コンピュータアニメーション

福井 一夫[†]

1. ま え が き

コンピュータを使って生成する画像には、平面的な2次元画像と3次元CGと呼ばれる立体的な画像がある。どちらの画像もペイントボックスやお絵書きソフトを使って生成することができる。しかし、少しずつ異なる画像を大量に生成して動きのある映像を制作するには、膨大な作業を必要とする。アニメーション技術は動きのある映像を生成するために必要な大量のデータを、効率的に生成する技術であるといえる。

コンピュータの低廉化により、誰もがコンピュータを使ってイメージを画像にすることができるようになった。また、ハードウェアの高速・高性能化によって、生成する画像の品質は稚拙であるが実時間の生成も可能になり、バーチャルリアリティや、サイエンスビジュアルライゼーションといった応用分野が現実性のあるものになっている。

テレビに登場し子供達に人気のある縫いぐるみや人形劇のキャラクタに代わるCGキャラクタが登場し、出演者と対話するリアルタイムCGを実現したり、誰もがビデオカメラで身近な出来事を映像化できるように、各人のイメージを簡便に映像化し、文字や言葉に代えて、意志や情報の伝達手段として映像を使うビジュアルコミュニケーションの実現を図る上で、アニメーション技術は欠かせない技術である。

今回は、まずアニメーション技術を概観し、最新の研究事例として、運動学と動力学を利用した骨格構造体のアニメーション手法を解説する。

2. アニメーション技術の概要

1枚1枚描画した画像を連続して表示した時、動画として意味を持つためには、それぞれの画像を生成するために使用する各種のパラメータが、時間の推移と共に適切に変化している必要がある。

画像生成パラメータには、カメラ位置や視線方向といったカメラデータ(撮影環境)、照明の位置や光量などの照明データ、そして、表示対象の図形の位置や形状を表す形状データがある。アニメーション技術は、これらのパラメータの時間的な変化を扱う技術であるといえる。具体的には、一連の画像を生成する際に、各フレームなりフィールドで表示されるべき画像の生成パラメータを決定することである。

アニメーション技術は歴史的にも古く、画像の生成にコンピュータが利用されはじめた2次元CGの時代から各種の手法が開発され、3次元CGへ適用されている。

最も代表的な手法であるキーフレーム法は、コンピュータが存在する以前から漫画映画の制作工程を分業化するために利用されていた。一連の動作を決定する代表的な画像(キーフレーム)を描いておき、これらの画像に連続するように、時間的な経過と動きを考慮して適当な枚数の画像(中割り画像)を挿入して動画を制作する方法である¹⁾²⁾。

現在市販されているCG用プログラムパッケージのほとんどが、この手法を基本としている。キーフレームでの画像生成パラメータの値を入力し、隣接するキーフレーム間でこれらパラメータ値を自動的に内挿する方法で、直線内挿や曲線内挿、適当なパラメータを介した間接的な内挿などの工夫が付加されている。

画像生成パラメータのうち、形状データ以外のものにはキーフレーム法が最も単純で簡便な方法であり、大きな問題も生じない。しかし、最もデータ量の多い

[†] NHK 放送技術研究所

“Introduction to 3 Dimensional Computer Graphics (9); Computer Animation” by Kazuo Fukui (NHK Science and Technical Research Laboratories, Tokyo)

図 1 キーフレーム法では不十分な例

図 2 アニメーション技術の概要

形状データの移動や変形においては、図 1 に示す 2 次元 CG の例に見られるように、内挿して得られる図形はキーフレームのものと異なる場合があり、意図した動き以外の動きが生じてしまうことがある。

図 1 の問題は図形の移動・回転による変化を形状変化として捉えた点に原因があるが、このように形状データの操作は単なる位置データの内挿では不十分な場合がある。このため、アニメーション技術として研究されてきた内容のほとんどは、形状データに関わるものである。

各種のアニメーション手法が提案されており、これらを系統立てて整理することはなかなか難しいが、表現しようとする対象の特徴で分類すると図 2 のようになる。

群れの運動は、魚や鳥の群れの運動に代表される、個々の物体の形状より、それらが集まって集団としての動きを表現する手法で、基本的には点の移動法を論じている¹⁸⁾。

逆に、面の変形は、移動や回転とは独立に、図形を定義したローカル座標系での変形を扱うもので、ほとんどの対象はこれに属し、キーフレーム法による内挿が主流である。

骨格構造体の変形は、人物や動物がその例で、最終的に映像として表示され表面形状が複雑で、しかも、より単純な骨格の動きに付随して変形するものを対象とする。

図 2 に取り上げた以外にも多くの手法があるが、これらの多くは、個別の現象や物体を表示するために必要な個々のアルゴリズムを検証するという段階にある。

今回の講座では第 7 回に「自然物体の CG 表現とその応用」と題して、動きを含めた表示法について解説されているので、ここでは骨格構造体の変形を中心に解説する。

3. 骨格構造の変形

アニメーションで欠かすことのできない人物や動物を CG で生成することは難しい。これは、形状が複雑で膨大な形状データを必要とするためで、モデリングの方法や正確さによっても異なるが、数百から数千点の位置データが必要になる。さらに意味のある動作を表現しようとする、これらの位置データを統一的に操作しなくてはならない。

骨格構造体の複雑な表面形状は、形状の基準となる単純なスケルトン(骨格)を定義して、表面形状はこの骨格との相対的な位置関係で定義しておく。動作は骨格の変形として取り扱い、動作に伴う表面形状の変化は、それぞれの骨格から自動的に定めることができる。したがって、動作は骨格の時間的な変化の様子を表すことになる。この手法はスケルトン法と呼ばれ、人物や動物を対象とするアニメーション制作に欠くことのできない手法である⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

図 3 は人物を例に代表的な骨格構造の例を示した。また、骨格構造は図 4 に示すとおり、起点(図では腰骨)を設定し、左右の手足や背骨に対応する各リンク構造の先端に向けて、各リンク毎にローカル座標を定義した階層構造で表す。このことで、各リンクの接続関係は自動的に維持される。

スケルトン法を使うことで、取り扱うデータ量を削減することはできるが、本来の動作をどのように操作するかは、別の問題である。実際の動作を撮影して、関節変位の変化を計測し、歩行や走行などの基本的な動作を表す関数を求める方法が古くから研究されている²¹⁾²²⁾。

基本動作以外の一般的な動作はキーフレーム法が使われることが多いが、キーフレームでの骨格全体の形状(姿勢と呼ぶ)を決定することそれ自体が難しい。例えば、関節や手先足先の位置を指定する方法が直感的

図 3 骨格構造体

に操作しやすいが、各骨の長さが変化しないとする
と、関節位置は独立に操作することができない。これ
を避けるためには、それぞれの関節の自由度にあわせ
て、位置に比較して操作が難しい回転角で操作しな
くはならない。骨格構造の関節角と関節位置の関係は
運動学で論じられ、アニメーション技術にも応用され
ている。

3.1 運動学 (Kinematics)

運動学はリンク構造を持つ系の関節や先端の位置と
関節の回転角との関係を明らかにするもので、工業用
ロボットの設計や運動解析のために研究されてきた。

運動学をアニメーション手法に取り入れることで、
姿勢や動作の指定を、関節や先端の位置の操作で実現
できる。また、先端の位置を変更するだけで、これに
関わる多数の関節の回転角を自動的に生成することが
できるなど、対話的な処理の実現に適している。

反面、この手法は、系に加わる力やトルクといった
力学的な要素とは無関係で、リンクの構成だけに関わ
るもので、時間的な変化を含む、物理法則に添った自
然な動作が生成されるかどうかは、オペレータに委ね
られている。

(1) 順運動学 (Forward Kinematics)

関節角の値が既知の時、各関節や先端の位置を求め
る問題は順運動学と呼ばれている。図 5 に示す簡単な
リンク構成を例に説明する。まず、グローバル座標系
はリンクが設置されている点 O_0 を原点とし、図に示
す方向に各座標軸を設定する。また、各リンクの先端
にローカル座標系を定義する。アーム先端はローカル
座標系 Σ_2 の原点 O_2 である。このとき、順運動学の
問題は、点 O_2 をグローバル座標系 Σ_0 で計測した座
標値 $({}^0O_2, {}^0x_2, {}^0y_2, {}^0z_2)$ を関節角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_i)$ の関数とし

図 4 骨格構造の階層的構成

図 5 骨格モデルと座標系

表すことである。

座標系 Σ_2 で表された点を座標系 Σ_1 の座標値に変
換する座標変換行列 1T_2 は、この場合、平行移動後に
点 O_1 で y 軸周りに θ_1 度回転する回転行列の積で表さ
れる。

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

同様に座標系 Σ_1 からグローバル座標系である Σ_0
への座標変換行列 $({}^0T_1)$ が求まる。

したがって、座標系 Σ_2 からグローバル座標系 Σ_0
への座標変換行列 $({}^0T_2)$ は以下のとおり求まり、 0O_2
は 0T_2 の第 4 桁の要素として表すことができる。

$${}^0T_2 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \\ {}^0O_2 = {}^0T_2 \cdot {}^0O_2 \Rightarrow {}^0O_2 = \begin{bmatrix} F_x(\theta_1, \theta_2, \theta_i) \\ F_y(\theta_1, \theta_2, \theta_i) \\ F_z(\theta_1, \theta_2, \theta_i) \end{bmatrix}$$

各行列要素は(1)式からも類推できるとおり、関節角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_i)$ の関数である。一般的には、アーム先端位置 $(\mathbf{r})$ を(3)式のように表すことができる。これが、関節角から、アーム先端位置を求める順運動学の式である。

$$\mathbf{r} = \mathbf{F}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_i) \quad (3)$$

(2) 逆運動学 (Inverse Kinematics)

順運動学は関節の回転角を使ってアーム先端位置を表すことであった。逆に、アームの先端位置が与えられたとき各関節の回転角を求める問題を、逆運動学と呼んでいる。

アニメーションを制作する際、アーム先端位置に相当する手先や足先の位置またはその運動経路を指定して、これを実現する各関節の回転角が算出できることを意味し、手先の位置を表す少数のデータでこれに関わる多数の関節角を自動的に算出することができるなど、アニメーションの制作には有効な手法のひとつである。

グローバル座標系で指定された関節やアームの先端の位置を指定し、これを実現する各関節角を求める問題は、(3)式の関数 $\mathbf{F}$ の逆関数を求めることである。 $\mathbf{F}$ は微分可能な非線形関数で、解析的な逆関数は容易に得られない。したがって、手先の位置を表す絶対値(座標値)からすべての関節角の絶対値を直接求めることはできない。

そこで、(3)式を時間で微分し(速度分解法)、線形化して考える。このことは、人物の姿勢がある状態にあり、その状態から微小時間経過した状態の関係を議論することになる。アニメーションの制作では図6に示すように、フレーム毎に関節角を求めることが目的であるため、隣接するフレーム間の問題を議論するこ

図6 運動経路に沿った動作の生成

とと考えることができる。

線形化した(3)式は、 $\mathbf{F}$ を各関節角で偏微分して得られるヤコビ行列 $\mathbf{J}$ を用いて次のように表すことができる。

$$\delta \mathbf{r} = \mathbf{J} \cdot \delta \Theta \quad (4)$$

$$\delta \Theta = [\delta \theta_1, \delta \theta_2, \dots, \delta \theta_i]^t$$

t は転置行列

このとき、 $\mathbf{J}$ が正則であれば、逆関数は $\mathbf{J}$ の逆行列 $\mathbf{J}^{-1}$ を使って次のようになる。

$$\delta \Theta = \mathbf{J}^{-1} \cdot \delta \mathbf{r} \quad (5)$$

(5)式から隣接するフレーム間で所望のアーム先端位置(手先等)の変化量から、それを実現するすべての関節角の変化量を算出することができる。

工業内ロボットでは $\mathbf{J}$ が正則である系が使われることが多いが、人物のアニメーションでは、非正方行列となる場合が多い。例えば、肩から手先までの系を考えると、図4から関節の自由度は7であり、 Θ は7次元ベクトルで、手先の位置 $\mathbf{r}$ は3次元ベクトルである。したがって、 $\mathbf{J}$ は 3×7 の行列となる。いいかえれば、3つの条件式から7個の変数を決定することになる。この場合、4変数だけ冗長な系であり、解は無数に存在する。したがって、(5)式で表されるような通常の逆行列は存在しない。

このような場合、何らかの条件を付加して解くことができる。関節角の変化量の2乗和を評価関数(W)として、これを最小とする条件を加えて(3)式の逆行列を求めると(7)式となる。

$$W = \delta \theta_1^2 + \delta \theta_2^2 + \dots + \delta \theta_i^2 \quad (6)$$

$$\delta \Theta = \mathbf{J}^+ \cdot (\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^+)^{-1} \cdot \delta \mathbf{r} \quad (7)$$

$$= \mathbf{J}^+ \cdot \delta \mathbf{r}$$

$\mathbf{J}^+$: 一般逆行列(Pseudoinverse)

(7)式の $\delta \mathbf{r}$ の係数を一般逆行列と呼び $\mathbf{J}^+$ で表す。 $\mathbf{J}^+$ は $\mathbf{J}$ が正則のとき $\mathbf{J}^{-1}$ に一致することが知られている。

$\mathbf{J}^{-1}$ に代わり $\mathbf{J}^+$ を使えば、冗長な系であっても逆運動学の解を求めることができる。しかし、注意しなくてはならないことは、(7)式は無数に存在する解のうちの1つ(特別解)であって、この解は必ずしも希望する動作を実現するものではない。

この手法には線形化近似の誤差が含まれる。精度を上げるためには、 $\delta \mathbf{r}$ を細分化して逐次計算する方法や、ニュートン法による収束計算が考えられるが、特別な場合を除いて、フレーム間隔での算出では無視できる程度の範囲にある。

(3) 一般逆行列の一般解

冗長な系の場合、希望する先端位置の変化量を実現

図 7 一般逆行列の一般解の性質

図 8 一般逆行列の一般解の性質

する関節角の組合せは無数にあり、これらすべての解は次式で表されることが知られている。

$$\delta\theta = J^+ \cdot \delta r + (I - J^+ \cdot J) \cdot Z \quad (8)$$

ただし、 z は関節角と同次元の任意ベクトル

I は関節角と同次元の単位行列

(8)式の第2項括弧内は一般逆行列(J^+)の直交射影行列で、任意ベクトル(z)を作用して得られる関節角ベクトルは J に対してゼロ空間へ射影する(図7)。すなわち、(8)式の第1項は δr を実現する関節角ベクトルを表し、第2項から得られる関節角ベクトルは注目している先端位置に影響を与えない。いいかえれば、 z を適切に選べば、注目している関節位置に影響を与えることなく、関節角を希望の値に近づけることができ、全体の形状(姿勢)を操作できる(図8)。

例えば、任意ベクトル z を(9)式とすると、第2項による関節角の変更は手先など連結の先端位置または関節位置など逆行列で制御した位置に影響を与えない範囲で、各々の関節角を θ_{di} に近づける効果が得られる。

図 9 アニメーション作成手順

図 10 キーフレーム姿勢の算出手順

$$Z = [\alpha_1(\theta_1 - \theta_{d1}), \dots, \alpha_i(\theta_i - \theta_{di}), \dots]^t \quad (9)$$

$$= -\text{grad}(H)$$

$$H = 1/2 \sum \alpha_i(\theta_i - \theta_{di})^2 \quad \alpha_i: \text{重み係数}$$

(4) 運動学を用いたアニメーションシステム

図9は運動学を利用したアニメーションシステムの例である。このシステムでは、対話的な操作でキーとなるフレームでの姿勢を何枚か作成する。つづいて、これらのキーフレーム間で適当な枚数の中割りフレーム(フレーム姿勢)を手先の運動経路を指定して自動的に生成する。

まず、キー姿勢の作成は、先端位置を対話的に操作して大まかな姿勢を決める。このとき特別解だけを使って各関節角が定まる。このときの姿勢は必ずしも希

望の姿勢が実現していない。このため、先端以外の関節の位置を操作して希望の姿勢を実現する。このときは、操作する関節から起点に向かう系だけで得られるヤコビ行列 (J) を使った特別解で関節角の変化量 ($\delta\theta$) を求め、関節角の絶対値を算出する。得られた関節角を目的関節角として、系全体のヤコビ行列の直交射影行列を使って、すべての関節角を修正する。

必要な中割りフレームでの関節角は、隣接するキーフレーム間で内挿する。特に、先端位置の運動経路を特定する必要があるれば、逐次ヤコビ行列を算出して特別解を求める。さらに、キーフレームから内挿した関節角を目標値に設定して、直交射影行列の項から得られる変化量で修正する。

特別解だけを使った場合、先端が指定した運動経路に沿った動作を実現できるが、動作完了時の姿勢は事前に判明しないため、これに続くフレームでの動作データに制約が生じる。直交射影行列の項を効果的に利用することで、動作を区間に分けて処理する手法を利用できる。

4. ダイナミックシミュレーション (Dynamic simulation)

より自然な動作をできるだけ自動的に生成するため、いいかえれば、キーフレーム法の中割り画像の枚数や形状変化の速度までも自動的に生成するため、重力や質量などの影響を考慮して、力学的な法則を適用しようとする試みは、ダイナミックシミュレーションと呼ばれている。

4.1 動力学 (Dynamics)

ダイナミックシミュレーションは、運動や変形を引き起こす力やトルクを指定して表示物体の時間的な変化、すなわち、重心の加速度や軸周りの回転加速度を算出し、連続するフレームで図形の変化量を自動的に決定しようとするものである。動作の主体が単純な球や直方体の場合は動作を決定する力は外力だけによるため、ニュートンの第2法則とオイラーの運動方程式から容易に運動を算出できる。

骨格構造を持つ系ではそれほど単純ではない。骨格構造を持つ系では摩擦のない関節で連結され、この点で自由に回転できるとしても、質点系の運動方程式を考える必要がある。どの方程式を基本にするかは報告によって異なり、優劣はつけがたい²³⁾²⁴⁾。

(10)式はそのひとつであるラグランジュの方程式である。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial L}{\partial q_r} = Q_r \quad (10)$$

$$r=1, 2, \dots, n$$

Q_r : 一般化力ベクトル (力, トルク)

q_r : 一般化座標

$$L = T - V$$

T : 運動エネルギー

V : ポテンシャルエネルギー

(10)式は各自由度 ($r=1, 2, \dots, n$) に対して系のエネルギーと外力の関係を示すもので、系全体の n 個の方程式を変形して逆動力学 (Inverse Dynamics) の次式が得られる。

$$[A] \cdot [\ddot{q}] = [B] \quad (11)$$

$[A]$: 質量行列 $n \times n$ (質量, 慣性モーメント)

$[\ddot{q}]$: 一般化加速度ベクトル (加速度, 角加速度)

$[B]$: 一般化力ベクトル (力, トルク)

また、可逆であれば順動力学 (Forward Dynamics) の次式が得られる。

$$[\ddot{q}] = [A]^{-1} \cdot [B] \quad (12)$$

(12)式を使って、あるフレームで、各リンクの重心位置、速度、回転角、回転角速度が既知であれば、そのフレームで加わる力とトルクから加速度 ($\ddot{q}$) が計算できる。

逆に必要な加速度から、各リンクに加わる力やトルクを(11)式から算出することもできる。

図11は動力学を用いた動作データ生成システムの一例を示した。動作開始時点では、パラメータ更新ブロックへ初期状態がロードされる。これらの値を基に、系の状態を表す行列 $[A]$ が数値的に計算される。この行列に対して、動作に対応する外力を指定し、順動力学の式から各部の加速度が得られる。この加速度

図11 動力学によるアニメーションシステム

図 12 高速化した動力学的手法

から次の表示フレームまでの時間を使って、新しい位置や、速度、角速度などのパラメータを更新して、次のフレームのデータ作成に進む。

このシステムでは、動作の速度や、どのような動作になるかは、すべて入力される力やトルクによって操作される。このため、思わぬ動作が実現したり、関節の回転範囲を越えることもある。そこで、逆動力学の式を使って、種々の拘束条件を満足するように、指定された力やトルクを修正する方法が採られている。

この手法は、骨格構造を反映した運動方程式を用いるために直接加速度や角加速度が算出できる特長があるが、計算時間が膨大になるという問題が大きい。

4.2 動力学的手法の高速化

動力学を使いながら計算時間を削減する手法が提案されている²⁹⁾。

この手法は、リンク構造の全体の運動方程式を扱う代わりに、各々のリンクに対して個別の運動方程式（ニュートンの第2法則とオイラーの方程式）を適用し、動作を実現すると思われる一般化力を、それぞれのリンクに個別に作用させて、重心の加速度、角加速度を求める。計算は単純で高速化を図れるが、各リンクが関節で連結され、また、本来固定されている箇所などの拘束条件がこわされてしまう。

そこで、次のステップとして、本来の拘束条件を満たすために必要な各部に働くべき一般化力を求めて、指定された力を補正する。具体的には、得られた一般化加速度から、各リンクの移動量、回転量を算出し、拘束条件からの遊離量を求める。この値から逆動力学の式により、拘束条件を満たすために必要な一般化力

を計算する。この操作を拘束条件が満たされるまで繰り返す。

この処理は、各リンク毎に起点リンクから先端に向けて順次実行する。

4.1節、4.2節の手法はともに産業用ロボットの設計技術に応用したものである。ロボットの設計では、所定の動作を実行するため、逆動力学を使って各関節位置に置かれたモータを的確に駆動するトルクを求めることが主眼であるのに対し、アニメーション技術として応用する主眼は、物理法則に適合した動作の自然さである。このため、ロボット工学の技術を直接適用することは本来の目的を見失うことになりかねず、注意が必要である。

5. む す び

人物や動物といった骨格構造体のアニメーション技術を中心に解説してきた。運動学を利用したシステムは操作性の点で良好な特性を実現できる反面、物理的な法則に従った動作とするには不十分である。逆に、ダイナミックシミュレーションは、希望する動作を的確に実現する力やトルクを指定する必要がある、力学的な知識を必要とするため操作性に問題がある。両者は相補的な関係にあり、両手法を取り入れたシステムの研究が進んでいる。

アニメーション技術の中には、ここで取り上げなかった課題として、画像生成の高速化はもとより、衝突検出やデータグローブに代表される多次元入力デバイスの技術、動きほけを再現するモーションブレンダーなど、レンダリングとの関わりなどがある。

画像生成技術に期待されるものは、現実の世界を撮影して映像化する方法では得られない映像であったり、生成する映像を演出意図に添って自由に制御できることが重要な要素であり、それを支えるアニメーション技術のますますの発展が期待される。

【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”, 産報出版(1983)
- 2) 町田ほか: “コンピュータイメージング”, コロナ社(1984)
- 3) N. Thalmann, D. Thalmann: “Computer Animation”, Springer-Vorlag Tokyo, Berlin, Heidelberg, New York (1985)
- 4) 根本, 大町: “自然言語を解説し動画を自動生成するアニメーションシステム”, 日経 CG, pp. 110-117(1987.8)
- 5) 佐藤: “仕事に使えるペイントシステム”, 日経 CG, pp. 8-18(1987.1)
- 6) S. Strassmann: “Hairy Brushes”, Proc. SIGGRAPH'86, pp. 225-232(1986)
- 7) A. R. Smith: “Tint Fill”, Proc. SIGGRAPH'79, 13, 3, pp. 276-282(1979)

- 8) N. Burtnyk, M. Wein: "Interactive Skelton Techniqus for Enhancing Motion Dynamics in Key Frame Animation", ACM Com., **19**, 10, pp. 564-596(1976)
- 9) R. Baeker: "Picture-driven animation", SJCC, pp. 273-288(1969)
- 10) W. Reeves: "Inbetweening for Computer Animation Utilizing", Proc. SIGGRAPH'81, pp. 263-269
- 11) S. T. Crane, R. D. Snyder: "Animatic Camera Effects System (ACES)", NCC, pp. 73-81(1980)
- 12) 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(Dec. 1983)
- 13) T. O'Donnell, A. Olson: "GRAMPS-A Graphics Language Interpreter for Real-Time, Interactive, Three-Dimensional Picture Editing and Animation", Proc. SIGGRAPH'81, pp. 133-142(1981)
- 14) M. Girard, A. A. Maciejewski: "Computational Modeling for the Computer Animation of Legged Figures", Proc. SIGGRAPH'85, **19**, 3, pp. 263-270 (1981)
- 15) A. Fournier, W. T. Reeves: "A Simple Model of Ocean Waves", Proc. SIGGRAPH'86, **20**, 4, pp. 75-84(1986)
- 16) W. Reeves: "Particle Systems—A Technique for Modeling of Fuzzy Objects", ACM trans. Gr., **12**, 2, pp. 91-108 (1983)
- 17) 内木, 丸一, 所: "能動的キャラクターを用いたアニメーション生成手法", NICOGRAPH 論文集, pp. 197-206(1986)
- 18) C. Reynolds: "Flocks, Herds and School: A Distributed Behavioral Model", ACM Computer Graphics, **21**, 4, pp. 25-34(1987)
- 19) M. Potmesil, I. Chakravarty: "Modeling Motion Blur in Computer-Generated Image", Proc. SIGGRAPH'83, **17**, 3, pp. 389-399(1983)
- 20) J. Korein, N. Badler: "Temporal Anti-Aliassing in Computer Generated Animation", Proc. SIGGRAPH'83, **17**, 3, pp. 377-388(1983)
- 21) 安居院, 大江, 富沢, 中嶋: "アニメーションプリミティブの合成による3角関数近似式動画", 信学誌, **63-D**, 1, pp. 87-92 (1980)
- 22) 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", テレビ学技報, IPD 90-3, pp. 13-18(1984)
- 23) J. Wilhelms: "Using Dynamic Analysis for Realistic Animation of Articulated Bodies", IEEE CG & A, **6**, 12, pp. 12-27(1987)
- 24) N. M. Thalmann, D. Thalmann: "The Direction of Synthetic Actors in the Film Rendez-Vous a Montreal", IEEE Computer Graphics & Application Dec., pp. 9-19 (1987)
- 25) K. Waters: "A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression", ACM Computer Graphics, **21**, 4, pp. 17-24(1987)
- 26) 小松: "キャラクター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)
- 27) Paul M. Isaacs, Michael F. Cohen: "Controlling Dynamic Simulation with Kinematic Constraints, Behavior Function and Inverse Dynamics", ACM Computer Graphics, **21**, 4, pp. 215-224(1987)
- 28) Armin Bruderlin, Thomas W. Calvert: "Goal-Directed Dynamic Animation of Human Walking", ACM Computer Graphics, **23**, 3, pp. 233-252(1989)
- 29) Ronen Barzel, Alan H. Barr: "A Modeling System Based on Dynamic Constraints", ACM Computer Graphics, **22**, 2, pp. 179-188(1988)

ふくい かずお
福井 一夫 昭和50年、東京工業大学大学院電子物理工学専攻修士課程修了。同年、NHKに入局。甲府放送局を経て、昭和54年より、放送技術研究所に勤務。コンピュータグラフィックス、画像処理装置等の番組制作のための映像機器の研究、開発に従事。現在、同所画像研究部主任研究員。