

画像解析に基づく二重透過を利用した 織布の透過および反射特性の抽出

松田悠

武田祐樹

田中弘美

立命館大学 情報理工学部

近年、有形・無形文化財を次世代へ伝えるべく「デジタル保存・コンテンツ化」技術が著しい進歩を遂げている。有形文化財である能装束等の布物体は、素材固有の独特な質感や光沢をもち、これらの特性を忠実に表現し再現することが重要な課題である。本稿では、透過性を持つ布地物体を対象とし、計測画像を解析することにより、布地物体の幾何構造、透過特性及び反射特性を抽出し、さらにそれらの特性に基づき計測画像データを圧縮し、効率的なレンダリングを実現する方法を提案する。

A new method taking advance of the twofold transparency component for measuring the BRDF and BTDF of woven cloth

Yu Matsuda

Yuki Takeda

Hiroimi Tanaka

Faculty of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

Recently, technology of digital archiving and making contents makes remarkably progress to pass down tangible and intangible cultural asset to generations. Clothes like “Nou costume” have peculiar appearances and luster, so it is an important problem to reproduce these characteristics accurately. In this paper, we propose compression of measurement data and an efficient image-based method for rendering of woven fabrics after we extract geometry, transparency and reflection of transparent cloth.

1. はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)技術やハードウェア性能の向上、またコンピュータビジョン(CV)研究により、有形・無形文化財を現代から未来へ伝えるべく「文化財のデジタルアーカイブ化・コンテンツ化」技術が著しい進歩を遂げている。有形文化財である能装束等の布物体は、素材固有の独特な質感や光沢をもち、これらの特性を忠実に表現し再現することがCGやCVにおける重要な課題である。

図1に示すように、能装束の中には、起毛した糸が間隔を空けて織られ、さらに金糸・銀糸等の金属箔を絹糸や綿糸に巻きつけた糸が織り込まれた複雑な模様を持つ織布が用いられており、そのため、織布の反射特性と共に、糸のすき間による透過性を持つ布地物体の反射特性および透過特性を忠実にモデル化する必要がある。

画像処理の分野にはクロマキーと呼ばれる、背景と人物を分離、もしくは統合させる技術がある。クロマキーに基づいて、ガラスのような単純透過を起こす物体とその背景とを分離する方法が提案された[1]。また、半透明物体を画像計測することにより、反射・透過特性に加えその物体の形状を獲得する研究がなされた[2][3][4][8]。

しかし、対象物体はガラスのような均一に等方的な反射・透過を起こす材質であり、布地のように縦糸・横糸の織りによる微視的幾何構造を持つ物体の反射・透過特性を高精度にモデリングする方法は提案されていない。照明、視点をインタラクティブに変えて対象を観測し、物体表面の微小面における反射特性のみならず、表面より内部に入り込み屈折・散乱する光を分析し、高精細な表現を自動生成する研究がなされている[5][6][7]。しかし、物体の透過特性を解析するには至っていない。透過性を持つ布地物体の表現として、透過の要因となる糸と糸のすき間の間隔に注目し、また糸自体の透過度を、繊維密度を仮定することで透過分布を推定する手法が提案された[9]。しかし織布を構成する糸の密度や特性は、糸の種類によって異なり、その違いを記述するには至っていない。

そこで本論文では、透過性を持つ布地物体を対象とし、計測画像を解析することにより、布地物体の幾何構造、透過特性及び反射特性を抽出し、さらにそれらの特性に基づき計測画像データを圧縮し、効率的なレンダリングを実現する方法を提案する。

まず、織布の糸の太さ・糸の間隔の違いにより反射特性及び透過特性に相違が現れることに着目し、テクスチャ解析を行い、糸の太さと糸の間隔を獲得

する。次に、全方位型光学異方性測定装置により獲得された多視点画像データを Catmull-Rom splines[10] を用いて補間することにより、双方向透過分布関数 BTDF を生成する。さらに、獲得した BTDF に基づき、反射光の計測データより二重透過を分離し、織布の双方向反射分布関数 BRDF を抽出する。得られた BRDF, BTDF を用いて透過性織布の異方性反射・透過レンダリングを実現する。実測データと提案手法により生成した BTDF と BRDF を比較することにより、精度評価を行い提案手法の有効性を確認した。

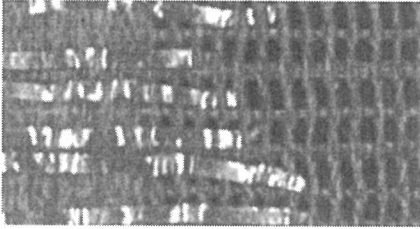


図1 透過性を持つ能装束用織布

2. 織布の質感表現

ある対象物体の光沢や質感を表現するためには、物体の表面に光が入射した際に反射する光の分布特性が必要である。さらに、透過性を持つ物体は、光が任意の方向から対象物体の表面に入射した際に、物体表面で反射を起こすだけでなく、裏側に透過するため、反射に加え透過特性を獲得する必要がある。これらの二つの特性により、透過性物体の質感を表現することができる。この章ではこれら二つの特性に関して説明する。

2.1. BRDF

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点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) により記述される。BRDF は、式(1)により定義される。

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

ただし、 $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は光源ベクトル L 方向から立体角 $d\omega_i$ で入射した放射照度、 $L_r(\theta_r, \phi_r)$ は視点ベクトル V_r 方向に反射される放射輝度である。図2に、本論分で用いる BRDF 及び BTDF 幾何関係を示す。 N は法線ベクトル、 R は正反射ベクトルである。入射角 θ_i は N と L のなす角、入射方位角 ϕ_i は XY 表面上で X 軸から L の角度、入射方向は (θ_i, ϕ_i) 、視角 θ_r は N と V_r のなす角、視方位角 ϕ_r は XY 表面上で X 軸から V_r の角度、視方向は (θ_r, ϕ_r) である。また、 L と N が作る平面を入射面と呼ぶ。

2.2. BTDF

物体の透過特性は、図2に示すように、任意の光源からの入射光と任意の視点方向への透過光の比率として、双方向透過分布関数 BTDF (Bidirectional Transmission Distribution Function) により記述される。BTDF は式(2)により定義される。

$$\tau_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_t(\theta_t, \phi_t)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos(\theta_i) d\omega_i} \quad (2)$$

ただし、 $L_t(\theta_t, \phi_t)$ は視点ベクトル V_t 方向の透過光エネルギーである。視方向 $(\theta_t + \pi, \phi_t + \pi)$ を正透過方向と呼び、このベクトル T を、正透過ベクトルと呼ぶ。視角 θ_t は N と V_t のなす角、視方位角 ϕ_t は XY 表面上で X 軸から V_t の角度。視方向は (θ_t, ϕ_t) である。

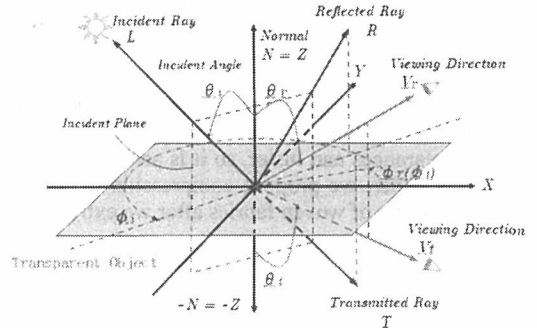


図2 BRDF 及び BTDF 幾何関係

3. 画像計測

3.1. 測定環境

図4に、透過データを得るために画像計測に用いた全方位型光学異方性透過測定装置 (OGM3: Optical Gyro Measuring Machine version3) を示す。OGM3 は、カメラは固定で、光源は2軸、ステージは2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で、任意の入射方向に対する任意の視点方向からの画像を計測することができ、対象織布の計測データから反射分布 BRDF と透過分布 BTDF を獲得することが可能である。

図3に、OGM3 から透過画像データを得た後に、反射特性を抽出するための画像計測に用いた光学異方性測定装置 (OGM1: Optical Gyro Measuring Machine version1) を示す。OGM1 は OGM3 と同じく合計4軸の回転自由度を持ち、任意の入射方向に対する、任意の視点方向の反射分布 BRDF を画像計測することが可能である。得られた反射データには標準白色板を

用いた補正が必要であり、その標準白色板を計測するには水平な回転試料台が必要であるため、1軸自由度の試料台を持つ OGM 1 を反射特性計測に使用した。それぞれ撮影は暗室で行い、光源は自然光に近く演色性の高いメタルハライドランプ(外部調光機能付)を用いる。

今回計測に用いた対象織物は、図 5 に示すように、構成する縦糸と横糸とで特徴が異なるシャンブレイオーガンジーと呼ばれる透過性布地物体である。シャンブレイとは縦糸と横糸に違う色に染め上げた糸を使った織物の事で、見る角度によって色が違って見えることから「玉虫」とも呼ばれる。オーガンジーは基本的には綿で織られた、透き通った生地のことである。もっとも単純な織りで縦横 1 本ずつが交互に織られた平織りの薄地で、絹でできたものはシルク・オーガンジーと呼ばれる。対象のシャンブレイオーガンジーは、それぞれ縦糸は太い赤色の、横糸は細い黄色の糸から成り、視方向によって色が赤から黄へと変化する。

我々がシャンブレイオーガンジーを対象織布として選んだ理由は、縦糸と横糸の比が 1 対 1 の平織りで、それぞれの糸の色・太さ・断面形状等の特徴が異なり、それらの特徴変化を分析することにより、対象織物の透過および反射特性の異方性を安定に観測するために有効と考えたからである。

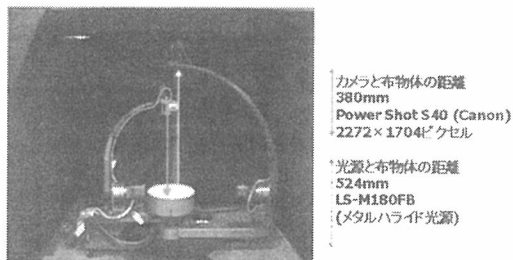


図 3 光学異方性測定装置 OGM1



図 4 光学異方性測定装置 OGM 3

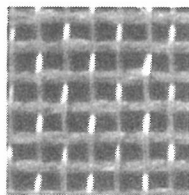


図 5 シャンブレイオーガンジー

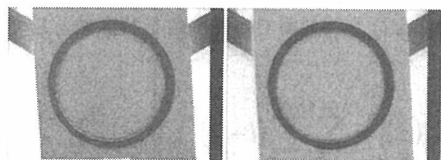
3.2. 測定方法

透過画像データを得るために、図 7 に示す OGM3 のステージに測定試料を取り付けて透過光を画像計測する。測定試料は図 8(a)に示すように、直径

6.55cm の円形厚紙の中央 4cm 角をくり抜きそこへ透過性布地物体を貼り付ける。計測画像例を図 8(b)に示す。また、得られた透過データから同試料の反射特性を抽出するために OGM1 で計測した画像例を図 6 に示す。透過性布地物体は透けて背景も同時に含まれて観測される。そこで、黒紙の画像図 6(a)と織布の背景として黒紙を置いた画像(図 6(b))の二種類を計測し、これらの画像間の差分解析から対象織布の反射特性を抽出する。

入射光の変化に対する反射分布と透過分布の変化を解析するために、入射面において、入射方向 θ_i を 15 度、方位角 ϕ_i を 45 度刻みに変化させた時の透過・反射分布を計測する。

図 2 に示すように、OGM3 における入射方向 ϕ_i は縦糸から 15 度刻みに X 軸 0° (赤糸), 15° , 30° , 45° (パイアス), 60° , 75° , Y 軸 90° (黄糸), また各々の入射角 θ_i を 15 度刻みに 0° ($\theta_i=0$), 15° , 30° , 45° , 60° , 75° とする。視線方向は光の照射する面を表とすると、裏面から観測する。視角 θ_l を N 方向から 5 度刻みに、 $0^\circ \sim 75^\circ$ まで 16 回、またその各々に対して、方位角 ϕ_l を 5 度ずつ回転させ計測し、合計 48384 枚の透過画像データを獲得する。また、図 2 に示すように、OGM1 における入射方向 ϕ_i は縦糸から 45 度刻みに 0° X 軸(赤糸), 45° (パイアス), 90° Y 軸(黄糸), またそれら各々に対して、入射角 θ_i を 15 度刻みに 0° ($\theta_i=0$), 15° , 30° , 45° , 60° , 75° とする。視線方向 θ_r は法線から 5 度刻みに、 $0^\circ \sim 85^\circ$ まで 18 種類、またそれら各々に対して、視方位角 ϕ_r を 5 度刻みに回転させ計測し、合計 23328 枚の画像データを獲得する。



(a) 背景(黒紙)の計測画像 (b) 背景と透過性布の計測画像
図 6 計測画像例(OGM1)

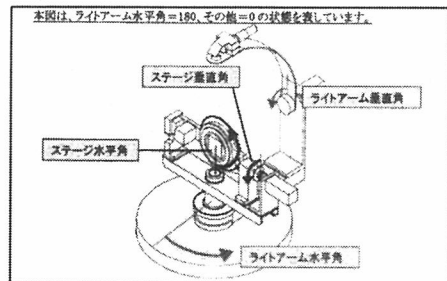
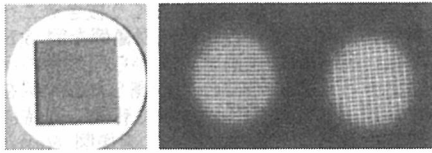


図 7 OGM3 光源・カメラのアーム自由度



(a) 測定試料 (b) 計測画像例(OGM3)
図8 測定対象織布

4. 画像解析

本章では、図5に示す、対象織布をスキャナで取り込んだ画像をテクスチャ解析することで、透過・反射特性と織布の幾何微視的構造との関係を考察する。計測透過画像データから、対象織布のBTDFを抽出し、その等方性について述べる。次に、得られたBTDFを用いて、視測反射画像データから二重透過を分離しBRDFを抽出する。

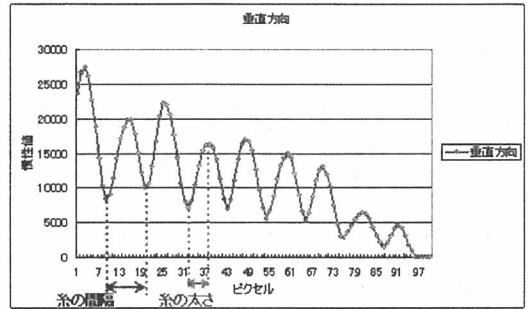
4.1. 織布のテクスチャ解析

対象織布は平織りであるため、同方向に織られている糸と糸との間隔はほぼ等しい。この節では、図5に示すスキャナ画像をテクスチャ解析することで、画像中に糸が現れる周期性を求める。テクスチャ解析の手法として最も一般的な濃度共起行列を用いる。この手法は、基本的には2次元結合確率密度関数(joint probability density function) $f(i, j | d, \theta)$ の評価に基づくものである。 $f(i, j | d, \theta)$ は、濃度値 i を持つ画素から θ 方向に距離 d だけ離れた画素が、濃度値 j をもつ可能性を示す確率密度関数である。 (d, θ) ごとに $f(i, j | d, \theta)$ を行列で表したものが濃度共起行列であり、 i, j がそれぞれ行、列の位置を示す。この行列を用いて式(3)に示す特徴量を計算しテクスチャの識別を行う。本稿では慣性値を特徴量として用いる。

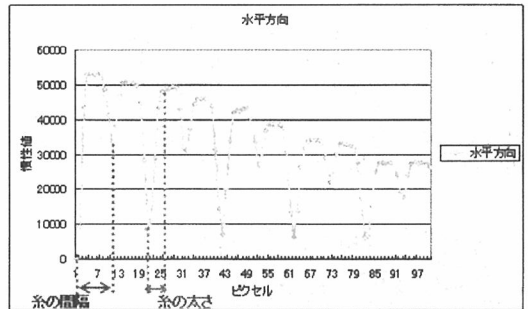
$$I\{S_{\theta}(d)\} = \sum_{i=0}^{NG-1} \sum_{j=0}^{NG-1} (i-j)^2 s_{\theta}(i, j | d) \quad (3)$$

ここで、 $S_{\theta}(i, j | d)$ は $S_{\theta}(d)$ 行列の i 行 j 列要素であり、 NG は画像の濃度レベルの数である。図5のスキャナ画像の濃度レベルを16階調にし、画像の垂直方向と水平方向それぞれの慣性値を求めた結果を図9に示す。図9(a)は画像を垂直方向に走査した時の慣性値を示し、赤糸の間隔や糸の太さの特徴が抽出される。図9(b)は画像を水平方向に走査した時の慣性値を示し、同じく黄糸の特徴が抽出される。画像中のある画素値を基準とした際に、着目する画素値と類似していれば慣性値は低くなる。すなわち図9に示す慣性値の極小の画素から次の極小の画素までが糸と糸の間隔となる。さらに、極小の画素から慣性値が急激に大きくなる極大の画素までが糸の太さとなる。したがって、赤糸の太さは約2mm、間隔は3mm、黄糸の太さは約1.13mm、間隔は2.5mmと推定された。以上から、黄糸に対して赤糸は約2

倍の太さであり、縦糸と横糸の太さの違いが、反射分布及び透過分布に大きな影響を及ぼすことが確認できる。



(a) 垂直方向、赤糸の太さと間隔



(b) 水平方向、黄糸の太さと間隔

図9 糸の太さと間隔を表す慣性値

4.2. 透過分布解析

図2に示すように、入射角を θ とすると、正透過方向 T の透過率 $\tau(\theta, \phi, \theta + \pi, \phi + \pi)$ は、入射光の強度と正透過方向の光の強度の比率のことであるので、式(4)のように示すことができる。 L_i は任意の入射方向からの光量であり、 T_o は正透過方向への光量を示す。

$$\tau(\theta, \phi, \theta + \pi, \phi + \pi) = \frac{T_o(\theta + \pi, \phi + \pi)}{L_i(\theta, \phi) \cos \theta} \quad (4)$$

図10に示すように、入射面において正透過方向 T から5度ずれると透過率は約211分の1にまで急激に減少する。同様に、任意の入射方向に対しても透過率の急速な減少が観測された。そこで本論文では、正透過方向 T 以外の視線方向における透過率は0とする。したがって、対象織布のBTDF τ は式(5)のように示すことができる。

$$\tau(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \begin{cases} \tau(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) & \text{if } \theta_i = \theta_r + \pi \text{ and } \phi_i = \phi_r + \pi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

図 11 は、正透過方向 T で計測された透過率の大きさを原点からの距離とし、入射方向の変化に伴う T 方向の透過率変化を、球座標系にて 3 次元表示させたものである。下部の楕円体と光源ベクトルを延長させたときの交点が入射角 θ_i に対する正透過方向 T の透過率を示す。

図 12 に、図 11 の透過モデルの縦(黄)糸、バイアス、横(赤)糸、各方向の断面における透過率の変化を示す。真上(入射角 $\theta_i=0$)方向から光を入射させた時が最も透過率が大きく、入射角 θ_i を大きくしていくと透過率がわずかに減少することを示している。これは、画像では、入射角を大きくしていくと、糸と糸のすき間の面積が減少するため、すき間を通過する透過光が減少し、その結果、透過率を減少させることを示す。また、図 12(c)が図 12(a)よりも透過率がより減少している原因は、黄糸に比べ赤糸が太いために、半径の大きな赤糸断面の形状により、入射角を大きくすると、画像ではより早く糸のすき間領域が減少するためである。以上から、糸の太さ・糸の間隔・織り等の微視的幾何構造が布地の透過特性の要因であることが確認できる。図 12 に示すように、断面ごとに透過率の変化は異なるが、全体的にはほぼ等方的な透過特性を持つと考えることができる。

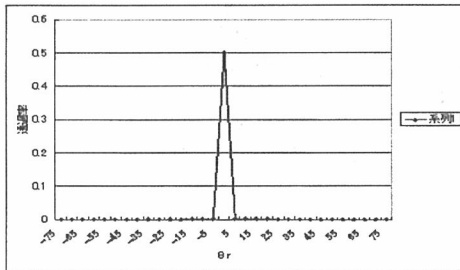


図 10 正透過方向とのずれ角と透過率の変化

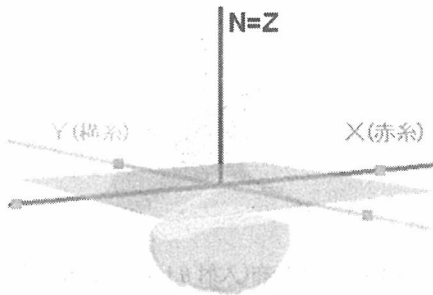
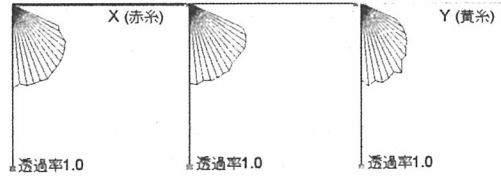


図 11 正透過方向の透過率



(a) 黄糸断面図 (b) バイアス断面図 (c) 赤糸断面
図 12 各断面における透過度の減衰

4.3. 反射分布解析

対象織布の BRDF を求めるために、OGM1 を用いて画像計測する。しかし対象織布のみの反射を画像計測から得ようとしても、背景も同時に観測される。そこで、図 6(a)に示す、等方的な反射特性を持つ背景の黒紙と、図 6(b)に示す黒紙の上に置かれた対象織布を観測した画像から、それぞれの反射率を抽出する。任意の入射方向における光量を L_i とすると、黒紙の反射率 ρ_B 、対象織布の背景として黒紙を置いたときの反射率 ρ_m 、対象織布の反射率 ρ はそれぞれ、式(4)、式(5)、式(6)のように示すことができる。

$$\rho_B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{R_B(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega} \quad (6)$$

$$\rho_m(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{R_m(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega} \quad (7)$$

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{R(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega} \quad (8)$$

R_B は黒紙表面における反射光量、 R_m は対象織布の背景に黒紙を置いたときの反射光量、 R は対象織布の反射光量を示す。前述した通り、対象織布の反射光量 R は計測不可能である。したがって、 R_B 、 R_m と式(5)で求めた透過率を用いて、 R を抽出する。図 13 に、対象織布の背景に黒紙を置いたときの、入射面における入射光と反射光の関係を示す。 R_m は、対象織布表面の反射 R と、対象織布を光が透過して黒紙に反射した光が、さらに布地を透過(二重透過)した光が合わさった総光量であるため、式(7)のよう示すことができる。

$$R_m = R + R_B \tau(\theta_i) \tau(\theta_r) \quad \dots \dots (9)$$

$\tau(\theta_i)$ は、入射方向 θ_i の光が対象織布に入射したときの透過率、 $\tau(\theta_r)$ は、入射方向 θ_i の透過率が黒紙表面で反射し、再び対象織布に入射するときの透過率を示す。

式(8), 式(9)より, 対象織布の双方向反射分布関数 BRDF ρ は, 式(10)で示すことができる.

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{R_m - R_B \tau(\theta_i, \phi_i) \tau(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (10)$$

入射方向を真上方向 ($\theta_i=0$) に固定し, 任意の視点方向から見た際の反射率 ρ の強度を, 原点からの距離として球座標系にて 3 次元表示させたグラフが図 14 である. 図 14(a)はグラフを真上方向 ($\theta_i=0$) から, 図 14(b)は横(赤)糸方向から, 図 14(c)は縦(黄)糸方向から視点を固定したときの反射率分布を表示したグラフであり, プロットさせた点が反射率 1.0 を示す. 図 7 スキャナ画像及び, 4.1 節のテクスチャ解析から, 赤糸は太く真っ直ぐ織られているため, 図 14(b)のように赤糸の法線分布に沿って両翼に広がる形となる. それに対し黄糸は細く, 赤糸に沿うように波状に織られているため, 図 14(a)のように X 軸(赤糸)から少しずれた方向に強い反射を起こす. これは図 16(a)に示すように, 同じ方向から光が入射しても, 細い糸は太い糸に比べて外側に大きく反射を起こすからである. また, 図 16(b)のように黄糸は赤糸に対して非常に細く, 赤糸に沿うように織られているために, 赤糸を中心に両側へ反射分布が広がると推定できる. 以上から, 織布を構成する糸の太さや糸と糸の間隔が反射に大きく影響を及ぼし, 異方性の要因であることが確認できる.

図 15 に, 入射角 $\theta_i=30^\circ$ $\phi_i=90^\circ$ (Y 軸)のときに, の反射率分布を示す. 入射角を 30 度傾けることで, 赤糸の法線分布に沿って, フレネル効果により正反射方向の反射率が強くなることが表れている.

図 17 に, 入射方向を真上方向 ($\theta_i=0$) に固定したときの, BRDF と BTDF を示す. BRDF は前述の通り, 織布の微視的幾何構造を反映した異方性のある分布となる. しかし BTDF は, 真上方向 ($\theta_i=0$) から織布表面に照射した光は真下方向(-N)に強く透過していることが見て取れる. 織布に対して光源と対称な方向以外の透過分布に関しては無視しても良いほど小さな透過率であるため, 対象織布の質感を表現するにはそれらの透過分布は無視する.

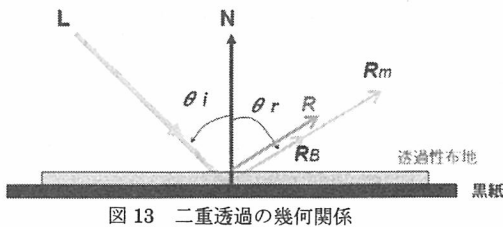


図 13 二重透過の幾何関係

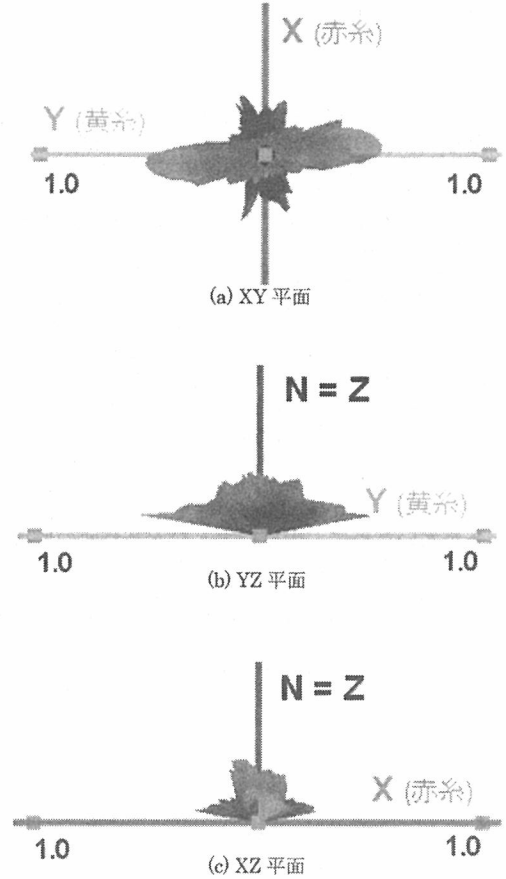


図 14 反射分布(入射真上から)

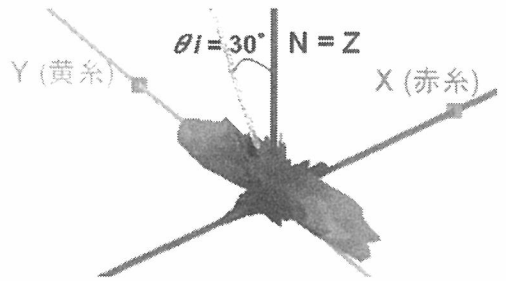
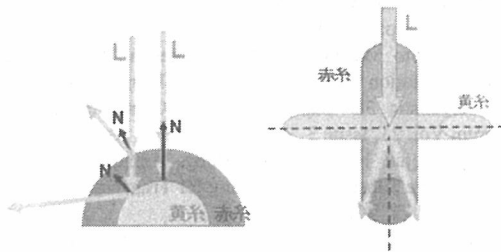


図 15 反射分布(入射 $\theta_i=30^\circ$ $\phi_i=90^\circ$)



(a) 糸の太さと反射の関係 (b) 反射光の赤糸方向からのずれ
図 16 糸の太さが及ぼす反射への影響

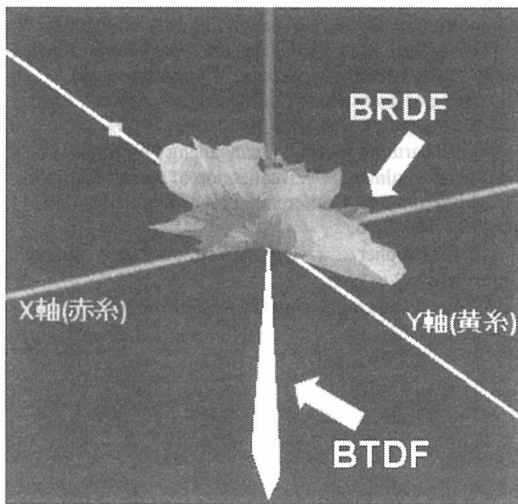


図 17 シャンプレーオーガンジーの BRDF と BTDF

5. 実験結果

3章で述べたように、我々が BTDF 及び BRDF を得るために計測した OGM3 のサンプリング数は、入射角 ϕ_i を $0^\circ \sim 90^\circ$ まで 15° 刻みに 7 点、その各々に θ_i を $0^\circ \sim 75^\circ$ まで 15° 刻みに 6 点、視点角 θ_r を $-N$ 方向から 5° 刻みに、 $0^\circ \sim 75^\circ$ まで 16 点、またその各々に対して布を 5° ずつ回転させた 72 点である。また、OGM1 の計測サンプリング数は、入射角 ϕ_i は縦糸から 45° 刻みに $0^\circ \sim 90^\circ$ まで 3 点、またそれら各々に対して、入射角 θ_i を 15° 刻みに $0^\circ \sim 75^\circ$ まで 6 点、視点方向 θ_r は法線から 5° 刻みに、 $0^\circ \sim 85^\circ$ まで 18 種類、またそれら各々に対して布を 5° 刻みに 72 点である。どちらも任意の入射方向、任意の視点方向からの BRDF、BTDF を抽出するには疎な計測データである。密な BRDF と BTDF を得るために Caumull-Rom splines を用いて

補間を行った。本節では、補間したデータが十分有効なデータであるか検証するために、補間したデータと同角度において、画像計測した実測データとを比較することにより、精度評価を行う。図 18 は実測データと補間データの比較を示したグラフであり、点線が実測値、実線が補間値を示す。入射角、視点角はそれぞれ、図 18(a)は入射角 $\theta_i 30^\circ \phi_i 30^\circ$ 、視点角 $\theta_r 65^\circ \phi_r 0^\circ \sim 355^\circ$ 、図 18(b)は入射角 $\theta_i 30^\circ \phi_i 60^\circ$ 、視点角 $\theta_r 65^\circ \phi_r 0^\circ \sim 355^\circ$ である。補間したデータは、実測値に近い推定値となった。したがって、提案手法により生成された密な BRDF と BTDF は、十分な精度であると言える。

ここで、本手法の計測効率性を考察する。従来の画像計測に基づく手法では、入射方向を n 度ずつ計測した場合、 $(90/n) * (90/n) = 8100/n^2$ 通りの入射方向と、視点方向を m 度ずつ計測した場合、 $(90/m) * (360/m) = 32400/m^2$ 通りの視点方向からの計測をする必要があった。一方、本手法では $(90/15) * (90/3) = 18$ 通りの入射方向と、 $(90/5) * (360/5) = 1296$ 通りの計測で十分であることから、 $(n^2/450) * (m^2/25)$ に計測枚数を圧縮できる。例えば n, m 共に 3 度なら、約 138 分の 1 の計測枚数に圧縮できる。

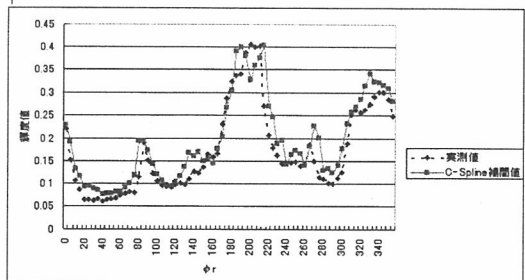
図 19 に、獲得した BRDF と BTDF を用いてレンダリングした結果を示す。図 19(a)は視点方向を黄糸方向から見ているため赤色に見える。それに対し、図 19(b)は視点角 ϕ_r を約 60° 回転させ、赤糸方向空見しているため、対象織布は黄色く見えている。

6. まとめ

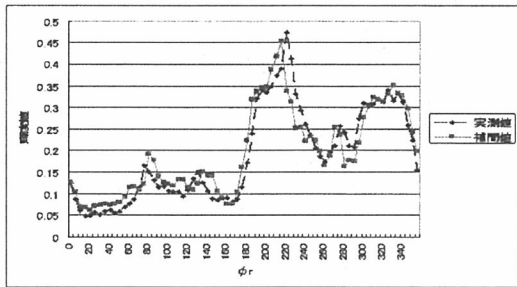
本論文では、糸の太さ、糸の間隔、糸の色といった織布の微視的幾何構造に基づき、効率的な視測から得られた透過画像データ、及び反射画像データから BRDF と BTDF を抽出する方法を提案した。実験結果より、本手法が十分有効であることを確認した。

今後は、能装束のような複雑な模様を持つ織布の質感を表現するために、テクスチャを用いてデジタルアーカイブ化を目標として研究を進める。

謝辞 有益なアドバイスと実験に御協力いただいた、デジタルファッション株式会社の今尾公二様に、深謝致します。

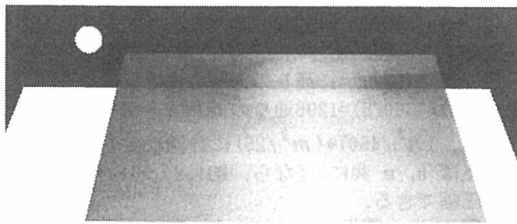


(a)入射角 $\theta_i 30^\circ \phi_i 30^\circ$ 視点角 $\theta_r 65^\circ \phi_r 0^\circ \sim 355^\circ$

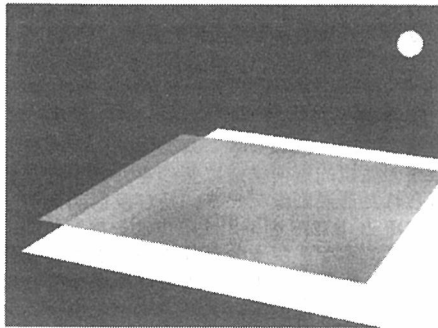


(a)入射角 θ 30° ϕ 60° 視点角 θ 65° ϕ $0^\circ \sim 355^\circ$

図 18 実測値と補間値の精度評価



(a)黄糸方向から見たとき



(b)赤糸方向から見たとき

図 19 シャンプルーオーガンジー デモ

参考文献

- [1]Alvy Ray Smith, James F. Blinn: "Blue Screen Matting", Vol.30, SIGGRAPH 96 pp.259-268 1996
- [2] Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi: "Transparent Surface Modoring from a Pair of Polarization Images", Vol. 26 IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. pp.73-82 2004
- [3] Daisuke Miyazaki, Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi: "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible

and infrared wavelengths" Vol. 19, J. Opt. Soc. Am., April 2002 pp: 687-694

[4] Hiroto Matsuoka, Tatsuto Takeuchi, Ikuo Harada: "Representation of Reflection and Transparency by a Photorealistic 3D Capture System" Computer Graphics Forum Vol. 21, Issue 3 2002

[5] Xuejun Hao, Thomas Baby, Amitabh Varshney: "Interactive Subsurface Scattering for Translucent Meshes pp: 75 – 82 2003

[6] H. Lensch, M.Goesele, P. Bekaert, J. Kautz, M. Magnor, J. Lang, H.-P. Seidel: "Interactive Rendering of Translucent Object" Proceedings of Pacific Graphics '02, pages 214-224, October 2002

[7] T. Mertens, J. Kautz, P. Bekaert, H.-P. Seidel, F. Van Reeth: "Interactive Rendering of Translucent Deformable Objects" Proceedings of the 14th Eurographics Symposium on Rendering, pages 130-140, June 2003.

[8] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Remo Ziegler, Addy Ngan, Leonard McMillan: "Acquisition and Rendering of Transparent and Refractive objects", Proc. 13th Eurographics Workshop Rendering, 2002

[9] Neeharika Adabala, Guangzheng Fei, Nadia Magnenat-Thalmann: "Visualization of woven fabrics" ACM International Conference Proceeding Series; Vol. 44 pp:178 – 185 2003

[10]Christopher Twigg "Catmull-Rom splines", <http://www-2.cs.cmu.edu/fp/courses/graphics/asst5/catmullRom.pdf>