

写真画像入力による頭髪の3次元モデリング

水野友晶[†] 金子豊久[†] 栗山 繁[†]

[†]豊橋技術科学大学 情報工学系

人物の頭髪に関するCGは数多く研究されている。頭髪の形状や毛髪の流れ等をデザイナーが各種パラメータを制御することにより生成するものが多い。本研究では複数の角度から撮影した人物の頭部写真画像とハンドヘルドスキャナにより取得した頭髪の形状データを使用して、内部を含めて実物に近い頭髪の形状・流れを自動生成する方法を提案する。提案方法によりマネキンの頭部を用いて女性の髪の毛の生成を行った。実物に類似した結果が得られ、本方法の有効性を確認した。

3D Hair Modeling from Photographs.

TOMOAKI MIZUNO[†], TOYOHISA KANEKO[†] and SHIGERU KURIYAMA[†]

[†] Department of Information and Computer Science, Toyohashi University of Technology

The topic of human hair modeling has been investigated in the CG community. Majorities are such that hair is made with adjusting some parameters manually set by a designer who sees the hair style of interest. This paper aims at reconstructing a 3D hair model based upon five high resolution photographs (top, front, sides, back), where hair is modeled piece by piece and distributed inside the measured hair region. This method was applied to mannequin hair. A good result was obtained.

1. はじめに

近年、コンピュータの発達によってCGが容易に扱えるようになり、多くの場面で利用されるようになってきた。人物のCGは重要であり、特に顔は人物の意志や感情などの情報を多く反映するため、大きな役割を果たしている。

CGで人物を表現する場合、頭髪はその人物を特徴付ける上で重要な要素である。しかし、頭髪の本数は多く形状も複雑なため、髪形状の上にテクスチャマッピングで代用されることが多い[1]~[3]。この方法は頭髪を1つの物体として扱うため、髪が風になびくなどの応用には適用できない。一方テクスチャを使わず毛髪1本1本を表現する方法も研究が行われている[4]~[6]。この方法は物理的なシミュレーションにより毛髪の運動をアニメーション表現したり、髪型の微妙なニュアンスを3次元的に構築することができる。また、頭髪の形状や毛髪の流れなどをデザイナーが目視により観察しながら各種パラメータを制御して生成する方法も提案されている[7],[8]。これらの方法は、通常デザイナーの高いスキ

ルを必要とする。Mingら[10]は、複数の写真画像を用いて頭髪領域を推定し、頭髪をその領域内に納める方法を提案してしているが、髪の方角には留意していない。Grabliら[9]は、画像から毛髪のモデルを得るといふ本論文の趣旨と類似しているが、表面の毛髪の方角を検出して、光源の方角に合わせて髪の毛の反射をセットするレンダリングに重点を置いている。

医療分野、特に顔部の手術シミュレーションへの応用において頭髪モデルを考えた論文[11]~[13]では、頭髪の形状をカメラ画像から求めて、テクスチャマッピングを行う方法をとっている。

本研究は手入力ではなく、人物の頭部写真を複数枚用いて実物の頭髪の形状と毛髪の流れ、頭髪内部の構造をなるべく自動的に再現する方法を提案する。

本論文では髪全体を考える場合には"頭髪"、髪の毛1本1本を考える場合には"毛髪"と表記する。

2. 方法の概要

写真画像を用いて、頭髪の3次元モデルを作成する方法の概要は以下の通りである。

- 1) 頭髪の形状が得られるよう結び目のついた糸を頭髪に沿わせ、ハンドヘルド(手動)のレーザースキャナ(Polhemus 社製、以下 3D スキャナ)を用いて頭髪と顔部の 3 次元形状を測定する。また、ペンシル型スタイラスを用いて髪を除いた頭皮の 3 次元形状の測定および毛髪の出発点となる毛穴の領域指定する。
- 2) 3D スキャナで取得された形状データより頭部モデルと頭髪形状モデルを作成する。
- 3) 顔の前部、左右側面、後部、および上部の計 5 画面の写真を撮る。毛髪 1 本が識別できるように解像度の高い(500 万画素)カメラを用い被写体から約 13 メートル離し画面いっぱい撮る。
- 4) 3D スキャナで形状を測定した糸の結び目や、目・鼻・口などをランドマークとして用いて、形状モデルとの位置合わせを行う。
- 5) 5 枚の写真から、エッジ検出、二値化、細線化などの画像処理により毛髪を 1 本ずつ抽出し、頭髪表面における髪の流れを推定する。
- 6) ほぼ等しい密度で毛穴を生成する。上部写真において手動で指定した髪の分け目線からの距離を用いて毛穴を複数の層に分け、番号を付ける。
- 7) 毛穴から頭部表面の法線方向に髪の毛 1 本ずつ発生させる。このとき番号順に行い、若い順の毛はより外側に置く。髪の上と領域専有状態を指定するためにボクセルを用いる。髪の毛の分布がなるべく一様になるようにボクセルのサイズと毛穴の層数を髪の毛の密度に対応するように決める。

3. 頭部の形状測定と形状モデルの作成

本提案方法は実際の頭髪形状に沿うように頭髪を生成する。頭髪形状の測定には 3D スキャナを使用する。このスキャナはレーザーを使用しているため、頭髪のような黒く細いものを測定することができない。そこで頭髪に白い糸に沿わせ、その形状を測定することにより頭髪の形状を得る。

またこの 3D スキャナにはスタイラスが付属しており、これぞでなぞることにより頭皮部分の形状を得る。また毛穴が存在する範囲もなぞっておく。測定の様子を図 1 に示す。

次に、測定された形状データより頭髪形状モデルと頭部モデルを生成する方法について説明する。まず形状データの高さ方向の断面を取得する。各断面には顔と糸もしくはスタイラス軌跡の断面頂点が存在する。次に顔断面の端と糸などの断面間をスプライン補完する。すべての断面で補完を行った後、すべての頂点の間にポリゴンを生成することにより、3D 頭髪モデルを得る。このようにして得られた頭髪形状モデルと頭部モデルを図 2 に示す。



図 1 測定の様子

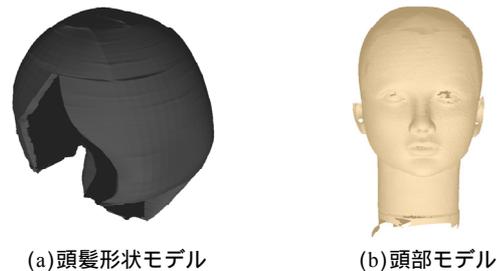


図 2 形状モデル

4. 写真画像による流れ方向の推定

本研究では、デジタルカメラを使用して対象の全周囲 360° を 90° 間隔で撮影した 4 枚と、頭部上方より撮影した 1 枚の計 5 枚の写真を使用する。本研究で撮影された画像のサイズは 2592 × 1944 Pixel である。

4.1 毛髪の抽出

写真を用いて髪の流れる方向を推定する。人の頭髪画像を拡大したものを図 3 に示す。



図 3 毛髪の拡大図

毛髪を抽出するには以下の処理を行う。

微分

微分には以下の Prewitt のエッジ検出オペレータを使用する。

$$h_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad h_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、横方向のフィルタ出力を f_x 、縦方向のフィ

ルタ出力を f_y とすると，画素 (i,j) における輝度値 $I(i,j)$ は

$$I(i,j) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (2)$$

となる．エッジは毛髪の一側に検出される．一方のエッジだけ検出するため，次の条件を設定し，それを満たすときのみ輝度値を設定し，それ以外は 0 とする．

- 1) $f_x > 0, f_y > 0$
- 2) $f_x > 0, f_y < 0$
- 3) $f_x \cong 0, f_y < 0$
- 4) $f_x > 0, f_y \cong 0$

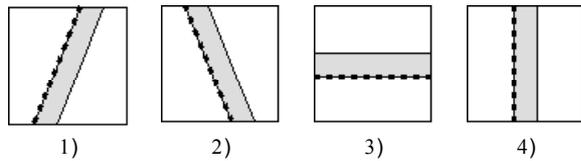


図4 検出されるエッジ

二値化

二値化は次のように行われる．

$$g(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(i,j) \geq t \\ 0 & \text{if } g(i,j) < t \end{cases} \quad (3)$$

しきい値 t は P タイル法を使用して決定する．画像の総画素数を K ，輝度値が 0 以外の画素数を R ，求める画素の割合を P ，各輝度の出現頻度を P_i ($0 \leq i \leq 255$) とすると次式を満たす t がしきい値となる．

$$\sum_{i=t}^{255} \frac{KP_i}{R} = P \quad (4)$$

本研究では $t=40$ とする．

細線化

Hilditch のアルゴリズムを用いて，二値化された毛髪を細線化する．

交点の除去

$g(i,j) = 1$ の点 (i,j) において，以下の条件を満たしていた場合， $g(i,j) = 0$ とする．

$$\sum_{k=1}^1 \sum_{l=1}^1 g(i+k,j+l) > 3 \quad (5)$$

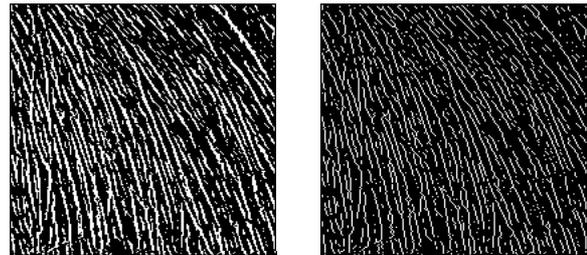
小領域の除去

細線化後の画像に対しラベリングを行い，領域の大きさがしきい値 θ 以下の領域を除去する．本研究では $\theta=5$ とする．



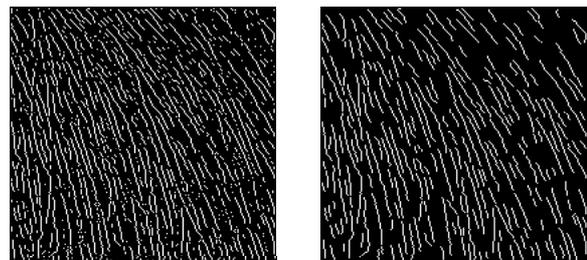
(a)写真画像

(b)エッジ



(c)二値化

(d)細線化



(e)交点の除去

(f)小領域除去

図5 毛髪の抽出

4.2 分け目の指定と流れベクトルの生成

頭髪は分け目を中心として放射状に髪が流れている．分け目を写真画像に手でストロークを描く事により指定し，抽出された毛髪の流れる方向を決定する．分け目ストロークからの距離を計算し，距離が近い方の端点から遠い方の端点に向かう方向が，図6に示すように，毛髪の流れの方向となる．

写真画像より推定された流れを頭髪形状モデル表面へ投影することにより，3次元の流れベクトルを得る．

4.3 流れベクトルを持つボクセル

頭髪形状表面に沿ったボクセルには，その中心点での画像から得られた 3次元流れベクトルを格納する．ここで使用するボクセルのサイズは 6.3 に述べる．

図5(f)を見てわかるように，流れベクトルが与えられていない画素も多い．そこで，半径 r の球に含まれるすべての流れベクトルの平均により定義する． $Q(x,y,z)$ を定義された場所 (x,y,z) における流れベクトルとすると，ボクセル (i,j,k) における流れベクトルは

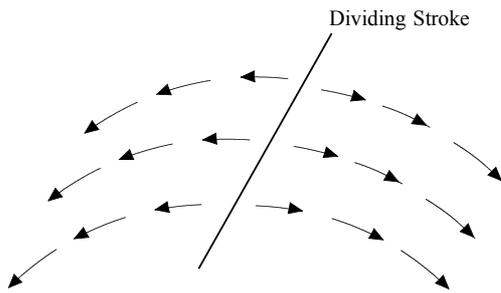


図6 流れの推定

$$w(i,j,k) = Ave \left(\sum Q(x,y,z) \right) \quad (6)$$

で与えられる。ただし Ave とは平均を表すものとし、 $(x-i)^2 + (y-j)^2 + (z-k)^2 = r^2$ である。本研究では $r=10$ (すなわち 1cm) とする。

表面の全ボクセル Ω_1 が定義されると、次いで隣接する内側の各ボクセルに法線方向のもっとも近いボクセルの値をコピーする。この操作を続け、全頭髪領域ボクセルに流れベクトルを格納する。

最終的に、ボクセル (i,j,k) の流れベクトルはすべての頭髪領域において $w(i,j,k)$ で与えられる。

5. 毛穴の生成

毛髪の生成開始位置(毛穴)と、その分布範囲を決定する。毛穴は頭皮上に存在しているため、頭部モデルの形状情報を使用して毛穴を配置するのが妥当と考えられる。

5.1 毛穴の配置

毛穴が存在する範囲は、すでに述べた 3D スキャナのスタイラス軌跡を利用する。毛穴分布範囲の指定例を図7に示す。



図7 毛穴範囲

指定された毛穴範囲内にある頭部モデルの表面に毛穴を生成する。まず頭部モデルを内包する立方体を設定し、その内部に六方最密構造[14]で球を満たす。次に頭部モデル表面に接している球を選択し、その中心点を毛穴の座標とすると、モデル表面上にほぼ一定間隔の点を作成することができる。

5.2 毛穴の層分け

すべての毛穴について、すでに定義した分け目からの距離を計算し、その距離に応じて属する層を決め、番号付けをする。

i 番目の毛穴から分け目への距離を D_i とする。距離の最低値を D_{min} 、最大値を D_{max} 、層分けをする数を L

としたとき、割り振られる層の番号 J_i は次のように与えられる。

$$J_i = \text{int} \left\{ L \frac{(D_i - D_{min})}{D_{max} - D_{min}} \right\} + 1 \quad (7)$$

ここで、 $\text{int}(a)$ とは a の小数点以下を切り捨てた数である。

6. 毛髪の生成

毛髪を 1 本ずつ生成し、その流れを頭髪形状モデル上に指定された毛髪の流れに沿わせる

6.1 毛髪のモデル化

本研究では毛髪を複数の直線セグメントで構成される疑似曲線として近似する方法を用いる[8]。直線セグメント長を短く(1mm)することにより擬似的に曲線を描く。毛髪の形状は位置の点列として表現される。

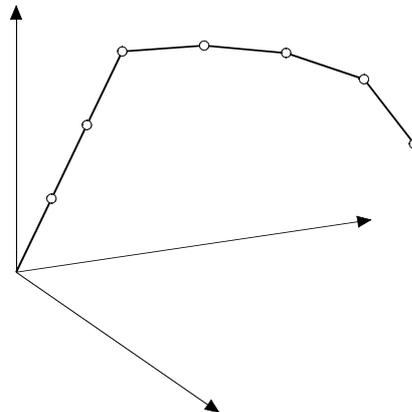


図8 セグメントモデル

6.2 毛髪の形状制御

まず第 1 層に属する毛穴からスタートする毛髪を考える。分け目からの距離が近い順に番号が付けられており若い順から開始する。この層に属する毛髪同士の衝突判定は行わず、独立に毛髪を頭皮から伸ばして行き、すでに定義した 3 次元形状表面ボクセルの集合 Ω_1 にぶつかったときに、形状表面に沿って伸ばしてゆく。

ある毛穴を考え、その位置を $s_0=(i,j,k)$ とする。頭部の中心から外側へのベクトル(簡易的な法線ベクトルと考えられ、以降外向き法線ベクトルと呼ぶ)を定義し、 $N(i,j,k)$ とする。従って、最初の毛の先端は

$$s_1 = s_0 + dN(i,j,k) \quad (8)$$

となる。図8に示すように、先端が頭髪領域 Ω_1 に到達するまで、毛髪は長さ d ずつ法線方向に進む。

$1, 2, \dots, J$ まで Ω_1 の内部であり、 $J+1$ 番目ではじめて Ω_1 の外部に出たとする。その位置 (l,m,n) の外向き法線ベクトルを計算し、その位置での髪の流れ

れベクトル $w(l,m,n)$ に加える．すなわち

$$u_{j+1} = \frac{w(l,m,n) + \alpha N(l,m,n)}{|w(l,m,n) + \alpha N(l,m,n)|} \quad (9)$$

とする．ここで u_{j+1} が Ω_1 内部に存在する最大値とする．外向きベクトル成分を加えるのは，毛髪が毛髪領域表面に沿うようにするためである．外部から観察すれば，毛髪の方は観測された通りであるが，深さを調整したことに相当する．

次のステップで，同様に毛髪先端での流れベクトル $w(l,m,n)$ を読み出し，外向き成分を加える操作を続ける．1 ステップで毛髪は長さ d だけ伸び，その長さが M を越えると，伸長をストップする．まとめると，毛髪の先端の座標 s_i は次式で表される．

$$s_i = s_0 + d \sum_{j=1}^i u_j \quad (10)$$

第 1 層に属するすべての毛穴からの毛髪生成を終えると，毛髪が通過したすべてのボクセルを使用済みとして，領域 Ω_1 から除去する．この結果 Ω_1 は縮小し，新しい領域 Ω_2 が定義される．第 2 層での毛髪の生成は，第 1 層と同じであるが毛髪領域は Ω_2 となる．この操作を次々と第 L 層まで続けて終了する． L の値の決め方は次節で説明する．

6.3 毛髪の分布

頭髪内部全体に毛髪を分布させる方法を考える．図 9 にボクセルの断面の様子を示す．ボクセルの 1 辺の長さを ε ，頭部モデル表面から頭髪形状モデル表面までの距離を μ とすると，その間にあるボクセルの数は約 μ / ε となる．1 層ごとの毛髪本数が十分に多いとすると，1 つの層につき 1 個のボクセルを満たすので，ある断面を通る毛髪の層の数を L とし，観測位置を層の数の $1/2$ の箇所と仮定すると次式が成り立つ．

$$L \cong 2 \frac{\mu}{\varepsilon} \quad (11)$$

$\varepsilon=1\text{mm}$ ， $\mu=4\text{cm}$ の場合， L は 80 となる．上の観測位置では断面を通る毛髪の層が 40 となり，断面においてほぼ一様に髪の色が分布することになる．

7. レンダリング

7.1 反射モデル

本研究では，毛髪をきわめて細いチューブであると仮定し，毛髪上の任意の点における法線ベクトルを計算し，鏡面反射成分を計算する方法[8]を用いて毛髪の光の反射を再現する．

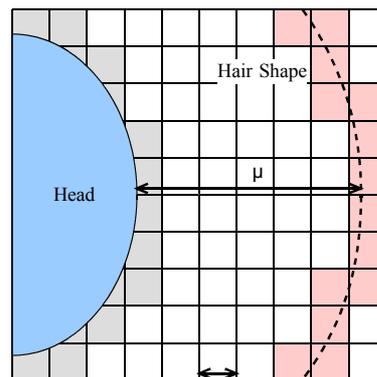


図 9 ボクセルの断面

7.2 アンチエイリアシング

毛髪モデルは非常に細いため，エイリアシングが発生する．本研究では PC のビデオカードの機能によりアンチエイリアシングを行う．使用したビデオカードは ATI Technologies RADEON 9800 PRO である．

8. 頭髪生成実験

本研究で提案した方法により得られたマネキンの頭髪を図 10 に示す．髪の流れが 1 本ずつ分別できるように毛髪数を約 5,000 本とした．頭髪の形状とその流れが良く再現されている．特に前髪付近の再現性はよい．また毛髪を約 23,000 本生成したとき頭髪と内部の様子を図 11 に示す．外側の縁が頭髪形状モデル表面，内側の縁が太い線が頭部モデル表面である．これを見ると，毛髪はほぼ一様に分布していることが分かる．

9. まとめ

本研究では 3 次元頭髪モデリングの 1 つの方法として，写真に画像処理を施すことにより得られる髪の流れに着目し，その情報を使用して頭髪を生成する方法を提案した．また外からでは確認することができない頭髪内部の毛髪の状態についても，ボクセルを使用して毛髪同士の衝突を考慮することにより，実際の毛髪の生える様子を再現した．提案方法を用いてマネキンの頭髪を生成した結果，実物に近い流れと形状を持った頭髪が生成できることを確認した．またその内部構造においてもほぼ一様に毛髪が生成されていることを確認し，本方法の有効性を示した．

この方法は毛髪 1 本ずつのモデルを必要とする応用に利用できる．

今後は，すべての作業を完全に自動化することにより，ユーザーの手を煩わせず，写真を入力するだけで実際の頭髪を 3 次元モデリングできるシステムの構築を目指す．



図 10 生成結果(5,000 本)

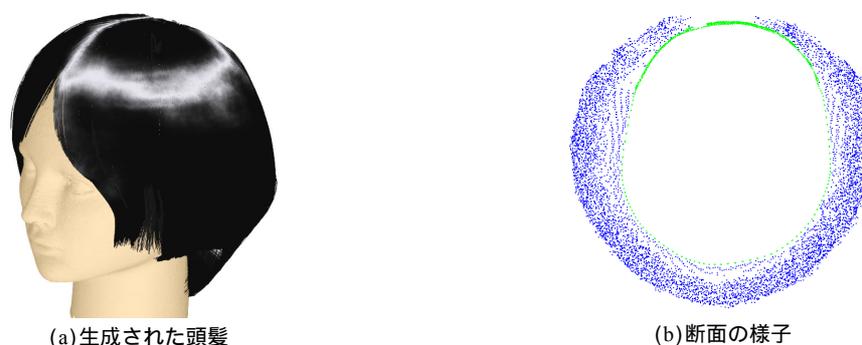


図 11 生成結果(約 23,000 本)

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髪の質感表現”, 信学論 D-II, Vol. J73-D-II No. 6, pp. 880-886, (1990)
- [2] 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放線マッピングの応用”, 信学技報, IE 89-34, 1989
- [3] J. T. Kajiya and T. L. Kay, “Rendering fur with three dimensional textures”, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 89)*, vol. 23, no. 3, pp. 271-280, (1989)
- [4] 渡部保日児, 末永康仁, “三角柱と房モデルによる頭髪生成”, 情処全大, 5K-10, pp. 715-716, (1989)
- [5] A. Daldegan, N. M. Thalmann, T. Kurahara and D. Thalmann, “An integrated system for modeling, animating and rendering hair.”, *EUROGRAPHICS '93*, pp. 211-221, (1993)
- [6] 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”, 情処学グラフィックスとCADシンポジウム, pp. 127-134, (1991)
- [7] 岸 啓補, 森島 繁生, “頭髪のスタイリングとアニメーション表現”, 信学論 D-II, Vol. J83D-II No. 12 pp. 2716-2724, (2000)
- [8] K. Anjyo, Y. Usami, T. Kurihara, “A Simple Method for Extracting the Natural Beauty of Hair”, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '92)*, pp. 111-120, (1992)
- [9] S. Grabli, F. X. Sillion, S. R. Marschner, J. E. Lengyel, “Image-Based Hair Capture by Inverse Lighting”, *Graphics Interface 2002*, pp. 51-58, (2002)
- [10] K. W. Ming, H. Takahashi and M. Nakajima, “Generation of 3D Hair Model from Multiple Pictures”, *Multimedia Modeling '97*, pp. 183-196, (1997)
- [11] A. Md. Haider and T. Kaneko, “Hair shape modeling from video captured images and CT data.”, *The 10th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 52-57, (2000)
- [12] A. Md. Haider and T. Kaneko, “Realistic 3D head modeling from video captured images and CT data.”, *Third IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine*, pp. 238-243, (2000)
- [13] T. Kaneko, Y. Iwasaki and S. Kuriyama, “3D hair modeling based on CT data and photogrammetry.”, *The 6th IASTED International Conference on Computers, Graphics, and Imaging*, pp. 123-128, (2003)
- [14] 水野 勇, 岩崎 洋平, 金子 豊久, 栗山 繁, “柔らかい3次元物体モデルの構築と外力による体積保持変形シミュレーション”, 信学論 D-II, Vol. J87D-II No. 6, pp. 1319-1328, (2004)