

コンピュータアニメーションによる頭髮の動き生成手法

安 生 健 一[†] 宇 佐 美 芳 明^{††} 栗 原 恒 弥^{†††}

コンピュータグラフィックスによって現実感ある人間を表現する技術は、その重要性の認識の高まりとともに、ここ数年で急速な進歩を遂げた。しかしながら、頭髮の表現に関してはまだその研究の緒についたにすぎない。特に外力に伴う頭髮の動きを表現するには、数万本以上あるといわれる頭髮の複雑なダイナミクスを扱わねばならず、一般的に解決するには著しい困難が伴う。これに対し従来手法では、計算の簡易化は果たせたが表現力が十分でないか、あるいは計算量や適切なパラメータ設定に負荷が重く効率良いアニメーション作成が行えないといった問題点を有していた。そこで本論文では頭髮のもつ慣性と外力場とのつりあいを記述する簡単な微分方程式とこれに適合する外力場モデルを提示し、さまざまな外力場を簡単なプレビューをもとに指定できる方式を提案する。また頭髮と頭部の衝突問題を近似的に解く方法として疑似外力を導入し、さらに頭髮の慣性に関する経験式を用いて頭髮相互の摩擦の効果を粗く表現している。本方式によって、従来よりもしなやかで多様な頭髮の動きを表現できることが示される。

A Computer Animation Method for Hair Dynamics Description

KEN-ICHI ANJYO,[†] YOSHIAKI USAMI^{††} and TSUNEYA KURIHARA^{†††}

This paper presents a simple method for describing dynamical behavior of human hair by computer animation. Supposing that each hair consists of linked linear segments, we derive the projective differential equations and associated simple force field, which roughly approximate hair dynamics. Because of the simplicity of the equations, we can introduce some efficient heuristics for obtaining a wide variety of hair dynamics animations. For example the method allows to make a quick preview for specifying the simple force field, in order to get various animations, such as a wind gust scene and that of hair movements in a running scene. The collision detection problem between hair and a human head can be visually solved by modifying the force field. In addition the inertia term in the projective equations can be controlled so effectively that hair's pliability is successfully described and that the hair's frictional effect is also roughly approximated. The efficiency of the method is well illustrated by the animations obtained.

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) の広範な研究分野の中で、現実感ある人間を表現することは最も魅力的かつ挑戦的なテーマのひとつである。人間の頭髮表現に関しても、異方性反対等を考慮した質感^{1),2)}、髪形の定義^{3),4)}、動きの表現⁵⁾⁻⁷⁾などが発表されてきた。

人間の頭髮に限定せず、動物の柔毛などを含めた柔毛物体の表現に関する従来研究例を見渡すと、比較的早くから着手され、また良好な結果を得ているのはレンダリング技術である。特に柔らかな質感の表現に関しては、テクセルを用いる方法⁸⁾、アルファブレン

ディングによる細線表示法⁹⁾等が成功例であろう。柔毛物体のモデリングやアニメーションに関しては今後の研究が望まれる。

頭髮の動き表現に関する従来の代表的な研究報告としては、剛体セグメントの運動方程式を用いる方法⁵⁾、実験に基づく統計モデルを用いる手法⁶⁾、さらにはバネモデルを用いる手法⁷⁾等がある。前二者の手法では時間変化に伴う頭髮の位置計算自体は効率良く進められるが、得られる頭髮の動きは限定的であり、例えば突然風が吹き上げる際の動きなど、外力場が急激に変化する場合等は扱われていない。一方バネモデルの場合では、微分方程式の数値解を得るための計算量と適切なパラメータ設定に関する負荷が重いという問題がある。

CG 技術を開発する上での主要課題のひとつは、計算機処理上の効率性と生成される CG 画像のリアリティとの兼ね合いである。数万本以上あるといわれる

[†] (株)日立製作所システム事業部
Systems Engineering Division, Hitachi, Ltd.

^{††} (株)日立製作所日立研究所
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

^{†††} (株)日立製作所中央研究所
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

頭髮のリアリスティックな表現を達成するにはこの点はことさら重要である。その意味では従来の頭髮の動き表現技術は効率性かリアリティかのいずれかに力点が片寄っており、残された課題は多い。

これに対して筆者らは、頭髮の動きを簡便に記述するための微分方程式を新たに提示し、指定された外力場を適宜修正しつつこの方程式を解くという頭髮の動き生成手法を提案した⁹⁾。この手法の特徴として、従来手法では計算負荷の重かった頭髮の干渉チェックの簡易化や、取り扱いの困難だった頭髮同士の相互作用の擬似的演出が可能であることが示された。しかしながらこの手法では、上記微分方程式—以下では射影方程式と呼ぶ—に対し、どのような外力場を指定すれば所望の動きが得られるかという重要な課題は未解決のままである。またどのようにして外力場を指定すれば使いやすいかという問題も残っている。さらに、アニメーション作成例として、非常に単純なケースが示されただけであり、提案した手法の表現力を例証するに不十分であった。

そこで本論文では、これらの課題や問題点を克服するために、既提案の頭髮の動き生成手法を拡張する。特に、射影方程式に適合する外力場の概念とその指定方法とを提案する。この外力場を用いることにより、先に述べた既提案手法の特徴がそのまま引き継がれ、しかも簡易で高速なプレビューが行える。その結果、本手法によって従来よりも多様な表現が可能となることが応用例とともに示される。

2. 基本方針

本手法においては、頭髮一本一本を曲線として扱うことにした。質感および（限定または固定した）髪形のみを扱うなら、一本一本を単位として扱う必要はないが、動きまで考慮するためには必要なことと考えた。したがってレンダリングには曲線に対する異方性反射モデルが必要となる（後述）。

動きのアルゴリズムの開発にあたっては、物理シミュレーション的なアナロジーを導入して対処することとした。これは物理学的に厳密な方程式を解くというものではない。外力場がどのように与えられたにせよ、頭髮同士の摩擦による動きの変化等の頭髮相互の作用や、頭髮と頭部との干渉チェックなどを考慮しながら数万本の頭髮に関する厳密な連立微分方程式を解くのは現実的でない。以下に述べる手法では、むしろ頭髮の滑らかな動きが高速処理によって実現されるよ

うに、扱うべき微分方程式とそれに基づくアルゴリズムはできるだけ簡単化することとした。

モデル化すべき対象には外力場も含まれる。これに関しても一般的かつ厳密な定義方法を与えることは避けた。重力を考慮することはもちろんだが、風力や体の動きによって生じる外力に関しては、頭髮の位置には依存せず時間のみを変数とするという意味で“一様な”外力場のみを扱うものとした。さらに外力場モデルの指定方法も十分考慮しなければならない。本手法にて特に配慮した点は、利用者に対して、流体力学等の専門知識を仮定することなく、外力場がなるべく容易に指定できるような方式とすることである。

外力場のモデルとその指定方法は、使用する微分方程式がどの程度実際の現象を記述できるかにも依存して定まる。そこで次章では、本手法にて用いる射影方程式および頭髮の干渉チェックに関し、既報では示されなかった詳細構造について述べる。第4章にて、外力場のモデルとその指定方法、および実験結果を示す。

3. 頭髮の動き生成手法

例えば一陣の風にさっと舞い上がる頭髮の現実の動きを考えると、そのしなやかさは数万本の頭髮が描く曲線の軌跡の総体として表現される。舞い上がった髪が重力の影響で落下する場合等を考察すると、いわば慣性（現在の状態を保持しようとする傾向）と外力（この場合は重力）とのかけひきの結果としてしなやかさが表現されるものと考えられよう。そこで本章では、まず“慣性対外力場”というダイナミクスを直接的に表現する常微分方程式を導入する。次に、外力場と初期条件とが与えられた状況下でこの方程式を解く際に、頭髮と頭部の干渉チェックを簡便に行うための擬似外力の計算法を示す。

3.1 準備—頭髮モデルの表現形式

まず提案する頭髮の動き表現手法が適用できる頭髮的モデルの表現形式について整理しておく。大前提として頭部のモデルが必要となる。本論文に登場するモデルは3次元デジタイザで計測したデータから作られたポリゴンモデルである。後述する頭髮と頭部の干渉チェックの簡易化等のために、さらに次のような準備と頭髮表現形式の設定をしておくものとする：

(a) 頭髮形状を外接近似するような楕円体—以下ではこれを簡単のために頭部楕円体と呼ぶ—を定義し、この楕円体の面上に頭髮の毛穴を配置する。

(b) 一本一本の頭髮は微小線分をつないでできる線分列で表現する。以下ではこれを頭髮曲線と呼ぶ。各微小線分は頭髮セグメントと呼ばれ、皆同じ長さとする。

上記(a)の頭部楕円体はあくまで頭髮の生え際の部分に関して近似を与えるものであればよい。この楕円体が頭髮のない顔の部分に関してまで良い近似となる必要はない。また(b)で頭髮セグメントの長さは一定としたが、これは以下の提案手法にとって本質的な制限でなく計算の簡易化の手段にすぎない。

これらの条件下で頭髮の初期状態、すなわち髪形を設定する。なお本論文におけるすべての例においては、材料力学の分野で知られる片持ちはりモデルを適用した手法⁴⁾により髪形を生成している。

3.2 微分方程式のモデル化と擬似外力

上述のように、頭髮一本一本は微小線分の集まりとして表される。これら微小線分の外力影響下での振る舞いは、その“影”の振る舞いをみてもおおむね理解されるであろう。すなわち、ここでいう影とはある平面上への微小線分の投影像のことである。逆に微小時間内における微小線分の空間的振る舞いを二つの平面上での影の振る舞いによって規定しようとするのが射影方程式の基本的考え方である。

3.2.1 頭髮の動き表現のための射影方程式

頭髮曲線の動きを記述するために、まず頭髮セグメントの振る舞いを規定する。頭髮セグメントの長さ d は微小であるとし、各セグメントは剛体であるという仮定を置く。また頭髮は k 個の頭髮セグメント s_i ($i = 1, \dots, k$) からなる。根本から自由端までの節点を順に $p_0, p_1, \dots, p_k$ とすれば、セグメント s_i はベクトル $\vec{p_{i-1}p_i}$ に対応する。このベクトルを以下では太文字 $\mathbf{s}_i$ で記す。各 s_i の挙動を記述するための局所座標系は、図1に示すように垂直方向を y 軸とする直交座標系とする。

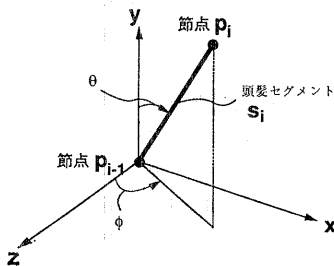


図1 頭髮セグメントの極座標表示
Fig. 1 The polar coordinate system for a hair segment.

いま仮に図1に示した節点 p_{i-1} が固定端であるとし、この点のまわりの剛体運動を考える。外力場 $\mathbf{F}$ が与えられたとしよう。まず次の θ 平面と ϕ 平面を定義する。図2に示すように、 θ 平面とは先の y 軸と当該セグメント s_i とが張る平面のことである。 ϕ 平面は図3のとおり zx 平面である。セグメント s_i の θ 平面と ϕ 平面への影の振る舞いはそれぞれ次の常微分方程式で記述される：

$$I_i d^2 \theta_i / dt^2 = u_i f_\theta. \quad (1)$$

$$I_i d^2 \phi_i / dt^2 = v_i f_\phi. \quad (2)$$

ここで θ_i と ϕ_i は、図1に示したセグメント s_i の極座標成分である。 I_i は s_i の慣性モーメントである。以下に示すように f_θ と f_ϕ はそれぞれ外力場 $\mathbf{F}$ を θ 平面と ϕ 平面へ射影したときの大きさである。すなわち、図2にあるように、まず θ 平面上にあってセグメント s_i に対して垂直な単位ベクトル $\mathbf{V}_\theta$ を求め、 $\mathbf{F}$ と $\mathbf{V}_\theta$ との内積 $(\mathbf{F}, \mathbf{V}_\theta)$ を用いて $\mathbf{F}_\theta = (\mathbf{F}, \mathbf{V}_\theta) \mathbf{V}_\theta$ とする。 $f_\theta = (\mathbf{F}, \mathbf{V}_\theta)$ である。図3に示したように、セグメント s_i の ϕ 平面上への投影セグメントを s_i^* とすれば、 $\mathbf{F}_\phi$ は ϕ 平面上にあって s_i^* に対して垂直な方向への分力である。 $\mathbf{e}_y = (0, 1, 0)$ と置き、投影セグメント s_i^* を表すベクトルを太文字 $\mathbf{s}_i^*$ とすると、 $\mathbf{V}_\phi$ は、 $\mathbf{e}_y$ と $\mathbf{s}_i$ との外積ベクトル $\mathbf{e}_y \times$

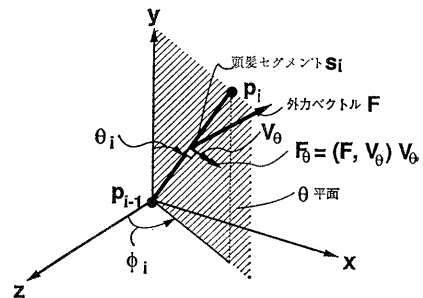


図2 θ 平面と $\mathbf{F}_\theta$ の定義
Fig. 2 Definitions of θ -plane and $\mathbf{F}_\theta$.

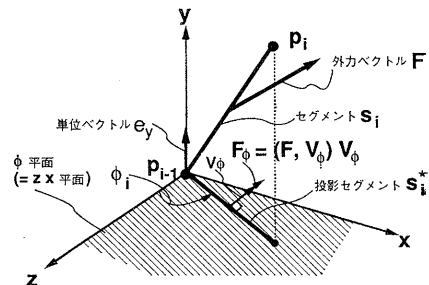


図3 ϕ 平面と $\mathbf{F}_\phi$ の定義
Fig. 3 Definitions of ϕ -plane and $\mathbf{F}_\phi$.

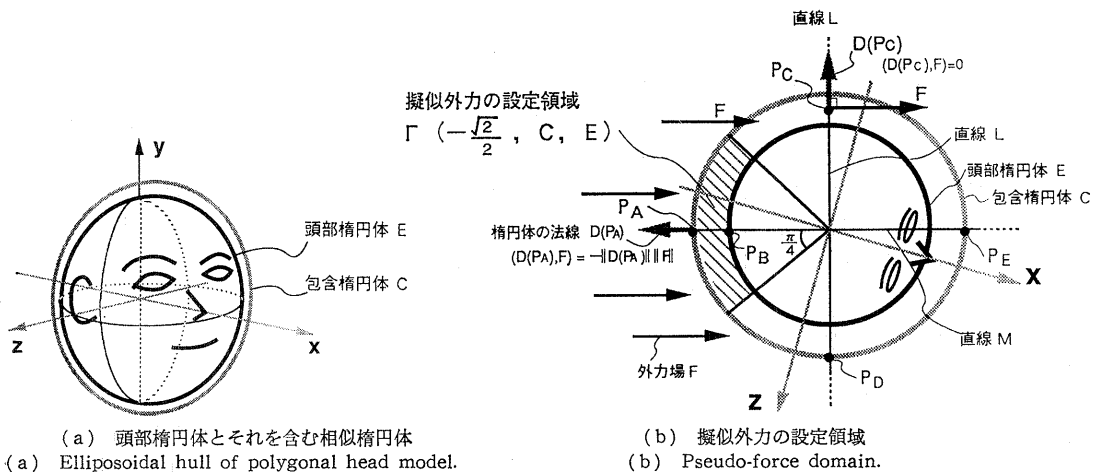


図 4 擬似外力の設定領域の指定
Fig. 4 Specification of pseudo-force domain.

$\mathbf{s}_i^*$ を大きさ 1 に正規化したものであり, $\mathbf{F}_\phi = (\mathbf{F}, \mathbf{V}_\phi)$ $\mathbf{V}_\phi$ である. $f_\phi = (\mathbf{F}, \mathbf{V}_\phi)$ となる. また u_i と v_i はこれら $\mathbf{F}_\theta$ と $\mathbf{F}_\phi$ に関するモーメントの腕の長さで, $u_i = \|\mathbf{s}_i\|/2$, $v_i = \|\mathbf{s}_i^*\|/2$ である. ここで $\|\cdot\|$ はベクトルの大きさを示す.

上記の方程式 (1), (2) は, 片側端点を固定した単一の剛体セグメントに関し, θ 平面と ϕ 平面という特定の平面上に射影されたセグメントの動きを示すものである. 簡単のために以上ではこれらの方程式を射影方程式と呼ぶことにする. 本方式においてはこれら射影方程式が剛体セグメントそのものの動きを規定するものと仮定する.

ここではさらに, 頭髮の各セグメントは上記方程式に従って独立に振る舞うものと仮定する. この仮定によって一本の頭髮の動きは, 根元の頭髮セグメントから末端の頭髮セグメントまで, 順次対応する射影方程式を解くことにより求めることができる.

しかしながらこの仮定は, 頭髮全体の動きを表現するには簡略にすぎる. 特に頭髮同士の摩擦による動きの変化などは表現できない. 例えば頭部付近の頭髮同士は互いに影響し合っており, 頭髮の先端部よりも動きが緩やかになるはずである. こうした現実の頭髮同士の相互干渉の効果を擬似的に取り入れるために, 射影方程式 (1) (2) 中に含まれる慣性モーメント I_i に対し, 次の仮定を置く:

$$I_i \propto 1/(id). \quad (3)$$

すなわち I_i が, 当該セグメント s_i の根元からの距離に反比例して小さくなるということである. この仮定により根元に近い頭髮セグメントほど動きが緩やかに

なる.

3.2.2 擬似外力の計算

与えられた外力場 $\mathbf{F}$ に対し上記射影方程式を解くだけでは, 頭髮と頭部との干渉チェックがなされないために, 頭髮は頭部内にめりこんでしまう. 一方この干渉チェックを厳密に取り扱うには, 頭髮セグメントが頭部に当たるかどうかの計算, 衝突した際にはさらに頭部からの反発力 (ベクトル) の計算などが必要である. 特に頭部付近で他の頭髮に当たった際の反発力の計算には, 頭髮の密集度や摩擦等も考慮する必要がある. これら衝突回避のための厳密な物理学的対処は, 計算機処理上現実的ではないと思われる. 本方式では, この衝突回避の問題を近似的に解決するために, 擬似外力という考え方を導入する.

本節では, 外力場 $\mathbf{F}$ がすでに指定されたものとする. 頭部付近にある頭髮セグメントのうち, 外力場 $\mathbf{F}$ の影響を強く受ける範囲にあるセグメントに限っては, 外力場 $\mathbf{F}$ そのものについてでなく, 擬似外力 $\varepsilon_i \mathbf{F}$ ($0 < \varepsilon_i \leq 1.0$) に対して先の射影方程式を解く. ここで外力場 $\mathbf{F}$ の影響を強く受ける範囲とは, 例えば図 4 に示されるような領域のことである. 以下ではこれを擬似外力の設定領域と呼ぶ. 図 4 (a) に示される座標系では, 頭部の重心位置が原点であり, 頭部ポリゴンモデルの顔正面は x 軸の正の方向を向いている. いまこの座標系での頭部楕円体の定義式を $E(\mathbf{p})=0$ とする. E は (x, y, z) の 3 変数の 2 次多項式で, ほぼ球に近い形とする. 図 4 (a) にあるように, 頭部楕円体 E を包含し, E に相似な楕円体を C とする. $\mathbf{D}(\mathbf{p}) = \text{grad } E(\mathbf{p})$ とおけば, 擬似外力の設定領域 Γ は次の

ように定義される：

$$\Gamma(\alpha, C, E) = \{p \in C \setminus E; \\ (\mathbf{D}(p), \mathbf{F}) \leq \alpha \|\mathbf{D}(p)\| \cdot \|\mathbf{F}\|\}. \quad (4)$$

となる。ここで $C \setminus E$ は C と E の補集合との共通部分である。影響領域設定パラメータ α は絶対値が 1.0 以下の実数である。(4)において $\mathbf{D}(p)$ は点 p をとおり E と相似な楕円体の外向き法線だから、上記の不等式条件を満たす点は、この法線がベクトル $\mathbf{F}$ とほぼ正反対の向きにある点、すなわち“ $\mathbf{F}$ の影響を強く受ける”領域の点である。図 4 (b)にて具体的にこの状況を説明する。同図は zx 平面上に平行な外力場 $\mathbf{F}$ が与えられた場合を示している。直線 L は $\mathbf{F}$ に直交しており、直線 M は L に直交している。例えば直線 M 上の点 p_A では $\mathbf{D}(p)$ と $\mathbf{F}$ とは正反対の向き、すなわち $(\mathbf{D}(p_A), \mathbf{F}) = -\|\mathbf{D}(p_A)\| \cdot \|\mathbf{F}\|$ であり、 L 上の点 p_C や p_D においては $(\mathbf{D}(p), \mathbf{F}) = 0$ である。他方 M 上の点 p_E では、 $\mathbf{D}(p_E)$ と $\mathbf{F}$ とが全く同じ向きであり、 $(\mathbf{D}(p_E), \mathbf{F}) = \|\mathbf{D}(p_E)\| \cdot \|\mathbf{F}\|$ である。 α は $\mathbf{F}$ の影響領域の範囲を規定するパラメータであって、例えば $\alpha = -1$ のときの $\Gamma = \Gamma(-1, C, E)$ は図中では p_A と p_B とを結ぶ線分に対応する。同様に $\Gamma(1, C, E) = C \setminus E$ であり、図中の斜線で示した領域は $\Gamma\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, C, E\right)$ である。

セグメント s_i の端点 p_i が Γ に入れば、このセグメントに対する射影方程式を解く際の外力は $\varepsilon_i \mathbf{F}$ に置き換えられる。このことは、頭部付近の反発力との合力（最終的に頭髮にかかる力）として $\varepsilon_i \mathbf{F}$ なる擬似的な力が働くことを意味する。本手法では、頭部からの反発力の複雑な計算はこうにして粗く近似表現される。擬似外力係数 $\{\varepsilon_i\}$ は根本近くのセグメントに対しては小さな値とされ、自由端では 1.0 である。これにより根本付近の頭髮で外力の影響を強く受けるものほど反発力が大きいことを擬似的に表現したことになる。なおセグメント s_i の端点 p_i が Γ に入らなければ、入力された $\mathbf{F}$ はそのまま用いられる。

4. 射影方程式の適用方法と結果

本章では、まず上記射影方程式に適合する外力場のモデルを定義する。次に射影方程式の離散化法と各パラメータの設定過程について説明する。さらに所望の動きを得るための外力場の指定方法は、実験例と共に示される。指定された外力場についてでなく、擬似外力を求めながらこの方程式を解くことにより、慣性対外力場というダイナミクスに起因した頭髮のしなやか

さが表現できることが例証される。

4.1 外力場モデル

射影方程式に対する外力場のモデル $\{\mathbf{F}(n)\}_n$ は、アニメーションのフレーム数を表す自然数の列 $k_0 < k_1 < \dots < k_p$ と、3次元ベクトルの列 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_p$ とを入力して次のように定義される：

$$\mathbf{F}(n) = \begin{cases} \mathbf{F}_1 (k_0 \leq n \leq k_1) \\ \mathbf{F}_2 (k_1 \leq n \leq k_2) \\ \vdots \\ \mathbf{F}_p (k_{p-1} \leq n \leq k_p) \end{cases} \quad (5)$$

このモデルは、一定のフレーム数、すなわち一定時間において定数ベクトルという非常に単純な表現となっている。しかも、後述の実験例でも示されるように、ベクトル $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_p$ は、必ずしも連続的に変化する必要はなく、急激な変化があってもよい。またこのモデルは、外力そのものというよりも、むしろ頭髮の動く向きを指示する形式に近いことが後に示される。このような意味で、本モデルは不連続型の仮想的な外力場となっている。

4.2 射影方程式の離散化

離散化に先立って、式(3)での比例定数を決める。一般に綿密度 λ 、長さ L の棒状剛体の慣性モーメント $Im(\lambda, L)$ は次式で与えられる。

$$Im(\lambda, L) = (\lambda L/3) L^2 = (\lambda/3) L^3.$$

末端のセグメント s_i の慣性モーメント I_k はそれだけ独立に考えればこの式で $L=d$ とおけばよいが、ここでは頭髮同士の影響を考慮してやや動きにくい値、すなわち大きな値を与えることにする。以下のシミュレーションでは、経験的に $I_k = Im(\lambda, kd)$ とした。したがって式(3)より、 $I_i = c/(id)$ (c は i に依存しない比例定数)とおけば、 $c = kd I_k$ であり、 $I_i = (k/i) I_k$ である。よって $I_k = Im(\lambda, kd)$ をこの式に代入して、

$$I_i = (\lambda/3i) k^4 d^3. \quad (6)$$

となる。

射影方程式(1)、(2)の離散化は容易に行える。例えば方程式(1)の場合、離散時刻 n におけるセグメント s_i の θ を θ_i^n と記すとき、次の式を $i=1, 2, \dots, k$ と順次解いてゆく：

$$\theta^{n+1}_i - 2\theta^n_i + \theta^{n-1}_i = (\Delta t)^2 u_i f_{\theta} / I_i. \quad (7)$$

ここで Δt は時間きざみ幅である。なお、 y 軸と s_i が平行な場合の θ 平面は、便宜上例えば $\mathbf{F}$ と線分で張る平面とする。 u_i はセグメント s_i を θ 平面に射影したときのうでの長さで $d/2$ に等しい。ゆえに離散化式(7)の右辺で f_{θ} 以外の項を c_i とすれば、(6)を用いて

表 1 動き計算のための入力データ
Table 1 Input data for hair dynamics calculation.

データの種類	変 数 / 内 容	図 6 の例にて用いた値	備 考
頭髮位置データ	$P[]$ =全頭髮セグメントの節点の xyz 座標値 d =折れ線の長さ Nh =頭髮の総本数 Ms =頭髮セグメントの最大数	{省略} 1.0 19,330 18	髪形を作成する別プログラムから受け取る
頭髮の動き計算用データ	Δt =時間間隔 λ =線密度 Nf =フレーム数	0.1 0.05 100	Nf は、アニメーションの総フレーム数
外力場データ	$F[N][3]$ =時間依存の外力ベクトル場	$(-100, 0, 0)$ for $1 \leq N \leq 50$; $(-15, -150, 0)$ for $51 \leq N \leq 100$	簡易プレビューによる設定
擬似外力設定のためのデータ	α =影響範囲パラメータ $\{\epsilon_i\}$ =擬似外力係数 ($1 \leq i \leq Ms$)	-0.75 0.01 for $i=1, 2$ 0.10 for $i=3, 4$ 0.20 for $i=5 \sim 8$ 0.40 for $i=9 \sim 12$ 0.80 for $i=13 \sim 15$ 1.00 for $i \geq 16$	

$$c_i = \{3id(\Delta t)^2\} / (2\lambda k^4 d^3). \quad (8)$$

を得る。 c_i の大きさを前もって見積もることにより効率のよいプレビューができる。射影方程式(2)に関しても(7)と同様な漸化式が得られる。

4.3 動き生成のためのパラメータ指定方法

頭髮の動き生成にあたっては、4.1 節に示した形式の外力場を具体的に指定したうえで、4.2 節で示した計算アルゴリズムを用いて、3.2.2 項で述べた頭髮と頭部の干渉チェック処理を行いながら、頭髮の位置計算を行う。本節では実際のアニメーション作成例を交えながら、これらについて説明する。なお厳密かつ精密な結果を得るためには、物理単位系に関しても考慮する必要があるが、本手法では CG での応用という観点から厳密な扱いは避けた。以下の記述で外力場ベクトル等具体的な数値で表現してはいるが、本質的に重要なのは定数倍を除いたスカラーやベクトル諸量であることをあらかじめ断っておく。

表 1 に頭髮の動き生成に必要な入力データの名称とその内容を示した。動き計算用データにおける時間間隔 Δt 、線密度 λ 等は独立に指定できるが、各セグメントの角度の変化は外力場と c_i (式(8))の大きさで決まる。すなわち実質的には Δt や λ 個々の値より c_i の値が頭髮の動きに影響する。

次に外力場の与え方に関して、図 5 と図 6 で示した

アニメーション作成例をもとに説明する。この例では頭髮が瞬間的な風にさっと舞い上がって落ちるという状況を表現する。まず頭部モデルと頭髮位置データを用意する。得られる髪形は図 5 に示した。頭部楕円体を表すための座標系は先の図 4 (a) に示したものと同じである。頭髮の動き計算用データの値は表 1 の通りである。ここでは百フレームを作成するものとした。つぎに外力場の定義であるが、本方式では頭髮の本数を二、三百本程度に間引いて動きを簡易プレビューしながら設定する。この例では、50 フレームのあたりで頭髮をどれくらい吹き上げるかを、この簡易プレビューの繰り返しにより決めた。その結果、前半の外力場の値 $F_1 = (-100, 0, 0)$ が決まる。つぎに、風が



図 5 静止状態の頭髮
Fig. 5 A hairstyle example.

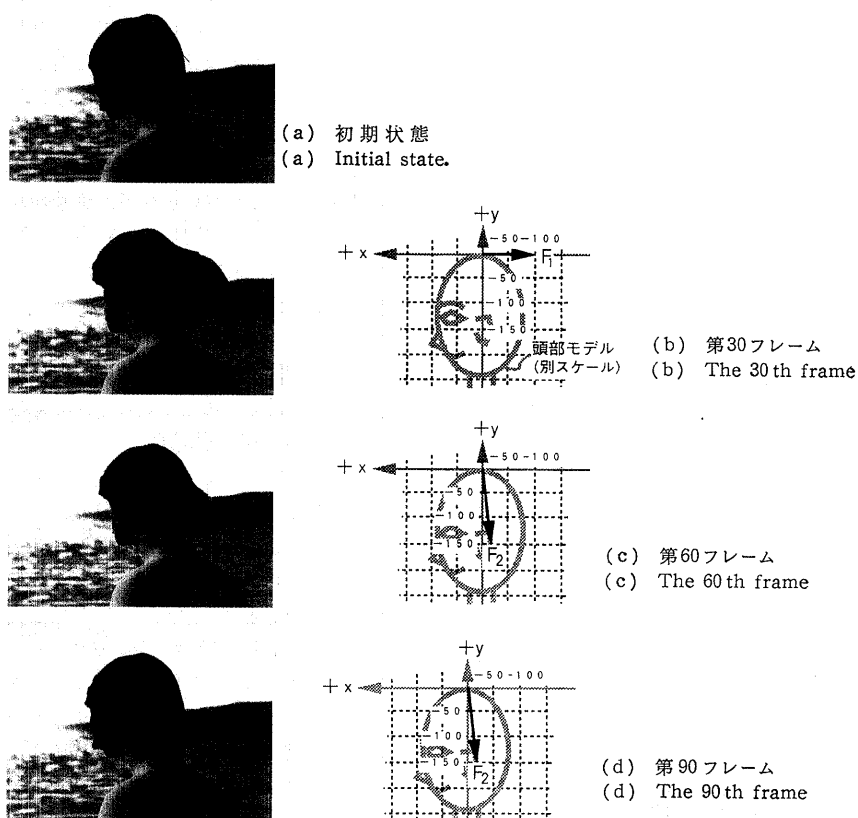


図 6 吹き上げられる頭髮の動き表現 (左: 生成画像; 右: 外力ベクトル)
Fig. 6 A wind gust scene. (Left: generated image; Right: assigned force vector)



図 8 約五万本の頭髮の表示例
Fig. 8 Rendered image of 50,000 hairs.

急に变化した状況を表示するものとして後半の外力場 $\mathbf{F}_2$ を定める. おおまかな目安として $\mathbf{F}_2$ はほぼ $-y$ 方向であり, 大きさ $\|\mathbf{F}_2\|$ は $\|\mathbf{F}_1\|$ よりも大きい値と考え, 再び簡易プレビューを行う. 5, 6 回程度の試行を行って, $\mathbf{F}_2 = (-15, -150, 0)$ を得る. 図 6 (a) では, この 100 コマのアニメーションの初期状態を示している. 図 6 (b) - (d) では 30, 60, 90 フレーム目のカット (生成画像) と対応する外力ベクトルを示した. なおこれらの図における座標系は, 図 4 (a) に示したものを平行移動している. この例では, 頭髮の柔らかな変形の様子が表現されている.

もちろんこのようなプレビュー処理において頭髮の動き計算に時間がかかるなら, 適切な外力場の設定に多大な試行錯誤を要することになり実用的でない. しかしながら後述のように本手法は高速処理によって動きが再現できるので, 二, 三百本程度の頭髮での簡易プレビューが実用的な速度で可能であり, ほとんど障害とはならない.

3.2.2 項の最後に述べた擬似外力の設定領域の決め方も上述の外力場の設定と同様に簡易プレビューを行って決まる. 係数 $\{\epsilon_i\}$ や影響範囲パラメータ α の設

定は比較的簡単のため, 外力場の設定と同時に行うことができる. またこれらの値は, 外力場ファイルの設定と違って, 頭部モデルや髪形を固定しておけば極端に外力場の大きさを強めたりしないかぎり, 大幅に変更する必要もない. 図 7 に擬似外力の効果を示した. 初期状態は先の例と同じく図 5 である. 図 7 (b) では擬似外力を設定しない場合で, 真横からの風 $\mathbf{F} = (0, 0, -500)$ を受けた状態である. 多くの頭髮が頭部ポリゴン内へ入り込んでいるのが分かる. 一方図 7 (b) の場合には, 表 1 に示した $\{\epsilon_i\}$ と α とを決めている. このように一万本程度以上の頭髮を描くと, 擬似外力によって頭部ポリゴン内にはいつてしまった頭髮は無視できるほどのものとしてすることができる.

4.4 応用例と計算結果

ここで今回の頭髮モデルの表示技術について簡単に触れておく. 詳細については既報⁹⁾を参照されたい.

3.1 節に述べたように頭髮曲線は 3 次元空間内の線分の列で表される. そこで, 各セグメント s_i の方向ベクトルをもとに, 節点 p_i における異方性反射を考慮した輝度計算を行い, 頭髮セグメントの節点以外の点の輝度は線形補間にて定まるものとした⁹⁾. ところで頭髮の太さは前節までの諸データと独立に設定できる. 今回は頭髮セグメントの描画を高速に行うために, グラフィックスワークステーションのハードウェアによる線分描画機能を利用した. このハードウェア機能を使用するには, 線分の太さを画素の整数倍で指定しなければならないという制約があるので, 表示スクリーンに投影したときの頭髮セグメントの太さは画素の整数倍であるとしている. 一方, 頭部を通常のポリゴンで表すとすれば, ハードウェア Z バッファ表示機能が使えて, 高速表示が可能となる. 画素の整数倍より細い頭を描くにはオーバーサンプリングを行うことで表示が可能となる. 図 8 は, 約 5 万本の頭髮モデルを作成し, 本手法により動き計算を行った結果を表示したものである. 画像の解像度は 1024×783 である. オーバーサンプリングを用いて, 頭髮の太さを約 4 分の 1 画素としている. 異方性反射計算を含むレンダリングと本手法による動き計算との相乗効果によって頭髮の柔らかな質感が表現されている.

本手法の有効な応用例として, 風力のほかに身体への動きに伴って生じる外力を受けたときの頭髮の動きのアニメーションを作成した¹⁰⁾. このアニメーションでは, 頭髮の動きを扱ったシーンがいくつかあるが, 以下ではラストシーンに関して説明する. 図 9 に, ラストシーンからの数フレームを示した. これは陸上競技



(a) 外力場 $\mathbf{F}$ をそのまま用いた場合
(a) Under the force field $\mathbf{F}$ given



(b) 擬似外力 $\epsilon \mathbf{F}$ を用いた場合
(b) Under the pseudo-force $\epsilon \mathbf{F}$

図 7 擬似外力の効果
Fig. 7 The pseudo-force effect.



図 9 体の動きと風力を考慮したアニメーション
Fig. 9 Hair animation in running scene.

会で女性ランナーがゴールインする状況を想定したものである。外力場の設定は次のように行った。まず、あらかじめ得られている人体モデルの動きのデータから右足と左足が順次着地する間隔（フレーム数）を求めた。この例では以下に示すような外力場を順次 20 フレームごとに与えた：

$F_1 = (-50, -30, -50)$ (最初の 20 フレーム)；

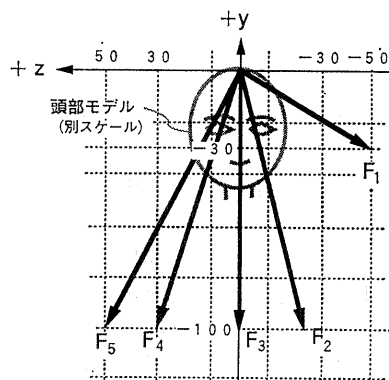
$F_2 = (-50, -100, -25)$ (21~40 フレーム)；

$F_3 = (-30, -100, 0)$ (41~60 フレーム)；

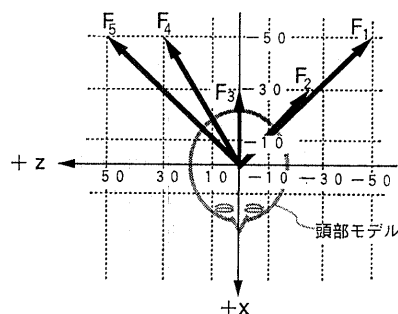
$F_4 = (-50, -100, 30)$ (61~80 フレーム)；

$F_5 = (-50, -100, 50)$ (81~100 フレーム)。

これらを用いて走っている最中の頭髮の左右の揺れの半周期が約 80 となるようにした。半周期とは、最も高く左に揺れた髪が体の動き（重心の移動）とともに落下して右に移動し最も高く上がるまでのフレーム数のことである。図 10(a), (b) にて、これらの外力ベクトル場 F_n を yz 平面および xz 平面上に投影したものを示した。外力場 F_1 を使ったのは最初の 20 フ



(a) 外力場の yz 平面上への投影図
(a) Force field F projected onto yz plane.



(b) 外力場の xz 平面上への投影図
(b) Force field F projected onto xz plane.

図 10 外力場の指定例

Fig. 10 Force field example.

レームであるが、この 20 フレームで頭髮の初期状態から右に髪が舞い上がって一番高くなる所までが求められる。 $F_2, F_3, \dots$ と外力を変化させながら頭髮の動きを作成した。図 9 の 6 枚のカットは F_3 から F_6 までを与えた後半の 60 フレームから取っている。なおこの 60 フレームでは、風による髪の乱れを演出するために、10 フレームごとの頭髮セグメント位置に適当な揺らぎを入れた（各フレームで揺らぎを入れたと乱れが過度になってしまう）。本手法によれば、このようにおおまかな外力場の指定であっても、連続的に滑らかに変化する頭髮の動きが表現できる。

今回用いたグラフィックスワークステーションは毎秒 100 万ポリゴンまたはベクトルが描画可能であり、30 MIPS の CPU 性能を持つものである。典型的な例として、約 2 万本の頭髮を用いて、最大の頭髮セグメント数が 20 の場合をみると、本手法による頭髮の動き計算の所要時間は 1 フレームあたり平均 40 秒程度である。またその表示には、頭髮の太さを 1 画素として、 1024×1024 の解像度でアンチエイリアス処理を施して約 10 秒かかる。なお図 8 の表示例では、動き計算に 1 フレーム平均約 2 分、レンダリング計算に約 20 分を要した。

また本手法におけるプレビューのための計算時間であるが、三百本程度の頭髮の動き計算に 1 フレームあたり 2 秒程度である。実際のプレビュー時には 20 フレーム程度の連続した画像をみながらパラメータを修正する作業を繰り返して、所望の結果を得ている。さらに頭髮本数を減らして百本程度とすれば、ほぼリアルタイムに近いプレビューが可能となる。

5. 結果の検討

以上の結果によれば、頭髮の動きを扱うコンピュータアニメーションの既存手法と比べると、本手法はより多様な表現力を有することがわかる。例えば、図 6 に示したような、頭髮がふわっと舞い上がる様子や、図 7 のようなかなりの強風下での動き、さらには図 9 に示した体の動きに伴う頭髮の動きの変化等、従来手法では示されなかった表現が可能となった。

本手法のもうひとつの重要な特徴は、簡便な入力データ指定と実用的な処理速度によって頭髮の動き表現が得られることである。アニメーション作成にあたって所望の動きを得るためには、どれほど正確なシミュレーション技術が確立されたとしてもパラメータの選択に試行錯誤がつきまとう。したがって迅速なプ

レビューが可能であることはアニメーション作成を効率よくすすめるための必須条件といえる。本手法においては、頭髮の動きを記述する射影方程式の単純さのゆえに離散化も容易であり、高速な表示手法と組み合わせることで実用的な処理速度で結果が得られる。この利点は、二、三百本程度の頭髮でのプレビューと組み合わせで行われる外力場の指定の際に威力を発揮する。また本手法では頭髮一本一本が独立して計算されるため、プレビュー結果と最終出力とが大幅に異なることはない。なお本手法での外力場は、その適用例で示したように、流体力学等における厳密なものと比べてかなり簡略化されており、頭髮がどの方向に移動して行くかを直感的に指定するものである。現在までの経験的な結果からみると、本手法での外力場指定方法は CG での適用という意味でむしろ有効であると考えられる。

本手法で生成される頭髮の動きは、2, 3 章で述べたようないくつかの仮定と制限のもとで得られるものであり、より現実感ある結果を得るための課題も多く残されている。

まず頭髮相互の干渉効果、および頭髮と頭部の衝突の問題について述べる。頭髮同士の干渉に関しては、本手法では射影方程式中の慣性モーメントに対する経験則を用いて、疑似的に摩擦の効果を表した。これは、頭髮の根本付近の頭髮の密集した領域では動きが緩やかになるということ、非常に粗く表現したにすぎない。より望ましいモデルとしては、頭髮の材質としての柔らかさをパラメータとして取り込む必要がある。しかしながら現時点での本手法では、これを考慮していない。また頭髮と頭髮の交差判定も行っていない。頭髮と頭部の衝突問題については、本手法では疑似外力を計算して、頭髮セグメントの交差判定処理を非常に単純化した。これは頭髮がある程度頭部モデル内に入り込むことを許容しているという意味で厳密な解答ではない。後述のような、今回の適用例よりも複雑で乱れた髪の毛の動きを表す際には改良が必要となるであろう。なお肩や腕など、頭部以外の体と髪の毛との衝突問題については今回は取り扱っていないが、これについては続報を予定している。

次に外力場の指定方法の現状と課題について述べる。本手法では（2 章で述べた意味で）一様な外力場のみを扱った。これは利用者が指定する場合には単純でよいが、強風下での非常に乱れた髪の毛の動きなどを表現するには不十分である。また現実には、一様な風力がかかった場合にも、顔の形状に依存して顔付近の

流れの場はより複雑となっている。現状では、図9の例のように、乱数を用いた簡易表現のみが可能である。このような外力場の“乱れ”の表現に関しては今後精密化を図ってゆく。また身体の動きに連動した頭髮の表現について、今回は利用者が外力場を指定する方法によっている。しかしながら、より多様な表現力をより簡便に得るためには、身体の動きを指定したうえで外力場を自動的に定義するといった方式なども検討する必要がある。

6. おわりに

本論文ではCGによって頭髮の動きを表現するための手法を提案しその有効性を検証した。提案手法では、頭髮のもつ慣性と外力場との関係を抽象し、簡単な微分方程式と外力場モデルを提案し、これと簡易プレビューとを組み合わせるアニメーションを作成した。頭髮と頭部との衝突問題に関しては、疑似的な外力計算を導入し、計算量を軽減した。また頭髮同士の摩擦による動きの変化を、非常に簡易的な演出ではあるが、表現することができた。さらに本手法が、頭髮のしなやかで多様な動きを実用的処理速度によって実現する方式として、従来手法にない優位性を持つことも例証された。

今後の主な課題としては、乱流の効果をも扱えるような、より一般的な動き（外力場）設定を可能とする対話型エディタの開発がある。

謝辞 本研究の推進に当たり、日頃から熱心なご討論をいただく(株)日立製作所中央研究所の新井清志研究員、同デザイン研究所の高月宏明研究員、および同日立研究所の武内主任研究員に感謝申し上げます。またアニメーション Windy Moment の制作にご協力いただいたディファクションの渡部健司氏、(株)ナムコのCG事業部の皆様に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山名岳志, 末永康仁: 関数制御型異方性反射モデルを用いた頭髮の質感表現, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J73, No. 6, pp. 880-886 (1990).
- 2) LeBlanc, A. et al.: Rendering Hair Using Blending and Shadow Buffers, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 2, No. 3, pp. 92-97 (1991).
- 3) Watanabe, Y. and Suenaga, Y.: Drawing Human Hair Using Wisp Model, *Proc. Computer Graphics International*, pp. 691-700 (1990).
- 4) 宇佐美芳明, 安生健一: 曲げ剛性を利用した頭髮のモデリング, 情報処理学会論文誌, Vol. 32,

No. 6, pp. 367-373 (1992).

- 5) 小林誠司, 森島繁生, 原島 博: 糸状物体の運動モデルとCGによるシミュレーション, 電子情報通信学会技術報告, PRU 90-127, pp. 15-20 (1990).
- 6) 安居院猛, 三輪喜良, 中島正之: 確率モデルを用いた頭髮の動きのシミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 6, pp. 749-755 (1991).
- 7) Rosenblum, R. E. et al.: Simulating the Structure and Dynamics of Human Hair: Modeling, Rendering and Animation, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 2, No. 4, pp. 141-148 (1991).
- 8) Kajiya, J. and Kay, T.: Rendering Fur with Three Dimensional Textures, *Comput. Gr.*, Vol. 23, No. 3, pp. 271-280 (1989).
- 9) Anjyo, K., Usami Y., and Kurihara, T.: A Simple Method for Extracting the Natural Beauty of Hair, *Comput. Gr.*, Vol. 26, No. 2, pp. 111-120, and also included in *SIGGRAPH Video Review*, Issue 86 (1992).
- 10) Hitachi, Ltd.: Windy Moment (Film). A short version of the film is found in *SIGGRAPH Video Review* Issue 85 (1992).

(平成4年11月24日受付)

(平成5年11月11日採録)



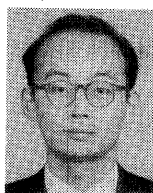
安生 健一 (正会員)

1982年九州大学大学院博士課程中退。同年(株)日立製作所入社。同社日立研究所研究員を経て、現在は同社システム事業部主任技師。コンピュータグラフィックスの研究開発に従事。1989年EUROGRAPHICS '89 Award受賞(スライド・科学部門)。日本数学会, SIAM, ACM SIGGRAPH, EUROGRAPHICS 各会員。



宇佐美芳明 (正会員)

1958年生。1981年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業。1983年同大学か修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。以来、コンピュータグラフィックスのソフトウェアの研究開発に従事。IEEE-CS 会員。



原 恒 弥 (正会員)

1983年東京大学大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。現在、同社中央研究所研究員。1992年、スイス連邦工科大学(EPFL)客員研究員。コンピュータグラフィックス, キャラクターアニメーション, 形状モデリングに興味を持つ。ACM SIGGRAPH, IEEE, Computer Graphics Society 各会員。