

分枝毛モデルを用いた頭髪画像の生成

中嶋正之 猿田誠一

東京工業大学・工学部・電気電子工学科

近年、CGの分野では様々な材質や物体を取り扱えるようになり、人物の表現も盛んに研究されている。その中で人間の頭髪は、本数が膨大であり、髪の毛一本の太さが非常に細いものであるという特徴があり、しかも人によって髪型が様々に異なり、外力によっても変形しやすいため、CGで頭髪を描く際の大きな問題となっている。

そこで、本研究では、頭髪を表現するのに適した新しい形状モデルである”分枝毛モデル”を提案し、このモデルを用いた頭髪の画像の生成アルゴリズムと作成された頭髪画像の例を示す。分枝毛モデルは、複雑な髪型や運動の表現が可能であり、同時に頭髪全体の扱いやすさと必要な記憶容量の低減を実現するための形状モデルである。

和文キーワード コンピュータグラフィックス、頭髪モデル、アニメーション、レンダリング

Hair Image Generating Algorithm Using Fractional Hair Model

Masayuki NAKAJIMA , Seiich SARUTA

Tokyo Institute of Technology, Faculty of Engineering
4-14-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152 Japan.
Tel 03-3726-1111 ex2183 ,nakajima@ctrl.titech.ac.jp

Computer Graphics technology is rapidly improved and almost all kinds of objects we can see become realistically generated using CG recently. However human hair remains to be one of the difficult object to generate easily using CG technology because the number of hair is enormous and the hair size has very thin figure. Furthermore the style is very different individually and easily changeable by external force.

In this paper, the new hair model named "fractional hair model" is proposed and many human hair CG images using this model are shown.

英文 key words Computer Graphics, hair model, animation, rendering

1. はじめに

近年、コンピュータ、グラフィックス(Computer Graphics, 以下CGと略す)の分野では様々な自然物体から人間や動物までを取り扱うようになってきており精力的に研究がなされ多くの報告がある。^{(1), (2), (3)} そこで、本研究では、人間の頭髪画像のCGによるリアリティある生成アルゴリズムの提案を行っている。

人間の頭髪は、目・鼻・口などとともに容貌を決定する重要な要素である。CGで人物を表現する際には見る側が自然な印象を受けるようにするために、頭髪部分のあるリアルな顔画像を生成することが必要である。従来、以下に述べる様な頭髪画像の生成に関する多くのアルゴリズムが提案されている⁽³⁾。代表的な方式は、2次元テクスチャマッピングを利用する方法であり、先に髪型を決定するための曲面または平面パッチの集合を定義しておき、その表面にカメラなどから入力した頭髪画像のテクスチャを付する方法である。この手法は、特定の方向から見た髪の毛の映像を簡単に生成するのには適している。しかし、この方法を用いた場合には光源や視点が変化しても髪の毛の模様はほとんど変化せず現実感に乏しいという欠点がある。この問題を解決するために、山名ら³⁾と東條ら⁴⁾は頭髪を頭部形状の表面についた傷や凹凸であると見なして、異方性反射モデルとパンプマッピングを利用する方法を提案した。これらの手法は、あらかじめ定義された髪型曲面の上に、視点、光源、および異方性反射テーブルから計算される頭髪のテクスチャをマッピングするものであり、直毛の場合にはある程度実際の頭髪に似た画像を生成することができる。しかし、ウェーブのかかった髪の毛の画像を生成するための異方性反射テーブルを作成することは容易ではない。また、頭髪を一物体として扱っているため、一本一本の運動を表現することは非常に難しくなるという欠点がある。一方Kajiyaraらは、"texel"と呼ばれる3次元テクスチャを考案し、熊のぬいぐるみの画像を生成した⁵⁾。texelとは、空間の任意の点における密度、表面構造光学モデルのパラメータを記憶する表現の基本要素である。しかし現時点では、毛皮をモデリングしただけであり、長い毛は扱っていない。人間の頭髪に応用するためには、実際の3次元形状からtexelを自動的に生成する方法を考える必要があり、また頭髪の動きを表現することは難しいという欠点があった。

近年、計算機の性能が向上してきたことによって、頭髪を1本1本別の物体として扱うことが比較的容易になり、以下に述べる様な手法がいくつか提案されている。渡部らは、1本の髪の毛を短い三角柱の連結であるとし、それらを何本かまとめた"房"を単位として効率的に頭髪を表現した⁶⁾。三角柱と房によるモデリングは、房の数や房の中に含まれる頭髪の本数、頭髪の太さ、長さなどのわずかなパラメータを制御することによって様々な頭髪の画像を生成することが可能である。また、房の制御によって、アニメーションが表現できる。しかし髪の毛の動きは房の制御によって表現できるが、これは、同じ房を用いた部分では、それぞれの房がほとんど同一形態であることを仮定しているので、同じ動きしか表現できないため複雑な動きの表現は難しいという欠点がある。

また平面パッチを用いずに、1本の髪の毛を単純に表現する方法として線分の連結とする方法がある^{7), 8)}。しかし実際の頭髪の平均本数が約10万本であることを考えると、プリミティブの数は膨大になるという欠点がある。

また、髪の毛の動きを表現するときは、力学的な方程式を解く方法⁷⁾と、確率的なモデルを用いる方法⁸⁾が、提案されている。

以上、今まで多くの頭髪モデルが提案されてきたが、一長一短があり、極めて複雑な髪型やリアルな運動の表現を行うためには、充分満足されるものはないと考えられる。そこで本報告では、頭髪を表現するに適した新しい形態モデルである"分枝毛"を提案し、このモデルを用いた頭髪画像の生成アルゴリズムと作成された頭髪画像の例を示す。

分枝毛モデルでは毛を束にしたもの扱い、頭髪全体は毛の束の集合として扱われる。これによつて頭髪全体を扱いややすくし、必要な記憶容量を少なくしている。

毛の束は、1本の基準毛と多くの分枝毛から構成される。基準毛は、束の位置と、束に含まれる毛の平均的な形を表す1本の毛であり、空間における自由曲線を表現する。自由曲線である基準毛は、複雑な髪型や運動の表現が可能である。

一方、分枝毛は、基準毛の回りに存在する毛であり基準毛に操作を加えて生成される。基準毛と分枝毛の外観上の区別はない。分枝毛1本ずつの属性ではなく、束としての属性をもつ。分枝毛を生成するための束の属性として、毛の本数、束の太さ、束の乱雑度などがある。束の属性を調節すること

によって複雑な運動を表現することが可能である。

2. 分枝毛モデルを用いた頭髪形状モデリング

本章では、頭髪の表現に適した新しい形状モデルである”分枝毛モデル”を提案する。分枝毛モデルは、複雑な髪型や運動の表現が可能であり、同時に頭髪全体の扱いやすさと必要な記憶容量の低減を実現するための形状モデルである。

2. 1 分枝毛モデルについて

物体の形状モデルとレンダリングの手法とは密接な関係がある。例えば、サーフェスモデルはZバッファ法やスキアンライン法などでレンダリングするのに適した形状であり、ソリッドモデルはレイトレーシング法でレンダリングするのに適している。本研究では新しい形状モデルを提案し、領域アンチエイリアシング手法を用いてレンダリングを行う。

1人の人間の頭髪の本数は、通常5万から10万本であると言われている。このことは、髪の毛を1本1本ずつモデリングする際に、データを保持しておくために必要な記憶容量が膨大になる原因となる。CGに適した髪の毛の形状モデルには、次の3点が必要であると考えられる。

1. 表現力

髪の毛の形は、人によって様々に異なり、風などの外力によって変形しやすい。髪の毛の複雑な形状や、運動の表現が可能であること。

2. 制御しやすさ

形状は複雑であるが、そのための制御は単純でモデリングが容易であること。

3. 実現の容易性

髪の毛の本数は非常に多いので、計算時間が長く記憶容量が膨大になる可能性がある。頭髪を表現するための計算量、記憶容量がより少ない方が実現性が高い。

これらは、互いに矛盾することであると考えられるが両立させることを目指す。

そこで本研究では、髪の毛を表現するための新しい形状モデルである”分枝毛”を提案する。分枝毛モデルは、毛を束にすることによって頭髪全体を扱いやすくし、必要な記憶容量を少なくするという特徴がある。また、束の属性を調節することによって複雑な運動を表現することが可能である。

もしも髪の毛1本1本が互いに全く制約を受けなければ、それぞれの髪の毛は、ランダムな方向に生えるはずである。しかし、実際には重力や隣り合う髪の毛の影響によってかなり規則的に生えており、部分的に平行な箇所も多い。その上、くしや整髪料といった人工的な要素が、一層髪の毛を規則的な方向に生えるように作用している。従って、この規則的な髪の毛を束にして髪の毛を効率的に表現することが可能である。

2. 1. 1 基準毛について

基準毛は、束の位置と、束に含まれる毛の平均的な形を表す1本の毛である。また、空間における自由曲線を表現するために、糸状モデルを用いる。そのため自由曲線である基準毛は、複雑な髪型や運動の表現が可能となる。

基準毛は、1つの束に1本だけ存在するものとする。そして、その形を正確にモデリングする。

2. 1. 2 分枝毛について

分枝毛は、基準毛の回りに存在する毛であり、基準毛に操作を加えて生成される。基準毛と分枝毛の外観上の区別はない。分枝毛1本ずつの属性はなく、束としての属性を持つ。分枝毛を生成するための束の属性として、毛の本数、束の太さ、束の乱雑度などがある。

分枝毛の形は基準毛の形と同じであるという仮定をすることによって、束のデータ量を著しく減少させることができある。例えば、100本の髪の毛を含む1つの束を表現するときに必要な情報は、1本の基準毛を表すデータと、分枝毛を生成するための数個のパラメータだけである。これらを合わせても髪の毛2本分の情報量より少なくて済む。つまり、1本ずつモデリングする方法と比べて、データ量は1/50以下に削減される。分枝毛の他の生成方法も考えられる。つまり、分枝毛を基準毛のコピーではなく、形が異なるものとする考え方である。この場合でも、効率的にモデリングするために、形の違いが小さい毛を束にして、その違いだけを記憶する。

2. 2 基準毛のモデリング

本来、基準毛は空間における自由曲線である。本研究では、線分列によるモデリングを用いる。それは、空間曲線によるモデリングは特徴点の決定が難しく三角柱によるモデリングは複雑な髪型や動きの表現に

はあまり向いていないと考えたからである。これに対して線分列によるモデリングは、単純な手法であり、表現力にも優れていると考えたからである。

基準毛1本を表現した画像を、図1(a)に示す。これは20個の点を結び、19本の線分の連結によって1本の髪の毛を表現している。

2.3 分枝毛の生成方法

分枝毛は、束の毛の本数だけ基準毛から生成される。本報告では、基準毛をスクリーン座標系で回転、平行移動することによって、分枝毛を生成する。このとき分枝毛の形は基準毛の形と全く同じ形状となる。これは束の表現力の制限となるが、現時点では重要な問題にはならない。なぜなら、100本程度またはそれ以下の本数の髪の毛の束は、頭髪上での位置が近く、髪の毛の形もほとんど同じ形とみなせるからである。また、実際の髪型をモデリングする際に、形の大きく違う毛は別の束に含まれるように調整する。分枝毛を生成するための束の属性は、次に挙げる4種類とする。

1. 毛の本数

束に含まれる分枝毛の本数であり、これに基準毛の1本を加えると束に含まれる髪の毛全本数となる。

2. 束の太さ

基準毛のどの程度周りに、分枝毛が存在しているかを表す。実際には毛根部分での広がり具合である。

3. 乱雑度

束に含まれる髪の毛が、どの程度同じ方向を向いているかを表す。乱雑度が小さいときは、基準毛と分枝毛はほとんど同じ方向を向く。

4. 頭皮の向き

スクリーン座標系で平行移動するため、視点から見た束の向きを計算する。そのため、髪の毛が生えている皮膚の向きを表す。

回転角と平行移動量は、それぞれ独立な正規乱数で決定する。回転角の上限は束の乱雑度に依存し、平行移動量の上限は束の

太さと頭皮の向きに依存する。

図1.(a)の基準毛を用いて分枝毛10本を生成し、基準毛とともに表現した画像を、図(b). (c). (d)に示す。

(b)は、基準毛をスクリーン座標系で回転することによって、分枝毛を生成した画像である。同様に、(c)は横方向に平行移動した

ものであり、(d)は、縦方向に平行移動したものである。さらに、(e)は、回転と平行移動を組み合せて、分枝毛を生成した。

(f)は、(e)と同様の方法によって、分枝毛100本を生成した場合の画像である。

2.4 従来のモデリング手法との比較

先に図1(f)では、基準毛1本と分枝毛100本から成る髪の毛の束を示した。この髪の毛101本の束を表現するために必要なデータ量を、従来のモデリング手法である線分列によって1本ずつモデリングする手法と比較する。

1. 従来のモデリング手法

図1(f)に示した髪の毛と同様に、20個の点を結び、19本の線分の連結で1本の髪の毛を表現する場合を考える。

点の表現(3次元座標)3(個)

1本の表現(20点の座標) $3 \times 20 = 60$

101本の表現 $60 \times 101 = 6060$

つまり、6060個のデータが必要である。

2. 本手法

基準毛1本を表現するためのデータ量は従来の手法と同じ量である。束の属性のうち、毛の本数、束の太さ、乱雑度はスカラーレ値であり、頭皮の向きはベクトル値である。束を表現するための全データは、これらの合計である。

基準毛1本 60, 毛の本数 1, 束の太さ 1, 乱雑度 1, 頭皮の向き 3, つまり合計66個のデータが必要である。

以上の結果より、本手法は、従来手法の約1/99データ量で、髪の毛の束を表現することが可能である。

3. 頭髪の表現

本章では、分枝毛モデルを頭髪全体に適用し、頭髪の画像を生成するアルゴリズム、また、より現実感を増すために必要な、髪の毛の反射モデルとエリアシングの除去について述べる。

より現実感がある画像を生成するためには、物体に陰影を付けることが必要である。

光源から出た光が物体に当たり目に届くまでの光は、環境光、拡散反射光、鏡面反射光、透過屈折光の4種類に分類される。

これらの光を計算するためのモデルや式は反射モデルと呼ばれ、反射モデルの決め方によって物体の質感が表現される。本研究では、次のような反射モデルを用いて、

髪の毛の輝度を求める。

基準毛を構成している線分は面を持たないので、レンダリングの際には、頭髪セグメントの代りに細い円柱があるものとして、反射モデルを用いる。頭髪1本1本は非常に細く、見かけの太さはスクリーン上の1画素以下であると考え、円柱を一周する領域の輝度を求める。また、髪の毛の場合、

“つや”という質感を表現するために、鏡面反射が特に重要であると考えられる。そこで環境光は一定値とし、拡散反射光と透過屈折光はないものとする。鏡面反射光は鏡面反射モデルの1つであるBlinnの反射モデル^{(9), (10)}を簡略化して、鏡面反射強度は次式に示すDに比例するものとする。

$$D = \cos^n \alpha \quad (1)$$

ここで、nは鏡面反射の広がりを調節する係数で、表面の光沢度が高いほど大きな値になる。Blinnの反射モデルを利用するためには、頭髪上の法線ベクトルnを求める。毛の任意の点における方法ベクトルをt、視点ベクトルをv、光源ベクトルを1とする。vと1を2等分するベクトルをhとし、次にtに垂直な平面にhを正射影をしたベクトルを法線ベクトルnとする。これらのベクトルを図2示す。そして、求められたnとhを用いてシーディングを施す。楕円体の頭部の上に、基準毛1722本をシーディングしたもののが図3に示す。

図3と同じ頭髪を、領域アンチエイリアンシングを用いたレンダリング法で表現したもののが図4に示す。図3と図4との見た目の違いは明らかであり、エリアシングが低減していることが分かる。基準毛だけの頭髪は、本数が非常に少ないので、髪の毛が薄く見えることが分かる。

4. 頭髪CG画像生成実験結果

分枝毛の色は、基準毛のシーディング結果をそのまま利用する。つまり、分枝毛と基準毛は、形と色が全く同じ髪の毛として扱う。基準毛と分枝毛にシーディング

を施して生成した画像を、図5に示す。解像度は512x512画素であり、エリアシングの除去を行っている。

図3と同じ基準毛を用いて、基準毛と分枝毛と合わせて76,619本の髪の毛を表現した。つまり、毛の束が1722本あり、1つの束には平均44本の毛が含まれている。

図5の頭髪画像は、”天使の輪”と呼ばれる頭髪の輝きが表現され、髪の毛らしい質感が表現されていることが分かる。

分枝毛モデルの表現力を示すために、束

の属性を変えていくつかの頭髪画像の生成を試みる。図6は、束の乱雑度を大きくした場合である。束の乱雑度以外の属性値は、図5と同じ値となっている。

また、風に吹かれたときなどの、頭髪のアニメーションを作成するときにも、分枝毛モデルは極めて有効であると考えられる。まず、基準毛は外力によって変形する。外力の大きさや向きは、基準毛の位置によって異なる場合が考えられる。その場合、頭髪を構成するそれぞれの束は独立であるため、基準毛ごとに変形する度合いを制御することが可能である。基準毛の変形と同時に毛の束の乱れ具合を変化させる。このことによって、分枝毛も変化することができ、容易にアニメーションを作成することが可能である。図3と図5の頭髪が画面左側からの風を受けた場合を考え、アニメーションを作成した画像を、図7, 8, 9に示す。それぞれの図で、(a)は第10フレーム、(b)は第20フレームの画像である。図8, 9だけは、エリアシングの除去を行っている。図7は、図3の基準毛を一定方向の外力によって変形したものである。

図8は、図7の基準毛から分枝毛を生成したものであり、束の属性値は図5と同じ値である。図9は、基準毛の変形に従って束の乱雑度が大きくなるように変化させた場合であり、束の乱雑度以外の属性値は図8と同じ値である。

5. おわりに

本報告では、複雑な髪型や運動の表現が要求される頭髪を扱いやすくするために、頭髪を表現するのに適した新しい形状モデルである”分枝毛モデル”を提案し、このモデルを用いた頭髪画像の生成アルゴリズムと作成された頭髪画像の例を示した。

本研究で提案した分枝毛モデルは、複雑な髪型や運動の表現が可能であり、同時に頭髪全体の扱いやすさと必要な記憶容量の低減を実現するという特徴を持った形状モデルである。ここでは、頭髪上の規則的な髪の毛を束にして、頭髪全体を毛の束の集合として扱い、それぞれの毛の束を、1本の基準毛と多くの分枝毛から構成する。また、頭髪を構成する毛の束1つ1つを、それぞれ独立にモデリングする。分枝毛モデルは、毛を束にすることによって頭髪全体を扱いやすくし、必要な記憶容量を少なくするという特徴がある。また、束の属性を調節することによって複雑な運動を表現することが可能である。CGに適する髪の毛

のモデルには、表現力、制御しやすさ、実現の容易性が必要であると考えられその方式として今回提案した分枝毛モデルを利用する方法が極めて有効であると考えられる。

文献

- (1). 中嶋正之：C G による自然物体の生成に関する研究動向，情報処理学会グラフィックスと C A D 研究会，90-CG-46-1. (1990)
- (2). 中嶋正之：同上（第2報） 91-CG-52-1. (1991)
- (3). 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)
- (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”，信学技法，IE89-34, PP. 57-64(1989)
- (5). J. T. Kajiya, T. L. Kay: "Rendering Fur with Three Dimensional Textures" SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 23. No. 3, pp. 271-280(1989)
- (6). 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”，信学論，Vol. J73-D-II, No. 3, pp. 367-373 (1990)
- (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”，情報処理学会「グラフィックスと C A D」シンポジウム論文集，Vol. 91, No. 7, pp. 127-134 (1991).
- (8) 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”，情処学論，Vol. 32. No. 6, pp. 749-755(1991).
- (9). J. F. Blinn: "Models of Light Reflect ion for Computer Synthesized Pictures", SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 11, No. 3, pp. 192-198(1977).
- (10). 田中伸治：“ショーディング。モデルで材質感を表現”，日経CG, No. 27, pp. 166-171(1988)
- (11). 安居院猛，三輪喜良，中嶋正之“領域アンチエイリアジングを用いた頭髪表現”，信学春季全大，D-609(1990)

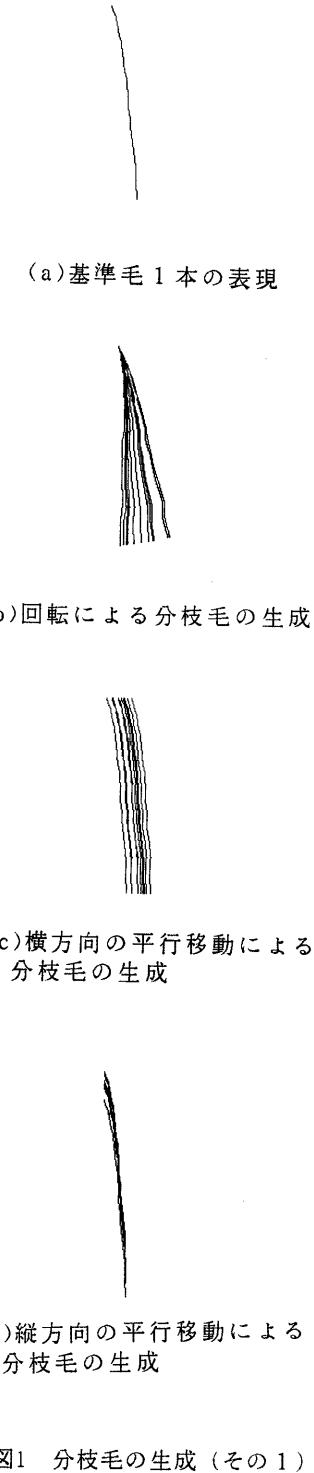
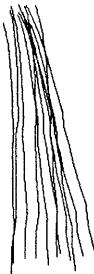


図1 分枝毛の生成（その1）



(e) 回転と平行移動による
分枝毛の生成



(f) 分枝毛 100 本を生成した
束の表現

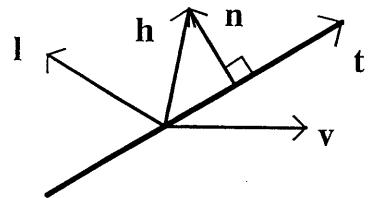


図2 法線ベクトルの決定

図1 分枝毛の生成（その2）



図3 基準毛だけの頭髪

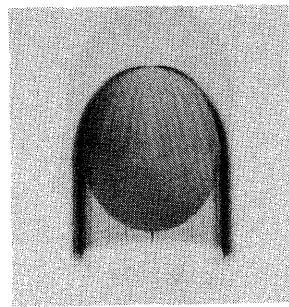


図4 エリアシングを除去した
基準毛だけの頭髪

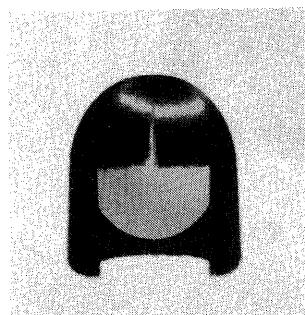


図5 基準毛と分枝毛を表現した頭髪

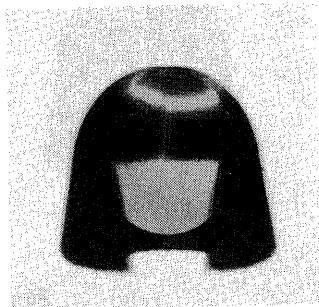
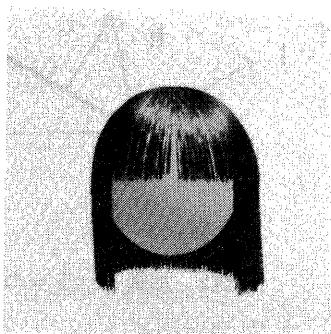
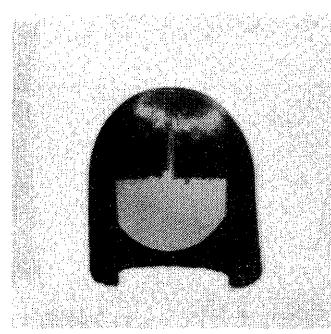


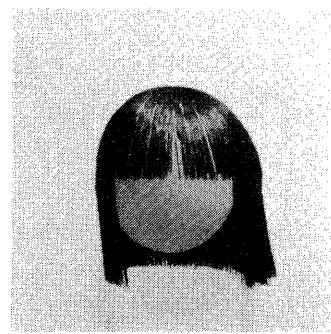
図6 束の乱雑度が大きい頭髪



(a) 第107フレーム

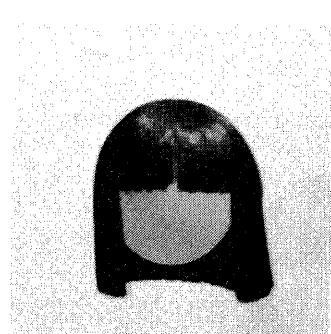


(a) 第107フレーム



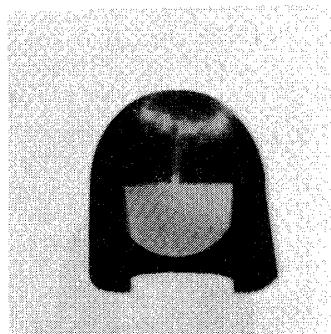
(b) 第207フレーム

図7 基準毛だけの頭髪アニメーション

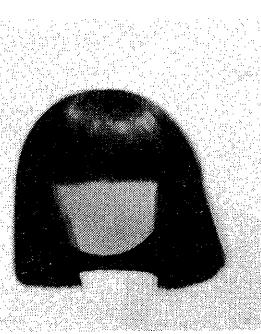


(b) 第207フレーム

図8 頭髪アニメーション



(a) 第107フレーム



(b) 第207フレーム

図9 束の乱雑度が大きい頭髪の
アニメーション