表現するため、R,G,B3原色の成分ごとに8ビット、計24ビットの画素データを持ったフレーム・メモリもある。

フレーム・メモリの画素数に関係なく、1秒間の表示回数は一定でなければならない。テレビの場合、同期信号のタイミングに従って30フレーム/秒の速度で表示が行われる。1走査線上に512画素を表示するとき、1画素のアクセス・タイムは約100nsecとなる。このよう

に高速なメモリ素子の利用は価格の点で難しく、もっと低速な素子を使い、複数のメモリ素子からデータを並列に読み出し直列に変換して表示する方法をとることが多い。表示する際のフレーム・メモリへのアクセスは、左から右、上から下へと規則的に行うため、このような方法で見掛け上のアクセス・タイムを高速化することができる。画素単位に直列になったデータは0-A変換器によってアナログ信号に変換されCRTに表示される。

一方、コンピュータからフレーム・メモリへの書き込みは、一般に不規則で画素ごとにランダム・アクセスができなければならない。したがって、全画面を書き換えるには0.1~5秒程度の時間を要する。表示とコンピュータからの書き込みは相互に干渉することなく同時に行えることが望ましい。フレーム・メモリの内容を参照して次の書き込みデータを決めることがあるため、コンピュータからフレーム・メモリの内容を読み出す機能を持っていることが多い。

3. コンピュータ・グラフィックスの表現技術

コンピュータ・アニメーションを実現する上で最も重要な技術はコンピュータ・グラフィックス技術である。汎用のグラフィックス・システムの上に数多くの表示手法が実現されてきた。コンピュータ・グラフィックスには、表示対象の形状などのモデル化法、陰線/陰面消去法、データの入力法など多くの問題がある。しかし、ここでは表示の手法に限定して説明する。

3.1 照明の原理

表示対象が立体的であるとき、それが立体的に見える要因の一つに照明効果がある。照明効果を無視すると、例えば、球面が円盤に見えてしまう。Bui Tuong Phongの照明モデルは次のように表される(図3)。

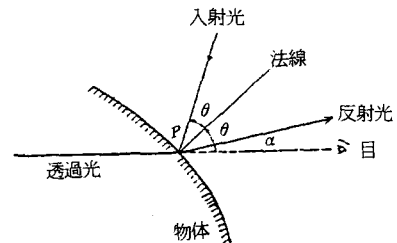


図-3 Bui Tuong Phongの照明モデル

$$E = A + R I_s \cos \theta + W(\theta) I_s \cos^n \alpha + T I_b$$

ただし、 I_s は入射光、 I_b は透過光を示す。

右辺の第1項は周囲光を表す。物体の置かれた環境に常に一定量存在する光と考えられる。第2項は拡散反射光を表し、物体の表面が光源に正対するとき($\theta=0$)最も明るく、平行になると($\theta=90^\circ$)この光の成分は目に到達しなくなる。光源からの光が物体の表面で全方向に等しく乱反射する現象を表している。物体の立体的な構造を表現するのに重要な働きを持ち、曲面を曲面らしく表示する効果がある。第3項は鏡面反射光を表し、物体表面で鏡面反射した光のうち視点に入る割合を決める。この項は一般にハイライト効果を示し、巾定数 n の値が大きいほど鋭いハイライトを生ずる。鏡面反射係数 $W(\theta)$ は、入射角 θ によって変化する。ガラスの場合、 $\theta=0\sim30^\circ$ のとき $W(\theta)$ はほとんど0であるが、 θ の増加とともに急激に増大し、 $\theta=90^\circ$ では1となる。第4項は透過光の成分を表し、透明効果を実現する。

3.2 スムーズ・シェーディング法

曲面を表示する際にも曲面上の各点で光の入射角を求め輝度を計算することにより、上記の照明モデルを適用できる。しかし、球面や円筒など単純な曲面を除き、一般に入射光と曲面上の1点のなす角度を求めるには計算時間が長くなる。H.Gouraud は簡便な方法で多面体モデルを使って曲面を表現する方法を提案した。

多面体が多面体と見えるのは、稜線の部分で面の明るさが不連続的に変化し、面内では同一の明るさを保っているからである。いま、ある頂点の周りの多角形の明るさの平均値をその頂点の明るさとし、頂点を結ぶ稜線上の明るさは二つの頂点からの距離に比例して決める。多角形の内部の明るさは、同様にして、走査線に交わる二つの稜線の明るさから求める。多面体全体にわたって、明るさは連続的に変化し曲面らしく見えるようになる。

3.3 透明物体の表示

光が透明な物体を透過するとき、必ず光が減衰する性質を利用して透明物体の表示ができる。物体が曲面の場合、式1の鏡面反射係数 $W(\theta)$ の変化による透過率の見掛けの変化を考慮すると、より現実的な表示ができる。すなわち、視線が表面に対して直角になっているとき透過率は最大で、ほとんど透明である。視線と表面が平行に近づくにつれ、透過率は急激に低下し、ほとんど不透明な物体となる。図4にその効果を示す。

3.4 マッピング手法

複雑な模様や不規則な凹凸を持った物体の正確な定義は難しく、またわずらわしい作業が必要となる。マッピ

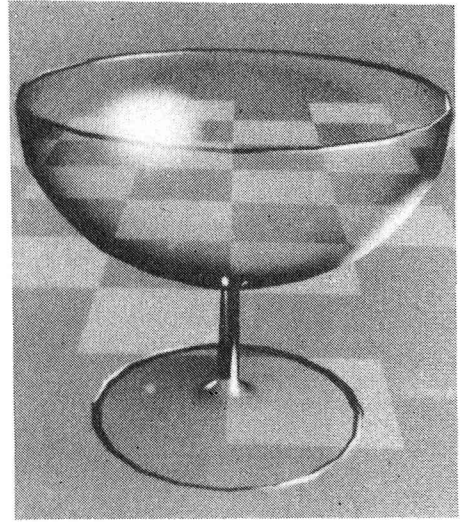


図-4 透明物体の表示

ング法を利用すると、物体の形と表面の模様を分離して扱うことができる。マッピング(mapping:写像)は、「写し絵」或いは「貼り絵」といった概念で、立体的な物体の表面に他の絵を写し込む操作である。

平面的な画像を物体の表面に写像するとき、その寸法や傾きが変わる。また、曲面に写像するには曲面の形状にそって元の画像を歪ませる必要がある(図5)。照明効果を考えると、曲面上の輝度の変化が写像された平面画像の輝度に反映しなければならない。

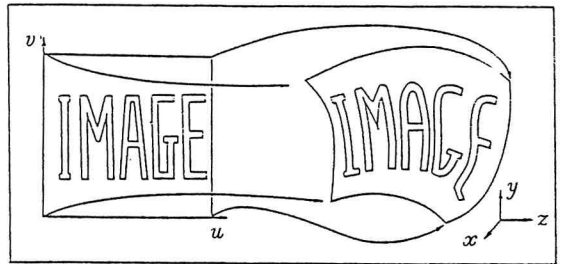


図-5 マッピングの原理

みかんの表面のように無数の不規則な凹凸のある表面を的確に表すことは困難である。凹凸を表す2次元の関数(しわ関数と呼ぶ)を定め、これに基づいて曲面上の輝度を変化するとあたかも曲面上に凹凸があるように見える。曲面を表す関数に従って曲面上の各点の入射光に対する角度を求めるが、この角度をしわ関数にに応じてわずかに変更する。元の角度よりも光源に向いた場合には明るく、光源とは逆方向を向く場合には暗くなる。この結果しわ関数に対応した凹凸の模様が表現される。

3.5 レイトレーシング

画像を生成するとき、物体の像をスクリーン（表示画面）へ投影するのが一般的な方法である。しかし、このような方法では物体表面に写る他の物体の影、レンズの屈折効果などの現象を扱うことが困難である。レイトレーシング（ray tracing: 光線追跡法）は、多くの光学的現象を統一的に扱うために考案された。

レイトレーシングの原理を図6に示す。視点とスクリ

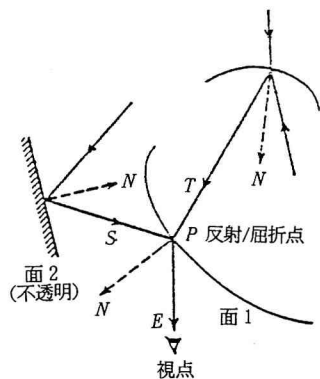


図-6 レイトレーシング法の原理

ーン上の1点（画素）とを結ぶ直線を考え、この直線と最初に交点を持つ物体を求める。反射の法則に従って、この点における入射光の方向を求め、さらに次の物体との交点を計算する。入射光の方向に光源があれば、反射点の輝度が決まる。入射光の方向に他の物体があれば、その交点の輝度が最初の交点の輝度となる。2番目の輝度はその点の入射光の方向をたどって決める。また、透明な物体に到達すると光は反射光と透過光の成分に2分され、それぞれの光線を辿って輝度を求め結果を合成する。

表示すべき対象物体が多い場合、レイトレーシング法は膨大な計算を必要とする。大型のコンピュータによっても数時間を要することもある。しかし、光学的な現象を精密に再現できるので、この方法を利用する例も多くなってきた。

3.6 フラクタル法

コンピュータで生成する画像は理想的な形を持っている。しかし、現実の世界に存在する事物はもっと不規則で複雑である。山の形を多くの多角形で近似的に表すことは必ずしも不可能ではない。だが、多角形の数には有限であり、非常に近い位置からこの山を見ると、平面しか見えないことになる。このような欠点を補い自然な形状

をどのような距離からでも再現する方法としてフラクタル法が考案された。

フラクタルは「統計的自己相似」という概念に基づいている。対象に対してどんどん近寄ると、対象の細部が見えてくるが、その形はもとの形と同じではないが良く似ているという性質である。これは山や地面など自然の景色の中ではよく見られることである。したがって、わずかなパラメータで対象の形を与え、細部は確率的な規則で生成するという方法をとることができる（図7）。

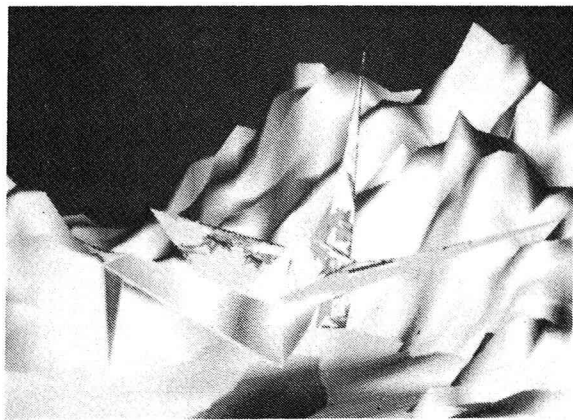


図-7 フラクタル法による山

4. 動画化の方法

これまでは主に静止画の生成法について述べてきた。アニメーションは内容のわずかに異なる静止画を多数発生して作られる。アニメーションを具体的に作る手法について我々がこれまで開発してきたシステムを中心に説明する。

4.1 リアルタイム動画表示システム

CANVASと呼ばれるシステムは、選挙の開票速報番組のように外部の状況の変化を即座に映像化して表示する目的で開発された。カラーで着色した面画を線画表示と同程度のデータ量で表現できるため、変化に対応する計算が容易で1秒間30フレームの速度で表示内容を変更することができる。

表示する図形は多角形で定義する。輪郭線を構成する各辺の位置を線分の二つの端点の座標値で指定し、この線分の右側の色を与える。表示に当たって、各走査線ごとにこれらの線分との交点を求め、交点に出会うごとに線分に指定された色を出力する。したがって、3角形は3本の線分データで定義できる。漢字はパターンを登録しておき文字コードで呼び出して表示する。図形と文字

の情報はホスト・コンピュータからコマンドの形で転送する。表示する色は、R,G,B 各5ビットで表され32768色を指定できる。表示例を図8に示す。



図-8 CANVASの表示例

最初に試作した装置では、表示する図形或いはアニメーションごとに、利用者がプログラムを書きコマンドを発生する方式をとっていた。したがって、アニメーションの実現には、専門のプログラムを必要とした。現在稼働中のCANVASは対話型の入力端末を持ち、デザイナーが自ら操作してアニメーションを制作している。

4.2 画像処理装置

CANVASはリアルタイムのアニメーションが可能であるが、その内容は比較的簡単なものに限定される。これはリアルタイムに動作する装置の宿命であって、いかに高速な回路を備え、並列処理を行っても全体の処理量には限界があり、表現できない複雑な内容が必ず存在する。例えば、CANVASでは曲面を表現する滑らかな色の変化を実現できない。

画像処理装置は曲面を含む複雑な表示内容を生成することを目的に開発した。また、膨大な画素データの発生を高速化するため、マイクロコンピュータを8台並列に動作させる方式をとっている。マイクロコンピュータのプログラムはホスト・コンピュータから変更することが可能で、目的に応じてさまざまな動作ができる。マイクロコンピュータの発生する画素データはフレーム・メモリに記録される。1画素は8ビットで構成されているので、同時には256色の指定ができる。後述のカラー・テーブル方式を採用しているので、256色の実際の内容を随時変更することができる。

現在この装置では、平面的な画像の発生のほか、球面などの2次曲面、回転体、自由曲面など立体の表示(図

9)、曲面へのマッピング、フラクタル表示(図7)、或いは簡単なキャラクタ・アニメーション(後述)などが可能である。

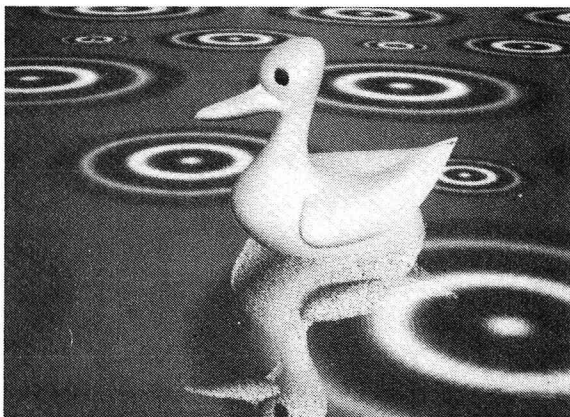


図-9 自由曲面による鳥の表示

4.3 カラー・テーブル法

ボールが跳びはねる場合を考えよう(図10)。通常の表示方法では、1番目のボールを表示し、これを消去して2番目のボールを表示し、また消去して3番目を表示し、……。表示と消去が高速に実行されないと、ボールが移動していると見えるよりも、単にボールを書き替えているように見えてしまう。

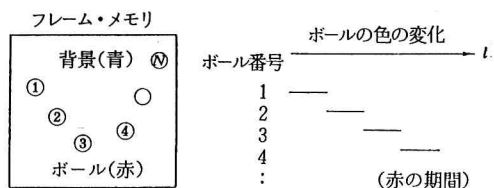


図-10 カラー・テーブル法の原理

フレーム・メモリの内容を変更しないで、表示する色のみを変更し実効的に高速表示を行うのがカラー・テーブル法である。カラー・テーブルはフレーム・メモリの出力側に設けられるメモリで、フレーム・メモリの画素データを色情報に変換する働きをする。8ビットの画素データであれば256種類の色が表現できる。1種類の色をR,G,B 各8ビットで表現すると、カラー・テーブルは256*3*8ビットの容量を持つ。例えば、画素データの値が10であれば、カラー・テーブルの10番目の内容の3*8ビットが取り出される。カラー・テーブルの内容はホスト・コンピュータの指令により高速に変更できる。

ボール1, 2, 3, ...を、それぞれ画素データ1, 2, 3, ...でフレーム・メモリに書き込む。カラー・テーブルの1, 2, 3, ...の内容が全て背景色(例えば、青)にセットしてあれば、表示画面上にはなにも見えない。カラー・テーブル1の内容を「赤」に変えると、ボール1が画面に現れる。1の内容を青に、2の内容を赤に変更すると、ボールが1から2に移動したように見える。この操作を高速に繰り返すと、ボールは滑らかに移動する。単純であるが効果は大きい。もちろん、二つのボールが重なり合うような場合には画素データの与え方が複雑になる。

4.4 間欠記録法

出力する内容が複雑になり、また表現手段も精巧になるにつれて、処理時間の増大は免れない。ハードウェア技術の進歩は処理の高速化に多大の寄与をしてきたが、現実の要求はそれを上回って増大している。従来から、画像出力の低速性を補うために間欠記録が用いられてきた。フィルム記録が早くから実用されてきたが、最近では放送用VTRの利用も増加している。

フィルムに記録する方法は二つある。第一は、完成した表示画面を撮影する方法であり、第二は、CRT上の電子ビームの動きに伴う光点の移動をフィルムに直接記録する方法である。前者は、普通のモニター或いは受像機の画面を撮影するので比較的容易に実現できるが、CRTが大きいので画面の周辺部では歪みやぼけの生ずる。後者はコンピュータの出力画像をマイクロフィルムへ記録する装置(COM)を利用する方法である。小さなCRTを用いるので歪みが少なく解像度も高い。しかし、表示速度は遅く、人間の目には数本の線がみえるに過ぎない。

VTRはテレビ信号を記録する装置としてかなり前から利用されてきた。しかし、連続したテレビ信号を記録再生することを目的として開発された装置であり、間欠記録は困難であった。近年、ビデオ・テープの位置を正確に決めるタイムコード(time code)の採用と制御方式の精度向上とが相まって、テレビ画面1フレーム単位の記録が可能になった。

コンピュータでVTRを制御すると、画像生成と記録を連続して自動的に実行できる。1フレームの画像が完成すると、VTRに記録開始位置と終了位置データを指定し記録開始信号を送る。記録が終わるとコンピュータに割り込み信号を返し、次の画像の生成を開始する。通常の放送用VTRを使用するとテープの巻戻しなどのために、

1フレームの記録に約10秒を要する。最近、間欠記録専用のVTRが開発され巻戻し時間が不要となり、記録に要する時間の短縮に成功している。

5. キャラクタ・アニメーション

NHK総合テレビでは大型NHK特集シリーズ「21世紀は警告する」を59年4月から毎月1回放送している。この番組では、コンピュータ・グラフィックス技術で制作したキャラクタ「ホロン博士」(図11)が解説者

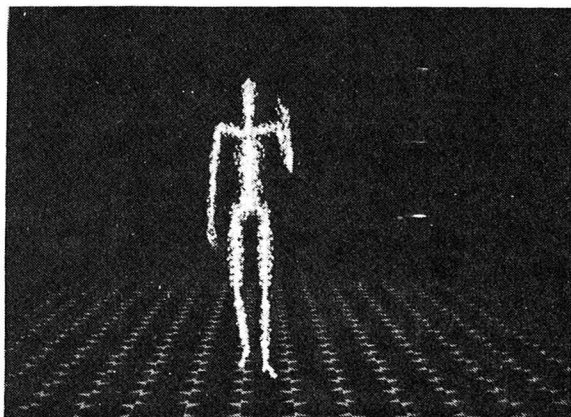


図-11 「ホロン博士」

として登場し、人間とは異なった効果をあげている。ここでは、ホロン博士のようなアニメーションを制作するための技術について説明する。

漫画映画のように人間(動物)の登場するアニメーションをキャラクタ(character)アニメーションと呼んでいる。従来は、わずかに位置や形の変化する「絵」を1コマずつ撮影してきた。紙の上に絵を描いて作るセル・アニメーションでは、30分のテレビ番組を制作するには数千枚の絵を必要とするといわれている。その制作期間は長く、制作に関係する人数も多い。このようなことから、様々な省力化、自動化の方法が考えられてきた。ここでは特に、コンピュータ内に人間の立体的なモデルを持ち、それを時間的に変形してアニメーションとする方法について述べる。

人間の動きは、全体の位置変化だけではなく、手足などが動いて全体の形が大きく変化する点に特徴がある。人間の動作や運動を的確に把握し、正確に再現する試みは、医学、スポーツ、ダンス或いはアニメーションの分野で古くから行われてきた。人手による計測やデータの整理には膨大な作業が必要で、データの収集、解析、再現にコンピュータの利用が多くなってきている。

5.1 システムの構成

コンピュータを用いたキャラクタ・アニメーション・システムの基本的な構成を図12に示す。全体の基本となる

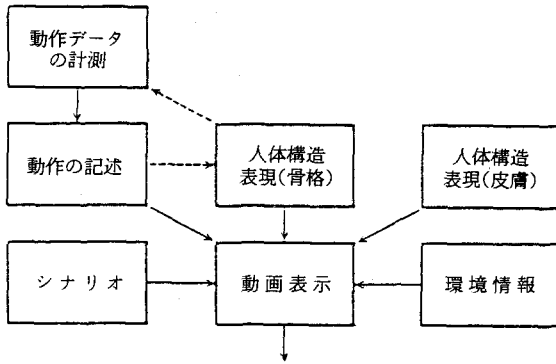


図12 キャラクタ・アニメーション・システム

る情報は人体の骨格構造であり、人間の実際の動作から骨格の時間的な形状変化のデータを入力する方法が重要な技術的課題である。表示する人体の外観は「皮膚」を表現するモデルで決まる。さらに、アニメーション画面の最終的な見え方はシナリオ及び環境情報によって決まる。

解剖学の観点からすれば、人体は骨、筋肉、皮膚などから構成されている。骨は、関節を介して相互に接続されており、それぞれの関節における2本の骨の角度が人体の全体の格好を定める。コンピュータ・グラフィックスで扱うときには、関節を点、骨を線分と考えることが多い。主な骨のみで人体を表した例を図13に示す。図13

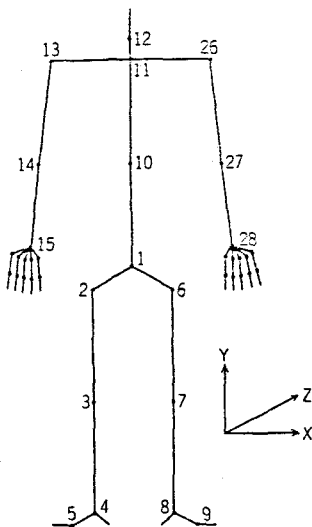


図13 スティック・フィギュア

の場合、人体の基準点（重心）は関節1にある。これに2本の大腿骨と背骨が接続されている。これらの先端にさらに多くの骨が次々と接続される。関節1の位置を与えると、骨の長さや隣接した骨との角度から各々の骨の位置を順番に定めることができる。これをスティック・フィギュア（stick figure：棒状）モデルと言う。

動作を確認するだけであればスティック・フィギュアでも十分なことが多い。しかし、人間らしさを表すには厚みをもった立体的な表示が必要である。身体の表面の形状を複雑な曲面を用いて正確に表現した例もあるが、多くは複数の球、円柱など単純な形を組合せて表現している。

ホロン博士（図11）は、回転楕円体の内部に数多くの小さな点を充填したモデルで表している。楕円体の表面に近いほど明るく中心にいくほど暗い色で表示し、幻想的な効果を出している。

人間の動作は非常に複雑である。例えば「歩行」動作は、身体全体の移動に、手足、胴体、頭の動きが重疊している。各部分はもちろん連絡して動いているが、動作のタイミングや微細な動きを正確に表現することは難しい。歩行速度によっても各部分の変位量が異なり、性別・年齢・体格・感情などによっても、運動の様子が変わる。

動作データをコンピュータに入力するため、これまでに多くの方法が検討されてきた。主な方法の概要を表1に示す。この中でも身体に計測用の装具を付けて動作を自動的に計測する方法に関する研究が多い。しかし、計測可能な動作の範囲が限定され、精度の点でも問題があり、必ずしも成功していない。パターン認識技術を使った自動追尾方式の計測も考えられるが、現段階では人間の複雑な動作を計測するまでには至っていない。

現在最も確実な方法は、人間が実際の動作を観察してそのデータをコンピュータに入力することである。直接法は、例えば透明なタブレットを通してフィルムやVTRの映像を1コマずつ再生し、重要な点の位置の変化をタブレットから直接コンピュータに入力し、データを整理する方法である。一方、間接法は、人間の動作を観察しながら変化を表すデータを入力する方法である。入力データを直ちに目で確認できるように、入力データの変化をスティック・フィギュアの形の変化に反映する方式をとることが多い。これらの方法は入力に長時間の作業を必要とするが、特別な装置が不要であるとともに様々な

表一 人体運動の計測法

方法		内 容	特 徴	問 題 点
人手による 入力	直接	動画をコマ送りで表示しながら主要点を指示して記録する	特別な知識が不用 修正が容易	2次元情報から3次元情報の抽出が困難
	間接	動画を人間が解釈し角度データなどを入力	人間の知識により多様な状況に対処可能	センスと経験が必要
装具による 計測	有線	ストレインゲージなどを身体に付け動きの変化を検出する	自動計測が可能で大量のデータを入力できる	高速運動や跳躍運動の計測は困難
	無線	複数の電波や光線を複数のセンサーで検出する		動物の計測は困難
自動追尾 (動画認識)		平面的な画像情報から対象点の動きを検出し立体的なデータを抽出する	あらゆる対象に適用可能	未開発

状況に柔軟に対処することができる。

入力した動作データをそのまま使って動作を再現することもあるが、多くの場合もっと整理して利用する。例えば、歩行動作における各関節の位置変化を時間の関数として表しておく、関数の中の適当なパラメータの値を変更して、歩行速度の変化に応じて歩く形を変えることができる。また、運動の傾向が大きく変化する時点の形（キーフレーム）のみを保存し、中間の形は表示の際に内挿法によって求めることも多い。

多くの運動を連続的に表示するためには、その順番や継続時間を指定するシナリオが必要である。さらに、複数のキャラクターが登場したり背景と組合せるときには、それぞれの配置やその時間的な変化に関する情報を指定する。キャラクターの登場する背景、キャラクターの表示寸法、見る角度などは、環境情報としてシナリオの中に同時に収められる。シナリオはコンピュータが理解できる形式で表現されていなければならないが、同時に人間が指定しやすいものでなければならない。

シナリオには、例えば次のようなデータを指定する：
a) キーフレーム番号（開始／終了の二つ）、b) 基準点の移動情報（移動、回転など）、c) 視点の移動経路（カメラワーク）、d) フレーム数。複数のカットのデータを1個のファイルに収めておくと、複数のカットにわたってアニメーションを連続的に制作することができる。

5.2 動作データ入力法の例

われわれは、人間の動作を観察しながら骨の接続角度を

入力或いは修正する対話方式の入力プログラムを開発した。操作画面を図14に示す。正面と側面を表す2種類のスティック・フィギュア、操作種別を指定する「メニュー」（画面右側）及び骨番号を指定する「デンキー」（画面中央下）が表示されている。タブレット使ってデンキーに触れ骨番号を指定した後、その点における2本の骨の間の角度 R_x, R_y, R_z をダイヤルの回転角度で指定する。入力した角度データは、3本の直交軸の向きの変化として画面上に現れ、同時に数値データ（画面左下）も表示される。（スティック・フィギュアを変更すると応答時間が長くなるので、直交軸の変更にとどめた。）それぞれの関節における角度が大体決まったら、右側のメニュー「CHECK」に触れ、スティック・フィギュアを再表示する。結果が不満足であれば、さらに角度を調整する。このようにして各関節における骨の角度を順番に入力し、1個のキーフレームの形を定める。

このシステムでは、二つのキーフレームの中間の形を内挿によって求め表示できるので、二つのキーフレーム間の変化の滑らかさを確認することができる。また、キーフレームの情報をファイルに格納し、或いはファイルの情報を読込んで再修正もできる。

人間の実際の動作をVTRに収録しその画像を1フレームづつ再生しながら、キーフレームとなるべき画像について上の入力プログラムでデータの入力を行った。大まかな格好だけを入力するのであれば、1キーフレーム当たり15分程度で入力できる。しかし、動作を精密に

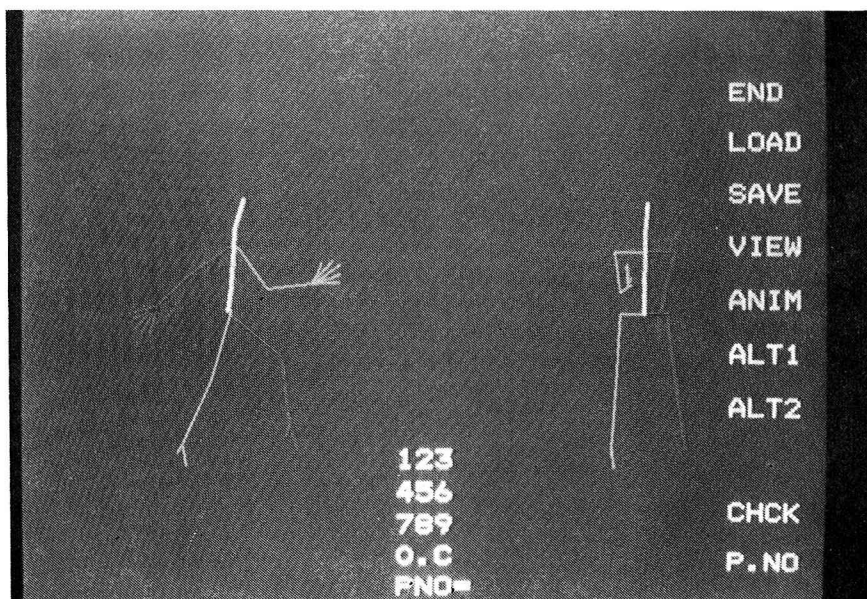


図-14 動作データ入力画面

再現しようとする1キーフレームの入力に2～3時間を要することもある。

5.3 規則による動作の表現

人間の実際の動作を観測して入力する方法は、どのような動作でもかなり正確に入力できることが分かった。しかし、歩行動作のように身体全体の位置変化が大きいときには、その動きに追従して形を定めることがかなり困難になる。また、環境のわずかな相違によってそのつど動作情報を入力しなおすわずらわしさもある。例えば平地を歩くとときと、坂道を歩くとときでは足の運び方が異なる。傾斜角度ごとに人間に歩いてもらいそのデータを入力するには相当の期間とコストを覚悟しなければならない。

人間の歩行動作を数式で表した例がいくつかある。身体の動きを定める十数個の点を身体の上に規定し各点の位置の変化を時間の関数で表す方法がとられている。直線と三角関数の組合せでほぼ満足すべき結果が得られている。

われわれは、この動作モデルを改良して、歩行速度と地面の傾斜に応じて足の運び方を自動的に変えるモデルを開発した。

身体の重心の移動量と歩幅とが適切に関係づけられていないと、足の先端が地面に対してスリップするように見える。いま、「一歩」を一方の足が接地してから次に地面より離れるまでの期間とすると、その間足の形は図

15のように変化する。図の θ_0 及び θ_a 、 θ_b が与えられると点 P_h の移動量を求めることができる。一歩の間に点 P_k の角度 θ は時刻 t に対し図16のように変化し、

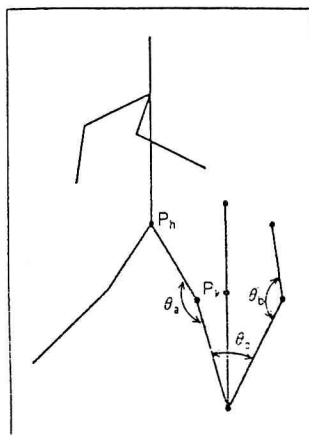


図-15 足の形の変化

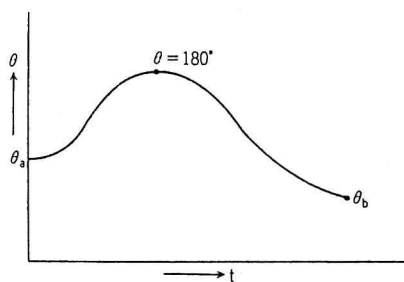


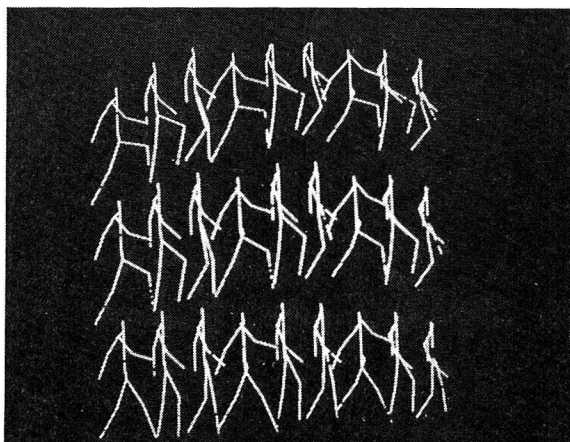
図-16 足の角度の変化

$$\theta = a + b \cos t$$

の形式の関数で表すことができる。なお、 a 、 b は θa 、 θb の関数である。

傾斜した地面を歩く場合はやや複雑になって、上下方向の移動も考慮しなければならず、さらに多くのパラメータを必要とするが、原理的には同様な方法で扱うことができる。

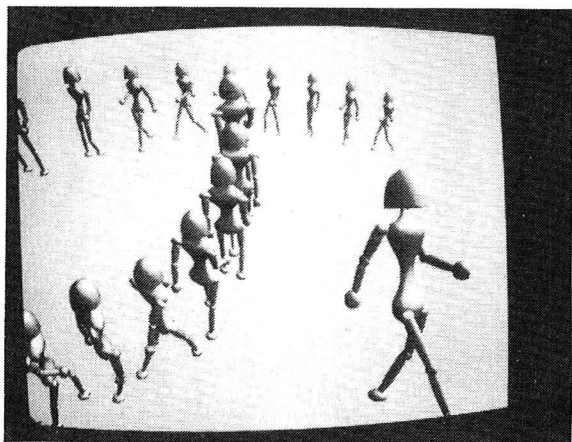
このような方法で平地及び斜面を歩く動作を表示した例を図17に示す。静止画では必ずしも明確ではないが、



図一17 斜面の歩行

実際にアニメーションにしてみるとかなり自然の動作に近いことが分かる。

人間の歩行は一般に曲線にそった運動である。このシステムでは背景の家や木の間を人間が歩き回る経路を対話方式で入力する機能を備えている。さらに、入力した経路にそった人間の歩行動作を線画ではあるがリアルタイムに確認することができる。動作がイメージに一致し



図一18 曲面モデルによる歩行動作の表示

ていれば、そのデータに従って曲面的な表示モデルによりアニメーション画像を生成する。図18はその一例である。

6. 今後の課題

わが国においても、すでに十社以上のコンピュータ・アニメーション制作会社が活動している。大型コンピュータを駆使した大規模なシステムから、パーソナル・コンピュータ程度を利用するシステムまで実施形態はさまざまである。また、テレビや映画の中で利用されることも多くなってきている。そして、コンピュータ・アニメーション技術は、いまや技術分野の問題ではなく、いかに利用するかという芸術分野の問題であるとの声も聞かれるようになった。しかし、コンピュータ・アニメーションの技術は表示手法の発達を除けば未だ不十分な点が多い。課題のいくつかに触れておきたい。

1) 高速化

表示内容の高度化、複雑化に対応して高速化への要望は強い。これは単に最終作品の制作段階における高速化のみならず、形状データや運動データの入力とこれらの検証の段階においても重要なことである。すなわち、人間の作業を不可欠とする部分において、装置の高速性是对話性能を向上する点から重要である。

2) 低価格化

コンピュータ・アニメーションを実用的な規模で利用するには、多数の端末機を用意して同時に多くの人間が利用できる環境が必要になる。これを実現する第一の要件は個々の機器に要する費用が低下することであろう。

3) 操作性

アニメーションに必要なデータは、文字や数字ではなく、できるだけ直感的な方法で扱えることが望ましい。2次元的なアニメーションにおいては、すでにかなり操作性の優れたシステムが利用されている。しかし、3次元アニメーションの場合、例えば、立体的な動線を入力したり修正する適当な手段がない。すなわち、特殊な装置を使用しないかぎり、入力した動線を立体的に把握するのが困難である。簡便な方法の出現が望まれる。

4) 技術の融合

あらゆる画像をコンピュータ・グラフィックス技術で生成することは技術的に大変興味ある問題である。しかし、実用的な見地からすれば、一つの技術にのみ頼ることは必ずしも得策ではない。現実にはテレビ技術やフィル

ムの光学的処理技術を併用した形のアニメーションが多数制作されている。ただし、このような装置はそれぞれ独自に開発されたものであって、操作性や情報の交換に問題がある。統一的な観点で統合したシステムを開発することが重要である。

5) 人間性

コンピュータで生成する画像は正確であるが「暖み: warmth」がないという批判がある。この問題は自然界の

事物を単純なモデルで表現するときに生ずる。草の葉を3角形で表す場合、常に同じ3角形が現れ非現実的である。人間は、同じように単純化するとしてもわずかな異なった絵を描くであろう。人間の動作は不規則であるが、これが人間の描く絵に個性を与え人間性を感じさせる。コンピュータの生成する画像にも同様の効果を与えるため乱数の利用などが考えられている。