

ブラシストロークと動的輪郭モデルを用いた髪のレンダリング

鎌田 光宣

はじめに

日本のアニメーション作品で用いられる描画手法をアルゴリズム化する研究の一部として、本稿では、トゥーンレンダリングにおいてイラストのような髪を表現する手法を提案する。

はじめにトゥーンレンダリングについて説明し、アニメーション作品との関係について述べる。次に、3次元コンピュータグラフィックス (3DCG) における髪の表現方法、およびアニメーション作品に適用する際の問題点を述べる。この問題を解決するため、髪の輪郭モデルを自動生成する方法を提案し、提案手法の実装方法および実験結果を示す。

トゥーンレンダリング

CG キャラクターの描画にトゥーンレンダリング法を用いることで、セルアニメや漫画といった手描きのイラストのような画像が得られる⁽¹⁾⁽²⁾。トゥーンレンダリングによる描画結果を図1に示す。底辺が広く、上辺が狭い円柱があり、光が右上から当たっている。(a) は一般的なシェーディング法による描画であり、上辺の輝度が高く、側面の輝度は左から右に緩やかに変化している。(b) はトゥーンレンダリングによる描画であり、輝度の階調が3段階に制限され、さらに輪郭線が描かれている⁽³⁾⁽⁴⁾。この手法は、リアルタイム処理が必要なコンピュータゲームにも用いられ、また、アニメーション作品を制作する際のガイドとして利用するなど、広く活用されている。なお、トゥーンレンダリングはほかに、トゥーンシェーディング、セルシェーディングとも呼ばれる。

ここで、日本のアニメーション作品の特徴を説明するため、アニメーション作品を描画方法により大まかに3つに分類する。ひとつは「フル3DCG」であり、作品の世界をすべて3次元モデルで構築し、表現するものである。建物や植物はもちろん、キャラクターも3Dでモデリングされており、物体の動きを厳密に計算でき、また写実的な表現を得意とする。このような手法は海外のアニメーション作品では一般的になっている。2つめは「セルアニメ」であり、1枚1枚の絵をアニメーターが描き、パラパラ漫画のように切り

(1) H. Aaron: Introduction to 3D Non-Photorealistic Rendering: Silhouettes and Outlines, SIGGRAPH 99 Non-Photorealistic Rendering course notes, 1999. <http://www.mrl.nyu.edu/~hertzman/hertzmman-intro3d.pdf>

(2) L. Jeff: Under the Shade of the Rendering Tree, Game Developer Magazine, vol.7, no.2, pp.17-21, 2000

(3) A. Lake: テクスチャマッピングとプログラマブル頂点シェーダを用いたトゥーンレンダリング (Mark DeLoura 編, Game Programming Gems 2 日本語版, ボーンデジタル, 2002)

(4) C. S. Marshall: トゥーンレンダリング: リアルタイム輪郭エッジ検出とレンダリング (Mark DeLoura 編, Game Programming Gems 2 日本語版, ボーンデジタル, 2002)

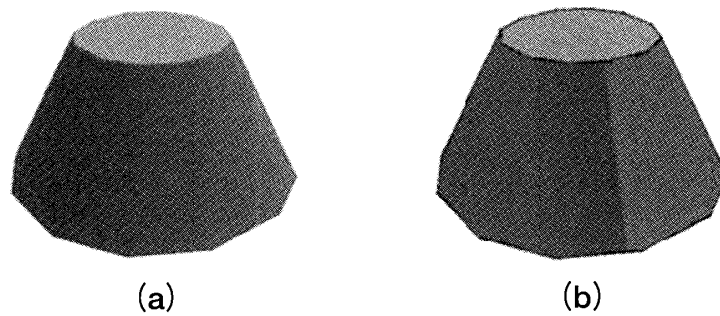


図1 トゥーンレンダリング

替えて表示するものである。古い時代の作品を含め、ジャパニメーションとして世界に発信されている。デジタル化された現在、背景や乗り物、エフェクト等にCGを用いることも増えてきたが、基本的には一枚一枚の絵を描いていくことに変わりはない。そして、3つめは「フル3DCG」と「セルアニメ」を融合したものである。作品の世界を3Dモデルで構築しておき、それをトゥーンレンダリングで描画する。これにより、3DCGでありながら、人の手で描いたかのような映像が得られる。特に、日本では漫画を原作としたアニメーション作品が多く、漫画のイメージをそのまま表現できることから、テレビゲーム等において多く用いられている。

しかしながら、日本のセルアニメーションで描かれるキャラクターの顔は側面と正面で形が違うなど、一般の3Dモデルでは表現できないことがある。このようなカートゥーンのレンダリング技法の代表的なものに、View-Dependent Geometry⁽⁵⁾がある。複数の角度について、それぞれの角度から見た時に自然に見える3Dモデルを用意しておき、カメラに映るキャラクターの角度に応じて、それらの3Dモデルを合成して描画する。また、現実のカメラではあり得ないパースを意図的に用いて心理的な効果を狙う場合もある。カートゥーンに限らず、芸術的效果を表現するために、1枚の絵の中に複数のパースを用いることがある。これを再現するために、シーン中の個々のオブジェクトに異なる投影を用い、その結果を合成するレンダリング法が提案されている⁽⁶⁾。

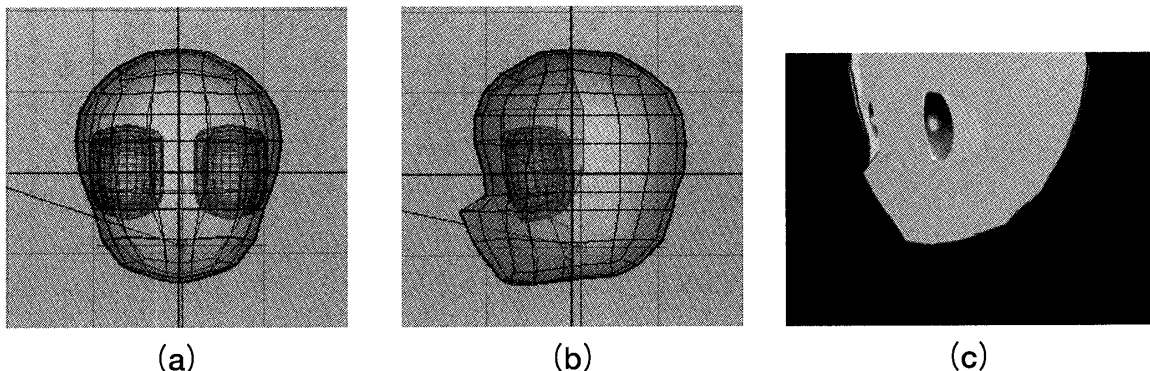


図2 トゥーンレンダリングで描画したキャラクターの顔モデル

(5) Paul Rademacher. View-dependent geometry. SIGGRAPH, 1999

(6) M. Agrawala, D. Zorin, and T. Munzner, Artistic multiprojection rendering. In Proceedings of Eurographics Rendering Workshop, 2000, Eurographics, pp.125-136.

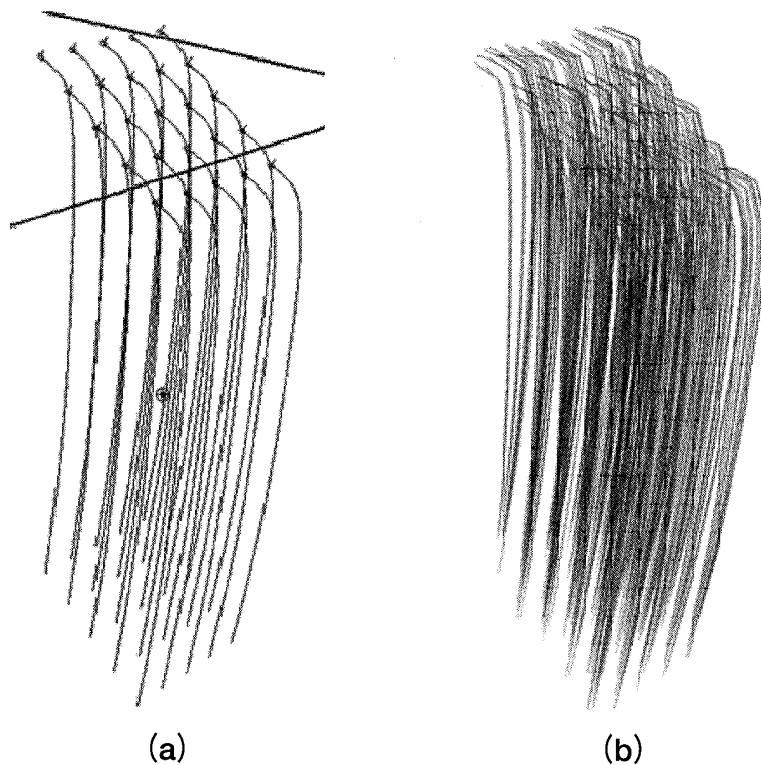


図3 Maya Hairによる髪の実現

セルアニメーションにおいて、3DCGは、遠めに見えるキャラクターやモブシーン（群集）の描画に利用されることが多い。しかしながら、ガイドとしてキャラクターに3DCGを用いる場合も、顔だけは手描きで作業を進めることが多い。これは、手描きでなければ表情の微妙な表現が難しいことや、上述のように、キャラクターが3Dモデルでは表現しにくい形状をしていることが原因として挙げられる（図2）⁽⁷⁾。

トゥーンレンダリングで表現することが難しいもののひとつにキャラクターの髪がある。デフォルメ化（単純化）されたキャラクターの場合、髪も単純化され、髪全体、あるいは髪の毛の大きなまとまりをひとつの塊としたモデルが作られる。また、漫画であれば髪の毛が細かく描かれているキャラクターでも、アニメやゲームで描かれる際には単純化された髪で表現されることが多い⁽⁸⁾。髪の毛の1本ずつを計算して細かくレンダリングすることもできるが、レンダリング時間が大幅に増加してしまい、また、単純化されたキャラクターの顔と写実性の高い髪の組み合わせによる mismatch が問題となる。

そこで、本稿では、トゥーンレンダリングにおいてイラストのような髪を表現する手法を検討する。Autodesk Maya⁽⁹⁾ の Maya Hair を用いて髪を生成すると、1本1本の髪の毛が Paint Effect で描かれる（図3）。生成された髪の情報を用いて髪の毛の輪郭線用モデルを自動生成することを試みる。

(7) 鎌田光宣: 視点依存型の形状モデルと複数の画角を用いたトゥーンレンダリング, 第23回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.169-174, 2007

(8) E. Sugisaki, T. Sawada, X. Mao, K. Anjyo and S. Morishima: Hair style designing and motion controlling tool for cartoon animation, Digital Animation Symposium, 2005

(9) <http://www.autodesk.co.jp/maya>

髪のリンドリング

A) ポリゴンモデルによる表現

髪をポリゴンモデルで表現する場合は、ある程度まとまった髪のをひとつの大きな塊としてポリゴンモデルを作り、それをキャラクタの動きに合わせて動かしたり、変形させたりする。この方法を用いることで、トゥーンリンドリングでセルアニメ的な絵を作成することができるが、イラストのような繊細な髪を表現することはできない。

また、平面テクスチャを重ね合わせて表現する方法では、まず、平面に髪のを描いた絵を用意しておき、透明度 (alpha 値) を持たせたテクスチャとしてポリゴンに貼る。次に、そのポリゴンをキャラクタの頭部にいくつも重ね合わせて貼り付けることで、細い髪のが無数に生えているように見せることができる。この方法により、少ない演算で繊細な髪を表現することができるが、キャラクタの動き等に伴って髪を動かした際に、平面ポリゴンが動いている様子が目立ってしまうことがある。

B) カーブによる表現

Maya Hair を用いたカーブによる髪表現を図 3 に示す。髪のを一本一本を NURBS カーブにより表現している。任意の面に Hair System を適用すると、指定した数の毛根が作られ (図 3 (a)), 毛根から生えた髪のを「Dynamics」により動かすことが可能となる。また、Maya Hair では、髪のを増やしながら演算処理の軽減を図るため、ひとつの毛根に複数の髪のを持たせてグループ化し、その形状についてのパラメータを持たせている (図 3 (b))。パラメータとして、グループの髪の本数、毛根から先端部までの広がり具合、先端に近づくに従い髪の本数を減らす割合などを指定することができる。図 4 に髪のグループの様子を示す。

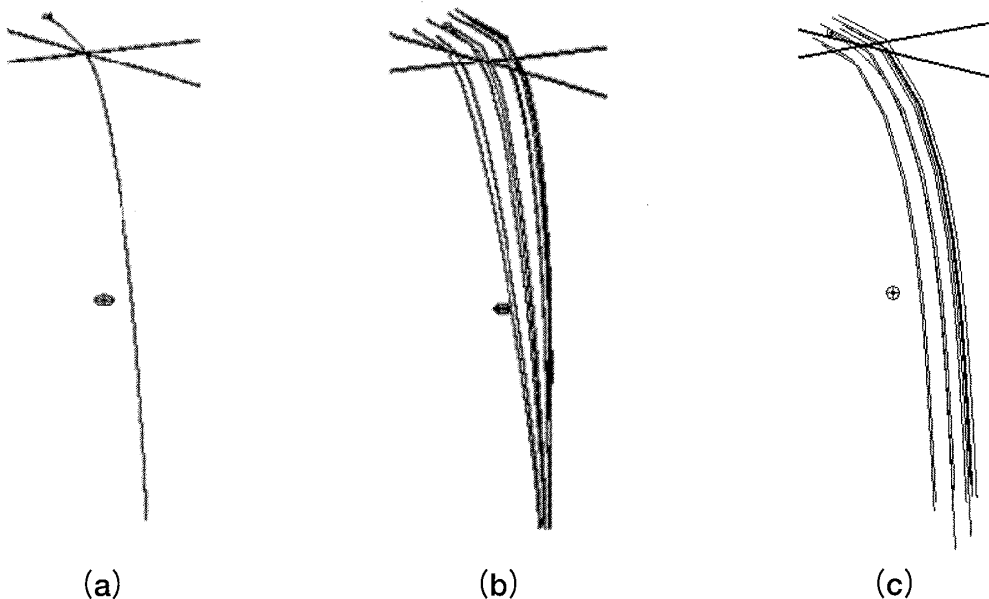


図 4 中心となるカーブと髪グループの広がり具合

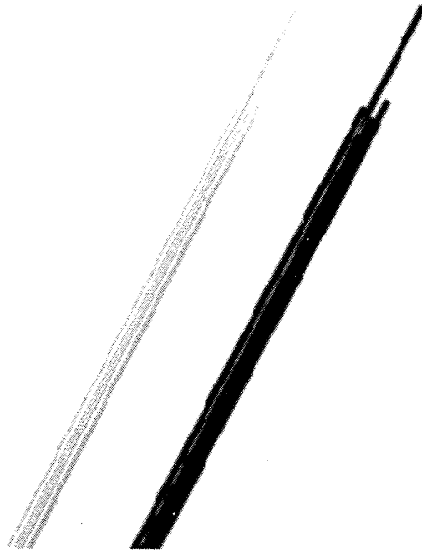


図5 Paint Effectによる髪（左）にアウトラインを設定した結果（右）

このカーブを髪の毛としてレンダリングする場合、カーブに沿って髪の毛の質感やボリュームを描画する必要があり、Maya Hairでは「Paint Effect」がこれを担当する。Paint Effectで描かれた髪に対して、そのままではトゥーンレンダリングを適用することができないが、一度ポリゴンモデルに変換することで適用が可能となる。しかしながら、これに輪郭線を付けるためにアウトラインを設定すると、1本1本すべての髪の毛に輪郭線ができてしまう（図5）。このように、カーブで定義した髪の毛には輪郭線の設定が困難であり、トゥーンレンダリングに適していない。

提案手法

提案手法の概要

漫画やイラストのキャラクターに適用することを想定して、細かな髪の毛を表現しつつ、髪に輪郭線をつけてトゥーンレンダリングする方法を検討する。本手法では、髪に輪郭線を付けるために、髪の毛の輪郭線用モデルを生成する。

まず、Maya Hairにより髪の毛を生成する。1つの髪グループには毛根が1つ含まれており、中心となるカーブの周りに、パラメータを共有するカーブが生成される（図4）。次に、髪の毛1本ずつについて、髪の毛の根元では太く、髪の毛の先端では細くなるようなコーン型のポリゴンモデルを生成する。この様子を図6に示す。3本の髪の毛（カーブ）があり、中心のカーブを「髪2」とする。「髪2」のカーブの各ポイント（関節部分）ごとに、接線に垂直な面を考え、他の髪も同じ高さに円形のカーブを作成する。

なお、ポリゴンモデルを作成する際、後述の動的輪郭モデルを用いて各平面の形状を調整する。

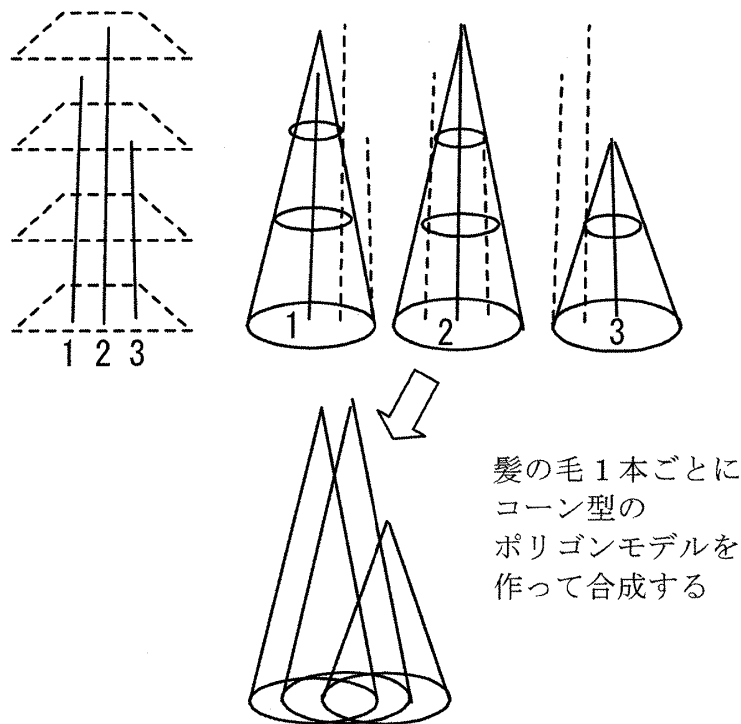


図6 髪の毛の輪郭線用ポリゴンモデルの生成

このようにして生成されたポリゴンモデルに対し、セルシェーディングとアウトライン（輪郭線）を適用し、Paint Effectでレンダリングされた結果と合成することで最終結果を得る。

動的輪郭モデルの概要

本手法では、動的輪郭モデルの代表的な手法である Snakes⁽¹⁰⁾ を用いて各平面の形状を求める。Snakes は 2 次元画像の境界追跡法であり、ある閉曲線に対し、次式で定義される評価関数が最小となるように変形する。

$$E_{snakes} = \int \{E_{int}(\mathbf{v}(s)) + E_{image}(\mathbf{v}(s))\} ds \quad (1)$$

ここで、 $E_{int}(\mathbf{v}(s))$ は内部エネルギーであり、輪郭が円形に近いほど、また輪郭の長さが短いほど値が小さくなる。 $E_{image}(\mathbf{v}(s))$ は一般には画像エネルギーとして画像濃度が用いられる。Snakes は医用画像セグメンテーション⁽¹¹⁾や人体の 3 次元リアルタイム追跡⁽¹²⁾など、幅広い分野で使われている。

(10) M. Kass, A. Witkin and D. Terzopoulos: Snakes, Active contour models, Int. J. Computer Vision, Vol.1, No.4, pp.321-331, 1998

(11) Y. Sato and H. Haneishi: Segmentation of medical images using a level-set method, Technical Report of IEICE, MI2004-81 (2005-1), pp.1-6, 2005

(12) Y. Iwashita, R. Kurazume, K. Hara and T. Hasegawa: Robust Motion Capture System against Target Occlusion using Fast Level Set Method, in Proc. IEEE International Conference on on Robotics and Automation, pp.168-174, 2006

提案手法の実装

髪のパターンモデルの生成処理には Maya のスクリプト言語である MEL を用いた。

まず、空間上に平面を配置し、その上に Hair を「Paint Effect and NURBS」として生成する。このモードでは、レンダリング時に髪の質感を表示するための Paint Effect と、この後の処理で使用する NURBS カーブが同時に生成される。なお、1つの毛根の周囲にはあらかじめ設定した本数の髪の毛が出力され、これを1つの髪グループとする。

次に、1つの髪グループの中心となる NURBS カーブをカーブのポイントの位置で区切り、各ポイントの位置、傾き、および接線を求める。そして、接線に垂直な面を求め、グループ内の髪の毛がその面を通る点を求める (図 6)。これにより、髪グループを根本から先端まで一定間隔で輪切りにし、輪切りにした各面に含まれる髪の毛の本数、および平面上での位置が分かる。

中心となるカーブが直線でない場合は、接線の傾きの分だけ平面を傾けて、その平面と髪の毛の交点を求める。図 7 (a) は、髪の毛のグループが3本の髪の毛から成り、グループ全体が曲がっている様子を示す。すると、図 7 (b) のように、途中の平面は接線の向きに合わせて傾く。傾いた面を uv 平面とすると、uv 平面上での髪の毛の位置は、図 7 (c) のように、髪の毛の位置を示す \mathbf{a} を、 \mathbf{u} と \mathbf{v} に射影して求めることができる。

ここで、ベクトル \mathbf{P} と \mathbf{Q} について、内積 $\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q}$ を

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^n P_i Q_i \quad (2)$$

として、 \mathbf{P} の \mathbf{Q} への射影は次式で表わされる。

$$\text{proj}_{\mathbf{Q}} \mathbf{P} = \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q}}{\|\mathbf{Q}\|^2} \mathbf{Q} = \frac{\mathbf{Q}^T \mathbf{P}}{\|\mathbf{Q}\|^2} \mathbf{Q} = \frac{1}{\|\mathbf{Q}\|^2} \begin{bmatrix} Q_x^2 & Q_x Q_y & Q_x Q_z \\ Q_x Q_y & Q_y^2 & Q_y Q_z \\ Q_x Q_z & Q_y Q_z & Q_z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{u} と \mathbf{v} を辺とする正方形に水平な面への射影 \mathbf{a}' は次のように表せる。

$$\mathbf{a}' = (\text{proj}_{\mathbf{u}} \mathbf{a}, \text{proj}_{\mathbf{v}} \mathbf{a}) \quad (4)$$

続いて、髪グループに含まれる1本1本の髪の毛について、根本付近では半径を大きく、先端付近では半径を小さくした円形のカーブを作成する。根元における円形のカーブの半

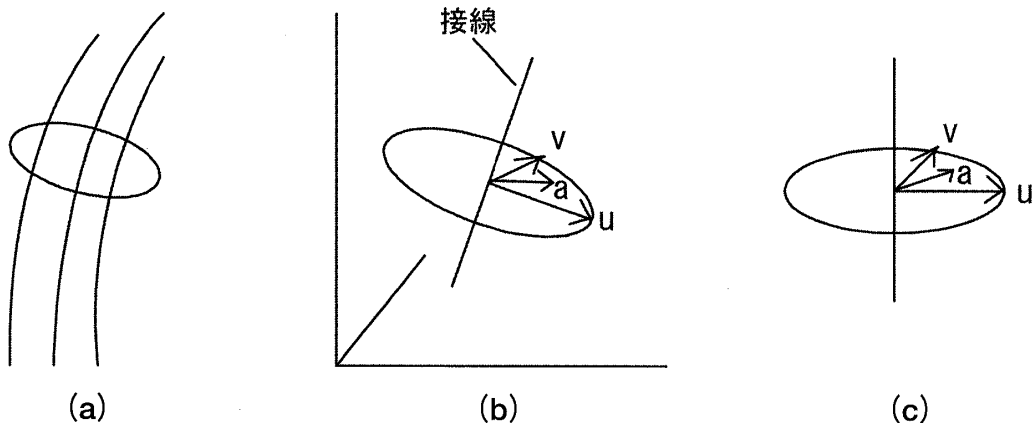


図 7 傾いた平面における髪の毛の位置

半径 r_0 は、対象とする髪の毛から、グループ内の最も遠い髪の毛までの距離とする。そして、各平面（輪切りにした面）における円形のカーブの半径 r_i は、カーブの全長を tl 、求める平面の根元からの距離を l として、次式により求める。

$$r_i = r_0 \times (1 - l/tl) \quad (5)$$

円形のカーブの評価値 $Eval$ は次式で定義する。

$$Eval = w_h \left(1 - \frac{h}{h_s}\right) + w_l \frac{l}{l_s} + w_a \frac{a}{a_s} + w_c \left(1 - \frac{c}{c_s}\right) \quad (6)$$

$$w_h + w_l + w_a + w_c = 1$$

ここで、 h_s は初期状態における円形のカーブの内側に含まれる髪の毛の本数、 h は現在の状態における髪の毛の本数、 w_h は重みである。同様に、 l は円周長、 a は面積、 c はカーブ内の全 Edit Point における最小の曲率を示す。この評価値が最小になるよう変形することは、すなわち、領域内に含まれる髪の毛の数をできるだけ減らさずに、適当な滑らかさを保ったまま内側に潰れた形状にすることである（図8）。

なお、今回の実験では、グループ内の髪の毛の本数を Edit Point の数としてカーブを作成した。このカーブを次の手順に従って変形させる。

1) 初期状態の評価

円形のカーブの初期状態の評価値 $Eval$ を式(6)により算出する。

2) カーブの仮変形と評価

カーブの全ての Edit Point について、1つずつ中心に向かって動かし、 $Eval$ を求めて元に戻す。そして、 $Eval$ が最小となる Edit Point を求める。

3) カーブの変形

手順2) で求めた Edit Point について、これまでの $Eval$ の最小値と比較する。最小値よりも小さい場合は Edit Point を動かし、 $Eval$ を求めて手順2) に戻る。これまでの最小値よりも大きい場合は処理を終了して次のカーブに移る。

4) ポリゴンモデルの作成

すべてのカーブを変形させたら、根本から先端までのカーブを Loft 機能により繋ぎ、ポリゴンモデルを作成する。

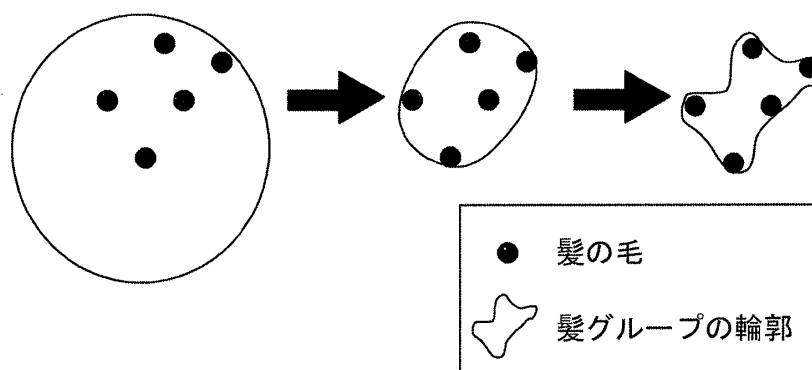


図8 動的輪郭モデルによる輪郭の調整

続いて、髪のパネルモデルに対してトゥーンシェーディングを行うために、「Assign Fill Shader」の「Solid Color」を設定した。これにより、モデルは1色でレンダリングされるようになる。また、輪郭線を抽出して強調するために、「Assign Outline」を設定した。

実験結果と考察

実験結果を図9に示す。今回の実験では10本の髪を1つの髪グループとした。図9(c)はPaint Effectによるレンダリング結果であり、ポリゴンモデルの生成に使うカーブはこれと同じ形をしている。根本から先端までの髪のはがりはほぼ一定である。

図9(a)はカーブから生成した輪郭線用ポリゴンモデルである。中央あたりで、髪の本数の存在しない部分に出っ張りができてしまっている。円カーブを変形する際に、しきい値以下の回数で処理を終えていることから、最適解が得られていないものと考えられる。

図9(b)は(a)のポリゴンモデルに対して、「Assign Outline」により輪郭線を設定したものである。そして、髪のパネル線を表現した(b)と髪の本質を表現した(c)を合成した結果を(d)に示す。輪郭線用モデルの輪郭線が目立ってしまっているが、髪の本数を増やし、輪郭線の色を薄くすることでより自然な表現となる。

本稿では、Hair SystemによりPaint Effectとカーブを生成し、そのカーブを用いて輪郭線用ポリゴンを生成する方法を示した。また、このポリゴンに輪郭線を設定してレンダリングしたものと、Paint Effectによる髪を合成した結果を示した。今回の実験では1つの髪グループのみを対象としたが、本手法をCGキャラクターに適用する際は、髪の本数を増やすとともに、髪全体に範囲を広げて実験を進める必要がある。

現在のシステムでは、髪の本数が増えると計算ステップ数が爆発的に増加してしまう。さらに、スクリプト言語を使用しているために計算時間が非常に長くなり、髪全体の処理は困難である。この問題を解決するため、アルゴリズムの改良をはかるとともに、C++言語を用いたプラグインによる実装を検討している。



図9 実験結果

—Abstract—

Rendering Method to Write Hair with Brush Stroke and Active Contour Model

KAMATA, Mitsunobu

This paper is a part of my study on drawing methods for computer graphics to make Japanese cartoon. I suggest a technique to illustrate hair by using toon rendering method.

Firstly, I outline the relation between the toon rendering and animation. Secondly, I explain a technique to write hair on a three-dimensional computer graphics (3DCG), and consider about problems we face when applying it to animation. Finally, I suggest a method to make a contour model for hair automatically to solve the problems.