

## ダイナミクスモデルに基づく頭髮の運動表現

三枝 太†

森島 繁生

成蹊大学工学部

〒180 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1

Phone: 0422.37.3742 Fax: 0422.37.3871

† E-mail: futoshi@ee.seikei.ac.jp

あらまし

サイバースペースにおける仮想人物の合成やコミュニケーションシステムのための人物像合成等で、コンピュータグラフィックスによる人物合成が注目を集めている。本稿では、特に人物のCGの中でも特に合成が難しいとされる頭髮の表現手法について述べる。既に頭髮を空間曲線により近似することで、形状データの容量を大幅に削減し、また剛体セグメントモデルで近似することにより頭髮の運動制御を実現する方法を筆者らは提案した。本稿では、この運動制御方法をさらに改良し実際の運動に即したモデルで記述することで、頭髮の動きをより自然なものにした。また、新たな衝突判定アルゴリズムを提案し、高速な衝突判定処理を行った。さらに、ディスプレイの数倍の解像度を持つイメージバッファを用いたレンダリング手法により、より滑らかな頭髮の表現を可能にした。

キーワード: コンピュータグラフィックス、頭髮、運動制御、レンダリング、アニメーション、衝突判定

### Representation of Motion for Human Hair based on Dynamics Model

Futoshi SAEGUSA †

Shigeo MORISHIMA

Faculty of Engineering, Seikei University

3-3-1 Kichijoji-kitamachi, Musashino-shi, Tokyo, 180 JAPAN

Phone: +81.422.37.3742 Fax: +81.422.37.3871

† E-mail: futoshi@ee.seikei.ac.jp

#### Abstract

A trial to generate the object in the natural world by computer graphics is now actively done. Normally, huge computer power and storage capacity are necessary to make real and natural movement of the human's hair. In this paper, a technique to synthesize human's hair with short processing time and little storage capacity is discussed. A new *Collision Buffer* for high speed collision detection with the human's body is discussed. Moreover, new rendering method using Image Buffer of a few times as large as resolution of CRT to synthesize more natural hair image is also proposed.

key words: Computer Graphics, Human's Hair, Motion Control, Rendering, Animation, Collision Detection

## 1. はじめに

現在、コンピュータグラフィックス (CG) による人物の画像合成が様々な分野で行なわれている。アミューズメントや映画などをはじめとするエンターテインメントの分野では、よりリアルな人物の合成画像が求められており、またヒューマンコミュニケーションの分野でも、より高度なインタフェースを実現するために、人物の画像にCGが用いられている。

しかし、人物の頭部の画像の中で、頭髮は視覚的に重要であるにも関わらず、簡単な曲面や背景の一部によって代用されることが多かった。これは、頭髮が極めて多くの糸状物体から構成されており、形状が複雑であることから、従来よりCGによって表現が困難な対象の一つであるためである。

CGによる頭髮の表現手法としては、異方性反射モデル[1,4]やテクセル[8]などのマッピング技術や、アルファブレンディング法を用いる方法が提案され、成果を収めている。一方頭髮のアニメーションを考慮した場合は、髪の毛の一本一本について運動を制御する方法が一般的である。これらの代表的な手法としては、髪の毛の一本一本を三角柱などによってモデル化する手法[2]や、実測値に基づく確立モデルによって動きを求める手法[3]、微小線分の振舞いを「射影方程式」を解くことにより求め、それらを異方性反射モデルによってレンダリングする手法[7]などがある。これらの手法でしばしば問題をとなるのは、膨大な量の髪の毛を扱うことによる計算負荷の増大や記憶容量の増加である。筆者らは既に頭髮を「空間曲線」によって近似し、「剛体セグメントモデル」を用いて運動を制御することで、複雑な頭髮を少ない形状データでリアルに表現することを可能とした。しかし、

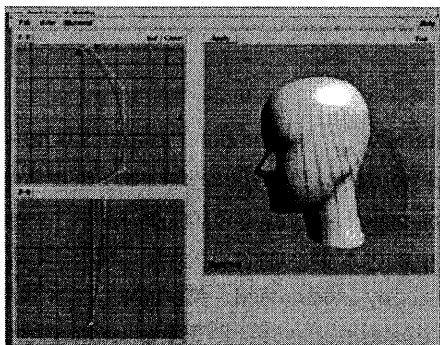


図1：ヘアスタイルデザインシステム

頭部と頭髮の衝突判定の際に、頭部を球によって近似していたため、モデル形状に依存した衝突判定を行っていたなどの問題点が残されていた。本稿では、「衝突判定バッファ」を用いた高速な衝突判定を行う手法について述べ、頭髮が頭部内部にめり込みことを回避する手法についても述べる。また、ディスプレイの数倍の解像度を持つイメージバッファを用いたレンダリングにより、より細く、滑らかな頭髮のレンダリングを可能とした。

## 2. 頭髮のモデル化

風によってしなやかになびく髪の毛を表現する場合は、髪の毛の一本一本について運動の制御を行わなければならない。しかし、髪の毛一本一本をモデル化する場合微細な構造の髪の毛を多角形 (ポリゴン) などによって近似すると、その数は極めて多くなり、頭髮全体をモデル化するために膨大な量の記憶容量を必要とする。本研究では、髪の毛一本一本を空間曲線である3次B-Spline関数によって近似している[9]。空間曲線の形状は、「形状制御点」と呼ばれる空間中の点列によって決定される。そのため、この形状制御点のみを形状データとして保存することで、少ない記憶容量で髪の毛全体をモデル化することに成功した。

形状制御点によって複雑な髪型をデザインするためには、膨大な量の形状制御点を適切に設定する必要がある。これには、適当な関数を用いて形状制御点の並びを決定する手法[10]や、髪の毛の曲げ剛性を利用し、自動的に髪の毛の形状を作成する手法[5]などが提案されている。しかし、前者は希望する髪型に合わせた関数の選択が難しいという問題がある。一方後者は放射状に生成された髪の毛の初期形状に、重力などの外力を加えて髪の毛を变形させることで髪の毛全体をモデル化する手法であるが、形状の決定に力学的な計算が必要であり、また希望の髪型を得るためにある程度の熟練を要すると思われる。本研究をはじめ、CGアニメーションを作成するシステムでは、コンピュータに熟練していないユーザであっても簡単に操作できることが望まれる。複雑な髪型を短時間でイメージどりにモデル化するためには、結局ユーザが直接曲線の形状を決定できることが必要であると考えられる。そのためには、マウスなどのポインティングデバイスを活用した、対話的でグラフィカルなツールが望まれる。本研究では、グラフィ

カルユーザーインターフェース (GUI) を考慮したヘアスタイルデザインシステムを作成し、マウスオペレーションによって髪型のモデル化を行った (図 1)[11]。

### 3. 頭髪のレンダリング

レンダリングによってリアルな頭髪の質感を再現するためには、空間曲線上の全ての点において法線ベクトルが定義されていなくてはならない。しかし、先に述べた空間曲線によって得られる値は、空間中の座標値だけであり、局所的な構造は定義されていない。本研究では、空間曲線上を極めて細いチューブであると仮定し、曲線上の任意の点における法線ベクトルを計算することで、空間曲線のレンダリングを可能としている[9]。

本研究のように、頭髪のような非常に細い物体を扱った場合、エイリアシングは極めて頻繁に発生する。従って、頭髪を細く、滑らかに再現するためには、エイリアシングを除去することは重要である。

エイリアシングは、高解像度のCRTを用いることにより減少させることが可能であるが、2K×2K画素以上の解像度を有するCRTは高価であり、問題の根本的な解決にはならない。アンチエイリアシング手法は種々提案されているが、本研究では、Zバッファ・アルゴリズムを用いて隠面消去を行っているため、Zバッファ法に適合したアンチエイリアシング法を用いることが重要である。

Zバッファ法では、一般に1つの画素に対しては1つの輝度と奥行きしか記憶しない。従って、実際には1画素中に複数の物体が存在しても、レンダリングされる物体はその内最も手前にあるもののみである。頭髪のように非常に細い物体では、このような問題は必ず生じる。

そこで、本研究では実際のCRTの数倍の解像度を持つZバッファを準備し、そのZバッファを用いて高解像度の画像を合成した後、数画素分を平均して1画素に割り当てることにより低解像度の画像を生成した。

### 4. ダイナミクスモデルに基づいた頭髪の運動制御

曲線の運動を制御するためには、形状制御点の位置を何らかの方法に従って求めればよい。外力

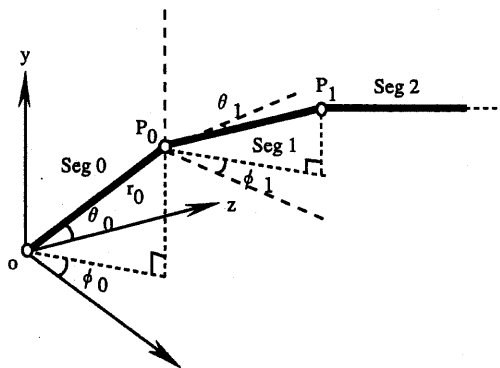


図 2：剛体セグメントモデル

の影響による頭髪の伸縮は、全体の形状の変化に比べれば無視できる。そこで、本研究では、空間中に設定された形状制御点を質量のある棒状の剛体で結び、各剛体に働く外力や隣り合う剛体間に働く復元力などを考慮した運動方程式の数値解を求めることによって、セグメントの運動をシミュレートしている。図 2 は、剛体棒によって連結された形状制御点を表している。

各々の剛体棒は極座標系において表されており、その運動は  $\theta$  と  $\phi$  の 2 方向の回転運動によって考えることができる。セグメントに加わる全ての力の総和を  $F$ 、セグメントの重心の位置ベクトルを  $r$  とすると、回転モーメント  $N$  は  $N = F \times r$  と表せるので、任意のセグメントの運動方程式は次式のようにになる。

$$F \times r = \frac{ml^2}{3} \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

ここで  $m$ 、 $l$ 、 $\omega$  はそれぞれセグメントの質量、長さ、角速度である。

### 5. 頭髪の高速な衝突判定・めり込み回避

頭髪のモデル化においては、頭髪が頭部内部に存在することの無いように空間曲線の形状を定める。しかし、頭部の存在を無視して運動のシミュレーションを行えば、頭髪は頭部へめり込んでしまう。これを避けるための手法としては、疑似外力を用いる手法[7]や、円筒座標系による衝突判定バッファを用いる手法[6]が提案されている。前者の手法は、頭部を包むように疑似外力領域を設け、疑似外力の作用で頭髪が頭部内部にめり込むこと

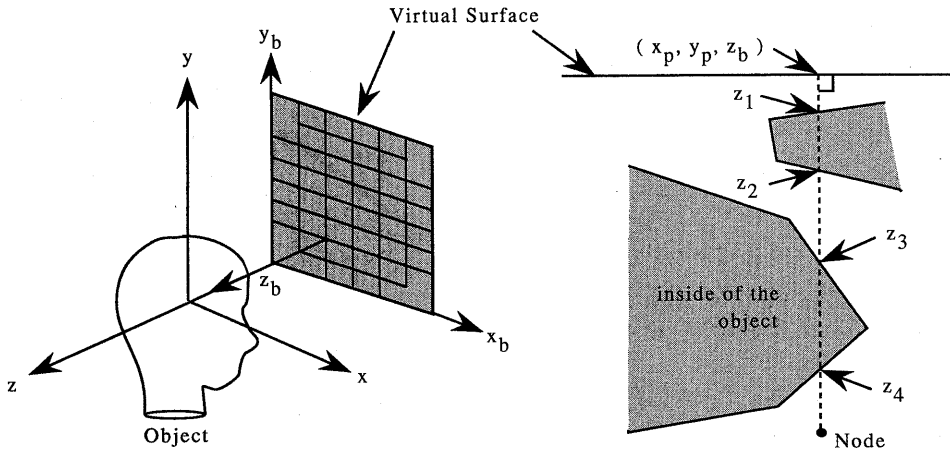


図3：衝突判定用バッファ

を防いでいる。特別な衝突処理が必要でない分、計算が高速化されているが、厳密な衝突判定はなされていない。また、頭髪が頭部にめり込まないような疑似外力を設定しなければならない。一方後者の手法では、円筒座標系に変換された形状制御点と、予め作成された物体の中心から物体表面までの円筒座標系における距離を格納したテーブルを比較することで、衝突の検出を行っている。しかし、衝突判定用バッファは円筒形座標系で表されているため、物体それぞれについてバッファを用意しなければならない、ノードの座標変換を個々の物体について計算しなければならない。腕などいくつかの物体が混在する環境では、計算時間が増大するものと思われる。

### 5. 1 衝突判定

本研究では、次に述べるようにポリゴンとの交点を予め計算しておくことによって、比較のみ的高速な判定を行っている。まず図3に示すように、衝突に関する全ての物体が平行投影可能な大きさで、かつ全ての物体と交差しないような仮想面を設定する。ここでは、 $x-y$ 平面に平行な面を考えているが、 $x-z$ 平面、 $y-z$ 平面に平行な面でもよい。次にこの面に対応した2次元配列を用意する。配列の要素 $[x_n, y_n]$ には、図3に示すように面に対応する点 $(x_n, y_n)$ から垂線をおろし、各物体と交わる点の $z$ 座標を、交差する順番に格納する。こ

で、仮想面に設定された配列の取り方は、四分岐法を用いて物体がまったく存在していない所は荒くなるようにする。

衝突の判定においては、頭髪の形状を決定する制御点の座標を $(x_p, y_p, z_p)$ で表すとすると、初めに作成した配列から $x_p, y_p$ に最も近い要素を参照する。制御点に座標が配列の範囲を越えている場合は、もともと仮想面が全ての物体を包含するように設定されているので、物体は存在しないことになる。この要素には、同じ $x_p, y_p$ における全てのポリゴンとの交点に $z$ 座標値 $z_1, z_2, z_3, \dots$ が格納されているので、物体が全て閉じていることを前提とすれば、制御点の $z$ 座標値 $z_p$ が $z_p > z_1, z_2 < z_p < z_3, z_{2n} < z_p < z_{2n+1}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )の範囲にあれば、この制御点は必ず全ての物体の外部に存在することになる。

### 5. 2 めり込み回避

衝突判定によって、頭髪が頭部などの物体に衝突したことを知ることができても、このままでは、頭髪が頭部にめり込むことを回避することはできない。頭髪のめり込みを回避するには、衝突した時点で頭髪に何らかの処理を施して、頭髪が頭部内部へ進入することを防がなくてはならない。

実際の運動を観察すると、頭髪が人物の頭部に衝突した場合、頭髪はしばらく頭部に接触したま

ま頭部表面に沿って流れるものと思われる。本研究では、より自然な運動を表現するために、この現象を次の方法によってシミュレートした。図4に示すように、物体表面のノードPが持つ速度、加速度は、物体表面の法線方向の成分と接線方向の成分に分けることができる。この内接線方向成分は、頭髪が頭部に進入することとは無関係であると考えられる。そこでこのノードの持つ速度、加速度のうち接線方向成分のみを保存することで、ノードは物体表面を流れるように運動を続け、物体内部に進入することを防ぐことができる。図4において、Nを物体表面の法線ベクトルとする。これは、予め物体を構成する全てのポリゴンを含む直方体を準備しておき、衝突と判定されたノードがどの直方体、つまりどのポリゴンと衝突をしたのかを判定することにより法線ベクトルを得る。物体表面の接線方向のベクトルは、無限に存在し接平面を作るが、このときノードPが持つ速度ベクトルを $f$ とすると、 $f$ の接線方向成分は法線ベクトルNと $f$ が作る平面と、この接平面の交線の方向を持つ。従って $f$ の接線方向成分の単位ベクトルは次式で表される。

$$f_{HN} = (N \times f_N) \times N \quad (2)$$

ここで $f_{HN}$ は $f_N$ の単位法線ベクトルであり、

$f_{HH} = f / |f|$ として求める。従って、 $f$ の接線方向成分は、次式のようになる。

$$f_H = f_{HN} \times (f \times f_{HN}) \quad (3)$$

同様にノードPの加速度の接線方向も求めることができる。これらの成分をノードPの新たな速度、加速度として与えることによって、頭髪の自然な運動を実現した。

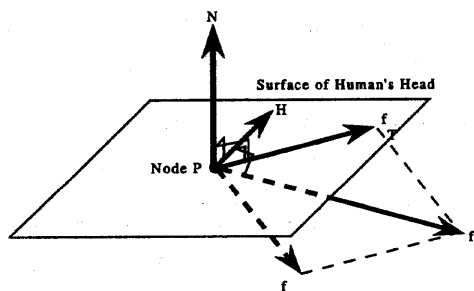


図4:めり込み回避処理

## 6. 結果

頭髪生成本数約10万本、解像度 $2160 \times 1458$ 、衝突判定用バッファ解像度約 $512 \times 512$ 、約8000ポリゴンから構成されるモデルを用いた頭髪アニメーション例を図5に示す。なお、アニメーション作成には、Silicon Graphics IRIS O2 (R1000 150MHz)を使用し、1フレームの画像生成時間は約4分である。

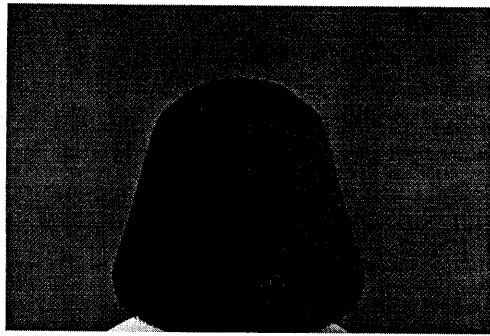
## 7. まとめ

頭髪を空間曲線によって近似する手法は、膨大な本数の頭髪を少ない形状データでモデル化する有効な手段である。頭髪のように、非常に細い物体を、CGで扱った場合に顕著に表れるエイリアシングの問題は、CRTの数倍の解像度を持つイメージバッファを用いることにより解決した。これにより、より細く、滑らかな頭髪のレンダリングが可能となった。また、人体と頭髪との間の衝突問題は、自然なアニメーションには不可欠であるが、本稿ではこの問題に「衝突判定バッファ」を用いることにより、正確で高速な衝突判定を可能にした。また、「衝突判定バッファ」を、四分岐法を用いて密度を適応的に変化させることでメモリ効率を向上させた。また、頭髪の頭部へのめり込み回避は、衝突ポリゴンの法線ベクトルからノードの速度、加速度の接線方向成分を求めことで、これを実現した。

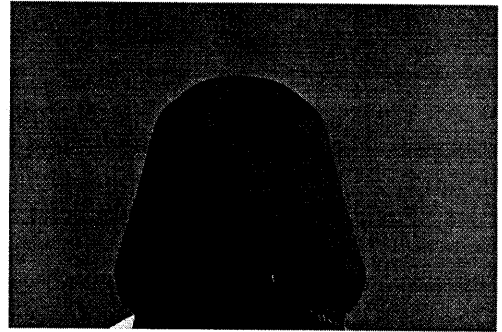
VRやゲームなどのリアルタイム性が重要な分野では、画像のクオリティにも増して画像生成の高速化が要求される。本手法では、特に計算時間を削減を重点にアルゴリズムの改良を行ってきたが、未だリアルタイムによる生成には至っていない。リアルタイムでは合成を可能にするために、より一層のアルゴリズムの単純化と効率化が課題となっている。

今回提案したアンチエイリアシング手法により、完全にエイリアシングを除去するためには、Zバッファの解像度をかなり上げる必要があり、記憶容量や処理時間が問題となる。今後の課題として、複数のバッファを用いたAバッファ法によるエイリアシング除去があげられる。

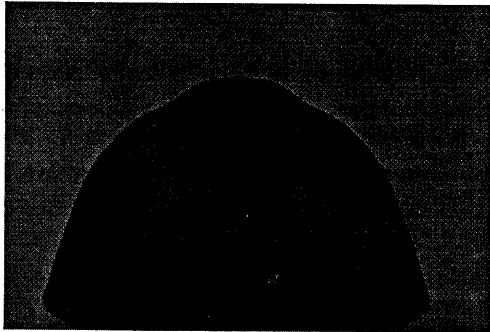
また、現在作成されているヘアスタイルモデリングツールは、比較的複雑な髪型の形状データをグラフィカルかつ対話的に行うモデリングシステ



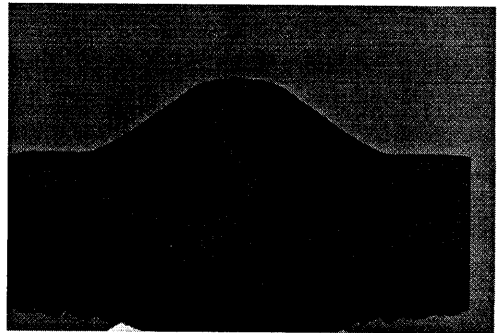
(a) 0.0sec



(b) 4.0sec



(c) 8.0sec



(d) 12.0sec

図5：アニメーション例

ムである。しかし、より複雑なウェーブヘアやパーマヘアのモデリングの実現には至っていない。今後、複雑な髪型デザインが簡単に行えるデザインシステムを作成する予定である。

#### 参考文献

- [1] 山名岳志, 末永康仁, "異方性反射モデルを用いた頭髪表現", 信学技報, PRU87-3, pp.15-20, 1987.
- [2] 渡部保日児, 末永康仁, "三角柱と房モデルによる頭髪生成", 情報処学全大, 5K-10, pp.715-716, 1989.
- [3] 安居院猛, 三輪喜良, 中嶋正之, "確立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", 情報処学論文誌, vol. 32, no. 6, pp.749-755, Jun. 1991
- [4] 東條弘, 宮原誠, 村上公一, 広田克彦, "コンピュータ・グラフィックスによる髪の毛の質感表現—異方性反射モデルと法線マッピングの応用—", 信学技報, IE89-34, pp.57-64, Jul. 1989.
- [5] K.Anjyo, Y.Usami, T.Kurihara, "A Simple Method for Extracting the Natural Beauty of Hair", Computer Graphics, vol.26, no.2, pp.111-120, July. 1992
- [6] T.Kuraihara, K.Anjyo, D.Thalman, "Hair Animation with Collision detection", In: Models and Techniques in Computer Animation, Springer-Verlag, Tokyo, pp.128-138, 1993.
- [7] 安生健一, 宇佐美芳明, 栗原恒弥, "3次元コンピュータグラフィックスによる頭髪表現", 情報処学「グラフィックスとCAD」シンポジウム, pp.127-13, Nov. 1991.
- [8] J.T.Kajiya, T.L.Kay, "Rendering Fur with Three dimensional Textures", Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH89), vol.23, no.3, pp.271-280, Jul. 1989.
- [9] 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" 信学技報, PRU90-127, pp.15-20, Feb. 1991.
- [10] 菅野雄彦, 小林誠司, 森島繁生, 原島博, "ヘアデザインのための髪型形状の自動生成の試み", 信学春季全大, D-662, pp.7-374, Mar. 1991.
- [11] 三枝太, 安藤真, 森島繁生, "GUIを用いたヘアスタイルデザインシステムの開発", 信学会春季大会, A-394, pp.395, 1996.