

曲げ剛性を利用した頭髪のモデリング†

宇佐美 芳明** 安生 健一††*

コンピュータ・グラフィックスにより、リアルな人間を表示可能にすることは、ニーズのある重要な課題である。しかし従来の映像生成の手法では、他の人体各部に比較して、頭髪の表現レベルが不十分である。また、容易に髪形を定義できるような、頭髪のモデリング方法も存在しない。これらの問題は頭髪の形状決定の際に、頭髪の物理的特性が考慮されていないことが原因と考えられる。そこで、頭髪の曲げ変形に対する剛性を考慮した物理シミュレーションを導入して、新しいモデリング方法を提案する。曲げ剛性を利用すると、頭髪の変形量はこれに作用する曲げモーメントの大きさから求められ、頭髪の変形の基本的性質をシミュレートできる。すなわち、頭髪の生え際付近では変形量が小さく、先端に向かうにつれて変形量が大きくなる性質である。そのため、本手法では頭髪の分け目やボリューム感が容易に表現でき、従来手法にないリアルな頭髪の表現が可能となった。また、頭髪をコンパクトな3次元のポリラインのデータで表現しており、多数のポリゴンで頭髪を近似する必要はない。したがって、グラフィックス・ワークステーションのハードウェアを利用して、高速なレンダリングが可能である。さらに、モデリング処理である頭髪の曲げ計算の時間についても、実用上問題のない範囲で処理できる。

1. はじめに

コンピュータ・グラフィックス (CG) 技術は、人や機械とのコミュニケーションの道具であり、画面内に人間の登場が必要となるケースが多い。しかし現状では、リアルな人間の映像を、CG により生成することは困難で、主要な課題のひとつになっている。その人間の構成要素のなかでも、特に頭髪は極めて多数の毛髪の集合体であり、表現すべきデータ量の膨大さのために、リアルな表現が困難である。例えば、毛髪に関連した従来の研究では、パッチ上に異方性反射する毛を定義して毛のある動物を表現する方法¹⁾や、密集した毛を3次元のテクスチャとしてモデル化して毛皮を表現する方法²⁾などが知られている。しかし、これらの方法は毛の長さが短い状態を対象としたもので、人間の頭髪のように、比較的に長いものに対しては、直接には適用できないと思われる。また人間の頭髪を対象とした研究では、頭髪の異方性反射を考慮して作成した模様をマッピングすることにより表現する方法³⁾、一本の頭髪を三角柱で近似して房単位に制御する方法⁴⁾、および光源からの距離情報をシャドウマップとして頭髪の影を表現する方法⁵⁾などがある。このほかにも、頭髪の運動表現の試みでは、風力により頭髪がなびく運動を、流体力学と確率モデルを使用し

て求める方法⁶⁾や、頭髪の運動方程式を解いて髪の揺れる運動を求める方法⁷⁾がある。しかし、これらの研究は、主として頭髪のレンダリングおよびアニメーション技術に主眼を置いたものである。したがって、頭髪のモデリング方法、すなわち髪形の設定方法については、頭髪形状を簡単な関数で記述するか、手作業で形状設定する手法を採用している。このようなモデリング手法では、頭髪の変形に対する物理的特性を全く考慮していないので、十分にリアルな頭髪形状は得られないものと思われる。現実の人間の髪形設定においては、髪に櫛やブラシで曲げを与えて形を作り固定する。それゆえに、曲げ変形により髪形を制御することは極めて自然であり、またリアルな頭髪表現のために不可欠な要素であると考えられる。そこで本研究では、リアルな CG 人間の頭髪表現のために、頭髪の曲げに対する剛性を考慮して、新たな頭髪のモデリング方法を検討する。

2. 頭髪のモデリング方法

2.1 頭髪モデルの定義

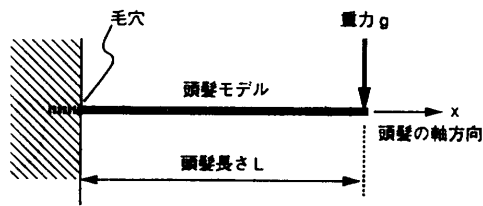
頭髪モデルは棒状要素で、人間の頭髪の本一本を表すものとし、頭部モデルに近似させて定義した一つの楕円体面上の毛穴から頭髪が発生するものとする。そして無重力の状態では、頭髪モデルはこの楕円体の中心から、法線方向に直線状に伸びているものとし、この形状を髪形の初期形状とする。つぎに、頭髪は重力の環境下に置かれているので、頭髪モデルの各部に下向きの力を与えて曲げ変形をさせる。本方式では、頭髪の曲げに対する剛性を考慮して、力によって生じ

† Hairstyle Modeling Technique Using Flexural Rigidity by YOSHIKI USAMI and KEN-ICHI ANJYO (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

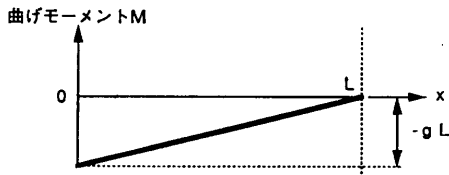
†† (株)日立製作所日立研究所

* 現在 (株)日立製作所システム事業部

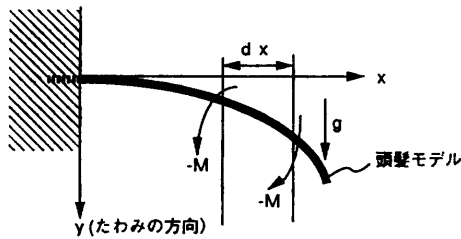
Currently, Systems Engineering Division, Hitachi, Ltd.



(a) 変形前の状態
(a) Before bending.



(b) 曲げモーメントの分布
(b) Bending moment diagram.



(c) 変形後の状態
(c) After bending.

図1 頭髪モデルの定義

Fig. 1 Definition of hair model.

る変形量を求めることで、髪形を決定する。

この変形量の求め方であるが、ここで実際の頭髪が受けている物理的環境に対して、図1のようなモデル化を行う。図1は2次元の一本の頭髪モデルの定義を示す図であるが、これは後で3次元に拡張する。まず頭髪モデルは等しい断面を持つ棒状の要素であるとし、この要素の毛穴側の端点は固定されているものとする。ここで、頭髪モデルが毛穴から伸びていく方向を頭髪の軸方向とし、一本の頭髪の長さを L とする。さらに固定されていない側の端点に集中的にかかる重力の大きさを g とする。このモデルは、材料力学⁹⁾で扱う片持ちはりのモデルと同等のものである。このような重力を受けると、頭髪モデルは曲げモーメントによる変形と、せん断力による変形とを生じる。しかし、変形量としては、曲げモーメントによる曲げ変形量の方が、値が大きく支配的であるので、以降ではせん断変形は無視して考える。また、頭髪の伸びもないものとする。この時の頭髪モデルの曲げモーメント M

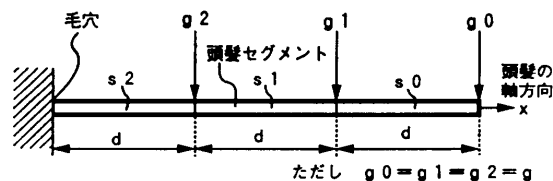
は、同図のように、固定していない側の端点の位置では0の大きさを、毛穴側の固定端点では $-gL$ の大きさとなる。つぎに、頭髪の軸方向を x とし、これに垂直なたわみの方向を y とし、モデルが弾性変形をするものとする、材料力学の手法により、次のようなたわみの方程式が得られる。

$$d^2y/dx^2 = -(M/(E * I)). \quad (1)$$

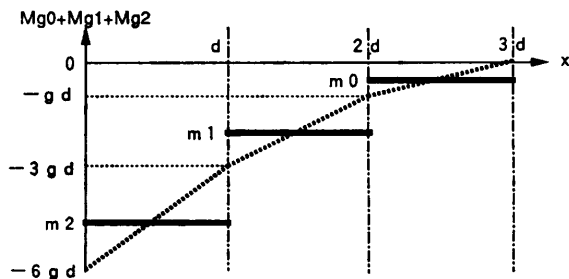
ここで、 E はヤング率でモデルの材料の変形に対する強さにより定まる値であり、 I は断面2次モーメントでモデルの断面形状により定まる値である。通常は $E I$ をまとめて曲げ剛性とよび、これはモデルの曲げに対する強さを表現する定数である。また $-M$ はモデルに対して外部から作用する力によるモーメントで、一方 $(d^2y/dx^2) * (E * I)$ はモデルの曲げ剛性によって生じる内部の力によるモーメントであるので、この式は頭髪の外部と内部の力の釣り合いを意味している。この関係を利用して、頭髪が重力により受ける変形量を求めることができる。

2.2 曲げモーメントによるたわみの計算

図2により曲げモーメントの計算方法について述べる。図1に示した一本の頭髪モデルは、計算上は図2のように、等しい長さ d で直線状に連結した、複数の頭髪セグメントから構成されるものとして扱う。この図の例では、一つの頭髪モデルは s_0, s_1 , および s_2 の三つの頭髪セグメントから構成されている。このと



(a) 荷重分布
(a) Distribution of loads.



(b) g_0, g_1, g_2 によるモーメントの和
(b) Sum of moment for g_0, g_1 , and g_2 .

図2 曲げモーメントの計算

Fig. 2 Bending moment diagram.

き重力は各セグメントの端点にのみ集中的に加わるものとして、それぞれを g_0, g_1 , および g_2 とする。ただし、これらの重力の大きさと方向はすべて同一である。そして、これらのセグメントに生じるモーメントを求めるには、まず g_0 と g_1 および g_2 についてのモーメントを独立に求め、つぎにこれを加算して合成したモーメントを求める。ここで、実際には g_0 から g_2 による合成モーメントは図2の太い破線で示したようなグラフとなる。しかし、計算の簡略化のため、実線で示すように各セグメント内では、 m_0, m_1 , および m_2 のように一定の値(平均値)をとるものとする。こうすると、先ほどのたわみの方程式で、ある点 $k-1$ から x 方向に d だけ離れた点 k' の位置のたわみ y は、式(1)より次式のように求められる。

$$y = (-1/2) * (M / (E * I)) * d^2. \quad (2)$$

このたわみの計算手順を、2次元で説明するものを図3に示す。ここでは、二つの頭髮セグメント s_1 および s_0 が連結しているものとし、これらの端点を $k-2, k-1$, および k とする。端点の位置は固定してある毛穴側から、セグメントごとにたわみ量を加算して順次決定していくものとし、 $k-2$ と $k-1$ の端点については、すでに位置が決定している。したがって、点 k の位置がここで求めようとする値である。ここで空間固定の座標軸を x_0 および y_0 とする。また頭髮の軸方向の X 軸と、たわみ方向の Y 軸は頭髮セグメントの向きによって変化するので、空間固定ではないローカルな座標系である。まず既知の s_1 の向きから頭髮の軸方向である X 軸の方向を決定し、変形前

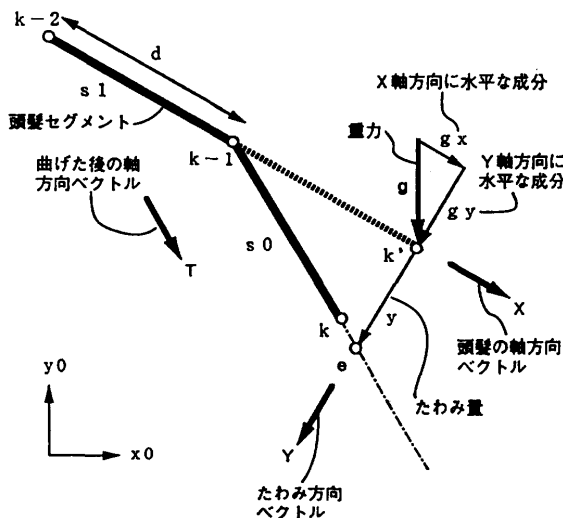


図3 頭髮モデルのたわみ
Fig. 3 Deflection of hair model.

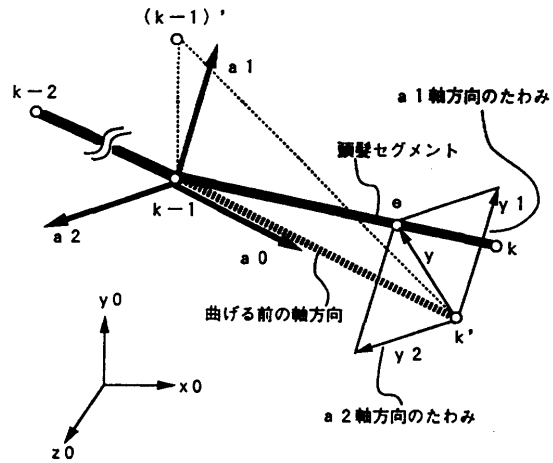


図4 3次元頭髮モデルのたわみ
Fig. 4 Deflection of 3D hair model.

の端点 k' の座標を求める。つぎに X 軸に垂直な方向を Y 軸として定める。さらに重力 g を X 軸に水平な成分 g_x と、 Y 軸に水平な成分 g_y に分解する。ここで g_x は s_0 に対してモーメントを生じないので無視し、以下では g_y のみを考慮する。そして、式(2)によりたわみ y を求める。点 k' から Y 軸の方向に y だけ移動した点を e とする。この e と $k-1$ を結ぶ方向をベクトル T として、 $k-1$ から T の方向に長さ d だけ離れた点を求める。これが求める点 k の位置である。

つぎに、図3の頭髮モデルのたわみを、3次元に拡張した場合を図4に示す。3次元の場合では、点 $k-1$ と点 k' とを結び、曲げる前の軸方向を a_0 軸とする。次に点 $k-1$ を一定量 y_0 軸方向にシフトした点を $(k-1)'$ とする。そして点 $k-1$ と点 $(k-1)'$ と点 k' との3点により定まる平面を求める。この平面上にあって、 a_0 軸と垂直になる方向を a_1 軸とする。さらに両者に垂直な方向を a_2 軸として定める。重力はこれらの三つの軸方向に分解する。2次元の場合と同様に、 a_0 軸方向のモーメントは生じない。よって a_1 軸方向のたわみ y_1 と、 a_2 軸方向のたわみ y_2 を、式(2)により独立に求めてから合成して、3次元の最終的なたわみ y を求める。あとは2次元の場合と同様にして、頭髮セグメントの端点 k の位置を求められる。

2.3 頭髮の配置位置

ここで、図5により毛穴の配置方法につき説明する。毛穴とは頭髮モデルの生え際であるが、これらすべてはある楕円体の面上にあるものとする。この楕円

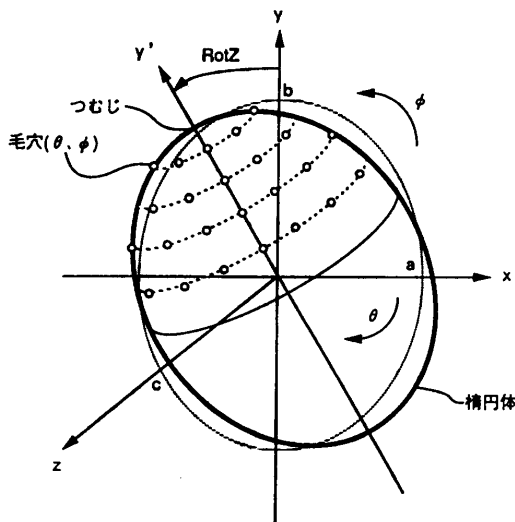


図 5 毛穴配置
Fig. 5 Pore location.

体の大きさは x, y, z 軸方向の大きさ a, b, c の値で設定し、さらに z 軸回りに角度 $\text{Rot } Z$ だけ回転させて定義する。そして橢円体は頭部モデルを包含するような大きさに設定する。ただし、このままでは毛穴が頭部から離れている部分が見えるので、各毛穴位置から橢円体の中心に向けて、頭髮セグメントを一つずつ追加する。ここで頭部モデルの顔の正面方向は x 軸の方向であり、回転後の y' 軸が橢円体と交わる点がつむじとなる。また毛穴の位置は橢円体座標系で指示し、角度 ϕ および角度 θ を同図のような向きに規定して、 ϕ と θ の値により、毛穴およびそこから発生する頭髮を特定する。さらに毛穴の配置間隔については、あらかじめ入力した間隔の設定値により、 ϕ 方向と θ 方向の円周長を求めて、両者に等しい間隔となるように配置位置を決定する。ただし、完全な等間隔では毛穴位置に規則性が現れてしまうので、乱数により微小量移動させて、最終的な位置を決定している。

重力による曲げの計算だけで髪形を決定すると、場所によっては頭髮が頭部モデルの内部に入り込んでしまう場合があり、好ましくない。しかし頭部モデルは通常は数多くのポリゴンから構成されており、すべてのポリゴンについて頭髮との干渉をチェックすることは難しい。そこで、頭髮と橢円体で干渉をチェックして、両者の衝突を回避する処理を行う。この方法を図 6 で説明する。図 3 の場合と同様にして、点 k が曲げ計算により求められた位置であるとする。この点 k が橢円体の内部に含まれるか否かは、その座標値を橢円体の方程式に当てはめてみることで、容易に判別する

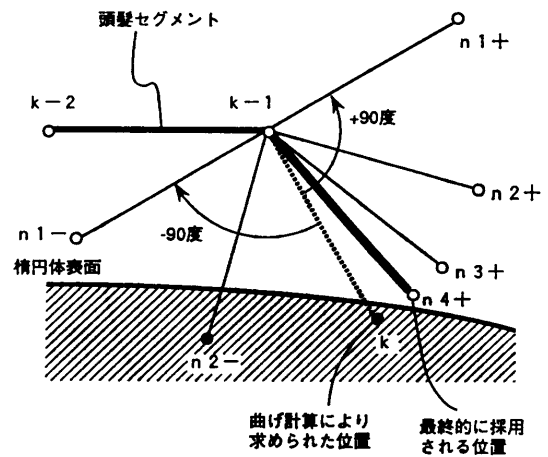


図 6 衝突回避
Fig. 6 Collision avoidance.

ことができる。いまこの点が橢円体の内部であったとすると、頭髮と橢円体が衝突していることになるので、衝突回避の処理を行う。なお同図においては、黒丸が橢円体内部の点、白丸が外部の点であることを意味する。まず衝突があった場合には、点 $k-2$ と点 $k-1$ および点 k の 3 点がなす平面上で、第 1 次に点 k のある方向から ± 90 度の方向への回避を試みる。 $+90$ 度方向へ回避した点を $n1+$ とし、 -90 度方向の点を $n1-$ とする。そこで再び橢円体との衝突を判定し、同図のように両者ともに衝突がないとする。その場合には、両者の回避する方向の角度を $1/2$ にして、さらに衝突を判定する。こうして求めた点が、 $+45$ 度方向が点 $n2+$ 、 -45 度方向が点 $n2-$ である。今度はこれらの点で衝突を判定すると、同図の例では点 $n2-$ が衝突している。そこで、これ以降は角度がマイナスになる方向については、衝突回避をせず、プラスの方向についてのみさらに角度を $1/2$ にして回避を試みる。こうして求めた点が $n3+$ で、この点は衝突しないのでさらに点 $n4+$ を求める。回避方向を計算する回数はあらかじめ設定されており、この例では 4 とするので、ここで処理を打ち切る。したがって、点 $n4+$ が最終的に採用される位置で、ここが頭髮セグメントの端点になる。

2.4 カットおよび外力の指定

髪形を決定するには、頭髮カット機能も重要であり、その方法について述べる。現状では、カットの対象となる頭髮は毛穴位置の θ と ϕ で特定し、頭髮のカット位置は y 軸の高さ方向の値で指示を与える場合が多い。この値が設定されると、それ以下の頭髮セグメントには非表示の属性を持たせる。したがってディ

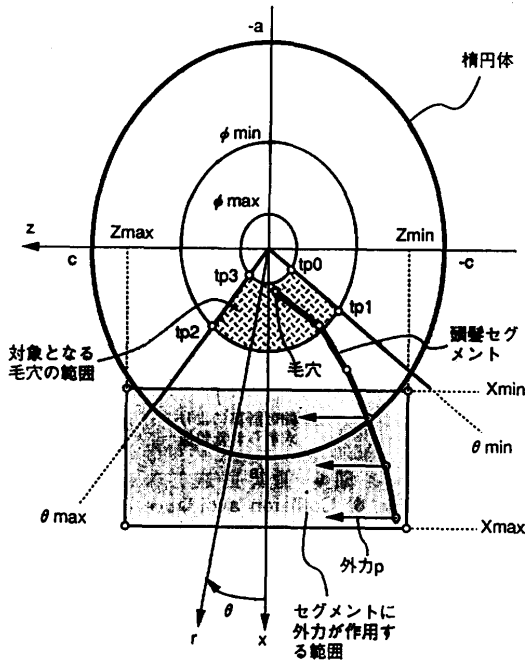
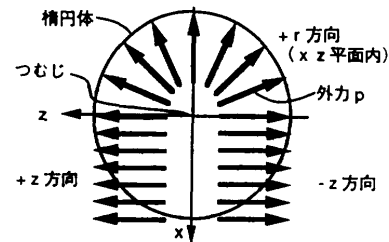


図 7 外力指定

Fig. 7 Instruction of external force.

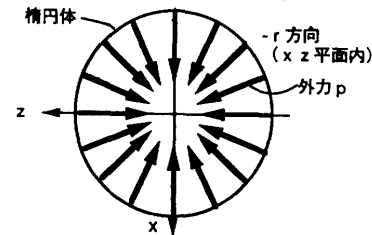
スプレイ上では、高さが一定値以上のセグメントだけが表示され、これ以下の部分はカットされたことになる。厳密には、カットによって頭髮の剛性が変化しているの、曲げ変形の計算を再度を行うべきであるが、現状では行っていない。

実際の人間の頭髮では、重力による変形以外にも、櫛やブラシで意図的に頭髮の方向付けをして髪形をセットすることが行われる。これを実現する方法、およびその指定方法を図 7 により説明する。意図的に方向付けをするためには、重力以外にさらに外力 p を指定し、曲げ変形の計算のときには、重力のベクトルと外力のベクトルを加算したものをを用いて、たわみを求めることで実現できる。まず対象となる毛穴すなわち頭髮の範囲は角度 θ と角度 ϕ で指定し、最大値を θ_{max} および ϕ_{max} 、最小値を θ_{min} および ϕ_{min} で与える。この範囲は同図では点 $tp0$ から点 $tp3$ までの 4 点で囲まれる領域である。次にこの範囲の毛穴から出た頭髮のうちで、特定の領域にあるセグメントだけが外力を受けようとしている。このセグメントに外力が作用する範囲は、 x 軸、 y 軸、 z 軸の値で指定し、最大値を X_{max} , Y_{max} , Z_{max} 、最小値を X_{min} , Y_{min} , Z_{min} で与える。そして、この範囲内のセグメントに対して、各軸方向の x , y , z および半径方向 r のいずれかの方向で、任意の大きさの外



(a) 目の高さ以上の領域

(a) Region above eye position.



(b) 目の高さ以下の領域

(b) Region below eye position.

図 8 外力指示の例

Fig. 8 Example of external force.

力を与えて頭髮形状を修正することができる。

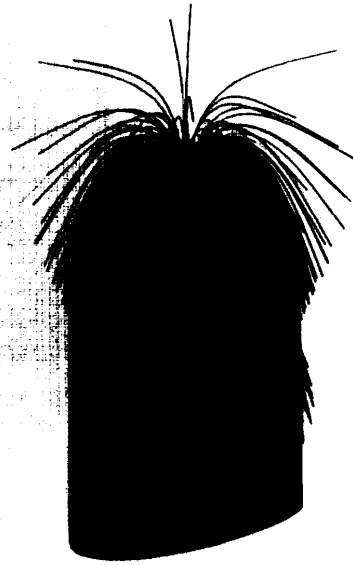
次に図 8 により、外力の指定をした例について説明する。例えば後述の図 10 のように、中央で分け目を入れて、前髪は短くし、下の方の頭髮は内側へカールさせるようなボブカット（おかつぱ髪）の髪形を生成する場合を想定する。カットについては、顔の前面にくる頭髮の部分の θ と ϕ を指定し、眉毛の高さにカット位置を設定してカット量を決める。外力については、 y の値が頭部モデルの目の高さ以下のセグメントを内側へカールさせるものとして、この値を境に設定値を変える。まず目の高さ以上の領域 (a) では、分け目を入れるために、顔の前方からつむじまでの間に、頭髮を左右に分けるような $\pm z$ 方向の外力を加える。そして、後頭部は xz 平面内の半径方向で $+r$ の方向に加える。次に目の高さ以下の領域 (b) では、全体に xz 平面内で $-r$ の方向に外力を与える。このように外力の向きと大きさを指定することで、多様な髪形の表現が可能となる。

3. 結 果

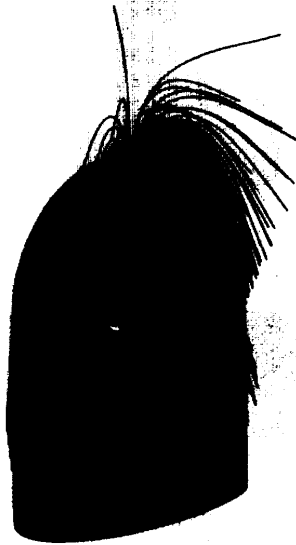
頭髮モデルの形状は、曲げ計算の結果を 3 次元のポリラインデータとして与えている。またポリラインの色彩については、各頭髮セグメントの両端位置で、頭髮の異方性反射を考慮したシェーディング⁹⁾ 計算を



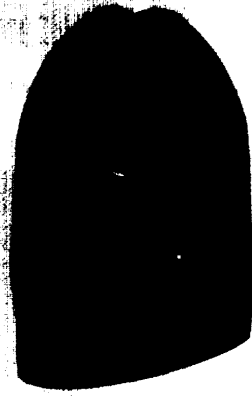
(a) 初期形状
(a) Initial state.



(b) 重力による効果
(b) Gravity effect.



(c) 右向き外力の付加
(c) Addition of right directed force.



(d) 左向き外力の付加
(d) Addition of left directed force.

図 9 髪形生成の過程
Fig. 9 Hairdressing process.

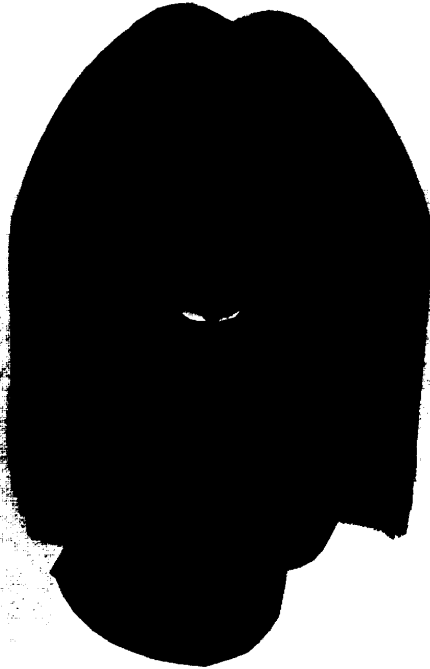


図 10 レンダリング結果
Fig. 10 Rendered image.



(a)



(b)



(c)



(d)

図 11 髪形の例
Fig. 11 Examples of hairstyle.

し、これにより得た頭髪の表示色をポリラインの頂点色として与える。そして、ポリラインの内部については色の補間を行って表示させている。頭髪をポリゴン近似すると膨大なデータが必要となるが、ポリラインの場合にはデータ量を極めて小さくできる。したがって、頭髪表示にポリラインを使用し、その他の頭部のみに通常のポリゴンを使用すると、ワークステーションのハードウェアによるレンダリング機能を利用して、高速表示が可能である。最近ではハードウェアでもアンチエイリアス処理等が可能になっており、画質の点での問題は少なくなっている。ただし、線幅を画面上の整数幅で指定する必要があるため、極端なズームングが必要なシーンなど、画面上で頭髪の幅をスムーズに変化させることが必要な場面では問題が生じる。

このプログラムの入力情報には、毛穴位置や外力ベクトルの指定のためのパラメタがあるが、現状では入力操作が対話式にできていないので、これらの値はファイルから入力している。したがって、事前にテキストエディタを使用して、パラメタの値をファイルにセットしておく必要がある。しかし高速表示可能なハードウェアのレンダリング機能を利用しているので、アンチエイリアス処理なしで、視点位置を変更する場合については、ほぼリアルタイムの対話的操作が可能である。

図9に、本手法による髪形生成の過程を示す。まず、(a)は初期形状で、無重力で放射状に拡がっている状態である。つぎの、(b)は重力のみを与えた状態で、顔前面にある膨らみの部分は、楕円体との衝突回避処理によって、頭髪が外側へはじき出された部分である。頭の頂上付近にあり、重力方向に近い向きの頭髪は、あまり重力から曲げモーメントを受けないので、毛が寝ないで立ってしまう。そこで、外力を付加して髪形を整えることが必要となる。(c)は右半分にZ方向の外力を付加して整えた状態で、(d)は左半分にも付加した状態である。

本手法の適用結果を、図10および図11に示す。図10は図8のような外力を与えており、約5万本の頭髪モデルから構成されている。ここで頭髪の本数は、モデルを色々な方向から見ても、頭皮が見えてこない程度の最小の本数に設定している。したがって、必要な本数は画面上での頭髪モデルのポリラインの表示幅に依存する。図10の例は、特にレンダリング時に4096×4096の解像度でオーバーサンプリングしたもの

を、フィルタリングで1024×1024にしているため、ポリラインの幅は見かけ上1/4画素程度になっている。図10以外では、画像は同じく1024×1024の解像度であるが、ポリラインの幅は1画素であるため、頭髪本数は2万本程度に設定している。また図11に示す髪形の例は、外力とカットの指定を変化させて生成したものである。ここで、同図(a)は分け目をやや右寄りに設定して、前髪は自然に垂れるようにした例である。(b)は外力を顔の前方から、 $-x$ の方向に作用させている。(c)はいわゆるポニーテールのように束ねた髪形で、テールの部分と、それ以外の部分は別々に定義している。そして、(d)はショートカットの髪形で、 y の高さに応じてセグメントの数が変化するようにカットしたものである。図11のような例において、モデリングの時間(頭髪の曲げの計算時間)は上記ワークステーションで60秒程度であり、レンダリングの時間(1024×1024画素、アンチエイリアス処理あり)は15秒程度である。これらの値は、毎秒100万ポリゴンまたはベクタが描画でき、30 MIPSのCPUを持つグラフィック・ワークステーション上で実行したときの時間である。

4. 結果の検討

本手法の適用結果によれば、従来よりもリアルな頭髪の表現が可能になっている。頭髪の曲げ剛性を考慮したシミュレーションでない場合には、このような頭髪の表現は困難と思われる。例えば、図10のようなボブカットでは、頭髪が皮膚から立ち上がる生え際部分でのボリューム感が表現できており、従来よりもリアルさが向上した。また、頭髪の分け目も十分に表現できており、この点においても従来よりも表現レベルは向上している。

現状の問題点では、外力ベクトルなどをすべてテキストエディタで数値入力しなければならないので、使い勝手が悪くまた微妙な形状変更が難しい点がある。多様な髪形を扱えるためのモデリング方法としては、頭髪の曲げ剛性を考慮した本方式は有効であるが、実際に容易に髪形を作り出せるようにするためには、さらに形状操作を対話指示できる方法を開発することが必要である。理想的な頭髪形状の操作方法は、櫛やブラシを使うように頭髪の向きを指示でき、はさみでカットするように頭髪を切断できることである。

ここで本手法の現状での適用可能な範囲について示す。頭髪の長さでは、いわゆるセミロング程度の、肩

程度の長さには伸びた髪までは扱うことができる。現状では楕円体との干渉チェックにより、顔の中に入り込まないような処理はしているが、体との干渉はチェックしていない。そこでロングヘアーの場合には、頭髪が体の内部に入ってしまう問題がある。したがってより長い頭髪を扱えるようにするためには、体との干渉チェックの効率的な方法を開発しなければならない。さらに実際には頭髪同士の干渉も考慮する必要がある、この点も重要な課題である。また本手法で扱える髪の質は、直毛のストレートヘアーに限定されており、縮れやきついウェーブのついたパーマヘアなどは扱えない。これらの髪質を扱うには頭髪モデルのセグメント間のねじれ等を考慮する必要がある、これも今後の検討項目である。以上のように、各種の制限はあるが、本方式によれば従来方法よりもリアルな髪形がモデリングできる。

計算時間については、視点変更がほぼリアルタイムで応答できるので、設定した形状を確認することは非常に容易である。一方、曲げの計算時間については、前述のように 60 秒程度であり、この条件で頭髪設定の操作をするには問題がある。しかし、頭髪の本数を数百本程度に減らして計算すれば数秒程度で応答でき、かつ形状の概略は把握することができる。そこで、プレビューとして頭髪の本数を減らした状態で、曲げ計算を行うようにすれば、十分な速度で応答できる。

5. おわりに

CG によるリアルな人間の表現を可能にするために、頭髪のモデリング方法について検討し、以下のような結論が得られた。

(1) 頭髪の曲げ剛性を考慮した、物理シミュレーションを導入することにより、生え際のボリューム感や分け目の表現など、従来手法にないリアルな頭髪表現が可能となった。

(2) 頭髪を 3 次元のポリラインで定義しているので、データ量を小さくでき、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表示機能を利用すれば、頭髪の高速度レンダリングが可能である。一方、モデリング処理である頭髪の曲げ計算についても、実用上問題のない時間で処理可能である。

ただし、本手法により、現状で扱える髪形は直毛でセミロング程度のものに限定されている。また、形状パラメタを事前に数値入力する必要があり、使い勝手

の上で問題がある。そこで、櫛やブラシで髪を整えるように、対話形式で頭髪形状を操作できるような入力方式の開発が、今後の主要な課題である。

謝辞 本研究の推進にあたり、異方性反射のシェーディング方法および頭部データを提供していただいた(株)日立製作所中央研究所の栗原恒弥研究員、新井清志企画員、ならびに、日頃ご討論いただく同デザイン研究所の高月宏明企画員、および同日立研究所の武内良三主任研究員に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Miller, G. S. P.: The Motion of Snakes and Worms, *SIGGRAPH '88, Comput. Gr.*, Vol. 22, No. 4, pp. 169-178 (1988).
- 2) Kajiya, J. T. and Kay, T. L.: Rendering Fur with Three Dimensional Textures, *SIGGRAPH '89, Comput. Gr.*, Vol. 23, No. 4, pp. 271-280 (1989).
- 3) 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髪の質感表現, 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol. J73, No. 6, pp. 880-886 (1990).
- 4) 渡部保日児, 末永康仁: 三角柱と房のモデルによる頭髪像の生成, 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol. J73, No. 3, pp. 367-373 (1990).
- 5) LeBlanc, A. M., Turner, R. and Thalmann, D.: Rendering Hair Using Pixel Blending and Shadow Buffers, *SIGGRAPH '91 Course Notes C20, ACM SIGGRAPH*, pp. 96-110 (1991).
- 6) 安居院猛, 三輪喜良, 中嶋正之: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 6, pp. 749-755 (1991).
- 7) 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).
- 8) 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, 情報処理学会グラフィックスと CAD シンポジウム論文集, pp. 127-134 (1991).
- 9) 平 修二: 現代材料力学, オーム社 (1970).

(平成3年11月19日受付)

(平成4年2月14日採録)

**宇佐美芳明 (正会員)**

1958年生。1981年慶応義塾大学工学部機械工学科卒業。1983年同大学院修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。以来、同社日立研究所にて、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。

**安生 健一 (正会員)**

1954年生。1982年九州大学大学院理学研究科博士後期課程2年中退。同年(株)日立製作所入社。以来同社日立研究所においてコンピュータ・グラフィックスや数値解析等のソフトウェア研究に従事。1992年2月より同社システム事業部に勤務、現在に至る。