

## 毛髪繊維の遮蔽を考慮した毛髪画像の陰影編集

佐々木悠真<sup>†1</sup> 金森由博<sup>†1</sup> 三谷純<sup>†1</sup>

画像を用いた髪型のシミュレーションは手軽に行うことができるが、単純に髪型画像と顔画像を重ね合わせると、各画像で照明条件が異なるために、合成画像の陰影に違和感を生じてしまう。そこで本研究では、画像中の毛髪の陰影を編集する手法を提案する。まず毛髪の陰影が、画像全体で滑らかに変化する陰影と、毛髪繊維同士の遮蔽により生じる細かい影からなるものと仮定する。さらにこれらの陰影について、滑らかな陰影は照明方向の違いに影響されるものの、細かい影は照明方向を変化させたときの毛髪の外観にそれほど影響を与えないと仮定する。これらの仮定に基づき、毛髪画像における滑らかな陰影を編集することで、照明効果の変更を行う。滑らかな陰影に Kajiya-Kay モデルを当てはめ、毛髪繊維の三次元方向ベクトル場を推定し、照明計算に用いる。提案手法の結果の質は、計算された毛髪繊維の方向ベクトル場の質に大きく依存する。ユーザは単純なマウス入力によって直感的に陰影を編集し、様々な照明効果の調整結果を得ることが期待される。

## Editing Shading Effects in a Single Hair Image Considering Occlusion Between Hair Fibers

YUUMA SASAKI<sup>†1</sup> YOSHIHIRO KANAMORI<sup>†1</sup>  
JUN MITANI<sup>†1</sup>

Image-based hairstyle simulation is easy to use, but naïve overlay of a hair image onto a face image often yields an unnatural composite image due to the shading inconsistency caused by different illumination environments between the hair and face images. In this work, we present a method for editing the shading in a single hair image. First, we assume that the shading consists of smoothly-varying global shading and fine-scale local shadows caused by occlusions between hair fibers. In addition, we further assume that, when we change light directions, the global shading changes significantly whereas the local shadows changes only slightly. Based on these assumptions, we edit shading effects by only editing the smooth global shading. Specifically, we fit the Kajiya-Kay model to the global shading in order to estimate the three-dimensional vector field of hair-fiber directions as well as the input light direction for the use of relighting. The result of our method depends on the vector field of hair fibers. We expect that users can edit shading effects intuitively to obtain various lighting results via simple mouse input.

### 1. 研究背景

画像ベースの髪型シミュレーションを行うアプリケーションが、PC やスマートフォン向けに開発されている。これらのアプリケーションにより、ユーザは予め登録された髪型画像と、自身で撮影した顔画像とを合成して、髪型を変更したときの自分の見た目を確かめることができる。画像合成の際、頭部形状の違いや生え際の処理などは画像処理によりある程度対応できる。しかし髪型画像と顔画像の照明方向の違いに起因した、光の当たり方の違いによる違和感は、通常の画像処理では対処が難しい。この問題を解決するためには、髪型画像の照明効果を調整する方法が必要である。

しかし画像中の毛髪における照明効果の変更は、毛髪繊維の持つ複雑な光の反射特性から困難なものになっている。毛髪繊維は円筒形状をした半透明の物体であり、さらに繊維の表面に僅かな鱗片を持っており、毛髪繊維の表面やその内部で、光の複雑な反射や屈折、散乱を生じる [1]。加えて、多数の細かい繊維が複雑に重なっているという特徴

を持っている。そのため、ある繊維が他の繊維を遮蔽したために生じる細かい影が、毛髪領域全体にわたって存在している。以上の性質から、毛髪画像における陰影を光学的に解析することは困難である。

そこで本研究では、画像処理的なアプローチを援用し、毛髪画像における陰影を編集する手法を提案する。本手法は次のような仮定に基づく。まず、毛髪の陰影が、画像全体で滑らかに変化する陰影と、毛髪繊維の遮蔽により生じる細かい影から構成されるとする。さらにこれらの陰影について、滑らかな陰影は照明方向の違いに影響されるものの、細かい影は照明方向を変化させたときの毛髪の外観にそれほど影響を与えないと仮定する。これらの仮定に基づき、毛髪画像における滑らかな陰影を編集することで、照明効果の変更を行う。このとき、滑らかな陰影に対して Kajiya-Kay モデル [2] を当てはめる。これにより、入力画像の照明の方向ベクトルと、毛髪繊維の三次元方向ベクトル場を推定する。計算された毛髪繊維の三次元方向ベクトル場と、ユーザの指定した照明の方向ベクトルを用いて、入力画像とは異なる照明方向での照明効果を計算する。照明効果の計算結果の質は、推定された毛髪繊維の三次元ベクトル場や、その推定に用いられる毛髪繊維の二次元ベク

<sup>†1</sup> 筑波大学  
University of Tsukuba



図 1：提案手法の流れ

トル場に大きく依存することを示す。ユーザが照明の方向を指定することで、様々な照明効果の調整結果を得られることが期待される。単一の毛髪画像の陰影を編集する手法は、我々の研究以外には存在しない。

## 2. 関連研究

### 2.1 リライティング

照明環境を変化させたときの様子をシミュレートする技術はリライティングと呼ばれている。物理的に妥当なリライティングの計算を行う場合、照明の位置や方向、光の強さといった照明条件や、対象物体の形状や反射率などの情報を取得することが不可欠である。Charbert ら [3] は、対象となる物体を大掛かりな装置を用いて三次元の人間の計測を行い、必要な測定情報を用いてリライティングを行った。この装置は、ターンテーブルにトレッドミルを重ねたものに人間を載せて歩かせながら、周囲から床下照明やドーム状に配置された照明で照らし、カメラを格子状に並べたカメラアレイで撮影するというものである。しかし特別な装置が必要であるほか、三次元の人間を対象としているため、画像を対象としている本研究では利用できない。

画像を入力としたリライティングでは、リライティングに必要な三次元情報を何らかの方法で推定するか補う必要がある。Okabe ら [4] はユーザにペンデバイスを使って法線情報を付加させることで物体の形状情報を補い、さらに照明を平行光源とし、物体の反射特性として Phong の反射モデルを仮定してリライティングを行った。Chen ら [5] は顔の特徴点を用いて、画像中の顔領域を顔の 3D モデルとフィッティングし、それに基づいて照明計算を行う手法を提案した。また、Munoz ら [6] は単一画像中の半透明物体のリライティングを実現した。しかしこれらの手法では毛

髪の反射特性を考慮していないため、適切な照明効果の変更はできない。

### 2.2 毛髪の反射モデル

毛髪における照明効果を計算するには毛髪の反射モデルを考慮する必要がある。Kajiya と Kay [2] は毛髪が円筒形をしているという事実に基づき、毛髪表面の光沢を表現するための反射モデルを提案した。実際の毛髪では、さらに毛髪内部での光の屈折や散乱の発生や、毛髪表面上に多数の鱗片の存在のために、照明の影響はより複雑になる。Goldman [7] はこのような特徴に対し、毛髪内部での反射と屈折を制御する、方向のパラメータを用いて、毛髪の半透明性を表現した。Marschner ら [1] は毛髪繊維の測定結果に基づいて、Marschner モデルと呼ばれる反射モデルを提案した。3DCG における毛髪のレンダリングにおいて、一般的に用いられているのは Marschner モデルである。

提案手法では、入力画像の毛髪領域に対して、推定すべきパラメータの比較的小さい Kajiya-Kay モデルを仮定し、照明効果を計算する。

## 3. 提案手法

### 3.1 提案手法の概要

提案手法の目的は、画像中の毛髪の陰影を対話的な操作によって編集することである。提案手法の流れを図 1 に示す。入力是一片の毛髪画像と、その毛髪領域を指定するマスク画像とする。毛髪には頭部全体に広がる陰影や、多数の細かい影が存在する。本稿ではこれらの影や陰影が、頭部の形状のために毛髪領域中で滑らかに変化する陰影と、毛髪繊維が他の繊維を遮ることにより生じる細かい影に大別できると仮定する。さらに、滑らかな陰影は照明の方向に大きく影響されるものの、細かい影は照明の方向にそれ

ほど影響を受けないと仮定する。これらの仮定に基づき、画像を毛髪の色と滑らかな陰影を表す髪色マップ  $R$  と、細かい影を表す遮蔽率マップ  $s$  を分離することで、細かい影を維持したまま、滑らかな陰影を編集できるようにする。

毛髪領域中の各ピクセル  $p$  に対して、毛髪の色  $I_p$  は次式のように、髪色マップの値  $R_p$  と遮蔽率マップの値  $s_p$  の積で表現できると仮定する。

$$I_p = s_p R_p \quad (1)$$

(1) 式に基づき、まず毛髪画像を髪色マップと遮蔽率マップに分離する。この際、Watanabe ら [8] の手法を用いて、各ピクセルにおける毛髪繊維の二次元方向ベクトルを計算する。さらに、計算された二次元方向ベクトル場から、粗い遮蔽率マップを計算する。しかし、この遮蔽率マップによって毛髪画像を分離したとき、髪色マップには局所的な陰影やノイズが残ってしまう。そこで、この粗い遮蔽率マップを遮蔽率マップの初期値（初期遮蔽率マップ）とし、髪色マップと遮蔽率マップの双方を改良する。これにより、毛髪繊維の方向に沿った陰影変化の影響を強くし、髪色マップから局所的な陰影を取り除く。この計算により改良された各マップを、それぞれ改良髪色マップと改良遮蔽率マップと呼ぶ。

次に、改良髪色マップの陰影に Kajiya-Kay モデルを当てはめる。Kajiya-Kay モデルに基づき、あらかじめ求めた毛髪繊維の二次元方向を示すベクトル場を用いて、毛髪繊維の三次元方向ベクトルと、入力画像における照明の方向ベクトルを推定する。

最後に、推定した毛髪繊維の三次元方向ベクトル場と、ユーザが指定した照明方向ベクトルから、照明効果を編集した結果画像を出力する。

### 3.2 毛髪の二次元方向ベクトル場の作成

毛髪繊維の遮蔽による局所的な影に対処するために、毛髪繊維の物理的な方向を検出する必要がある。そこで、毛髪画像の各ピクセルにおける毛髪繊維の  $x, y$  方向の成分を示す二次元方向ベクトル場を作成する。なお座標系は、画像の中心を原点とし、画像の右方向を  $x$  軸の正の方向、上方向を  $y$  軸の正の方向とする。

マスク画像で指定された毛髪領域に対して、Watanabe らの手法 [8] を用いて毛髪繊維の二次元方向ベクトル場を計算する。まず、グレースケールに変換した毛髪画像の各ピクセルに対し、一次元フィルタを回転させながら適用する。その結果、フィルタの応答値の最も大きかった方向の単位ベクトルを、毛髪の二次元方向ベクトルとして保存する。また、ノイズ軽減のために閾値処理を行い、一次元フィルタの応答値の小さいピクセルの方向ベクトルをゼロベクトルとする。

閾値処理によりゼロベクトルとしたピクセルに対し、pull-push [9] と呼ばれる手法を用いて補完を行う。補完にあたり、まずベクトルを、テンソルを表す  $2 \times 2$  行列に変

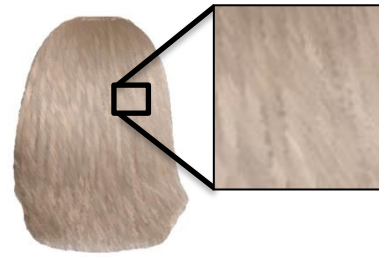


図 2: 初期遮蔽率マップを用いて (1) 式により計算された髪色マップ。毛髪繊維による影の影響が残った、滑らかでない結果となっている。

換する。これは方向ベクトル  $v$  とその逆符号  $-v$  のそれぞれを区別せずに扱うためである。補完時に参照する近傍ピクセルの方向ベクトルの符号が互いに異なる場合、成分同士が打ち消しあうことがあるため、テンソルを用いてそれを防ぐ。

各ピクセルのベクトルをテンソルに変換した後、ゼロベクトル以外の値を持つピクセルを保護する。次に、テンソル場に対してガウシアンフィルタを適用しつつ縮小し、サンプリングすることで、サイズが  $1/2$  に縮小されたテンソル場を作成する。この操作を繰り返してガウシアンピラミッドと呼ばれる画像集合を生成する。その後、縮小されたテンソル場をバイキュービック補間により 2 倍に拡大する。そして保護されていないピクセルに対して、拡大して得られた補間値を加算する。これらの処理を画像全体での値の変化が一定値以下になるまで繰り返す。最終的なテンソル場をベクトル場に変換することで、補完が完了する。

### 3.3 初期遮蔽率マップの計算

前節で計算された毛髪繊維の二次元ベクトル場を用いて、毛髪画像から毛髪繊維同士の遮蔽で生じる影を分離する。そのために、まず毛髪領域内の各ピクセルにおける遮蔽の度合いを示す画像を生成する。局所的に見ると、周囲の毛髪繊維に遮蔽された部分は比較的暗く、露出している部分は比較的明るくなっている。そこで、あるピクセルの輝度と、その近傍ピクセルの中で最も明るいピクセルの輝度との比を遮蔽率として扱い、初期遮蔽率マップとする。

初期遮蔽率マップの計算には、前節で計算された毛髪繊維の二次元方向ベクトル場を用いる。毛髪領域中の各ピクセル  $p$  の持つ毛髪の方角ベクトルに関して、直交する方向に両側 5 ピクセル分の輝度分布を得る。輝度分布を得る際、バイリニア補間を用いて輝度をサンプリングする。得られた輝度分布における最大輝度  $L_{max}$  と対象ピクセルの輝度  $L_p$  を用いて、次のように初期遮蔽率の値  $s_p$  を計算する。

$$s_p = \frac{L_p}{L_{max}} \quad (2)$$

(2) 式から計算された遮蔽率  $s_p$  により、(1) 式に基づいて髪色  $R_p$  を計算すると、図 2 のように、滑らかでない髪

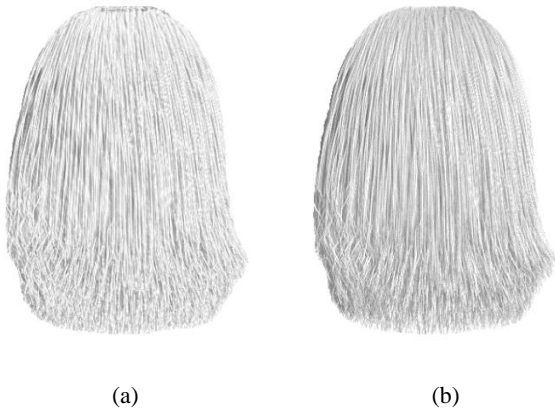


図 3: 遮蔽率マップの改良. (a) 初期遮蔽率マップ. (b) 改良遮蔽率マップ.

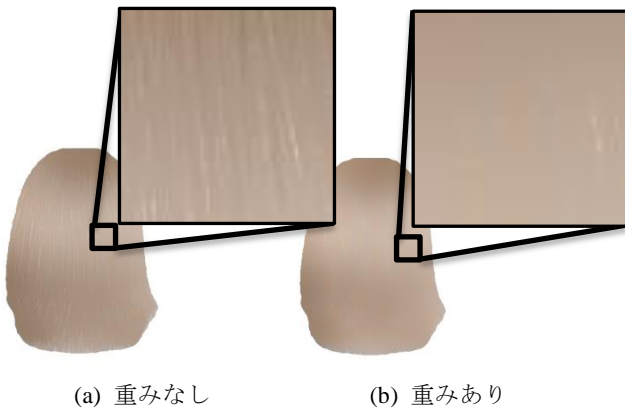


図 4: 重みによる髪色マップの違い. 方向依存の重みを考慮していない髪色マップ (a) に細かい影が現れているのに対し, 重みを考慮した髪色マップ (b) では陰影が比較的滑らかになっている.

色マップが生成されてしまう. 理想的には, 髪色マップは毛髪繊維の方向ベクトルに沿って滑らかな色変化を持つことが求められる. そこで次節において, 遮蔽率マップが局所的な影を含みつつ, 髪色マップが滑らかな色変化を持つように, それぞれのマップを改良する.

### 3.4 髪色と遮蔽率の改良

前節までで計算された毛髪繊維の二次元方向ベクトル場と初期遮蔽率マップを利用し, 改良髪色マップと改良遮蔽率マップを生成する. 基本的には Shen らの手法 [10] と同様な方法で最適化を行う. 彼らの手法では, 毛髪繊維の方向を考慮していないため, そのままでは髪色マップと遮蔽率マップをうまく分離できない. そこで, 毛髪繊維の方向に依存した重みを導入し, 毛髪繊維の遮蔽による細かい影だけを分離できるようにする. 具体的には, 次のエネルギー関数  $E_{sep}$  の最小化により, 髪色マップと遮蔽率マップを改良する.

$$E_{sep} = \sum_{\mathbf{p} \in P} \left\| \mathbf{R}_{\mathbf{p}} - \sum_{\mathbf{q} \in N_{\mathbf{p}}} \omega_{\mathbf{p}\mathbf{q}} \mathbf{R}_{\mathbf{q}} \right\|^2 + \sum_{\mathbf{p} \in P} \left\| \mathbf{I}_{\mathbf{p}} \delta_{\mathbf{p}} - \mathbf{R}_{\mathbf{p}} \right\|^2 \quad (3)$$

ここで,  $P$  はピクセル全体の集合である.  $N_{\mathbf{p}}$  はピクセル  $\mathbf{p}$  の近傍ピクセルの集合であり, 本稿では  $11 \times 11$  の近傍領域となっている. また  $\delta_{\mathbf{p}}$  は遮蔽率  $s_{\mathbf{p}}$  の逆数である.

(3) 式の最適化を以下の手順で行う. まず遮蔽率マップと髪色マップの初期値を設定する. 遮蔽率マップ  $s$  の初期値として, 3.2 節で計算した初期遮蔽率マップを設定する. この初期遮蔽率マップを利用して, (1) 式から初期髪色マップを計算する. 初めに第一項を計算し, 髪色マップを計算する. このとき, 重み  $\omega_{\mathbf{p}\mathbf{q}}$  を次のように決定する.

$$\omega_{\mathbf{p}\mathbf{q}} = \frac{|\cos \theta_{\mathbf{p}\mathbf{q}}|}{\sum_{\mathbf{r} \in N_{\mathbf{p}}} |\cos \theta_{\mathbf{p}\mathbf{r}}|} \quad (4)$$

ここで,  $\theta_{\mathbf{p}\mathbf{q}}$  はピクセル  $\mathbf{p}$  における毛髪方向ベクトルと, ピクセル  $\mathbf{p}$  から近傍ピクセル  $\mathbf{q}$  へ向かう単位方向ベクトルのなす角である. また,  $N_{\mathbf{p}}$  はピクセル  $\mathbf{p}$  の近傍ピクセル集合である. この方向依存の重みにより, 毛髪の繊維方向に沿った輝度変化の影響が強くなる. 次に得られた改良髪色マップと入力画像を用いて第二項を計算し, 改良遮蔽率マップを計算する. 毛髪領域内のすべてのピクセルについてこれらの計算を行い, 誤差が収束するまで反復する. 図 3 では, 遮蔽率マップの改良前後の結果を比較している.

初期遮蔽率マップ (図 3 (a)) では繊維の方向に沿った細かい影が薄く途切れがちであるのに対して, 改良遮蔽率マップ (図 3 (b)) では遮蔽による影ははっきりと現れている. また図 4 では, Shen らの手法 [10] における反射率マップと提案手法における髪色マップの比較を行っている. Shen らの手法の結果 (図 4 (a)) には白い筋と細かい影が現れているが, 提案手法の結果 (図 4 (b)) では比較的滑らかな陰影が取得できている.

### 3.5 Kajiya-Kay モデルを用いた最適化

前節で得られた改良髪色マップに Kajiya-Kay モデルを当てはめる. 3.2 節で計算された毛髪繊維の二次元方向ベクトル場を用いて, 各ピクセルにおける毛髪繊維の方向ベクトルの  $z$  方向成分と, 入力画像における照明の方向ベクトルを, 誤差関数の最小化により推定する. ここで座標系は 3.2 節の  $x, y$  軸に加え, 画像の手前方向を  $z$  軸の正の方向とする右手座標系とする. また照明は平行光源とし, 視線のベクトルは  $z$  軸の負の方向に平行な単位方向ベクトルとする.

Kajiya-Kay モデルでは, 各ピクセルにおける髪の色は次式のように, 拡散反射光  $\Psi_d$ , 鏡面反射光  $\Psi_s$ , 環境光  $\Psi_a$  の和で表される.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{p}} = \Psi_d + \Psi_s + \Psi_a \quad (5)$$

また, 拡散反射光と鏡面反射光はそれぞれ以下の式で計算



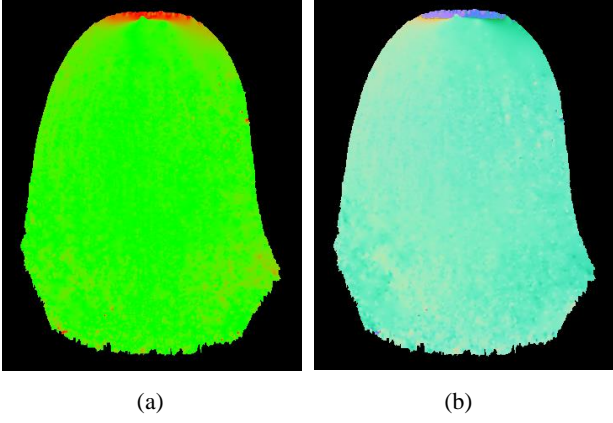


図 5: 毛髪繊維のベクトル場の可視化. (a) 毛髪繊維の二次元ベクトル場.  $x, y$  方向成分をそれぞれ赤, 緑で表している. (b) 毛髪繊維の三次元ベクトル場.  $x, y, z$  方向成分をそれぞれ赤, 緑, 青で表している.

される.

$$\Psi_d = \mathbf{k}_d \|\mathbf{t}_p \times \mathbf{l}\| \quad (6)$$

$$\Psi_s = (\mathbf{k}_s(-\mathbf{t}_p \cdot \mathbf{l})(\mathbf{t}_p \cdot \mathbf{e}) - \|\mathbf{t}_p \times \mathbf{l}\| \|\mathbf{t}_p \times \mathbf{e}\|)^p \quad (7)$$

ここで,  $\mathbf{k}_d, \mathbf{k}_s$  はそれぞれ拡散反射係数と鏡面反射係数であり,  $\mathbf{t}_p$  はピクセル  $\mathbf{p}$  における毛髪繊維の単位方向ベクトル,  $\mathbf{l}$  は照明の単位方向ベクトル,  $\mathbf{e}$  は視線の単位方向ベクトル,  $p$  は光沢度である.

毛髪繊維の方向ベクトルの  $z$  方向成分と光の入射方向を推定する手法について説明する. 照明の方向ベクトルを離散的に少しずつ変化させながら, ピクセルごとの照明計算を行う. 照明の方向は極座標において, 方位角  $\phi$  を  $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ , 仰角  $\theta$  を  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  の範囲で設定される. 本稿では方位角を 8 分割, 仰角を 6 分割して計算する. 各ピクセルにおける毛髪繊維の三次元方向ベクトルの  $x, y$  方向の成分については, 毛髪繊維の二次元ベクトル場の値を利用する. 毛髪繊維の方向ベクトルの  $z$  成分は誤差関数の最小化により推定する. ピクセル  $\mathbf{p}$  における髪色  $\mathbf{R}_p$  と, 毛髪繊維の三次元方向ベクトル  $\hat{\mathbf{t}}_p$  及び照明の方向ベクトル  $\hat{\mathbf{l}}$  から, (2) 式により計算された髪色  $\Psi_p$  を用いて, 点  $\mathbf{p}$  における誤差  $E_p$  を次のように定式化する.

$$E_p = \|\mathbf{R}_p - \Psi_p\|^2 \quad (8)$$

(8) 式を最小化するような  $z$  成分を持つ毛髪繊維の方向ベクトル  $\hat{\mathbf{t}}_p$  を, レーベンバーグ・マーカート法を用いた最適化により, 各ピクセルで計算する.

次に, 照明の方向と毛髪領域内で最適な毛髪繊維の方向ベクトル場を決定する. 各ピクセルで計算された  $E_p$  の最小値の総和を最小にする毛髪繊維の三次元方向ベクトル場  $\hat{\mathbf{T}}$  と照明の方向ベクトル  $\hat{\mathbf{l}}$  を, それぞれの最適値とする. すなわち, 次の関数  $E_{est}$  を最小にする各値を求める.

$$E_{est} = \sum_p \min E_p \quad (9)$$

本処理の疑似コードを Algorithm 1 に示す.

Algorithm 1:  $z$  方向成分と照明方向の推定の疑似コード

---

INPUT:  $\mathbf{R}$ : 髪色マップ,  $\mathbf{T}^2 = \{\mathbf{T}_p^2 = (t_x^2, t_y^2)\}$ : 毛髪繊維の二次元方向ベクトル場  
 OUTPUT:  $\mathbf{T}^3 = \{\mathbf{T}_p^3 = (t_x^3, t_y^3, t_z^3)\}$ : 毛髪繊維の三次元方向ベクトル場,  $\mathbf{l}$ : 入力画像の照明の方向ベクトル  
 FOR EACH  $\phi \in \{0^\circ, 45^\circ, \dots, 360^\circ\}$ ,  $\theta \in \{0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ\}$  DO  
    $\mathbf{l}$  を  $\phi$  と  $\theta$  から設定  
    $E_{est} \leftarrow 0$   
   FOR EACH 毛髪画像内の各ピクセル  $\mathbf{p}$  DO  
      $(t_x^3, t_y^3) \leftarrow (t_x^2, t_y^2)$   
      $\mathbf{l}$  と  $\mathbf{T}_p^2$  から髪色  $\Psi_p$  を計算  
      $\mathbf{T}_p^3 \leftarrow \arg \min \|\mathbf{R}_p - \Psi_p\|^2$   
      $E_{est} \leftarrow E_{est} + E_p$   
   END FOR  
 END FOR  
 IF  $E_{est}$  が最小  
   RETURN  $\mathbf{T}^3, \mathbf{l}$   
 END IF

---

図 5 は 3.5 節の手法により計算された, 図 1 の入力画像の毛髪繊維の二次元ベクトル場及び三次元ベクトル場を可視化した図である. 図 5 (b) の三次元ベクトル場の推定結果は, 図 5 (a) の二次元ベクトル場のノイズの影響を強く受けていることが分かる. そこで次に, 三次元ベクトル場の平滑化により, このノイズの影響を減らすことを試みる.

### 3.6 毛髪繊維の三次元方向ベクトル場の平滑化

ノイズの影響を減らすために, 髪色マップと Kajiya-Kay モデルにおける計算結果との誤差をできるだけ小さくしつつ, ベクトル場が滑らかになるように平滑化を行う. まず 3.5 節の手法により照明の方向ベクトルと毛髪繊維の三次元方向ベクトル場を推定する. このとき得られた照明の方向ベクトルは正しい方向が得られたものとして固定する. 推定された毛髪繊維の三次元方向ベクトル場を初期値として, (9) 式に平滑化項を加えたエネルギー関数の最適化を行う. すなわち, 次のエネルギー関数  $E'_{est}$  を最小化する毛髪繊維の三次元ベクトル場を求める.

$$E'_{est} = \sum_p (\|\mathbf{R}_p - \Psi_p\|^2 + \lambda \frac{1}{\omega_{sum}} \sum_{q \in N_p} \omega_{pq} (z_p - z_q)^2) \quad (10)$$

ここで  $\lambda$  は平滑化項の重みであり, 本稿では  $\lambda = 10000$  としている.  $z_p, z_q$  は各ピクセルの  $z$  方向成分であり,  $N_p$  はピクセル  $\mathbf{p}$  の近傍ピクセル集合である. また  $\omega_{sum} = \sum_{q \in N_p} \omega_{pq}$  とする. ここで, あるピクセルとその近傍ピクセルの遮蔽率の差が小さければ, それらのピクセルは同じ毛髪繊維上に存在すると考えられる. また, あるピ

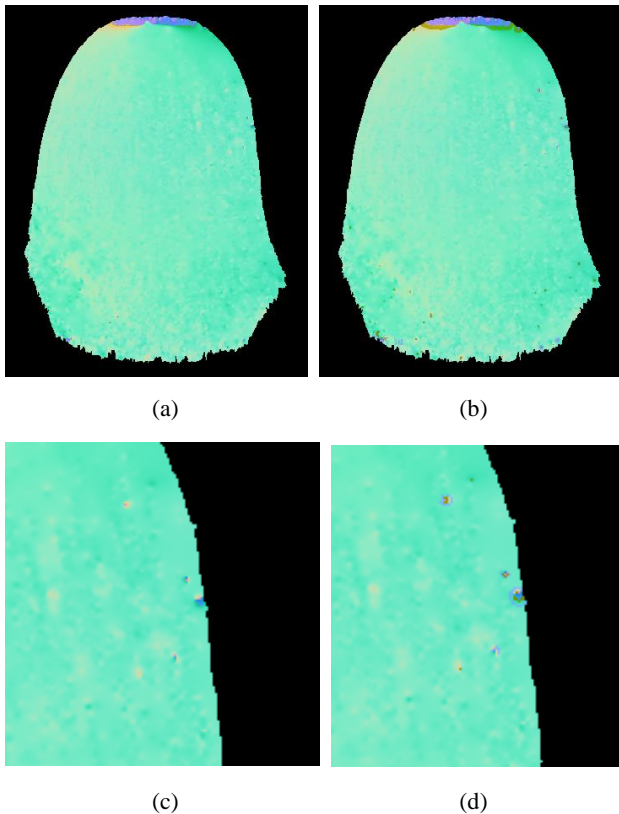


図 6: 平滑化の結果の例.  $x, y, z$  方向成分をそれぞれ赤, 緑, 青で表している. (a) 平滑化前. (b) 平滑化後. (c) 平滑化前 (a) の拡大図. (d) 平滑化後 (b) の拡大図.

クセルへの方向の影響は, ピクセル間の距離が近いほど強くなると考えられる. これらのことから, 重み  $\omega_{pq}$  を次のように計算している.

$$\omega_{pq} = \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{\sigma_d^2}\right) \exp\left(-\frac{|s_p - s_q|^2}{\sigma_o^2}\right) \quad (11)$$

ここで,  $\sigma_d$  は距離の項における重みであり,  $\sigma_o$  は遮蔽率の差の項における重みである. 本稿ではそれぞれ  $\sigma_d = 0.1$ ,  $\sigma_o = 3$  としている.

### 3.7 照明効果の変更

3.5 節で推定した毛髪繊維の三次元方向ベクトル場を利用して, (5) 式から髪色マップを新たに合成し, その結果画像に 3.4 節で得られた改良遮蔽率マップを乗算したものを出力画像とする. ユーザ照明の方向ベクトルを手動で設定することにより, 出力結果に対して変更を加えることができる.

## 4. 結果

提案手法の実装では, 実装言語として C++, ライブラリとして GLUT, GLUI, DevIL, Dlib を使用した. 実行環境は Intel Core i7-4771 3.50GHz, 16GBByte のメモリを搭載した PC である. この PC 環境下における提案手法の処理時間は,  $360 \times 450$  のサイズの画像において, 初期遮蔽率マップの計算に 9 秒程度, 髪色マップと遮蔽率マップの改良に 25

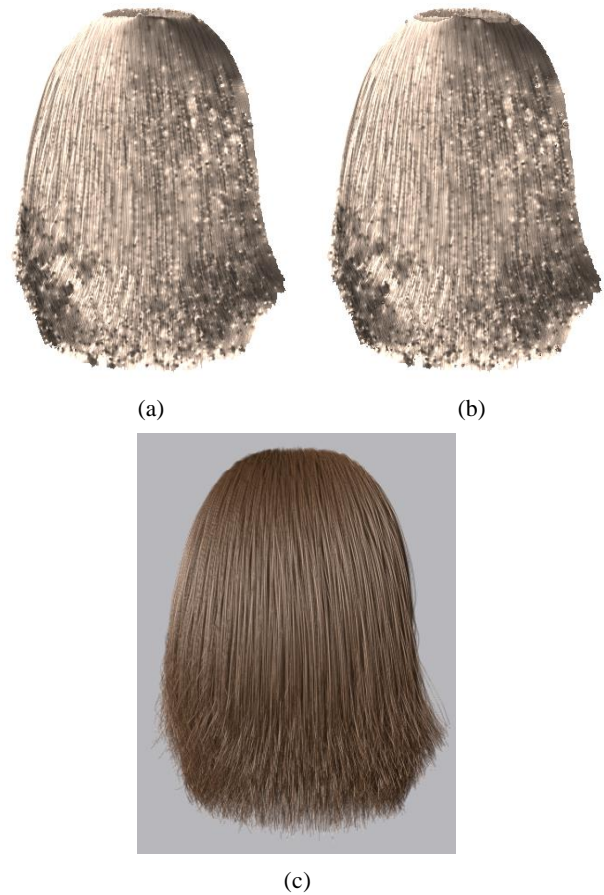


図 7: 図 6 の各毛髪繊維の三次元ベクトル場を用いた結果画像. (a) 平滑化前. (b) 平滑化後. 照明方向はすべて  $\phi = 135^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  で計算している. (c) は POV-Ray によりレンダリングされた, 同方向から照らされた毛髪である.

秒程度を要する. 三次元ベクトル場の推定については, 離散的にサンプリングした照明方向の 1 方向に対して 5 ミリ秒の時間を要するため, 照明方向のサンプル数によって計算時間が大きく変化する. 図 5 の結果では 25 秒程度を要している. ただし, 照明効果の変更はリアルタイムで行うことができる.

実験では, 実際の毛髪の画像のほか, レンダリングソフトウェアにより出力された, 照明方向が既知である毛髪画像 (図 1 における入力画像) を用いている. この毛髪画像のレンダリング時の照明方向は,  $\phi = 45^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  で定まる平行光源である.

3.5 節の手法による入力画像の照明の方向ベクトルの推定結果は,  $\phi = 90^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  となる. これは模範解であるレンダリング時の照明方向  $\phi = 45^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  とは大きな誤差がある. 図 6 は平滑化前後の毛髪の三次元ベクトル場を比較した図である. 平滑化前 (図 6 (a)) と平滑化後 (図 6 (b)) ではほとんど変化が観られない. 毛髪領域の一部を拡大する (図 6 (c), (d)) と, 平滑化後は平滑化前に比べて, ノイズが強調されているように見える. また図 6 の双方のベクトル場を利用して, 照明効果を計算した結果例を

図7に示す。平滑化前(図7(a))と平滑化後(図7(b))で結果に大きな変化は見られない。また現時点での計算結果は、図7(a)、(b)と同じ方向から照らされた毛髪の模範例(図7(c))とは大きくかけ離れている。

提案手法の改善案として、平滑化の際の重みに3.3節で計算した二次元ベクトル場の影響を加えることや、二次元ベクトル場の計算手法の改良などを考えている。

## 5. 結論

本稿では、毛髪画像における陰影の編集手法を提案した。提案手法では、毛髪が大域的な陰影を含む髪色マップと、局所的な陰影を表す遮蔽率マップとの積で表現できると仮定した。この仮定に基づき、毛髪繊維の遮蔽による細かい影を維持するために、画像から遮蔽部分を粗く検出した初期遮蔽率マップを計算した。次に、初期遮蔽率マップを用いて、髪色マップと遮蔽率マップの改良を行った。改良された髪色マップにKajiya-Kayモデルを当てはめ、髪色マップから毛髪繊維の三次元ベクトル場と入力画像の照明の方向ベクトルを推定した。最後に、推定された三次元ベクトル場と、ユーザの指定した照明の方向ベクトルから照明計算を行い、最終的な結果を出力する。ユーザは照明方向を設定することで、様々な照明効果の編集結果を得ることができる。

本手法では細かい毛髪繊維と、それによって生じる細かい影を扱うため、各ステップの結果の質は、入力された毛髪画像の画質に大きく依存する。画質の低さから毛髪繊維間の細かい影が失われてしまうと、3.4節における髪色マップと遮蔽率マップの分離と改良がうまくいかない場合がある。また、入力する毛髪画像の繊維の構造が複雑であるほど、Watanabeらの手法では毛髪繊維の二次元方向ベクトル場をうまく検出できなくなる。そのため、生成された改良髪色マップが不自然な色になってしまう。

今後の課題として、毛髪繊維の三次元方向ベクトル場の推定手法、および推定された三次元方向ベクトル場の平滑化手法を検討する必要がある。現在の推定手法では、照明方向の推定はできていない。また図6に示すように、4節で提案した平滑化項を加えたエネルギー関数による結果は、毛髪繊維に沿って滑らかでない三次元方向ベクトル場を生成してしまう。毛髪繊維の流れを反映した、滑らかな照明効果の得られる最適化手法が求められる。また毛髪画像の髪色マップと遮蔽率マップの分離と改良について、提案手法は髪色マップにおけるハイライトの影響を完全に除去できていない。図2(b)における白い筋がハイライト部分になっている。そのため、陰影だけを編集するためには、残ったハイライトを除去する必要がある。

## 参考文献

- 1) S. R. Marschner, H. W. Jensen, M. Cammarano, S. Worley and P. Hanrahan. 2003. Light scattering from human hair fibers. *ACM Trans. on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 780-791
- 2) J. T. Kajiya and T. L. Kay. 1989. Rendering fur with three dimensional textures. In *Proc. of 1989 ACM SIGGRAPH*, vol. 23, no. 3, pp. 271-280.
- 3) C-F. Charbert, P. Einarson, A. Jones, B. Lamond, W-C. Ma, S. Slywan, T. Hawkins and P. Debevec. 2006. Relighting human locomotion with flowed reflectance fields. *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*.
- 4) M. Okabe, G. Zeng, Y. Matsushita, T. Igarashi, L. Quan and H. Y. Shum. 2006. Single-view relighting with normal map painting. In *Proc. of Pacific Graphics 2006*, pp. 27-34.
- 5) J. Chen, G. Su, J. He and S. Ben. 2010. Face image relighting using locally constrained global optimization. In *Proc. of ECCV 2010, Part IV*, pp. 44-57.
- 6) A. Munoz, J. I. Echevarria, F. Seron, J. L-Moreno, M. Glencross and D. Gutierrez. 2011. BSSRDF estimation from single image. *Computer Graphics Forum*, vol. 30, no. 2, pp. 455-464.
- 7) D. B. Goldman. 1997. Fake fur rendering. In *Proc. of SIGGRAPH*, ACM Press, pp. 127-134.
- 8) H. Watanabe, Y. Kanamori, J. Mitani and Y. Fukui. 2011. An image-based hair styling system using layered texture pieces. In *Proc. of Pacific Graphics 2011*, pp. 7-12.
- 9) S. J. Gortler, R. Grezeszczuk, R. Szeliski and M. F. Cohen. 1996. The lumigraph. In *Proc. of SIGGRAPH '96*, pp. 43-54.
- 10) J. Shen, X. Yang, Y. Jia and X. Li. 2011. Intrinsic image using optimization. In *Proc of IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3481-3487.