

髪モデルについての考察*

4P-4

月岡 健人 國井 利泰†

東京大学理学部‡

1 はじめに

コンピューターによる人間のイメージの生成が近年盛んに行なわれているが、中でも髪イメージのできればは、人間、とくに頭部のイメージの現実感を大きく左右する要素といえる。しかし、現実感ある髪の描画は、10万本もの毛からなる髪の複雑な構造や、反射に遠方性があるなどの理由から、容易ではない。

現在とられている方法としては、髪の毛一本一本の形状を適当にパラメーターで指定し、非常に多くの髪の毛を一本一本描くことで全体の形状と質感を表現するもの [1] と、異方性反射のモデルを持ちいたテクスチャマッピングを応用するもの [2] があるが、前者ではうまくパラメーターを与えるのが難しく、後者では全体の形状を与えるのが難しい、などの問題点がある。また、人間のアニメーションを現実感あふれるものにするためには、各部の動きを現実感あるものにする必要があるが、髪の毛の場合、頭部やからだの動きによって形状が大きく変わる場合があり、これにはどちらの方法でも対応できない。

そこで、ここでは、髪の毛の物理的性質に基づいたモデル化を提案する。髪は一本ずつ見れば弾性体と考えられ、これをモデル化することで、髪の毛の形を多くのパラメーターで記述する必要がなくなり、また頭部の動きにつれての形の変化なども容易に扱えるようになる。また、髪の構造を考慮した、従来方法より容易に髪の形状や質感を生成することのできる髪全体のモデルについての考察を行なう。これは、実際の髪は、毛のある程度まとまったもの(束)を単位として振舞うという仮定に基づいている。

2 物理的な髪の毛のモデル

髪の毛は断面積が非常に小さく長さが非常に長い弾性体であり、ほとんど曲線と考えることができる。空間曲線は、一変数のパラメーター表示にたいして、曲率、振率とを与えれば決まるので、髪の毛の形状はこれで記述することにする。

弾性体の振舞いを調べるには、弾性体のポテンシャルエネルギー(歪みエネルギー+外力の位置エネルギー)を極小化して安定状態を求める方法がよく使われるが、外力が複雑な場合は弾性体の満たす運動方程式 [3] を解かなければならない。髪の毛の場合は弾性を持った曲線としてこの運動方程式を解けばよいのだが、この運動方程式がかなり複雑で数値解を求めるのにも時間がかかるうえ、この場合、髪に働いている外力を完全に正確に知ることはできないので、方程式を正確に解くことにはそれほど意味がなく、おおよその振舞いを知ることができれば十分であると思われる。そこで、髪の毛の形の曲線を折れ線で近似し、折れ線の各節点に等しい質量の質点があり、折れ線を構成する線分は、Hookの法則を満たす弾性体だと考えて、質点とバネで髪の毛の振舞いを模倣することにする。伸びに対する弾性以外に曲げに対する弾性を表現するため、節点 P_i には、線分 $P_{i-1}P_i$ のはじめのひずみ方向からのずれを戻すような弾性力がかかるようにする。また、このように全体をバネで近似したシミュレーションでは振動が

いつまでも消えないので、形のひずみを戻すようなバネは減衰振動をさせるようにする。こうしてもとまった節点の列をスプライン補間して、髪の形状を求める。これらのバネの強さは、実際に髪の毛のヤング率や曲げに対する剛性の値が測定されている [4] ので、これらの実測値にあった動きをするように調整する。

このモデルでは、一本の髪の毛の外力がある場合の運動を求めるのは、単に節点にかかる力を求め、その運動を計算すればよいだけなので比較的簡単にできる。また、髪の毛が皮膚にめりこんでは困るので、制約条件を破らないように形を求めることが必要であるが、このモデルでは節点に制約条件を侵さないような余分な力を与えられるだけで済む。髪の毛同士の干渉や摩擦の効果も、外力の形を工夫することで、可能になると考えられる。

これまででは、主として髪の形状について述べてきたが、弾性を決める値の他にも、髪には、形や色、光に対する反射率などの様々な属性があり、これらはよく研究、測定されている [4] ので、髪の毛を描くのに必要なパラメーターの多くを得ることができる。これらのパラメーターは、髪の毛のあれ具合や気温、湿度によってかなり左右されるので、これらの要因の変化により髪の毛の振舞いがどのように違うかシミュレートしてみることもできる。

3 髪モデル

上のよう弾性体でモデル化することで、髪の形状の記述は、人間が多くのパラメーターを与えて定義する方法より容易になると思われるが、記述量が膨大になる可能性は依然として変わっていない。局所的にみれば、髪は非常に多く(10万本程度)の髪の毛の集まりであり、さらに一本一本の形がそれほど単純でないという、複雑な構造を持っている。また、髪の毛の反射特性は等方でなく、軸方向からはなれた方向ほどよく光を反射する。こういった髪の性質は、現在のコンピューターグラフィックスの手法を相当適用しづらくしているため、髪の記述になんらかの工夫が必要とされる。

さて、遠くからみた場合、実際の髪はたくさん筋がついた面の集まりと、所々に房がついている物体のように見える。そこで、髪の毛を一本一本ではなくある程度まとめて扱うことを考える。髪を観察してみると、

- 局所的に見ると、髪の毛はかなり平行に伸びている。広い範囲に渡ってこのようになっている場合も多い。
- そのような髪の毛のながれを追っていくと、髪の毛の根元での向きも、頭皮のある領域ではほぼ平行になっている。

ことがわかる。つまり、ある頭皮領域からほぼ似た向きに生えている髪の毛の集合が一つの流れを形成し、その集合内では髪の毛の形がほぼ連続的に変化しているような場合がよく見られる。そこで、その集合内では髪の毛の形が連続的に変化するとみなせるような髪の毛の集合を、束と名付ける。自然の力は、大抵場所に関して連続的に働くので、このような場合には束は一つの物体であるかのように振舞う。しかし、人為的な力が加わる場合(例えば髪をかきあげたりするとき)や、制約条件による力が加わる場合(例えば、髪が肩にかかったりするよ

* A study about a model of human hair

† Taketo Tsukioka, Tosiya L. Kuni

‡ The University of Tokyo

うなとき)には、束に働く力はもはや連続的でなく、束を分割しなければ束の条件が満たせないような場合も生じうる。逆に、櫛でとがした場合のように、一様な髪の流れが作られて束が大きくなる場合もある。このように、束は様々な原因で分割されたり合併したりしており、髪は、このような束の集合の状態によって記述されると考えることができる。また、これまで作用とってきたのは外部からの作用を指していたが、髪の内部に働く力(髪同士の摩擦など)は、束集合の状態の安定性を左右すると考えられる重要な要素である。とくに大きな要因は各個人の頭における自然な髪の生え方で、この状態が髪の初期の状態であり、最初の束集合を与えるため、この状態からのずれが、髪型の崩れやすさに大きな影響を及ぼすと考えられる。

束の内部では、髪の毛は似た向き、性質、形を持っているので、これらの性質を平均値で代表させ、束を特徴づけるパラメーターとすることができる。これらの少数のパラメーターにより束が記述されるため、髪のこのようなモデル化では、パラメーターによる記述は大幅に少なくなる。

4 束のモデル

この章では、束の状態(形状や運動)や、分割、合併の可能性を、どのように与えられたパラメーターから求めるかを考える。与えられるパラメーターには、

- 束の根元の領域 D
- D での、髪の生えている平均的な向き v
- 束に含まれる髪の平均的な形(外力のない時)、長さ、性質
- 束に含まれる髪の密度

などがある。束の定義からの重要な性質として、束の内部では、髪の毛は与えられた平均的なパラメーターにごく近い向き、性質などを持っているとする。

ここで、扱いを容易にするため、束をさらに階層化する。髪の内部には髪同士の摩擦、重なった髪の重みによる圧迫やその反発などの力が働いているにもかかわらず水平方向にはスライドしやすいことから、髪は層状構造になっていると思われる。そこで、基本的な束として D として頭皮のある曲線であるものをとりあげる。

とりえず束の内力は考慮せずに、外力も連続的であると仮定して、髪の毛の物理的モデルを使ってこの束の形を求めることを考える。この場合、束は曲面に近い形になると期待できる。形を計算するには、束の性質から、 D の両端点とその中間の幾点かで計算した、髪の毛の形を計算し、各髪の毛の終点をつなげて曲線補間した曲線、両端点での髪の毛の曲線と D から、一つの曲面を得ることができる。各点での髪の毛の形状の計算には、パラメーターとして与えられたものにランダムに少しのずれを加えたものを用いる。この束の運動も、同様な補間で求めることができる。

次に、 D が領域の場合に拡張する。その際、領域を曲線の集まりで近似し、各曲線について束の形状を求め、その積み重ねとして全体の形を決めることにする。このとき、束同士の相互干渉をどう扱うかが問題であるが、ここをどのようにモデル化するかは今後の課題である。髪の毛の摩擦が十分少なく、束がそれほど大きいものでなければ、束の内部の髪の形の連続性から、そのまま重ねた形が全体のかたちとなる。

これまでは束全域で類似の外力が働くことと仮定したが、制約条件などの影響で束の各部に大きく異なる外力が働いた場合は、束を分割しなければならない。これは、束の形状を求める時、計算された髪の形が一種類に分類できない、あるいは補間して作った形状が制約条件をしている(例えば皮膚と交わってしまう)等の場合が生じるかをチェックすることである程度発見できると考えられる。

5 今後の課題

髪のモデルについての考察を行なったが、髪の毛の間の摩擦など髪の内部に働く力をどのようにモデル化するかは難しい問題であると思われる。また、束については、その密度が十分大きい場合について考えているので、ぼつれ毛や禿げ頭に近い場合など髪の本数が少ない場合はこれではうまく表現できない。

また、このモデルを使って実際に髪を描く場合の方法についても、一層の考察が必要がある。異方向性反射を用いたテクスチャマッピングを束を描くのに応用してもよいが、髪の向うに景色が透けて見えるといった効果を出すのは難しいと思われる。このモデルで生成されたイメージがどの程度実物に似ているを評価する方法についても検討を行っている。

6 結び

髪の毛の変形を、人為的なパラメーターで与えるのではなく、髪の毛の弾性体としての性質を考慮したモデルに基づいた計算により与えた。さらに、髪の性質を考えることで、束を単位とした髪のモデルについて考察した。

参考文献

- [1] Watanabe, Y., and Y. Suenaga, "Drawing Human Hair using Wisp model," *Proceedings of CG International '89*, pp. 691-700.
- [2] 山名, 末長, 「異方向性反射モデルを用いた頭髪表現」, 電子情報通信学会, PRU 87-3
- [3] Terzopolous, D., J. Barr, and K. Fleischer, "Elastically defoemable models," *Computer Graphics*, 21, 4, 1087, pp. 205-214.
- [4] Robbins, R. C., *Chemical and Physical Behavior of Human Hair* (2nd ed), Springer-Verlag.
- [5] Kajiya, J. T., and T. L. Kay, "RENDERING FUR WITH TREE DIMENSIONAL TEXTURES," *Computer Graphics*, 23, 3(1989), pp. 271-280.