

力学シミュレーションによる2次元アニメーション自動生成

青木 政勝[†] 新谷 幹夫[†] 筒口 拳^{††}

Dynamic Texture: A Physically-Based 2D Animation System

Masakatsu AOKI[†], Mikio SHINYA[†], and Ken TSUTSUGUCHI^{††}

あらまし CGアニメーションの作成を容易にするため、テクスチャ画像をリアルに運動させる手法(Dynamic Texture法)を開発した。本手法では、与えられた画像に対して、力学的な骨組みにあたるスケルトンを指定する。これに対して力学シミュレーションを適用し、スケルトンのリアルな動きを生成する。このスケルトンに合わせて、もとの画像を変形することにより、リアルなアニメーション画像を生成することが可能となる。従来のアプローチと最も異なる点は、3次元モデルを必要としない点にある。すなわち、手間のかかる3次元モデリングを行うことなく、容易にリアルなアニメーションを作成できる。対象物体として風にそよぐ草木及び人物歩行を取り上げ、実験を行ったところ、良好な結果を得た。

キーワード 力学シミュレーション, 2次元アニメーション, モーフィング, テクスチャマッピング

1. ま え が き

写実的なアニメーションの生成はコンピュータグラフィックスの重要な課題である。様々な研究が意欲的に行われているが、力学シミュレーションを利用した手法(物理ベース手法: Physically-based methods)が有力であり、剛体, 柔軟物体, 流体などの無機物をはじめ, 動物や人間の動作など数多くの運動に関して, 良好な結果が報告されている。これらのアプローチでは, 3次元のCGモデルをもとに, 質点系や剛体系などの力学モデルを構築する。次いで, 力学モデルに対する運動方程式を数値的に解くことにより力学モデルの幾何構造の変化を計算する。これに応じてCGモデルを変形することにより, アニメーションが自動的に作成される。

しかしながら, 複雑な3次元CGモデルの作成は, 高度な技能を有する専門家を要する, 手間のかかる作業である。また, 複雑なモデルのレンダリングは計算量が多いという問題もあり, ビルボード方式を利用して, 樹木等をテクスチャで3次元モデルの代用とする

ことが標準的に行われている[10]。記憶量の制限などから, 通常, これらのテクスチャは静止画から構成され, 運動を表現できない。

力学シミュレーションをテクスチャに適用できるようになれば, 3次元モデルと同様なリアルなアニメーションがより手軽に作成できることになる。また, コンピュータ化が進みつつあるセルアニメーションにおいても, 静止画をリアルに動かす技術が確立すれば, アニメータが描いた背景の樹木などに動きを与えることが可能となる。背景などにリアルな動きを付けることは困難であったので, 画期的な新効果を生むことができる。

本論文では, 力学シミュレーションとモーフィング技術を結合することにより, 2次元のテクスチャ画像からリアルなアニメーションが作成できることを示す[1]。物理ベース手法では, 3次元CGモデルを単純化した力学モデルを用いてシミュレーションを行う。言い換えれば, 3次元CGモデルがなくても, 力学モデルがあれば力学シミュレーションが可能である。この点に着目し, まず, 静止画から物体の骨組み(スケルトン)を作成し, このスケルトンを力学モデルとしたシミュレーションを行う。これにより, スケルトンのリアルな動きが生成される。このスケルトンに合わせてもとの入力画像を変形(モーフィング)させることにより, 静止画をリアルに動画化することが可能と

[†] 日本電信電話株式会社 NTTサイバーソリューション研究所, 横須賀市

NTT Cyber Solutions Laboratories, NTT Corporation, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

^{††} NTTラーニングシステムズ株式会社, 東京都

NTT Learning Systems Corporation, Minato-ku, Tokyo, 106-8566 Japan

なる．この考えは van Overveld [4] により提案されていたが，力学系の作成方法等が不明確であり，効果も実証されていなかったため，余り注目を集めなかった．本論文では，題材として風にそよぐ草木及び人物歩行を取り上げ，力学計算法，システム構成，パラメータ等の指定方法を提案するとともに，実験により有効性を実証する．

2. 処理概要

図 1 に処理手順を示す．まず，入力した静止画像から背景を抽出し，対象物体（樹木や人物）を切り出す．次いで，樹木の幹，枝，葉や人物の手足などに対応するスケルトンを定義して，画像とスケルトンの対応を求める．得られたスケルトンに対して，接続関係を規定する．また，硬さなどの力学パラメータも指定する．これにより力学モデルを定義できるので，力学シミュレーションを行い，スケルトンの運動を計算する．スケルトンと入力画像との対応を用いて，対象画像を変形させ，動画を作成する．この動きを参照し，必要であれば力学パラメータを修正する．

以下，処理の基本となる力学シミュレーション技法を概説し，次いで処理の詳細を述べる．

3. 樹木の力学シミュレーション

樹木の力学シミュレーション手法としては，Multi-link 法 [2]，モード解析法 [5] などが提案されている．本手法ではいずれの手法も適用可能であるが，竹のように剛性の高い物体のシミュレーションに効果がある

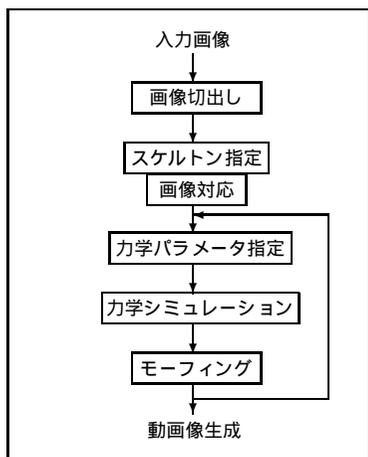


図 1 処理手順
Fig. 1 Outline of the algorithm.

モード解析法を採用した．モード解析では，ヤング率などの力学パラメータと自然周波数などの運動学的パラメータとの対応がとりやすいという利点もあり，後述のようにパラメータ指定を容易にすることが可能となる．風は統計的手法により，周期的な風の世界速度場を生成する．更に，生成した運動が繰り返し利用できるように周期的な定常解を求める．

3.1 モード解析

モード解析は振動解析等でよく用いられる手法で，Pentland が CG に導入した [3]．モード解析理論によると，線形系の任意の運動 $v(x, t)$ は力学モデルによって定まるモード関数 $V_r(x)$ の線形和，

$$v(x, t) = \sum_r V_r(x) q_t(t), \quad (1)$$

で表される．均一な棒（beam）に対するモード関数は，境界条件から解析的に与えられる（図 2）．通常はこの解析解をモード関数として用いるが，ユーザが対話的に指定することも可能である．

さて，振動 $q_t(t)$ は外力 $f(t)$ により変化し，方程式

$$\frac{d^2 q_t}{dt^2} + c\omega_r^2 \frac{dq_t}{dt} + \omega_r^2 q_t = K_r f(t), \quad (2)$$

により求まる．ここで， ω_r は自然周波数で，

$$\omega_r^2 = ((r - 1/2)\pi)^2 \sqrt{EI/\rho A}. \quad (3)$$

ただし， E はヤング率， I は慣性モーメント， ρ は密度である．また，係数 K_r は力点の位置により定まる．

方程式 (2) を見ると，ヤング率 E ，密度 ρ ，減衰定数 c が一定である場合は，これらを指定するだけで枝の長さや太さを問わず，方程式が記述される．この特徴を利用することで，力学パラメータの設定を容易に行うことが可能となる．

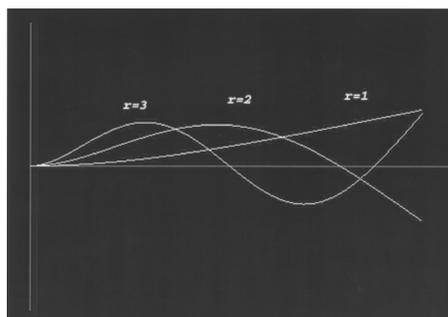


図 2 モード関数
Fig. 2 Modal functions.

3.2 統計的風速場

風の場のモデリングは、渦や湧き出しなどの線形場プリミティブを用いる方法 [8]、統計的性質を用いる方法 [5]、双方を用いる手法 [7] などが知られている。煙などの運動表現には渦が不可欠であるが、草木の運動では支配的ではないと考え、統計的手法による風生成のみを行った。具体的には、速度場の時空間相関モデルにより周期的な風の速度場をフーリエ法により生成する [5]。図 3 に速度場の一例を示す。

速度場を $U(x, t)$ とすれば、これによる外力は

$$f(t) = (1/2)\rho_a U^2 C_d \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 C_d は形状により決まる Drag 係数、 ρ_a は空気の密度である。

3.3 定常解

速度場が周期的なので、外力も周期的となり、方程式 (2) の解は周期的な定常解をもつ。前述のように、周期解は繰り返し適用することで長時間のアニメーションが作成できるので都合がよい。しかし、オイラー法など直接的な手法で定常解を求めるのは、時間がかかるのみならず、安定性に問題がある。そこで、本研究では重畳法 [6] により定常解を求める。

この手法では、まず特定の 1 周期 (例えば $0 < t < T$) の間だけ風を吹かせる。

$$f_T(t) = \begin{cases} f(t) & \text{if } 0 < t < T, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

このときの振動 $p(t)$ をオイラー法などにより求める。この解をシフトした関数の和、



図3 風速場
Fig. 3 Wind velocity field.

$$q_t(t) = \sum_n p(t - nT), \quad (5)$$

は実は $f(t)$ を無限時間作用させたときの解となる。これが線形方程式系では常に成り立つことは容易に証明できる。

4. 人物歩行のシミュレーション

人物の歩行モデルでは、人体の各部位を長さの変化しない剛体棒とみなし、その剛体棒を関節で接続した多関節構造体として表現している (図 4)。外力としては脚が床を蹴る力 (床反力)、内力としては股関節における筋力を想定している。シミュレーションエンジンとしては、動力学と運動学を組み合わせた WWWalk 法 [9] を用いた。本手法では、ユーザが指定する歩行経路から、脚の着地位置等の境界条件を求め、これに基づいて重心運動、回転運動、関節角度等を計算することにより、歩行動作を効率的に生成する。また、特徴としては、

- 計算量が少なく、実時間処理が可能
- 階段や坂道などの環境に柔軟に対応可能
- 指定すべきパラメータが少ない

が挙げられる。以下、簡単に処理の概要を述べる。

(a) 境界条件の決定

指定された歩行経路、平均速度から、脚の着地位置、及び着地時間を求める。これから、着地時間における重心位置や進行方向などの境界条件を決定する。

(b) 重心運動の計算

力学的には、立脚に対する地面からの反力 (床反力) が歩行動作における支配的な外力となる。人体の重心 \vec{r} の運動方程式は以下のように近似できる：

$$M\ddot{\vec{r}}(t) = \vec{F}_L(t) + \vec{F}_R(t) - M\vec{g}, \quad (6)$$

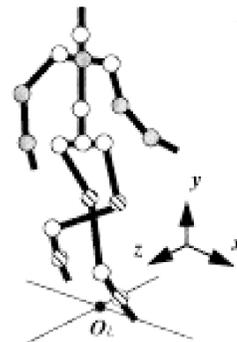


図4 多関節構造体モデル
Fig. 4 The human model.

ここで、 M は人体の全質量、 \vec{g} は重力加速度、 $\vec{F}_L(t)$ 、 $\vec{F}_R(t)$ はそれぞれ左足、右足が受ける床反力である。

床反力の時間変化のパターンは、個人差や歩行状態に対し安定していることが知られており [9]、各方向の成分は、フーリエ級数の有限和、

$$F_x(t) = s_x \sum_{k=1}^3 a_{xk} \sin\left(\frac{2k\pi}{T^{stance}}t\right), \quad (7)$$

$$F_y(t) = s_y \sum_{k=1}^3 a_{yk} \sin\left(\frac{k\pi}{T^{stance}}t\right), \quad (8)$$

$$F_z(t) = \pm s_z \sum_{k=1}^3 a_{zk} \sin\left(\frac{k\pi}{T^{stance}}t\right), \quad (9)$$

で近似できる。ただし、 a_{xk} 、 a_{yk} 、 a_{zk} はフーリエ級数の展開係数であり、 T^{stance} は着地からその足が地面を離れるまでの時間である。そこで、着地時点での重心位置が境界条件と一致するように、床反力の強度 s_x 、 s_y 、 s_z を反復計算により求める。

(c) 軸足回りの回転

ターンする場合など進行方向が変化するとき、軸足を中心とした回転運動が起こる。重心移動の計算と同様に、着地時期において進行方向が一致するように床から受けるトルクを反復計算により求め、回転運動を計算する。

(d) 関節角の計算

軸足の関節角は重心位置をもとに運動学的に求める。また、手の関節角を主に脚の動きに合わせ、運動学的に決定する。遊脚（上げている足）については、足の先端のパスを先験的に決め、このパスに沿うように股関節の筋力を調整することで動力学計算する。

5. 処理手順

力学シミュレーションを除く各処理の詳細を述べる。

5.1 入力/切出し

画像は PhotoshopTM 等の市販ペイントシステムで作成する。作成の際、枝や幹などの各部分が重なる場合には、それぞれを異なったレイヤに格納するようにする。また背景は既知の色にする。このように作成することにより、対象画像の切出しを容易に行うことができる。

5.2 スケルトン

切り出した樹木や人物の画像を表示し、その上に GUI を用いて、対話的にスケルトンを定義する。図 5 に示すように、マウスなどのポインティングデバイス

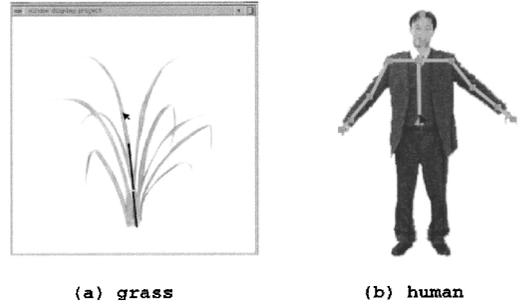


図 5 スケルトン指定
Fig. 5 Specifying skeletons.

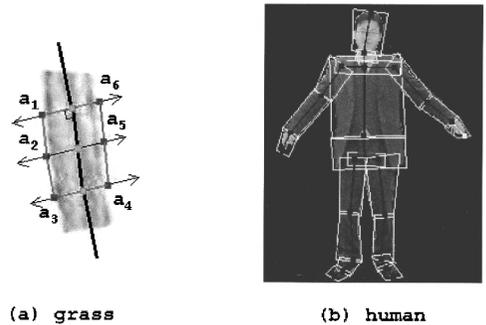


図 6 スケルトンと画像の対応
Fig. 6 The correspondence between skeletons and the given image.

により端点（ノード）を入力して行き、スケルトンを構成する線分を作成する。枝が分かれる場合には、既に定義されているノードを起点に新たな線分を作成することで、接続関係を明らかにする。

後述のモーフィングを行うためには、スケルトンと画像との対応が必要である。樹木の場合は、幹や枝がほぼ線状であることを利用し、自動的に関係を求める（図 6(a)）。まず、各ノード及びスケルトンの中点からスケルトンに垂直な線分を両側に引き、その線分の下にある画像の色が背景の色になるまで延ばす。この六つの端点 $a_1 \sim a_6$ を結んだ方形領域により、テクスチャ領域を近似する。厳密には、対象画像が方形領域からはみ出る場合もあるが、実用上問題はなかった。このようにして得られた方形領域とスケルトンとを対応させる。スケルトンの動きに合わせて、対応づけた方形領域の画像を移動することにより画像の変形が可能となる。

一方、人物の場合は、胴体と手足の分離など、機械的な分割は容易ではない。しかしながら、樹木と異なる

リスケルトンの数は少ないので、図 6(b) のように、GUI を用いて対話的に対応を与えることとした。各スケルトンごとに、対応する方形領域を個別に指定する。このとき、方形領域は各々重なるようにして、すき間が生じないようにする。現在はユーザが行っているが、実際にはあまり負担にはなっていない。

5.3 力学パラメータの設定

5.3.1 樹木

樹木などの複雑な力学モデルでは、力学パラメータを枝や葉に対し、1本ずつ個別に指定するのは現実的ではない。幸い、モード解析法では、式(2)に示されるように、ヤング率、密度、減衰率など各部分に共通する物理定数を指定すれば、各枝の長さや太さに応じた方程式が生成できる。すなわち、三つのパラメータを指定するだけで、力学モデルが完成することになる。しかし実際には、

- 密度以外のパラメータにはなじみが薄く、設定値の選択が容易でない、
- 生成された動きに満足な場合、どのパラメータをどのように制御すればよいのかわかりにくい、
- 描かれる画像は、枝が太い、葉が少ない、など、デフォルメされていることが多く、物理的に正しくとも、リアルな動きが生成されない場合がある、などの問題がある。

そこで、幹、枝、葉などのグループごとに代表する部分(枝など)を選び、

- 自然周波数 (f_0)
- 減衰時間 (τ_0)
- 振幅 (A_0)

の三つの運動学的パラメータを指定し、

$$E = (2\pi f_0)^2 (1/13.0) l^4 \rho \quad (10)$$

$$C_d = 2A_0(2\pi f)^2 / \rho_a U^2 K_r \quad (11)$$

$$c = 2/(\tau_0(2\pi f)^2) \quad (12)$$

の関係式を用いて、共通力学パラメータに変換する。ここで、 l は代表枝の長さで、他の定数は式(2)、(4)と同様である。これにより、作業量の増加を抑えた上で、パラメータ指定の操作性を向上させた。

5.3.2 人物

人物の場合は、必要な力学パラメータは質量、慣性モーメントである。これらは、質量密度、厚さなどが一定であるとみなし、スケルトンと対応づけた画像の面積から計算する。歩行経路は図 7 に示すように、マウ

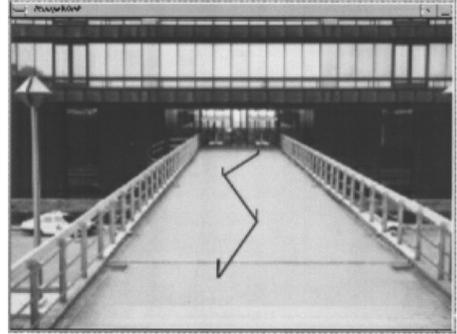


図 7 歩行パス指定例
Fig. 7 Setting walking path.

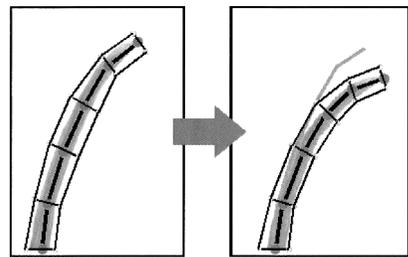


図 8 モーフィング
Fig. 8 Morphing.

スにより指定する。歩幅や歩行速度は身長からデフォルト値を決めるが、直接指定することも可能である。

5.4 モーフィング

3. で述べたモード解析による力学シミュレーションを行い、スケルトンの運動を計算する。スケルトンを指定した際に対応づけた画像領域を力学シミュレーションで計算されたスケルトンに合わせて変形させる。これは、図 8 に示すように、スケルトンに対応させ画像領域を移動させることで実現する。方形領域にテクスチャマッピングによりもとの画像を貼り付ける。これにより、画像が変形し、アニメーションが作成できる。

6. 結 果

本手法を実際に適用し、アニメーションを作成した。図 9 は入力画像、図 10 は各々に対するスケルトンである。図 11、図 12、図 13 はスケルトンの動きを示し、図 14、図 15、図 16 はモーフィングにより生成した画像例である。

草、竹、人物、いずれの例でも、力学シミュレーション及び画像生成は、SGI のワークステーション O2 上



(a) grass



(a) grass



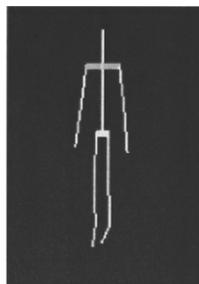
(b) bamboo



(b) bamboo



(c) human



(c) human

図9 入力画像
Fig9 Input images.

図10 スケルトン画像
Fig10 Skeleton images.

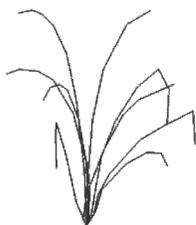


図11 スケルトンの動き(草)
Fig.11 Motion of skeleton (grass).

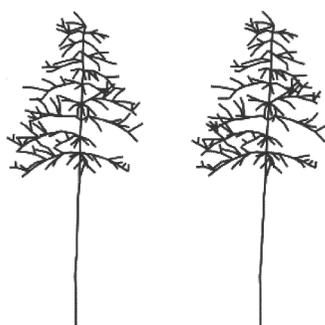


図12 スケルトンの動き(竹)
Fig.12 Motion of skeleton (bamboo).

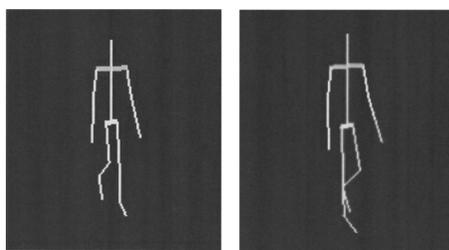


図13 スケルトンの動き(人物)
Fig.13 Motion of skeleton (human).



図14 動画像(草)
Fig.14 Animation (grass).



図15 動画像(竹)
Fig.15 Animation (bamboo).

で、ほぼ実時間(20 frame/s以上)で実現できた。また、運動パラメータ指定は容易で、ほとんどストレスを感じなかった。一方、スケルトンの入力、草では、スケルトン数が54本で約1分、竹では、スケルトン数が987本で約30分を要した。前述のように、入力



図 16 動画像(人物)
Fig. 16 Animation (human).



図 19 木と草が風にそよぐ。©株式会社ドマーニ
Fig. 19 Another sample shot.



図 17 21世紀夢の技術展 展示システム
Fig. 17 An example of exhibition system.



図 18 アニメーション「*gift for nature*」, 竹林が提案手法により動画化されている。
Fig. 18 A sample shot from *gift for nature*.

画像はきれいに分離されているので、細線化処理等の導入を進めるなど、スケルトン入力自動化の検討が必要である。なお、画像とスケルトンとの対応付け処理は、スケルトンの数に応じて増加するが、草では、0.02秒、竹では、0.5秒であった。

人物歩行の例では、テクスチャが平面的なために人

物の方向をあまり変化させることができないが、意外に興味を引く映像を作成できる。日本経済新聞社主催・21世紀夢の技術展(2000年7月20日から8月6日、東京ビッグサイト)NTTブースにおいて展示し、主に子供が体験利用したが、大好評を博した。図17に展示に用いたシステムの画面を示す。

最後に、本手法により作成したアニメーション、*gift for nature*、及びコマーシャルフィルムからのスナップを図18、図19に示す。

7. む す び

CGアニメーションを容易に作成するために、テクスチャ画像をリアルに運動させる手法、Dynamic Texture法を開発した。本手法では、与えられた画像に対して、力学的な骨組みにあたるスケルトンを指定する。このスケルトンに対して力学シミュレーションを適用することにより、スケルトンのリアルな動きを生成する。スケルトンに合わせて、もとの画像を変形することにより、リアルなアニメーション画像が作成できる。従来のアプローチと最も異なる点は、3次元モデルを必要としない点にある。すなわち、手間のかかる3次元モデリングを行うことなく、リアルなアニメーションを作成できる点が、本手法の特徴となっている。

対象物体として、風にそよぐ草木、人物歩行を取り上げ、実験システムを構築した。力学シミュレーションとしては、モード解析を用い、風のモデルとしては統計的モデルを採用した。また、歩行シミュレーションとしてはWWWalk法を用いた。評価実験として3分ほどのアニメーションを作成したところ、少ない作業時間で印象的なアニメーションが作成可能となるこ

とが確認された。また、コマーシャルフィルムの作成、21世紀夢の技術展での出展を通じ、実用的価値も検証された。

謝辞 日ごろ御指導頂く曾根原登部長、御討論頂いたコンテンツ流通プロジェクトの皆様にご感謝致します。

文 献

- [1] M. Aoki, M. Shinya, K. Tsutsuguchi, and N. Kotani, "Dynamic texture: Physically based 2D animation," Siggraph'99 Conference Abstracts and Applications (Siggraph'99 Sketches), p.239, 1999.
- [2] P.M. Isaacs and M.F. Cohen, "Controlling dynamic simulation with kinematic constraints, behavior functions and inverse dynamics," Computer Graphics, vol.21, no.4, pp.215-224, 1987.
- [3] A. Pentland and J. Williams, "Good vibrations: Modal dynamics for graphics and animation," Computer Graphics, vol.23, no.3, pp.215-222, 1989.
- [4] C. van Overveld, "A technique for motion specification in computer animation," The Visual Computer, vol.6, pp.106-116, 1990.
- [5] M. Shinya and A. Fournier, "Stochastic motion—Motion under the influence of wind," Computer Graphics Forum (Proc. of Eurographics'92), vol.11, no.3, pp.C-119-128, 1992.
- [6] M. Shinya, T. Mori, and N. Osumi, "Periodic motion synthesis and Fourier compression," J. Visualization and Computer Animation, vol.9, pp.95-107, 1998.
- [7] J. Stan and E. Fiume, "Turbulent wind fields for gaseous phenomena," Proc. SIGGRAPH'93, pp.369-376, 1993.
- [8] J. Wejchert and D. Haumann, "Animation aerodynamics," Computer Graphics, vol.25, no.4, pp.19-22, 1991.
- [9] K. Tsutsuguchi, S. Shimada, Y. Suenaga, N. Sonehara, and S. Ohtsuka, "Human walking animation based on foot reaction force in the three-dimensional virtual world," J. Visualization and Computer Animation, vol.11, no.1, pp.3-16, 2000.
- [10] G. Bell, R. Carey, and C. Marrin, "The virtual reality modeling language," 5. Node Reference, Version 2.0, ISO/IEC WD 14772, Aug. 1996.

(平成12年10月17日受付, 13年2月5日再受付)



青木 政勝

平6信州大・繊維卒。平8同大大学院工学研究科修士課程了。同年、日本電信電話(株)(NTT)入社、NTTヒューマンインタフェース研究所勤務。以来、コンピュータグラフィックスの研究開発に従事。現在、同社NTTサイバーソリューション研究所

に勤務。



新谷 幹夫 (正員)

昭56早大・理工修士課程了。同年、日本電信電話公社(現NTT)入社。以来、文字認識の研究、コンピュータグラフィックスの研究に従事。昭63~64トロント大学客員研究員。平7~9日本電信電話(株)NTTヒューマンインタフェース研究所カリフォルニアラボ勤務。現在、同社NTTサイバーソリューション研究所主任研究員。博士(工学)。ACM会員。



筒口 拳 (正員)

平1京大・理卒。平3同大大学院工学研究科修士課程了。同年、日本電信電話(株)NTTヒューマンインタフェース研究所入社、コンピュータグラフィックス、コンピュータアニメーション、コンピュータビジョンの研究に従事。同社NTTサイバースペース研究所、NTTサイバーソリューション研究所を経て、平12よりNTTラーニングシステムズ(株)に勤務。博士(情報学)。日本情報処理学会、IEEE、ACM各会員。