

## 解説

## コンピュータアニメーション技法†



沓沢 淳之助††

## 1. ま え が き

アニメーションは、たくさんの静止画を使って動く映像を作り出す技術である。主として教育・娯楽の分野で利用されてきたが、最近では各種の設計などにも使われるようになってきた。

動画化には、コンピュータアニメーションを含めさまざまな手法がある。伝統的な手法では、平面的な絵を撮影するセル (cel) アニメーションと立体的な実物を撮影するパペット (puppet) アニメーションが代表的である。このような手法では得られない新鮮な映像効果の実現、制作期間の短縮や経費の節減を目指して、コンピュータの利用が進められてきた。

「コンピュータアニメーション」<sup>1)~3)</sup>は、アニメーションの映像制作にコンピュータを利用する技術である。制作支援型、画像変換型、画像生成型の3方式に大別できる。それぞれ異なる技術分野を基礎として独立に発達してきた。しかし、実用化されているシステムでは、複数の技術が混在していることも多い。

## 2. 制作支援型システム

従来の手作業によるアニメーション制作過程の各段階を個別に自動化することを目的としている。

2.1 動画確認装置<sup>4)</sup>

セルアニメーションにおいて、絵の動きの連続性を確認する装置である。滑らかな動きを実現するために描かれた複数の鉛筆画をテレビカメラで撮影し、メモリに蓄積し、連続的に再生・表示ができる。挿入、消去、移動などの編集処理も可能で、動画効果を手軽に確認できる。

## 2.2 自動着色システム

鉛筆画をフレーム・メモリに入力し、輪郭線で囲まれた領域を指定の色で自動的に着色する。入力した線

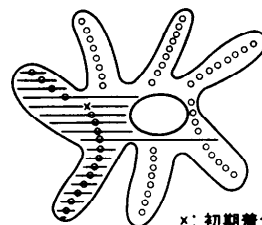
画情報を画面に表示し、着色すべき領域の内部の1点(着色開始点)と着色する色を指定する。システムはメモリ上の輪郭情報を探索しながら指定領域の内部を自動的に着色する(図-1)。凹凸形を効率的に塗り潰す方法がいくつか提案されている<sup>5),6)</sup>。

2値画像である鉛筆画をデジタル化すると、輪郭部分にエイリアスが発生する。着色システムでこの妨害を防止する二つの方法がある。輪郭線を階調画像として入力すると、輪郭線の中心は黒く、周辺部分では灰色になる。指定の色と輪郭線の階調を混合して着色するとエイリアスが防止できる<sup>7)</sup>。2値の輪郭線の付近を着色するとき、領域内部と輪郭線との中間階調を画素単位に求め、連続階調とする方法もある<sup>8)</sup>。

2.3 ペイント・システム<sup>9),10)</sup>

電子的に絵を描くシステムで、マウスやタブレットの動きが線となって画面に現れる。線の太さや着色する色を自由に選択したり、新たに定義することができる。また、エアブラシ効果のように線の中心部を濃く周辺を薄く着色したり、光沢をもった丸い管のように着色する機能も実現されている。あるいは、スタイラスに筆圧を感知する機構を設けると、筆圧に応じて線の太さや色の濃さを制御できる<sup>11)</sup>。

一般に、長方形や円など基本図形の表示やあらかじめ登録した部分画像を繰り返し表示する機能を備えている。また、アナログ画像を入力し、色の修正、拡大・縮小あるいは部分的に画像を切り出す機能があ



x: 初期着色開始点  
o: 着色開始点

図-1 自動着色の方法

† Computer Animation by Junnosuke KUTSUZAWA  
(Management Information Services Bureau, Japan  
Broadcasting Corporation).

†† 日本放送協会経営情報室

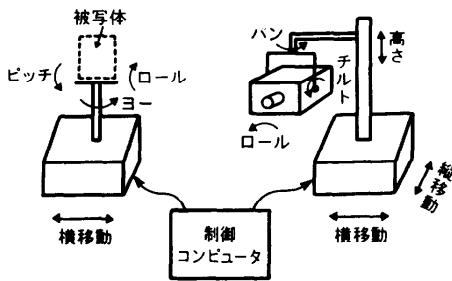


図-2 撮影の自動制御

る。作成した画像は、外部の記録媒体に蓄積し利用もできる。

静止画の制作を目的としたシステムであり、動画化するには多数の画像を用意する必要がある。しかし、カラーテーブルの内容を高速に変更すると疑似的に動画効果が得られる<sup>12)</sup>。

#### 2.4 撮影の自動化

アニメーションの撮影台の制御を自動化すると、背景画の移動やパン・ズームなどのカメラワークが容易になる。すなわち、セル画を乗せる台の前後左右の移動、カメラの位置や回転角あるいはフォーカスを制御し、また、カメラのシャッター制御を行う<sup>13),14)</sup>。多重露光の制御などに便利である。

パペットアニメーションの撮影のため、さらに複雑な装置が開発されている。ACES は、カメラの台と被写体を乗せる台で構成される (図-2)<sup>15)</sup>。カメラの台は前後左右に動き、カメラの高さが変化する。カメラ自体は3本の軸の回りを回転できる。被写体の台は、水平方向にのみ移動し、高さは固定である。被写体を乗せる面は3方向に回転する。すべての動きはコンピュータで制御される。撮影に先立って動作をシミュレートできるので、動画効果の確認が容易である。手作業に比較し操作の再現性が優れている。

### 3. 画像変換型システム<sup>16)</sup>

テレビの映像合成技術を基礎としている。一般に、対話的な操作とリアルタイム処理が特徴である。画素単位に明るさや色を変更する機能、フレームのメモリアドレス変換による3次元的な座標変換やマッピングの機能、残像効果の付与など多くの機能がある。

「マット合成」は、前景に当たる人物像などのシルエット像 (マット: matte) を作り、この像で背景の一部を覆い隠し、この部分に前景像をはめ込む。テレビの分野では従来この効果をクロマキー (croma key)

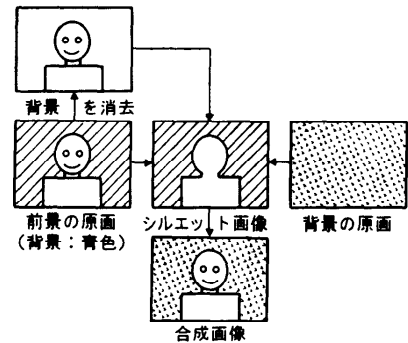


図-3 クロマキー合成

で実現してきた (図-3)。色を手掛かりに青色背景の前にある被写体を分離してキー信号を作り、背景と前景の映像を合成する方法である。背景と前景を独立に制作できるので、非常に有用な手法である。

クロマキー法の欠点の一つは、前景を撮影する際に特殊な背景を必要とすることである。電子マット法では、前景となる対象物の輪郭線を対話的に指定し、これをキー信号とする<sup>17)</sup>。この方法によれば、任意の映像の間で合成が可能となるが、輪郭の指定は人手によるため動画への適用は難しい。最初のフレームの輪郭を指定するだけで、後続フレームの輪郭を自動的に求める動画マット方式も提案されている<sup>18)</sup>。

### 4. 画像生成型システム

コンピュータアニメーションの中で最も精力的に研究・開発されてきた。従来の手法に比較し、きわめて滑らかな変化の実現が特徴である。

#### 4.1 動画のパラメータ<sup>2)</sup>

アニメーションは画像内容の時間的変化によって実現される。変化する対象の選び方や変化速度が動画の効果を決める。

図-4 に動画の対象を階層的に示す。個別変化は個々の対象の変化を表し、相似変化、変形効果、材質変化がある。相似変化は、平行移動、拡大・縮小、回転の組み合わせで表現される。変形効果は、キーフレーム法の適用、形状モデルの構造変化、せん断変形や等角写像などの座標変換によって実現できる。材質変化は、表示対象の色、模様あるいは材質感の変化を意味する。自然界では実現の難しい色彩の滑らかな変化、透明度の変更などが容易である。

集成的変化は、「世界」の中に存在する複数の対象に関する相対的な位置関係の時間的変化やそれらのタ

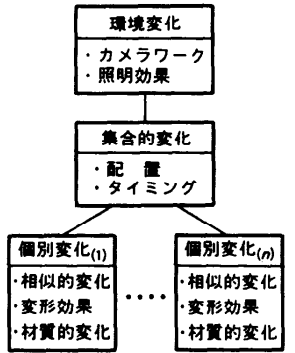


図-4 動画パラメータの階層的構造

イミングを扱う。対象間の従属関係を表すため、集会的変化をさらに階層化することがある。

環境変化は、集会的および個別変化によって決まった世界を「見る」立場を与える。カメラワークは、視点の位置、視点の方向、そして視野の範囲の時間的な変化であり、カメラの移動、パン（左右の回転）、チルト（上下の回転）、ズーム効果で実現される。照明効果は、光源の数、位置、方向、明るさや色合いを表す。これらの変化によって、画面に現れる対象の明るさやハイライトの位置が変化する。

変化の速度は、パラメータの初期値と最終値の差およびフレーム数によって決まる。パラメータの変化量を一定にすると、定速度の変化となり、不自然な感じを与えることもある。たとえば、つぎの式を用いると、加速、定速、減速の効果を一つの式で表現できる。

$$t' = 0.5(1 - \cos \pi t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

### 4.2 動きの表現

個別のパラメータを直接制御して動きを表す基本的な方法と、動作の種別を指定して、具体的なパラメータの変化を自動的に発生する方法がある。

#### (1) 関数法

アニメーションを作る基本的な方法の一つは、「関数」を利用することである。関数は、数式、プログラムあるいは数表で表される。直線運動や回転運動は簡単に表現できる。また、外部から入力した曲線をスプライン近似して使うこともある。

多くのシステムでは、MOVE, ROTATE, SCALE など基本的なコマンドを用意している。また、特殊効果用として TURN, TWIST, WOBBLE など複合的なコマンドをもつシステムもある<sup>19)</sup>。このようなコマンドは通常1枚の静止画しか生成しないので、時間をパラメータとするループ構造を作らなければ

ならない。プログラミングの負担を軽減するため、GRAMPS では、遅延型更新関数 (delayed update function) を導入した<sup>20)</sup>。あるパラメータについて、目標値とフレーム数を与えると、現在の値から指定の値まで徐々に変化し、各フレームごとに関数の内容が計算され、画像が生成される。直線的な変化のほか、式(1)のようなパラメータ変化も指定できる。CINEMIRA は、この考えをさらに発展してアニメーション変数型を導入した<sup>21)</sup>。この型の変数宣言は通常の手続宣言と類似の構造をもち、変数値の可変範囲、変数の有効であるフレーム番号の範囲、変数の変化の法則が定義できる。変数の値は、画像生成が1フレーム進むごとに自動的に更新される。

P-curve は、平面上の移動の軌跡と各時点ごとの軌跡上の位置を示す方法で、対話的に入力と修正ができる<sup>21)</sup>。図-5 で○印がタイミングを表し、○印間の時間間隔は一定である。同様の方法が ANTICS にも採用されている<sup>19)</sup>。

任意の曲線を適当なスプライン曲線で近似する方法がよく使われる。しかし、曲線の長さや曲線の端点から一定の距離の位置を解析的に求めることは一般に不可能である。吉良は、対話的に入力した曲線を2次のベゼ曲線で近似し、曲線  $P(t)$  の任意の位置までの距離を解析的に求めた<sup>22)</sup>。

#### (2) キーフレーム法

セルアニメーションの中割り (inbetweening) に基づく方法である。二つの平面図形間の頂点の位置を内挿によって求め、中間図形を生成する方法として登場した<sup>23)</sup>。今日では、パラメータ値の内挿法としても広く利用されている。

基本的には、初期値  $P_0$  と最終値  $P_n$  の中間値  $P_i$  を直線内挿によって求める。1例を図-6 に示す。

$$P_i = (P_n - P_0) \times i/n + P_0 \quad 0 \leq i \leq n \quad (2)$$

直線内挿の欠点は、回転する図形の間画像を求められないことである。これを解消するため、スケルトン

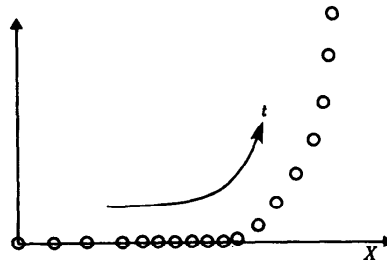


図-5 P-curve

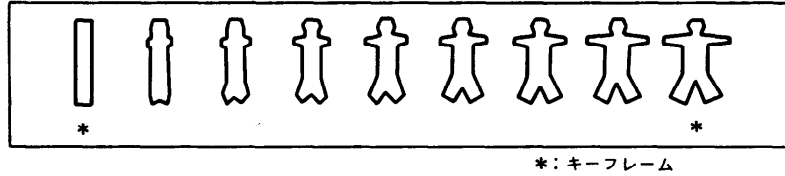


図-6 キーフレーム法

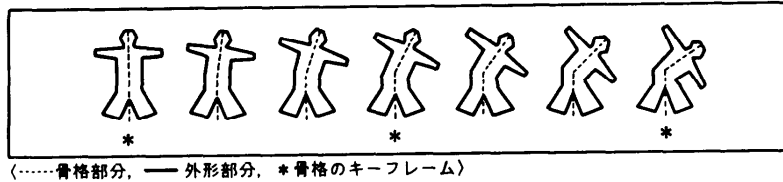


図-7 スケルトン法

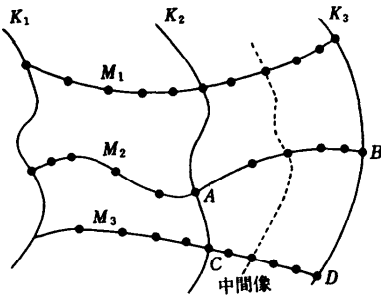


図-8 動点制約法

法が考えられた<sup>24)</sup>。対象とする図形の中に仮想的なスケルトン(骨格)を設け、このスケルトンに対して直線内挿を適用する。中間的なスケルトンの形状に合わせ、対象図形を重畳する(図-7)。

動点制約法は、P-curveの考え方を拡張し、複数のパラメータの変化する軌跡と変化のタイミングを同時に表す(図-8)<sup>25)</sup>。K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>は、対象図形のキーフレームである。M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>は動点の曲線であり、この線にそって変形する。線上の・印はタイミングを示す。中間図形を求めるには、たとえば、頂点A, B, C, Dのパッチを Coons パッチと考え、t 時点の形 K<sub>t</sub> を求める。

(3) 運動学と力学<sup>26)</sup>

リンク構造をもった対象物、たとえば、クレーン車や人体は、複数の部品が「関節」で結合された構造をしている。各部分の長さは一定であり、関節部で回転する。このような制約条件の中で、可能な動きを実現するのが運動学(kinematics)である。

物体の基幹部分から先端に向けて、順番に関節の回

転角を指示し先端の空間座標を求める方法を順運動学という。座標変換により簡単に解が求められる。先端の座標値を与えて各関節部の回転角を求める方法を逆運動学(inverse kinematics)という。座標値と回転角の関係が線形でないため、線形化して解を求めなければならない。すなわち、微小な角度と位置の変化を1次関数で表し、逆ヤコビアン行列を解いて段階的に角度変化を求める。一般にリンク構造の自由度が多いため、先端座標の一つの値に対し、複数個の回転角の解の組が得られる。最適解を求めるには適当な制約条件を設定しなければならない。

運動学は受動的なモデルであり、物体の慣性をまったく考慮していないので、変化速度は外部から指定しなければならない。力学(dynamics)に基づく慣性を考慮すると、加える力に応じて物体の加速や減速の効果が自動的に得られる。したがって、変化速度などを詳細に指定する必要がない。

4.3 自然現象の表現

雲の動き、ゆれる炎、海の波など自然現象は、規則的な動きと不規則な動きが複合しており、リアルに表現することは難しい。

(1) 微細な粒子による表現

Reeves は、微粒子法(particle system)により、境界の不明瞭な形をもち不規則に変化する炎や雲などを表した<sup>27)</sup>。対象は微細な粒子の集団で表され、粒子は時間とともに確率的に発生・移動・消滅する。粒子の集団は階層的に定義され、粒子をさらに粒子の集団で表現できる。

1フレーム当たり発生する粒子の数は、平均値に

標準偏差×乱数 (-1.0~1.0) を加えて求められる。粒子の数が多ほど表現される対象は「濃く」なる。発生した粒子には、最初の位置、速度と方向、形状(球、直方体、カプセル状)、寸法、色、透明度、寿命などの属性値が、ランダムに与えられる。

個々の粒子は、3次元的に動き、同時に寸法、色、透明度が変化する。寿命に達した粒子、輝度や透明度が限度に達した粒子、あるいは、移動距離が限界を越えた粒子は、集団から除かれる。生存している粒子について、点光源を仮定して表示する。

### (2) 集団行動の表現

鳥や魚などの群れは、集団の意志に従って行動しているように見える。また、個々の鳥や魚はそれぞれの意志で方向や速度を変えて移動する。Reynolds は、粒子法を発展させて、鳥の集団飛行のシミュレーションを行った<sup>28)</sup>。1羽の鳥が1個の粒子に相当する。

集団として飛行するため、それぞれの鳥は、集団の中に留まると同時に他の鳥と衝突しないように行動する。前者は求心的に動き、後者は遠心的に動く。集団の中の初期の配置と飛ぶ方向を指示すると、それぞれの鳥が二つの意志に従って配置を変えながら飛んでいく。求心的な力と遠心的な力が平衡すると飛行機の編隊飛行となる。しかし、平衡点をわずかに越えて動くと、集団の中の鳥の配置は時間とともに変わり実際の鳥の飛行に似てくる。

### (3) 海面の表現

Max は、規則的な波の動きを扱い、レイトレーシング法によりリアルな海面表現を実現した<sup>29)</sup>。Peachey は、同様な波の動きに加えて、海岸で波の方向や形が変わる様子を表現した<sup>30)</sup>。沖の方から海岸に向かって波が進むにつれ、海岸に垂直となるよう進行方向を変え、波頭は海岸に平行となる。

Fournier, Reeves は、風と重力を考慮したモデルを開発した<sup>31)</sup>。波を構成する粒子の運動は、トロコイド曲線で表す。この曲線は3角関数で表されるゆるやかな波から、非常に鋭い波や覆いかぶさる波まで表現できる。この波に風が当たると、山の部分は風の方に傾き、谷の部分は逆方向に傾く。海底の形状による波の進行方向の変化、水しぶき(波の面から離れた水滴)や泡(波の面を滑る水滴)を表現できる。

## 5. キャラクタアニメーション

人間や動物などのキャラクタ(character)のリアルな表現と、柔軟な動作の実現はコンピュータアニメー

ションの究極の目標である。これまでに数多くの研究が行われ、魅力的な作品も制作されている。

キャラクタを平面図形として扱った例もあるが、一般には、3次元形状モデルを使う。3次元で扱うと計算コストは高くなるが、実際の人間の動きと対比して動作を直観的に表現できる。

### 5.1 表示モデル

キャラクタは、関節をもった対象物(articulated figure)として定義され、階層構造で表現される。単純なモデルでは関節の数は20~30個であり、手の指を含めても50個程度で表せる。関節は、回転に関して3自由度をもつが、関節ごとの特性を考慮して、回転角を制限したり自由度を削減したモデルもある。

さまざまなキャラクタの表示モデルがあるが、スティック・フィギュア、線画、サーフェス・モデルに大別される。サーフェス・モデルには、多面体、球、円柱などのプリミティブを組み合わせた、滑らかな曲面で近似するものまで多くのモデルが提案されている。

小松は、双4次のベゼパッチを用いて滑らかな表面をもった人体モデルを開発した(図-9)<sup>32)</sup>。動作によって身体の形が変わっても、表面の滑らかさは常に保たれる。また、筋肉のふくらみのような動的な形状変形も実現できる。

### 5.2 動作モデル

関節動物の動作は複雑で、手や足など複数の部分が同期して動作する。きわめて多様な動作があり、年齢や性別によっても変わる。動作の記述には、各部分の変化を明示的に指定する基本的な方法、モデル化した動作(例・歩行)を再現する方法、力学的な特性を考慮した方法など、多くの方法が提案されている。

関節部の回転角に関してキーフレーム法を適用する

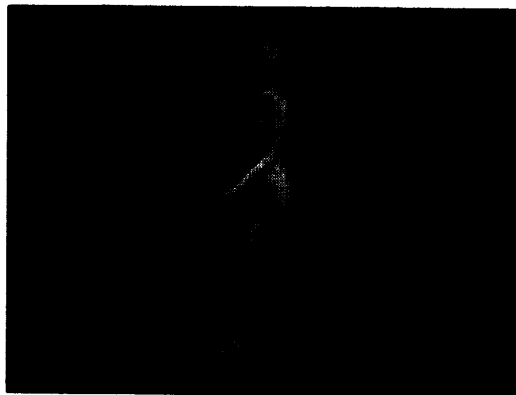


図-9 人体モデル

と、比較的容易に自然な動作が再現できる。二つのキーフレームを用意し、対応する関節間の三つの回転角について線形内挿を行い、中間の形を求める。かなり自然に見えるアニメーションが実現できる。しかし、たとえば、歩行動作において、身体全体の移動量と足の動く量を一致させることは難しい。

安居院らは、人体上に9個の動作区分点を設定し、これらの点の時間的な変化を測定した<sup>31)</sup>。得られた時間-位置曲線を3角関数で近似し、アニメーションを作成した。井上らは、特に足の動きに着目し、足が着地している状態と空中にある状態とに分け、それぞれを3角関数と直線で近似した<sup>32)</sup>。

指先などの移動軌跡を与え身体全体の変化を求めるには、途中の関節における回転角を逆運動学によって計算する。Korein, Badler は、身体の各部分が到達できる領域を階層的に表し、目標点がこの領域内にあるかどうかを調べる方法を提案している<sup>34)</sup>。目標点領域の内部にあると、その範囲内で角度を任意に選ぶことができる。エネルギー、変位量など適当な目的関数の値を最小にする角度を選ぶ。ヤコビアン行列を用いる数値解析法に比べ計算時間は短い。

Wilhelms は、身体の各部分の質量と外部および内部の力を考慮した力学モデルを作った<sup>35)</sup>。外部力としては重力と床の反発力と摩擦を、内部力として関節の部分にバネとダンパを仮定している。自然な動作が自動的に生成できる。

### 5.3 表情の表現

表情の変化は複雑であり微妙な変化が求められる。

顔の表情は複数の筋肉の動きが複合して表れるものであり、記述することも再現することも難しい。

根本らは、顔を目、鼻、ほおなど24個の部分に分け、3角形で構成する多面体で表した<sup>36)</sup>。頂点の接続データと座標データをもち、座標データを変更して表情を変える。秋本らは、同じく顔を3角形で近似したが、あごの回転といくつかの特徴点の移動ベクトルを指定する方法で表情変化を表した<sup>37)</sup>。

小松は、双4次ベゼパッチを用いた顔の曲面モデルを提案している<sup>38)</sup>。顔の正面と側面の2枚の写真から、対話的に約40個の特徴点を入力し曲面モデルを構成する。さらに、この曲面に元の顔写真をマッピングしてリアルな顔を得た(図-10)。顔が正面と側面の中間の角度にあるときには、2枚の写真の中間像を内挿によって求めマッピングする。表情の変化は、あごの回転と特徴点の移動で表す。



図-10 顔のモデル

Waters は顔の筋肉の伸縮をモデル化して顔の表情を表した<sup>39)</sup>。筋肉の伸縮の限界と弾性率および筋肉の伸縮が顔の表面の変形に影響する範囲を定め、表面の各点の変位量を求める。このモデルでは、筋肉は独立に動作するので、不自然な変化となることもある。

## 6. あとがき

これまで述べたような手法を使って、映画やテレビに向け多くの作品が作られてきた。数年前までは、これらは特殊な技術であり、高価な設備をもつ研究機関やプロダクション以外では利用できなかった。最近のパーソナル・コンピュータの普及と性能向上、グラフィックス機材の充実、そして表示ソフトウェアの商品化によって、誰でもがアニメーションを制作できるようになった。

最近では、手法の目新しさよりも表現すべき内容の充実が問われている。芸術的な作品ではもちろんのこと、説明用のアニメーションにおいても、十分に計算された表現が求められている。アニメーターなどの積極的な参加が必要である。

しかし、アニメーション制作は依然として人手と時間のかかる作業であることに変わりはない。ハード/ソフトの高速化はもちろんであるが、アニメーションの構成を体系的に表す手段や条件に応じてさまざまな変化を自動的に生成する方法が望まれる。

## 参考文献

- 1) 安居院, 中嶋, 大江: コンピュータアニメーション, p. 166, 産報出版, 東京 (1983).
- 2) 町田, 他: コンピュータイメージング, p. 175, コロナ社, 東京 (1984).

- 3) Thalmann, N. and Thalmann, D.: *Computer Animation*, p. 240, Springer-Verlag, Tokyo, Berlin, Heidelberg, New York (1985).
- 4) ナック社パンフレット: *Quick Action Recorder*, p. 8, ナック社, 東京 (1988).
- 5) Lane, J., Magedson, R. and Rarick, M.: NOTE: An Algorithm for Filling Regions on Graphics Display Devices, *ACM Trans. Gr.*, Vol. 2, No. 3, pp. 192-196 (1983).
- 6) Dunlavey, M.: Efficient Polygon-Filling Algorithms for Raster Display, *ACM Trans. Gr.*, Vol. 2, No. 4, pp. 264-273 (1983).
- 7) Smith, A.: TINT FILL, *ACM SIGGRAPH*, pp. 276-283 (1979).
- 8) 中嶋, 安居院, 北村: 2 値画像に対する自動 Anti-aliasing 彩色処理, *テレビジョン学会技術報告*, IPA 70-6, pp. 41-48 (1984).
- 9) 佐藤: 仕事に使えるペイント・システム, *日経 CG* 1987. 1, pp. 8-18 (1987).
- 10) 安斎, 伊吹: ターボ・グラフィックス, pp. 143-217, JICC 出版局, 東京 (1987).
- 11) Strassmann, S.: Hairy Brushes, *SIGGRAPH*, pp. 225-232 (1986).
- 12) Shoup, R.: "SUPERPAINT" ... THE DIGITAL ANIMATOR, *DATAMATION*, pp. 150-156 (May 1979).
- 13) 後藤: 最近の映像特殊効果, *テレビジョン学会技術報告*, PPOE 54-1, pp. 1-5 (1984).
- 14) パンフレット: 多目的接写撮影台, (株)セイキ, 東京 (1988).
- 15) Crane, S. and Snyder, R.: Automatic Camera Effects System (ACES), *NCC*, pp. 73-81 (1980).
- 16) 為ヶ谷, 他: テレビ放送における映像特殊効果装置利用の現状と技術動向, など 7 編, *放送技術*, pp. 59-93 (1987. 10)
- 17) 門條, 田村, 新倉: 大河ドラマ「山河燃ゆ」の新しい映像合成, *テレビジョン*, Vol. 39, No. 8, pp. 43-44 (1985).
- 18) 梶井, 吉田, 松林: ビデオマットによる動画合成, *放送技術*, pp. 1-6 (1988).
- 19) 犬伏: ANTICS, *テレビジョン*, Vol. 34, No. 11, pp. 36-41 (1980).
- 20) O'Donnell, T. and Olson, A.: GRAMPS-A Graphics Language Interpreter for Real-Time, Interactive, Three-Dimensional Picture Editing and Animation, *SIGGRAPH* pp. 133-142 (1981).
- 21) Baecker, R.: Picture-driven animation, *SJCC*, pp. 273-288 (1969).
- 22) 吉良, 野口, 福井, 井沢: 3次元アニメーションにおける入力手法, *NHK 技研月報*, pp. 22-31 (1983. 12).
- 23) Burtnyk, N. and Wein, M.: Computer-Generated Key-Frame Animation, *SMPTE J*, Vol. 80, pp. 149-153 (1971).
- 24) Burtnyk, N. and Wein, M.: Interactive Skelton Techniques for Enhancing Motion Dynamics in Key Frame Animation, *Comm. ACM*, Vol. 19, No. 10, pp. 564-569 (1976).
- 25) Reeves, W.: Inbetweening for Computer Animation Utilizing Moving Point Constraint, *SIGGRAPH* pp. 263-269 (1981).
- 26) Wilhelms, J.: Toward Automatic Motion Control, *IEEE CG & A*, pp. 11-22 (Apr. 1987).
- 27) Reeves, W.: Particle Systems--A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, *ACM Trans. Gr.*, Vol. 2, No. 2, pp. 91-108 (1983).
- 28) Reynolds, C.: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *SIGGRAPH* pp. 25-34 (1987).
- 29) Max, N.: Vectorized Procedural Models for Natural Terrain: Waves and Islands in the Sunset, *SIGGRAPH* pp. 317-324 (1981).
- 30) Peachey, D.: Modeling Waves and Surf, *SIGGRAPH* pp. 65-74 (1986).
- 31) Fournier, A. and Reeves, W.: A Simple Model of Ocean Waves, *SIGGRAPH* pp. 75-84 (1986).
- 32) 小松: キャラクタ・アニメーションのための人体の曲面モデル, *情報処理学会論文誌*, Vol. 29, No. 1, pp. 7-19 (1988).
- 33) 井上, 吉良, 井沢: 柔軟な歩行モデルの開発とキャラクターアニメーションの制作手法, *テレビジョン学会技術報告*, IPD 90-3, pp. 13-18 (1984).
- 34) Korein, J. and Badler, N.: Techniques for Generating the Goal-Directed Motion of Articulated Structures, *IEEE CG & A*, pp. 71-81 (Nov. 1982).
- 35) Wilhelms, J.: Using Dynamics Analysis for Realistic Animation of Articulated Bodies, *IEEE CG & A*, pp. 12-27 (1987).
- 36) 根本, 大町: 顔の3次元アニメーション作成システム, *日経 CG*, 創刊前夏号, pp. 58-65 (1986).
- 37) 秋本, 間瀬, 末永: 形状の自動変形による表情を持つ顔画像の生成方法の検討, *情報処理学会*, 87-CAD-28, pp. 119-125 (1987).
- 38) 小松: キャラクタ・アニメーションのための顔の曲面モデル, *情報処理学会*, 88-CAD-31-5, pp. 1-8 (1988).
- 39) Waters, K.: A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression, *SIGGRAPH* pp. 17-24 (1987).

(昭和63年6月20日受付)