

“Physically-Accurate Fur Reflectance: Modeling, Measurement and Rendering”の実装報告

柏木彰[†] 溝口智博[†] 岩崎慶[†]

概要: 本研究報告は SIGGRAPH Asia 2015 で Yan らが発表した論文, “Physically-Accurate Fur Reflectance: Modeling, Measurement and Rendering” の実装に関する研究報告である. この論文では写実的な動物の毛を表現するためのモデルとして, 新しくダブルシリンダモデルを提案し, 実際の計測データを用いて 10 種類の動物に対するパラメータのフィッティングを行っている. 提案手法を用いることで, 従来手法に比べてより写実的な動物の毛を表現することができる. 写実的な動物の毛を表現するためには, 現実の動物の毛の構造をモデル化した散乱分布関数を用いる必要がある. ダブルシリンダモデルでは, 従来のモデルでは考慮されていなかった毛の内部の構造を考慮し, 散乱分布関数に散乱成分と非散乱成分を導入している.

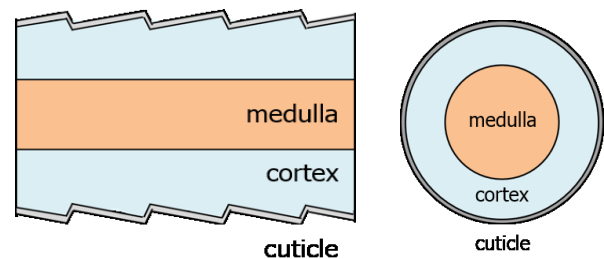
1. ダブルシリンダモデルの概要

毛の繊維構造は, キューティクル層とコルテックス層とメデュラ層の3層で構成されている. 毛を表現するモデルとして Marschner モデル[2]がある. このモデルは人の髪の毛を対象にしたもので, 毛の繊維をキューティクル層とコルテックス層のみで表現しており, メデュラ層を無視している. しかしながら, 動物の毛ではメデュラ層が大きく, 毛の構造の大部分を占めているため動物の毛を表現する際に無視することができない.

Yan らが提案したダブルシリンダモデル[1]では, 動物の毛の構造をキューティクル層, コルテックス層, メデュラ層の3層で表現している(図1). ダブルシリンダモデルにおいて, 各層は以下の性質を考慮している.

- キューティクル層は, 傾きがあり, 表面に粗さと層の厚さがある.
- コルテックス層は, 色の波長ごとに光を吸光する性質を持つ.
- メデュラ層は, 入射した光が散乱する性質を持つ.
- キューティクル層とメデュラ層を 2 つのシリンダで表現し, シリンダに衝突した光は反射,及び屈折する.

ダブルシリンダモデルでは, 毛の表面の光の分布を散乱分布関数で表す. 散乱分布関数は, シリンダでの反射と透過の組み合わせによって経路を分割し, 全ての経路の分布の和で表現する. ダブルシリンダモデルでは, キューティクル層での反射を R , 透過を T , メデュラ層での反射を r , 透過を t として $R, TT, TRT, TrT, TttT, TtrtT, TrRrT, TttRttT$ の 8 経路を考慮する. また, ダブルシリンダモデルでは, メデュラ層を透過する経路において, 散乱成分を考慮する. この散乱成分は, 前計算されたテーブルを参照して計算する. この前計算テーブルはこの論文の著者の Web ページにて公開されている.



緯度方向の構造 方位角方向の構造

図1. ダブルシリンダモデルの構造

2. 動物の毛の物理パラメータ

ダブルシリンダモデルは, 従来法に比べ毛の構造が複雑であるため使用する物理パラメータが多くなっている. ダブルシリンダモデルでは, 従来のモデルでも使用されていた物理パラメータである, コルテックス層の屈折率 η_c と吸光係数 $\sigma_{c,a}$, キューティクル層の粗さ β と傾斜 α の4つのパラメータに加え, 新しく導入されたパラメータである, キューティクル層の厚さ l , メデュラ層の繊維の大きさに対する比率 κ , メデュラ層の屈折率 η_m と散乱係数 $\sigma_{m,s}$, 散乱時の異方性 g の計9つの物理パラメータを使用している.

Yan らの論文[1]では, 実際に 10 種類の動物の毛に関する反射分布を計測しており, 計測データに対する物理パラメータのフィッティングを行っている. その物理パラメータは論文中に記載されている. しかしながら, $\sigma_{c,a}$ に関しては, 前述のように色の波長ごとにパラメータが必要であるが, 実際の計測データが1チャンネルで計測されているため, 1チャンネルのデータとなっている. そのため, フィッティングされたパラメータを使用する場合は, $\sigma_{c,a}$ はフィッティングされたものは使用せずに, RGBごとに任意の値を割り当てる必要がある.

[†] 和歌山大学システム工学部
〒 640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930

3. レンダリングモデル

毛のレンダリングを行うためには、毛の繊維の反射分布を表す散乱分布関数を用いる。従来のモデルとダブルシリンダモデルで大きく違う点は、メデュラ層の考慮による要素であり、散乱分布関数が提案法のものに置き換わる。ダブルシリンダモデルにおける散乱分布関数 S は以下の式で計算される。

$$S(\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, h) = \frac{\sum_p M_p^u(\theta_i, \theta_r) N_p^u(h, \phi)}{\cos^2 \theta_i} \quad (1)$$

$$+ \frac{M^s(\theta_i, \theta_r, \phi) \sum_p N_p^s(h, \phi)}{\cos^2 \theta_i}$$

ここで、 p は経路、 h は方位角方向の入射位置のオフセット、 $\phi = \phi_r - \phi_i$ 、 M_p^u は緯度非散乱成分、 N_p^u は方位角非散乱成分、 M^s は緯度散乱成分、 N_p^s は緯度散乱成分である。

3.1 非散乱成分

緯度非散乱成分 M_p^u は、経路ごとに平均と分散の値が異なる正規化ガウス関数で表現され、以下の式で計算される。

$$M_p^u(\theta_i, \theta_r) = G(\theta_r + \theta_i - \alpha_p, \beta_p) \quad (2)$$

$$G(\theta, \beta) = \frac{e^{-\theta^2/2\beta^2}}{\sqrt{2\pi}\beta} \quad (3)$$

ここで α_p は経路における毛の傾きの累計値、 β_p は経路における毛の粗さの累計値である。

方位角関数 N は、毛の表面に入射してから出射するまでの減衰と分布を考慮したものであり、方位角方向の断面上で2次元のレイトレースをすることで計算する。方位角非散乱成分 N_p^u は以下の式で計算される。

$$N_p^u(h, \phi) = A_p^u(h) \cdot D_p^u(h, \phi) \quad (4)$$

ここで A_p^u は減衰項、 D_p^u は分布項である。

減衰項 A_p^u は、光が毛の内部を通る際の減衰成分であり、各層にぶつかる際のフレネル項と各層間を通る際の吸光成分の積で表される。

$$A_p^u(h) = \prod_{i=1}^n F(p_i) \cdot \prod_{i=2}^n \exp(-\sigma_t(p_{i-1}p_i) \cdot |p_{i-1}p_i|) \quad (5)$$

ここで F はフレネル項、 $|p_{i-1}p_i|$ は各層間の距離、 $\sigma_t(p_{i-1}p_i)$ は吸光係数であり、コルテックス層を通る場合は $\sigma_{c,a}$ を用い、メデュラ層を通る場合は $\sigma_{m,s}$ を用いる。

分布項 D_p^u は、式(3)と同様に正規化ガウス関数であり、レイトレースした際の出射方向を平均としたものである。

3.2 散乱成分

散乱成分は、メデュラ層を透過する経路である $TttT, TtrtT, TttRttT$ の3経路で考慮され、メデュラ層内で散乱してから空気中に出射する経路である。ダブルシリンダモデルでは、非散乱成分と同様に方位角方向と緯度方向の成分に分解されており、非散乱成分で使用していた分布項が、前計算テーブルを用いた散乱分布に置き換わる。前計算テーブルは4次元テーブルとして、方位角方向用の C^N と

緯度方向用の C^M があり、3次元のパラメータから1次元の散乱分布を参照する。

方位角散乱成分 N_p^s は、 N_p^u と同様に減衰項と分布項の積で表されるが、計算を簡単にするために、メデュラ層で散乱した分布は、コルテックス層を透過する際には分布は変化しないという仮定と、出射時のキューティクル層の粗さの影響は受けないという仮定をしている。この仮定の下、 N_p^s は以下の式で計算される。

$$N_p^s(h, \phi) = A_p^s(h) \cdot D_p^s(h, \phi) \quad (6)$$

$$A_{TttT}^s(h) = A_{Tt}(h) \cdot (1 - A_{tt}(h)) \cdot A'_{tT}(h) \quad (7)$$

$$A_{TtrtT}^s(h) = A_{Tt}(h) \cdot A_{tr}(h) \cdot (1 - A_{rt}(h)) \cdot A'_{tT}(h) \quad (8)$$

$$A_{TttRttT}^s(h) = A_{Tt}(h) \cdot A_{tt}(h) \cdot A_{tR}(h) \cdot A_{Rt} \cdot (1 - A_{tt}(h)) \cdot A'_{tT}(h) \quad (9)$$

$$D_p^s(h, \phi) = C^N(\phi - \Phi_p^s(h); h'/\kappa, \sigma_{m,s}/\kappa, g) \quad (10)$$

ここで、 A_p^s は減衰項、 A'_{tT} は仮定により近似した減衰項で $A'_{tT} = \exp(-\sigma_{c,a} \cdot (1 - \kappa))$ 、 D_p^s は散乱項、 Φ_p^s はメデュラ層を透過した際の入射角度、 h' はメデュラ層を透過した方向に対するオフセット値である。

緯度散乱成分 M^s は、緯度方向のメデュラ層内で散乱してから出射する分布である。 M^s は各経路において同じ変数を共有するので経路に依存しないが、散乱分布が方位角 ϕ に依存している。 M^s は以下の式で計算される。

$$M^s(\theta_i, \theta_r, \phi) = \mu(\theta_i) \cdot F_t(\theta_r) \cdot C^M(\theta'_i; \theta'_r, \sigma_{m,s}/\kappa, g) \quad (11)$$

ここで、 F_t は散乱してから出射する際のメデュラ層とキューティクル層におけるフレネル透過項の積、 C^M はメデュラ層での散乱分布、 μ は正規化項である。また、 θ'_i と θ'_r はメデュラ層に入射、出射する角度でキューティクル層とメデュラ層で2回屈折させて計算する。

散乱分布は ϕ に依存しているが、前計算テーブルは $\phi = 0$ のローブと $\phi = \pm\pi$ のローブの2つのローブが作成されている。実際の M^s の計算では、2つのローブを用いて計算した M^s を ϕ に関して線形補間する。

$$M^s(\theta_i, \theta_r, \phi) = \frac{\pi - |\phi|}{\pi} M^s(\theta_i, \theta_r, 0) + \frac{|\phi|}{\pi} M^s(\theta_i, \theta_r, \pi) \quad (12)$$

参考文献

- [1] Yan, L. Q., Tseng, G.W., Jensen, H. W., Ramamoorthi, R.: Physically-Accurate Fur Reflectance: Modeling, Measurement and Rendering, ACM Trans. Graph., Vol. 34, No. 6, pp. 185:1-185:13 (2015).
- [2] Marschner, S. R., Jensen, H. W., Cammarano, M., Worley, S., Hanrahan, P.: Light Scattering from Human Hair Fibers, ACM Trans. Graph., Vol. 22, No. 3, pp. 780-791 (2003).