

多方向照明 HDR 画像を用いた 金襴の多重解像度異方性 BTF モデリング

武田 祐樹 田中 弘美
立命館大学 情報理工部

布や肌のような物体表面の複雑で微妙な光沢や質感を、観測画像データから抽出し高精度にモデリングすることや、それらを忠実に再現しフォトリアリスティックなレンダリングを実現することは、依然として、CV および CG 研究分野における重要な課題である。そこで本論文では、金襴と呼ばれる平金糸を織り込んだ伝統織物を対象し、露光時間を変化させて獲得した多方向照明 HDR (High Dynamic Range) 画像データを用いた反射光解析により、EM アルゴリズムを用いて、金襴の多重解像度の異方性 BTF モデルを自動獲得し、さらにフォトリアリスティックな質感を再現し且つ視距離の変化に対してモアレの発生を最小限にとどめる、多重解像度 BTF レンダリング法を提案する。実験結果から、近視距離レンダリングにおいては金襴の微細構造が高精度に再現され、遠視距離レンダリングにおいては金襴のモアレが解消されていることを確認し、提案手法の有効性を示した。

Multi-resolution Anisotropic BTF Modeling of Gold Brocade Fabrics based on Multi-illuminated HDR Image Analysis

Yuki Takeda Hiromi T. Tanaka
College of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

The image-based modeling and realistic visualization of complex materials such as fabrics is one of the main challenges in today's computer vision and computer graphics. The difficulty arises from the complex mesostructure and reflectance behavior defining the unique look-and-feel of a material. In this paper, we propose a method for reconstructing highly-accurate geometry of mesostructure of Kin-ran fabrics woven with gold-plated strings, based on multi-illuminated HDR image analysis and a method for constructing multi-resolution anisotropic BTF mipmaps that represent pixel geometry information of Kin-ran fabrics. With this method, accurate scale-dependent reflectance effects with smooth transitions are rendered with negligible aliasing.

1. はじめに

布や肌のような物体表面の複雑で微妙な光沢や質感を、観測画像データから抽出し高精度にモデリングすることや、それらを忠実に再現しフォトリアリスティックなレンダリングを実現することは、依然として、CV および CG 研究分野における重要な課題である。これらの課題の困難さは、物体表面の複雑な微細構造や、入射方向や視方向により反射特性が大きく変化することに起因しており、従来のテクスチャマッピングでは、素材に独特の光沢や質感をもたらす、物体表面の反射特性を忠実に再現することは困難である。

従来、物体表面の反射特性は、双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)[12]や、双方向テクスチャ関数 (BTF: Bidirectional Texture Function)[3]により記述される。BTF はテクスチャ上の任意点における、任意入射方向からの放射照度に対する任意視点方向の放射輝度の比として定義される。従来の BRDF/BTF 研究において、計測装置の開発、計測画像数と計測時間の膨大性が課題であ

った。Dana や向川らは放物面鏡 (a parabolic mirror) や楕円鏡 (an ellipsoidal mirror) を用いた高速計測装置を開発した[4,15]。また、Muller らは BTF 計測装置を開発し、計測・テクスチャ生成・レンダリングと BTF の計測から可視化までの一連の方法を提案した[10]。しかし、これらの計測装置では対象物体を計測台に設置するために小さく切り取る必要があり、一度に観測可能なテクスチャサイズは小さい。Filip らは獲得した BTF データの各テクセルに Lafortune モデル[8]をフィッティングし、圧縮 BTF データを用いてレンダリングした[6]。Schneider は PCA を用いて BTF データを分析・圧縮してリアルタイムにレンダリングした[13]。関根らが提案した手法はセーターや花柄のタオル生地といった光沢の少ない布素材を対象とし、マクロ柄に対しテクスチャ生成を行った[14]。いずれの手法も対象物体のテクスチャが規則的な柄を持つため、対象物体の一部のテクスチャに注目し反射光を計測している。一般に、これらの BTF モデリングは、固定の解像度の BTF を用いたレンダリングのために提案されている。

一方、多重解像度反射モデリングとレンダリングの研究も進められてきた[7,11]。物体表面が複雑で微細な幾何構造を持つ場合は、視距離の変化に応じて、1ピクセル内に投影される物体表面の範囲が変化するため、1ピクセル内の反射特性も変化する。そのため、物体表面の法線分布のサブサンプリングにより生成された低解像度画像では、しばしばエリアシングが起こり、モアレ縞が発生する。そこで、Tanらは、視距離に応じて、異なる解像度の物体表面の法線分布を用いて、多重解像度 BRDF レンダリングを実現し、エリアシングを最小限にとどめる方法を提案している[18]。しかし、異方性反射特性をもつ物体に対する多重解像度 BTF モデリングとレンダリングの方法は提案されていない。

我々はこれまで、能装束等の織物を対象としたデジタルアーカイブ化とコンテンツ化を目的とし、画像情報を用いた織物の反射特性モデリングと可視化の研究を推進してきた。織構造に着目し、多視点画像から BRDF を自動生成した[16,17]。しかし、多くの能装束に見られる、金襴と呼ばれる、金糸が織り込まれた織部分の光沢や質感の再現が困難であった。

そこで、本研究では、金襴の光沢や質感を再現するための画像情報を用いた BTF モデリングを目的とする。

金襴は、能装束をはじめ十二単や帯などに使われる織物であり、古代より、神事、仏事の尊厳、王侯貴族の品位、格式などの象徴の副飾として発達した。金襴には、平金糸(紙の上に漆を塗り金箔を置いて金箔紙を作り、それを簾形に細かく裁断したもの)を用いて四季折々の花鳥風月の文様が織り込まれ、日本の伝統織物の絢爛と豪華さを表現するために重要な役割を果たす織物である。

しかしながら、金襴の反射光のダイナミックレンジが広いために、一般のカメラを用いた画像計測ではサチュレーションが起こり高精度の画像計測が困難である。そのため、観測画像から織物表面の3次元の微細構造(mesostructure)を復元するためには、極めて高分解能のカメラが必要である[2]。また金襴は、平金糸と絹糸領域が規則的な間隔で並び、反射特性が大きく異なるため、明暗が大きな縞柄が生成される。このため、計測時よりも遠距離でレンダリングすると、観測画像の解像度よりもレンダリング画像の解像度が低いため、1ピクセルに平金糸と絹糸の異なる反射特性による縞柄が含まれ、エリアシングによる干渉縞(モアレ)が発生しやすい。さらに、金襴は異方性反射特性を持つため、モアレの発生を防ぐためには、視距離に応じて異方性反射 BTF モデルの解像度を切り替えたレンダリングが必要である。しかしながら、観測画像データから異方性反射特性を持つ多重解像

度 BTF モデルを自動生成する方法は提案されていない。

そこで本論文では、露光時間を変化させて獲得した多方向照明 HDR(High Dynamic Range)画像データを用いた反射光解析により、EM アルゴリズムを用いて、金襴の多重解像度の異方性 BTF モデルを自動獲得し、さらに、フォトリアリスティックな質感を再現し且つ視距離の変化に対してモアレの発生を最小限にとどめる、多重解像度 BTF レンダリング法を提案する。

まず、多方向照明かつ多重露光時間で撮影した画像を統合し HDR 画像を生成する。得られた HDR 画像を用いた反射光変化の解析から、平金糸領域を抽出し、平金糸領域の各点における法線の推定結果から、金襴テクスチャの3次元微細構造形状を高精度に復元する。次に、金襴の異方性反射特性を表現するためのパラメトリックモデルとして、Ashkhmin の異方性反射モデル[1]を用いて、金襴の異方性反射特性を抽出する。まず、複数の異方性反射特性パラメータを安定に推定するために、多重解像度の金襴テクスチャの微小面分布の主成分分析から、EM アルゴリズムの初期値を推定する。各解像度のテクスチャに対して EM アルゴリズムによる反復試行により、多重解像度の異方性 BTF モデルを生成し、多重解像度異方性 BTF を用いたレンダリングを実現する。

能装束の金襴を用いたレンダリング実験結果から、多重解像度異方性 BTF モデルの性能を評価し、提案手法の有効性を示した。近視距離レンダリングにおいては金襴の微細構造が高精度に再現され、遠視距離レンダリングにおいては金襴のモアレが解消されていることを確認した。

2. 双方向テクスチャ画像データの獲得

物体表面テクスチャの任意の点 (u, v) における反射特性は双方向テクスチャ関数(BTF: Bidirectional Texture Function)で記述される。

図1に、BTFの幾何関係を示す。

BTF $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, u, v)$ は物体表面テクスチャの任意の点 (u, v) において、(1)式より、入射方向 (θ_i, ϕ_i) からの放射照度に対する視方向 (θ_r, ϕ_r) への放射輝度の比として定義される。

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, u, v) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, u, v)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1)$$

ただし、 $\vec{l}$ を光源ベクトル、 $\vec{v}$ を視線ベクトル、 $\vec{n}$ を法線ベクトル、 $\vec{l}$ と $\vec{n}$ のなす角 θ_i を入射角、 $\vec{l}$ をXY平面に投影したベクトルとX軸がなす角 ϕ_i を入射方位角、 $\vec{v}$ と $\vec{n}$ のなす角 θ_r を視角、 $\vec{v}$ をXY平面に投影したベクトルとX軸がなす角 ϕ_r を視方位角とする。また、 $\vec{l}$ と $\vec{n}$ が存在する面を入射面と呼ぶ。なお、物体表面テクスチャ上の各点 (u, v) の反射特性は、各点

(u, v) における双方向反射率分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)で表現される。

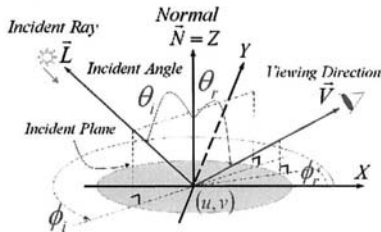


図 1: BTF 幾何
Fig.1: BTF geometry.



図 2: 全方位型光学異方性反射測定装置(OGM)
Fig.2: Optical Gyro Measuring Machine.

図 2 に、本研究の BTF 獲得のために使用した全方位型光学異方性反射測定装置(OGM: Optical Gyro Measuring Machine)を示す。画像計測には解像度 3888×2592 ピクセル、有効画素数約 800 万画素のデジタルカメラ Canon EOS Kiss Digital X を使用した。光源には朝日分光(株)のキセノン光源 Lax-102 を使用した。OGM は、光源 2 軸、カメラ 1 軸、試料台 1 軸、合計 4 軸の回転自由度を持つ。これらの自由度を組み合わせることにより、対象物に対しあらゆる入射方向、視方向からの反射光計測が可能である。

BTF を計測データから得るためには、任意の入射方向、視方向に加えテクスチャ上の任意位置 (u, v) における反射光データを獲得する必要がある。能装束のように微細かつ精巧に作られた対象は高精細な解像度にも必要である。さらに金糸・銀糸と絹糸は反射特性が異なるため、全種類の糸の反射光を計測するためには多重露光の観測画像による HDR 画像[5]の獲得が必要である。よって能装束織布の BTF を獲得するためには膨大な画像データを必要とする

3. 能装束織物の金襴

図 3 に示す能装束織布の一部を示す。朱色糸の基本地に平金糸が織り込まれた金襴に、さらに青・緑・白色等の糸で花・葉・枝の文様が織り込まれている。図 4 に、能装束織布の接写画像を示す。平金糸・文様部分の三次元凹凸によ

る影や、平金糸の向き、文様内の絹糸の向きが確認できる。

能装束織布の実物の大きさは数十 cm × 数十 cm から数十 cm × 数 m である。しかし、これまでの BTF に関する研究[3,4,6,9,10,11,13,14]では数 cm 角で小サイズ(256 × 256 pixels)のテクスチャを対象としており、しかし、能装束織布を対象とした場合は、そのテクスチャサイズの大きさから、計測時間と計測データの膨大さが問題点となる。



図 3: 能装束織布
Fig.3: Kin-ran fabrics.

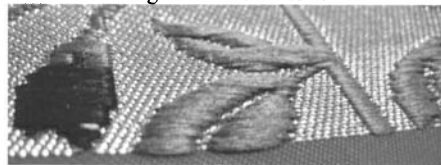


図 4: 能装束織布の接写
Fig.4: Close up of Kin-ran fabrics.

4. 金襴の多重解像度異方性 BTF モデリング

4.1 多方向照明による多重露光画像獲得

一般的に、画像観測により BTF を獲得するためには任意入射方向・任意視方向の膨大な観測画像が必要である。また、光源を固定し多方向から撮影した多視点画像を統合するためには高精度のキャリブレーションが必要とされる。

そこで本研究では、視方向を固定しても多方向照明により鏡面反射光と拡散反射光を観測することが可能であるため、視線ベクトル $\vec{v}$ を織布の法線ベクトル $\vec{n}$ に一致させカメラを固定し、照明方向を変化させた多方向照明観測画像を獲得する。また、金襴の反射光のダイナミックレンジが広く、固定の露光時間の撮影ではサチュレーションを起こすため、露光時間を変化させた多重露光時間による観測が必要である。

4.2 多方向照明 HDR 画像生成

照明方向を変化させて獲得した、多重露光時間による観測画像から HDR 画像を生成する。本研究では Debevec らの方法[5]を用いて HDR 画像を生成する。

レンズを通過しカメラに入射した光の放射輝度と多重露光時間による観測画像の画素値の関係は以下の(2)式で与えられる。

$$\ln E(u, v) = g(T_e(u, v)) - \ln \Delta t_e \quad (2)$$

ただし、 $E(u, v)$ は金襴テクスチャの点 (u, v) においてレンズを通過しカメラに入射した放射照度、 $T_e(u, v)$ は金襴テクスチャの点 (u, v) における e 番目の露光時間での観測画像の画素値、関数 g は

カメラの応答関数の逆関数、 Δ_t は e 番目の露光時間である。関数 g は固定照明環境における多重露光時間による観測画像から求めることができる。

d 重露光時間による 256 階調の観測画像から生成できる HDR 画像の階調は $256 \times d$ 階調である。また、ダイナミックレンジは最短露光時間による観測画像に依存する。よって、撮影では、使用するデジタルカメラの最短露光時間による観測画像でサチュレーションが起こらないように光源の強さを調節する必要がある。

以上から、視方向 $(\theta, \phi_r) = (0, 0)$ から観測した金襴テクスチャの各点 (u, v) における多方向照明による放射輝度データ $L_r(\theta, \phi_i, \theta_r = 0, \phi_r = 0, u, v)$ 、ただし $i=1, \dots$ 、照明方向数、を獲得する。

4.3 固定視点下における BTF 獲得

前節と同様に、固定視点下において多方向照明による標準白色板の放射輝度 $L_{r, \text{standard}}(\theta, \phi_i, 0, 0, u, v)$ 、ただし $i=1, \dots$ 、照明方向数、を獲得する。反射率は、標準白色板の放射輝度 $L_{r, \text{standard}}(\theta, \phi_i, \theta_r, \phi_r, u, v)$ に対する対象物体の放射輝度 $L(\theta, \phi_i, \theta_r, \phi_r, u, v)$ の比として求めることができる。点 (u, v) において、入射方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光に対する視方向 $(\theta_r, \phi_r) = (0, 0)$ への反射光の反射率を表す BTF $\rho_{bd}(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v)$ は以下の式で与えられる。

$$\rho_{bd}(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v)}{\pi L_{r, \text{standard}}(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v)} \quad (3)$$

なお、 ρ_{bd} と f_r の関係は以下の (4) 式で与えられる。

$$\rho_{bd}(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v) = f_r(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v) / \rho_{\text{standard}} \quad (4)$$

ただし、 ρ_{standard} は標準白色板の反射率であり、精度の高い標準白色板は $\rho_{\text{standard}} = 1$ とみなせる。

図 5(a) に、多方向照明により獲得した金襴テクスチャの BTF データ $\rho_{bd}(\theta_i, \phi_i, 0, 0, u, v)$ を示す。また、図 5(b) に、金襴テクスチャの各点 (u, v) における双方向反射率分布関数 BRDF $\rho_{bd}(\theta, \phi, 0, 0)$ 、ただし $i=1, \dots$ 、照明方向数、を示し、 $T_i(u, v)$ と表す。 $T_i(u, v)$ は鏡面反射成分 $\rho_{rs}(\theta, \phi, 0, 0)$ と拡散反射成分 $\rho_{rd}(\theta, \phi, 0, 0)$ からなる。図 5(b) の下に、 $T_i(u, v)$ の二次元ヒストグラムを示す。

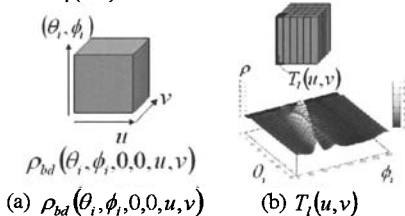


図 5: BTF と BRDF データ

Fig. 5: BTF & BRDF data.

4.4 微視的幾何構造の 3 次元形状推定

多方向照明により観測された、金襴テクスチャの点 (u, v) における双方向反射率分布関数

BRDF $T_i(u, v)$ 中の最大反射率を示す光源ベクトルを $\vec{L}_s$ とする。この時、視方向 $(\theta_r, \phi_r) = (0, 0)$ において正反射光を観測する。よって (5) 式より、 $\vec{L}_s$ と視線ベクトル $\vec{V}_0$ のハーフベクトル $\vec{H}$ は点 (u, v) の法線ベクトル $\vec{n}$ に一致する。図 6 に、糸の微小面の法線ベクトル $\vec{n}$ の推定方向を示す。

$$\vec{H} = \frac{\vec{L}_s + \vec{V}_0}{|\vec{L}_s + \vec{V}_0|} \quad (5)$$

以上より、金襴テクスチャの任意の点 (u, v) において観測された BRDF $T_i(u, v)$ 中の反射率の最大値から点 (u, v) における法線ベクトル $\vec{n}$ を推定することができる。

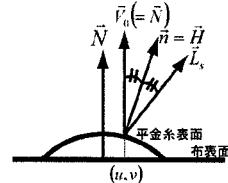


図 6: 布の法線ベクトル $\vec{N}$ と糸の微小面の法線ベクトル $\vec{n}$ の幾何関係

Fig. 6: Surface geometry of a fabric and a string.

4.5 拡散反射率 ρ_d の推定

金襴テクスチャの各点 (u, v) において、反射率が最大となる入射方向を (θ_i, ϕ_i) とすると、鏡面反射は主に正反射方向に分布することから、鏡面反射が観測されない反射方向の反射率から拡散反射率を推定する。

正反射方向から方位角が $\pm \pi/2$ と π 、離れた反射方向、 $(\theta_i, \phi_i \pm \pi/2)$ 、 $(\theta_i, \phi_i + \pi)$ 、つまり入射面に垂直な 2 方向と入射方向、のそれぞれの反射方向への反射率の最小値から拡散反射成分 $\rho_{rd}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ を推定する。ランバード面を仮定すると、拡散反射率 ρ_d は反射方向によらず一定であることから、 ρ_d は以下 (6) 式で与えられる。

$$\rho_{rd}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_d \quad (6)$$

以上より、金襴テクスチャの任意の点 (u, v) における BRDF $T_i(u, v)$ の最小値から拡散反射率 ρ_d を抽出する。

4.6 異方性反射特性の抽出

金襴テクスチャの各点 (u, v) における BRDF $T_i(u, v) = \rho(\theta, \phi, 0, 0)$ 、ただし $i=0, \dots$ 、照明方向数、と前節で求めた拡散反射成分 $\rho_{rd}(\theta, \phi, 0, 0)$ の差から、鏡面反射成分 $\rho_{rs}(\theta, \phi, 0, 0)$ を抽出する。さらに、異方性反射特性をパラメトリックに表現する Ashikhmin モデル[1]を用いて、 $\rho_{rs}(\theta, \phi, 0, 0)$ から金襴の異方性反射特性を抽出する。

Ashikhmin モデルは、以下の (7) 式と (8) 式により、直交二軸性の反射特性を表現する。

$$\rho_{rs}(\theta, \phi, \theta_r, \phi_r) = \frac{D(\theta_h, \phi_h)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (7)$$

$$D(\theta_h, \phi_h) = \rho_s \exp \left(-\tan^2 \theta_h \left(\frac{\cos^2 \phi_h}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_h}{\sigma_y^2} \right) \right) \quad (8)$$

ただし、各点 (u, v) において、 $D(\theta_h, \phi_h)$ は表面の微小面分布関数である。また、糸の法線ベクトル $\vec{n}$ の方向 (θ_h, ϕ_h) 、接線ベクトル $\vec{i}$ の方向 $(\theta + \pi/2, \phi_h)$ 、従法線ベクトル $\vec{b} = \vec{n} \times \vec{i}$ の方向をそれぞれ、z 方向、x 方向、y 方向とする、直交二軸性の異方性反射を表すための xyz 直交座標系を考える。XYZ 座標系のハーフベクトル $\vec{H}$ を、xyz 座標系に変換したベクトルを $\vec{h}$ 、その方向を (θ_h, ϕ_h) とする。

ここで、各点 (u, v) において、 θ_h は糸の法線ベクトル $\vec{n}$ と $\vec{h}$ のなす角、 ϕ_h は $\vec{h}$ を xy 平面に投影したベクトルと $\vec{i}$ のなす角である。 ρ_s は鏡面反射率、 σ_x は x 方向の偏差、 σ_y は y 方向の偏差である。

また、 $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ の最大値 ρ_s が正反射率であり、 σ_x 、 σ_y は以下のように求める。

(7) 式と(8) 式より

$$\tan \theta_h^2 \left(\frac{\cos^2 \phi_h}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \phi_h}{\sigma_y^2} \right) + \log(f_{r,d}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r) = \log \rho_s \quad (9)$$

ここで、 $A = 1/\sigma_x^2$ 、 $B = 1/\sigma_y^2$ 、 $o = \tan \theta_h^2$ 、 $p = \cos^2 \phi_h$ 、 $q = -\log(\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r)$ とおくと

$$Aop + B(o - op) - q = 0 \quad (10)$$

であるから、さらに $O = op$ 、 $P = o - op$ 、 $Q = q$ とおくと、

$$AO + BP - Q = 0 \quad (11)$$

であり、平面の方程式となる。

図 7 に示すように、 $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ は OPQ 座標系では平面上に分布する。よって、 OPQ 座標系における $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ の主成分分析により A 、 B が求まり、 σ_x 、 σ_y が求まる。

以上より、金縷テクスチャの任意の点 (u, v) において $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ から ρ_s 、 σ_x 、 σ_y を推定できる。

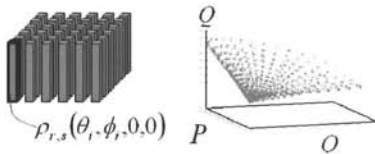


図 7: OPQ 座標系における $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$

Fig. 7: $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ in the OPQ coord. system.

4.7 異方性反射 BTF 生成

4.4 から 4.6 まであり、金縷テクスチャの各点 (u, v) における法線ベクトル $\vec{n}$ 、拡散反射率 ρ_d 、鏡面反射率 ρ_s 、偏差 σ_x 、 σ_y が求まる。それぞれを法線マップ、拡散反射率マップ、鏡面反射率マップ、偏差 σ_x マップ、偏差 σ_y マップと呼ぶ。この 5 種類のマップから BTF を

生成する。図 8 に、推定された BTF パラメータマップを示す。

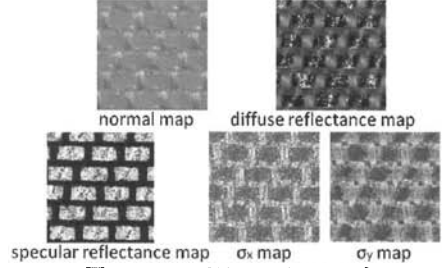


図 8: BTF パラメータマップ

Fig8: BTF parameter maps.

4.8 平金糸の三次元形状推定

抽出した鏡面反射率マップから平金糸領域を抽出する。鏡面反射率マップの 2 値化・膨張収縮・ラベリングにより小面積領域を除去する。その結果から、平金糸領域が白、それ以外の領域が黒であるマスク画像を生成する。ある平金糸領域に対して、同位置の法線マップの領域から平金糸の三次元形状を推定する。図 9 に、平金糸の 3 次元形状推定処理の流れを示す。

平金糸の表面は滑らかであると仮定すると、以下の条件を満たすものが推定される三次元形状である。

$$\min \sum_{u,v} \{g_x(u-1, v-1) + g_y(u, v-1)\}^2 - \{g_x(u-1, v-1) + g_y(u, v-1)\}^2 \quad (12)$$

$$g_x(u, v) = \frac{n_x(u, v)}{n_z(u, v)} \quad (13)$$

$$g_y(u, v) = \frac{n_y(u, v)}{n_z(u, v)} \quad (14)$$

ただし、点 (u, v) における法線ベクトル $\vec{n}$ の各 xyz 成分を $n_x(u, v)$ 、 $n_y(u, v)$ 、 $n_z(u, v)$ とする。

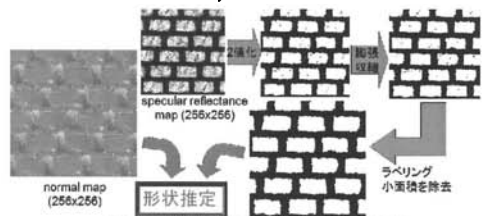


図 9: 平金糸の 3 次元形状推定

Fig. 9: 3D shape reconstruction of a golden string.

4.9 多重解像度 BTF 生成

多重解像度 BTF 生成とは、観測した $a \times a$ pixels サイズの BTF から、 $a/2 \times a/2$ 、 $a/4 \times a/4$ 、 $\dots$ 、 1×1 pixels までの $\log a$ 階層の BTF を生成することである。高解像度の規則的なテクスチャを低解像度で表示するとモアレが発生する。金縷は規則的なテクスチャであるためモアレが

発生しやすい。そのため、表示解像度に合った解像度の反射特性を表す BTF を用いる必要がある。

表示解像度に適切な解像度のテクスチャに切り替えるために、ミップマップ(mip map)法[19]を用いる。ただし、ミップマップの画素には反射パラメータを格納する。4.7 節にて、ミップマップ中の最高解像度(レベル 0)のテクスチャを生成している。レベル 0 のテクスチャからテクスチャサイズを縦・横ともに 1/2 に縮小したテクスチャ(レベル 1)を、同様にレベル 1 のテクスチャからレベル 2 を、と繰り返し、テクスチャサイズが 1×1 pixel のテクスチャまでのテクスチャを含むものがミップマップである。レベルが一つ上がるごとに 2×2 pixel 中の反射特性を 1 pixel に含む必要があり、各画素に含まれる反射特性の種類は 4 倍になる。

拡散反射成分 $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ に対しては、複数ある反射特性の拡散反射成分の和は各拡散反射 $\rho_{r,d}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ の総和である。よってレベルが上がっても 1 pixel に含まれる反射特性は一つの拡散反射率 ρ_d で表現できる。

一方、鏡面反射 $\rho_{r,s}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ に対しては、複数ある反射特性の鏡面反射成分の和は鏡面反射 $\rho_{r,s}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ の総和であるが、レベルが上がると 1 pixel に含まれる反射特性が 4 倍になり、レンダリング時の計算負荷が増大するため、 $\rho_{r,s}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ の総和から複数種類の鏡面反射パラメータ $(\bar{n}, \rho_s, \sigma_x, \sigma_y)$ を求める必要がある。ここでレベルが一つ低い 4m 個の鏡面反射 $\rho_{r,s}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ の総和から m 個の反射特性の鏡面反射成分を抽出するために EM アルゴリズムを用いる。

EM(Expectation Maximization) アルゴリズムは最尤推定の一手法であり、正解を与えずに計算を行う教師なし学習アルゴリズムである。EM アルゴリズムは E-step と M-step の反復処理を行い、収束することが保障されている。EM アルゴリズムは、初期値によっては局所解に収束することがある。よって真の解に収束するためには初期値を慎重に選ぶ必要がある。 $\rho_{r,s}(\theta_i, \phi_i, 0, 0)$ から (7) 式により $D(\theta_h, \phi_h)$ を求め、 $D(\theta_h, \phi_h)$ に対し EM アルゴリズムを適用する

Step 1. 初期値の決定方法

- ① $k=1$ とする。
- ② もし $k=m$ なら終了する。
- ③ 最大値を探索しその光源ベクトル $\vec{L}_i$ と視線ベクトル $\vec{P}_0$ からハーフベクトル $\vec{H}$ を求め $\bar{n}^{(k)}$ とする。また最大値を $\rho_s^{(k)}$ とする。
- ④ 入射方向 $(\theta_i, \phi_i) = (\theta_h, \phi_h)$ から傾き $dD(\theta_h, 0)/d\theta_h$, $dD(0, \phi_h)/d\phi_h$ が閾値以下になるまでの $D(\theta_h, \phi_h)$ から $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$ を求める。
- ⑤ 分散 $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$ から $D^{(k)}(\theta_h, \phi_h)$ を求める。
- ⑥ $D(\theta_h, \phi_h)$ から $D^{(k)}(\theta_h, \phi_h)$ を減算し $D(\theta_h, \phi_h)$ とする。
- ⑦ $k=k+1$ とし、②に戻る。

Step 2. 所属確率推定の反復試行

(E-step)

$\bar{n}^{(k)}$, $\rho_s^{(k)}$, $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$ を (8) 式に代入し、所属確率 $\omega_a^{(k)}$; $k=1, \dots, m$ を求める。

$$\omega_a^{(k)} = \frac{D^{(k)}(\theta_h, \phi_h)}{\sum_{k=1}^m D^{(k)}(\theta_h, \phi_h)} \quad (15)$$

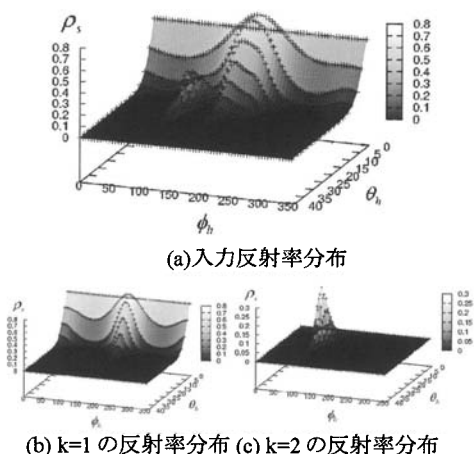
(M-step)

$\omega_a^{(k)}$; $k=1, \dots, m$ に基づき $\omega_a^{(k)} D^{(k)}(\theta_h, \phi_h)$ から $\bar{n}^{(k)}$, $\rho_s^{(k)}$, $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$ を求める。

$\omega_a^{(k)}$; $k=1, \dots, m$ を $\bar{n}^{(k)}$, $\rho_s^{(k)}$, $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$ により更新する。

収束するまで E-step と M-step を反復する

図 10 に、入力反射率分から、EM アルゴリズムにより 2 つの反射特性を抽出した結果を示す。



(b) $k=1$ の反射率分布 (c) $k=2$ の反射率分布

図 10: EM アルゴリズムによる多重解像度反射特性抽出

Fig.10: Multi-Resolution Reflectance by EM alg.

4.10 GPU による多重解像度 BTF レンダリング

レンダリングには OpenGL と Cg(C for Graphics)を使用する。入力は法線マップ、拡散反射率マップ、鏡面反射率マップ、直交異方性の x 軸方向の偏差 σ_x マップ、y 軸方向の偏差 σ_y マップの 5 種類のマップである。各マップについて、EM アルゴリズムにより多重解像度のミップマップを用意してある。

ddx(), ddy() を用いて、現在の表示画像のピクセルと x, y 方向の隣接ピクセル間の微分値を求め、各ピクセルにおいて含まれる、テクスチャのテクセル数の微分値に基づき、ミップマップのレベルを切り替える。

5. 実験

まず、法線マップから平金糸の三次元形状を推定する。次に、多重解像度 BTF レンダリング

を行う。最後に、BTF レンダリングの精度評価を行う。

5.1 平金糸の三次元形状を推定

獲得した画像は入射方向 (θ_i, ϕ_i) を、 θ_i が 0 度から 80 度まで 5 度ずつ、 ϕ_i が 0 度から 355 度まで 5 度ずつ変化させ、観測画像を入射方向の変化に対し 1224 種類獲得する。ただし、各条件下において露光時間は 1/10, 1/80, 1/500, 1/4000(sec) の 4 種類を設定するため、入力画像は計 4896 枚である。次に、多重露光時間による画像から金襴の 256×256 画素に対し HDR 画像を生成する。生成した HDR 画像を基に多重解像度 BTF モデリングを行った。

図 11 に抽出した法線マップから金平糸の三次元形状を推定した結果を示す。

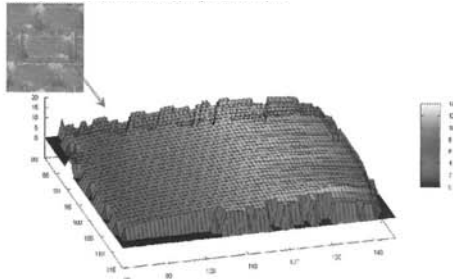


図 11：平金糸の 3 次元形状推定結果

Fig. 11: Reconstruction result of 3D shape of a golden string.

5.2 金襴の多重解像度 BTF レンダリング

図 12 に、金襴の多重解像度 BTF レンダリング結果を示す。能装束の 3 次元形状は VIVID910 で計測し、提案手法で生成した金襴の多重解像度 BTF によりレンダリングを行った。図 12(a) に示すように、レベル 0 では平金糸の一本の形が見え反射特性も表現できている。図 12(b) に示すように、レベル 2 においても金襴の光沢を再現している。図 13 に、多重解像度 BTF と一重解像度 BTF によるレンダリング結果を示す。図 13(a) と比べ(b)ではモアレが発生している。

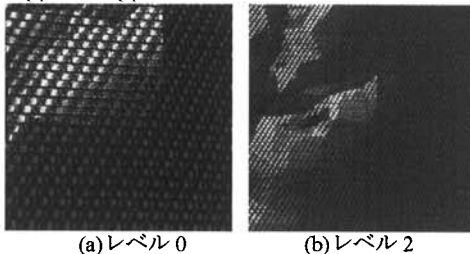
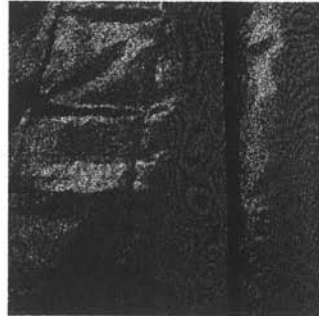


図 12：金襴の多重解像度 BTF レンダリング
Fig. 12: Multi-resolution BTF Rendering Results.



(a) レベル 4



(b) 多重解像度なし

図 13: 多重解像度 BTF によるモアレの解消

Fig13: Multi-resolution BTF rendering of Kin-ran fabric with negligible aliasing.

5.3 多重解像度 BTF の精度評価

図 14 に、入射方向 $(\theta_i, \phi_i) = (45, 0)$ 、視方向 $(\theta_r, \phi_r) = (0, 0)$ における入力画像と本手法のシミュレーション結果、また入力画像とシミュレーション結果の誤差を画像で示す。図 14 (c) よりハイライト部分に誤差が見られる。

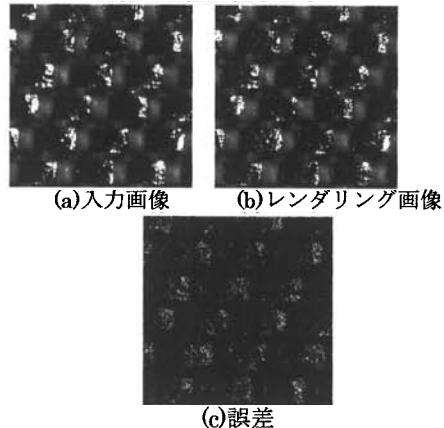


図 13：多重解像度 BTF の精度評価
Fig. 13: Evaluation Result of Multi-resolution BTF modeling.

5.5 平金糸の異方性反射特性の要因

直交異方性の二軸 x , y 方向のそれぞれのベクトルは $\vec{i}$, $\vec{b}$ である。平金糸の各点において、 $\vec{i}$ の方向の分散 σ_x は、 $\vec{b}$ の方向の分散 σ_y よりも大きい、 $\vec{i}$ の方向では法線分布が広い。また、平金糸の各点で $\vec{i}$, $\vec{b}$ の方向を調べ、推定した三次元形状と併せて考えると、局所曲面の曲率は $\vec{i}$ の方向で小さく、 $\vec{b}$ の方向で大きい。よって金襴の異方性反射は局所曲面形状に起因していることが確認できた。

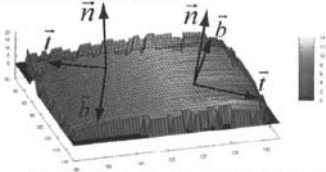


図 14：表面形状と直交二軸異方性反射

Fig. 14: Anisotropic reflection properties arising from 3D surface shape of a gold string.

6. おわりに

多方向照明 HDR(High Dynamic Range)画像データを用いた反射光解析により、EM アルゴリズムを用いて、金襴の多重解像度の異方性 BTF モデルを自動獲得し、視距離の変化に対して、モアレの発生を最小限にとどめ且つフォトリアリスティックな質感を再現する、多重解像度 BTF レンダリング方法を提案した。実験結果より金襴の質感再現が可能であることを示した。また、金平箔糸の 3 次元形状および金襴の微細構造を復元し、金襴の異方性反射特性は平金糸の曲面形状に起因していることを確認した。今後の課題として、金襴の文様の微細構造および反射特性モデリングが挙げられる。

参考文献

- [1] M. Ashikhmin, S. Premoze and P. Shirley, "A Microfacet-based BRDF Generator", Proc. ACM SIGGRAPH, pp.65-74, 2000.
- [2] Tongbo Chen, Michael Goesele and Hans-Peter Seidel, "Mesostructure from Specularity", Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 1825-1832, 2006.
- [3] K. J. Dana, Van Ginneken B., Nayar S. K., Koenderink J. J., "Reflectance and Texture of Real-world Surfaces", ACM Transactions on Graphics, No. 8, Vol. 1, pp.1-34, 69, 73, 1999.
- [4] K. J. Dana, Van Ginneken B., Nayar S. K., Koenderink J. J., "BRDF/BTF Measurement Device", IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Vol. 2, pp. 460-466, 2001.
- [5] P. E. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", In SIGGRAPH 97, pp. 369-378, 1997.
- [6] J. Filip, M. Haindl, "Non-linear Reflectance Model for Bidirectional Texture Function Synthesis", Proc. the 17th International Conference on Pattern Recognition, Vol.1, pp.80-83, 2004.
- [7] A. Fournier, "Normal Distribution Functions and Multiple Surfaces", In Graphics Interface Workshop on Local Illumination, pp. 45-52, 1992.
- [8] E. P. F. Laforune, S. C. Foo, K. E. Torrance and D. P. Greenberg, "Non-linear Approximation of Reflectance Functions", Proc. Siggraph, pp.117-126, Aug. 1997.
- [9] G. Muller, G. H. Bendels, R. Klein, "Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artifacts", Proc. the 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 2005.
- [10] G. Muller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette and R. Klein, "Acquisition, Synthesis and Rendering of Bidirectional Texture Functions", Proc. Eurographics, pp.69-94, 2004.
- [11] F. Neyret, "Modeling, Animating, and Rendering Complex Scenes using Volumetric Textures", IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics vol. 4, no. 1, pp. 55-70, 1998.
- [12] N. Nicodemus, J. Richmond, and J. Hsia, "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, tech.rep.", U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977.
- [13] M. Schneider, "Real-Time BTF Rendering", Proc. the 8th Central European Seminar on Computer Graphics, pp. 79-86, 2004.
- [14] 関根真弘, 山内康晋, "マクロ柄を考慮した双方向依存テクスチャの生成とマッピング", 情報処理学会, グラフィクスと CAD, pp.13-18, 2004.
- [15] 角野皓平, 向川康博, 八木康史, "楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J90-D No.8, pp.1930-1937, 2007.
- [16] 武田祐樹, フィンクアンファイ ヴィエト, 坂口嘉之, 田中弘美, "フレネル項を考慮した多視点画像の反射光解析に基づく織布の異方性反射モデリング", MIRU2005 画像の認識・理解シンポジウム論文集, pp.1582-1589, 2005.
- [17] R. Ozaki, Y. Takeda, H. T. Tanaka, "Reconstructing and Rendering Transparent Woven Fabrics based on Reflection Analysis", Proc. 14th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision, pp.208-213, 2008.
- [18] Ping Tan, Stephen Lin, Long Quan, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum, "Multiresolution Reflectance Filtering", Proc. Eurographics Symposium on Rendering, pp. 111-116, 2005.
- [19] L. Williams, "Pyramidal parametrics", Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 1-11, 1983.