G-18

環境照明下における布のレンダリング

Cloth Rendering under Environment Lighting

水谷 一貴†　　岩崎 慶‡
Kazutaka Mizutani　　Kei Iwasaki

1．はじめに

CG 分野において，布の質感をリアルに表現することは，重要な課題のひとつであり，多くの研究がなされてきた．写実的な布のレンダリングは，布特有の光沢や質感といった異方性 BRDF を計算し，環境マップで表現された照明を用いることで行われる．しかしながら，環境マップで表現された照明を利用したレンダリング手法では，全方位からの入射光を考慮する必要があり，計算コストが高い処理と言える．

そこで，本研究では球面ガウシアンを用いることで，環境マップで表現される照明下でのリアルで高速な布のレンダリング方法を提案する．

2．関連研究

Sadeghi ら[1] は様々な布の繊維における散乱光の測定値から求めた実用的な BRDF モデルを提案した．Sadeghi らの手法では，布表面の輝度 $L(\omega_o)$ を次式によって計算する．

$$L(\omega_o) = \int f_r(t, \omega_i, \omega_o) L_i(\omega_i) \cos\theta_i \, d\omega_i \qquad (1)$$

ここで，f_r は BRDF，t は接線，ω_i は入射方向，ω_o は出射方向，θ_i は入射方向と法線平面との成す角度であり，L_i は入射光，つまり環境マップにおける輝度である．式 (1) の積分において全方位からの入射光を考慮しなければならず，計算コストが高いといえる．そこで本研究では，Xu ら[2]の手法を基に，環境マップを J 個の球面ガウシアンの線形和として近似すること ($L(\omega_i) = \sum_{j=1}^{J} L_j G_j(\omega_i)$，$L_j$は球面ガウシアンの振幅) で計算コストを抑え，高速に布をレンダリングする手法を提案する．

3. 提案手法

布表面の輝度 $L(\omega_o)$ は次式で表される．

$$L(\omega_o) = \sum_{j=1}^{J} L_j \int_{\Omega} G_j(\omega_i) f_r(t, \omega_i, \omega_o) \cos\theta_i \, d\omega_i \qquad (2)$$

ここで，Ω は全方位，$G_j(\omega_i) = G(\omega_i; \omega_j, \lambda_j) = exp\left(2(\omega_i \cdot \omega_j - 1)/\lambda_j^2\right)$ は中心軸 ω_j，幅 λ_j の球面ガウシアン，f_r は BRDF，t は接線である．式 (2) の計算は，図 1 に示すように，法線，接線，従接線を基底とするローカルな座標系において行われる．θ は法線平面との成す角度であり，φ は法線を基に計算される．f_r は [1] により表面散乱成分 $f_{r,s}$ と体積散乱成分$f_{v,s}$ とに分けられ，$f_r(t, \omega_i, \omega_o) = \left(f_{r,s}(t, \omega_i, \omega_o) + f_{r,v}(t, \omega_i, \omega_o)\right) / \cos^2\theta_d$ のように表される．

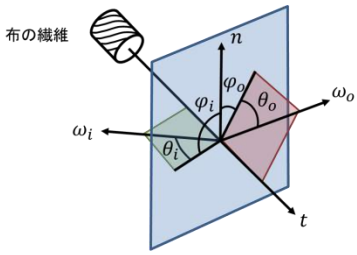


図 1　ローカル座標系

3.1　表面散乱成分

表面散乱成分 $f_{r,s}$ は次式によって計算される．

$$f_{r,s}(t, \omega_i, \omega_o) = F_r(\eta, \theta_d, \varphi_d) \cos\left(\frac{\varphi_d}{2}\right) g(\gamma_s, \theta_h) \qquad (3)$$

ここで，η は屈折率，$\varphi_d = \varphi_i - \varphi_o$，$\theta_h = (\theta_i + \theta_o)/2$，$\theta_d = (\theta_i - \theta_o)/2$ であり，$g(\gamma_s, \theta_h)$ は $g(\gamma_s, \theta_h) = exp\left(-\theta_h^2/2\gamma_s\right)/\sqrt{2\pi\gamma_s}$ で表される [1]．また，式 (2) の積分において，f_r の表面散乱成分 $f_{r,s}$ について積分した結果を M_s とすると，M_s は次式で計算される．

$$M_s = \int_{\Omega} G_j(\omega_i) F_r(\eta, \theta_d, \varphi_d) \cos\left(\frac{\varphi_d}{2}\right) g(\gamma_s, \theta_h) \frac{\cos\theta_i}{\cos^2\theta_d} \, d\omega_i \qquad (4)$$

球面ガウシアン G_j を θ と φ 方向に分解すると，球面ガウシアン G_j は，2 つの 1D circular ガウシアンの積として表すことができ，Ω 上の積分は θ_i および φ_i 上の 2 重積分として展開することができる．1D circular ガウシアン$g_j^c(\theta_i)$ および $g_j^c(\varphi_i)$ はそれぞれ $g_j^c(\theta_i) = g^c(\theta_i; \theta_j, \lambda_j) = \exp\left(2\left(\cos(\theta_i - \theta_j) - 1\right)/\lambda_j^2\right)$，$g_j^c(\varphi_i) = g^c(\varphi_i; \varphi_j, \lambda_j') = \exp\left(2\left(\cos(\varphi_i - \varphi_j) - 1\right)/\lambda_j'^2\right)$ であり，これらの積は$G_j(\omega_i)$ と等しくなる．ここで，$\lambda_j' = \lambda_j / \sqrt{\cos\theta_i \cos\theta_o}$ である．また，$g(\gamma_s, \theta_h)$ は 1D circular ガウシアンとして表現することができ，$g(\gamma_s, \theta_h) = exp\left(-\theta_h^2/2\gamma_s\right)/\sqrt{2\pi\gamma_s} = exp(-(\theta_i + \theta_o)^2/8\gamma_s)/\sqrt{2\pi\gamma_s} \approx g^c\left(\theta_i; -\theta_o, \sqrt{8\gamma_s}\right)/\sqrt{2\pi\gamma_s}$ となる．そうすると，式 (4) は次式のように書き直すことができる．

$$M_s = \iint \left(g_j^c(\theta_i) \, g_j^c(\varphi_i)\right) F_r(\eta, \theta_d, \varphi_d) \cos\left(\frac{\varphi_d}{2}\right) g(\gamma_s, \theta_h) \frac{\cos^2\theta_i}{\cos^2\theta_d} \, d\varphi_i \, d\theta_i$$

$$= \int g_j^c(\theta_i) \, g(\gamma_s, \theta_h) \frac{\cos^2\theta_i}{\cos^2\theta_d} \left(\int g_j^c(\varphi_i) F_r(\eta, \theta_d, \varphi_d) \cos\left(\frac{\varphi_d}{2}\right) d\varphi_i \right) d\theta_i$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\gamma_s}} \int g_j^c(\theta_i) \, g^c\left(\theta_i; -\theta_o, \sqrt{8\gamma_s}\right) \frac{\cos^2\theta_i}{\cos^2\theta_d} \mathcal{N}_s(\lambda_j', \varphi_o - \varphi_j, \theta_d) d\theta_i \qquad (5)$$

†和歌山大学大学院　システム工学研究科,
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

2 つの 1D circular ガウシアン $g_1^c(x;\mu_1,\lambda_1)$ と $g_2^c(x;\mu_2,\lambda_2)$ の積は $g_1^c \cdot g_2^c = b \cdot g_3^c(x;\mu_3,\lambda_3)$ と定義される．このとき，b，μ_3 および λ_3 は次式で表される．

$$\mu_3 = arctan(n,m), \quad \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt[4]{m^2+n^2}}$$

$$b = exp\left(-\frac{2}{\lambda_1^2}-\frac{2}{\lambda_2^2}+\frac{2}{\lambda_3^2}\right) \tag{6}$$

$$m = \frac{cos(\mu_1)}{\lambda_1^2}+\frac{cos(\mu_2)}{\lambda_2^2}, \quad n = \frac{sin(\mu_1)}{\lambda_1^2}+\frac{sin(\mu_2)}{\lambda_2^2}$$

式 (6) を式 (5) 中の 1D circular ガウシアンの積 $g_j^c(\theta_i)\, g^c\left(\theta_i;-\theta_o,\sqrt{8\gamma_s}\right)$ に適用する．その結果を $g_j^c(\theta_i)\, g^c\left(\theta_i;-\theta_o,\sqrt{8\gamma_s}\right) = b \cdot g_j'(\theta_i;\theta',\lambda') = b \cdot g_j^{c\prime}(\theta_i)$ とする．また，$g_j^{c\prime}(\theta_i)$ は 1D ガウシアンで近似することができ，$g_j^{c\prime}(\theta_i) \approx g_j'(\theta_i) = g_j'(\theta_i;\theta',\lambda') = \exp(-(\theta_i-\theta')^2/\lambda'^2)$ となる．そうすると式 (5) は次式のように表される．

$$M_s \approx \frac{b}{\sqrt{2\pi\gamma_s}} \int g_j'(\theta_i)\, \frac{cos^2\theta_i}{cos^2\theta_d}\, \mathcal{N}_s\left(\lambda_j', \varphi_o-\varphi_j, \theta_d\right) d\theta_i \tag{7}$$

次にフレネル項を近似する．フレネル項 $F_r(\eta,\theta_d,\varphi_d) = F_r\left(\eta, cos^{-1}(cos(\theta_d)\, cos(\varphi_d/2))\right)$ は Schlick の近似によって $F_r(\eta,\theta_d,\varphi_d) \approx F_0 + (1-F_0)(1-cos\,\theta_d\, cos(\varphi_d/2))^5$ のように近似することができる．ここで，F_0 は入射角 0 の値で $F_0 = (1-\eta)^2/(1+\eta)^2$ である．この近似式を展開すると，次式のような $cos(\varphi_d/2)$ の多項式として表される．

$$F_r(\eta,\theta_d,\varphi_d) \approx \sum\nolimits_{0\le k\le 5} C_k(\theta_d,\eta)\left|cos^k\left(\frac{\varphi_d}{2}\right)\right| \tag{8}$$

ここで，各次数に対応する係数 $C_k(\theta_d,\eta)$ は $cos\,\theta_d$ の多項式として表される．このとき，$\varphi_i' = \varphi_i - \varphi_j$ とおき，$\mathcal{N}_s$ に式 (8) を代入することで，$\mathcal{N}_s$ は次のように書き換えることができる．

$$\mathcal{N}_s \approx \sum\nolimits_k C_k(\theta_d,\eta) \int_{-\pi}^{\pi} \left|cos^{k+1}\left(\frac{\varphi_o-\varphi_j-\varphi_i'}{2}\right)\right| g^c(\varphi_i';0,\lambda_j')\, d\varphi_i'$$

$$= \sum\nolimits_k C_k(\theta_d,\eta)\, N_s\left(\lambda_j', \varphi_o-\varphi_j\right) \tag{9}$$

ここで，N_s は次数 k の cos 関数と 1D circular ガウシアン g^c との積の積分を計算する関数である．N_s は λ_j' と $\varphi_o-\varphi_j$ にのみ依存する関数なので，2D テーブルとして前計算することが可能である．λ_j' は $\lambda_j' \in [0.001, 10]$ の範囲で対数的にサンプリングし，サンプリング数は 128 で行う．一方，$(\varphi_o-\varphi_j)$ のサンプリング数は 64 である．このように N_s を前計算しておくことで，$\mathcal{N}_s$ を高速に求めることが可能となる．

次に，$cos^2\theta_i/cos^2\theta_d\, \mathcal{N}_s\left(\lambda_j', \varphi_o-\varphi_j, \theta_d\right)$ は θ_i において滑らかに値が変化する関数であり，このような滑らかな関数と 1D ガウシアンとの積との積分計算は，[2] の数値求積法を用いて推定することができる．したがって，式 (7) に示す積分計算を高速に計算することが可能である．計算方法は，積分範囲を一様に分割し，分割された区間において，$cos^2\theta_i/cos^2\theta_d\, \mathcal{N}_s\left(\lambda_j', \varphi_o-\varphi_j, \theta_d\right)$ を直線的に近似し，1D ガウシアンとの積の積分を計算する．この計算は，簡単に求めることができ，積分範囲の分割数は少なくて済むので高速に実行できる．本研究では 4 分割 で十分なレンダリング結果を得ている．

3.2 体積散乱成分

体積散乱成分 $f_{r,v}$ は次式によって計算される．

$$f_{r,v}(t,\omega_i,\omega_r) = F_t(\eta,\theta_d,\varphi_d)\, \frac{(1-k_d)\, g(\gamma_v,\theta_h)+k_d}{\cos\theta_i+\cos\theta_o}\, A \tag{10}$$

ここで，$F_t(\eta,\theta_d,\varphi_d) = 1-F_r(\eta,\theta_d,\varphi_d)$，$k_d$ は等方性散乱係数，γ_v はガウシアンの幅，A は RGB3 要素のアルベド係数である．体積散乱成分の計算は，表面散乱成分と同様に計算することができる．

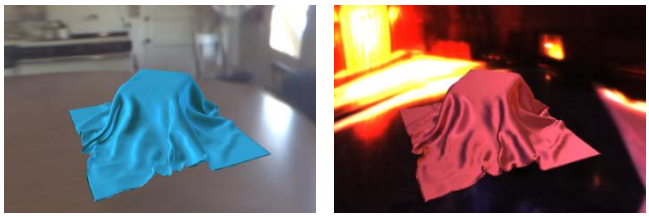


図 2　レンダリング結果

4. 結果とまとめ

本手法でレンダリングされた結果画像を図 2 に示す．また，結果画像に用いたパラメータを表 1 に示す．実行環境は，Inter Core i7 CPU 920 2.67GHz，6GB RAM，NVIDIA GeForce GTS 470 を搭載した PC である．

左図は Linen Plain，右図は Polyester Satin Charmeuse のパラメータを用いた．球面ガウシアンの近似に用いたローブの数はいずれも 10 である．輝度計算はすべて GLSL を用いて計算している．レンダリング時間は 6ms であり，動的に布のパラメータを変更することが可能で，光沢のある反射や，マットな反射といった様々な布の質感をリアルタイムに表現することができる．

本研究では，環境照明下において高速に布のレンダリングを行う手法を提案した．今後の予定として，シャドウイングやマスキング，布の繊維構造を考慮した詳細なレンダリングが挙げられる．

表 1　パラメータ　γ は度数

繊維	η	A	k_d	γ_s	γ_v
Linen Plain	1.46	(0.2, 0.8, 1)	0.3	12	24
Polyester Satin Charmeuse	1.539	(1, 0.37, 0.3)	0.1	2.5	5

参考文献

[1] I. Sadeghi, O. Bisker, J. D. Deken, H. W. Jensen, “A Practical Microcylinder Appearance Model for Cloth Rendering”, ACM Transactions on Graphics, to appear.

[2] K. Xu, L.Q. Ma, B. Ren, R. Wang, S.M. Hu, “Interactive Hair Rendering and Appearance Editing under Environment Lighting”, ACM Transactions on Graphics, Vol.30, No.6, pp. 173:1-173:10 , 2011.