

光反射特性計測に基づいた絹織物表面の光反射モデル構築

Construction of Reflection Model of Silk Fabrics Surface base on Reflection Properties Measurement

望月 宏 祐*

田中 法 博**

Kosuke MOCHIZUKI

Norihiro TANAKA

概要

本研究では絹織物の高精度なデジタルアーカイブを目的として、画像計測により絹織物の光沢等の反射特性を推定する手法を提案する。絹織物は糸や織りの構造によって複雑な反射特性を持つことから様々な幾何条件での反射光計測が必要となる。このためにはBRDFを全て計測できるような大掛かりな計測系が必要となる。本研究では球体上に単色の絹織物を貼り付けて様々な入射角と受光角による反射光分布の計測を少数の画像計測から可能になるようにする。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、高解像度のデジタルカメラとマクロレンズを用いることで織物表面を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光反射モデルと比較する。最後に計測結果を基に異方性反射を含めた光反射モデルを構築し、分光情報に基づいて3DCGで可視化する。

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, 3DCG

1. はじめに

近年、様々な文化財や美術品に対して3次元的に精密なデジタルアーカイブの技術が求められるようになってきている。このときデジタルアーカイブした物体を3DCGとして可視化する場合、物体固有の形状に加え、質感が重要となる。しかしそれを再現するためには光反射特性の情報を知る必要がある。このとき、絹織物のような物体の光反射特性は糸や織りの構造から極めて複雑になるため、一般的なプラスチック物体等と比較して知ることが難しい。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[1]が提案されているが、その計測には大掛かりな計測系や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再現する光

反射モデル構築までは至っていない[2]。

これまで我々はプラスチックや金属を中心とした物体表面の光反射特性を画像計測に基づいて定量化する手法を提案してきた[3]。また光反射特性を定量化した物体を3DCG化する際には分光ベースでレンダリングし、ディスプレイデバイス等に依存せず様々な照明シーン下の物体を鑑賞できるようにしてきた[4]。

本研究では絹織物の高精度なデジタルアーカイブを目的として、画像計測により絹織物の光沢等の反射特性を推定する手法を提案する。本研究では球体上に単色の絹織物を貼り付けて様々な入射角と受光角の状態を画像計測する手法を提案し、簡便に反射光分布の計測が可能になるようにする。

また画像計測系として高解像度のカメラとマクロレンズを用いる。そして本研究では高精細な画像計測に基づいて、幾何条件としては受光角度のみを変化させ

る[5]. 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を構成する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光反射モデルとフィッティングして比較する。最後に計測結果から絹織物の異方性反射を再現できる光反射モデルを構築し、球状物体に包んだ絹織物を3DCG再現する。このとき3DCGは分光ベースでレンダリングする[5].

2. 絹織物の光反射特性計測

織物の反射は異方性があるため、その反射の計測には入射角、受光角に加えてあおり角等といった様々な幾何条件を考慮する必要がある。本研究ではこういった幾何条件での計測を簡便に行うために球形状を用いる。球体は部位によって法線の向きが異なり、球体全体では全方位の法線ベクトルが得られ、画像計測においては半球面での法線ベクトルが得られる。また画像上に写る球体の法線ベクトルは、2次元座標上と法線ベクトルの対応関係が簡単な幾何計算で容易に求めることができる。この形状の性質を利用して様々な幾何条件での反射光強度分布を調べる。図1は球体面の光反射のプロセスを示す概略図である。ここで \mathbf{V} は視線方向ベクトル、 \mathbf{L} は照明方向ベクトル、 \mathbf{N} は物体の法線ベクトルを示している。

2.1 計測系の試作

本研究では、絹織物の反射光強度分布を計測するための計測系を試作する。図2は試作した計測系と各部位の名称を示している。この計測系は光源とその固定台と球面物体、カメラとその電子制御アームから構成されている。この計測系ではカメラの受光角を任意に設定することができる。本研究では、入射角の変化による計測の手間と誤差を低減させるため光源を固定して反射光強度の計測を行う。これにより様々な幾何条件に対する反射光強度分布が得られる。この計測系はデジタルカメラ(Canon EOS 5D MarkII)、撮影用クレーン、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。ここでカメラの制御、撮影データのPCへの取り込みは自動制御で行う。また、照明方向ベクトルは事前に鏡面球を用いてその反射光を画像計測しキャリ

ブレーションを行った。このとき鏡面球は絹織物を包んだ球体と同じ位置に固定して計測した。図3はキャリブレーションに用いた直径70mmの鏡面球である。図4は本研究で用いるカメラで撮影した絹織物の一部とその計測スケールを示している。

2.2 光反射特性計測

本研究では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する。計測の対象は、図5にある無地で白色の絹織物で包んだ球体である。この絹織物は平織りであり、糸の太さは緯糸32デニール、経糸22デニールである。計測に設定する受光角は0~50度とし、この範囲を5度間隔で単一の光源入射に対する反射光の分布を調べた。計測から得られた画像から緯糸と経糸それぞれ10か所ずつ画像からサンプリングを行った。図5にある枠線はサンプリングした領域を示している。図6が反射特性の計測結果である。実線が緯糸、破線が経糸である。この結果から緯糸が全体的に高い値を示していることがわかる。

次に計測結果から反射特性を既存の反射モデルであるLambertモデルと適合して、どの程度反射の特性が異なるか調べた。Lambertモデルはカメラ出力を ρ_g とすると法線ベクトルと照明方向ベクトルから $\rho_g = \alpha \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}$ と記述できる。ここで未知パラメータ α を関数フィッティングで求め、計測値と比較した。図7は反射特性の計測結果とLambertモデルによる推定値を比較した結果である。この図の(a)は緯糸、(b)は経糸について計測値と推定値を比較した結果である。これらの結果から、糸単位でサンプリングした場合、Lambertモデルのみによるフィッティングは困難であることがわかる。

3. 光反射モデルの構築

計測画像から、球状物体に包んだ絹織物に異方性反射があることを視覚的に確認することができた。図8は計測から得られた球状に包んだ絹織物の計測画像である。この画像から、独特な異方性反射光分布があることがわかる。

本研究では、絹織物表面の光反射特性を光反射モデルで再現できると仮定する。この異方性反射光分布を再現するため、本研究ではTorrance-Sparrowモデル[6]をベースとしたモデルを拡張して記述する。このモデルはこれまでプラスチック表面などの再現に用いられてきたが、絹織物表面の反射光分布に対応させるためWardの異方性分布モデル[7]を分布関数としたモ

デルを構築した。本研究では視覚系に到達する分光分布を色信号 $C(\lambda)$ で示す。光の波長 λ の関数として次式で記述する。

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

ここで $S(\lambda)$ は物体の分光反射率であり、 $E(\lambda)$ は光源分光分布である。 α は拡散反射成分、 β は鏡面反射成分である。 \mathbf{L} は照明方向ベクトル、 \mathbf{V} は視線方向ベクトル、 \mathbf{N} は法線ベクトルである。 θ_i は \mathbf{L} と \mathbf{N} のなす角であり、 θ_r は \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角である。 F は Fresnel 関数である。 n は物体がもつ屈折率である。このモデルは物体表面の微小な凹凸を表現できる。微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} とし、 θ_H は \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角である。 G は幾何的減衰係数である。このとき反射光分布関数 $D(\mu_x, \mu_y)$ は Ward が提案した異方性反射モデルに基づいて緯糸と経糸によって発生する反射光分布を再現する。 $D(\mu_x, \mu_y)$ は次式のように記述できる。

$$D(\mu_x, \mu_y) = \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}} \exp \left[-2 \frac{\left(\frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{X}}{\mu_x} \right)^2 + \left(\frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{Y}}{\mu_y} \right)^2}{1 + (\mathbf{H} \cdot \mathbf{N})} \right] \quad (2)$$

ここで、 μ_x, μ_y は緯糸と経糸によるそれぞれの反射光分布の広がりを決めるパラメータである。また、 \mathbf{X}, \mathbf{Y} は異方性の方向ベクトルである。

4. 絹織物の分光ベースレンダリング

本研究では今回計測した球状物体に包んだ絹織物を分光ベースで3DCG再現する[5]。分光ベースで色を計算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もなる。このとき用いる絹織物の分光反射率は文献[8]で用いられた値とする(図9)。この分光反射率は本研究で対象とする絹織物と同様のものを分光光度計で計測した値である。光反射モデルは前章で構築したものをを用いて質感を再現する。このとき光反射モデルに与えるパラメータは推定できていないため、視覚的に妥当だと考えられるパラメータを与える。そこで μ_x は 0.18、 μ_y は 0.5 とする。また、光源は単一の D65 光源とする。レンダリング解像度は 800×600 ピクセルとする。

図10は絹織物を包んだ球状物体を3DCG再現した結果である。この結果から計測画像にあるような絹織物の独特な反射光分布が再現できたことがわかる。

5. まとめ

本研究では高精細な画像計測に基づいて、球体上に単色で平織りの絹織物を貼り付けて様々な入射角と受光角を少数の画像計測による簡便な反射光分布の計測が可能になる手法を提案した。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た。その上で絹織物の反射特性を調べ、既存の反射モデルと適合した。そして、計測により確認できた絹織物の異方性反射を含めた光反射モデルを構築し、分光ベースで3DCG再現した。

しかし以下に示す課題が残る。まず、今回は構築した光反射モデルでは反射特性を計測データに基づいて定量化するところまで達していない。次に、計測した絹織物は一種類であったため、糸や織り構造が異なる織物の検証には至っていない。最後に、現時点では多くの文化財等の織物は球状に包むことが難しいと予想されるため、デジタルアーカイブを想定した場合は用途が限定される。

今後は、上記の課題に対する新たな手法を提案する必要がある。また、これまでに我々が提案した手法[9-11]と組み合わせることでより多くの文化財のデジタルアーカイブに応用が可能になると考える。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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. 943-950.
- [4] 田中法博, 望月宏祐, 禹在勇: 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダ

リング手法, 日本感性工学会論文誌, Vol. 9, No.3, 2010, pp.311-321.

- [5]望月宏祐, 田中法博, 林一成, 禹在勇, 三浦幹彦, 森川英明: 絹織物表面の反射特性計測の一手法, 色彩情報シンポジウムin長野論文集, 2010, pp.39-41.
- [6]K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, J. of Optical Society of America A, Vol.57, No.9, 1967, pp.1105-1114.
- [7]Gregory J. Ward: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 26,2, 1992, p265-272.
- [8]望月宏祐, 田中法博: 光反射特性推定に基づいた絹織物の3DCG再現, 長野大学紀要, Vol.36, No.2, 2016, pp41-47.
- [9]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, 35-44.

- [10]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.
- [11] 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, 17-26.

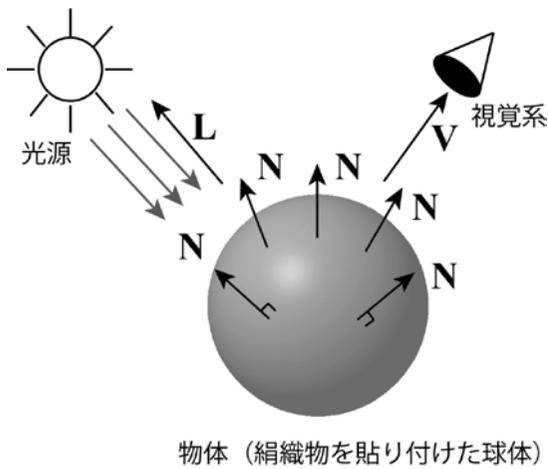


図1. 光反射の幾何モデル



図2. 光反射特性計測系の概略図



図3. 照明方向の推定に用いた鏡面球

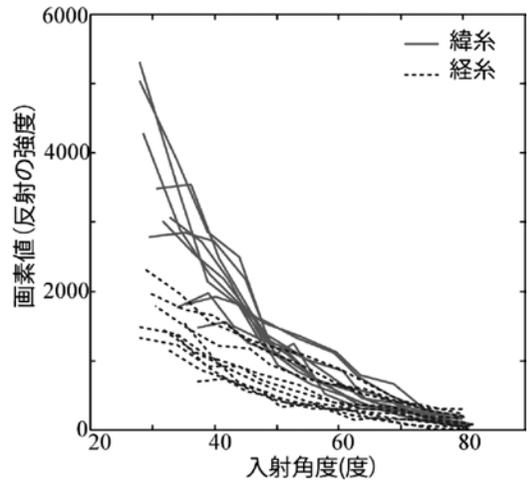


図6. 反射特性の計測結果

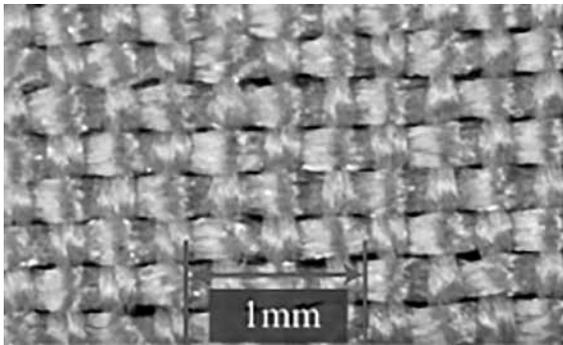
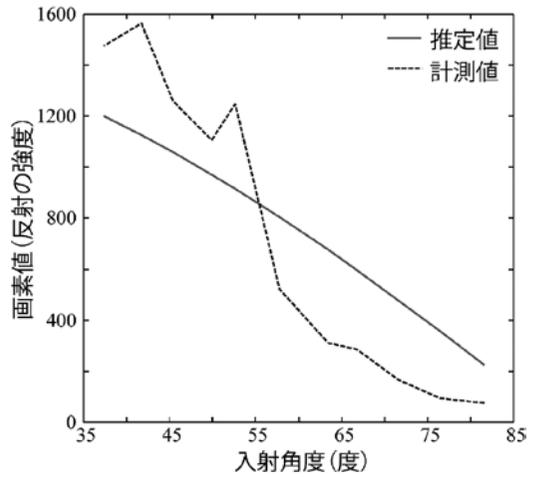


図4. マクロレンズで撮影した絹織物とスケール



(a) 緯糸

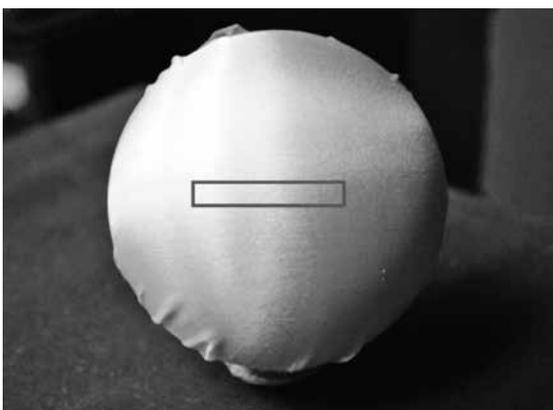
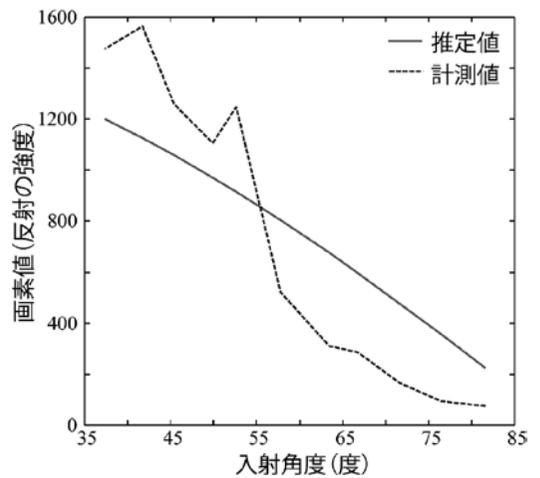


図5. 計測に用いた絹織物を被せた球体とサンプリング部位



(b) 経糸

図7. 計測値とLambertモデルの比較結果

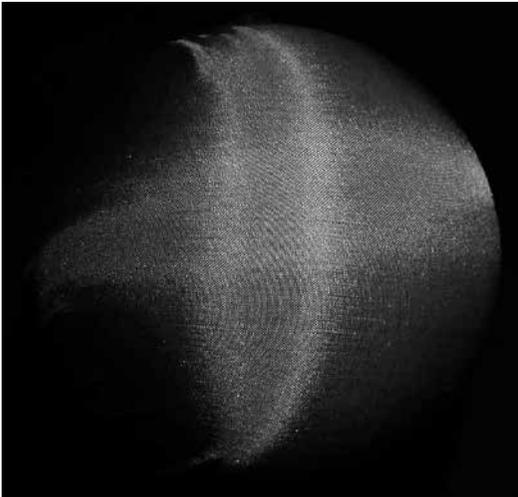


図8. 球形状の絹織物の計測画像

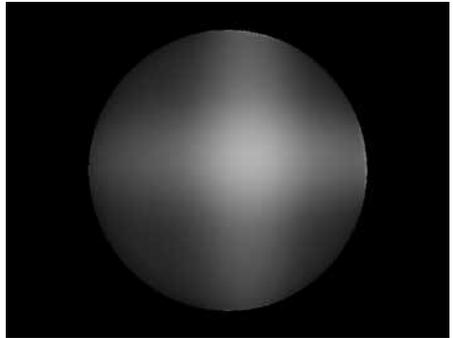


図10. 構築した光反射モデルに基づいて
3DCG再現した物体

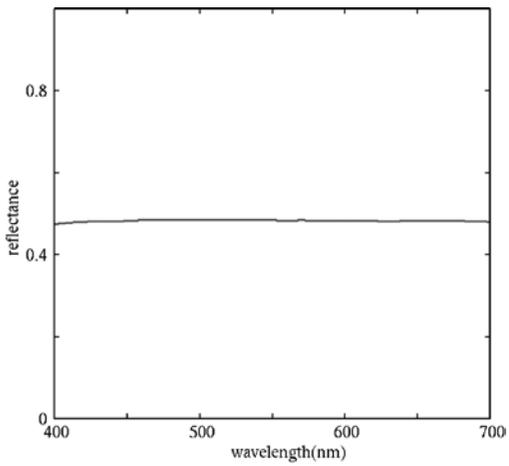


図9. 絹織物の分光反射率[9]