

能装束のデジタルアーカイブに向けた織布の異方性反射モデリング

武田 祐樹[†] フィン クアン フィ ヴィエト[†]
坂口 嘉之^{††} 田中 弘美[†]

我々は、能装束のデジタルアーカイブに向けた織布の異方性反射モデリングを提案する。能装束は、その糸の製造工程が特別であり、一般の布と比べて異なる材質でできており、大変貴重な文化財である。また、微視的幾何構造が独特のため、独特の質感がある。またその能装束をデジタルアーカイブするために、画像計測により反射特性を抽出する。そのためには、得られた画像から特定領域ごとに分割し、同領域における反射特性を抽出する。そこで本論文では、単一領域での反射特性を得る手法を提案する。実験対象織布としてシルクライクな無彩色（黒色）のポリエステルサテンを選んだ。これは撚りがかかっていないフィラメント糸の断面が三角形形状で、且つ朱子織りであるため、縦糸横糸の直交二軸性に基づく布の微視的幾何構造の要因が明らかであり、安定に画像計測できることが期待されるためである。効率的な多視点画像の反射光解析により、高精度な反射特性を生成し、同素材の布物体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した。

Image-based Anisotropic Reflectance Modeling of Woven Fabrics For Digital Archive of Noh Costume

YUKI TAKEDA,[†] VIET HUYNH QUANG HUY,[†] SHINTARO TAKEMURA,^{††}
YOSHIYUKI SAKAGUCHI^{††} and HIROMI TANAKA[†]

The reflectance of fabric surface is commonly represented by a 4D bidirectional reflectance distribution function (BRDF). To generate the 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 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 woven fabrics from measurement of the reflectances caused by the incident light only in the direction perpendicular to the fabric's surface.

1. はじめに

最近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。素材に固有の布物体の変形、光沢や質感は独特であるため、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),3),6),11),12)}。しかし、布の縦糸横糸が織り成す複雑な3次元の表面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、任意の光源からの入射光と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)⁵⁾により記述される。布表面の反射光には表面幾何学的構造における光学特性が含まれており、その質感は、肉眼の分解能を問題とする微小な部分の集合体の3次元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の生成法が提案された^{1),13)}。布表面の微視的幾何構造から反射特性を求め、サテンやベルベットをモデル化しレンダリングした結果が報告されている。また、織りの幾

[†] 立命館大学情報理工学部知能情報学科

Department of Human and Computer Intelligence
College of Information Science and Engineering Ritsumeikan University

^{††} デジタルファッション株式会社
Digital Fashion Ltd.

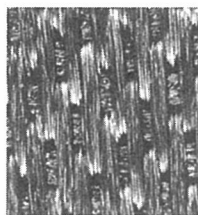
何構造をモデル化し BRDF を生成する手法¹⁰⁾では、計測データから自動的にそのパラメータを抽出する方法が提案されていない。

また、Ward の Gaussian reflectance model¹¹⁾に基づいて、画像計測により BRDF を求める方法⁴⁾が提案されたが、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⁹⁾。しかし、高精度の BRDF を獲得するためには、膨大な数の計測データを必要としている。これに対し効率的な計測による手法⁸⁾があるが、補間精度が十分でなく、誤差が大きいという問題点がある。

そこで本論文では、繊維の断面形状と織り構造の違いにより布の光沢感に相違が現れることに着眼し、光源方向を一定とした少数の多視点観測画像から、反射光解析に基づいて織布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。本論文では、図 1(a), (b) に示すように、シルクライクな無彩色 (黒色) のポリエステルサテンを対象織布とする。これは撚りがかかっていないフィラメント糸の断面が三角形状で、且つ朱子織りであるため、縦系横系の直交二軸性に基づく布の微視的幾何構造の要因が明らかであり、安定に画像計測できることが期待されるためである。まず、光源を布に対し真上から当て、布の織り構造の直交二軸性に基づいて選択された 1/8 球の視点範囲で少数の観測画像データを獲得する。そのデータを下に基準異方性反射分布と呼ぶ基準反射モデルを生成する。次に、入射光を変化させて獲得した多視点画像の反射光解析により直交二軸性の異方性反射の特性を抽出する。得られた特性に基づき、基準反射モデルから高精度の 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、同素材の布物体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した。

2. 織布の BRDF の生成手法

本研究で用いた、全方位型光学異方性反射測定装置 (OGM: Optical Gyro Measuring Machine) を図 2 に示す。測定には Canon Power Shot S40、解像度 2272×1704 、有効画素数約 400 万画素のデジタルカメラを、光源にはメタルハライドランプ 180W (外部調光機能付) を使用した。OGM は、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つ。この自由度を組み合わせることによってあら



(a) 朱子織り (サテン) (b) ポリエステル断面形状

図 1 ポリエステルサテン (対象布)

ゆる光源入射方向、視方向からの計測を可能とする。撮影は暗室にて行う。

能装束の反射特性を計測する際は、真上から撮影した画像を領域分割し、この結果を元に任意の視点方向における画像と特定領域を幾何関係より結びつける。特定の色領域ごとに分割する方法では、反射特性により視点方向と光源方向の組み合わせで色の変化が起こり、分割した領域が変化するからである。

本論文では領域ごとに分割でき、単一の領域に対して反射光解析ができるとする。そこで無地の無彩色ポリエステルサテンを OGM で撮影した画像の中心 16×16 ピクセルの平均を反射光とした。

我々がポリエステルサテンを選んだ理由は、布の反射が微視的幾何構造に非常に強く関係しており⁷⁾、布の微視的幾何構造と反射光の関係の解析が容易であると考えたからである。そこで、ある素材に対して入射光の方向変化に対して観測される反射分布は入射方向に基づいた相関性が見られるはずである。つまり入射方向の変化に対し、反射分布が相関性のある変化を起こすはずである。以下では、この相関性を見つけるために入射方向を少しずつ変えた反射分布を観測しその変化を解析することにより、入射方向と反射分布を関係づけ、一つの入射方向の反射分布の観測画像から任意の入射方向での反射分布を生成する。これにより少数の画像計測による BRDF の生成を実現する。

また、この手法では生成した BRDF から同素材である任意色の布を再現することができる。物体表面の反射は、一般的には鏡面反射成分と拡散反射成分を混ぜ合わせた 2 色性反射モデルで表現される。そして、鏡面反射成分は照明光の色を表し、拡散反射成分は物体色を表す。そこで我々は、計測対象布物体に黒色無彩色のポリエステルサテンを選んだ。これは拡散反射成分がほぼ無く、鏡面反射成分のみを計測することができるからである。そしてこの計測により生成された BRDF は鏡面反射成分だけであるので、任意の拡散反射成分を加えることにより任意色の BRDF を生成

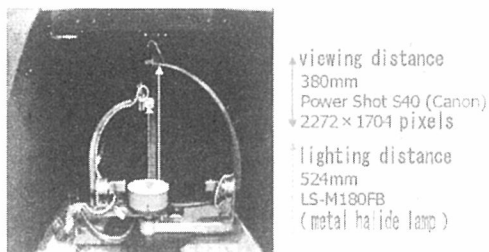


図 2 全方位型光学異方性反射測定装置

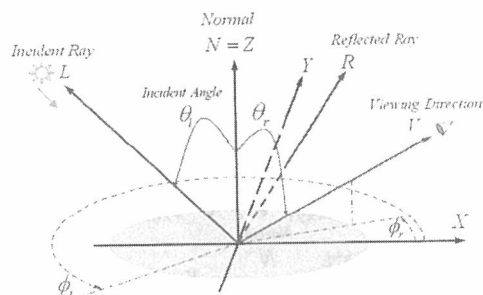


図 3 BRDF 幾何

することができる。

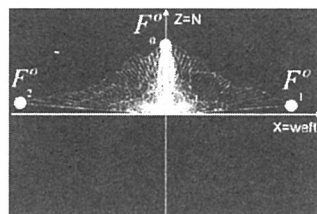
3. 表面上の反射特性

物体表面の反射特性は、任意の光源からの入射光と任意の視方向への反射光の比率として BRDF で表現される。図 3 に BRDF の幾何関係を示す。X 軸が横糸方向、Y 軸が縦糸方向、Z 軸が布の法線方向、N は法線ベクトル、L は光源ベクトル、V は視点ベクトル、R は正反射ベクトル、 θ_i は N と L のなす角、 ϕ_i は L の X 軸からの方位角、 θ_r は N と V のなす角、 ϕ_r は V の X 軸からの方位角である。

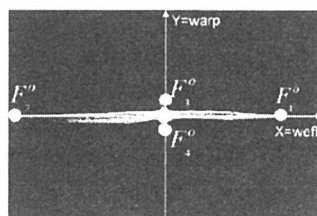
BRDF は物体表面の一点の反射を表現しており、我々は OGM を使用しポリエステルサテン布の BRDF を計測する。そこで、物体表面の微視的幾何構造が反射光と関係が強いことより、ある光源方向で、視点方向を布表面上の半球状の範囲で動かし、反射分布を計測する。入射方向を徐々に変化した状況下でそれぞれの反射分布が入射方向に相関性を持った変化を起こしていれば、ある光源方向での反射分布より任意の光源方向の反射分布が生成できる。つまり BRDF を生成できる。

4. 反射分布の計測

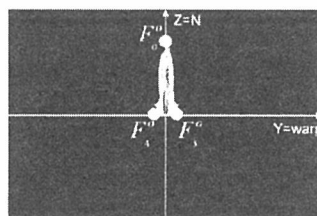
縦糸方向・横糸方向・バイアス方向に入射させ、それ



(a) XZ 平面



(b) XY 平面



(c) YZ 平面

図 4 基準異方性反射分布 (球座標表示)

ぞれの方向で入射角を変化させた場合の反射分布を計測した。入射方向は縦糸、横糸、バイアス方向のそれぞれで、入射角を 0, 15, 30, 45, 60, 75 度とした。また各々の入射に対して、視点角を正反射方向に 0 度から 87 度まで 3 度ずつ、また入射方向にも 0 度から 87 度まで 3 度ずつ撮影する。またその各々に対して布を、5 度ずつ回転させて撮影し、合計 127440 組の反射光データを獲得する。⁷⁾ 中の図 19, 20, 21 には原点からの距離を反射率とし、観測した視方向にプロットする。また、入射光 0 度、15 度、45 度、60 度、75 度の実測データをそれぞれ、水色、白色、緑色、黄色、赤色、青色で彩色し表示した。

この計測データより、入射方位角 ϕ_i が同じ場合、入射角度 θ_i による相関性が反射分布に見られる。たとえば、正反射方向に分布した反射は、入射角が変化し正反射方向が変化するに従い、正反射の方向へその分布を変化させている。これより我々は、入射方向が真上の反射分布を基準反射分布とし、入射方向の変化に対する分布の変化を解析し、任意の入射方向の反射分

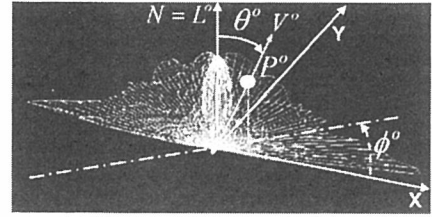
布を生成する。これにより基準反射分布から BRDF を生成する。

そこでまず基準となる入射角 $\theta_i = 0$ の反射分布を基準異方性反射分布 (BARD: Basic Anisotropic Reflectance Distribution) と呼び、 ρ° とし、球座標表現したものを図 4 に示す。ただし OGM の撮影制限により計測不可能部分は補間してある。また、織り構造の対称性と同様に、 $\text{BARD}\rho^\circ$ も X 軸・Y 軸で対称性があるため、計測は最小限で済む。

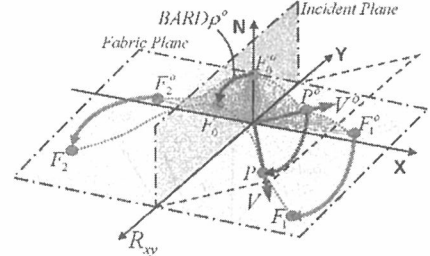
$\text{BARD}\rho^\circ$ が入射角の変化に伴い、徐々に変化する様子を考察するため、 $\text{BARD}\rho^\circ$ に 5 つの特徴点を定め、その特徴点が入射角の変化に対してどう変化するか追跡する。安定な追跡のために図 4 のように X 軸上で、Z 軸上で Z 値が最大の点 F_0° 、X 値が最大・最小の点 F_1° , F_2° 、Y 軸上で Z 値が最小の点 F_3° , F_4° の合計 5 点を追跡する。そこでまず、 $\text{BARD}\rho^\circ$ 上の特徴点が入射角の変化に伴い、どう変化するかを追跡する。次に、特徴点以外の任意点は入射角の変化に対しどう変化するかを追跡する。図 5(a), (b) に示すように、法線ベクトル N と一致する光源ベクトル L° での時の反射分布 $\text{BARD}\rho^\circ$ 上の点を F_0° , F_1° , F_2° , F_3° , F_4° , P° とし、入射角が変化した時の反射分布上の点を F_0 , F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , P とする。なぜなら、 $\text{BARD}\rho^\circ$ 上の F_0° , F_1° , F_2° , F_3° , F_4° が Z, X, Y 軸上の最大最小点であるように、 F_0 , F_1 , F_2 , F_3 , F_4 は任意の入射角の反射分布上にある特徴点であるからである。そして $\text{BARD}\rho^\circ$ 上の点 P° と任意の入射角でも反射分布上にある点 P が対応している。ここでは $\text{BARD}\rho^\circ$ と視点ベクトル V° が交わる点を P° とし、任意の反射分布と視点ベクトル V が交わる点を P とする。また、視点ベクトル V° は $(\theta^\circ, \phi^\circ)$ で表す。

前の BRDF 計測結果より、入射角 θ_i の変化で $\text{BARD}\rho^\circ$ 上の V° と V の対応は V° と R_{xy} で作られる平面内で考えればよいことが分かった。ただし、 R_{xy} は光源ベクトル L に対する正反射ベクトル R を XY 平面に投影したベクトルである。また、点 F_3 , F_4 は入射角によらず一定であるため、 $F_3 = F_3^\circ$, $F_4 = F_4^\circ$ である。

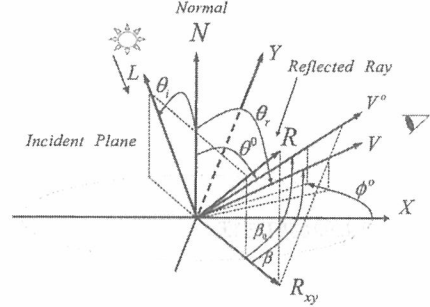
図 5(c) のように、入射角の変化に伴う V° と V の対応づけは 2 つの角度を考える。 β は R_{xy} と V の間の角度で、 β° は R_{xy} と V° の角度である。この 2 つの角度を入射角の変化に対して特徴点を追跡する際に比較することで V° と V の対応づけを行う。また、BRDF を $\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$ とする⁷⁾。



(a) 基準異方性反射分布 ρ° (BARD)



(b) R_{xy} , V と V° の関係



(c) BRDF 幾何での V°

図 5 異方性反射の幾何関係

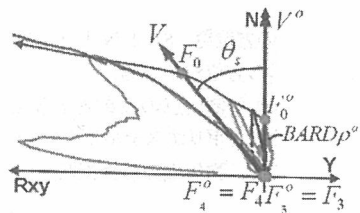


図 6 入射面における点 F_0 の追跡

5. 計測した反射分布の解析

入射面における反射分布解析

まず、入射面で入射角度の変化に対する特徴点 F_0 の反射率と分布について考える。入射面での反射分布を図 6 に示す。表 1 は左から順に入射角度 θ_i とそれぞれの入射角度に対する反射角度 $\theta_s (= \frac{\pi}{2} - \beta)$, F_0

θ_i	θ_s	ρ_{F_0}	$\frac{\rho_{F_0}^0}{\rho_{F_0}^0 \cos \theta_i}$	$\frac{1}{\cos \theta_i}$	$\frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_s}$
0	0	0.213	1.000	1.000	1.000
15	14	0.301	1.409	1.035	1.072
30	29	0.356	1.670	1.155	1.333
45	45	0.434	2.033	1.414	2.000
60	61	1.033	4.841	2.000	4.000
75	76	4.354	20.403	3.861	14.93

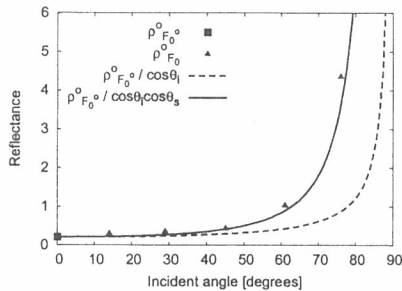


図 7 入射面における反射

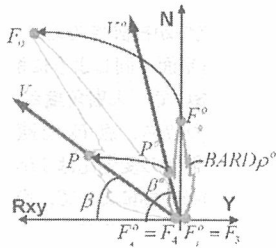


図 8 入射面における反射分布の対応付け

での反射率 $\rho_{F_0} (= \rho_{bd}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2}))$, BARD ρ^0 内の点 $F_0^0 (\rho_{F_0}^0 = \rho_{bd}(0, \frac{3\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}))$ の反射率 $\rho_{F_0}^0$ に対する ρ_{F_0} の比, $1/\cos \theta_i$, $1/\cos \theta_i \cos \theta_s$ を表している。また図 7 には入射面におけるこれらの関係を表した。

この結果より、反射率が最大になる特徴点 F_0 の分布する角度は入射角度とほぼ一致することが分かった。つまり $\theta_s = \theta_i$ で近似できる。また、入射角度の増加に対して、反射率 $\rho_{F_0}^0$ に対する特徴点 F_0 の反射率 ρ_{F_0} の比の変化は $1/\cos^2 \theta_i$ で近似できる。よって以下の関係式 (1) を導出した。

$$\rho_{bd}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, \theta_i, \frac{\pi}{2}) = \rho_{bd}(\theta_s, \frac{3\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}) \frac{1}{\cos^2 \theta_i}. \quad (1)$$

次に、入射面で入射角度の変化に対する特徴点 F_4 , F_0 , F_3 とその間の点の分布について考える。その様子を図 8 に示す。点 F_0^0 , F_3^0 , F_4^0 は BARD ρ^0 上の特徴点 3 点である。ここで、点 F_3^0 , F_4^0 は入射面内で水平面である XY 平面上にあるため、 $F_3^0 = F_3$, $F_4^0 = F_4$

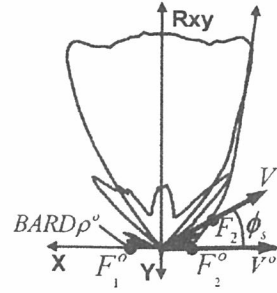


図 9 布平面における点 F_2 の追跡

θ_i	ϕ_s	ρ_{F_2}	$\frac{\rho_{F_2}^0}{\rho_{F_2}^0 \cos \theta_i}$	$\frac{1}{\cos \theta_i}$	$\frac{1}{\cos \theta_i \cos \phi_s}$
0	1	0.452	1.000	1.000	1.000
15	16	0.479	1.060	1.035	1.072
30	31	0.597	1.323	1.155	1.333
45	45	0.901	1.996	1.414	2.000
60	59	1.809	4.008	2.000	4.000
75	76	4.737	10.493	3.861	14.93

である。 β^0 は BARD ρ^0 上の任意の点 P^0 を通る視点ベクトル V^0 と R_{xy} の間の角度である。 β は点 P を通る V と R_{xy} の間の角度である。

入射角度の変化に対して、点 F_3^0 , F_4^0 は不変であるが、点 F_0^0 は点 F_0 に分布を変化させる。つまり点 F_3^0 , F_4^0 では $\beta^0 = \beta$ である。そして点 F_4^0 から点 F_0^0 の範囲は点 F_4 から点 F_0 の範囲に縮小し、点 F_3^0 から点 F_0^0 の範囲は点 F_3 から点 F_0 の範囲に拡大する。この 2 つの範囲の拡大縮小は線形であると考えた。それゆえ、角度 β^0 と β の関係は式 (2) で表すことができる。この関係式は点 P と点 P^0 の関係を表している。

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

以上より、入射面における BARD ρ^0 の任意の点 P^0 と任意の入射角度の反射分布の対応づけができた。

布平面における反射分布解析

ここでは、入射面と同じように布平面での入射角度の変化に対する特徴点の変化について考察する。布平面での反射分布を図 9 に示す。ただし、点 F_1 と点 F_2 は Y 軸に対して対称であるので、点 F_2 だけを考える。表 2 には左から順に入射角度 θ_i とそれぞれの入射角度に対する反射角度 $\phi_s (= \frac{\pi}{2} - \beta)$, F_2 での反射率 $\rho_{F_2} (= \rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2}))$, BARD ρ^0 内の点 $F_2^0 (\rho_{F_2}^0 = \rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, 0, \frac{\pi}{2}))$ の反射率 $\rho_{F_2}^0$ に対する ρ_{F_2} の比, $1/\cos \theta_i$, $1/\cos \theta_i \cos \phi_s$ を表している。また図 10 には入射面におけるこれらの関係を表した。

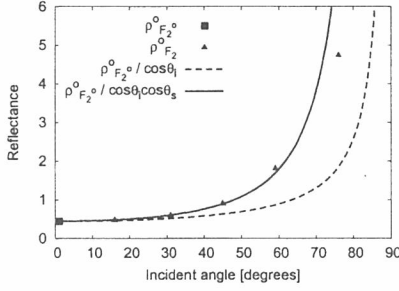


図 10 布平面における反射

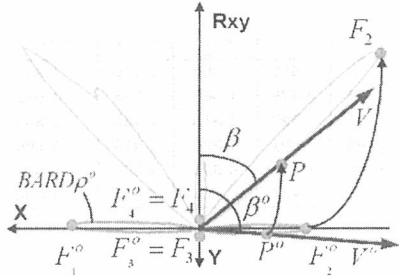


図 11 布平面における反射分布の対応付け

この結果より、反射率が最大になる特徴点 F_2 の分布する角度は入射角度とほぼ一致することが分かった。つまり $\phi_s = \theta_i$ である。また、入射角度の増加に対して、反射率 $\rho_{F_2}^0$ に対する特徴点 F_0 の反射率 $\rho_{F_0}^0$ の比の変化は $1/\cos^2\theta_i$ で近似できる。よって以下の関係式 (3) を導出した。

$$\rho_{bd}\left(\frac{\pi}{2}, \phi_s, \theta_i, \frac{\pi}{2}\right) = \rho_{bd}\left(\frac{\pi}{2}, \phi_s, 0, \frac{\pi}{2}\right) \frac{1}{\cos^2\theta_i}. \quad (3)$$

次に、布平面において $\text{BARD}\rho^0$ の任意の点 P^0 と入射角度 θ_i ($\neq 0$) における反射分布の任意の点 P を比較する。図 11 には $\text{BARD}\rho^0$ の特徴点 3 点 F_2^0, F_3^0, F_4^0 とそれらに対応する点 F_2, F_3, F_4 を表している。入射角度の変化に対して、点 F_3^0, F_4^0 は不変であるが、点 F_2^0 は点 F_2 に分布を変化させる。このことから、布平面において $\text{BARD}\rho^0$ の任意の点 P^0 と入射角度 θ_i ($\neq 0$) における反射分布の任意の点 P の関係は以下の式 (4) で表現できる。

$$\beta^0 = \begin{cases} \frac{\pi/2}{\pi/2 - \phi_s} \beta & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_i \\ \frac{\pi/2}{\pi/2 + \phi_s} \beta + \frac{\pi}{\pi/2 + \phi_s} \phi_s & \text{if } \pi/2 - \theta_i \leq \beta \leq \pi \end{cases}$$

以上より、布平面における $\text{BARD}\rho^0$ の任意の点 P^0 と任意の入射角度の反射分布の対応づけができた。

任意平面における反射分布解析

以上の入射面と布平面の関係式が、同じようにそれ

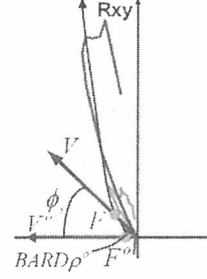


図 12 ある斜面における点 F の追跡

表 3 ある斜面における入射角度と反射の比較

Table 3 Comparing the incident angle and the reflections in an inclined plane.

θ_i	ϕ_s	ρ_F	$\frac{\rho_F}{\rho_{F^0}^0}$	$\frac{1}{\cos\theta_i}$	$\frac{1}{\cos^2\theta_i}$
0	2	0.266	1.000	1.000	1.000
15	18	0.259	0.975	1.035	1.072
30	32	0.346	1.301	1.155	1.333
45	46	0.555	2.087	1.414	2.000
60	58	1.267	4.765	2.000	4.000
75	75	4.531	17.045	3.861	14.93

以外の平面で成り立つか検証するために、入射面と布平面の中間にある平面で同じように解析してみる。図 6 では入射面において、入射角度が変化する時に $\theta_s = \theta_i$ の関係が成り立ち、点 F_0 を通る $\mathbf{V}$ は $\mathbf{R}_{xy}$ に近づく。また、反射率の変化比は $1/\cos^2\theta_i$ である。同じように図 9 では布平面において、点 F_1, F_2 に対しても同じことが言える。そこで、このことが任意の平面で言えば $\text{BARD}\rho^0$ の任意の点 P^0 、任意の特徴点 F^0 と入射角度 θ_i ($\neq 0$) における反射分布の任意の点 P 、点 F の関係は以下の式 (5)、(6) で表現できる。

$$\rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) = \rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, 0, \phi_i) \frac{1}{\cos^2\theta_i}, \quad (5)$$

$$\beta^0 = \begin{cases} \frac{\pi/2}{\pi/2 - \theta_i} \beta & \text{if } 0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_i \\ \frac{\pi/2}{\pi/2 + \theta_i} \beta + \frac{\pi}{\pi/2 + \theta_i} \theta_i & \text{if } \pi/2 - \theta_i \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (6)$$

以上のことを確かめるために、 $\mathbf{V}^0(\frac{\pi}{4}, 0)$ と $\mathbf{R}_{xy}$ が作る平面で解析する。図 12 はその平面での $\text{BARD}\rho^0$ の点 F_0^0 と点 F_1^0 の中間点であり、反射率が最大となる点 F^0 とその点を通る $\mathbf{V}^0$ 、点 F と視点ベクトル $\mathbf{V}$ (4) を表している。表 3 は左から順に入射角度 θ_i とそれぞれの入射角度に対する反射角度 ϕ_s 、 F での反射率 ρ_F 、 $\text{BARD}\rho^0$ 内の点 F^0 の反射率 $\rho_{F^0}^0$ に対する ρ_F の比、 $1/\cos\theta_i$ 、 $1/\cos^2\theta_i$ を表している。また図 13 にはこの平面におけるこれらの関係を表した。

その結果、この平面では特徴点 F 、 F^0 と P 、 P^0 に

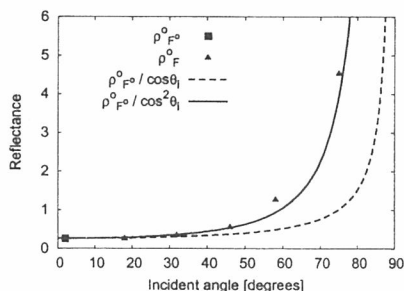


図 13 ある斜面における反射

対して式 (5), (6) の関係が言えることが分かった。

以上より、任意の $\mathbf{V}^\circ$ と $\mathbf{R}_{xy}$ が作る平面で式 (5), (6) の関係が成り立つと結論付けれる。

5.1 BRDF の生成

これまでから、 $\text{BARD}\rho^\circ$ を用いて任意の光源方向に対する反射分布を生成できることから我々は BRDF を以下の式 (7) で表す。

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{1}{\cos^2 \theta_i} \rho^\circ(\theta^\circ, \phi^\circ). \quad (7)$$

ただし、 (θ_r, ϕ_r) は視点方向、 (θ_i, ϕ_i) は光源方向、 ρ_d は拡散反射成分、 $\rho^\circ(\theta^\circ, \phi^\circ)$ は $\mathbf{V}^\circ$ が $(\theta^\circ, \phi^\circ)$ 方向の $\text{BARD}\rho^\circ$ の反射率で図 5(b) はこの関係を表している。また、 $\mathbf{V}^\circ$ 、 $\mathbf{R}_{xy}$ と $\mathbf{V}$ は同一平面上にあるため以下の関係式 (8), (9) が成り立つ。

$$\theta^\circ = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta^\circ}{\beta} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_r \right), \quad (8)$$

$$\phi^\circ = \frac{\beta^\circ \phi_r}{\beta}. \quad (9)$$

6. 実験結果

本手法の精度評価とデモとしてドレスシミュレーションを示す。まず、精度評価では本手法を用いて生成した BRDF と実計測による BRDF を比較する。BRDF の比較条件として、光源方向は $(\frac{\pi}{4}, 0)$, $(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$, $(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ で視点方向は $\theta_r = \frac{2\pi}{3}$ で ϕ_r を 0 から 2π まで変化させた時の反射率を比べる。図 14 は本手法で生成した BRDF と実計測から得た BRDF の比較結果を表している。縦糸・バイアス・横糸、いずれの方向においても異方性を表す 2 つのピークがあり、反射率のピーク値が方向、大きさ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 に反射率がピーク値である方向、大きさの誤差解析の結果を示す。方向の誤差に関しては 5 パーセント未満であり、十分な精度と言える。なお、図 14(a) の ϕ_r が 270 度付近、(b) の 330 度付近、(c) の 180 度付近で見られる誤差は横糸

表 4 誤差解析

	ϕ_s (本手法/実測)	方向 誤差	ρ_{bd} (本手法/実測)	反射率 誤差
縦糸方向	230/230	0	0.466/0.452	0.030
入射	310/300	0.033	0.461/0.484	0.048
バイアス方向	220/215	0.023	0.508/0.481	0.057
入射	335/320	0.047	0.445/0.330	0.349
横糸方向	180/180	0	0.625/0.433	0.445
入射	360/350	0.029	0.499/0.277	0.801

による反射の影響によるものと思われる。これは縦糸・横糸の異方性が等しい平織りの実験で更なる改善が可能であるとする。また、図 15 は本手法で生成した BRDF を 2 色性反射モデルに適用してドレスシミュレーションを行った結果を表している。非常にリアルスティックな画像が生成できている様子がわかる。

ここで本手法の計測効率性と精度について考察する。まず、計測効率性については従来の画像計測に基づく手法では、光源の方向を n 度ずつ計測した場合、 $(90/n) * (90/n) = 8100/n^2$ 通りの光源と視方向は物体の上半球の範囲を計測する必要があった。それに対し、本手法では光源方向を一方で視方向は 1/4 半球の範囲の計測で十分であることから $(n^2/8100) * (1/4) = n^2/32400$ に計測を圧縮できる。例えば $n=5$ の時は 1/1296 である。また、精度に関しては⁸⁾ では 116 枚の画像より BRDF を生成していたが、本手法では 540 枚の画像を入力とし BRDF を生成した。本手法の方が撮影枚数は僅かに増えたが、精度は十分に上回る。

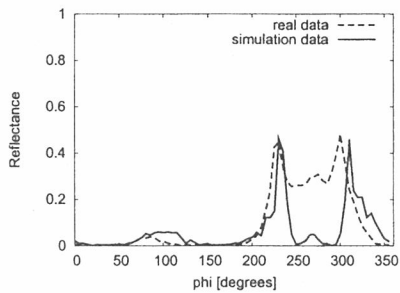
7. まとめ

我々は、繊維の断面形状、糸の撚り、織り構造といった織布の微視的幾何構造に基づき、効率的な観測から得られた織布の反射データから BRDF を自動生成する提案した。また、実験結果より本手法が十分に有効であることを確認した。今後は反射の分光特性を考慮するために、マルチバンドカメラでの撮影を考慮していく。

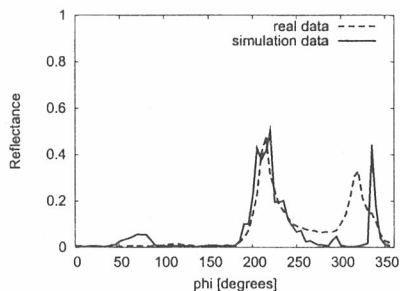
謝辞 実験に用いた 3D モデルアニメーションを提供し、有益なアドバイスをいただいたデジタルファッション株式会社の竹村伸太郎様には深く感謝いたします。

参考文献

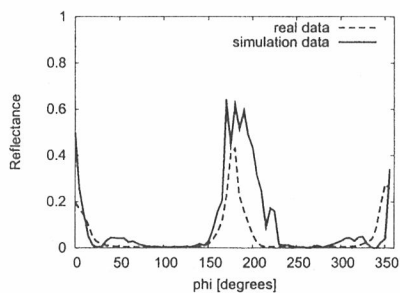
- 1) M. Ashikhmin, S. Premoze, and P. Shirley, "A Microfacet-based BRDF Generator," Proc. ACM SIGGRAPH 2000, pp.65-74, New Or-



(a) 縦糸方向入射の誤差



(b) バイアス方向入射の誤差



(c) 横糸方向入射の誤差

図 14 入射方向を変えた場合の誤差

leans, 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) J. Kajiya, "Anisotropic Reflection Models," in Computer Graphics, vol.19, no.3, pp.15-22, July 1985.
- 4) 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.
- 5) N. Nicodemus, J. Richmond, and J. Hsia:

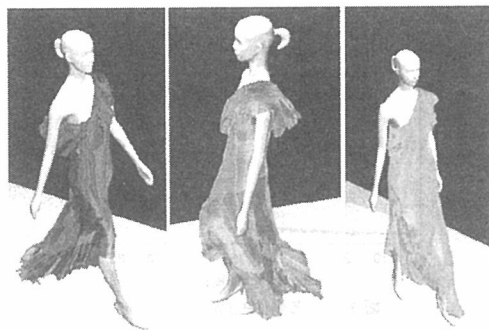


図 15 ドレスシミュレーション

Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, tech.rep., U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Oct.1997.

- 6) P. Poulin, and A. Fournier, "A model for anisotropic reflection," in Computer Graphics, vol.24, pp.273-282, 1990.
- 7) Yuki Takeda, Viet Huynh Quang Huy, and Hiromi T. Tanaka, "Image-based Rendering with the Anisotropic BRDF of Woven Fabrics," Proceedings of 7th Eurographics Workshop on Multimedia, pp.135-143,197, Nanjing, Oct. 2004.
- 8) 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, 東京, June 2004.
- 9) 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, 2002.
- 10) 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, 北海道, Sept. 2003.
- 11) G. J. Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection," Proc. SIGGRAPH 92, vol.26, pp.255-272, July 1992.
- 12) G. J. Ward, "The RADIANCE lighting simulation and rendering system," SIGGRAPH 1994, pp.459-472, July 1994.
- 13) 安田孝美, 鈴木克知, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 稲垣勝彦, "異方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.