

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

武田 祐樹† 坂口 嘉之‡ 田中 弘美†
† 立命館大学 情報理工学部 知能情報学科
‡ デジタルファッション株式会社

概要 織物の異方性反射特性を表現するためには、任意の入射方向の入射光に対する任意の視方向への反射光の比率を表す双方向反射分布関数 (BRDF) が必要である。本論文では、光沢のあるシルクライク織物を対象とし、繊維の断面形状と織構造の違いにより織物の光沢感に相違が現れることに着目し、入射方向を固定し反射光の分布を多視点観測した、少数視点画像に基づいた効率的な BRDF の自動生成法を提案する。まず、無彩色 (黒色) の織物表面に対し入射方向を鉛直方向に固定し、織構造の直交二軸性に基づいて選択された 1/8 球の視点範囲内で、少数の多視点画像を獲得し鏡面反射光の分布を観測する。獲得した観測画像データを用いて基準異方性反射分布と呼ぶ基準鏡面反射モデルを生成する。次に、入射方向を変化させた場合の基準異方性反射分布の変化を多視点から観測し、獲得した多視点画像から、光の反射と屈折を表すフレネル効果を考慮した反射光解析により、直交二軸性の異方性反射特性を抽出する。得られた特性に基づき、基準異方性反射分布から高精度の BRDF を生成する。生成した BRDF を用いて異方性反射レンダリングを実現し、同素材の任意に彩色されたドレス着装シミュレーション実験結果から提案手法の有効性を確認する。

キーワード 双方向反射分布関数, 異方性反射, イメージベースレンダリング, 反射モデル

Efficient Image-based Anisotropic Reflectance Rendering of Silk-like Woven Fabrics

Yuki Takeda† Yoshiyuki Sakaguchi‡ Hiromi T. Tanaka†

†College of Information Science & Engineering, Ritsumeikan University

‡Digital Fashion Ltd.

Abstract The reflectance of fabric surface is commonly represented by a bidirectional reflectance distribution function (BRDF). To generate the image-based BRDF from measured data, it requires an enormous amount of measurements. In this paper, we propose an efficient image-based method for rendering the anisotropic BRDF of silk-like woven fabrics based on the micro facet surface geometry determined by the cross-sectional shape of fibers, twist of yarns, and type of weave. We develop an image-based method for generating the BRDF of silk-like woven fabrics from measurement of the reflectances caused by the incident light only in the direction perpendicular to the fabric's surface.

Key words BRDF, Anisotropic Reflection, Image-based Rendering, Reflection Model

1 はじめに

近年では、コンピュータグラフィクス (CG)・コンピュータビジョン (CV) 研究により博物館等の所蔵する能装束や衣装等の様々な布物体のデジタル記録・保存、デジタルアーカイブ化・コンテンツ化の研究が精力的に進められている。布物体の変形、光沢や質感は独特で素材に固有なため、これを忠実に再現することが CG や CV における重要な課題である。

布の異方性反射特性を表現するために、Phong のモデルの異方性拡張をはじめとし、直交二軸性の異方性反射を仮定したモデル等、様々な異方性反射特性のモデル化やその計測方法について研究が進められてきた [2, 5, 8, 16, 17]。しかし、布のたて糸よこ糸が織り成す複雑な 3 次元表面の微視的幾何構造を忠実に表現する異方性反射モデルは提案されていない。

物体表面の反射特性は、任意の入射方向の入射光

に対する任意の視方向への反射光の比率として、双方向反射分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) [7] により記述される。布表面の反射光には表面の微視的幾何構造による光学特性が含まれており、その質感は、微小な凹凸による 3 次元幾何学特性の観察から得られている。そこで、布地の微視的幾何構造 (micro facet geometry) を基にした布の異方性反射を表す BRDF の生成手法が提案された [1, 18]。布表面の微視的幾何構造から反射特性をモデル化し、サテンやベルベットをレンダリングした結果が報告されている。最近では、さらに糸断面の凸形状による陰影 (Shadowing/Masking) をモデル化し高精度の BRDF を生成する手法 [15] が提案されている。しかし、画像計測から自動的に陰影パラメータを抽出する方法は提案されていない。

また、Ward の Gaussian reflectance model [16] に基づいて、画像計測により BRDF を求める方法 [6] が

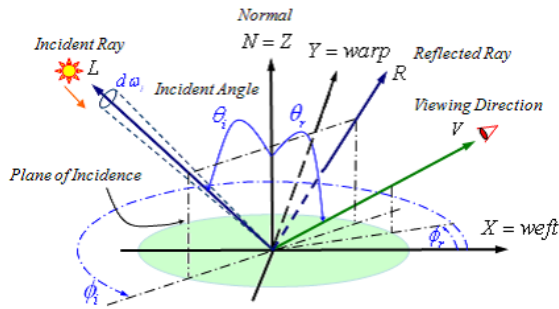


図1 織物のBRDF幾何

提案されたが、布の異方性反射特性を高精細に表現するためには不十分であった。最近では、全方位型の光学異方性測定装置が開発され、多数の入射方向と視方向の組み合わせによる計測データからBRDFを獲得し可視化する方法が提案された[14]。しかし、高精度のBRDFを獲得するためには、膨大な計測データを必要としていた。これに対し織りの対称性に注目した効率的な計測による手法[11, 12, 13]が提案された。

本論文では、光沢のあるシルクライク織物を対象とし、繊維の断面形状と織り構造の違いにより織物の光沢感に相違が現れることに着目し、入射方向を固定した少数の多視点観測画像から、反射光解析に基づき効率的に織物の異方性反射特性を表すBRDFを自動生成する方法を提案する。まず、光学異方性測定装置による無彩色(黒色)のシルクライク合成繊維の計測データから、繊維の断面形状、単糸の撚りと織構造による織物表面の微視的幾何構造と反射特性の拘束関係を明らかにする。次に、入射方向を鉛直方向に固定し、織構造の直交二軸性に基づいて選択された1/8球上の視点範囲内で少数視点の観測画像を獲得する。獲得した画像を基に、基準異方性反射分布と呼ぶ基準鏡面反射モデルを生成する。次に、入射方向を変化させた場合の基準異方性反射分布の変化を多視点から観測し、獲得した多視点画像から、フレネル効果を考慮した反射光解析により直交二軸性の異方性反射特性を抽出する。得られた特性に基づき、基準異方性反射分布から高精度のBRDFを効率的に生成する。得られたBRDFを用いて、異方性反射レンダリングを実現し、同素材の織物の任意に彩色された任意視点画像の合成実験結果から提案手法の有効性を確認する。

2 双方向反射分布関数 (BRDF)

一般的に物体表面の異方性反射特性は、任意の入射方向の入射光に対する任意の視方向への反射光の比率とする双方向反射分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) で記述される。図1にBRDFの幾何関係を示す。BRDFは球座標で定義され、式(1)により入射方向 $L(\theta_i, \phi_i)$ からの放射照度 (W/m^2) に対する視方向 $V(\theta_r, \phi_r)$ の放射輝度 ($W/m^2 sr$) の比 ρ_{bd} として定義される[7]。

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_r(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos(\theta_i) d\omega_i}, \quad (1)$$

ただし、 $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は入射方向 L から入射した放射輝度、 $L_r(\theta_r, \phi_r)$ は視方向 V に反射される放射輝度で

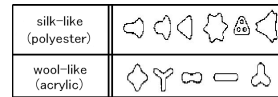
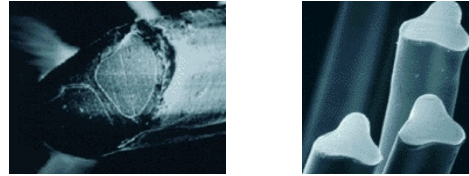
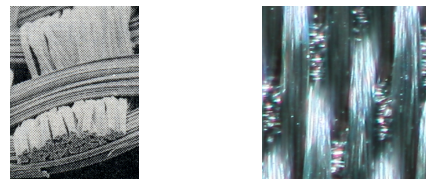


図2 合成繊維の断面形状



(a) 絹の繭糸 (b) ポリエステル繊維

図3 絹とシルクライク繊維の断面形状



(a) フィラメント糸 (b) 糸表面の光沢

図4 フィラメント糸の光沢

ある。入射角 θ_i は N と L のなす角度、入射方位角 ϕ_i は X と L を XY 平面上に投影したベクトルのなす角度、視角 θ_r は N と V のなす角度、視方位角 ϕ_r は X と V を XY 平面上に投影したベクトルのなす角度である。 L と N が作る平面は入射面 (Plane of Incidence) とよばれる。

本論文では、 X 軸を織物のよこ糸 (weft) 方向に、 Y 軸をたて糸 (warp) 方向に、 Z 軸を織物の法線方向 N に一致させて表現し、入射面を $I(\phi_i)$ と記す。

3 織物の微視的幾何構造と異方性反射

織物は、糸を経緯(たてよこ)に交差させて作った布である。本章では、繊維の断面形状・糸の撚り・織構造等に基づくシルクライク織物の微視的幾何構造と異方性反射特性の関係について述べる。

3.1 織物の微視的幾何構造

3.1.1 繊維の断面形状

絹や羊毛などの天然繊維が持つ光沢や風合いを再現するために、図2に示すような、様々な異型の断面の合成繊維が開発された。図3(a)に示すように、絹の繭糸は2本のフィブロインとそれらを披覆するセリシンから成り、織物にした後に精練すると、セリシンが除去され、絹の風合いがもたらされる。フィブロインの断面はやや扁平な丸味を帯びた三角形形状をしている。そのため、図3(b)に示すように、ポリエステルのようにシルクライク合成繊維の断面は三角形形状をしている[4]。特に、ポリエステル繊維は性能も汎用性も高く用途も広いため、広く大量に使われている。

3.1.2 糸の撚り

繊維には、綿やウールに代表的される短いわた状の短繊維 ($20 \sim 200mm$) と、絹などに代表される長く連続した長繊維 ($5 \sim 10 \times 10^3 mm$) がある。天然繊維では絹だけが長繊維である。糸はこの二つの繊維のタイ

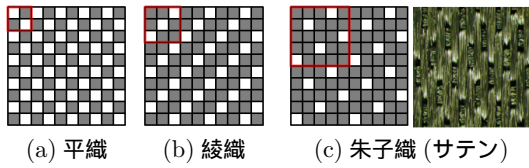


図5 織物の三原組織

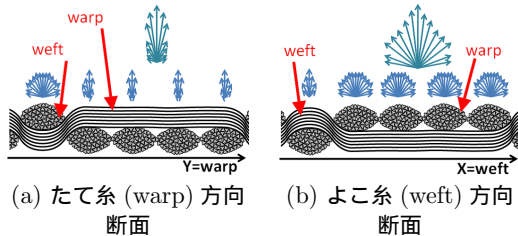


図6 シルクライク織物の微小面分布

プによって、スパン糸とフィラメント糸の二つの種類にわけられる。

スパン糸は、短繊維を紡ぎ撚り長い糸にしているため繊維の端（毛羽）が多く、光沢が少ない。一方、フィラメント糸は、長繊維をばらばらにならないよう数本束ねた糸で、毛羽が少なく滑らかで光沢がある。図4(a)に、フィラメント糸の表面と断面を示す。糸表面では撚られていない角柱状の長繊維が並行にならび、糸の断面はたて糸とよこ糸が張りをかけて織られているため、上下につぶされ扁平な楕円状になっている。また図4(b)に示すように、フィラメント糸の表面では、各長繊維の極細角柱上の各平面上で反射した光がスジ状の光沢となって表れている。

このように、フィラメント糸自体が持つ異方性反射特性が、フィラメント糸で織られた光沢のある織物の異方性反射特性を特徴づける。

以下本論文では、光沢のある長繊維のフィラメント糸で織られた織物をシルクライク織物と記す。

3.1.3 織構造と織組織

織構造とは織物の組織のことで、織物を構成するたて糸とよこ糸が浮沈して交差する仕方を表したものを(織物)組織図という。織物の種類は多いが、その基礎となる平織・綾織・朱子織(サテン)の3つは三原組織とよばれ、最も多く生産されている基本的な組織である。図5に、三原組織の組織図を示す。平織りは、たて糸とよこ糸が交互に交差した最も単純な組織である。綾織は、連続的に浮沈した組織点がななめに走る畝線を形成する組織である。朱子織はたて糸(またはよこ糸)の浮きが多い(4本以上)組織である。

シルクライク織物は、平織・綾織・朱子織のいずれにも光沢がある。図5(c)右に、5枚朱子とよばれる朱子織(ポリエステルサテン)を実体顕微鏡で撮影した画像を示す。朱子織は特に、たて糸が長く浮いてフィラメント糸の異方性反射特性が強く表面に表れる。

3.1.4 織物表面の微小面分布

織物の微視的幾何構造は、微小面分布とよばれる織物表面の微小面集合の法線分布により表わされる。そこで、三原組織のうちで朱子織が、最も強く異方性反射特性が表れる微視的幾何構造をもつことから、フィラメント糸形状と朱子織構造に基づいて、シルクライ

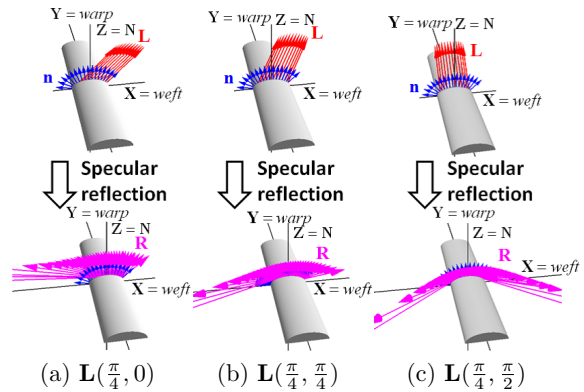


図7 朱子織を近似した織物の鏡面反射分布のシミュレーション値

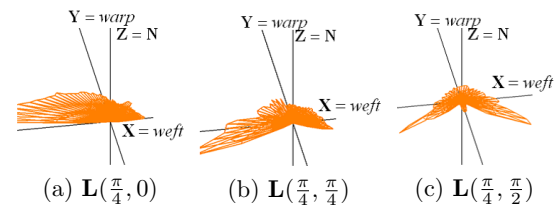


図8 朱子織の鏡面反射分布の実測値

ク織物表面の微小面分布について述べる。

図6に、朱子織表面の微小面分布を示す。図6(a)に示すように、楕円柱状のフィラメント糸を側面から見ると、つまり、たて糸方向のY軸断面では、たて糸の繊維がほぼ水平に長く浮いているため、微小面の多くは鉛直上方を向いている。朱子織の場合は、たて糸がよこ糸よりも4倍以上長く浮いているため、全体としては、図6(a)上に示すように、たて糸表面にほぼ垂直な微小面分布となる。

一方、図6(b)に示すように、楕円状のフィラメント糸の断面では、つまりよこ糸方向のX軸断面では、たて糸断面上部の楕円の扁平な部分では鉛直上方を向く微小面が多く、鉛直方向から下に傾くにつれて微小面が徐々に減少していく。全体としては、図6(b)上に示すように、楕円形状をつくる様々な方向の微小面分布となる。

以上から、フィラメント糸表面は、糸の楕円柱形状に基づく直交二軸性の微小面分布をもち、さらに、織構造もたて糸とよこ糸が直交に交差する直交二軸性をもつことから、シルクライク織物は直交二軸性の微小面分布を持つことが導かれる。

3.2 織物の異方性反射

シルクライク織物の微視的幾何構造と異方性反射特性の関係を明らかにするために、シルクライク織物の鏡面反射分布のシミュレーション値と鏡面反射分布の実測値を比較する。

図7に、レイトレーシングにより生成した、朱子織を近似した“たて糸のみが浮いた織物”の鏡面反射分布シミュレーション値を示す。朱子織をフィラメント糸が並行にならんだ織物と近似することにより、織物表面の微小面分布を、フィラメント糸自体の微小面分布に等しいとみなすことができる。図7(a)に示すように、よこ糸方向 $L(\frac{\pi}{4}, 0)$ から入射した場合は、糸

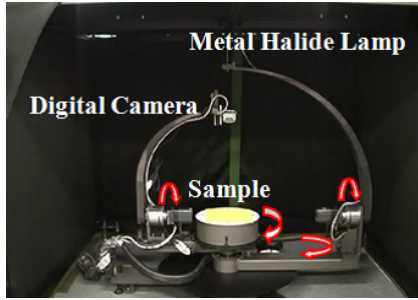


図9 全方位型光学異方性反射測定装置 (OGM)

断面の微小面の法線は入射面 $I(0)$ 内に存在しているため、鏡面反射光は $I(0)$ 内で X 軸方向に強く分布する。図 7(b) に示すように、バイアス方向 $L(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$ から入射した場合は、糸断面と入射面 $I(\frac{\pi}{4})$ の角度が $\frac{\pi}{4}$ で交差するため、鏡面反射光の分布は $I(\frac{\pi}{4})$ に対し左右非対称になる。図 7(c) に示すように、たて糸方向 $L(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ から入射した場合は、糸断面と入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ が直交するため、鏡面反射光の分布は $I(\frac{\pi}{2})$ に対し左右対称となる。

図 8 に、図 7 と同方向の入射光による、図 5(c) 右で示した黒色ポリエステル朱子織 (サテン) 表面の鏡面反射光分布の実測値を示す。図 7 と図 8 の (a), (b), (c) のそれぞれにおいて、同方向の入射光に対してシミュレーションにより推定された反射特性と実測値が示す反射特性が類似している。これは、織物組織から、黒色ポリエステルサテンの表面の 80% がたて糸で覆われており、表面に現れるたて糸の法線の分布が楕円柱と一致しているからである。

以上から、シルクライク織物の異方性反射特性は、繊維と糸の断面形状、糸の撚り、織構造による表面の微視的幾何構造に起因していること、また同時に、これらの異方性反射特性が多視点画像から安定に観測されることがわかる [12]。

4 シルクライク織物の異方性反射の観測

一般的に、物体表面の反射光は拡散反射成分と鏡面反射成分からなる 2 色性反射モデルで記述される [10]。従来から、拡散反射成分には Lambert モデルが用いられ、素材の光沢や質感を表すためには、様々な鏡面反射モデルが提案されてきた [1, 2, 3, 16]。そこで本論文では、多視点画像から鏡面反射分布を獲得し、シルクライク織物の異方性反射特性を観測する。

4.1 観測環境

図 5(c) に示した無彩色黒色のポリエステルサテンを観測対象織物とする。これは、無彩色黒色の物体表面の反射光には、拡散反射成分は無く鏡面反射成分のみ含まれると近似でき、また、ポリエステルサテンは最も代表的なシルクライク合成繊維のフィラメント糸で織られた、三原組織のうちで最も強く異方性反射特性を表す朱子織 (サテン) であるため、シルクライク織物の異方性反射を安定に画像計測できるためである。

図 9 に、反射分布測定に用いた全方位型光学異方性反射測定装置 (OGM: Optical Gyro Measuring Machine) を示す。OGM は、試料台とデジタルカメラ、光源を先端に付けた 2 本のアームで構成される。

光源 2 軸、カメラ 1 軸、ステージ 1 軸、合計 4 軸の回転自由度を持ち、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、視方向から反射光の計測が可能である。画像計測には解像度 2272×1704 ピクセル、有効画素数約 400 万画素のデジタルカメラ Canon PowerShot S40 を使用した。光源にはメタルハライドランプ 180W (外部調光機能付) の LS-M180FB を使用した。測定は環境光を取り除くために暗室にて行う。また、撮影した画像の中心 16×16 ピクセル領域の平均輝度値を反射光 Lv_{msd} とした。観測領域は図 5(c) 右の画像に一致し、組織の繰り返し単位以上を含む。さらに、光源色に依存しない反射率を求めるために、織物の反射光の標準白色板の反射光 Lv_{std} に対する比を織物の反射率 ρ_{bd} とする。 ρ_{bd} は、以下の式 (2) により与えられる。

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{Lv_{msd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)}{Lv_{std}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)} \cdot \frac{\rho_{std}}{\pi} \quad (2)$$

ただし、 ρ_{std} は標準白色板の反射率である。

4.2 反射分布の観測

入射方向 $L(\theta_i, \phi_i)$ の変化による反射分布の変化を解析するために、よこ糸 ($\phi_i = 0$)・バイアス ($\phi_i = \frac{\pi}{4}$)・たて糸 ($\phi_i = \frac{\pi}{2}$) 方向のそれぞれの入射面を $I(0), I(\frac{\pi}{4}), I(\frac{\pi}{2})$ とし、入射角 θ_i を変化させ反射分布を観測した。 θ_i は、 $0 \leq \theta_i < \frac{\pi}{2}$ において $\Delta\theta_i = \frac{\pi}{12}$ の間隔で変化させた。また各入射方向 L に対し、視方向 $V(\theta_r, \phi_r)$ は、視方位角 ϕ_r を $0 \leq \phi_r < 2\pi$ において $\Delta\phi_r = \frac{\pi}{36}$ の間隔で、視角 θ_r を $0 \leq \theta_r < \frac{\pi}{2}$ において $\Delta\theta_r = \frac{\pi}{60}$ の間隔で変化させて撮影し、計 38880 枚の画像から反射光 Lv_{msd} を獲得する。また、標準白色板に対しても同様に反射光 Lv_{std} を獲得し、式 (2) より対象織物の BRDF を求める。図 10, 11, 12 に球座標系 (原点からの距離を反射率、方向を反射方向) で反射分布データを示す。また、入射角 $\theta_i = 0, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{5\pi}{12}$ の反射分布データをそれぞれ、水色、白色、緑色、黄色、赤色、青色で彩色し表示している。

いずれの入射面 $I(0), I(\frac{\pi}{4}), I(\frac{\pi}{2})$ においても、入射角 $\theta_i = 0$ の反射分布は、真上からの入射光 $L(0, 0)$ による、正反射方向が Z 軸に一致する反射分布であり、よこ糸 (weft) 方向とたて糸 (warp) 方向に対してそれぞれ対称である。よこ糸方向では、楕円形の糸断面形状により反射が羽状に広がり、たて糸方向では、糸表面が水平なために、ほぼ Z 軸方向に反射している。これらの反射分布形状の対称性は、朱子織の直交二軸の異方性反射特性を表している。

図 10 に示すように、入射面 $I(0)$ がよこ糸方向の場合の反射分布の変化は、図 10(a)(c) に示すように、入射面 $I(0)$ (=XZ 平面) に対称であるが、図 10(b) に示す、XZ 投影面では、入射角が増えるにしたがって、 Z 軸に対して反射分布形状の対称性が失われる。

図 11 に示すように、入射面 $I(\frac{\pi}{4})$ がバイアス方向の場合は、図 11(a), (b), (c) 全てにおいて θ_i が増すと反射率が増加し、入射方向への反射が観測された。

図 12 に示すように、入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ がたて糸方向の場合は、図 12(a) では入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ (=YZ 平面) に反射分布形状全体が対称性を保ちながら変形し、図 12(b) に示す XZ 投影面では、 θ_i を変化させた場合の反射分布形状が原点を中心として放射状に拡大されている。これは、 θ_i を変化させた場合の反射光 $V(\theta_r, \phi_r)$ の変

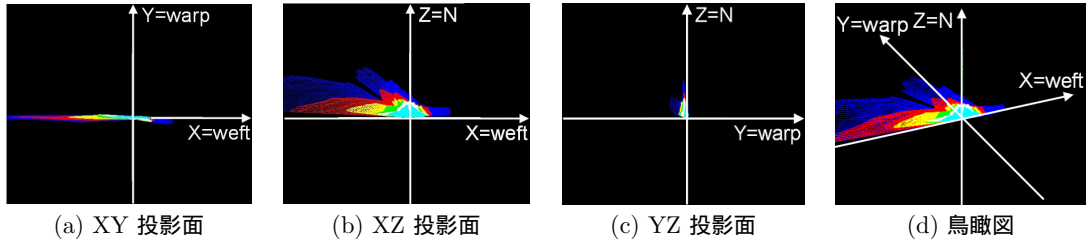


図 10 よこ糸 (weft) 方向入射における反射分布の変化 (入射面 $I(\phi_i = 0)$)

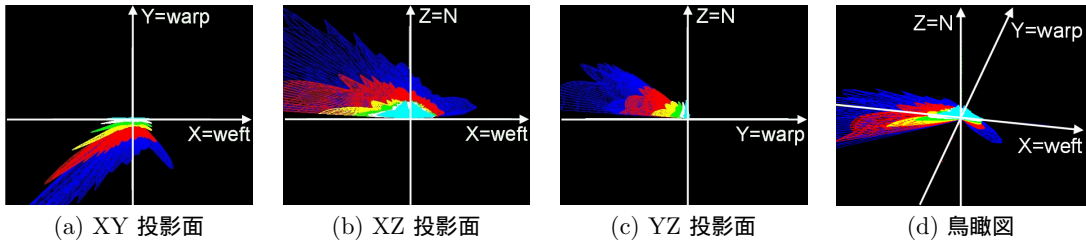


図 11 バイアス方向入射における反射分布の変化 (入射面 $I(\phi_i = \frac{\pi}{4})$)

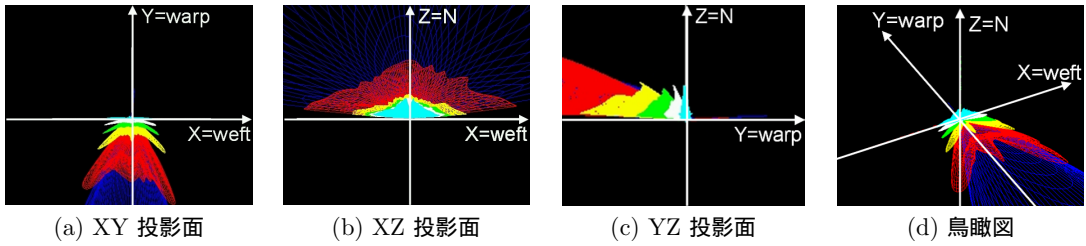


図 12 たて糸 (warp) 方向入射における反射分布の変化 (入射面 $I(\phi_i = \frac{\pi}{2})$)

化の軌跡は、XZ 投影面では原点を通る放射線となり、3次元空間では反射光は反射方向 V と Y 軸がつくる平面上で変化することを示している。図 12(c) に示す YZ 投影面では入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ において正反射 (ピーク点) の移動が観察された。

いずれの入射方向に対しても、 θ_i が増すと反射率が増加するフレネル効果^{*1}が観察された。

図 13, 図 14 に示すように、黒色のポリエステル平織り対しても上記の黒色のポリエステルサテンの特徴がみられるため、これらは、織物組織に依らないシルクライク織物の異方性反射の特徴である。

以上から、シルクライク織物の直交二軸の異方性反射特性は、反射分布の分散が小さい方向、つまり、糸が長く浮いている方向を入射面にすれば、1) 正反射 (の方向と大きさ) の推移を安定に観測することができ、同時に、2) $L(0,0)$ に対する初期反射分布が形状対称性を保ちながら変形するため、糸の断面形状に基づく反射分布の変化を安定に観測できることがわかる。

以下 5 章では、たて糸方向入射における反射分布の変化を解析することにより、織物の直交二軸のそれぞ

れの方向の異方性反射特性を同時に抽出する。

5 少数視点画像を用いる織物の BRDF 自動生成法

対象織物を無彩色 (黒色) のシルクライク織物とする。まず、入射方向を鉛直方向に固定し、織構造の直交二軸性に基づいて選択された $1/8$ 球の視点範囲内で、少数視点から鏡面反射分布を観測する。獲得した観測画像データを補間して基準異方性反射分布とよぶ基準鏡面反射モデルを生成する。次に、入射方向を変化させた場合の基準異方性反射分布の形状変化を多視点から観測し、フレネル効果を考慮した反射光解析により、直交二軸性の異方性反射特性を抽出する。得られた特性に基づき、任意の入射方向に対して、基準異方性反射分布形状を変形させて推定した鏡面反射分布から、任意の視方向への鏡面反射成分を推定する。さらに、得られた鏡面反射成分に任意の拡散反射成分を加えることにより、同素材で任意色のシルクライク織物の BRDF を自動生成する。

5.1 基準異方性反射分布と微小面分布抽出

4.1 節で述べた観測環境において獲得された、真上からの入射方向 $L(0,0)$ に対する鏡面反射分布 (データを補間した曲面) を基準異方性反射分布 $BARD\rho^o$ (Basic Anisotropic Reflectance Distribu-

*1 一般的に、微小面に入射した光は反射光・屈折光・吸収光に分かれる。フレネル効果とは、微小面に対し入射角度が水平に近づくほど反射光が強くなることで、フレネル項は、微小面において入射光に対する鏡面反射光の割合を表す。微小面に入射した光の反射光はフレネル項により定式化された。

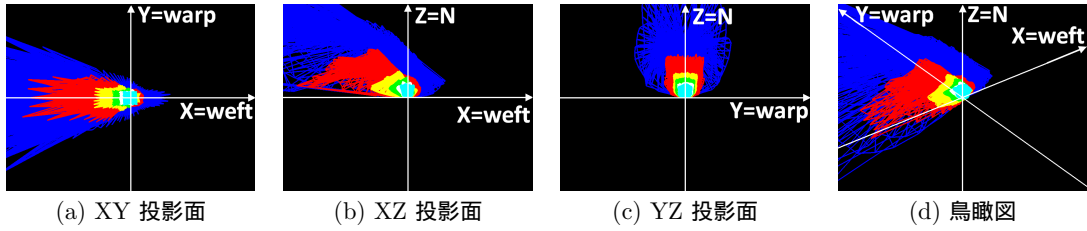


図 13 黒色ポリエステル平織のよこ糸 (weft) 方向入射における反射分布の変化 (入射面 $I(\phi_i = 0)$)

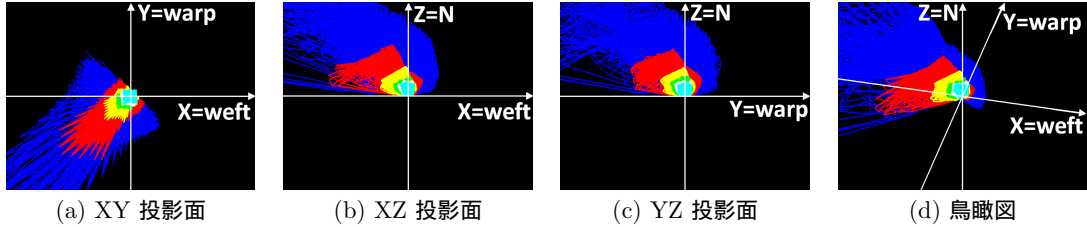


図 14 黒色ポリエステル平織のバイス方向入射における反射分布の変化 (入射面 $I(\phi_i = \frac{\pi}{4})$)

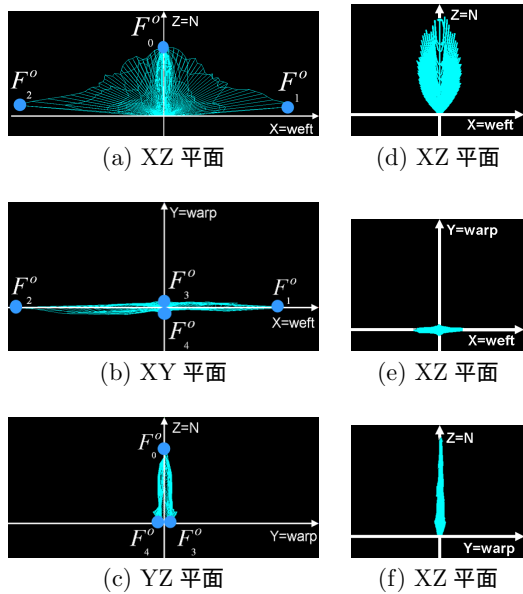


図 15 黒色ポリエステルサテンの基準異方性反射分布 (左) と表面の 3 次元微小面分布 (右)

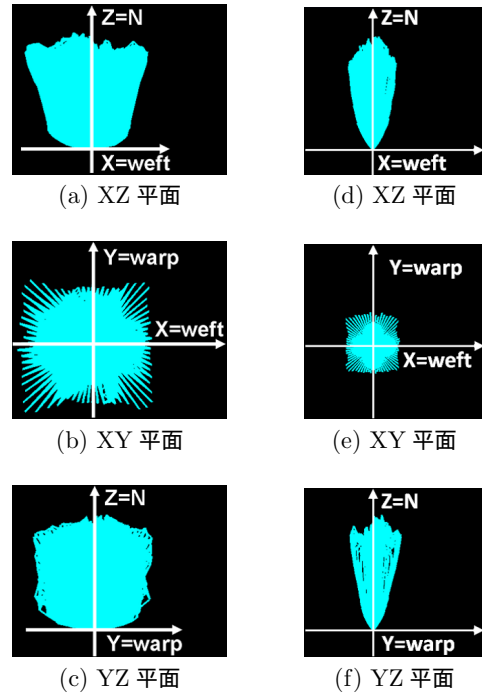


図 16 黒色ポリエステル平織の基準異方性反射分布 (左) と表面の 3 次元微小面分布 (右)

tion) とよび, X 軸をよこ糸方向, Y 軸をたて糸方向, Z 軸を織物の法線方向 N とする球座標系 (原点からの距離を反射率, 方向を反射方向) で表す. $BARD\rho^\circ$ では, 正反射方向が Z 軸方向に一致し, また, よこ糸 (X 軸) 方向とたて糸 (Y 軸) 方向の各軸に対して対称である. したがって, $BARD\rho^\circ$ はシルクライク織物の直交二軸の異方性反射特性を 3 次元直交座標系で対称な形状をもつ曲面として表現したものである. 図 15(a)(b)(c) と図 16(a)(b)(c) に, 黒色ポリエステルサテン (図 5(c) 右) と黒色ポリエステル平織の BARD を示す.

一方, 鏡面反射成分 $\rho_s(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$ と微小面分布の関係は微小面理論 (microfacet theory)[3] に基づ

き, 以下の式 (3) により表わされる.

$$\rho_s(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{D(\mathbf{H})G(\mathbf{L}, \mathbf{V})F_r(\mathbf{L}, \mathbf{H})}{\cos\theta_i \cos\theta_r}. \quad (3)$$

ただし, $\mathbf{V}(\theta_r, \phi_r)$ は視方向, $\mathbf{L}(\theta_i, \phi_i)$ は入射方向, $\mathbf{H}(= (\mathbf{L} + \mathbf{V})/|\mathbf{L} + \mathbf{V}|)$ は微小面の法線を表すハーフベクトル, $D(\mathbf{H})$ は物体表面の微小面分布関数, $G(\mathbf{L}, \mathbf{V})$ は微小面間の入射・反射の遮蔽を表す幾何減衰, $F_r(\mathbf{L}, \mathbf{H})$ はフレネル項である.

$G(\mathbf{L}, \mathbf{V})$ は Cook ら [3] の式 (4) により与えられる .

$$G(\mathbf{L}, \mathbf{V}) = \min \left\{ 1, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{H})}, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})}{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{H})} \right\} \quad (4)$$

$F_r(\mathbf{L}, \mathbf{H})$ は, Schlick[9] の式 (5) により与えられる .

$$F_r(\mathbf{L}, \mathbf{H}) = f_0 + (1 - f_0)(1 - (\mathbf{L} \cdot \mathbf{H}))^5 \quad (5)$$

ここで, f_0 は物体微小面の屈折率で, 微小面に対し垂直に入射した入射光に対する反射光の比である .

BARD は鏡面反射分布に等しく, $\rho^o = \rho_s(\theta_r, \phi_r, 0, 0)$ から, 式 (3), 式 (4), 式 (5) を用いて, 織物表面の微小面分布関数 $D(\mathbf{H})$ を抽出することができる . これは, BARD ρ^o に, 織物表面の微視的幾何構造の " 視方向に依存しない " 曲面本来の 3 次元形状情報が含まれていることを示している . ρ^o のよこ糸 (X 軸) 方向の輪郭形状は, 繊維の断面の連続からなるフィラメント系の断面形状を表し, よこ糸 (Y 軸) 方向の輪郭形状は, フィラメント系の浮きの長さを示している .

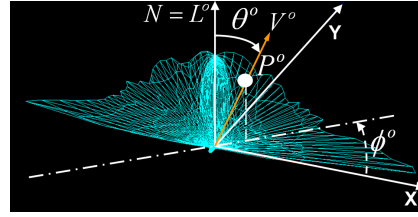
図 15(d)(e)(f) に, 図 15(a)(b)(c) より抽出した微小面分布 $D(\mathbf{H})$ を示す . これらは, 朱子織のもつ直交二軸性の微小面分布の特徴と一致している .

5.2 異方性反射分布特性抽出

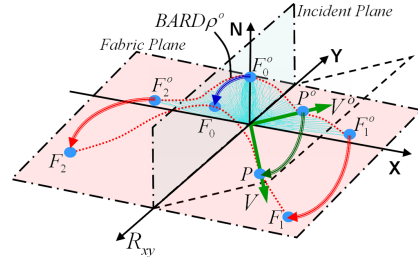
シルクライク織物の直交二軸の異方性反射特性を効率的に安定に抽出するために, たて糸方向入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ における入射角 θ_i の変化に対する基準異方性反射分布の変形特性を解析する . これは, 1)4.2 節の反射分布の観測結果から, たて糸方向入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ の場合の基準異方性反射分布の変形が安定に観測されること, また, 2)5.1 節で, 基準異方性反射分布には, " 観察の方向に依存しない " 織物表面の微視的幾何構造の 3 次元形状情報が含まれているため, 解析結果は観察の方向に依存しないこと, に基づいている .

まず, BARD ρ^o の変形を観察するために, ρ^o 上に反射特徴点を設定する . 図 15 と図 17 に示すように, ρ^o 上で, Z 軸上にある正反射を表す点 $F_0^o(\rho_{F_0^o}^o, 0, 0)$, よこ糸 (X 軸) 方向とたて糸 (Y 軸) 方向のそれぞれで, 最大の視角 (最も水平方向) から観測された反射を表す 4 点, $F_1^o(\rho_{F_1^o}^o, \frac{\pi}{2}, 0)$, $F_2^o(\rho_{F_2^o}^o, \frac{\pi}{2}, \pi)$, $F_3^o(\rho_{F_3^o}^o, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $F_4^o(\rho_{F_4^o}^o, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ の計 5 点を特徴点とする . また, BARD ρ^o 上の任意の点 $P^o(\rho_{P^o}^o, \theta^o, \phi^o)$ とその視方向を $\mathbf{V}^o(\theta^o, \phi^o)$ とする . 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ で, 入射角 θ_i の変化により, ρ^o が変形した反射分布 ρ 上のこれらの特徴点の対応点をそれぞれ $F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, P$ とし, P における視方向を $\mathbf{V}(\theta_r, \phi_r)$ とする . ただし, F_1, F_2, F_3, F_4 が観測されないか, あるいは十分に反射率が小さい場合は 0 とする .

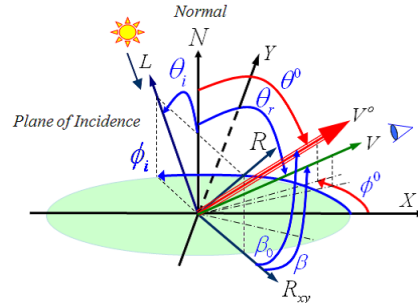
まず, P^o から P における反射方向の変化を考える . 4.2 節の反射分布の観測において図 12(b) に示したように, 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ で θ_i を変化させた場合は, ρ^o 上の任意の点 P^o は, その視方向 \mathbf{V}^o と Y 軸 (正反射方向 $\mathbf{R}(\theta_i, \frac{3\pi}{2})$) を XY 平面に投影したベクトル) がつくる平面上で移動した . この観測結果に基づくと, 入射面 $I(\phi_i)$ の場合は, 図 17(c) に示すように, ρ^o 上の任意の点 P^o はその視方向 \mathbf{V}^o と $\mathbf{R}_{xy}(\frac{\pi}{2}, \phi_i + \pi)$ (正反射方向 $\mathbf{R}(\theta_i, \phi_i + \pi)$ を XY 平面に投影した方向)



(a) 基準異方性反射分布 BARD ρ^o



(b) 入射面 $I(\phi_i = \frac{\pi}{2})$ における \mathbf{R}_{xy} , \mathbf{V} と \mathbf{V}^o の関係



(c) BRDF 幾何における \mathbf{V}^o

図 17 異方性反射の幾何関係

が作る平面上で P に移動する . したがって P^o の視方向 \mathbf{V}^o は \mathbf{V} に変化し, \mathbf{R}_{xy} と \mathbf{V}^o の角度 β^o は, \mathbf{R}_{xy} と \mathbf{V} の角度 β に変化する .

次に, P^o から P における反射率の変化を考える . 式 (5) において, f_0 は BARD ρ^o 上で正反射を表す点 F_0^o の Z 値から得られるため, $f_0 = \rho_{F_0^o}^o$ である . また, 式 (3) において,

$$\tilde{F}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{F_r(\mathbf{L}, \mathbf{H})G(\mathbf{L}, \mathbf{V})}{\cos\theta_i \cos\theta_r} \quad (6)$$

とおくと, P^o における反射率 $\rho^o(\theta^o, \phi^o)$ から P における反射率 $\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$ への変化は, 以下式 (7) により表わされる .

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{\tilde{F}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)}{\tilde{F}(\theta^o, \phi^o, 0, 0)} \rho^o(\theta^o, \phi^o) \quad (7)$$

以下では, これらの反射特徴点間の対応関係から, 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ (=YZ 投影面), 布平面 (XY 投影面), および, X 軸と Z 軸の中間ベクトルと Y 軸が作る中間面の 3 投影面において, たて糸方向の入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ で θ_i を変化させた場合の ρ^o の変形 (反射方向と反射率の変化) を解析し, シルクライク織物の直交二軸の異方性反射特性を抽出する .

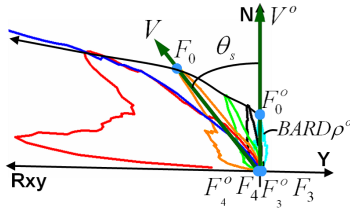


図 18 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ での正反射点 F_0 の変化

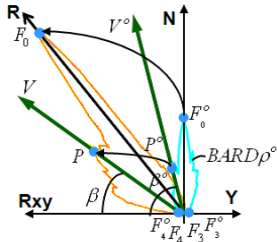


図 19 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ での任意反射点 P^o の変化

表 1 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ での正反射光の実測値と推定値の比較

θ_i	θ_s	ρ_{F_0}	$\rho_{F_0^o}$
0	0	0.213	0.213
$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12} - \frac{\pi}{180}$	0.301	0.227
$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{180}$	0.356	0.279
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0.434	0.427
$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{180}$	1.033	0.908
$\frac{5\pi}{12}$	$\frac{5\pi}{12} + \frac{\pi}{180}$	4.354	3.652

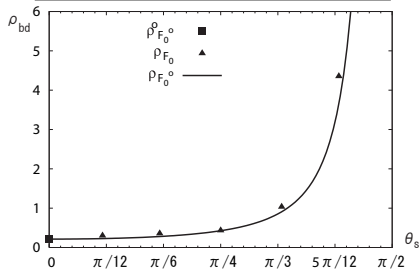


図 20 入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ での正反射率の実測値と推定値の比較

5.2.1 入射面における反射分布解析

まず、図 18 に示すように、入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ において、入射角 θ_i を変化した場合の正反射点 F_0 の方向と反射率の変化を考察する。

表 1 と図 20 に、入射角 θ_i 、実測正反射角 θ_s 、実測正反射率 $\rho_{F_0} (= \rho_{bd}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2}))$ 、 ρ^o 上の F_0^o の正反射率 $\rho_{F_0^o} (= \rho^o(0, 0))$ を用いて式 (7) より推定した F_0 の正反射率 $\rho_{F_0^o} (= \frac{\tilde{F}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2})}{\tilde{F}(0, 0, 0, 0)} \rho^o(0, 0))$ の値とグラフを示す。点 F_0 の実測正反射角 θ_s は θ_i とほぼ一致し、 $\theta_s = \theta_i$ と近似できる。また、実測正反射率 ρ_{F_0} と推定正反射率 $\rho_{F_0^o}$ がほぼ一致することから正反射率 ρ_{F_0} の変化は、式 (7) により近似できる。よって、正反射率の変化は F_0^o における反射率 $\rho^o(0, 0)$ と F_0 における反射率 $\rho_{bd}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2})$ の関係を表す以下の

式 (8) より与えられる。

$$\rho_{bd}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2}) = \frac{\tilde{F}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2})}{\tilde{F}(0, 0, 0, 0)} \rho^o(0, 0). \quad (8)$$

次に、 $I(\frac{\pi}{2})$ における ρ^o 上の任意の点 P^o の反射方向の変化を考察する。図 19 に示すように、 $I(\frac{\pi}{2})$ で θ_i を変化した場合は、正反射点 F_0^o が F_0 に一致するように、水色で表示された ρ^o 全体が、オレンジ色で表示された ρ 全体に一致するように変形している。これを、 ρ^o を正反射方向により二分して考察する。

1) P^o が F_3^o から F_0^o の ρ^o 上の任意の点であれば、 P は ρ 上の F_3 から F_0 間に移動し、視方向 V^o は Y 軸方向から Z 軸方向の間 ($0 < \pi - \beta^o < \frac{\pi}{2}$) の方向から、Y 軸方向から正反射方向 $R(\theta_s, \frac{3\pi}{2})$ の間 ($0 < \pi - \beta^o < \frac{\pi}{2} + \theta_s$) の方向の V へ変化する。

2) P^o が F_0^o から F_4^o の ρ^o 上の任意の点であれば、 P は ρ 上の F_0 から F_4 間の ρ 上の点に移動し、視方向 V^o は Z 軸方向から $R_{xy} (= -Y)$ の間 ($\frac{\pi}{2} < \pi - \beta^o < \pi$) の方向から、正反射方向 R から $R_{xy} (= -Y)$ の間 ($\frac{\pi}{2} + \theta_s < \pi - \beta^o < \pi$) の方向の V へ変化する。

ここで、 F_3^o, F_4^o, F_3, F_4 は Y 軸上にあるため、 F_3^o と F_3 において $V^o = V$ であるから $\beta^o = \beta = \pi$ 、同様に F_4^o と F_4 においても $V^o = V$ であるから $\beta^o = \beta = 0$ である。

以上の 1) と 2) のいずれにおいても正反射角は入射角に等しく $\theta_s = \theta_i$ であるから、 β と β^o が線形の関係にあると仮定すると、以下の式 (9) が得られる。

$$\beta^o = \begin{cases} \frac{\pi/2 - \beta}{\pi/2 - \theta_i} \beta & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_i \\ \frac{\pi/2}{\pi/2 + \theta_i} \beta + \frac{\pi}{\pi/2 + \theta_i} \theta_i & \text{if } \pi/2 - \theta_i \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (9)$$

5.2.2 布平面における反射分布解析

入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ で入射角 θ_i を変化した場合の、布平面 (XY 投影面) における BARD ρ^o 上の反射特徴点 $F_1^o, F_2^o, F_3^o, F_4^o$ の変化を考察する。図 21 に、布平面における反射分布の変化を示す。 F_1^o と F_2^o は Y 軸に対称であるため、以下では、点 F_2^o の反射率と反射方向の変化を考察する。

表 2 と図 23 に、入射角 θ_i 、 $-X$ 軸から F_2 における視方向 V までの実測反射角 ϕ_s 、 F_2 の実測反射率 $\rho_{F_2} (= \rho_{bd}(\frac{\pi}{2}, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2}))$ 、 ρ^o 上の F_2^o の反射率 $\rho_{F_2^o} (= \rho^o(\frac{\pi}{2}, \pi))$ を用いて式 (7) より推定した F_2 の反射率 $\rho_{F_2^o} (= \frac{\tilde{F}(\frac{\pi}{2}, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2})}{\tilde{F}(\frac{\pi}{2}, \pi, 0, 0)} \rho^o(\frac{\pi}{2}, \pi))$ の値とグラフを示す。

入射面における解析結果と同様に、 F_2 の実測反射角 ϕ_s は θ_i とほぼ一致し、 $\phi_s = \theta_i$ と近似できる。また、 F_2 の実測反射率 ρ_{F_2} と推定反射率 $\rho_{F_2^o}$ がほぼ一致することから ρ_{F_2} の変化は、式 (7) により近似できる。よって、 F_2^o における反射率 $\rho^o(\frac{\pi}{2}, \pi)$ と F_2 における反射率 $\rho_{bd}(\frac{\pi}{2}, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2})$ の関係は以下の式 (10) より与えられる。

$$\rho_{bd}(\frac{\pi}{2}, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2}) = \frac{\tilde{F}(\frac{\pi}{2}, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2})}{\tilde{F}(\frac{\pi}{2}, \pi, 0, 0)} \rho^o(\frac{\pi}{2}, \pi). \quad (10)$$

次に、図 22 に示すように、入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ で θ_i を変

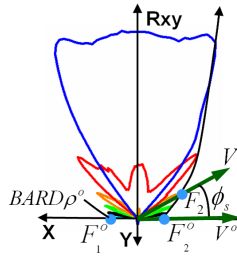


図 21 布平面での点 F_2 の変化

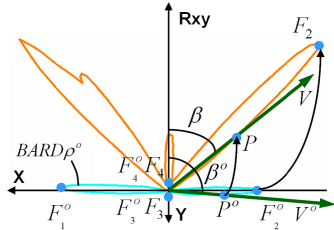


図 22 布平面での任意反射点 P^o の変化

表 2 布平面での正反射光の実測値と推定値の比較

θ_i	ϕ_s	ρ_{F_2}	$\rho_{F_2^o}$
0	$\frac{\pi}{180}$	0.452	0.452
$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{180}$	0.479	0.484
$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{180}$	0.597	0.602
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0.901	0.903
$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{180}$	1.809	1.183
$\frac{5\pi}{12}$	$\frac{5\pi}{12} + \frac{\pi}{180}$	4.737	6.748

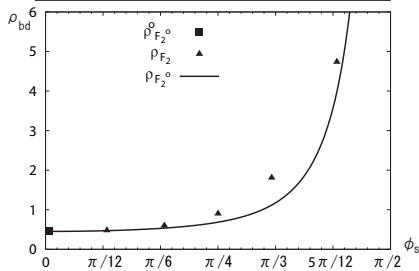


図 23 布平面での正反射率の実測値と推定値の比較

化させた場合は、入射面における変化と同様に、布平面において点 F_2^o が F_2 に移動し、水色で表示された ρ^o 全体が、オレンジ色で表示された ρ 全体に一致するように変形している。入射面と同様に、布平面における点 F_2 の実測反射角 ϕ_s は θ_i とほぼ一致することから、 β と β^o が線形の関係にあると仮定すると、以下の式 (11) が得られる。

$$\beta^o = \begin{cases} \frac{\pi/2 - \beta}{\pi/2 - \theta_i} & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_i \\ \frac{\pi/2}{\pi/2 + \theta_i} \beta + \frac{\pi}{\pi/2 + \theta_i} \theta_i & \text{if } \pi/2 - \theta_i \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (11)$$

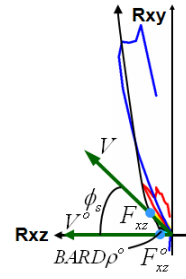


図 24 中間面での点 F_{xz} の変化

表 3 中間面での正反射光の実測値と推定値の比較

θ_i	ϕ_s	$\rho_{F_{xz}}$	$\rho_{F_{xz}^o}$
0	$\frac{\pi}{90}$	0.266	0.266
$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{60}$	0.259	0.285
$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{90}$	0.346	0.354
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{180}$	0.555	0.532
$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{90}$	1.267	1.064
$\frac{5\pi}{12}$	$\frac{5\pi}{12}$	4.531	3.973

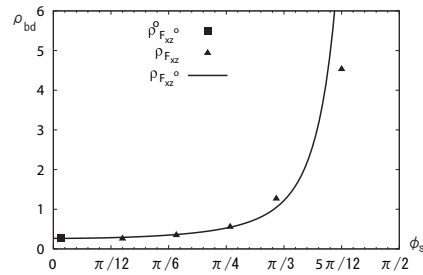


図 25 中間面での正反射率の実測値と推定値の比較

5.2.3 中間面における反射分布解析

入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ で入射角 θ_i を変化させた場合の、 X 軸と N の中間ベクトル $\mathbf{R}_{xz} (= (\mathbf{X} + \mathbf{Z})/|\mathbf{X} + \mathbf{Z}|)$ と \mathbf{R}_{xy} が作る中間面における ρ^o 上の点 F_{xz}^o の変化について考察する。図 24 に、中間面における、反射分布と F_{xz}^o の変化を示す。

表 3 と図 25 に、入射角 θ_i , $\mathbf{R}_{xz}(\frac{\pi}{4}, 0)$ からの $F_{xz}(\rho_{F_{xz}}, \theta_s, \phi_s)$ の視方向 \mathbf{V} までの実測反射角 ϕ_s , F_{xz} の実測反射率 $\rho_{F_{xz}} (= \rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2}))$, ρ^o 上の F_{xz}^o の反射率 $\rho_{F_{xz}^o} (= \rho^o(\frac{\pi}{4}, 0))$ を用いて式 (7) より推定した F_{xz} の反射率 $\rho_{F_{xz}^o} (= \frac{\tilde{F}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)}{\tilde{F}(\frac{\pi}{4}, 0)} \rho^o(\frac{\pi}{4}, 0))$ の、値とグラフを示す。

入射面と布平面における解析結果と同様に、点 F_{xz} の実測反射角 ϕ_s は θ_i とほぼ一致し、 $\phi_s = \theta_i$ と近似できる。また、 F_{xz} の実測反射率 $\rho_{F_{xz}}$ と推定反射率 $\rho_{F_{xz}^o}$ がほぼ一致することから $\rho_{F_{xz}}$ の変化は、式 (7) により近似できる。よって、 F_{xz}^o における反射率 $\rho^o(\frac{\pi}{4}, 0)$ と F_{xz} における反射率 $\rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)$ の関係は以下の式 (10) より与えられる。

$$\rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) = \frac{\tilde{F}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)}{\tilde{F}(\frac{\pi}{4}, 0)} \rho^o(\frac{\pi}{4}, 0). \quad (12)$$

入射面、布平面と同様に中間面における点 F_{xz} の実

測反射角 ϕ_s は θ_i とほぼ一致するから、 β と β^o が線形の関係にあると仮定すると、以下の式 (13) が成り立つ。

$$\beta^o = \begin{cases} \frac{\pi/2}{\pi/2-\theta_i} \beta & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_i \\ \frac{\pi/2}{\pi/2+\theta_i} \beta + \frac{\pi}{\pi/2+\theta_i} \theta_i & \text{if } \pi/2 - \theta_i \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (13)$$

5.3 基準異方性反射分布を用いた BRDF 生成

5.2.1 小節から 5.2.3 小節の反射光解析から、抽出された BARD ρ^o の変形特性 (反射率と反射方向の変化) は一致し、また BARD ρ^o には "観測の方向に依存しない" 織物表面の微視的幾何構造の 3 次元情報が含まれていること、から入射面 $I(\frac{\pi}{2})$ における ρ^o の変形特性は入射面 $I(\phi_i)$ に一般化できる。

よって、式 (8)、式 (10)、式 (12) より、入射面 $I(\phi_i)$ において任意の θ_i の反射分布 ρ と BARD ρ^o に対して、 P における反射率 $\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$ は P^o における反射率 $\rho^o(\theta^o, \phi^o)$ を用いて以下の式 (14) で表わすことができる。

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{\tilde{F}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)}{\tilde{F}(\theta^o, \phi^o, 0, 0)} \rho^o(\theta^o, \phi^o) \quad (14)$$

ただし、 $\mathbf{V}(\theta_r, \phi_r)$ は視方向、 $\mathbf{L}(\theta_i, \phi_i)$ は入射方向、 $\rho^o(\theta^o, \phi^o)$ は ρ^o 上の視方向 \mathbf{V}^o の反射率である。

また、式 (9)、式 (11)、式 (13) より、入射面 $I(\phi_i)$ において θ_i を変化した場合の、正反射方向 $\mathbf{R}(\theta_i, \phi_i + \pi)$ を XY 平面に投影したベクトル \mathbf{R}_{xy} と \mathbf{V} がなす角度 β と \mathbf{R}_{xy} と \mathbf{V}^o がなす角度 β^o の関係は以下の式 (15) で与えられる。

$$\beta^o = \begin{cases} \frac{\pi/2}{\pi/2-\theta_i} \beta & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_i \\ \frac{\pi/2}{\pi/2+\theta_i} \beta + \frac{\pi}{\pi/2+\theta_i} \theta_i & \text{if } \pi/2 - \theta_i \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (15)$$

さらに、 \mathbf{R}_{xy} と \mathbf{V} が作る任意の面において、 \mathbf{V}^o 、 \mathbf{R}_{xy} と \mathbf{V} は同一平面上にあるため以下の関係式 (16)、(17) が成り立つ。

$$\theta^o = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta^o}{\beta} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_r \right). \quad (16)$$

$$\phi^o = \frac{\beta^o \phi_r}{\beta}. \quad (17)$$

以上の式 (14)、式 (15)、式 (16)、式 (17) を用いて、BARD ρ^o から BRDF $\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$ を生成する手順は以下のである。入力を $\mathbf{L}(\theta_i, \phi_i)$ 、 $\mathbf{V}(\theta_r, \phi_r)$ 、 ρ^o とすると、

1. \mathbf{L} から $\mathbf{R}_{xy}(\frac{\pi}{2}, \phi_i + \pi)$ を求める。
2. \mathbf{R}_{xy} から \mathbf{V} までの角度 $\beta = \arccos(\mathbf{R}_{xy} \cdot \mathbf{V})$ を求める。
3. 式 (15) により、 θ_i と β から β^o を求める。
4. 式 (16)、(17) により、 θ_r 、 ϕ_r 、 β 、 β^o から θ^o 、 ϕ^o を求める。
5. 式 (18) により、 θ_r 、 ϕ_r 、 θ_i 、 ϕ_i 、 θ^o 、 ϕ^o から $\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$ を求める。

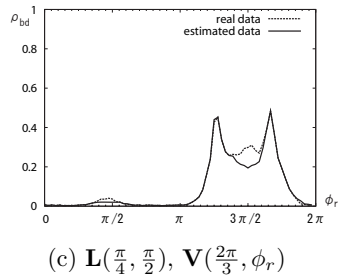
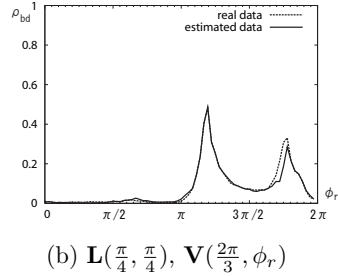
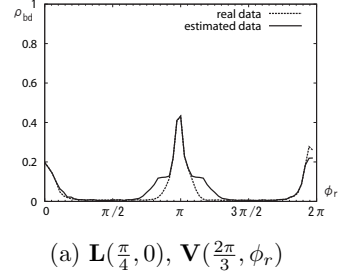


図 26 黒色ポリエステルサテン布の BRDF 生成評価

表 4 黒色ポリエステルサテンを用いた誤差評価

$\mathbf{L}(\theta_i, \phi_i)$	$\mathbf{V}(\frac{2\pi}{3}, \phi_r)$	$\rho_{bd}(\frac{2\pi}{3}, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$			
		ϕ_r	esti.	real	err.(%)
$\mathbf{L}(\frac{\pi}{4}, 0)$	π		0.431	0.433	0.44
	$35\pi/18$		0.220	0.277	20.7
$\mathbf{L}(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$	$43\pi/72$		0.486	0.481	1.17
	$8\pi/9$		0.286	0.330	13.4
$\mathbf{L}(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$	$23\pi/18$		0.452	0.452	0.0
	$5\pi/6$		0.484	0.484	0.0

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{\tilde{F}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)}{\tilde{F}(\theta^o, \phi^o, 0, 0)} \rho^o(\theta^o, \phi^o). \quad (18)$$

ただし、 ρ_d は拡散反射率である。

6 実験結果

実験は、4.1 節で述べた観測環境において、実験対象を黒色のポリエステルサテンとポリエステル平織として行った。入射方向を鉛直方向に固定し、織構造の直交二軸性に基づいて選択された 1/8 球の視点範囲内で、少数視点から観測した鏡面反射分布データを補間し、BARD ρ^o を生成した。本手法により ρ^o から生

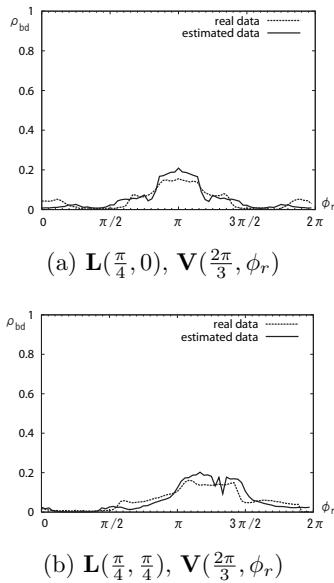


図 27 黒色ポリエステル平織布の BRDF 生成評価

成した BRDF の精度評価として、黒色のポリエステルサテンに対しては入射面がよこ糸 $I(0)$ 、パイアス $I(\frac{\pi}{4})$ 、たて糸 $I(\frac{\pi}{2})$ 方向、黒色のポリエステル平織に対しては入射面がよこ糸 $I(0)$ 、パイアス $I(\frac{\pi}{4})$ 方向に対する反射分布の計測データと、本手法によりそれぞれの対象織物の ρ^o から生成した BRDF の推定値を比較した。また、Alias 社の Maya を使用し、本手法より生成したポリエステルサテンの BRDF を実装したドレス着装シミュレーションを行った。最後に、本手法による BRDF 生成の計測効率性を考察した。

図 26 に、黒色ポリエステルサテンの BRDF の実測値と本手法を用いて生成した BRDF の推定値の比較による精度評価を示す。比較条件は、入射方向が $L(\frac{\pi}{4}, 0)$, $L(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$, $L(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ 、視方向 $V(\frac{2\pi}{3}, \phi_r)$ 、ただし $0 \leq \phi_r < 2\pi$ である。入射面がよこ糸・パイアス・たて糸方向、いずれにおいてもサテンの異方性を表す反射率のピークが 2 つあり、反射率のピーク値が方向、反射率共に十分に実測値と一致していることが確認できる。また、表 4 に、入射面がよこ糸・パイアス・たて糸方向で反射率がピーク値をとる反射方向 ϕ_r の反射率 ρ_{bd} の誤差解析結果を示す。 ρ_{bd} の誤差は約 20% 以内で収まる。入射面がよこ糸方向で誤差が 20.7% と最大となるが、これはサテンの場合、よこ糸方向が最も糸の楕円形状による幾何減衰が起こるため、微小面分布の観測が不完全になるからである。

図 27 に、黒色ポリエステル平織の BRDF の実測値と本手法を用いて生成した BRDF の推定値の比較による精度評価を示す。比較条件は、入射方向が $L(\frac{\pi}{4}, 0)$, $L(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$ 、視方向 $V(\frac{2\pi}{3}, \phi_r)$ 、ただし $0 \leq \phi_r < 2\pi$ である。 $L(\frac{\pi}{4}, 0)$ の場合、 $V(\frac{2\pi}{3}, \pi)$ 付近で反射率が大きく、 $L(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$ の場合、 $V(\frac{2\pi}{3}, \frac{5\pi}{4})$ 付近で反射率が大きくなり、実測値と推定値が一致していることがわかる。

また、 ϕ_r の全範囲の誤差評価として、実測の最大反射率に対する平均誤差の比を考える。黒色ポリエステルサテンに対しては、入射面がよこ糸方向では 7.60%、



図 29 京都南座での仮想デジタルファッションショー



図 30 任意に彩色された柄つきドレス着装シミュレーション

パイアス方向では 6.35%、たて糸方向では 7.84% であり、黒色ポリエステル平織では、入射面がよこ糸方向では 13.5%、パイアス方向では 13.5% である。いずれの織構造に対しても誤差 15% であり、本手法が織構造の違いに依存しない有効性を確認した。

図 28 に拡散反射成分を変化させ、同素材の布物体の任意に彩色したドレス着装シミュレーション結果を示す。シルクライクな光沢を持つ布画像が生成されたことより、十分に異方性を表現できた。

図 29, 30 は本手法を任意彩色・任意柄をもつ布に対して適用し、仮想デジタルファッションショーを行った。

図 31 は白色の布素材に、左から光源を D65, Metal Halide, Tungsten と変えた結果を示す。この結果、本手法が任意の素材色、デザイン、光源色、仮想環境に適用できる有効性が確認できた。

本手法の計測効率性を考察する。計測回数は、従来の画像計測に基づく BRDF 生成手法では n 度間隔で計測した場合、入射方向を $(90/n) * (90/n) = 8100/n^2$ 通り、視方向を $(90/n) * (360/n) = 32400/n^2$ 通りの計 $262440000/n^4$ 回必要である。一方、本手法では、入射方向を真上からの一方向、視方向を $1/8$ 球の $(90/n) * (360/4/n) = 8100/n^2$ 通りの計 $8100/n^2$ 回である。よって、従来の BRDF 生成法に比べ $(8100/n^2)/(262440000/n^4) = n^2/32400$ に計測数を圧縮できる。例えば $n=5$ では、圧縮率は $1/1296$ である。



図 28 任意に彩色されたドレス着装シミュレーション

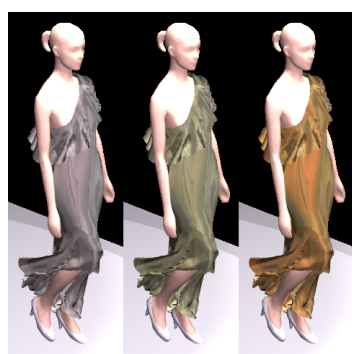


図 31 任意光源下でのドレス着装シミュレーション

7 まとめ

我々は、入射方向を鉛直方向に固定し、織構造の直交二軸性に基づいて選択された $1/8$ 球の視点範囲内で、少数視点観測から得られた織物の鏡面反射分布データを補間した基準異方性反射分布から BRDF を自動生成する手法を提案した。まず、繊維の断面形状・糸の撚り・織構造等に基づくシルクライク織物の微視的幾何構造と異方性反射特性の関係について述べた。入射方向を変化させた場合の基準異方性反射分布の変化を多視点から観測し、獲得した多視点画像から、フレネル効果を考慮した反射光解析により、直交二軸性の異方性反射特性を抽出した。得られた特性に基づき、基準異方性反射分布から高精度の BRDF を生成した。生成した BRDF を用いて異方性反射レンダリングを実現し、同素材の任意に彩色されたドレス着装シミュレーション実験結果から提案手法の有効性を確認した。

今後は、織物の微視的幾何構造に忠実な幾何減衰モデルの提案や、糸間の相互反射を考慮した高精度な BRDF を生成する研究を進める予定である。

参考文献

- [1] M. Ashikhmin, S. Premoze, and P. Shirley, "A Microfacet-based BRDF Generator," Proc. ACM SIGGRAPH 2000, pp.65-74, New Orleans, USA, July 2000.
- [2] M. Ashikhmin, and P. Shirley, "An Anisotropic

Phong BRDF Model," Journal of Graphics Tools, vol.5, no.2, pp.25-32, Dec. 2000.

- [3] R. L. Cook and K. E. Torrance, "A reflectance models for computer graphics," Computer Graphics, vol.15, No.3, pp.307-316, Aug. 1981.
- [4] 原田隆司, "着ごちと科学," 裳華房, 1996-05
- [5] J. Kajiya, "Anisotropic Reflection Models," in Computer Graphics, vol.19, no.3, pp.15-22, July 1985.
- [6] K. F. Karner, H. Mayer, and M. Gervautz, "An Image based Measurement System for Anisotropic Reflection," Proc. ACM SIGGRAPH 1996, vol.15, no.3, pp.119-128, 1996.
- [7] N. Nicodemus, J. Richmond, and J. Hsia, "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance," tech.rep., U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Oct.1977.
- [8] P. Poulin, and A. Fournier, "A model for anisotropic reflection," in Computer Graphics, vol.24, pp.273-282, 1990.
- [9] C. Schlick, "An inexpensive BRDF model for physically-based rendering," Computer Graphics Forum, vol.13, No.3, pp.233-246, June 1994.
- [10] S. A. Shafer, "Using color to separate reflection components," Color Research and Application, vol.10, No.4, pp.210-218, 1985.
- [11] 武田祐樹, 豊田伸作, 松田悠, 田中弘美, 竹村伸太郎, 坂口嘉之, "多視点画像の反射光解析に基づく布の異方性反射モデリング," 情報処理学会研究会報告 CVIM, vol.2003, no.88, pp.41-48, Sept. 2003.
- [12] Yuki Takeda, Viet Huynh Quang Huy, and Hiromi T. Tanaka, "Image-based Rendering with the Anisotropic BRDF of Woven Fabrics," Proc. 7th Eurographics Workshop on Multimedia, pp.135-143, 197, Nanjing, Oct. 2004.
- [13] 武田祐樹, 豊田伸作, 田中弘美, 竹村伸太郎, 坂口嘉之, "画像解析に基づく布の異方性反射モデリング," Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2004 予稿集, pp.107-112, June 2004.
- [14] 竹村伸太郎, 坂口嘉之, 三ツ井茂, 国松敦, 山内康晋, 千原国広, "異方性反射特性の計測と可視化手法の提案," 計測自動制御学会, 第 7 回パターン計測シンポジウム, pp.29-32, 2002.
- [15] Jinhua Yang, and Katsushi Ikeuchi, "A Rendering Method for Woven Clothes Reflections," 情報処理学会研究会報告 CVIM, vol.2003, no.88, pp.33-40, Sept. 2003.
- [16] G. J. Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection," Proc. SIGGRAPH 92, vol.26, pp.255-272, July 1992.

- [17] G. J. Ward, "The RADIANCE lighting simulation and rendering system," SIGGRAPH 1994, pp.459-472, July 1994.
- [18] 安田孝美, 鈴木克知, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 稲垣勝彦, "異方向性を考慮した布地の光反射モデル," 第5回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.215-223, Nov. 1989.



武田 祐樹

2003年立命館大学・理工・情報学科卒。現在、同大学大学院理工学研究科博士課程在学中。コンピュータグラフィクス、コンピュータビジョンの研究に従事。芸術科学会、電子情報通信学会、VR学会、情報処理学会各会員。



坂口 嘉之

1983 富山大・工・電気卒。1985 同大学院電気工学専攻修士課程了。同年、東洋紡績(株)に入社。東洋紡績総合研究所配属。1989年～1991年京都大学研修員。1991年～1993年京都大学共同研究員。1993年～2001年東洋紡績いはんな研究室配属。2001年2月デジタルファッション株式会社設立。2002年4月同社専務取締役。2003年4月同社代表取締役社長。現在に至る。仮想服飾環境の研究に従事。情報科学、CG、画像処理、メカトロニクスに興味を持つ。工博。



田中 弘美

1975年お茶の水女子大学・理・物理卒。1975～1978年(株)富士通勤務。1981年米国ロチェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程修了。1988年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工博。1988～1994年ATR通信システム研究所客員研究員。1994年立命館大学理工学部情報学科教授。現在、同大学情報理工学部知能情報学科教授。CG、CV、VR、3次元画像通信の研究に従事。芸術科学会、IEEE、電子情報通信学会、VR学会、VR医学会、情報処理学会各会員。