

リアリティーベースド・エンターテインメントのための 布の異方性反射特性モデリング

田中 弘美

理工学研究科

1 はじめに

コンピュータビジョン (CV)・コンピュータグラフィクス (CG) 研究による 3次元視覚情報処理技術の進展により、貴重な文化財や文化遺産のデジタルアーカイブやデジタルコンテンツを非接触で獲得した画像情報から自動構築する研究が精力的に進められている。また、実世界に基づく高精細で高品質のデジタルエンターテインメントを構築するために、実物体の幾何特性や物理特性、さらに表面反射特性等に基づき実世界に忠実な可視化を実現することが期待されている。実世界には剛体や柔軟物体をはじめ多様で複雑な 3次元物体が無数存在している。そのうち、我々が纏う衣服や身の回りの家具の表面などの布物体が約 3分の1を占めるとされている。素材に固有の布地物体の光沢や質感は独特であり、その織り構造と繊維の形状や光の透過性により異方性反射を起こす。これを忠実に表現することが CV や CG における課題である。

CGにおける布の質感表現の研究は、1980年代後半より始められ、まず、布の変形挙動を力学的特性に基づいてモデル化し、皺やドレープなどの布形状やその動的な変形を表現する方法が提案された。また、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 [3]~[7]。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) [2] 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次元的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 [9]~[12]。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、Ward の Gaussiann reflectance model [6] に基づいて、画像計測により BRDF を求める方法 [8] 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 [13]。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。

そこで本研究では、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、少数の多視点観測画像から、反射光解析に基づいて布の異方性反射モデルを自動生成する方法を提案する。まず、シルクライクな無彩色 (黒色) の合成繊維を対象として、布の織り構造の直交二軸性に基づいて選択された直交する 4方向のみからの少数の観測画像データを獲得する。次に観測データ間を力学的異方性を考慮した補間式である拡張 KES (Kawabata's Evaluation System for fabric) を用いて補間し、対象布物体の BRDF を高精度に効率的に生成する。得られた BRDF 異方性反射輝度モデルを用いて、同素材の布物体の赤色に彩色された任意視点画像を合成し、提案手法の有効性を確認した。

2 布地の構造

2.1 繊維・糸・織りの構造

図 1 に示すように、布地の最小構成単位は繊維 (fiber) で、一般に、繊維は太さに対して十分な長さをもつ。繊維を数十から数百本集めて束にした一本を単位糸または単糸 (unit string) という。図 2 に示すように、絹やナイロンなどの長い繊維はよりがかけられずに、繊維がほぼ平行に並んでいるものが多く、これをフィラメント糸 (filament string) という。一方、木綿などの短い繊維はよりをかけて、繊維と繊維をつなぐ事により、長い糸を構成する。これをスパン糸 (spun string) という。単糸が一本または数本集まり、一般に呼ばれる糸 (string) となる [10]。布の織り方は様々であるが、縦横一本ずつの糸を交互に織り重ねたものを平織り、縦糸または横糸がの表面に多く出ているものを、朱子織り (サテン) という。

2.2 繊維の断面形状

合成繊維は、天然繊維が持つ光沢や風合いを再現するために、図3に示すような様々な断面形状をしている。図11(a)に示すように、絹の繭糸は2本のフィブロンとそれらを披覆するセシリンから成り立ち、織物にした後、精練すると、セシリンが除去され、絹の風合いがもたらされる。フィブロンの断面はやや扁平な丸味を帯びた三角形状をしている。そのため、図11(b)に示すように、ポリエステルのように絹を模倣したシルクライク合成繊維の断面は三角形状をしている [16]。

本研究では、繊維の断面形状・糸のより・織り構造と反射特性との微視的幾何拘束関係を考察する。そのため、図11に示すように、三角断面形状の繊維がよりがかけられずほぼ平行に並んでいるフィラメント糸の朱子織のポリエステルを対象織布とする。

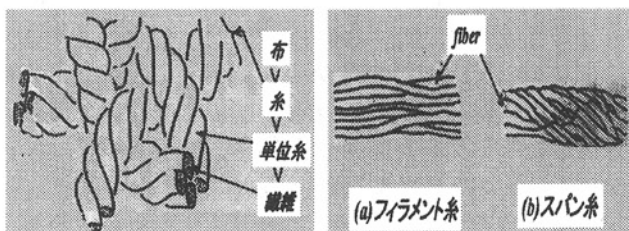


図1: 布の構造

図2: 単糸

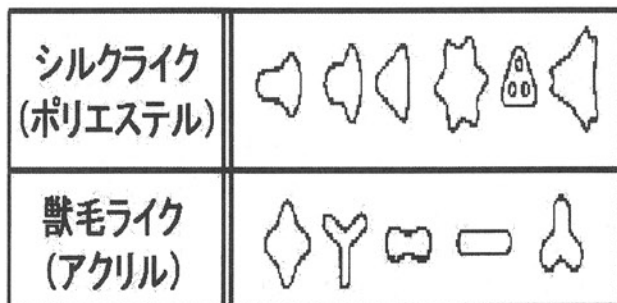
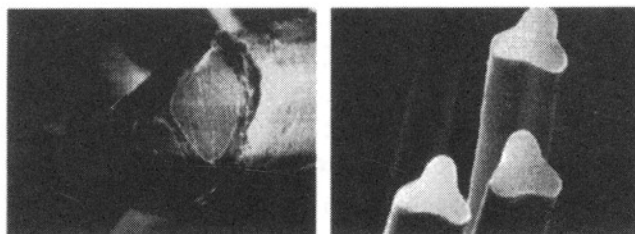


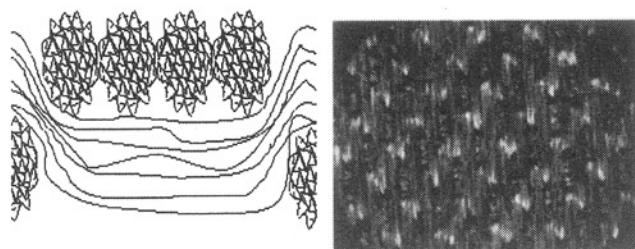
図3: 合成繊維の断面形状



(a) 天然シルクの繭糸

(b) ポリエステル繊維

図4: 繊維の断面形状



(a) フィラメント単糸の朱子織りの断面

(b) ポリエステル朱子織りの断面

図5: フィラメント糸の朱子織り布

2.3 布の力学的異方性

本研究では、布の光学的異方性は、力学的異方性と同様に、縦糸横糸の直交する織り構造に起因していることから、力学的異方性の補間方法を用いて計測データを補間することを考える。

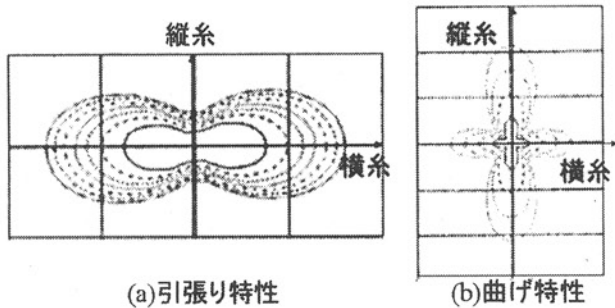
布は直交する縦糸と横糸を結びつけている内部摩擦力で構成され、布の異方性は直交異方性板理論が当てはまるとされている [14][15]。繊維業界では、布の引張り特性や曲げ特性等の力学的物理特性を測定する方法として、KES(Kawabata's Evaluation System for fabric)法が広く用いられている。KES法は本来、縦糸・横糸特性から、布の風合いを定量化する目的で開発されたものであり、縦糸・横糸の特性のみを考慮しているため、布特性のその複雑な異方性が表現できていない。そこで、坂口ら [1]はKES法を拡張し、縦糸と横糸特性と共に、バイアス(45度/135度)方向の特性を用いる、直交二軸性の布の力学的異方性を定式化した。

拡張KES法において、任意の方向の引張り特性は、以下の式(1)、(2)により表される。

$$\phi_{\theta}^h(f) = \left\{ \frac{\cos^4 \theta}{\phi_{\frac{h}{4}}^h(f)} + G' \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{\phi_{\frac{h}{135}}^h(f)} \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$G' = \frac{4}{\phi_{\frac{h}{4}}^h(f)} - \frac{1}{\phi_{\frac{h}{45}}^h(f)} - \frac{1}{\phi_{\frac{h}{135}}^h(f)} \quad (2)$$

ここで、 $\phi_{\frac{h}{4}}^h(f)$ 、 $\phi_{\frac{h}{45}}^h(f)$ 、 $\phi_{\frac{h}{135}}^h(f)$ は、それぞれ、縦糸方向、横糸方向、バイアス(45°/135°)方向の引張り特性である。 θ は横糸方向と成す角度、 f は引張り力、 h は履歴を示す。任意の曲げ特性は、式(1)における変数 f (=引張り力)を η (=曲率)に置き換えたものに等しい。また、光学異方性の場合には、摩擦力を考慮する必要がないことから、 $h=0$ とすることができる。図6(a)(b)にポリエステルの引張り特性と曲げ特性の実測値(実線)と補間値(波線)の比較を示す。式(1)による補間結果は実測値と良く一致していることがわかる。



(a) 引張り特性 (b) 曲げ特性
図 6: ポリエステルの力学的異方性

2.4 布の光学的異方性

フィラメント単糸の朱子織り布の断面は、図 5 のように、縦糸（または横糸）のみが布表面に多く表れるように織られており、繊維の多層構造として考えられる。ポリエステル繊維の断面形状は、図 4(b) に示すように、ほぼ三角形であるが、単糸の形状は織られているため、上下につぶされた扁平な丸味をもつ三角柱と考えられる。従って、観測される反射光は、単糸の最上層の扁平な三角断面形状の繊維表面での光反射について考えることにより、その反射傾向を推定することができる。

最上層の繊維表面を構成する微小面の法線方向は、図 7 のように分布している。これを縦糸断面から見ると、図 7(b) のように、左右の斜面方向を向く微小面が最も多く、上部の扁平な部分に近づくにつれて微小面の分布が減少し、さらに、頂上部では水平な微小面の分布が増加している。一方、図 7(a) のように、横糸断面（繊維の走っている方向）から見た場合、繊維がほぼ平行に走っており、ほとんど微小面は鉛直上方を向いている。

以上の 2 断面方向の分布特性から、扁平で対称な形状の 3 次元的な微小面分布が推定できる。以上の 3 次元微視的幾何構造の法線分布に基づいて、1) 横糸方向、2) 縦糸方向、3) バイアス 45 度方向から、入射角 45 度の光を照射した場合の反射光分布を推定する。

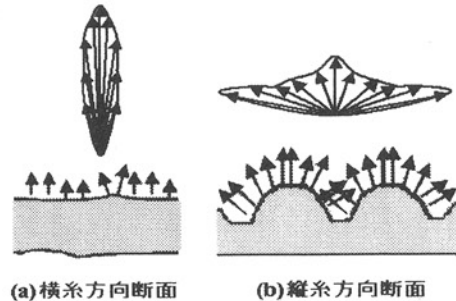
横糸方向から入射した場合は、ほとんど微小面法線は鉛直上方を向いているので、図 8(a) のように正反射方向への反射光が強く、また、単糸の形状が上下につぶされた扁平な丸味をもつ三角柱であるため、鉛直上方向の反射も少しあると推定される。バイアス方向から光を入射させた場合は、図 8(b) のように、反射方向は正反射方向以外にその断面形状にしたがって正反射方向が強く、左右に少し開いたような反射傾向が推定される。

縦糸方向から光を入射させた場合は、図 8(c) のように、正反射方向以外に、左右の三角斜面の断面形状から、その両翼に大きく広がるような反射が予測できる。

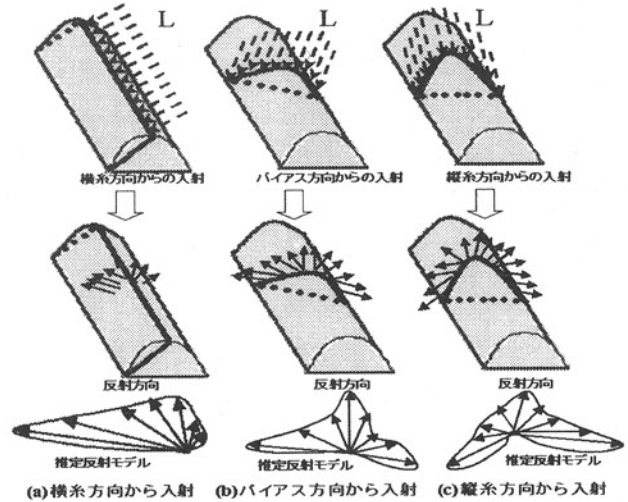
図 9(a)(b)(c) に、横糸方向から、バイアス 45 度方向から、縦糸方向から、それぞれ入射角 45 度で入射した

光による、反射光の実測データを示す。上記の微視的幾何構造モデルにより推定した反射特性と、十分に一致した実測値が観測された。

以上から、フィラメント単糸の織布の反射特性は、繊維の断面形状、糸のより織り構造による、布表面の微視的幾何構造に基づいていることが確認できる。



(a) 横糸方向断面 (b) 縦糸方向断面
図 7: シルクライク布の微小面方向分布



(a) 横糸方向から入射 (b) バイアス方向から入射 (c) 縦糸方向から入射
図 8: 微視的幾何構造に基づく反射光モデルの推定



(a) 横糸方向から入射 (b) 45° 方向から入射 (c) 縦糸方向から入射
図 9: 反射光の実測値

3 布の異方性反射特性の計測

布は素材ごとに光学異方性が異なっているため、対象布物体の高精度の高次関数である BRDF を獲得するためには莫大な測定数（入射方向と視方向の組み合わせ）が必要になる。そこで本研究では、1) 織り布は直交二軸の異方性を持ち、糸は一軸の異方性を持つため、資料を一周分測定すれば、異方性の次元がわかること、また、2) 布の二軸異方性が KES 法の補間式で補間可能な

らば、4方向の測定で十分であることから、試料を45度ずつ回転させて、直交4方向の反射率を測定する。

3.1 測定環境

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10に示す。測定にはCanon PowerShot 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ゆる光源入射角、視点角からの計測を可能とする。対象織り布はポリエステルサテンで朱子織りであるため縦糸が布の表面に多く現れており、また縦糸繊維の断面形状は三角形の形をしている。図11(a)(b)に縦糸・横糸断面を示す。

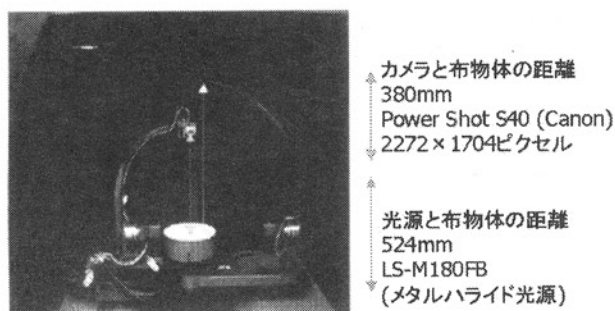
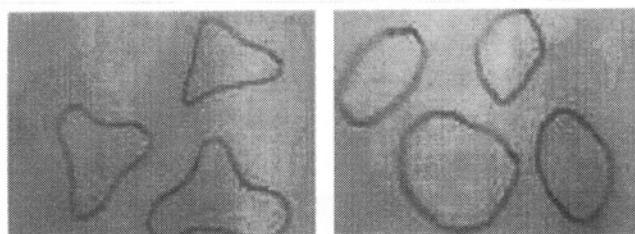


図10: OGM(光学異方性測定装置)



(a) 縦糸断面拡大図 (b) 横糸断面拡大図

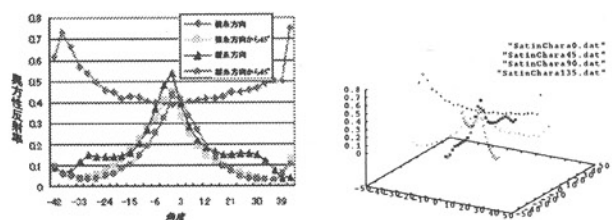
図11: 朱子織りの縦糸横糸断面

4 拡張KES法に基づく異方性反射モデリング

本研究では、1) 布の光学的異方性は、力学的異方性と同等に、縦糸横糸の直交する織り構造に起因していると考えられること、又、2) バイアス方向は布表面で最も光が透過する特徴的な方向と一致していることから、縦糸横糸、45度と135度のバイアス方向の反射特性を、KES法を用いて、補間することにより、全方向の布の異方性反射特性を獲得することを試みる。

Step1 縦糸・横糸・45度/135度バイアス方向の反射率測定

入射方向、視方向と織り方向による3方向間の相対関係の違いによる反射強度を測定するために、入射方向と視方向の成す角を90度に保ち、正反射面において、光源入射角は87度から3度まで、視点角は3度から87度まで変化させ、29組の(入射方向、視点方向)の反射光(輝度)を画像計測する。同じ条件で、縦糸方向、45度/135度バイアス方向の正反射面において反射光を計測し、合計116組の反射光データを獲得する。同時に計測した標準白色板を用いて補正した結果を図12に示す。横軸は、正反射とカメラのずれ角度(正反射方向との1/2ずれ角に相当する)を示し、入射角が45度のとき(x=0)カメラは正反射を観測する。反射強度は、正反射方向を軸に対称性を持つ。つまり、ずれ角が等しい場合は、反射強度が等しいことが確認できる。また縦糸方向に現れている2つのこぶは横糸の影響が出ていると考える。



(a) 角度 (=1/2 ずれ角) と 反射率 (b) 3次元表示

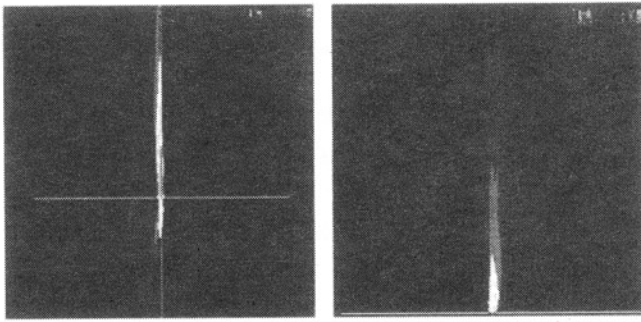
図12: 正反射方向とのずれ角と反射率の関係

Step2 全方向反射測定

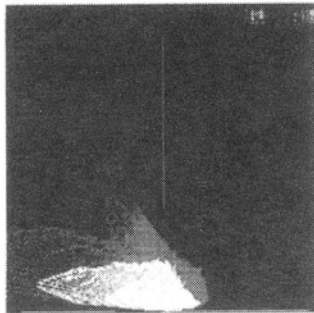
微視的幾何構造と反射光分布の関係を明らかにするために、1) 横糸、2) 45°方向、3) 縦糸方向から入射した光の反射光を全方向から計測する。

今回測定した光源入射角度は0・15・30・45・60・75度であり、これを横糸方向・バイアス方向・縦糸方向から入射させる。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、また正反射方向と反対側も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。

横糸方向・バイアス方向・縦糸方向から入射角45°で光を投影した場合の反射光を全方向から観測した実測データを図13,14,15に示す。入射光0°, 15°, 45°, 60°, 75°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。

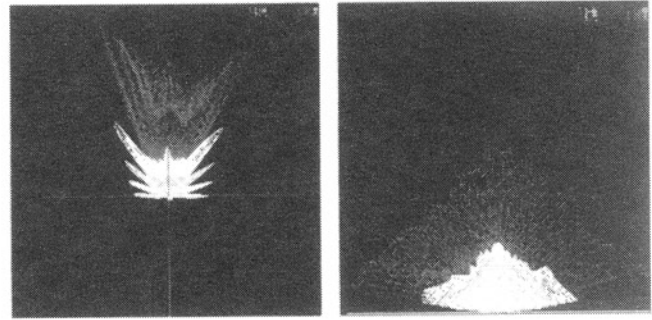


(a) 横糸・縦糸平面 (b) 横糸・法線平面

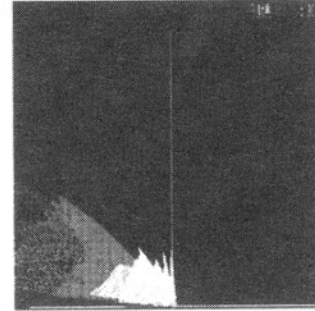


(c) 縦糸・法線平面

図 13: 横糸方向からの入射による反射光



(a) 横糸・縦糸平面 (b) 横糸・法線平面



(c) 縦糸・法線平面

図 15: 縦糸方向からの入射による反射光

Step3 布構造に基づく異方性反射補間

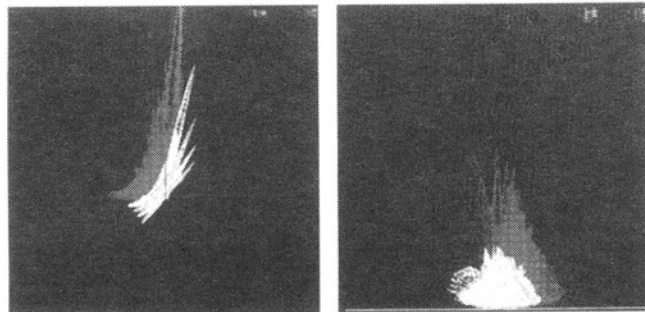
0° (横糸方向), 90° (縦糸方向), 45° / 135° (バイアス方向) の正反射面において計測された4方向の反射率から2節で述べた拡張型, KES法を用いて全周方向の反射率を補間する。

まず, 正反射方向から等しいずれ角の各0°, 45°, 90°, 135°の4方向の反射率 $\rho_0, \rho_{\frac{\pi}{4}}, \rho_{\frac{\pi}{2}}, \rho_{\frac{3\pi}{4}}$ を得る。これは図12において, 等しい角度 (=1/2 ずれ角) で計測されたy軸に平行な線上の4点に対応する。これらを, 式(1), 式(2)において,

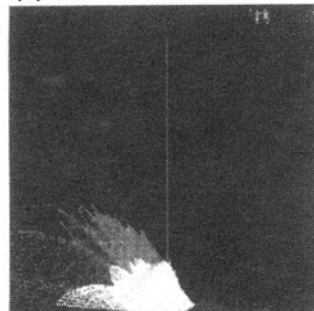
$$\phi_{\theta}^h(f) = \rho_0, \phi_{\frac{\pi}{4}}^h(f) = \rho_{\frac{\pi}{4}}, \phi_{\frac{\pi}{2}}^h(f) = \rho_{\frac{\pi}{2}}, \phi_{\frac{3\pi}{4}}^h(f) = \rho_{\frac{3\pi}{4}}$$

として代入し, 式(1), (2)から任意方向の方向の反射率 ρ_{θ} を $\phi_{\theta}^h(f)$ を用いて補間する。(ただし, $h=0$ とする) 図16に, 図12において, ずれ角が-84°から+84°までの29組の等ずれ角の全方向反射率を, 拡張KES法を用いて補間した結果を, 横糸縦糸, 横糸ずれ角, 縦糸ずれ角平面のそれぞれに, 投影した図を示す。

また, 図17にずれ角-60度, ずれ角+60度, 0度(正反射方向)の拡張KES法を用いた反射率補間値(実線)と実測値(破線)の比較を示す。実測値は, 直交二軸性を示し, 拡張KES補間値と十分に一致していることが確認できる。



(a) 横糸・縦糸平面 (b) 横糸・法線平面



(c) 縦糸・法線平面

図 14: バイアス45度方向からの入射による反射光

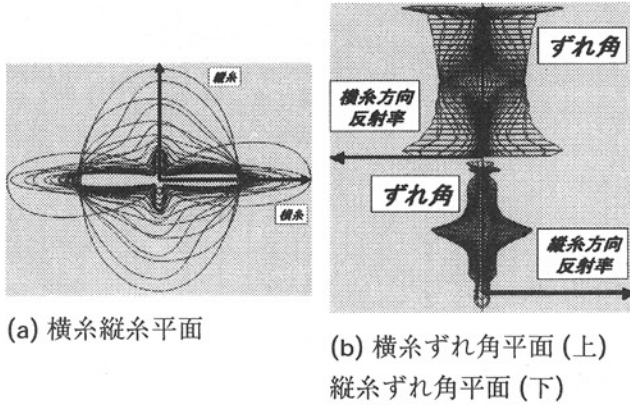
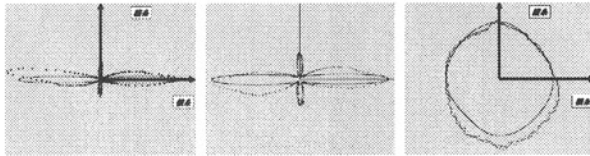


図 16: KES 法による等ずれ角の反射率補間



(a)-60 度ずれ角 (b)+60 度ずれ角 (c)0 度ずれ角
反射率 角反射率 射率

図 17: KES 補間値と実測値の比較

さらに、各方向の誤差は図 17(a) に示すように、四葉状に二軸性を持つため、KES 補間の (1) 式は (2) に誤差値を加えることにより以下の (3) 式とする。

$$\phi_{\theta}^h(f) = (\phi_u^h(f) - \phi_v^h(f)) \left(\frac{\phi_u^h(f)}{\phi_{\frac{\pi}{2}}^h(f)} \right)^b \sin^c \theta \cos^d \theta \quad (3)$$

以上より、全方向の正反射面における任意のずれ角の正反射面における任意のずれ角の反射率を得ることができる。

Step4 布の BRDF 異方性反射モデリング

図 18 に、4 章において KES 法を用いて生成した等ずれ角反射率曲線群を、X 軸 Y 軸を横糸縦糸とし、Z 軸を正反射方向とする 3 次元空間に、反射率の大きさを原点からの距離として球座標表現したものを示す。これを、異方性反射率表現と呼ぶ。

異方性反射率表現より、BRDF は以下の式で与えられる。

$$\text{BRDF}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_r(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i} \quad (4)$$

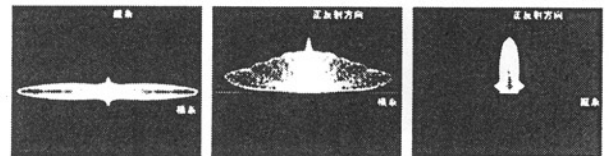
$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, 0) \cos^2 \phi_i + \rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \frac{\pi}{2}) \sin^2 \phi_i \quad (5)$$

$$= \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \rho \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \rho_{kes}(\gamma, \frac{\pi}{2} - \phi) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \phi = \frac{\beta \phi_r}{\beta_0}, \gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta_0}{\beta} (\frac{\pi}{2} - \theta_r), \beta' = \beta - \theta_i \sin \beta, \sin^2 \frac{\beta_0}{2} = \sin^2 \frac{\phi_r}{2} + \frac{1}{4} \cos^2 \theta_r$$

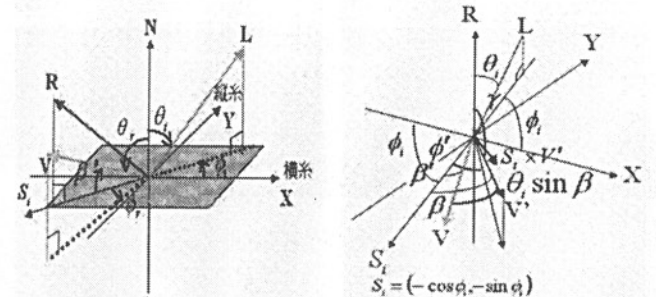
N は布の法線ベクトル、L は光源ベクトル、V は視点ベクトル、R は反射方向ベクトル、S_i は R の XY 平面への射影ベクトル、φ_i は反射面から横糸方向のずれ角、θ_i は光源の入射角、φ_r は正反射面から視点ベクトルのずれ角、θ_r は法線ベクトルから視点ベクトル V のずれ角、β' は S_i から V のずれ角 (図 19(a))、β は V と V' のなす角 (図 19(b))、P は、異方性反射率表現において、V に対応する点で正反射方向から γ、横糸方向から φ ずれた点である (図 19(d))。

図 19(c) では β と β' の関係を示している。S_iVV' 曲面内で比例関係により φ、γ、β' を求める。つまり β': β = φ_r:φ、β:β' = π/2 - θ_r:π/2 - γ から導出する。また S_iV と β' の関係から β' を導いた。

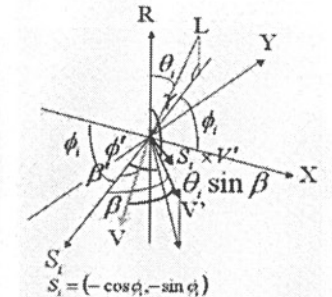


(a) 横糸縦糸平面 (b) 横糸正反射平面 (c) 縦糸正反射平面

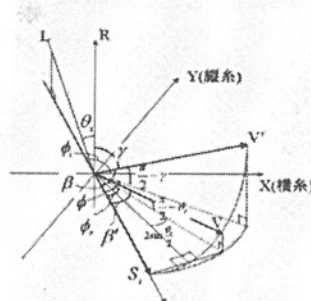
図 18: 異方性反射率表現 (球座標表示)



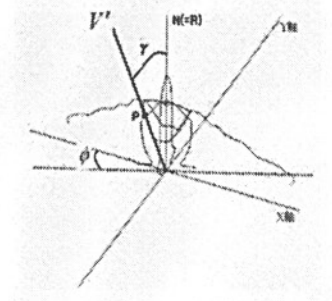
(a) BRDF パラメータ



(b) V と V' の関係



(c) β と β' の関係



(d) 異方性反射率表現と V' の関係

図 19: BRDF 異方性反射モデリングの各パラメータの関係

Step5 生成したモデルの評価

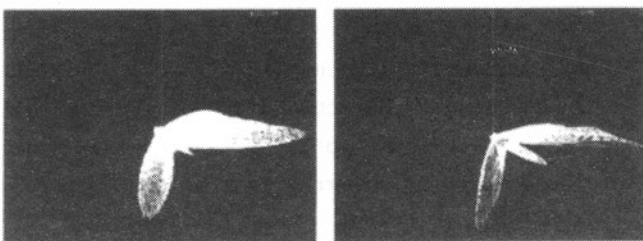
モデルの精度を評価するために、1) 横糸方向から、2) 縦糸方向から、3) 45° バイアス方向から、入射角 30 度、45 度に対する全方向の反射光強度を実測値と比較する。横糸方向からの入射光による反射光は正反射面をピークとし、正反射面からずれると急激に減少している。また視点が布に水平方向に近づくにつれ増大している。次に縦糸方向からの入射光による反射強度は正反射方向でピークが表れる。45 度方向からの入射光による反射は横糸・縦糸の両方に光が当たることにより、2つのピークが生成されると推定される。

図 20 に縦糸方向からの光源が入射角 45 度毎の提案モデルの変形と、また、図 21 に 45 度バイアス方向からの光源が入射角 45 度毎の提案モデルの変形と、実測値（全方向の反射強度）の比較を示す。両者とも、モデル値と実測値が十分に一致していることが確認できる。

図 22,23(a)(b) に横糸、縦糸方向から光源入射角 30° と 45° の正反射面における、提案反射モデルによる反射強度と実測値との比較を示す。正反射方向のピークの方と強度は実測値と良く一致している。また、縦糸方向から入射した場合は、もうひとつの下方の小ピークも実測値と一致しており、これは横糸による反射光と推定される。

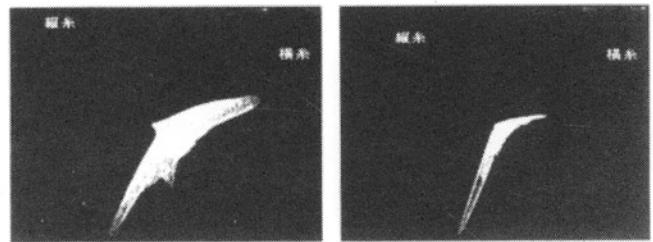
式 (3) において、二軸の四つ葉上の誤差補正を行った結果を図 24 に示す。点線は実測データ、実線は KES 補間データ、太線は誤差データを示す。最小二乗誤差の最小値から、 $a=4, b=0.9, c=50$ を設定した。実験結果から、実測値に近い補正結果が得られた。

さらに観測画像解析から生成した異方性反射モデルを用いて同素材で同じ光沢をもつ任意に彩色したドレスシミュレーションの結果を図 25 に示す。



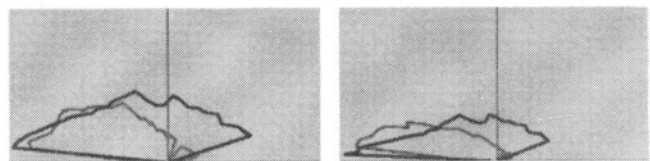
(a) 提案反射モデル (b) 実測値

図 20: 縦糸方向からの入射角 45 度による反射光



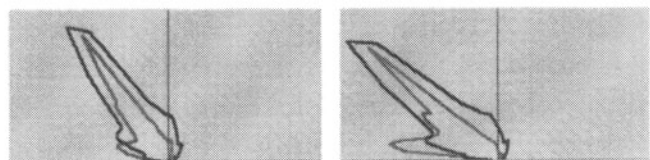
(a) 提案反射モデル (b) 実測値

図 21: 45 度バイアス方向からの入射角 45 度による反射光



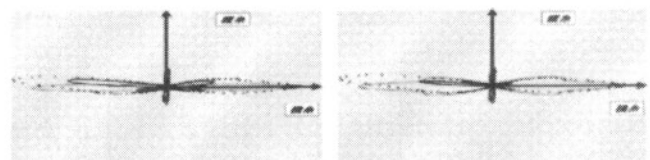
(a) 30 度モデル (b) 45 度モデル

図 22: 横糸方向モデル



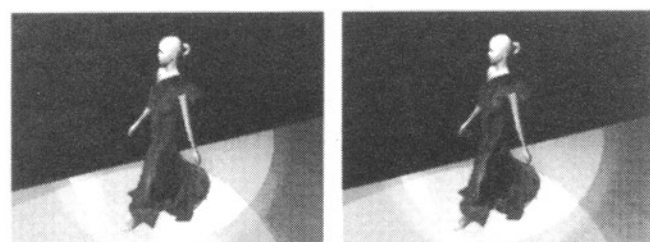
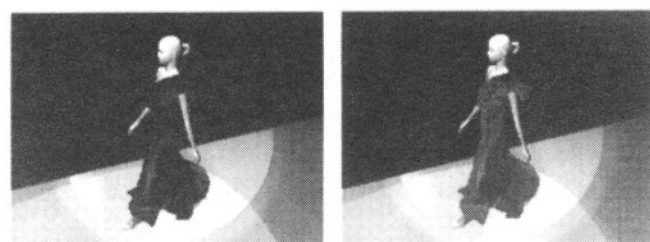
(a) 30 度モデル (b) 45 度モデル

図 23: 縦糸方向モデル



(a) 補正前 (b) 補正後

図 24: 誤差補正の評価



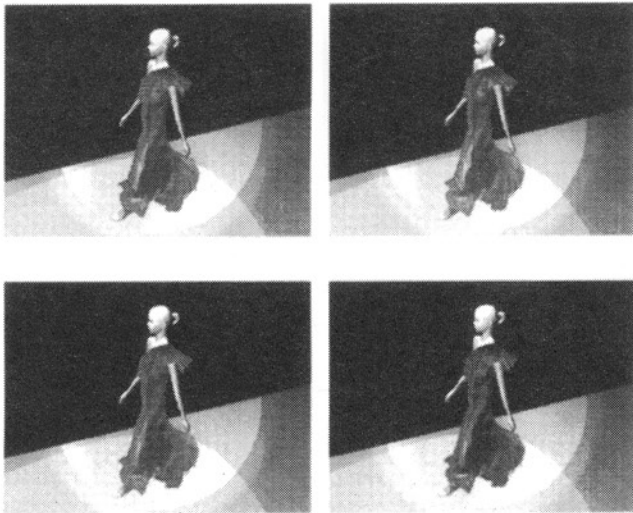


図 25: レンダリング結果

5 まとめ

繊維の断面形状と織り構造の違いにより布の光沢感の相違が現れることに着眼し、シルクライクな無彩色(黒色)の合成繊維を対象として、織り構造の直交二軸性に基づいて選択された小数の多視点観測画像から、反射光解析に基づいて布の異方性反射モデルを自動生成する方法を提案した。まず、布地表面の微視的幾何構造と、反射特性の拘束関係を、実測データに基づいて明らかにした。次に、布の織り構造の直交二軸性に基づく力学補間法を用いて、対象織布のBRDFを高精度に効率的に生成する方法を提案した。

シルクライクな合成繊維を用いた実験結果から、提案手法が布物体の異方性反射特性を表現するBRDF高精度に効率的に獲得できることを確認した。

参考文献

- [1] 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克彦, "仮想服飾環境 PARTY-動的変形可能な布のための数値計算方法-", 電子情報学会誌, J77-D-II, 5, pp.912-921(1994)
- [2] 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.1997)
- [3] J.Kajiya, "Anisotropic Reflection Models", in Computer Graphics, vol.19, pp.15-22(1985)
- [4] P.Poulin and A.Fournier, "A model for anisotropic reflection", in Computer Graphics, vol.24, pp.273-282, (1990)

- [5] Michael Ashikhmin, Pete Shirley: "An Anisotropic Phong BRDF Model", Journal of Graphics Tools, v.5, no.2(2000), pp.25-32
- [6] G.J.Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection", in Computer Graphics(Proc.Siggraph,92), vol.26, pp.255-272(July 1992)
- [7] G.Ward, "The RADIANCE lighting simulation and rendering system", Computer Graphics(SIGGRAPH '94), pp.459-472, July 1994
- [8] Konrad F. Karner, Heinz Mayer, Michael Ger-vautz: "An Image based Measurement System for Anisotropic Reflection", in Proc, ACM SIG-GRAPH96(1996)
- [9] Michael Ashikhmin, Simon Premoze, Pete Shirley: "A Microfacet-based BRDF Generator", The proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, 23-28, pp.65-74
- [10] 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(1989-11)
- [11] 高木元太郎, 田中弘美: "布の光反射モデルのための表面反射特性の測定と検討", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-12-221, pp.428, Mar.1997
- [12] 宇佐美賢子, 田中弘美: "反射光解析に基づく布の異方性反射モデルの生成", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-12-221, pp.285, Mar.1999
- [13] 竹村伸太郎, 坂口嘉之, 三ツ井茂, 国松敦, 山内康晋, 千原国広, 「異方性反射特性の背億亭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
- [14] W.J.Shanahan, D.W.Lloyd and J.W.S.Hearle: "Characterizing the elastic behavior of textile fabrics in complex deformations", Textile Research Institute, 48, 9, pp.495-505(1978)
- [15] 篠原昭: "織物の力学異方性", 繊維機械学会誌, 19, 11, pp.807-816(1996)
- [16] 原田隆司: "着ごこちと科学", 裳華房, 1996-05