

## 確率モデルを用いた頭髪の動きのコンピュータ アニメーション†

安居院 猛<sup>††</sup> 三輪 喜良<sup>††</sup> 中嶋 正之<sup>††</sup>

自然物体である無機物や生命体は、形状でも動きの面でも複雑なものが多い。現実感のある人間や動物などをコンピュータグラフィックスで表現する試みが盛んに行われているが、人間の頭髪を自然に表現することは現時点では困難である。実際の頭髪の動きは非常に複雑であり、その適切な動きを表現することは大きな課題である。旗や電線などのような柔物体の動きを力学的手法で表現する試みは数多く行われてきたが、力学的方程式の近似解を求めることは一般に時間がかかるため、扱う物体の量が多い頭髪の動きの表現には適さない。そこで、本論文では、実際に1本の糸が風になびく動きを解析し、その結果に基づく確率モデルを提案する。また、頭髪のように多数の糸状物体が風になびくときには、風の向きや強さなどのパラメータの与え方が問題になってくるが、本論文では、2次元ポテンシャル流れの解析解を利用して頭髪1本1本にパラメータを与える方法を提案する。そして最後に、頭髪が風に吹かれてなびく動きを表す連続画像の生成を試みる。その結果、強風による影響は表現できなかったが、力学的方程式の近似解を求めずに、比較的短時間でそれらしい動きを表現することができた。

### 1. はじめに

コンピュータアニメーションで自然物体の動きを表現する試みが最近盛んに行われている。現在までに提案されているその実現方法は2種類に分けられる。1つは、力学的なモデルを作り、その方程式の近似解を求める方法<sup>1),2)</sup>であり、もう1つは動きを確率的なものであるとして乱数を用いる方法<sup>3),4)</sup>である。

糸状物体が風に吹かれてなびく動きは複雑であり、この動きを微分方程式などで表して数値解析的に解くことは大変困難である。さらに頭髪の動きを表現する場合には、頭髪の本数が膨大である点が最大の問題点になる。1本あたりの計算量をできるだけ少なくしなければ実用に耐えない。方程式の近似解を求める方法は一般に大変時間がかかり、頭髪の動きの表現には向いていない。本論文では、短い計算時間でそれらしい動きを表現できる確率モデルを用いて頭髪の動きの表現を試みる。

束状になった複数の糸状物体の動きを確率モデルを用いて表現するとき、風の方向を示すパラメータと風の強さにあたるパラメータの与え方が全体の動きに影響してくる。本論文では、ポテンシャル流れの解析解をもとにパラメータを与える方法を提案する。なお本論文では、処理の簡略化のため、人間の頭部を球では

なく円柱とみなしたときのポテンシャル流れの解析解を用いた。

本論文ではまず、糸状物体の動きの特徴を解析する実験方法とその実験結果について述べる。次に、その実験の解析結果に基づいた1本の糸状物体の動きの確率モデルを提案する。さらに、複数の糸状物体である頭髪の1本1本に、風の方向と強さのパラメータを与える方法を提案し、実際に頭髪が風になびく様子のコンピュータグラフィックス(CG)連続画像を生成する。

### 2. 1本の糸の動きの解析

#### 2.1 実験方法

糸状物体を、長さの変化しない直線のセグメントがつながっているものであると仮定し、実際の糸に等間隔に印を付ける。糸がなるべく同一平面内で動くようにするために、糸の一端を壁面に固定する。扇風機によって風を送り、その糸が動いているところをビデオカメラで撮影する。概略図を図1に示す。実験では30cmの糸を10セグメントに分割した。約10分の1秒にあたる3フレーム間隔で、連続16枚の画像を、ビデオ再生画像からコンピュータに取り込む。画像は256×240画素の白黒256階調で取り込まれる。それぞれの画像から糸に付けた印の座標を求め、各セグメントの鉛直方向からの角度を計算する。

糸の動きは各セグメントの角度の変化として捉えられる。連続する画像から各セグメントごとの角度の変化および変化率を求めることができ、これらをそれぞれ

† Computer Animation of the Movements of Human Hair Blown by the Wind Using a Stochastic Model by TAKESHI AGUI, KIYOSHI MIWA and MASAYUKI NAKAJIMA (Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology).

†† 東京工業大学工学部画像情報工学研究施設

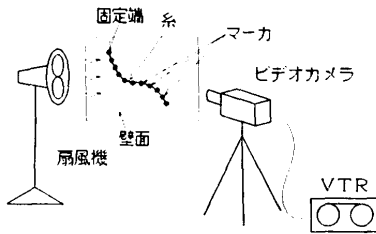
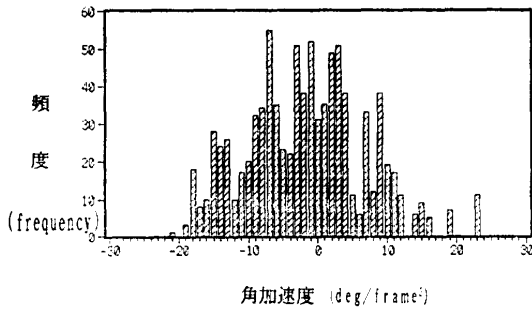
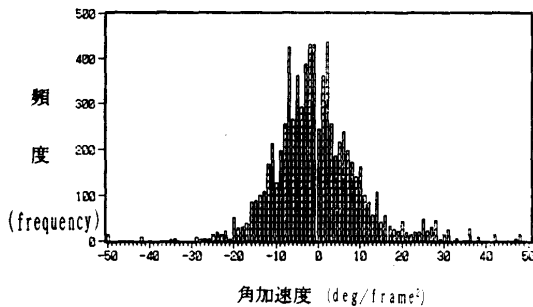


図1 糸状物体の動きの計測方法  
Fig. 1 Measurement of string movement.



(a) 角度 12°~18° にある No. 8 のセグメントに対するヒストグラム  
(a) Histogram for segment No. 8 with angular range [12°, 18°].



(b) 角度 6°~12° にあるすべてのセグメントに対するヒストグラム  
(b) Histogram for all segments with angular range [6°, 12°].

図2 セグメントの角加速度的ヒストグラム

Fig. 2 Histograms for angular acceleration of segments.

れ、セグメントの角速度、角加速度と呼ぶ。

3枚の連続画像から各セグメントごとに角速度が2つ、角加速度が1つ求められる。セグメントの数が10である場合、1回の画像取り込みで連続16枚の画像が取り込まれるため、角加速度は各セグメントごとに14個、合計140個得ることができる。

## 2.2 実験結果

図2と図3に実験結果を示す。図2(a)は、第8番目のセグメントが角度 12°~18° のときの角加速度を

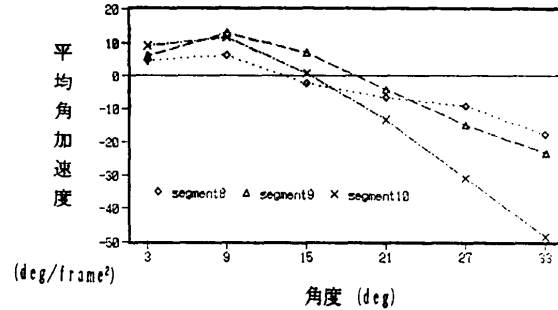


図3 セグメントの角度と平均角加速度の関係  
Fig. 3 Relation between angles and average angular acceleration of a segment.

集計した例であり、図2(b)は、セグメントの角度が6°~12° のときの角加速度をすべてのセグメントについて集計した例である。また図3は、末端のセグメントから数えて3つのセグメントについて、セグメントの角度ごとの平均角加速度をプロットしたグラフである。

## 2.3 解析結果

図2(b)に示すように、セグメントの角加速度は、その瞬間の角度ごとに集計するとほぼ正規分布をなしている。そして図3は、セグメントの角度が大きくなるほど平均角加速度は小さくなり、ある角度を越えると風の向きとは逆方向の角加速度を持つ可能性が高くなっていることを示している。また、セグメントの角度が大きくなったときの平均角加速度の小さくなる度合は、自由末端に近いセグメントほど大きいこともわかる。これは自由末端に近いほど急激に角速度が変わることを示している。

ある角度を持つセグメントの次の瞬間の角加速度は、その角度における平均角加速度を中心に、図2(b)で示したような分布を持つ確率に従って定まると考えられる。このようにして定まった角加速度が各セグメントの持つ現在の角速度に足し合わされることによって、次の瞬間の角速度、角度および位置が決定される。

## 3. 糸状物体の動きの確率モデル

### 3.1 確率モデルのパラメータ

糸状物体を短いセグメントがつながったものであると考える。図4に示すように、それぞれのセグメントは、始点座標P、セグメントをXZ平面上に正射影したものとZ軸の正の方向とがなす角度 $\theta$ 、セグメントとY軸を含む平面上でそのセグメントとY軸の負の

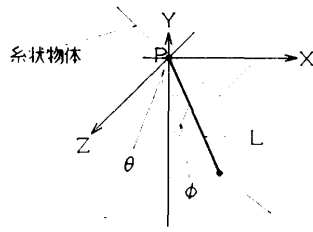


図 4 セグメントの記述  
Fig. 4 Description of a segment.

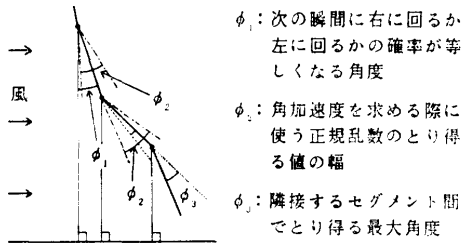


図 5 確率モデルに対するパラメータ  $\phi_1 \sim \phi_3$   
Fig. 5 Parameters  $\phi_1 \sim \phi_3$  for a stochastic model.

方向とかなす角度  $\phi$ 、セグメントの長さ  $L$  で表される。そしてセグメントの動きは  $\theta, \phi$  それぞれの方向の角速度、角加速度によって表現できる。つまり、この確率モデルに使用するパラメータは、それぞれのセグメントの角度、角速度、角加速度を制限するものである。これらのパラメータ  $\phi_1 \sim \phi_3$  の概略図を図 5 に示す。

まず 1 つめのパラメータは、それぞれのセグメントが風に吹かれたとき、 $\theta, \phi$  それぞれの方向での平均角加速度が 0 になる角度  $\theta_1, \phi_1$  である。 $\phi_1$  が大きくなるということは風の強さが増していることになる。つまり、 $\phi_1$  は風力に相当する。一方、 $\theta_1$  は風の向きに相当することになる。

2 つめのパラメータは、角加速度を定める際に使う正規乱数のとりうる値の幅  $\theta_2, \phi_2$  である。 $\theta_2$  および  $\phi_2$  は、正規分布の標準偏差を  $\sigma$  とした場合、 $3\sigma$  にある。つまり  $\theta_2, \phi_2$  を  $\sigma$  の 6 倍の値として設定すれば、その正規乱数は  $-\theta_2/2$  以上  $\theta_2/2$  以下、 $-\phi_2/2$  以上  $\phi_2/2$  以下の範囲内に 99.7% の分布が含まれる<sup>5)</sup>。

3 つめのパラメータは、隣接するセグメント間でとりうる最大角度  $\theta_3, \phi_3$  である。これは糸状物体の柔らかさ、滑らかさを制御するパラメータになる。

4 つめのパラメータは、図 3 のグラフの傾きに相当する  $\alpha, \beta$  である。図 3 のグラフは、ほぼ上に凸の 2 次曲線であるから、その傾きに相当する  $\alpha, \beta$  は、1 次関数で表される。

### 3.2 糸状物体の確率モデル

計算は固定末端のセグメントから自由末端のセグメントに向かって順次行われる。注目しているセグメントの現在の角度、角速度が  $\theta, \phi, d\theta/dt, d\phi/dt$  であるとき、最の瞬間の角度、角速度を次のようにして定める。

$$\text{rnd\_th} = \text{norrand}(\theta_2) \quad (1)$$

$$\text{diff\_th} = \text{in\_range}(\theta - \theta_1) \quad (2)$$

$$\text{ave\_th\_acc} = \alpha \times \text{diff\_th} \quad (3)$$

$$\text{th\_acc} = \text{ave\_th\_acc} + \text{rnd\_th} \quad (4)$$

$$\text{th\_v} = d\theta/dt + \text{th\_acc} / |\sin \phi| \quad (5)$$

$$\text{th} = \theta + \text{th\_v} \quad (6)$$

$$\text{rnd\_ph} = \text{norrand}(\phi_2) \quad (7)$$

$$\text{diff\_ph} = \text{in\_range}(\phi - \phi_1) \quad (8)$$

$$\text{ave\_ph\_acc} = \beta \times \text{diff\_ph} \quad (9)$$

$$\text{ph\_acc} = \text{ave\_ph\_acc} + \text{rnd\_ph} \quad (10)$$

$$\text{ph\_v} = d\phi/dt + \text{ph\_acc} \quad (11)$$

$$\text{ph} = \phi + \text{ph\_v} \quad (12)$$

ここで、

$\text{norrand}(x)$  :  $\sigma = x/6$  である正規乱数を与える関数。

$\text{rnd\_th}$  :  $\sigma = \theta_2/6$  である正規乱数

$\text{rnd\_ph}$  :  $\sigma = \phi_2/6$  である正規乱数

$\text{in\_range}(x)$  :  $x$  の範囲を  $(-\pi, \pi]$  にする関数

$\text{diff\_th}$  :  $\theta_1$  と現在の  $\theta$  の差

$\text{diff\_ph}$  :  $\phi_1$  と現在の  $\phi$  の差

$\text{ave\_th\_acc}$  :  $\theta$  方向の平均角加速度

$\text{ave\_ph\_acc}$  :  $\phi$  方向の平均角加速度

$\text{th\_acc}$  :  $\theta$  方向の角加速度

$\text{ph\_acc}$  :  $\phi$  方向の角加速度

$\text{th\_v}$  :  $\theta$  方向の次の瞬間の角速度

$\text{ph\_v}$  :  $\phi$  方向の次の瞬間の角速度

$\text{th}$  : 次の瞬間の  $\theta$

$\text{ph}$  : 次の瞬間の  $\phi$ 。

式(5)において、 $\sin \phi$  を導入している理由について述べる。 $\theta$  方向の角加速度  $\text{th\_acc}$  が決まっても、その時の  $\phi$  方向の角度、すなわちそのセグメントが垂直と水平のどちらに近いかで  $\theta$  方向への動きに与える影響が変わってくる。垂直に近い時の方が、 $\theta$  方向での自由度は大きく、いろいろな方向に向く可能性がある。また、水平に近い場合は  $\theta$  方向がそれほど急に大きく変わらない。そこで、 $\text{th\_acc}$  を  $XZ$  平面に正射影した時の角度  $\text{th\_acc}/|\sin \phi|$  を用いた。また、 $\phi < 0.3[\text{rad}]$  の時、 $\text{th\_acc}/|\sin \phi|$  の値としては、

-6~6[deg] の正規乱数を用いた。また、計算された角度はすべて、in\_range 関数によって  $(-\pi, \pi]$  の範囲に常に入っているようにする。求められた次の瞬間の  $\theta, \phi$  が1つ前のセグメントの角度と  $\pm\theta_s, \pm\phi_s$  以上異なっていた場合は、その  $\theta, \phi$  を  $\theta \pm \theta_s, \phi \pm \phi_s$  に変更し、次の瞬間の角速度を0にする。ただし、その瞬間の角速度が0であった場合は  $\theta, \phi$  の値は前の瞬間の値のままにし、 $\phi_v, \theta_v$  の値も変更しない。こうして求められた  $\theta, \phi$  をもとに、次のセグメントの始点座標を計算することができる。

#### 4. 風の方向と強さのパラメータの与え方

##### 4.1 2次元ポテンシャル流れ<sup>6)</sup>

縮まない流体の2次元流れでは流れ関数  $\Psi$  が存在し、さらに、流れが渦無しであると仮定すると、速度ポテンシャル  $\Phi$  が存在する。このような流れのことを2次元ポテンシャル流れと呼ぶ。このとき、 $\Psi$  と  $\Phi$  は Cauchy-Riemann の関係式が成り立つ。また、複素速度ポテンシャル  $F$  はただ1つの複素変数  $z$  の解析関数として表すことができる。

[Cauchy-Riemann の関係式]

$$u = d\Phi/dx = d\Psi/dy \quad (13)$$

$$v = d\Phi/dy = -d\Psi/dx \quad (14)$$

これらの式において、 $u, v$  は、それぞれ流速の  $x, y$  成分を表している。

$$F = \Phi + i\Psi \quad (15)$$

$$z = x + iy \\ = r \exp(i\theta) \quad (16)$$

式(16)において、 $z$  を極座標表示  $(r, \theta)$  に変更している。

##### 4.2 円柱のまわりの流れ<sup>6)</sup>

図6に示すように、 $X$  軸の正の方向に速度  $U$  の2次元ポテンシャル流れがあり、その中に静止した半径

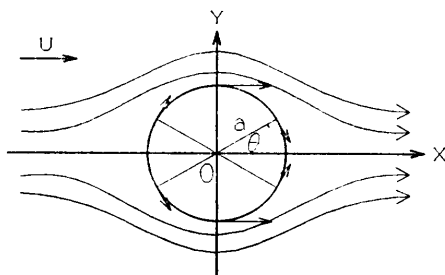


図6 円柱のまわりの2次元ポテンシャル流れ  
Fig. 6 Two dimensional potential stream around a cylinder.

$a$  の円柱があるとする。これは、一様流に対して、円柱が  $X$  軸の負の方向に速度  $U$  で動いていることになる。その複素速度ポテンシャルは次式(17)のように表される。

$$F(z) = Uz + Ua^2/z \quad (17)$$

式(17)から、円柱の表面での流速および流速方向を解析解として求めることができる。円柱の半径が  $a$  であるから、円柱表面で  $z$  は式(18)のように表され、これを式(17)に代入することによって式(19)が得られる。

$$z = a \times \exp(i\theta) \quad (18)$$

$$F = U(a \times \exp(i\theta) + a \times \exp(-i\theta)) \\ = 2Ua \cos \theta \quad (19)$$

式(19)から、式(20)、(21)が導かれる。

$$\Phi = 2Ua \cos \theta \quad (20)$$

$$\Psi = 0 \quad (21)$$

円柱表面での流れ関数  $\Psi$  が定数0であるから、円柱表面は流線である。流線は、その上の各点における接線が、その点での速度ベクトルの方向に一致するような曲線であるから、円柱表面では速度ベクトルが円柱の接線方向に向いていることになり、流速の半径方向成分  $V_{r=a}$  は0になる。さらに、円柱表面での流速の円周方向成分  $V_{\theta}$  は、次式で表される。

$$V_{\theta} = (1/r \cdot d\Phi/d\theta)_{r=a} \\ = -2U \sin \theta \quad (22)$$

##### 4.3 パラメータ $\theta_1, \phi_1$ の与え方

風の方向を表すパラメータ  $\theta_1$  と風の強さに相当するパラメータ  $\phi_1$  を与える方法として、4.2節で求めた2次元ポテンシャル流れの解析解を利用する方法を提案する。人間の頭部を円柱であると考え、その表面での大まかな風の方向は常にその接線方向に向いている。また、円周方向の風速成分  $V_{\theta}$  は式(22)と同様に求められて、次式(23)で与えられる。

$$V_{\theta} = -2U \sin(\pi - \theta_u + \theta) \quad (23)$$

ここで、

$\theta_u$  : 2次元ポテンシャル流れの方向

$U$  : 角度  $\theta_u$  の方向に流れる2次元ポテンシャル流れの一様流速

$\theta$  : 頭髪の固定末端がZ軸の正の方向となす角度

$V_{\theta}$  の絶対値は、 $\theta_u$  方向に流れている時に最大値  $2U$  をとる。 $\theta_1$  にはその点での接線方向を与え、 $\phi_1$  には  $V_{\theta}$  の定数倍の値を与えることにする。 $\phi_1$  は  $\phi$  方向の平均角加速度が0になる角度であるから、風の強さが最も強くなった時、 $\phi_1$  を  $\pi/2$  にするのが適切

であると考えられる。よって本論文では、 $\theta_u$  方向に流れている時の  $\phi_1$  の絶対値を、0以上1以下の値をとる変数  $V$  を用いて、 $V\pi/2$  で表す。つまり、式(23)の係数  $-2U$  を  $-V\pi/2$  に代えた次式(24)で  $\phi_1$  を定める。

$$\phi_1 = -V\pi/2 \sin(\pi - \theta_u + \theta) \quad (24)$$

ただし、 $0 \leq V \leq 1$ 。

#### 4.4 パラメータ $\theta_2$ , $\phi_2$ の与え方

本手法では、試行実験の結果から  $\theta_2$ ,  $\phi_2$  を次式から決定した。ただし、1本の頭髪を構成するセグメントの数を SEG とし、 $i$  は頭髪の根元から順に付けられたセグメントの番号であり、 $i=0, 1, \dots, \text{SEG}-1$  である。

$$\theta_2 = 1 + 3 \times (i/\text{SEG}) \quad [\text{deg}] \quad (25)$$

$$\phi_2 = 3 + 3 \times (i/\text{SEG}) \quad [\text{deg}] \quad (26)$$

すなわち、頭髪の末端部ほど  $\theta_2$ ,  $\phi_2$  は大きくなるようにしている。

#### 4.5 パラメータ $\theta_3$ , $\phi_3$ の与え方

本手法では、試行実験の結果から  $\theta_3$ ,  $\phi_3$  を次式のように決定している。

$$\theta_3 = 2 + 5 \times (i/\text{SEG}) \quad [\text{deg}] \quad (27)$$

$$\phi_3 = 10 + 5 \times (i/\text{SEG}) \quad [\text{deg}] \quad (28)$$

ただし  $i$  と SEG は 4.4 節で述べた場合と同様である。 $\theta_3$ ,  $\phi_3$  も、 $\theta_2$ ,  $\phi_2$  と同様に、頭髪の末端部ほど大きいように設定している。

#### 4.6 パラメータ $\alpha$ , $\beta$ の与え方

パラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  は、試行実験の結果、次式によって与えた。 $i$  と SEG は 4.4 節と同様である。

$$\alpha = \beta = -\frac{1}{100} - \frac{1}{100} \times (i/\text{SEG}) \quad [\text{deg}] \quad (29)$$

## 5. 頭髪の動きの表現

### 5.1 頭髪の表現

本論文では、1本の頭髪を20本のセグメントで近似した。また、1本の頭髪の画像を表示する際、セグメントとセグメントの接続部が不連続に見えることがないように、隣接するセグメントの法線ベクトルを内挿するスムーズシェーディング技法を用いた。

セグメントどうしの交差判定は、計算時間が膨大になるため本手法では行わなかった。また、頭髪どうしの影響、例えば、下部の頭髪が上部の頭髪の重みによって影響を受けることや、頭髪群としての空気抵抗なども考慮していない。同様に、髪の硬さなど、頭髪の材質としての属性も考慮していない。

セグメントと頭部との交差判定は、頭部モデルを完全におおう楕円体と、各セグメントの端点の交差判定で近似している。すなわち、各セグメントの位置を確率モデルを用いて計算した後、その点が楕円体の内部と外部のどちらにあるかを判別し、内部にある場合はその点から一番近い楕円体の表面上の点に端点の位置を移動している。ただし、頭髪と頭皮との摩擦などについては考慮していない。

また、本手法では、風が突然吹いた場合や、吹いていた風が突然止まった場合の頭髪の動きなど、非定常的な動きのメカニクスは扱わない。

### 5.2 頭髪の画像の生成

頭髪が風に吹かれてなびく様子をコンピュータアニメーション

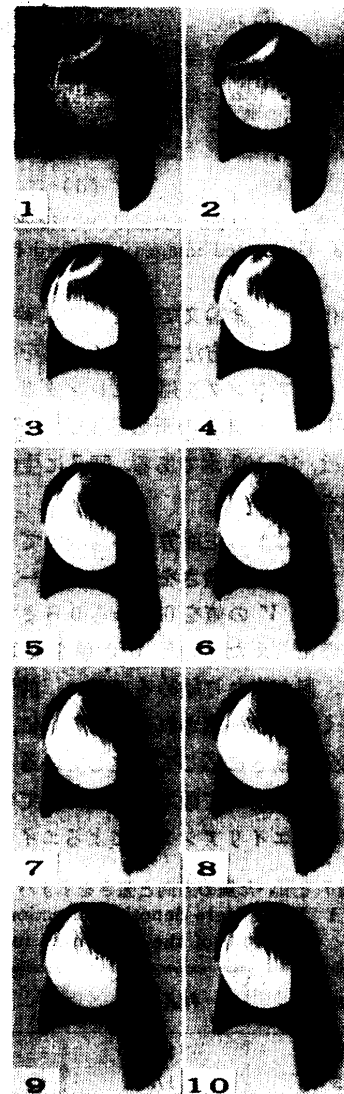


図7 生成された頭髪の動画像の例  
Fig. 7 Generated moving pictures of hair.

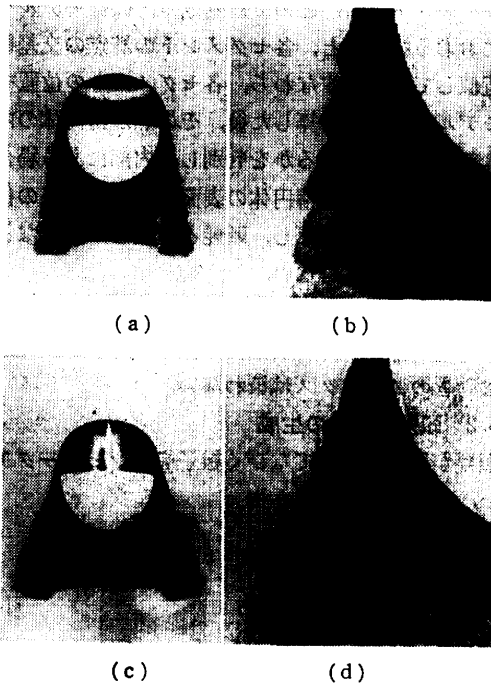


図8 ウェーブのかかった頭髪の生成画像の例  
Fig. 8 Generated images of waved hair.

メーション化する。本論文で提案した確率モデルを用い、本論文で提案した方法でパラメータを与える。領域アンチエイリアシングを用いたレンダリング手法<sup>7)</sup>によって、512×480画素の画像を生成する。設定した頭髪の本数は、10,199本である。図7に生成した頭髪動画像の例を示す。

風の方向  $\theta_s$  は顔の正面方向から吹いてくるように設定した。また、風の強さを表すパラメータとして、式(24)における  $V$  の値を0.5から0.8まで変化させている。実際に与えた  $\theta_s$  と  $V$  の値を表1に示す。

図7から、風が当たり始めるに従い、前髪の部分が割れてなびく様子が観察される。その際に、頭髪の光っている部分が動きに応じて変化していることもわかる。また、頭髪が動いて数本だけになっている部分から、領域アンチエイリアシングによるエイリアスの低

表1 図7で用いた風の方向と強さを示すパラメータ  
Table 1 Parameters denoting direction and strength of the wind used for Fig. 7.

| フレーム番号  | $\theta_s$ [deg] | $V$ |
|---------|------------------|-----|
| 1, 2, 3 | 178.0            | 0.5 |
| 4, 5    | 178.0            | 0.6 |
| 6, 7, 8 | 178.0            | 0.7 |
| 9, 10   | 178.0            | 0.8 |

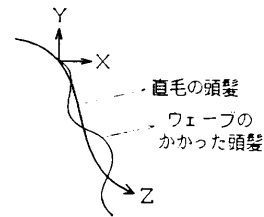


図9 ウェーブのかかった頭髪の座標系  
Fig. 9 A coordinate system for waved hair.

減の効果がわかる。

頭髪は時間とともに次第に広がっていくが、第6フレーム以降は、大きな変化がなく、頭髪の末端部分がわずかな動きを見せているだけである。 $V$ の値として比較的大きな値を与えたにもかかわらず、それほど強い風が吹いてきた様子を表現することはできなかったが、風の強弱が頭髪の動きに与える影響の違いは確認できた。

図7は直毛であったが、図8は、1本1本にウェーブをかけた頭髪の生成画像例である。ウェーブのかかった頭髪は、直毛を表す3次元空間曲線を軸として、楕円錐の渦巻状に表現する。直毛上でウェーブのかかり始める点を始点として、現在の点までの道のりを  $z$  で表す。直毛上のそれぞれの点で、接線ベクトルと直交する2つの直交ベクトルをそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸であるとすると、ウェーブのかかった頭髪を式(30)、(31)で表される3次元空間曲線で表現することができる。

実際に保持しているデータは、直毛の場合と全く同じであり、レンダリングをする時点で、直毛の座標データをもとに式(30)、(31)からウェーブのかかった頭髪座標データを一時的に計算している。この概略図を図9に示す。

また、図8(a)は、まだ頭髪が動き始めていない状態であり、図8(b)はその部分拡大図である。一方、図8(c)は、頭髪が動き始めて5フレーム目の図であり、図8(d)はその部分拡大図である。いずれも頭髪の本数は10,199本である。

$$x = Az \cos(Cz + D) \quad (30)$$

$$y = Bz \sin(Cz + D) \quad (31)$$

ただし、 $A, B, C, D$  は定数。 $z$  は、ウェーブのかかり始める点を始点とすると、始点から、軸である直毛上の現在の点までの道のりを表している。

## 6. まとめ

本論文では、糸状物体が風に吹かれてなびく動きをできる限り短い計算時間で表現するために、実際の動

きの解析結果に基づく確率モデルを提案した。また、ポテンシャル流れの解析解を利用して、全体の動きに影響する風の方向と強さのパラメータを与える方法を提案した。最後に、これらの提案した方法を使って、頭髪が風に吹かれたときのなびく様子をCG連続画像として生成した。そのとき、頭髪の種類として、直毛とウェーブのかかった頭髪の生成を試みた。本手法によって、強風になびく頭髪は表現できないが、風の強弱による動きの変化を表現できたと考える。

### 参 考 文 献

- 1) Barzel, R. and Barr, A.H.: A Modeling-System Based on Dynamic Constraints, *SIGGRAPH 88, Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 179-188 (1988).
- 2) Platt, J.C. and Barr, A.H.: Constraint Methods for Flexible Models, *SIGGRAPH 88, Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 279-288 (1988).
- 3) Reeves, W.T.: Particle System—A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, *SIGGRAPH 83, Computer Graphics*, Vol. 17, No. 3, pp. 359-376 (1983).
- 4) Reeves, W.T. and Blau, R.: Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems, *SIGGRAPH 85, Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, pp. 313-322 (1985).
- 5) 林 周二: 統計学講義第2版, 丸善, (1973).
- 6) 今井 功: 流体力学, 岩波文庫, (1970).
- 7) 安居院, 三輪, 中嶋: 領域アンチエイリアジングを用いた頭髪表現, 1990年信学春季全大, D-609 (1990).



**安居院 猛**

昭和34年東京工業大学工学部電気卒業。昭和39年同大学院博士課程修了。現在、同大像情報工学研究施設教授。制御理論、印写機器、コンピュータ・アニメーションなどの研究に従事。工学博士。52, 55, 60年度日本印刷学会論文賞受賞。著書「画像工学の基礎」(昭晃堂), 「コンピュータグラフィックスの技法」(新オーム文庫)。



**三輪 喜良**

昭和63年東京大学教養学部基礎科学科第1卒業。同年東京工業大学・総合理工学研究科物理情報工学専攻入学。計算機を用いた頭髪表現の研究に従事。平成2年同修了。同年(株)電通入社、現在に至る。



**中嶋 正之 (正会員)**

昭和44年東京工業大学工学部電気卒業。昭和50年同大学院博士課程修了。同年同大勤務。現在、同大像情報工学研究施設助教授。コンピュータ・グラフィックス、画像処理の研究に従事。工学博士。52, 55, 60, 63年度日本印刷学会論文賞受賞。著書「画像工学の基礎」(昭晃堂), 「パソコングラフィックス入門」(オーム社)。