環境照明下の布の高速レンダリングと外観編集
Interactive Cloth Rendering and Appearance Editing under Environment Lighting

水谷一貴⋆　岩崎慶⋆　土橋宜典†　西田友是‡

Kazutaka MIZUTANI⋆, Kei IWASAKI⋆, Yoshinori DOBASHI† and Tomoyuki NISHITA‡

⋆ 和歌山大学　⋆ Wakayama University
† 北海道大学/CREST　† Hokkaido University/CREST
‡ 東京大学/広島修道大学　‡ The University of Tokyo/Hiroshima Shudo University

E-mail: ⋆ {s131048,iwasaki}@sys.wakayama-u.ac.jp

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研究課題の一つである．布のレンダリングでは，現実世界の複雑な照明（環境照明）下において布の質感を表す散乱特性をインタラクティブに変化させて外観を編集することが望まれる．従来の布のレンダリング手法では，単純な光源のみを対象としているか [6]，計測データを用いているため外観をインタラクティブに編集することが難しい [7, 8, 9]．

本稿は，織り合された糸から構成される布の高速レンダリング法および布の外観編集法を提案する．本稿では，布の散乱モデルとして Sadeghi らの提案したマイクロシリンダモデル [6] を使用する．マイクロシリンダモデルにおける布の輝度は，入射光の輝度，布の散乱関数，および布を構成する糸の幾何構造に基づいた重み関数の積を積分することによって計算される．提案法では入射光（環境照明）を球面ガウス関数の線形和で表現する．球面ガウス関数，散乱関数と重み関数の積の積分を，球面ガウス関数と重み関数の畳み込み積分と，球面ガウス関数と散乱関数の積分の積で近似する．畳み込み積分は前計算可能であり，レンダリング時にテーブル参照するだけでよい．球面ガウス関数と散乱関数の積分は解析的に計算可能なため，レンダリング時に布の材質特性をインタラクティブに変更することが可能となる．

1.1 関連研究

布のレンダリングに関する研究は CG の分野において重要な研究分野の一つであり，25 年以上研究がなされてきている．初期のレンダリング手法では，実験によるシェーディングモデルに基づいている [10, 4]．Weil は，レイトレーシングによってリアルな布をレンダリングする手法を提案した [10]．Daubert らは，編み糸を陰関数表面でモデリングし，BTF に類似したデータ構造を用いて布をレンダリングする手法を提案した [4]．Ashikhmin らは，マイクロファセットモデルをもちいてサテンやベルベットをレンダリングする手法を提案した [2]．Adabala らは，単純な BRDF モデルを用いて効率的に布をレンダリングする手法を提案した [1]．これらの手法では，もっともらしい外観の表現に重きを置いており物理的正確さにかける．

布の繊維構造をモデリングすることにより布をレンダリングする手法がいくつか提案されている [13, 3]．これらの手法はリアルな布のレンダリングが可能であるが，反射モデルのコントロールが難しい．安田らは，布の特徴的な光沢反射を再現する手法を提案した [14]．しかしながらこの手法は非常に簡略化したモデルであり，現実の布モデルとの検証・照合を行っていない．Westin らは，繊維レベルの微細構造から布の反射特性を予測するモデルを提案した [11]．Zhao らは，布の CT 画像からボリュームレンダリングを用いて布をレンダリングする手法を提案した [15, 16]．これらのモデルは非常に高品質な布のレンダリングが可能であるが，特定の布に限られている．Irawan らは，編み込んだ絹の布の外観を表現するレンダリング手法を提案した [5]．この手法は，糸によるシャドウィングおよびマスキングの効果を考慮していない．

本稿では，Sadeghi らの提案したマイクロシリンダモデル [6] を用いて布の輝度を計算する．マイクロシリンダモデルは，糸における散乱モデルを定式化し，実際の布の計測データを用いてこのモデルの有効性を検証している．マイクロシリンダモデルでは，散乱関数のパラメータをコントロールすることにより様々な布の散乱特性を表現することが可能である．しかしながら，この手法では環境照明を考慮していない．そこで提案法では，マイクロシリンダモデルを用いて環境照明下の布をインタラクティブにレンダリングする手法を提案する．

1.2 関数・用語の定義

提案法で使用する球面ガウス関数 G・円形ガウス関数 g^c・ガウス関数 g・正規化ガウス関数 g^u は以下の式で表現される．

$$G(\boldsymbol{\omega};\boldsymbol{\xi},\sigma) \quad = \quad \exp(2(\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{\xi}-1)/\sigma^2) \tag{1}$$

$$g^c(x;\mu,\sigma) \;=\; \exp(2(\cos(x-\mu)-1)/\sigma^2) \quad (2)$$
$$g(x;\mu,\sigma) \;=\; \exp(-(x-\mu)^2/\sigma^2) \quad (3)$$
$$g^u(x;\mu,\sigma) \;=\; \exp(-(x-\mu)^2/\sigma^2)/(\sqrt{\pi}\sigma) \quad (4)$$

ここで，$\boldsymbol{\omega}$ は方向（単位）ベクトル，$\boldsymbol{\xi}$ は球面ガウス関数の軸（単位）ベクトル，σ, μ はパラメータで，$\sigma^2/2, \mu$ は分散，平均に相当する．布の輝度は，糸の接線方向 $\mathbf{t}$，法線方向 $\mathbf{n}$ からなるローカル座標系（図 1 参照）で計算される．$\mathbf{t}$ を法線とする平面とのなす角を θ，法線 $\mathbf{n}$ との方位角を ϕ とし，光の入射方向 $\boldsymbol{\omega}_i$ と反射方向 $\boldsymbol{\omega}_o$ の角度をそれぞれ $\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o$ とする．また，$\theta_d = (\theta_i - \theta_o)/2$, $\theta_h = (\theta_i + \theta_o)/2$,$\phi_d = \phi_i - \phi_o$ とする．$\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o$ を $\mathbf{n}$ と $\mathbf{t}$ がなす平面へ投影したベクトルと $\mathbf{n}$ とのなす角をそれぞれ ψ_i, ψ_o とし，$\psi_d = \psi_i - \psi_o$ とする．

2 マイクロシリンダモデルを用いた布の輝度計算

マイクロシリンダモデルでは，布地を 2 つの直交した方向に沿った円筒からなる糸が織り合わされたメッシュとみなす (図 1(c))．糸の織り込みパターンのなかで最小な部分を smallest patch と呼ばれる [6]．布地は smallest patch の反復によって構築される．布地における $\boldsymbol{\omega}_o$ 方向の輝度 $L_o(\boldsymbol{\omega}_o)$ は，smallest patch の 2 つの糸ごとに計算した輝度 $L_1(\boldsymbol{\omega}_o)$ と $L_2(\boldsymbol{\omega}_o)$ の線形和 $L_o(\boldsymbol{\omega}_o) = a_1 L_1(\boldsymbol{\omega}_o) + a_2 L_2(\boldsymbol{\omega}_o)$ で表現される．ここで，a_1 および a_2 は，2 種類の糸が smallest patch を占める面積の割合であり，隙間なく織り込まれている場合 $a_1 + a_2 = 1$ となる．smallest patch を構成する各糸 $j (= 1, 2)$ について接線分布を表す tangent curve を定義する（図 1(d) のグラフ）．糸 j の tangent curve を等間隔にサンプリングして得られる接線の集合を C_j とすると，糸 j における反射光の輝度 $L_j(\boldsymbol{\omega}_o)$ は以下の式で計算される．

$$L_j(\boldsymbol{\omega}_o) = \int_{\Omega} L_i(\boldsymbol{\omega}_i) \sum_{\mathbf{t} \in C_j} f_s(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) W(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) \cos\theta_i d\boldsymbol{\omega}_i$$

ここで，Ω は半球上の方向の集合，$f_s(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ は糸の散乱関数であり，表面散乱関数 $f_{r,s}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ と体積散乱関数 $f_{r,v}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ の和で計算される [6].

$$\begin{aligned} f_s(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) &= (f_{r,s}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) + f_{r,v}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o))/\cos^2\theta_d, \\ f_{r,s}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) &= F_r(\eta, \theta_d, \phi_d)\cos(\phi_d/2) g^u(\theta_h; 0, \gamma_s), \qquad (5) \\ f_{r,v}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) &= F \frac{(1-k_d) g^u(\theta_h; 0, \gamma_v) + k_d}{\cos\theta_i + \cos\theta_o} A. \end{aligned}$$

F_r はフレネル反射率，η は糸の屈折率，F は繊維に入射し再び出射する光のフレネル透過率の積を表し，k_d は等方散乱パラメータ，A はアルベド，γ_s,γ_v はパラメータとする．

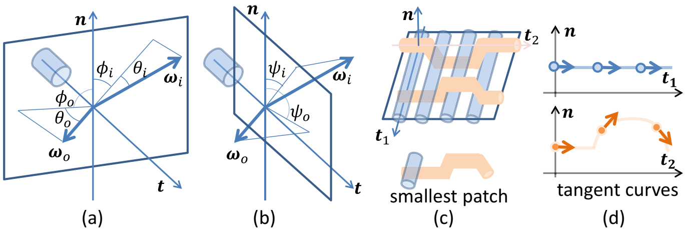

図 1: マイクロシリンダモデルにおける角度の表記，smallest patch, tangent curves.

関数 $W(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ は，シャドウィング・マスキングの関数 $M(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ とスクリーンへ投影される糸の長さを表す関数 $P(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ から以下の式で計算される [6].

$$W(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) = M(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) \cdot \frac{P(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)}{\sum_{\mathbf{t}' \in C_1 \cup C_2} P(\mathbf{t}', \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)} \quad (6)$$

$M(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ と $P(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o)$ は，表記簡略化のため $D(x, y, z) = (1-x) \cdot y \cdot z + x \cdot \min(y, z)$ とすると以下の式で表される．

$$M(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) = D(g(\phi_d; 0, \sigma), \max(\cos\phi_i, 0), \max(\cos\phi_o, 0))$$
$$P(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) = D(g(\psi_d; 0, \sigma), \max(\cos\psi_i, 0), \max(\cos\psi_o, 0))$$

ここでパラメータ σ は $15°$ から $20°$ の値とする．

3 提案法

提案法では，環境照明 $L_i(\boldsymbol{\omega}_i)$ を K 個の球面ガウス関数 G の線形和で表現する．

$$L_i(\boldsymbol{\omega}_i) \approx \sum_{k=1}^{K} L_k G(\boldsymbol{\omega}_i; \boldsymbol{\xi}_k, \sigma_k) \quad (7)$$

ここで，$\boldsymbol{\xi}_k$,σ_k,L_k はそれぞれ k 番目の球面ガウス関数の軸ベクトル, ローブの鋭さ，係数を表し，球面ガウス関数の数 K は $K = 10$ としている．以降表記簡略化のため $G_k(\boldsymbol{\omega}_i) = G(\boldsymbol{\omega}_i; \boldsymbol{\xi}_k, \sigma_k)$ とおく．球面ガウス関数の線形和を式 (5) に代入すると，式 (5) は以下の式に変形される．

$$L_j(\boldsymbol{\omega}_o) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{\mathbf{t} \in C_j} \int_{\Omega} G_k(\boldsymbol{\omega}_i) f_s(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) W(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) \cos\theta_i d\boldsymbol{\omega}_i$$

以降，$L_{j,k}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_o)$ を以下の式で定義し，$L_{j,k}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_o)$ の計算について説明する．

$$L_{j,k}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{\Omega} G_k(\boldsymbol{\omega}_i) f_s(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) W(\mathbf{t}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_o) \cos\theta_i d\boldsymbol{\omega}_i \quad (8)$$

散乱関数 f_s は，$\theta_i, \theta_o, \phi_i, \phi_o$ の関数として表現できるため，球面ガウス関数との積の積分は解析的に計算可能であることが知られている [12]. 一方 W は複雑な関数であり，球面調和関数や球面ガウス関数などの基底関数の線形和で表現することも解析的な積分を行うことも難しい (図 2 参照).

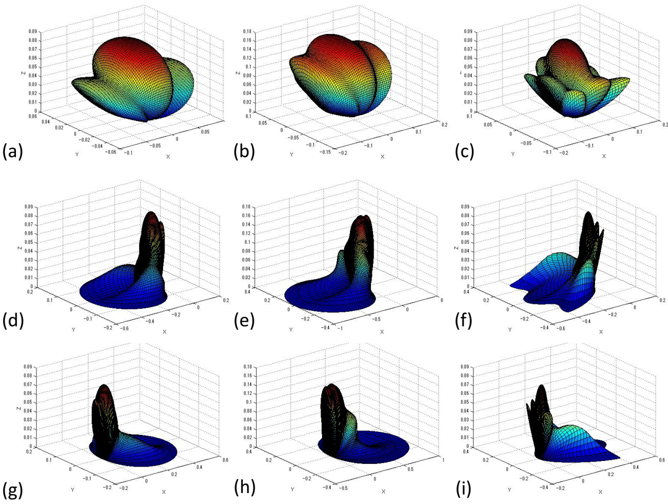

図 2: 関数 $W(\mathbf{t},\boldsymbol{\omega}_i,\boldsymbol{\omega}_o)$ の可視化．上段 (a)(b)(c) は $\mathbf{t}=(1,0,0)^T$，中段 (d)(e)(f) は $\mathbf{t}=(\cos(25°),0,-\sin(25°))^T$，下段 (g)(h)(i) は $\mathbf{t}=(\cos(-25°),0,-\sin(-25°))^T$，1 列目は $(\theta_o,\phi_o)=(-\pi/4,-\pi/3)$，2 列目は $(\theta_o,\phi_o)=(-\pi/4,0)$,3 列目は $(\theta_o,\phi_o)=(-\pi/4,\pi/3)$ のときの W を可視化したものである．

提案法では $L_{j,k}(\mathbf{t},\boldsymbol{\omega}_o)$ を W と G の畳み込み積分を用いて以下の式で近似する．

$$L_{j,k}(\mathbf{t},\boldsymbol{\omega}_o) \approx \frac{\int_\Omega G_k(\boldsymbol{\omega}_i)W(\mathbf{t},\boldsymbol{\omega}_i,\boldsymbol{\omega}_o)d\boldsymbol{\omega}_i}{\int_\Omega G_k(\boldsymbol{\omega}_i)d\boldsymbol{\omega}_i} \times \int_\Omega G_k(\boldsymbol{\omega}_i)f_s(\mathbf{t},\boldsymbol{\omega}_i,\boldsymbol{\omega}_o)\cos\theta_i d\boldsymbol{\omega}_i$$

ここで，$T(\mathbf{t},\boldsymbol{\xi}_k,\boldsymbol{\omega}_o)$ を以下の式で定義する．

$$T(\mathbf{t},\boldsymbol{\xi}_k,\boldsymbol{\omega}_o)=\frac{\int_\Omega G_k(\boldsymbol{\omega}_i)W(\mathbf{t},\boldsymbol{\omega}_i,\boldsymbol{\omega}_o)d\boldsymbol{\omega}_i}{\int_\Omega G_k(\boldsymbol{\omega}_i)d\boldsymbol{\omega}_i} \tag{9}$$

T は糸の幾何形状にのみ依存するため，前計算しておきレンダリング時に参照する．しかしながら T は 6 次元の関数 ($\boldsymbol{\xi}_k,\boldsymbol{\omega}_o$2 次元, σ_k 1 次元, $\mathbf{t}$ は tangent curve 上をサンプルしているため 1 次元）のためデータ量が膨大になるという問題がある．提案法では，$\mathbf{t},\sigma_k$ について離散化したテーブルを $T_{\mathbf{t},\sigma}(\boldsymbol{\xi}_k,\boldsymbol{\omega}_o)$ とし，$T_{\mathbf{t},\sigma}(\boldsymbol{\xi}_k,\boldsymbol{\omega}_o)$ を特異値分解し圧縮する．実験により少ない特異値で $T_{\mathbf{t},\sigma}(\boldsymbol{\xi}_k,\boldsymbol{\omega}_o)$ を精度よく近似できる．

3.1 円形ガウス関数を用いた輝度計算

次に，球面ガウス関数 G と散乱関数 f_s の積の積分について述べる．本稿では説明簡略化のため表面散乱成分 $f_{r,s}$ の計算について述べるが，体積散乱成分 $f_{r,v}$ についても同様に計算している．$L_{j,k}$ の後半の積分項に式 (5) を代入したものを I_s とおく．

$$I_s=\int_\Omega G_k(\boldsymbol{\omega}_i)F_r(\eta,\theta_d,\phi_d)\cos(\phi_d/2)g^u(\theta_h;0,\gamma_s)\frac{\cos\theta_i}{\cos^2\theta_d}d\boldsymbol{\omega}_i$$

提案法は，I_s を円形ガウス関数 g^c を用いて計算する．まず，G_k は θ_i,ϕ_i についての円形ガウス関数の積に分解できる．

$$G_k(\boldsymbol{\omega}_i)=g^c(\theta_i,\theta_k,\sigma_k)g^c(\phi_i;\phi_k,\sigma'_k) \tag{10}$$

ここで，θ_k,ϕ_k は $\boldsymbol{\xi}_k$ の角度，$\sigma'_k=\sigma_k/\sqrt{\cos\theta_i\cos\theta_k}$ とする．さらに，ガウス関数 $g^u(\theta_h;0,\gamma_s)$ を以下のように円形ガウス関数で近似する．

$$\begin{aligned}
g^u(\theta_h;0,\gamma_s) &= \frac{\exp\left(-\frac{\theta_h^2}{\gamma_s^2}\right)}{\sqrt{\pi}\gamma_s} \\
&= \frac{\exp\left(-\frac{\left(\frac{\theta_i+\theta_o}{2}\right)^2}{\gamma_s^2}\right)}{\sqrt{\pi}\gamma_s} \\
&= \frac{\exp\left(-\frac{(\theta_i+\theta_o)^2}{(2\gamma_s)^2}\right)}{\sqrt{\pi}\gamma_s}=\frac{g(\theta_i;-\theta_o,2\gamma_s)}{\sqrt{\pi}\gamma_s} \\
&\approx \frac{g^c(\theta_i;-\theta_o,2\gamma_s)}{\sqrt{\pi}\gamma_s}
\end{aligned}$$

さらに，円形ガウス関数同士の積は定数倍の円形ガウス関数で表現される（付録 1 参照）ため，

$$g^c(\theta_i;\theta_k,\sigma_k)g^c(\theta_i;-\theta_o,2\gamma_s)/(\sqrt{\pi}\gamma_s)=\alpha\cdot g^c_i(\theta_i) \tag{11}$$

とおくと，I_s は以下の式に変形される．

$$\alpha\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\frac{g^c_i(\theta_i)\cos^2\theta_i}{\cos^2\theta_d}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}g^c(\phi_i;\phi_k,\sigma'_k)F_r(\eta,\theta_d,\phi_d)\cos(\frac{\phi_d}{2})d\phi_i d\theta_i$$

まず，ϕ_i についての積分を計算する．フレネル項 $F_r(\eta,\theta_d,\phi_d)$ を Schlick の近似によって

$$F_r(\eta,\theta_d,\phi_d)\approx F_0+(1-F_0)(1-\cos\theta_d\cos(\phi_d/2))^5 \tag{12}$$

で計算する．ここで，$F_0=(1-\eta)^2/(1+\eta)^2$ である．この近似式を展開すると，$\cos(\phi_d/2)$ の 5 次の多項式として表現される．

$$F_r(\eta,\theta_d,\phi_d)=\sum_{l=0}^{5}C_l(\theta_d,\eta)\cos^l(\phi_d/2) \tag{13}$$

ここで $C_l(\theta_d,\eta)$ は $\cos^l(\phi_d/2)$ の係数とする．式 (13) を I_s に代入すると ϕ_i についての積分は以下の式で計算される．

$$\sum_{l=0}^{5}C_l(\theta_d,\eta)\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}g^c(\phi_i;\phi_k,\sigma'_k)\cos^{l+1}\left(\frac{\phi_i-\phi_o}{2}\right)d\phi_i \tag{14}$$

式 (14) の積分は ϕ_o,ϕ_k と σ'_k の 3 次元テーブル $T_l(\phi_o,\phi_k,\sigma'_k)$ として前計算することが可能である．次に，θ_i についての積分を計算する．式 (14) を I_s に代入すると以下の式に変形される．

$$I_s\approx\alpha\sum_{l=0}^{5}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}g^c_i(\theta_i)\frac{\cos^2\theta_i}{\cos^2\theta_d}C_l(\theta_d,\eta)T_l(\phi_o,\phi_k,\sigma'_k)d\theta_i \tag{15}$$

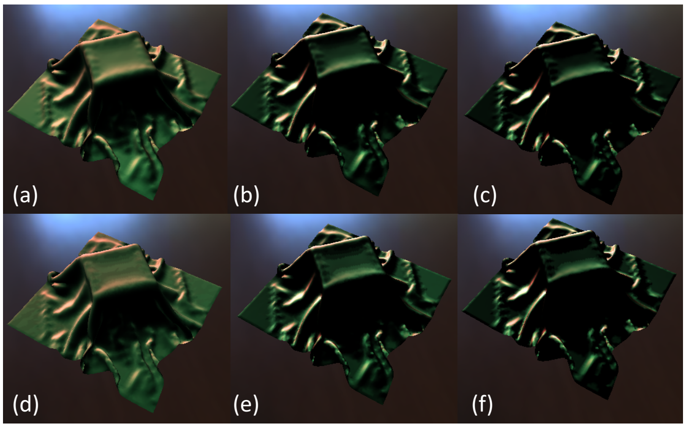

図 3: 赤い糸と緑の糸からなるシルクショットファブリックの例．球面ガウス関数 $G(\omega_i, (0,1,0), \sigma)$ を入射照明としてレンダリングした例．上段が参照画像，下段は畳み込み積分結果を特異値分解して輝度を計算した例．

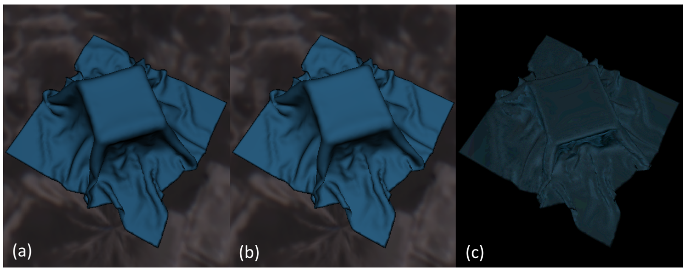

図 4: リネンのレンダリング結果．(a) は提案法によるレンダリング結果，(b) は参照画像，(c) は差分画像 (輝度を 8 倍で表示).

θ_i についての積分を計算するために，円形ガウス関数 $g^c(\theta_i)$ をガウス関数 $g(\theta_i)$ で近似する．次に，$h(\theta_i)$ を以下の式で定義する．

$$h(\theta_i) = \frac{\cos^2 \theta_i}{\cos^2 \theta_d} C_l(\theta_d, \eta) T_l(\phi_o, \phi_k, \sigma'_k) \tag{16}$$

関数 $h(\theta_i)$ は θ_i に関して滑らかに変化する関数であるため，ガウシアンとの積の積分は [12] の手法を用いて計算することができる．積分区間 $[-\frac{\pi}{2}\frac{\pi}{2}]$ を等間隔に分割し，分割区間 $[\theta_s\theta_{s+1}]$ において $h(\theta_i) \approx a_s\theta_i + b_s$ と線分で近似する．線分の係数 a_s, b_s は $h(\theta_s), h(\theta_{s+1})$ から計算される．分割区間 $[\theta_s\theta_{s+1}]$ における積分は以下の式で近似される．

$$\int_{\theta_s}^{\theta_{s+1}} h(\theta_i) g(\theta_i) d\theta_i \approx a_s \int_{\theta_s}^{\theta_{s+1}} \theta_i g(\theta_i) d\theta_i + b_s \int_{\theta_s}^{\theta_{s+1}} g(\theta_i) d\theta_i$$

これらの積分は解析的に計算することが可能となる．提案法では，6 分割で十分なレンダリング結果を得ている．

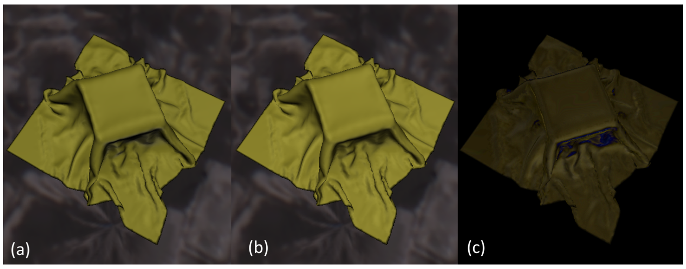

図 5: シルクのレンダリング結果．(a) は提案法によるレンダリング結果，(b) は参照画像，(c) は差分画像（輝度を 4 倍で表示）．

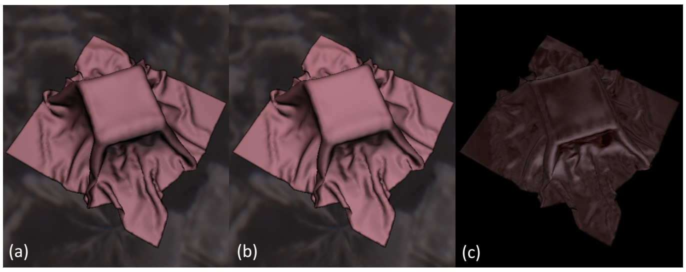

図 6: ポリエステル・サテン・シャルムーズのレンダリング結果．(a) は提案法によるレンダリング結果，(b) は参照画像，(c) は差分画像 (輝度を 4 倍で表示).

4 結果

提案法でレンダリングされた布の画像を図 3,4,5,6,7 に示す．実行環境は CPU が Core i7-2700K, GPU が GeForce 580GTX の PC である．画像サイズは 640×480 で，GLSL のフラグメントプログラムによりピクセル単位で輝度計算を行っている．レンダリング速度は 4 から 8fps である．前計算時間は約 3 時間で特異値分解が大部分を占めている．T_l のデータ量は 1.7MB である．$T_{\mathbf{t},\sigma}$ のデータ量は布ごとに異なり，30MB から 80MB である．寄与率が 90% 以上となる最小の特異値数を用いている．$\boldsymbol{\xi}_k, \boldsymbol{\omega}_o$ はともに半球上を 48×48 だけ離散化して $T_{\mathbf{t},\sigma}$ の特異値分解を行った．

図 3 は関数 W と球面ガウス関数 G との畳み込み積分による近似（下段）と参照画像（上段）を表している．入射照明として 1 つの球面ガウス関数 $G(\boldsymbol{\omega}_i, (0,1,0), \sigma)$ を用いた．布を構成する糸はシルクショットファブリックであり，赤い糸と緑色の糸からなる．図 3(a)(d) は $2/\sigma^2 = 10$, (b)(e) は $2/\sigma^2 = 100$, (c)(f) は $2/\sigma^2 = 1000$ のときのレンダリング結果である．この図より，提案法による畳み込み積分による近似により参照画像と似た画像を生成することができる．

図 4 は，リネンのレンダリング結果を示している．(a) は提案法によるレンダリング結果，(b) は参照画像であり，$6 \times 32 \times 32$ の環境マップの各方向からの寄与を累積して計

図 7: レンダリング結果 (上図：γ_s, γ_v を編集した例，左下に環境照明を表示).

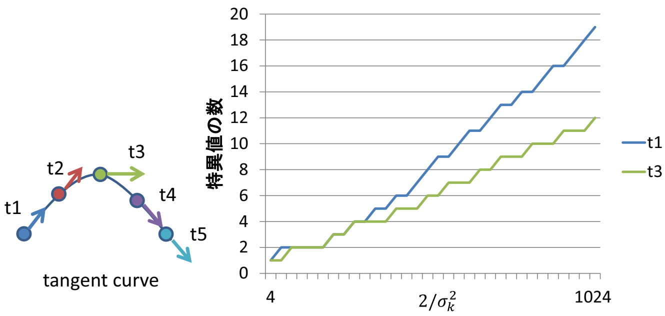

図 8: シルクの糸 1 における $T_{\mathbf{t},\sigma}(\boldsymbol{\xi}_k, \boldsymbol{\omega}_o)$ の寄与率 90% 以上となる特異値の数の片対数グラフ．横軸は $\frac{2}{\sigma^2}$，縦軸は特異値の数を表す．$\frac{2}{\sigma^2}$ が大きい，すなわち球面ガウス関数のローブが鋭くなるに従い必要となる特異値の数が増加する．寄与率 90% となる特異値の数は t_1, t_2, t_4, t_5 で等しいため，t_1 および t_3 を図示している．

算した結果である．(c) は (a) と (b) の差分画像の輝度を 8 倍した画像である．図 4(a) のレンダリング速度は 8fps であり，図 4(b) をレンダリングするのに要した時間は 184 秒であった．提案法により参照画像と遜色ない画像をインタラクティブにレンダリングすることが可能である．リネンにおける $T_{\mathbf{t},\sigma}$ のデータ量は 30MB である．

図 5 は，シルクのレンダリング結果を示している．(a) は提案法によるレンダリング結果，(b) は参照画像，(c) は (a) と (b) の差分画像の輝度を 4 倍した画像である．シルクにおける $T_{\mathbf{t},\sigma}$ のデータ量は 41MB である．図 6 は，ポリエステル・サテン・シャルムーズのレンダリング結果を示している．(a) は提案法によるレンダリング結果，(b) は参照画像，(c) は (a) と (b) の差分画像の輝度を 4 倍した画像である．シルクにおける $T_{\mathbf{t},\sigma}$ のデータ量は 66MB である．

図 7 に散乱関数のパラメータ γ_s, γ_v を変更することにより，ポリエステル・サテン・シャルムーズ布の外観を編集

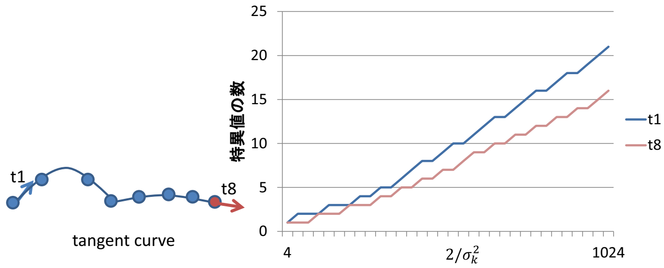

図 9: ポリエステル・サテン・シャルムーズの糸 1 における $T_{\mathbf{t},\sigma}(\boldsymbol{\xi}_k, \boldsymbol{\omega}_o)$ の寄与率 90% 以上となる特異値の数の片対数グラフ．横軸は $\frac{2}{\sigma^2}$，縦軸は特異値の数を表す．$\frac{2}{\sigma^2}$ が大きい，すなわち球面ガウス関数のローブが鋭くなるに従い必要となる特異値の数が増加する．寄与率 90% となる特異値の数が t_1, t_2, t_3, t_4 および t_5, t_6, t_7, t_8 で等しいため，t_1 および t_8 を図示している．

している（ハイライトが鋭くなっている）レンダリング例およびシルクとベルベットのレンダリング例を示す．

図 8,9 にシルクおよびポリエステル・サテン・シャルムーズの糸 1 における特異値の数のグラフを示す．球面ガウス関数のローブの鋭さを表す $2/\sigma_k^2$ が大きくなるに従い寄与率 90% となる特異値の数が増加しているが，比較的少ない特異値数で高次元データを表現できている．

5 まとめ

本稿は，環境照明下における布の高速レンダリング法および外観編集法を提案した．環境照明を球面ガウス関数の線形和で近似し，球面ガウス関数，重み関数および散乱関数の三重積積分を，球面ガウス関数と重み関数の畳み込み積分と球面ガウス関数と散乱関数の積分の積で近似することによりインタラクティブレンダリングを可能にした．球面ガウス関数とガウス関数で表現される散乱関数の積分は，球面ガウス関数を円形ガウス関数の積に分解することで解析的に計算することが可能となった．これにより，散乱関数の各種パラメータをレンダリング時に動的に変更することができ，布の外観編集をインタラクティブな速度で行うことが可能となった．

提案法の欠点として影を考慮していない点が挙げられる．また，重み関数を前計算するため，布の糸の構造をインタラクティブに編集することが難しい．そのため，今後の課題として影の考慮および重み関数の前計算の高速化が挙げられる．

謝辞

本研究は，科研費 (若手研究 (B) 研究課題番号：24700093) および科研費（新学術領域研究研究課題番号：13324688）の助成を受けたものである．

参考文献

[1] Neeharika Adabala, Nadia Magnenat-Thalmann, and Guangzheng Fei. Visualization of woven cloth. In *Proc. of Eurographics Symposium on Rendering*, pages 178–185, 2003.

[2] Michael Ashikmin, Simon Premože, and Peter Shirley. A microfacet-based brdf generator. In *Proc. of SIGGRAPH'00*, pages 65–74, 2000.

[3] Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Ying-Qing Xu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Realistic rendering and animation of knitwear. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9(1):43–55, 2003.

[4] Katja Daubert, Hendrik P. A. Lensch, Wolfgang Heidrich, and Hans peter Seidel. Efficient cloth modeling and rendering. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 63–70, 2001.

[5] Piti Irawan and Steve Marschner. Specular reflection from woven cloth. *ACM Transactions on Graphics*, 31(1):11:1–11:20, 2012.

[6] Iman Sadeghi. *Controlling the Appearance of Specular Microstructures*. PhD thesis, UC San Diego, 2011.

[7] Mirko Sattler, Ralf Sarlette, and Reinhard Klein. Efficient and realistic visualization of cloth. In *Eurographics Symposium on Rendering*, pages 167–177, 2003.

[8] Yuki Takeda, Huynh Quang Huy Viet, and Hiromi T. Tanaka. Image-based rendering of the anisotropic brdf of woven fabrics. In *Eurographics Multimedia Workshop*, pages 135–143, 2004.

[9] Jiaping Wang, Peiran Ren, Minmin Gong, John Snyder, and Bainin Guo. All-frequency rendering of dynamic, spatially-varying reflectance. *ACM Transactions on Graphics*, 28(5):133:1–133:10, 2009.

[10] Jerry Weil. The synthesis of cloth objects. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 20(4):49–54, 1986.

[11] Stephen H. Westin, James R. Arvo, and Kenneth E. Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. In *Proc. of SIGGRAPH'92*, pages 255–264, 1992.

[12] Kun Xu, Li-Qian Ma, Bo Ren, Rui Wang, and Shi-Min Hu. Interactive hair rendering and appearance editing under environment lighting. *ACM Transactions on Graphics*, 30(6):173:1–173:10, 2011.

[13] Ying-Qing Xu, Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Enhua Wu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Photorealistic rendering of knitwear using the lumislice. In *Proc. of SIGGRAPH2001*, pages 391–398, 2001.

[14] Takami Yasuda, Shigeki Yokoi, Jun-ichiro Toriwaki, and Katsuhiko Inagaki. A shading model for cloth objects. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 12(6):15–24, 2013.

[15] Shuang Zhao, Wenzel Jakob, Steve Marschner, and Kavita Bala. Building volumetric appearance models of fabric using micro ct imaging. *ACM Transactions on Graphics*, 30(4):44:1–44:10, 2011.

[16] Shuang Zhao, Wenzel Jakob, Steve Marschner, and Kavita Bala. Structure-aware synthesis for predictive woven fabric appearance. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4):75:1–75:10, 2012.

付録 1

2 つの円形ガウス関数 $g^c(x; .\mu_1, \sigma_1), g^c(x; \mu_2, \sigma_2)$ の積は円形ガウス関数の定数倍 $\alpha \cdot g^c(x; \mu_3, \sigma_3)$ で表される．ここで各パラメータは以下の式で計算される．

$$
\begin{aligned}
\mu_3 &= \arctan(n, m) \\
\sigma_3 &= \frac{1}{\sqrt[4]{m^2+n^2}} \\
\alpha &= \exp(-\frac{2}{\sigma_1^2} - \frac{2}{\sigma_2^2} + \frac{2}{\sigma_3^2}) \\
m &= \frac{\cos\mu_1}{\sigma_1^2} + \frac{\cos\mu_2}{\sigma_2^2} \\
n &= \frac{\sin\mu_1}{\sigma_1^2} + \frac{\sin\mu_2}{\sigma_2^2} \qquad (17)
\end{aligned}
$$