

光反射特性推定に基づいた絹織物の3DCG再現

3DCG Reproduction of Silk Textile Based on the Estimation of Reflection Properties

望月 宏 祐* 田中 法 博**

Kosuke MOCHIZUKI Norihiro TANAKA

概要

本研究では3DCGによる文化財のデジタルアーカイブを目的として、絹織物表面の織構造による複雑な反射特性を計測するための手法と織の3次元幾何モデルのモデリング手法を提案する。まず計測はグローバルな面ではなく織表面を拡大して画像計測する手法を提案する。このとき絹織物表面の微細構造をミクロな領域で経糸と緯糸ごとに分解して光反射光強度分布を計測する手法を提案する。物体の光反射特性は光反射モデルに基づいて推定し、個々の物体固有の特性はモデルパラメータとして定量化する。また光反射モデルはTorrance-Sparrowモデルをベースとしたモデルを用いる。光反射の計測は任意の照明角度を設定できる光反射計測系を構築し、照明角度を一定間隔で変えながら画像計測を行い反射光強度の分布を獲得する。この計測系のセンサ部分は高解像度のデジタルカメラとマクロレンズを用いることで、織の表面構造を拡大して撮影できるようにする。このときハイライトピークから織の微細面の法線ベクトルを推定し、入射角度、受光角度、反射光強度の3者の幾何的条件を決定し光反射モデルに適用する。そして、織構造を簡易的な3次元幾何モデルで表現する。最後に、モデリングして生成した法線マップと推定された反射特性をもとに絹織物を分光ベースの3DCGで再現することができた。

キーワード：絹織物、デジタルアーカイブ、画像計測、光反射モデル、光反射計測

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックスやコンピュータビジョンといった分野の発展に伴い精密な3DCGによる美術品や文化財のデジタルアーカイブが盛んに行われるようになってきた[1]。これにより、デジタルアーカイブされた物の鑑賞が自由な視線方向や照明方向のもとでできるようになってきている。また、物体のCG再現には分光ベースのレンダリング手法を適用することでディスプレイデバイス等に依存せず、さらに様々な照明シーン下の物体を鑑賞できる

ようになる。

このとき、織物のような物体をデジタルアーカイブするには反射特性が織構造により複雑なため一般的なプラスチック物体等と比較して推定が難しい。これまでの研究では双方向反射率分布関数(BRDF)を計測することで絹織物の反射特性を推定する手法[2]が提案されているが、その計測には大掛かりな計測系と膨大な量の計測回数が必要になるという問題を抱えている。また、円筒形状や球体を用いた簡便

*企業情報学部助教

**企業情報学部教授

なBRDF計測手法が提案されているが、織の詳細な光反射特性を光反射モデル構築までは至っていない[3]。

絹織物等の織物を精密にCG再現することができれば、美術品や文化財のデジタルアーカイブだけではなく、ファッション分野で絹素材を使った衣類製品のデザイン支援のツールなどとしても応用可能である。デザイナーがコンピュータ上でデザインに関する試行錯誤を素早く行いながらモックアップを制作できるようになる。

本研究では、絹織物を対象として反射特性の計測技術を開発する。また、織物を構成する緯糸と経糸は簡易的な3次元幾何モデルでモデリングする。計測データとモデリングしたデータから分光ベースで3DCG再現する手法を提案する。このとき、実際の絹織物の多くはテクスチャを持っている。そういった表面特性が不均一な物体の場合には、対象物体表面の色情報等の空間分布が計測できる画像計測が有効である。この画像計測を分光的に行ったものが分光画像計測である[4]。表面特性が不均一な絹織物の分光反射率の推定手法は文献[5、6]で述べている。本稿では分光反射率の推定までは対象とせず、単色の絹織物を対象に提案手法を適用する。

計測では幾何条件は照明方向のみを変化させ、また画像計測系としては高解像度のカメラとマクロレンズを用いる。対象物体の形状は任意の自由形状とする。対象物体の反射特性は光反射モデルと呼ばれる数学モデルで記述してモデルベースの推定[3]を行う。そして本研究では高精細な画像計測に基づいて、板に単色の絹織物を貼り付けて様々な入射角による画像計測で反射光分布を獲得できるようにする。このとき絹織物の表面構造をグローバルな表面と考えるのではなく、高解像度の画像計測により織物の緯糸と経糸の領域に分解してそれぞれ個別に反射特性を調べ、反射の解析をより単純化させる。その上で絹織物の反射特性を既存の反射モデルと比較する。次に織物の緯糸と経糸による織構造を簡易的な3次元幾何モデルとして法線マップで生成する。これらのデータと推定された反射特性で絹織物を分光ベースの3DCGで再現し、視覚的にその再現精度を検証する。

2. 絹織物の光反射モデル

本稿ではまず絹織物表面の反射特性は光反射モデ

ルで記述できると仮定する。適用する光反射モデルはこれまで本研究で不均質誘電体(プラスチック、革製品、塗料、木材などの多く)の物体等の再現に用いてきたTorrance-Sparrowモデルをベースとしたモデルで記述する[7]。このモデルに絹織物のモデルパラメータを与えて表現する。図1は本研究で用いる光反射の幾何モデルである。視覚系に到達する分光分布を色信号と呼ぶが、本研究では、この色信号を反射モデルにより記述する[7]。

不均質誘電体の物体が持つ表面反射は、物体色として見える拡散反射成分とハイライトとして見える鏡面反射成分によって構成されている。こういった不均質誘電体は、このように大きく2つの反射成分を持つ2色性反射の特性を持つ。反射の幾何モデルは、照明、物体、視覚系の3者の幾何的な関係で記述する。ここでは物体の法線ベクトルは \mathbf{N} 、視線方向ベクトルは \mathbf{V} 、照明方向ベクトルは \mathbf{L} で表す。このとき \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_i 、 \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_l となる、このモデルでは物体表面が微細な凹凸で構成されていると仮定しており、その微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_H であり、 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が φ である。

プラスチック、塗料などの不均質誘電体の表面反射は、物体色として見える拡散反射成分とハイライトとして見える鏡面反射成分によって構成されている。物体表面の光反射のプロセスを分光関数として記述すれば視覚系に入射する色信号 $C(\lambda)$ は光の波長 λ の関数として次式のようになる

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (1)$$

右辺第1項は拡散反射成分、第2項は粗い鏡面反射成分を示す。 $C(\lambda)$ は放射輝度、 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 α 、 β はそれぞれ拡散反射、鏡面反射成分の重み係数である。 F はFresnel関数である。 n は物体表面の屈折率である。一般に不均質誘電体の屈折率は波長に依存しない定数として記述できることが知られている。 D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数であり、 μ によって滑らかさを決める。 G は物体表面の微小な凹凸により生じる微細な影をモデル化した幾何的減衰係数である。ただし、織物はこの光反射モデル

に加え、織りによる3次元的な幾何構造を考慮しなければならない。幾何構造の与え方は本稿の5章で述べる。本研究ではモデルパラメータは緯糸、経糸部分を分けて求める。

3. 絹織物の計測系の試作

本研究では絹織物の光反射特性を計測するための計測系を試作した。図2は試作した計測系の概略図である。この計測系では光源からの入射角を任意に設定することができる。本研究では、受光角の変化による計測の手間と誤差を低減させるためカメラ側への受光角を固定して反射光強度の計測を行う。また、照明光源の方向ベクトルは鏡面球を用いて計測してキャリブレーションを行った。図2は本研究で試作した計測系である。この計測系は三脚に固定したデジタルカメラ (Canon EOS 5D MarkII)、光源 (LED電球OPTILED社製)、光源用クレーン (Texnai AUTO QTVR RC5P-3)、制御用PCから構成されている。本システムで使用しているカメラは2110万画素の解像度を持ち、各画素14bitのダイナミックレンジを持つ。レンズはマクロレンズ(Canon EF100mm F2.8LM IS)を使用する。図3はキャリブレーションに用いた鏡面球である。ここで光源の受光角度設定とカメラの制御、撮影データのPCへの取り込みは自動制御で行う。

4. 絹織物表面の反射特性推定

絹織物の光反射特性は試作した計測系を用いて計測した画像から推定する。まず試作した計測系は鏡面球を用いて照明方向のキャリブレーションを行う。キャリブレーションは照明方向を一定間隔で変えながら次々と画像計測を行い、それぞれの画像の照明方向を鏡面球表面のハイライトピークの位置から推定する。このとき受光角度は固定する。

次に試作した計測系で絹織物を計測し、反射特性を推定する。このときの照明方向は鏡面球を計測したときと同じ条件で画像計測する。

4.1. 注目座標の法線ベクトル推定

対象物体の反射特性を推定するためには、その座標の法線ベクトルを知る必要がある。図4は物体表面の法線ベクトル推定の幾何図である。本研究では絹織物の緯糸、経糸部分を対象として法線ベクトルを推定する。一般にハイライトピークは入射角度と受

光角度が等しい場合に発生するので、その性質を利用して法線ベクトルの推定を行う。このとき緯糸は画像上で画像に対して水平方向に並んでいると仮定すれば次式で対象座標の法線ベクトルが推定できる。

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{L} + \mathbf{V}}{|\mathbf{L} + \mathbf{V}|} \quad (2)$$

このとき法線方向が推定できると入射角 θ_i と受光角 θ_r は $\theta_i = \cos^{-1}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$ 、 $\theta_r = \cos^{-1}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})$ として求めることができる。

4.2. 反射モデル推定

物体表面 (緯糸、経糸) の反射特性は反射モデルの未知パラメータとして定量的に推定する[6]。計測データに反射モデルフィッティングを行うことで未知パラメータを推定する。この場合の未知パラメータは拡散反射成分の強さ α 、鏡面反射成分の強さ β 、表面粗さ μ の3つのパラメータである。これら3つのパラメータは次式を最小化することにより求める[7]。

$$\sum_j \left[\alpha \cos \theta_j + \beta \frac{F(n, \theta_{ij}) D(\mu, \varphi_j) G(N_j, V_j, L_j)}{\cos \theta_r} - \rho_{Gj} \right]^2 \quad (3)$$

5. 絹織物の表面のモデリング

本研究では3次元的な織構造の詳細は、円筒を仮定した緯糸と経糸に見立てた円筒物体をモデリングする。それを法線マップとして表現する。法線マップは全ての画素に法線の傾きの情報が含まれている。織表面の反射は単純な円筒物体の反射光として表現する。生成した法線マップの画素数は3600×3600である。図5は法線マップを生成するための織のモデルを示すものである。図6はこのモデルで生成した法線マップの一部を拡大しニードルマップとして表現したものである。ここで緑の点は画素の位置、赤の点は法線の傾きを表している。

6. 実験

6.1. 画像計測

試作した光反射計測系を用いて絹織物の反射光分布を計測した。計測の対象は図7で示す通り、白色で平織りの絹織物を貼り付けた板である。この織物に含まれる糸の太さは緯糸が32デニール、経糸が22デ

ニールとなっている。計測は、照明光の設定角度は0~90度の範囲を1度間隔で光源入射に対する反射光の分布を調べた。この計測から得られた画像から緯糸と経糸それぞれ1か所ずつのサンプリングを行った。図8は計測から得られた画像の一部を拡大したもので、赤い四角はサンプリングした場所を示している。図9はサンプリングした二か所の反射特性である。ここで赤色の実線はTorrance-Sparrowモデルで近似させた推定値、青色の点線は計測から得られた計測値である。これらから、絹織物の緯糸はハイライトピークがスパイク状に存在していることがわかる。また、計測値はピーク以外の場所で不規則な波形が見られ、Torrance-Sparrowモデルでは再現しきれない部分が存在することがわかる。このとき、モデルパラメータの推定値は緯糸が $\alpha = 2000$, $\beta = 310000$, $\mu = 0.017$ となり、経糸が $\alpha = 1500$, $\beta = 58000$, $\mu = 0.025$ となった。

6.2. レンダリング

ここで先の反射特性推定手法から得られた推定値を用いて、絹織物を3DCG再現した。レンダリングは分光ベースであり、文献[8]の手法に基づいて行った。この手法では分光情報の可視波長域(400~700nm)を5nmでサンプリングして、61個のベクトルで色計算する。光反射モデルは2章で述べたTorrance Sparrowモデルをベースとしたモデルを用いる。画像計測した絹織物の分光反射率は別途分光光度計を用いて計測した値である。使用した分光光度計はX-rite社製のi1 Proである。図10は分光光度計にて計測した絹織物表面の分光反射率である。絹織物の織構造についての情報は第5章で述べた法線マップをマッピングして表現する。レンダリング時の画面解像度は800×600画素として3DCG再現した。図11(a)は提案手法により3DCGで再現した絹織物である。また、図11(b)は再現した絹織物を拡大した様子である。グローバルな視点からみると、簡易的なモデルながら異方性反射も含めた光反射を再現できていることがわかる。

7. まとめ

本研究では、絹織物を対象として反射特性の計測技術を開発した。また、織物を構成する緯糸と経糸は簡易的な3次元幾何モデルでモデリングした。そし

てモデリングしたデータと、計測データから分光ベースで3DCG再現する手法を提案した。このとき高精細な画像計測に基づいて、単色の絹織物を対象とし受光角を変化させたときの反射光分布を計測する手法を提案した。絹織物の表面構造はグローバルな表面と考えるのではなく、高解像度の画像計測により織物の緯糸と経糸の領域に分解して反射特性を調べ、反射の解析をより単純化させた。その上で絹織物の反射特性を調べた。

本研究により、照明方向を変化させた際の織物表面の状態を記録することができた。今後は計測系の誤差の低減と詳細なモデルを構築する必要がある。また、今回生成した法線マップは織表面を緯糸と経糸に分割して簡略化して再現したものである。織り構造の3次元モデルについては文献[9]のものなどがあり、これらを適用することで、織り構造の光反射をより詳細に再現できると考えられる。

参考文献

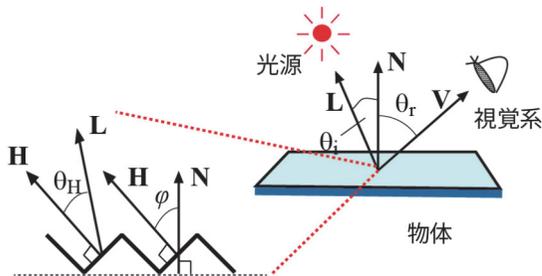
- [1] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕, The Great Buddha Project 一大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化—, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.1, 2002, pp.103-113.
- [2] 武田祐樹, 坂口嘉之, 田中弘美: 少数視点画像の反射光解析に基づくシルクライク織物の異方性反射レンダリング, 芸術科学会論文誌, Vol.7, No.4, 2008, pp.132-144.
- [3] Rong Lu, Jan J. Koenderink, and Astrid M. L. Kappers: Optical Properties (Bidirectional Reflectance Distribution Function) of Shot Fabric., Applied Optics, Vol.39, Issue 31, 2000, pp. 5785-5795.
- [4] K. Tonsho, Y. Akao, N. Tsumura, and Y. Miyake: Development of goniophotometric imaging system for recording reflectance spectra of 3D objects, SPIE Proceedings, 4663, 2001, pp. 370-378.
- [5] K. Mochizuki, N. Tanaka, H. Morikawa and M. Miura: Multispectral Reflection Measuring and Rendering Method for Silk Textiles, The Journal of Silk Science and Technology of

Japan. Vol.23, 2015, pp.17-26.

- [6] N. Tanaka and K. Mochizuki: A digital archive method based on multispectral imaging with goniometric multiband camera, The Bulletin of Japanese Society for the Science of Design. Vol.61, No.3, 2014, pp.35-44.
- [7] 田中法博、禹在勇、更科友啓、望月宏祐：分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定、日本感性工学会論文誌、Vol.8, No.3, 2009, pp.948-950.
- [8] 望月宏祐、田中法博、林一成、禹在勇、富永昌治：分光画像圧縮に基づいた分光ベースレンダリングの高精細化、日本感性工学会論文誌、Vol. 9, No.2, 2010, pp.301-309.
- [9] 日本繊維機械学会：基礎繊維工学 3、日本繊維機械学会、1967, pp.36-38.



図3. 照明方向のキャリブレーションに用いた鏡面球



表面の拡大図(微小凹凸モデル)

図1. 光反射の幾何モデル

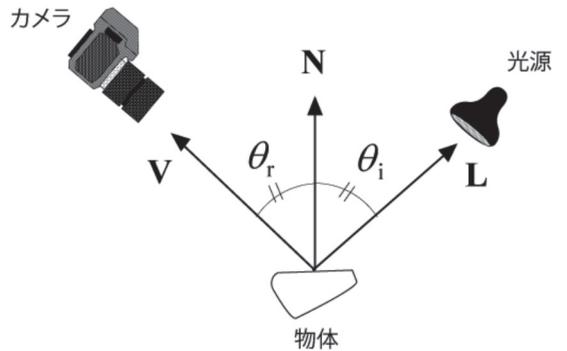
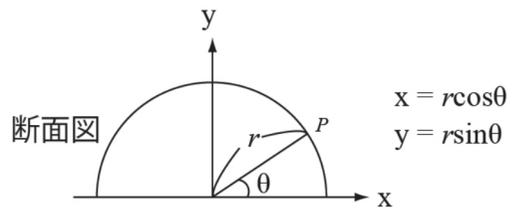


図4. 法線ベクトル推定の幾何図



本研究で使用した簡単な織のモデル



図2. 光反射特性計測系の概略図

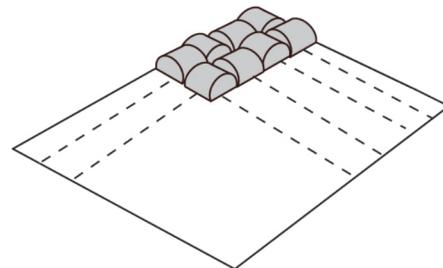


図5. 簡易的な法線マップの概略図

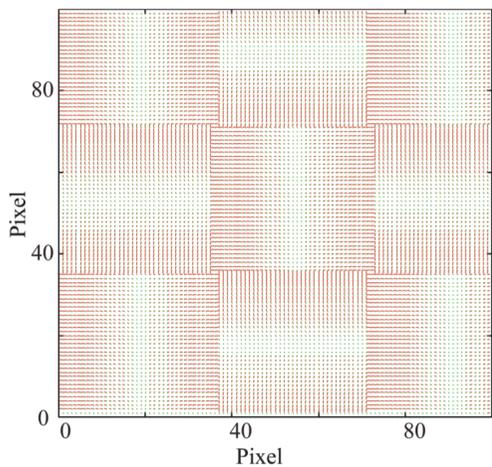
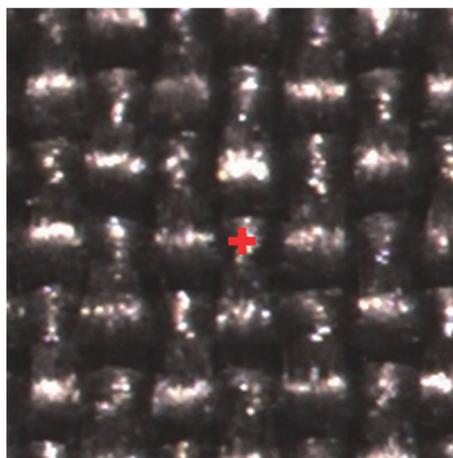


図6. 法線マップの一部分のニードルマップ



(b)経糸

図8. 試作した計測系から得られた絹織物の画像

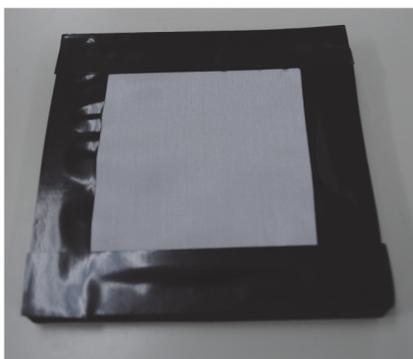
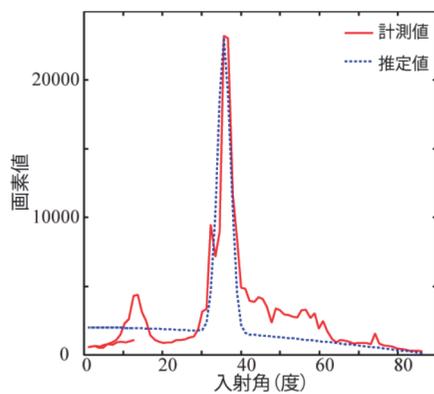
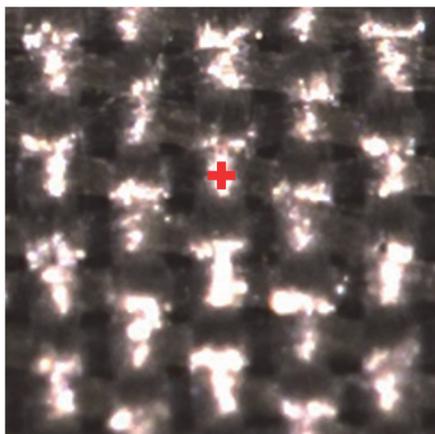


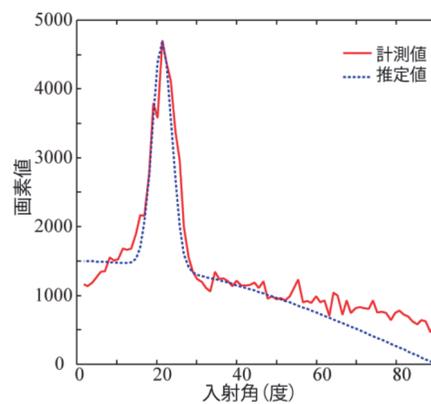
図7. 計測対象の絹織物



(a)緯糸



(a)緯糸



(b)経糸

図9. 緯糸と経糸部分の反射モデルとの適合結果

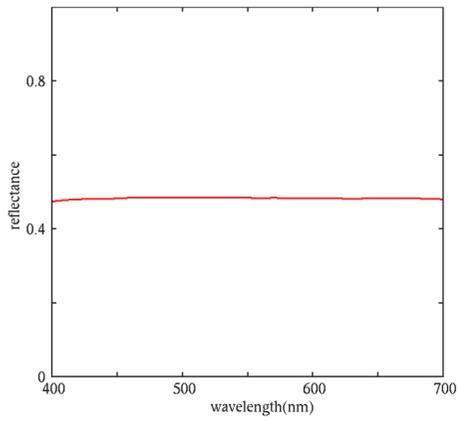
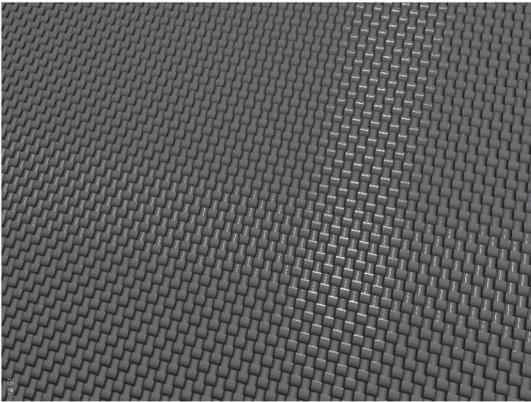
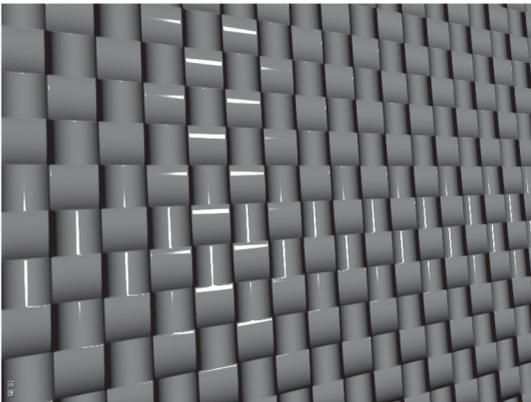


図10. 絹織物の分光反射率



(a)3DCG再現した織物表面



(b)3DCG再現した織物表面の一部を拡大した様子

図11. 構築した光反射モデルに基づいたCG再現結果