# Multi-band BRDF/BTDFによる織布の蛍光特性の表現

-カーテンのアニメーションカタログ制作-

○ 飛谷謙介†, 水嶋彬貴†, 長田典子†

○ Kensuke TOBITANI †, Yoshiki MIZUSHIMA † and Noriko NAGATA †

†: 関西学院大学 大学院理工学研究科 / 感性価値創造研究センター, tobitani@kwansei.ac.jp

<要約> 近年コンピュータグラフィクス(CG: Computer Graphics)による質感表現に関する研究の進展に伴い、CG の技術は様々な分野で多岐にわたる応用が行われている。そこで本研究では織布の高品質な CG 表現を目的として、織布の蛍光特性と透過特性に着目し、励起スペクトル、蛍光スペクトル、異方性透過分布関数(BTDF: Bidirectional Transmittance Distribution Function)の計測を行い、蛍光特性と反射、透過特性を組み合わせることで蛍光特性を持つ織布固有の透け感や透過を表現する Multi-band BRDF/BTDF を提案する。最終的には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。

<キーワード> BTDF, BRDF, カーテン, 蛍光特性

# 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 た[1]. しかしながら、これらの BRDF と BTDF は RGB 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.

中でも蛍光特性は織布や紙など日常的に用いる物でも確認でき、その素材の質感に大きく影響を与えている. それにもかかわらず蛍光特性を考慮した光学モデルや CG 表現の研究はこれまであまりなされていない.

本研究では、布素材固有の質感を表現する技術の 1つとして織布の蛍光特性に着目し、励起スペクトルと蛍光スペクトルの計測を行い、Multi-band BRDF/BTDFによって蛍光特性を持つ織布固有の輝きや透け感を表現する。最終的には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 (WeaveInformation File)[2][3][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、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.



(a)可視光領域 (b)近紫外領域

(c)紫外領域

図1 紫外線による蛍光の様子

### 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.

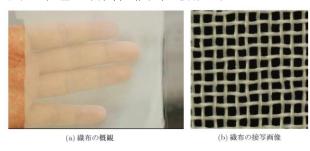


図2 本研究で計測する織布

# 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3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 を用いた.

# 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.





(a) 外観

(b) 内観

図3 蛍光分光光度計

### 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4および図5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.

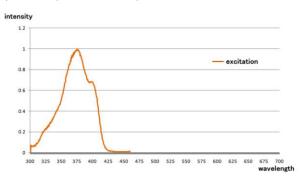


図4励起スペクトルの計測結果

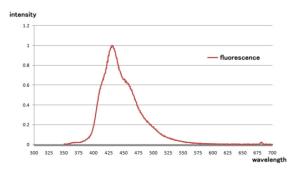


図5 蛍光スペクトルの計測結果

### 3.2 透過特性の計測

### 3.2.1 計測機器

計測に用いる BRDF/BTDF 測定装置 OGM-3 (OGM: Optical Gyro Measuring Machine)を図 6 に示す.

計測は暗室で行い, 光源には自然光に近いメタルハ ライド光源を使用する.

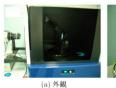






図 6 BRDF/BTDF 測定装置 OGM-3

#### 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7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 7 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 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<sub>c</sub> が 10°~90°の 40 ステップ, カメラの 方位角  $\theta_c$ は 0°と 180°の 2 ステップ, ライトの仰角  $\theta_L$ は 130°~180°の 5 ステップ, ライトの方位角 θ<sub>L</sub>は 0° ~330°の12ステップの計4800点で行う.

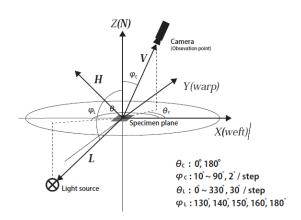
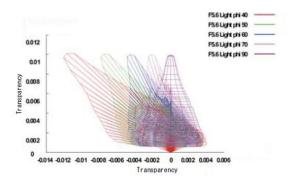


図 7 BTDF 計測座標系

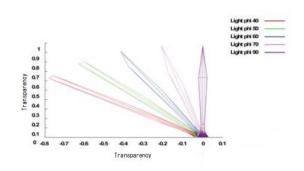
#### 3. 2. 3 計測結果

計測した BTDF の一部( $\theta_L=180^\circ$ )を図 8 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 8(a)に露光時間 32msec, F 値 5.6 で の計測結果を,図 8(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 8(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 8(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 8(a)に示すような拡散透過成分 と図 8(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.



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



(b) F-Number: 16.0 Exposure Time: 1msec 図8BTDF計測結果

# 4. 光学特性の表現

#### 蛍光特性の表現 4.1

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 クトルを基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.

$$X = K \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda$$
(1)

$$R = 3. 241X - 1. 537Y - 0. 499Z$$

$$G = -0. 969X + 1. 876Y + 0. 042Z$$

$$B = 0. 056X - 0. 204Y + 1. 057Z$$
(2)

式(1)中 $\bar{x}(\lambda)$ , $\bar{y}(\lambda)$ , $\bar{z}(\lambda)$ は XYZ 表色系における波長  $\lambda$  による等色関数で、 $L_e(\lambda)$ は図 5 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。

$$K = 100 / \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda$$
 (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4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9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, 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 を使用することにより, 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.

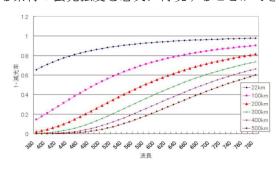


図9 太陽光スペクトル分布

### 4.2 透過特性の表現

織布の透過特性の表現は、鵜野らが提案した Henyey-Greenstein 関数を用いた BTDF 近似モデル[1] と楳泉らが推定した織り構造のパラメータ[15]を用 いて反射光と透過光をそれぞれ算出することによ り実現する. BTDF 近似モデルのパラメータは 3.2 節で計測した BTDF から、Levenberg-Marquardt 法に より推定した.この近似モデルに前節で述べた蛍光 特性を考慮することで Multi-band BRDF/BTDF を実 現する.

### 5. Multi-band BRDF/BTDF

Multi-band BRDF/BTDF の実装は 3DCG アプリケーション Mental Ray for Maya のプラグインとして行う. Multi-band BRDF/BTDF を用いてレンダリングした結果を図 10 にレンダリング環境を表 1 にそれぞれ示す.

表1 レンダリング環境

CPU	Intel®Core <sup>TM</sup> 2 CPU 6700 @ 2.66GHz 2.67GHz
GPU	NVIDIA Quadro FX 3500
メモリ	2.00GB RAM
OS	Microsoft Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 2



(a) HUNTER D

(b) 蛍光特性あり

図10 レンダリング結果

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 10(a) 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 10(b) では白い織布独特の青みがかった白さが再現できている。これにより、紫外線などの不可視光が物体色に影響を与えていたことが確認された。

# 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、BRDF/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.

### 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.
- [2] Andrew Glassnar.: "Digital Weaving, Part 1" IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 22, no. 6, pp. 108 – 118, 2002.
- [3] Andrew Glassnar.: "Digital Weaving, Part 2" *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 23, no. 1, pp. 77–90, 2003.
- [4] Andrew Glassnar.: "Digital Weaving, Part 3" IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 23, pp. 80–89, 2003.
- [5] N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann and G. Fei: "Visualization of woven cloth" *Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, pp. 178–185, 2003.
- [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*, pp. 41–47, 2003.
- [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, pp.248-254 2006.
- [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,pp.47-52,2005.
- [9] S. Yuko: "Whiteness effect of fluorescent whitening agents in commercial detergents" *Bulletin of Beppu University Junior College*, vol. 3, pp. 29–32, 1984.
- [10] A. Glassner: "A model of fluorescence and phosphorescence" *Proceedings of the Fifth Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 57–68, 1994.

- [11] A. Wilkie, R. Tobler, and W. Purgathofer: "Combined rendering of polarization and fluorescence effects" *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 197–204, Citeseer, 2001.
- [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, pp. 321-331, 2006.
- [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] 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, Vol.33, No.11, pp.49-52, 2009.