

髪の毛・毛皮のための効率的な重点的サンプリング

芝池 祐星[†] 岩崎 慶[‡]

概要

近年、ゲームや映画などの映像作品において人や動物のCG表現が多く使用されており、人や動物の表現において、髪の毛や毛皮は重要な要素である。髪の毛や毛皮の画像を生成(レンダリング)する手法として、パストレーシングが広く用いられている。パストレーシングを用いて毛をレンダリングする場合、光源から放射された光が、毛の表面で散乱して視点に到達する光の経路をサンプリングする必要がある。Yanらは、毛の散乱モデルとしてダブルシリンダーモデルを提案した。

本研究では、Yanらが提案したダブルシリンダーモデルを用いて、より効率的に重点的サンプリングを行う手法を提案する。従来の重点的サンプリングでは、毛に入射する光の位置を一樣サンプリングにより求めていたが、提案法では毛の散乱特性に基づいてサンプリングする。すなわち、毛内部での光のエネルギー損失が少ない経路を重点的にサンプリングすることで、より効率的に髪の毛・毛皮のレンダリングを行うことが可能になる。従来の重点的サンプリングと同時間レンダリング比較において、提案法はノイズの少ない画像を生成することができる。

1. はじめに

近年、テレビゲームや映画などの映像作品において、写実的な動物のキャラクタを目にする機会が増えてきている。コンピュータを用いて画像を生成するには各ピクセルの輝度値を計算する必要がある、1ピクセルごとに光の経路をサンプリングすることで輝度値を推定する。その際1ピクセルごとのサンプル数を増やすことで推定精度は向上するが、その分計算時間が増加する。また、輝度値への影響が大きい経路を重点的にサンプリングすればするほど、推定精度は高くなる。写実的な毛皮の質感を表現するには毛の内部で発生する光の減衰、散乱を考慮する必要がある、それらを考慮したレンダリングは、経路が複雑になり計算量が多くなる、ノイズが大量に発生するために多くのサンプル数が必要となる、などの問題点がある。そのため、コンピュータグラフィックスの分野において、写実的な毛皮の画像を効率的に生成することは重要な研究テーマとなっている。

Yanらは人間の髪の毛と動物の毛皮の構造的な違いを明らかにし、写実的な人間の髪の毛と動物の毛を表現するための散乱モデルとしてダブルシリンダーモデルを提案した[1]。この手法では動物の毛皮構造の特徴を考慮することで従来のモデルに比べて、より写実的な動物の毛の表現が可能である。しかし、光の経路の種類が全部で11種類あり、それぞれの経路の計算が複雑になってしまうため、計算に時間がかかるという問題点があった。その後Yanらは毛の内部におけるコルテックス層とメデュラ層の屈折率を同じ値にすることで、層の間で発生する光の反射・透過を無視し経路の種類を約半分抑えた新たなダブルシリンダーモデルを提案した[2]。改良後のダブルシリンダーモデルでは経路の種類を減らしたことで計算量が削減され、画像生成の時間が大幅に削減された。

本研究ではYanらのダブルシリンダーモデル[2]を使用して、さらに効率的に写実的な髪の毛・毛皮の画像を生成する重点的サンプリングの手法を提案する。従来の重点的サンプリングでは計算に必要となる光と毛の交差位置を表すパラメータを一樣サンプリングで求めていたが、提案法では光の反射率に従ってサンプリングすることで、ノイズを低減することができる。

2. 関連研究

髪の毛のレンダリングに関する研究は数多く存在するため、ここでは髪の毛・毛皮のための物理則に基づいた散乱モデルに関する研究と、髪の毛・毛皮のレンダリングのための重点的サンプリングに関する研究のみを取りあげる。

2.1 髪の毛・毛皮の散乱モデル

Marschnerらは、毛髪繊維を粗い誘電体の円筒として近似することで、Marschnerモデルと呼ばれる、物理則に基づいた髪の毛の散乱モデルを提案した[3]。Zinkeらは双方向曲面散乱分布関数(BCSDF)の概念を導入することにより、Marschnerモデルを一般化した[4]。Sadeghiらは、アーティストが使用しやすくなるように、Marschnerモデルを簡略化したモデルを提案した[5]。d'Eonらは、Marschnerモデルを拡張し、方位角方向のキューティクル層の粗さを考慮することにより、Marschnerモデルよりも写実性の高い散乱モデルを提案した[6]。Chiangらは、毛の内部で発生するすべての内部反射を単一の散乱ローブで表現する手法を提案した[7]。

人間の髪の毛と動物の毛は構造が異なるため、上記の髪の毛のモデルを動物の毛に適用すると、実物に比べて見た目が暗くなるという問題点があった。Yanらは、人間の髪の毛と動物の毛の構造の違いを明らかにし、写実的な動物の毛を表現するためにダブルシリンダーモデルを提案した[1]。提案されたダブルシリンダーモデルでは、毛を構成しているキューティクル層、コルテックス層、従来の髪の毛のモデルでは無視していたメデュラ層の3層を考慮したモデル化を行うことで写実的な動物の毛のレンダリングを可能にした。しかしながら、コルテックス層とメデュラ層の間で発生する光の反射・透過を考慮することで光の経路が複雑になり、計算コストが増大するという問題点があった。その後Yanらが提案した新たなダブルシリンダーモデル[2]では、元々コルテックス層とメデュラ層の絶対屈折率が近い値であり、2層の絶対屈折率を同じ値にしても結果に大した影響を与えなかったことから、コルテックス層とメデュラ層の絶対屈折率が同じ値であると仮定することで経路を大幅に削減し、効率的な毛皮のレンダリングを可能にした。

2.2 重点的サンプリング

重点的サンプリングとは、モンテカルロ積分において被積分関数になるべく比例した確率密度分布を用いてサンプリングすることで、モンテカルロ積分の推定値の分散を低減する手法である。髪の毛・毛皮のレンダリングにおいては、毛の散乱モデルに比例した確率密度関数を構築することで、パストレーシングにおける光の経路の方向をサンプリングする際に使用される。髪の毛・毛皮の効率的なレンダリングを行うために、様々な重点的サンプリングの手法が考えられてきた。HeryとRamamoorthiは、Marschnerモデルのための重点的サンプリングアルゴリズムを提案した[10]。Ouらは、Sadeghiらの提案した散乱モデル[5]に基づいた、複数のローブを個別にサンプリングするアルゴリズムを提案した[11]。d'Eonらは自身が提案した散乱モデル[6]に基づいて、効率的な重点的サンプリングの手法を提案した[12]。Yanらはd'Eonらが提案した手法[12]に基づいて、ダブルシリンダーモデルのための効率的な重点的サンプリングの手法を提案した[1][2]。提案法ではYanらの重点的サンプリングの手法[2]を拡張することで、より効率的な重点的サンプリングを行う。

3. 背景

本節では提案法に用いるYanらのダブルシリンダーモデル[2]と先行研究の問題点について述べる。

3.1 ダブルシリンダーモデルの概要

人間の髪の毛、および動物の毛はキューティクル層、コルテックス層、メデュラ層の3層で構成されている(図1参照)。キューティクル層には微小な傾斜があり、光が入射・出射する際に若干の角度のずれが生じる。また、実物に近い見た目を表現するには表面にある細かな粗さと層の厚みを考慮する必要がある。コルテックス層では内部を進む光が吸収され、メデュラ層では光の散乱・吸収が発生する。人間の髪の毛はメデュラ層の大きさがかなり小さいため、メデュラ層による影響が小さい。そのため従来の髪の毛のモデルでは、キューティクル層、コルテックス層の2層のみを考慮したモデル化が行われていた。一方ダブルシリンダーモデルではメデュラ層を含んだ3層を考慮したモデル化が行われており、各層の性質を考慮した計算を行うために、表1に示す10種類のパラメータを用いる。

3.2 毛の輝度計算

多くの髪の毛・毛皮のための散乱モデルは毛の繊維1本を円柱で近似することで以下の式のように輝度計算を行う。

$$L_r(\omega_r) = \int L_i(\omega_i) S(\omega_i, \omega_r) \cos\theta_i d\omega_i \quad (1)$$

ここで、 ω_i と ω_r は光の入射方向と出射方向、 L_i と L_r は入射・出射時の放射輝度であり、 S は毛の反射特性を表す散乱分布関数、BCSDF (Bidirectional Curve Scattering Distribution Function)である。ダブルシリンダーモデルではMarschnerモデルと同様に、図2に示すローカル座標系において、 ω_i と ω_r を接線に垂直な面とのなす角 θ_i, θ_r と方位角 ϕ_i, ϕ_r を用いて表す。BCSDFは経度方向と方位角方向に分解して定義することができるため、毛の輝度計算の

式(1)は $\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r$ を用いて以下の式(2)のように表すことができる。

表1: Yanらの散乱パラメータ

パラメータ	定義
η	コルテックス層とメデュラ層の絶対屈折率
κ	メデュラ層の半径
α	キューティクル層の傾斜
β_m	経度方向におけるキューティクル層の粗さ
β_n	方位角方向におけるキューティクル層の粗さ
$\sigma_{c,a}$	コルテックス層の吸収係数
$\sigma_{m,s}$	メデュラ層の散乱係数
$\sigma_{m,a}$	メデュラ層の吸収係数
g	メデュラ層での散乱の異方性
l	キューティクル層の厚さ

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} L_i(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r) \cos^2 \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (2)$$

3.3 BCSDF

写実的な毛の質感を表現する上で、光の散乱特性を表す散乱分布関数であるBCSDF (Bidirectional Curve Scattering Distribution Function)は重要な要素であり、散乱モデルによってその定義は異なる。

ダブルシリンダーモデルではメデュラ層での散乱を考慮するため、図3に示すように非散乱成分である R, TT, TRT の3経路に散乱成分である TT^s, TRT^s を加えた合計5種類の光の経路を考慮し、BCSDFは以下の式で表される。なお、 R は光の反射、 T は透過を表す。すなわち、 R は毛の表面で反射した経路を表し、 TT は毛内部で透過を2度経て毛の外部に出る光の経路を表す。

$$S(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r) = \frac{S_R + S_{TT} + S_{TRT} + S_{TT^s} + S_{TRT^s}}{\cos^2 \theta_i} \quad (3)$$

ここで、 S_p は経路 $p = \{R, TT, TRT\}$ における非散乱成分の分布関数であり、非散乱経度関数 M_p と非散乱方位角関数 N_p の積で表される。また、 N_p は毛内部での光の減衰を考慮するための減衰項 A_p と光が毛と衝突した後の分布を表す分布項 D_p の積で表される。 S_p^s は経路 $p = \{TT, TRT\}$ における散乱成分の分布関数であり、散乱経度関数 M_p^s と散乱方位角関数 N_p^s の積で表される。また、 N_p^s も同様に減衰項 A_p^s と分布項 D_p^s の積で表される。特に減衰項はBCSDFに与える影響が大きいため、減衰項の値の増減によってBCSDFの値は大きく変化する。 S_R^s の値は常に0となるため、計算は行わない。

3.4 先行研究の問題点

BCSDFは減衰項に依存し、減衰項は光の入射位置 h によって大きく値が変化する(図4参照)。先行研究[1][2]における重点的サンプリングは、減衰項の計算・経路の選択・角

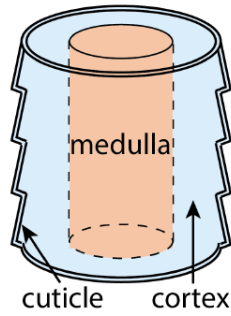


図 1 : 毛構造の模式図
(先行研究[2]より抜粋)

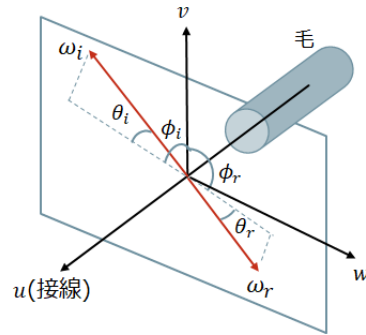
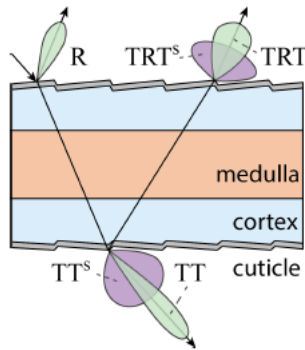
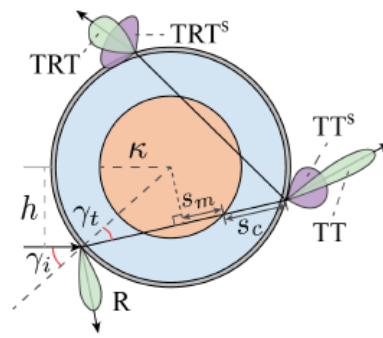


図 2 : 毛のローカル座標系



(a) : 経度方向の断面



(b) : 方位角方向の断面

図 3 : ダブルシリンダーモデルにおける光の経路(先行研究[2]より抜粋)

度のサンプリング・確率密度関数の計算の 4 つの工程に分けられているが、減衰項の計算時に一様サンプリングして求めた h の値を用いているため、減衰項に比例したサンプリングを行っておらず、結果的に画像のノイズが減少し辛くなる。

4. 提案法

4.1 提案法の重点的サンプリング

提案法の重点的サンプリングでは、 h を BCSDF の分布に従ってサンプリングすることでサンプリングの精度を更に高める。提案法は、減衰項の計算、経路の選択、交差位置 h のサンプリング、角度のサンプリング、確率密度関数の計算の 5 つの工程に分けられる。これから各工程について詳しく述べる。

4.2 各経路における減衰項の積分値計算

モンテカルロ積分の推定値の分散を抑えるために、確率密度関数はできるだけ BCSDF に比例するものが望ましい。ダブルシリンダーモデルにおいて BCSDF は経度関数 M_p と減衰項 A_p 、分布項 D_p の積で表されるが、各経路のエネルギーは減衰項 $A_p(h)$ の値に依存する。そのため、各経路について減衰項の計算を行う。また、この時点では減衰項 $A_p(h)$ の計算に必要となる、 h の値が定まっていないため、ここでは減衰項 $A_p(h)$ を $[-1, 1]$ の範囲で h について積分することで各経路の値を求める。また、減衰項の積分値は事前に計算しておくことでレンダリング時の実行時間を短縮することができる。

4.3 経路の選択

次に、求めた減衰項の積分値に比例して経路 p をサンプリングする。経路 p は、減衰項の積分値を離散確率変数とみなしてサンプリングされる。

4.4 h のサンプリング

先行研究[1][2]では、 h を一様分布に従ってサンプリングしていたが、提案法では選択した経路の減衰項 $A_p(h)$ に従って h のサンプリングを行う。具体的には、 h の範囲を一定の区間で区切り、各区間において減衰項 $A_p(h)$ を h について積分する。その後、経路の選択時と同様に閾値を用いて区間 1 つを選択し、選択した区間で h を一様サンプリングする。なお、提案法では区間の分割数を 200 にして計算している。これにより、従来法よりも BCSDF に比例したサンプリングを行うことができるため、より効率的なレンダリングが可能になる。

4.5 角度のサンプリング

方位角のサンプリング方法は選択された経路の種類が非散乱成分か散乱成分かで異なる。非散乱関数の場合、角度 ϕ は分布項 D_p で用いた正規化ガウス関数に従ったサンプリングを行うことで値を得る。なお、サンプリングには C++ の標準ライブラリ関数である、normal_distribution を用いる。 h と経路が選択されると $\phi_p(h)$ が計算可能になり、角度 ϕ を求めるためのサンプリングが可能になる。 ϕ_i の値は重点的サンプリングを開始する時点で既知の情報となっているため、 ϕ と ϕ_i の値から出射方向の方位角 ϕ_r を算出することができる。散乱成分の場合は ϕ_r に関して分布項 $D_p^s(h, \phi)$ の変化が小さいため、一様分布に従って ϕ_r をサンプリングする。

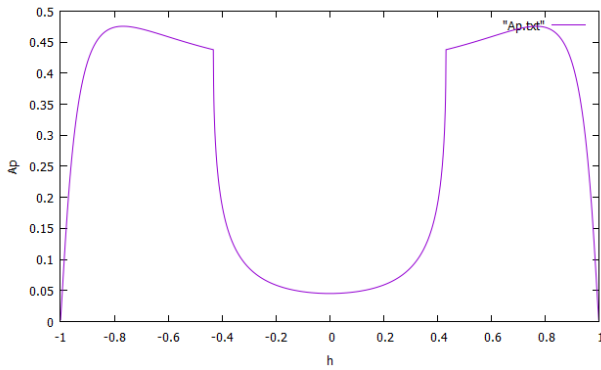


図 4 : 減衰項のグラフ

経度方向も方位角方向の場合と同様に非散乱成分と散乱成分でサンプリング方法が異なる。非散乱成分の場合、経度関数 M_p に従ってサンプリングを行うことで出射方向の角度 θ_r の値を得る。散乱成分の場合は確率密度関数 $p(\theta) = \frac{1}{2}\cos\theta$ に従って θ_r のサンプリングを行う。

4.6 確率密度関数の計算

最後にモンテカルロ積分に使用する確率密度関数 $pdf(p, \theta_i, \phi_i, h)$ を計算する。最終的に pdf の値は以下の式で計算できる。

$$pdf(p, \theta_i, \phi_i, h) = P(p) \cdot pdf(h|p) \cdot pdf(\theta_r|p, h) \cdot pdf(\phi_r|p, h) \quad (4)$$

ここで、 $P(p)$ は経路 p が選択される確率、 $pdf(h|p)$ は経路 p において h が選択される条件付き確率密度、 $pdf(\theta_r|p, h)$ 、 $pdf(\phi_r|p, h)$ はそれぞれ経路 p と入射位置 h が決まった状態で θ_r と ϕ_r が選ばれる条件付き確率密度である。

5. 実験結果

本節ではダブルシリンダーモデルを用いて毛のレンダリングを行った結果を示し、その後提案法と従来法の比較を行う。レンダリングには、CPU が Intel Core i7-6700 3.40GHz を搭載した PC を用いた。

5.1 パラメータの変更による見た目の変化

ダブルシリンダーモデルでは、表 1 に示すパラメータの値を変えることで見た目に変化が生じる。中でも特にコルテックス層の吸収係数である $\sigma_{c,a}$ を変化させた際は見た目の変化が顕著にみられる。図 5 の 2 つの画像はそれぞれ髪の毛のレンダリングを行った結果であり、(a)は Yan らの髪の毛用パラメータ[2]をそのまま使用した画像、(b)は $\sigma_{c,a}$ の値のみを(a)から変更したものである。図の下にはそれぞれ $\sigma_{c,a}$ の値を示している。

2 つの画像を比べると毛の色が大きく異なっていることがわかる。特に髪の毛はメデュラ層が小さく、円筒のほとんどをコルテックス層が占めているため、コルテックス層の吸収係数である $\sigma_{c,a}$ を変化させることで髪の毛の色が大きく変化する。また、 $\sigma_{c,a}$ の値を大きくすると毛の内部で吸収される光のエネルギーが増加し、毛の見た目が黒くなる。逆に $\sigma_{c,a}$ の値を小さくすると毛の内部で吸収される光のエ



(a) : $\sigma_{c,a} = 0.41$ (b) : $\sigma_{c,a} = 4.10$

図 5 : $\sigma_{c,a}$ の値を変更した髪の毛のレンダリング結果

ネルギーが減少し、毛の見た目が白くなる。本研究では $\sigma_{c,a}$ を 1 種類の値で設定しているが、RGB の 3 種類の値で設定して輝度計算を行うことで、所望の色の髪の毛・毛皮の見た目に変更することが可能である。

5.2 従来法との比較結果

本項では提案法と従来法を用いてレンダリングを行った結果を比較する。比較には黒髪の毛の画像、白髪の毛の画像、アライグマの毛の画像を使用する。図 7, 図 8, 図 9 はそれぞれ図 6 の(a)(b)(c)の赤枠部分を拡大したものであり、画像の 1 ピクセル当たりのサンプル数は 256 である。また、左の画像は参照画像、中央の画像は従来法を用いて作成した画像、右の画像は提案法を用いて作成した画像である。さらに、黒髪の毛の画像、白髪の毛の画像、アライグマの毛の画像を従来法と提案法でレンダリングした結果をそれぞれ参照画像と比較した場合の誤差の推移を示す(図 10, 図 11, 図 12)。なお、誤差の計算には以下の式に示す RMSE を用いた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

ここで、 n は画像のピクセル数、 y_i は参照画像の各ピクセルにおける輝度値、 \hat{y}_i は従来法または提案法を用いて作成した画像の各ピクセルにおける輝度値である。

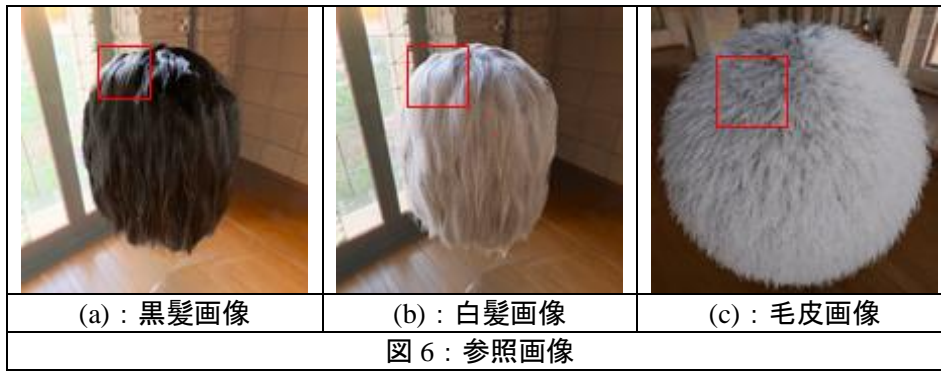


図 7 : 黒髪のレンダリング結果(サンプル数=256)



図 8 : 白髪のレンダリング結果(サンプル数=256)

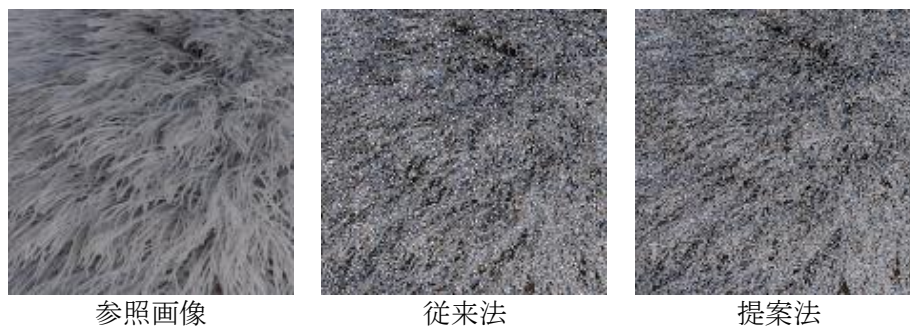


図 9 : アライグマの毛のレンダリング結果(サンプル数=256)

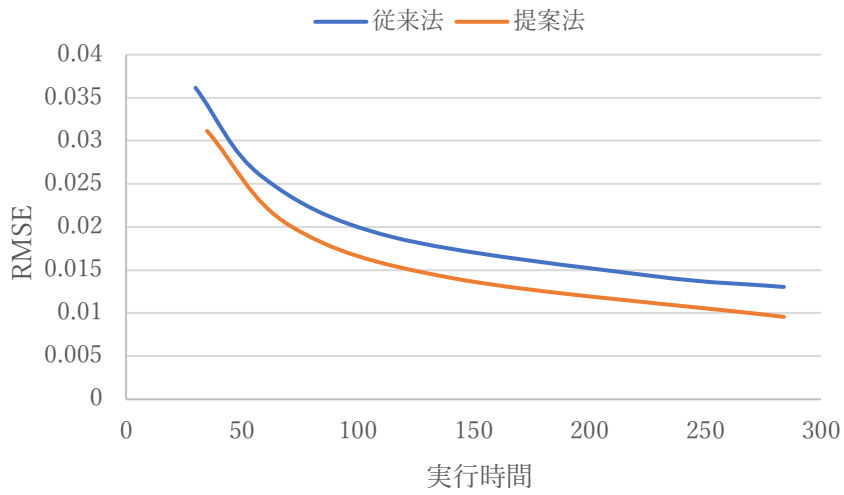


図 10 : 黒髪画像における実行時間と RMSE

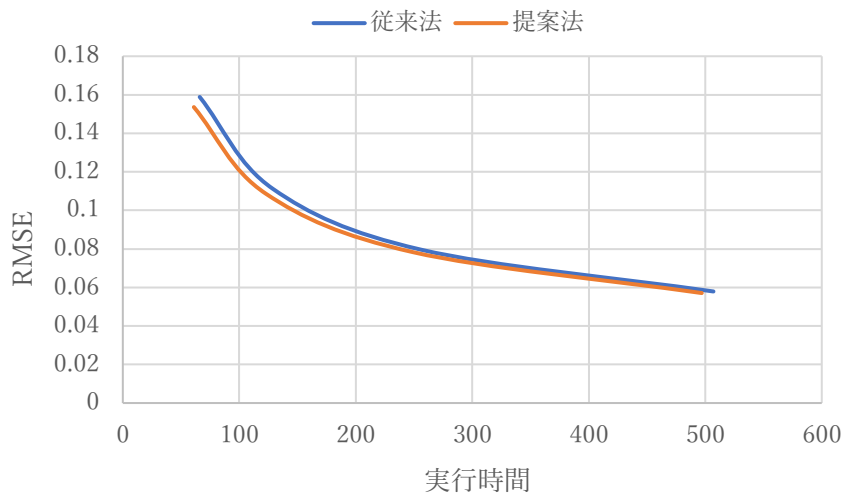


図 11 : 白髪画像における実行時間と RMSE

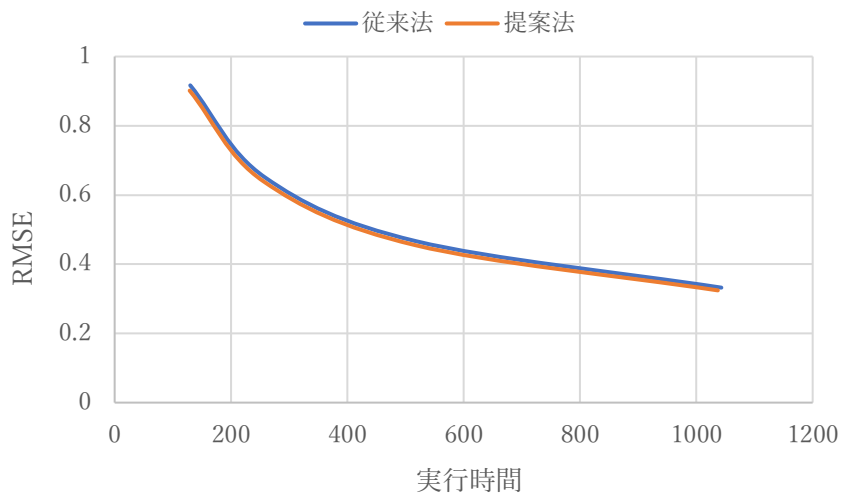


図 12 : アライグマの毛の画像における実行時間と RMSE

表 2：黒髪(図 7)をレンダリングした際に各経路が選択される回数と割合

従来法			提案法		
経路	選択回数	割合	経路	選択回数	割合
R	273114	95.1%	R	344958	93.7%
TT	3181	1.11%	TT	11193	3.04%
TRT	1	0.000348%	TRT	21	0.00570%
TT ^s	10825	3.77%	TT ^s	12089	3.28%
TRT ^s	2	0.000697%	TRT ^s	9	0.00244%
合計	287123	100%	合計	368270	100%

表 3：白髪(図 8)をレンダリングした際に各経路が選択される回数と割合

従来法			提案法		
経路	選択回数	割合	経路	選択回数	割合
R	41595	11.8%	R	44867	12.7%
TT	109479	31.1%	TT	120350	34.0%
TRT	3504	0.997%	TRT	3933	1.11%
TT ^s	191718	54.5%	TT ^s	178518	50.5%
TRT ^s	5242	1.49%	TRT ^s	6128	1.73%
合計	351538	100%	合計	353796	100%

表 4：アライグマの毛(図 9)をレンダリングした際に各経路が選択される回数と割合

従来法			提案法		
経路	選択回数	割合	経路	選択回数	割合
R	92862	13.2%	R	103557	14.6%
TT	96098	13.7%	TT	112340	15.8%
TRT	5194	0.739%	TRT	7196	1.01%
TT ^s	499179	71.0%	TT ^s	474283	66.9%
TRT ^s	9407	1.34%	TRT ^s	11908	1.68%
合計	702740	100%	合計	709284	100%

5.3 比較結果に関する考察

図 10, 図 11, 図 12 から, 提案法がすべての画像において従来法よりも RMSE が小さくなっていることが分かる. 図 10 ではサンプル数 512 での実行時間が従来法は 227 秒, 提案法は 284 秒とかなり伸びたが, 同時間のレンダリング (284 秒) において, 従来法の RMSE が 0.013 であるのに対して, 提案法の RMSE は 0.00957 であり(表 5 参照), RMSE を約 26%削減することに成功している. これは提案法の方が約 1.6 倍早く収束することに相当する. また図 11 ではサンプル数 512 において, 従来法の実行時間が 507 秒, RMSE が 0.0579 であるのに対して, 提案法の実行時間が 497 秒, RMSE が 0.0570 と実行時間・RMSE 共に減少しており, 提案法の方が効率的であるといえる(表 6 参照). さらに図 12 に関してもサンプル数 512 において, 従来法の実行時間が 1043 秒, RMSE が 0.332 であるのに対して, 提案法の実行時間が 1037 秒, RMSE が 0.324 であり, 図 11 と同様に実行時間・RMSE 共に減少しており, 提案法の方が効率的であるといえる(表 7 参照).

次に図 7, 図 8, 図 9 の画像を従来法と提案法でレンダリングした際に各経路が選択される回数と割合を表 2, 表 3, 表 4 に示す. まず表 2 と表 3 に注目すると, 黒髪の場合はかなり高い割合で R の経路が選択され, 白髪の場合は TT^s の経路を選択した回数が過半数を占めている. R の経路は

表 5：図 10 の同時間比較結果

	従来法	提案法
35 秒	0.0343 (76spp)	0.0311 (64spp / 0.91)
71 秒	0.0239 (154spp)	0.0201 (128spp / 0.84)
141 秒	0.0182 (316spp)	0.0141 (256spp / 0.77)
284 秒	0.0130 (635spp)	0.00957 (512spp/0.76)

表 6：図 11 の同サンプル数比較結果

サンプル数	従来法	提案法
64	0.158 (66 秒)	0.153 (61 秒 / 0.97)
128	0.111 (129 秒)	0.108 (123 秒 / 0.97)
256	0.0796 (256 秒)	0.0783 (249 秒 / 0.98)
512	0.0579 (507 秒)	0.0570 (497 秒 / 0.98)

表 7：図 12 の同サンプル数比較結果

サンプル数	従来法	提案法
64	0.916 (130 秒)	0.901 (129 秒 / 0.98)
128	0.650 (259 秒)	0.639 (256 秒 / 0.98)
256	0.466 (518 秒)	0.454 (517 秒 / 0.97)
512	0.332 (1043 秒)	0.324 (1037 秒 / 0.98)

毛に光が当たった際に反射が発生する経路であり, 反射後は物体に衝突することなく, 経路追跡を打ち切ることが多い. 一方, TT や TT^s の経路は光が毛に当たった際に透過

する経路であり、光が透過後に別の毛髪繊維と衝突する確率が高い。そのため、 R の経路が選択される割合が大きい黒髪の方が白髪に比べて経路追跡の時間が短くなった結果、実行時間が白髪に比べて短くなったと考えられる。また、表2、表3、表4の従来法と提案法の経路選択回数合計を比較すると、白髪とアライグマの毛はあまり差がなかったものの、黒髪は提案法の方が多く結果となった。元々、提案法では減衰項を事前計算しているためその分、従来法に比べて実行時間が短縮されるが、黒髪のみサンプリングの実行回数が増えているため、光と毛の衝突回数が増加し実行時間が伸びたと考えられる。

RMSEの減少率に注目すると、白髪とアライグマの画像におけるRMSEの減少率よりも黒髪の画像におけるRMSEの減少率が大きいことから、提案法は非散乱成分が多い毛の画像生成に対して有効な手法であると考えられる。散乱成分に対して提案法があまり機能しなかった理由としては、散乱成分におけるサンプリング手順が非散乱成分の手順に比べて正確性に欠けるということがあげられる。提案法はサンプリングの精度を更に高める手法であるため、正確性に欠ける散乱成分に対しては十分に機能しなかったと考えられる。また、もう一つの理由として散乱成分がBCSDFよりも入射輝度の影響を受けるため、BCSDFに従ったサンプリングではうまく散乱成分のノイズを低減できなかったということが考えられる。

6. 結論

本研究では髪の毛と毛皮を効率的にレンダリングするための重点的サンプリングの手法を提案した。重点的サンプリング実行時に光と毛の繊維の交差位置を表すパラメータ h を求める前に経路選択を行い、選択された経路の減衰項に従って h をサンプリングすることで、従来の重点的サンプリングの手法を拡張した。また、従来法と提案法の両方でレンダリングを行い、結果にどのような変化が生じるのか検証を行った。実験結果としては最大26%ノイズを低減させることに成功し、提案法により最大1.6倍収束を早めることが可能になった。さらに、提案法は黒い髪の毛の例のように非散乱成分が多く含まれるケースにおいて特に有効な手法であることが分かった。

提案法を用いることで従来法に比べてノイズを低減することができたものの、散乱成分が多い毛の画像に関してはノイズの減少量が少なかった。今後の課題として、さらにノイズを低減するために多重重点的サンプリングを用いることがあげられる。多重重点的サンプリングを用いることで、BCSDFに従ったサンプリングに加え、入射輝度に従ったサンプリングを行うことができる。実験結果より散乱成分はBCSDFよりも入射輝度の影響を受けると考えられるため、散乱成分によるノイズが低減され、非散乱成分がノイズの主な要因となり、提案法によるノイズ低減の恩恵が大きくなると予想される。また、Yanらが提案したmulti-scaleモデル[2]に提案法を組み合わせて、検証を行うことも今後の課題である。

参考文献

[1] Ling-Qi Yan, Chi-Wei Tseng, Henrik Wann Jensen, and Ravi Ramamoorthi, “Physically-Accurate Fur Reflectance: Modeling, Measurement and Rendering”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 34, Issue 6, Article No. 185, pp. 1-13, 2015.

[2] Ling-Qi Yan, Henrik Wann Jensen, and Ravi Ramamoorthi, “An Efficient and

Practical Near and Far Field Fur Reflectance Model”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 36, Issue 4, Article No. 67, pp. 1-13, 2017.

[3] Stephen R. Marschner, Henrik Wann Jensen, Mike Cammarano, Steve Worley, and Pat Hanrahan, “Light Scattering from Human Hair Fibers”, ACM Transactions on Graphics, Vol.22, Issue 3, pp. 780–791, 2003.

[4] Arno Zinke and Andreas Weber, “Light Scattering from Filaments”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 13, Issue 2, pp. 342-356, 2007.

[5] Iman Sadeghi, Heather Pritchett, Henrik Wann Jensen, and Rasmus Tamstorf, “An Artist Friendly Hair Shading System”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 29, Issue 4, Article No. 56, pp. 1-10, 2010.

[6] Eugene d’Eon, Guillaume Francois, Martin Hill, Joe Letteri, and Jean-Marie Aubry, “An Energy-Conserving Hair Reflectance Model”, Computer Graphics Forum, Vol. 30, Issue 4, pp. 1181-1187, 2011.

[7] Matt Jen-Yuan Chiang, Benedikt Bitterli, Chuck Tappan, and Brent Burley, “A Practical and Controllable Hair and Fur Model for Production Path Tracing”, Computer Graphics Forum, Vol. 35, Issue 2, pp. 275–283, 2016.

[8] Ellen Carrlee and Lauren Horelick, “The Alaska Fur ID Project: A Virtual Resource for Material Identification”, In Objects Specialty Group Postprints, Vol. 18, pp. 149–171, 2011.

[9] Ling-Qi Yan, “Physically-Accurate Fur Reflectance: Modeling, Measurement and Rendering”, <http://cseweb.ucsd.edu/~viscomp/projects/fur/index.html>, 2015.

[10] Christophe Hery and Ravi Ramamoorthi, “Importance Sampling of Reflection from Hair Fibers”, Journal of Computer Graphics Techniques, Vol. 1, Issue 1, pp. 1–17, 2011.

[11] Jiawei Ou, Feng Xie, Parashar Krishnamachari, and Fabio Pellacini, “Ishair: Importance Sampling for Hair Scattering”, In ACM SIGGRAPH 2012 Talks, Article No. 28, pp. 1, 2012.

[12] Eugene d’Eon, Steve Marschner, Johannes Hanika, “Importance Sampling for Physically-based Hair Fiber Models”, In SIGGRAPH Asia 2013 Technical Briefs, Article No. 25, pp. 1-4, 2013.