論文

Multi-band BTDF モデルによる織布の蛍光特性の表現 *

飛 谷 謙 介** 水 嶋 彬 貴*** 長 田 典 子***

Expression of Woven Cloth using Computer Graphics via Multi-band BTDF Model Considering Fluorescence Characteristics

Kensuke TOBITANI, Yoshiki MIZUSHIMA and Noriko NAGATA

As the recent improvements in appearance rendering capabilities of computer graphics(CG), CG technologies are widely applied to various field. In this research, we intend to generate high quality CG of woven cloth, and focus attention on fluorescence and transparent characteristics. First of all, we measure excitation spectra, fluorescence spectra and Bidirectional Transmittance Distribution Function(BTDF). Secondly, we combine these measurements and propose a new BTDF approximation model with considering fluorescence color and intensity(Multi-band BTDF model). Finally, we generate lace curtain CG images using this Multi-band BTDF model. The images suggested that fluorescence characteristics are important factor on expression of woven cloth using computer graphics.

Key words: fluorescent, woven cloth, BTDF

1. は じ め に

これまでに我々は織布の高品質な CG 表現のため、異方性反射分布関数（BRDF:Bidirectional Reflectance Distribution Function）や異方性透過散乱分布関数（BTDF: Bidirectional Transmittance Distribution Function）の計測を行い，それらを用いた織布のリアルタイムレンダリングアルゴリズムの提案を行ってきた[1]．しかしながら，これらの BRDF と BTDF は RGB 単位での減衰率をもとに演算が行われており，蛍光や回折など光の波長に依存する現象は表現できていない．

一方で CG の質感を高めるためには，光の波長に依存したさまざまな現象を扱うこ とも有効である．これまでに干渉や回折のシミュレーションや，マル チバンド 計測技術などによって，CG の高質感表現が実現されている．しかしながら紫外や赤外など非可視光領域に着目した CG 研究はあまりみられない．中でも蛍光特性 については，織布や紙など日常的に用いる物にでも確認でき，その素材の質感に 大きく影響を与えているにもかかわらず，これまであまり取り上げられてこなかった．

そこで本研究では，布素材固有の質感を表現する要素の１つとして織布の蛍光特性に着目し，蛍光特性を持つ織布固有の輝きや透け感を CG で表現することを目的とする．そのため，励起スペクトルと蛍光スペクトルの計測を行い，蛍光特性を考慮した BTDF 近似モデルである Multi-band BTDF モデルを提案する．最終的には，蛍光特性を持つ織布であるカーテンをアニメーション化し，多様な布素材を様々な照明条件下で動かしたときの質感をリアルに表現するアニメーションカタログの制作を目指す．

2. 先 行 研 究

カーテンやレースなどの布は，布独特の柔らかな光の透け感を示し，また紫外線の強度など光源のスペクトルによりその見え方は大きく異なる．これらを表現するためには透過特性に加えて，蛍光特性を考慮したモデルが不可欠である．

Adabala らは，Glassnar が提案した工業製品の織り方を元に電子化された WIF(Weave Information File)[2)–4)]を応用し様々な織構造に適応できる反射モデルと透過モデル[5)]を提案し，リアルタイムレンダリングに応用させた手法[6)]も提案している．また，武田らは能装束に着目し，織布の正透過特性に着目した表面幾何モデルを提案している[7)8)]．しかし，いずれの研究も BRDF と BTDF における可視光域の影響のみを対象としており，**図 1** に示すような紫外領域の光学特性は考慮されていない．また，RGB 単位で様々な演算を行っており，波長間での遷移等を表現していないため，蛍光特性を持つ素材を忠実にかつ様々な環境下で表現することができていない．このように，蛍光特性はその誘目性の高さから様々な物に蛍光特性を持つ染料が使われており非常に特徴的である[9)]にも関わらず，その CG 表現についての研究は少ない．その中で，Glassner らは，re-radiation matrix を用いて波長を越えたエネルギーの変換を提案し，燐光と蛍光を表現した[10)]．Wilkie らは，計測した蛍光特性により re-radiation matrix を用いて反射特性と蛍光特性を組み合わせた[11)]．さらに，各波長の BRDF を計測することで BRDF と蛍光特性を結合し，その指向性を示した[12)]．また，Hullin らは，蛍光・燐光現象も考慮した，より一般化された spectral BRDF を bispectral BRRDF として定義した[13)]．しかし，いずれの研究も透過特性は考慮されておらず，本研究の対象である織布の高品質な CG 表現を行うためには透過特性を表現する BTDF に対して蛍光特性を付与する必要がある．

3. 光学特性の計測

織布は素材ごとにその光学特性が異なる．そのため，織布の高品質な CG 表現のためには反射特性，透過特性だけでなく蛍光特性も計測する必要がある．

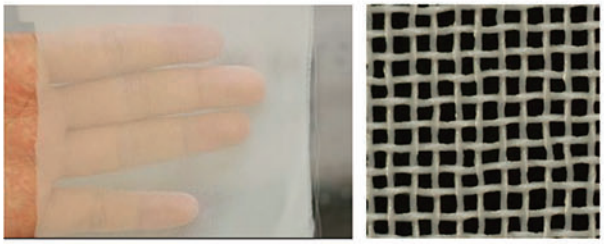
それぞれの計測にはレースカーテンなどに使う，織布の基本的な織り方の一つである「平織り」で織られた白色の布素材（**図 2**）を用いる．

この布素材に対し UV ライトを照射した様子を**図 3** に示す。

* 原稿受付 平成 26 年 5 月 16 日
掲載決定 平成 26 年 8 月 31 日
** 正 会 員 関西学院大学 理工学部／感性価値創造研究センター (兵庫県三田市学園 2-1)
*** 関西学院大学 理工学部／感性価値創造研究センター

(a) Visible light (b) Near ultraviolet light (c) Ultraviolet light

Fig.1: Fluorescence by ultraviolet light



(a)Overview (b)Close up picture

Fig.2: Woven cloth for the measurement

Fig.3: Fluorescence of the woven cloth

図 **3** から本布素材が蛍光特性を有していることが分かる．

3.1 蛍光特性の計測

3.1.1 計測機器

織布の蛍光特性計測には，**図 4** に示す蛍光分光光度計 Jobin Yvon Spex FluoroMax-2 を用いる．計測は暗室で行い，光源には太陽光に近いキセノンランプ Osram XBO 150W/1 OFR を用いる．

3.1.2 計測条件

蛍光スペクトルは励起波長 340nm によって 350nm から 700nm までを 0.5nm 幅で測定した．励起スペクトルは蛍光波長 470nm によって 300nm から 460nm までを 0.5nm 幅で測定した．

3.1.3 計測結果

励起スペクトルと蛍光スペクトルの測定結果をそれぞれ**図 5** および**図 6** に示す．計測結果から 図 **2** に示した織布は，蛍光スペクトルにおいて 430.5nm の波長に放射光のピークがあり，励起スペクトルにおいて 375nm の波長に励起のピークがある蛍光特性を持っていることがわかる．

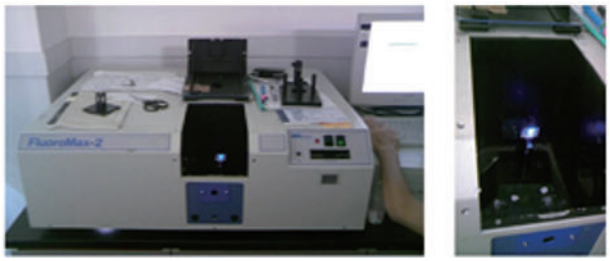
3.2 透過特性の計測

3.2.1 計測機器

計測には**図 7** に示す BRDF 測定装置 OGM-3（OGM : Optical Gyro Measuring Machine）を BTDF 計測用に改良したものを用いる．OGM-3 はカメラ固定で，ライト 2 軸，サンプル 2 軸が回転しながら BTDF の計測を行う．画像計測には解像度 256*256 pixel，有効画素 1100 万画素の冷却 CCD カメラ BS-43 を使用し，光源には自然光に近いメタルハライド光源 LS-M180FB を使用する．本論文では，撮像画像の中心 40 × 40 ピクセル領域における画素の輝度値の平均を透過光とし，あらかじめ試料を設置せずに撮像した画像における同領域の輝度値の平均 (入射光) との比を透過率とした．

3.2.2 計測条件

計測には 3.1 節で計測した織布と同様の素材を用い，**図 8** に定義した座標系において．布素材の横糸方向を X 軸，縦糸方向を Y 軸，布素材の法線を Z 軸に合わせ計測を行う．図 **8** 中 V は視点ベクトル，L は光源ベクトル，N は試料面の法線，H



(a)Outside (b)Inside

Fig.4: Fluorospectro-photometer

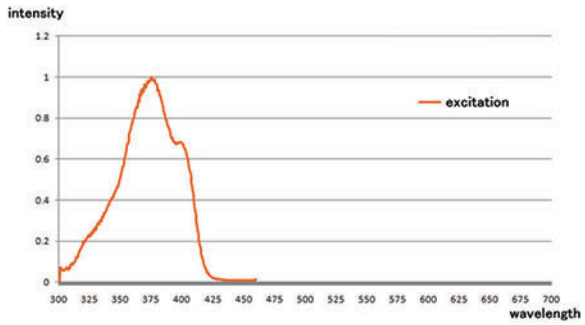


Fig.5: Excitation spectra

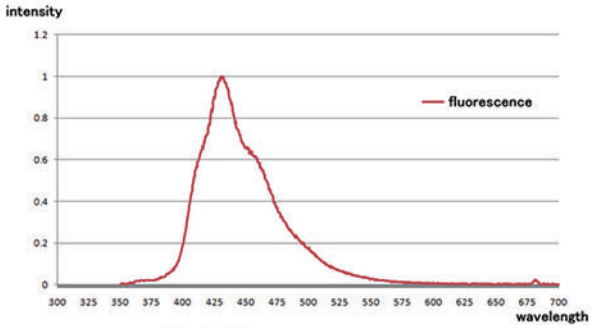


Fig.6: Fluorescence spectra

(a)Outside (b)CCD camera (c)Light source

Fig.7: OGM-3

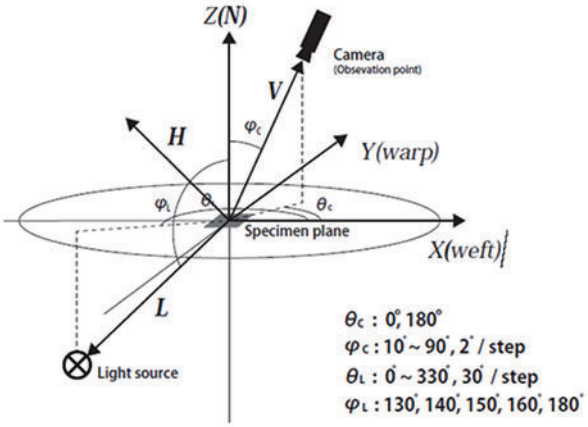
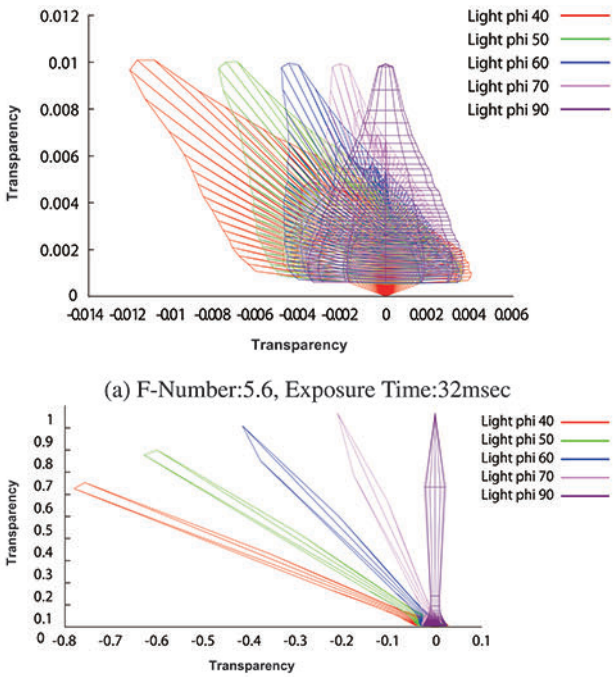


Fig.8: Coordinate system for the measurement



(a) F-Number:5.6, Exposure Time:32msec

(b) F-Number:16.0, Exposure Time:1msec

Fig.9: Measured BTDF

は V と L のハーフベクトルをそれぞれ表す．計測点数は，カメラの仰角 ϕ_c が 10° ～90° の 40 ステップ，カメラの方位角 θ_c は 0° と 180° の 2 ステップ，ライトの仰角 ϕ_L は 130° ～180° の 5 ステップ，ライトの方位角 θ_L は 0° ～330° の 12 ステップの計 4800 点で行う．

3.2.3　計測結果

計測した BTDF の一部 ($\theta_L = 180°$ ，$\theta_c = 0°$,180°) を **図 9** に示す．織布の正透過方向の値とそれ以外の値に大きく差がみられたため， 図 **9**(a) に露光時間 32msec，F 値 5.6 での計測結果を， 図 **9**(b) に露光時間 1msec，F 値 16.0 での計測結果をそれぞれ示す． 図 **9**(a) から，光の入射方向による透過傾向の変化が観測され，異方性があることが確認できた．また，ダイナミックレンジを変化させた計測結果 (図 **9**(b)) から，正透過方向の透過光が最も大きく，そこから角度がずれるにつれ透過光が急激に減少することが確認できる．以上より織布の透過光は 図 **9**(a) に示すような拡散透過成分と 図 **9**(b) に示すような指向性透過成分から構成されていると考えられる．

4.　光学特性の表現

4.1　蛍光特性の表現

蛍光特性を表現するためには蛍光色と蛍光強度を求める必要がある．蛍光は波長に依存して起こる現象のため，波長単位で処理を行う必要がある．そこで計測によって得られた励起スペクトルと蛍光スペクトルをもとに蛍光特性の算出を行う．

4.1.1　蛍光色

蛍光は励起光の波長に依存せず，その分光分布は一定である．よって蛍光スペクトルを RGB へと変換することで，蛍光色を事前に算出可能である．式 (1) によって，色刺激値を XYZ 表色系に変換し，式 (2) により RGB 値に変換する。この RGB 値が蛍光色となる．

$$
\begin{aligned}
X &= K\int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda)L_e(\lambda)d\lambda \\
Y &= K\int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda)L_e(\lambda)d\lambda \\
Z &= K\int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda)L_e(\lambda)d\lambda
\end{aligned}
\tag{1}
$$

$$
\begin{aligned}
R &= 3.241X - 1.537Y - 0.499Z \\
G &= -0.969X + 1.876Y + 0.042Z \\
B &= 0.056X - 0.204Y + 1.057Z
\end{aligned}
\tag{2}
$$

式 (1) 中 $\bar{x}(\lambda)$，$\bar{y}(\lambda)$，$\bar{z}(\lambda)$，は XYZ 表色系における波長 λ による等色関数で，$L_e(\lambda)$ は 図 **6** に示した蛍光スペクトルをそれぞれ表す．定数 K は刺激値 Y を測光値に一致するように定める定数で式 (3) から求める．

$$
K = 100/\int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda)L_e(\lambda)d\lambda \tag{3}
$$

4.1.2　蛍光強度

蛍光強度は光源スペクトルと励起スペクトルの波長ごとの積和によって求めることができる．光源には太陽光のスペクトルを適用し，励起スペクトルは図 **6** に示した計測データを用いる．太陽光のスペクトル分布は阪上が提案したレイリー散乱を用いた近似モデル[14] によって算出する．**図 10** に算出したスペクトル分布を示す．上から順に 22km，100km，200km，300km，400km，500km の大気通過距離における太陽光のスペクトル分布である．22km は夏至の南中時のもっとも大気通過距離が短くなった際の距離で，500km は日没時の最も長くなる

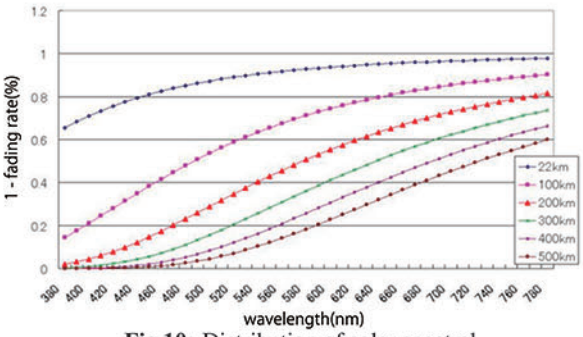


Fig.10: Distribution of solar spectral

時の距離である．大気通過距離が長くなるにつれて，レイリー散乱により短波長が長波長に比べて多く散乱していることが確認できる．以上より，計測した励起スペクトルおよび光源スペクトルとして太陽光の近似モデルを使用することで，任意の季節や時間帯における素材の蛍光強度を忠実に再現することができる．

蛍光強度 I_{fluor} を式 (4) で定義する．

$$I_{fluor} = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} I_{light}(\lambda) I_{exci}(\lambda)}{\sum_{\lambda=380}^{780} I_{light}(\lambda)} \tag{4}$$

式 (4) 中 $I_{light}(\lambda)$ は波長 λ における光源スペクトルの強度，$I_{exci}(\lambda)$ は波長 λ における励起スペクトルの強度をそれぞれ表す．式 (4) に示すように，本研究では蛍光強度を光源のスペクトルの強度に対する相対的な値として表現する．

4.2 透過特性の表現

計測した BTDF データを用いたレンダリングは素材の忠実な質感を容易に実現できる．しかしながら，計測データが膨大になり，また，素材ごとに計測する手間がかかるといった問題がある．そこで、本研究では，織布の透過特性を，鵜野らが提案した Henyey-Greenstein 関数[15]を用いた BTDF 近似モデル (Woven cloth HGF モデル)[1]を用いて表現する．以下に Woven cloth HGF モデルについて述べる．

織布の透過特性は任意の入射方向の入射光に対する任意の視点方向への透過光の比率を値とする BTDF で記述できる．BTDF は以下の式で与えられる．

$$BTDF(\theta_t, \phi_t, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_t(\theta_t, \phi_t)}{L_i(\theta_i, \phi_i)\cos\theta_i} \tag{5}$$

ただし, $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は光源方向から入射した放射照度, $L_t(\theta_t, \phi_t)$ は視点方向へ透過される放射輝度である．

3.2 節で述べたように織布の透過成分は拡散透過成分と指向性透過成分から構成されている．Woven Cloth HGF モデルは，それぞれの成分を Henyey-Greenstein 関数を用いて表現した，織布の質感表現のための物理ベース BTDF モデルである．Henyey-Greenstein 関数は銀河系間のごみの散乱を実測値から説明するために用いられる関数で，Woven Cloth HGF モデルでは，光が糸を透過する際の光の挙動の説明に応用した．Henyey-Greenstein 関数は以下の式で表される．

$$ph(\theta) = \frac{1-g^2}{4\pi(1+g^2-2gcos\theta)^{1.5}} \tag{6}$$

ただし $g \in [-1, 1]$ は，散乱の位相の形を決める重み係数である．g が正の値のときは前方散乱，負の値では後方散乱になる．

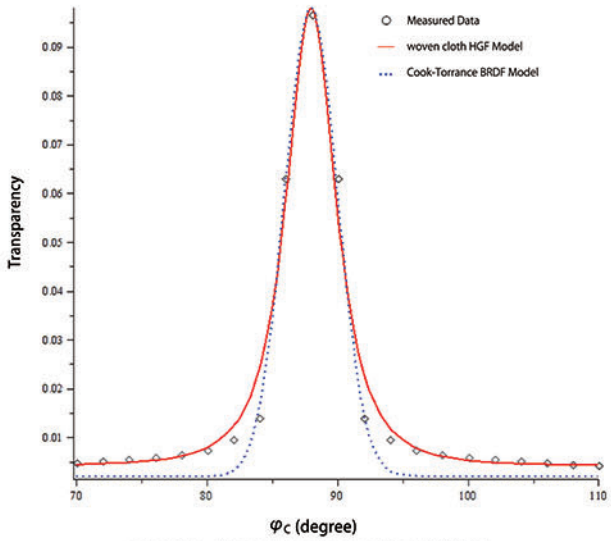


Fig.11: Approximate result of BTDF

また，θ は入射方向ベクトルと散乱方向 (出射方向) ベクトルとがなす角を表す．以上より，視点方向に透過される放射輝度を以下の式で表現することができる．

$$L_{out}(\theta) = L_D + k_d L_{in} exp(-\tau) ph_{diff}(\theta)\rho + k_s L_{in} exp(-\tau) ph_{spec}(\theta)\rho \tag{7}$$

ただし，$L_{out}(\theta)$ は視点方向に透過する放射輝度，L_{in} は放射照度，L_D は糸に当たらずに透過する放射輝度（直接透過光），k_d は拡散透過係数，$exp(-\tau)$ は吸収係数，$ph_{diff}(\theta)$ は拡散透過光の Henyey-Greenstein 関数，ρ は糸の密度，k_s は指向性透過係数，$ph_{spec}(\theta)$ は指向性透過光の Henyey-Greenstein 関数を表す．

次に，式 (7) 中の各パラメータを，本研究で用いた素材に対し最適化を行う．最適化は，3 章で計測した織布の BTDF における，ライトの方位角が 0°，ライトの仰角が 180°，カメラの方位角が 0° と 180°，カメラの仰角が 10° から 90° の 40 ステップで重複点 1 点を除いた計 79 点における計測データを用い，Levenberg-Marquardt 法 (LM 法)[17]を用いた反復法によって行う．ただし，式 (7) 中の糸の密度 ρ は楳泉らが提案した織り構造のパラメータ推定手法[16]を用いて算出した．また BTDF 近似モデルの近似精度の比較のため，Woven cloth HGF モデル以外に，物理法則に基づいた BRDF モデルである Cook-Trrance モデルについても同様に最適化を行った．計測データと Woven Cloth HGF モデルおよび Cook-Torrance モデルの近似結果を**図 11** に示す．

図 **11** から，両モデルとも透過光のピークである指向性透過成分の強度が計測値とよく一致している．しかし，ピークから数度ずれた裾野部分である拡散透過成分の強度は，BRDF モデルである Cook-Torrance モデルではうまく近似出来ていないのに対して，Woven cloth HGF モデルでは計測値とほぼ一致する近似精度が得られた．計測値と各モデルの誤差を最小二乗法によって算出したところ，Cook-Torrance モデルが 4.02×10^{-4}，Woven cloth HGF モデルが 3.33×10^{-4} であった．これらの結果から，Woven cloth HGF モデルが，本研究で用いた織布の BTDF 近似モデルに適していることがわかる．

4.3 Multi-band BTDF モデル

Woven cloth HGF モデルに 4.1 節で述べた蛍光特性を考慮することで Multi-band BTDF モデルを実現する．式 (7) に対し，蛍光特性の表現を加え RGB 成分に分解したモデル式を以下の式に示す．

$$
\begin{aligned}
L_{outR}(\theta) &= L_{DR} + k_d L_{inR} exp(-\tau) ph_{diff}(\theta)\rho + \\
&\quad k_s L_{inR} exp(-\tau) ph_{spec}(\theta)\rho + I_{fluor} F_R \\
L_{outG}(\theta) &= L_{DG} + k_d L_{inG} exp(-\tau) ph_{diff}(\theta)\rho + \\
&\quad k_s L_{inG} exp(-\tau) ph_{spec}(\theta)\rho + I_{fluor} F_G \\
L_{outB}(\theta) &= L_{DB} + k_d L_{inB} exp(-\tau) ph_{diff}(\theta)\rho + \\
&\quad k_s L_{inB} exp(-\tau) ph_{spec}(\theta)\rho + I_{fluor} F_B
\end{aligned}
\tag{8}
$$

ただし，$L_{outR}(\theta)$，$L_{outG}(\theta)$，$L_{outB}(\theta)$ はそれぞれ視点方向に透過する放射輝度の R 成分，G 成分，B 成分，L_{inR}，L_{inG}，L_{inB} はそれぞれ放射照度の R 成分，G 成分，B 成分，L_{DR}，L_{DG}，L_{DB} は糸に当たらずに透過する放射輝度（直接透過光）の R 成分，G 成分，B 成分 F_R，F_G，F_B はそれぞれ 4.1.1 節で算出した蛍光色の R 成分，G 成分，B 成分，I_{fluor} は 4.1.2 節で算出した蛍光強度をそれぞれ表す．

本 BTDF 近似モデルにより，蛍光特性を持つ織布考慮を忠実に表現することが可能になる．

5. Multi-band BTDF による織布の CG 表現

Multi-band BTDF モデル の実装は 3DCG アプリケーション Mental Ray for Maya のプラグインシェーダとして行う．提案モデルの適用対象はレースカーテンとしレンダリングを行った．光源は南中時の太陽光を想定し，透過特性のみを観測するためカーテンを挟んで視点位置と反対側に光源位置を設定した．また，カーテンによる部屋の明るさの変化や，透過光による見え方の変化を表現するため，ラジオシティ法によるグローバルイルミネーションを導入した．Multi-band BTDF モデルを用いてレンダリングした結果を**図 12**，**図 13** に，レンダリング環境を**表 1** にそれぞれ示す．また，本手法におけるレンダリング時間は，表 1 に示したスペックで約 5 分程度であった．

南中時の太陽光を光源としてレンダリングしたため，光源が赤みがかった色をしており，設定した光源環境を忠実に再現していることがわかる．蛍光特性を考慮せずにレンダリングした図 **12** はカーテンが太陽光の色に染まっており，蛍光染料を使用していない織布を太陽光下に置いた時の質感が確認できる．一方，蛍光特性を考慮してレンダリングした図 **13** では蛍光剤を使用しているレースカーテン独特の青みがかった白さが再現できている．次に，図 **12**，図 **13** 内の領域 A，B，C の RGB 値の平均値 (R_{avg}，G_{avg}，B_{avg}) を算出し，比較を行う．結果を**表 2** に示す．表 **2** から，蛍光特性を考慮した場合は考慮しない場合と比べて B の値が増加していることがわかる．事前に計測した蛍光スペクトルのピークが 430.5nm(青・藍色) であることから，提案モデルが紫外線などの不可視光が物体色に与えていた影響を再現できていることが確認された．

Table1: Rendering environment

CPU	Intel ®Core™ 2CPU 6700 @ 2.66GHz 2.67GHz
GPU	NVIDIA Quadro FX 3500
Memory	2.00GB RAM
OS	Microsoft Windows XP Professional ver. 2002 Service Pack 2

Table2: Comparison of pixel value

	Non-fluorescence(Fig.12)			Fluorescence(Fig.13)		
Region	R_{avg}	G_{avg}	B_{avg}	R_{avg}	G_{avg}	B_{avg}
A	147.7	195.0	174.6	150.7	204.2	206.0
B	226.2	226.0	191.4	228.5	236.9	229.4
C	251.2	238.7	202.0	252.5	248.7	238.1

6. ま と め

本研究では，織布の蛍光特性に着目し，蛍光スペクトルと励起スペクトルの計測を行った．また，BTDF モデルをマルチバンド化することで蛍光特性と組み合わせ，蛍光特性を持つ織布固有の輝きや透け感を表現する手法を提案した．その結果，蛍光特性が物体色に大きく影響を及ぼしていることが確認され，織布の高品質な CG 表現に対する蛍光特性のシミュレーションの重要性を示すことができた．

今後の課題として，蛍光強度は電子の存在確率の関係である程度以上からは増加が抑制されるため，強い光源下での蛍光強度を演算時に考慮する必要がある．さらに，蛍光だけでなく燐光やその他のルミネセンスにも対応し，より高品質な CG 表現を目指す．最終的には BRDF と BTDF を波長単位で計測することで，spectral BTDF へと拡張し，より高精度な質感表現を実現すると同時に，生成した CG の定量的な評価方法の確立を目指す．

Fig.12: Rendering image(non-fluorescence)

Fig.13: Rendering image(fluorescence)

参 考 文 献

1) Uno, H., Mizushima, Y., Nagata, N. and Sakaguchi, Y.: Lace curtain: Measurement of BTDF and rendering of woven cloth - Production of curtain catalog-, ACM SIGGRAPH 2008, Talks, Measurement & Textures, Full Conference DVD-ROM, 0960-abstract.pdf, (2008).
2) Andrew Glassnar.: Digital Weaving, Part 1, IEEE Computer Graphics and Applications, **22**, 6, (2002), 108.
3) Andrew Glassnar.: Digital Weaving, Part 2, IEEE Computer Graphics and Applications, **23**, (2003), 77.
4) Andrew Glassnar.: Digital Weaving, Part 3, IEEE Computer Graphics and Applications, **23**, (2003), 80.
5) N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann and G. Fei: Visualization of woven cloth, Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, (2003), 178.
6) N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann, and G. Fei : Real-time rendering of woven clothes, Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology, (2003), 41.
7) 武田祐樹, 松田悠, 田中弘美：能衣装のデジタルアーカイビングに向けて，精密工学会 動画像処理実利用化ワークショップ講演論文集, (2006)，248.
8) 松田悠，武田祐樹，田中弘美：画像解析に基づく二重透過を利用した織布の透過および反射特性の抽出， 情報処理学会 人文科学とコンピュータシンポジウム講演論文集，(2005)，47.
9) S. Yuko: Whiteness effect of fluorescent whitening agents in commercial detergents, Bulletin of Beppu University Junior College, **3**, (1984), 29.
10) A. Glassner: A model of fluorescence and phosphorescence, Proceedings of the 5th Eurographics Workshop on Rendering, (1994), 57.
11) A. Wilkie, R. Tobler, and W. Purgathofer: Combined rendering of polarization and fluorescence effects, Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, (2001), 197.
12) A. Wilkie, A. Weidlich, C. Larboulette, and W. Purgathofer: A reflectance model for diffuse fluorescent surfaces, ACM GRAPHITE ' 06 Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia, (2006), 321.
13) Matthias B. Hullin, Johannes Hanika, Boris Ajdin, Hans-Peter Seidel, Jan Kautz, Hendrik P. A. Lensch,: Acquisition and Analysis of Bispectral Bidirectional Reflectance and Reradiation Distribution Functions, ACM SIGGRAPH 2010, Papers, Article No. 97, (2010).
14) 阪上高師, 長田典子, 坂口公一, 北橋忠宏：任意光源色下の ibr を用いた vr 空間におけるオブジェクトの色変換， 第一回色彩情報シンポジウム in 長野， (2007).
15) L.G.Henyey, J.L.Greenstein: Diffuse radiation in the Galaxy, The Astrophysical Journal, **1**, (1983), 70.
16) 楳泉元輝, 水嶋彬貴, 野村周平, 長田典子：光学異方性を持つ織布の織り構造復元と質感表現，映像メディア学会技術報告， **33**，11，(2009)，49.
17) W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing 2nd ed.," Cambridge University Press, (1992).