

超高解像度 HDR 画像計測による シルクライク織物の散乱特性抽出

田中士郎[†] 平井佐和[†] 坂口嘉之[†] 田中弘美[†]

本研究では、反射光および散乱光を安定に観測できる画像計測システムを構築し、得られた高解像度多方向照明 HDR 画像を解析することにより、対象織物の表面および表面下の 3 次元微視的幾何構造と、反射および散乱の相関関係を解析する。まず、投影パターンの制御が可能で、1 画素サイズ $5\mu\text{m}$ の高解像度多視点 HDR 画像計測システムを構築する。次に構築したシステムを用いて、水平台上に置かれている織物に対し、垂直方向から 2° 刻みでプロジェクタを移動させ格子パターンを投影し、反射と散乱を HDR 画像計測する。格子サイズを 3×3 , 5×5 , 7×7 と拡大させ、反射および散乱光の方向や強度の変化を解析する。入射点からの距離に対する単一散乱の減少を分析し単一散乱の境界を推定し、反射・単一散乱・多重散乱を分離する。さらに、反射分布、単一散乱分布および多重散乱分布間の指向性や強度の相関を評価し、織物の表面および表面下の微視的幾何構造との関係を解析する。解析結果に基づいて、織物の散乱は反射と同様に指向性の強い直交二軸の異方性を持つことを示す。

1. はじめに

織布のような物体表面の複雑で微妙な光沢や質感を、観測画像データから抽出し高精度にモデリングすることや、それらを忠実に再現しフォトリアリスティックなレンダリングを実現することは、コンピュータグラフィックスおよびコンピュータビジョン分野における重要な課題である。

織物表面の光反射は二色性反射モデルにより、光源色を表す鏡面反射成分と物体色を表す拡散反射成分により記述される。織布の光沢や質感は鏡面反射成分に特徴が現れることからサテンやベルベット等の質感を再現するための鏡面反射表現法が提案されてきた。また、絹織物をはじめ光沢のあるシルクライク織物を対象とし、多視点から観測した反射光分布を解析し、緯糸（よこ糸）と経糸（たて糸）が織り成す織物表面の 3 次元微視的幾何構造に基づく異方性反射モデリング法も提案された[6]、

絹糸は、半透明のガラス棒のような形状をしており、その断面はやや丸みを帯びた三角形で、プリズムのような構造をもつため「絹のプリズム」と表現されている。絹織物はこの絹糸の構造によって光を透過・反射し、複雑な光沢や質感を発するとされている。しかし、絹織物を半透明物体として解析した質感の研究は報告されていない。また、富永ら[1]は、織布では物体色の鏡面反射が観測されることを報告し、織布の反射光を表現するための拡張二色性反射モデルを提案している。しかし、物体色の鏡面反射成分が観測される物理現象が解明されるまでは至っていない。

一方、コンピュータグラフィックス分野では、近年、人肌や大理石等の半透明物体の質感の表現や高速レンダリングに関する研究が盛んに行われている。半透明物体では、表面下散乱と呼ばれる媒質内部における光の散乱が発生する。Jensen ら[3]は、媒質が均一な半透明物体内部での光の散乱を、ダイポール近似によって解析し、高速にレンダリングする手法を提案した。

半透明物体のリアリスティックなレンダリングを行うた

めに、近年では、レーザーやプロジェクタを用いた特殊な光源によって、半透明物体内部での光の散乱を計測する方法が提案され、入射光を単一散乱と多重散乱に分離し、均一な散乱媒体中での光の伝搬を解析し可視化する方法も提案されている[3][4][5]。また、シーン中に含まれる成分を 6 成分として定義し、複数の観測方法を使って分離する、多重重み付け計測による反射光と散乱光の分解法も提案され、相互反射の考慮の重要性が指摘されている。しかし、不均質な媒質の半透明物体に対しては未着手である。

そこで本研究では、反射光および散乱光を安定に観測できる画像計測システムを構築し、得られた高解像度多方向照明 HDR 画像を解析することにより、対象織物の表面および表面下の 3 次元微視的幾何構造と、反射および散乱の相関関係を解析する。まず、投影パターンの制御が可能で、1 画素サイズ $5\mu\text{m}$ の高解像度多視点 HDR 画像計測システムを構築する。次に構築したシステムを用いて、水平台上に置かれている織物に対し、垂直方向から 2° 刻みでプロジェクタを移動させ格子パターンを投影し、反射と散乱を HDR 画像計測する。格子サイズを 3×3 , 5×5 , 7×7 と拡大させ、反射および散乱光の方向や強度の変化を解析する。入射点から観測点までの距離に対する散乱の減少を散乱減衰曲線として抽出する。さらに、反射分布と散乱分布間の指向性や強度の相関を評価し、織物の表面および表面下の微視的幾何構造との関係を解析する。解析結果に基づいて、織物の散乱は反射と同様に指向性の強い直交二軸の異方性を持つことを示す。

2. 織物のメゾ構造およびマイクロ断面構造

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、絹織物など光沢のある織物のメゾ構造や糸の超微細断面構造等と光学異方性の関係について述べる。

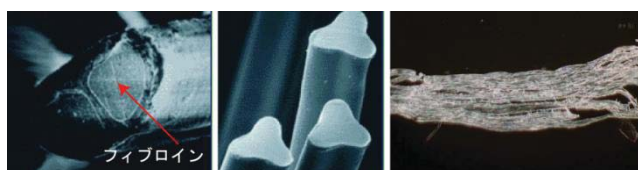
2.1 繊維のマイクロ断面構造

絹糸は、半透明のガラス棒のような形状をしており、その断面はやや丸みを帯びた三角形で、プリズムのような構造をもつため「絹のプリズム」と表現されている。図 1

[†] 立命館大学
Ritsumeikan University.

(a) に示す、絹の繭糸は2本のフィブロインとそれらを被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1(b)に示すように、ポリエステルのような人絹繊維の断面は三角形形状をしている。繊維状のフィブロインをさらに分解すると、図1(c)に示すように、マイクロフィブリルと呼ばれる超微細繊維から構成されている。マイクロフィブリルは、その中にきわめて微細な空隙を残した分子構造からなり、多孔質の異型断面構造をもち光を良く透過す。

図2に、シルクとポリエステルの光沢の違いを、三角形の筒に細くて丸い棒を詰め込んだ繭糸と、三角形の筒に水を入れたポリエステル繊維のそれぞれの内部模型に、レーザー光線を照射したときの、光の反射や透過の違いを示す[11]。内部が均質なポリエステルは光の直接的な反射・透過となり強い輝きの光沢が表れ、超微細繊維が束になった構造のシルクは光が屈折と分散を繰り返す、しなやかな光沢が表れる。絹織物はこの絹糸の断面形状や超微細繊維構造によって、光を透過・乱反射し、光沢を生み出している。



a)繭糸 (b)ポリエステル繊維 (c)マイクロフィブロン

図1 繊維の幾何形状と超微細繊維構造



図2 繊維断面模型による入射光の進み方

2.2 糸の幾何形状

絹などに代表される長繊維 ($5 \sim 10 \times 10^5$) がばらばらにならないよう数本束ねた糸はフィラメント糸と呼ばれ、毛羽が少なく滑らかで光沢がある。図3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三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、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、半透明のプリズム(三角柱)形状の繊維(単糸)の束であるフィラメント糸自体が持つ光学特性が、フィラメント糸で織られた光沢のある織物の異方性光学特性を特徴づける。

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。

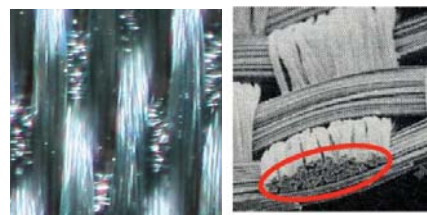
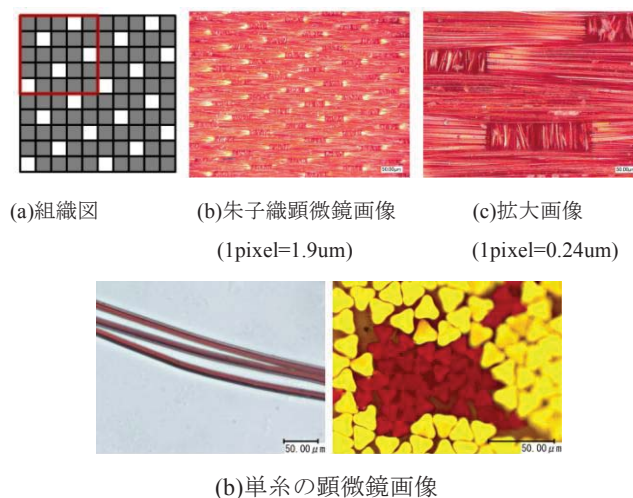


図3 フィラメント糸の表面と断面

2.3 織物のメゾ構造と織組織

組織図とは、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である。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る基本的な組織である。組織図に基づいてたて糸とよこ糸の交差により形成される立体形状が織物表面のメゾ構造を特徴づけている。朱子織は特に、たて糸/よこ糸が長く浮いてフィラメント糸の異方性光学特性が強く表れる。図4に、朱子織(サテン)の組織図と5枚朱子とよばれる赤色朱子織(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。

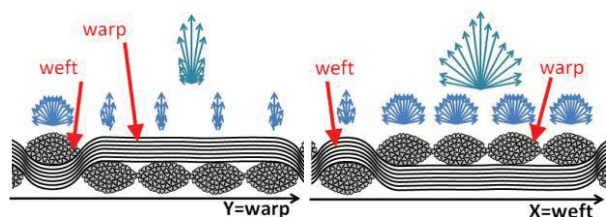


(a)組織図 (b)朱子織顕微鏡画像 (1pixel=1.9um) (c)拡大画像 (1pixel=0.24um)

(b)単糸の顕微鏡画像

図4 朱子織(サテン)の組織図と顕微鏡撮影画像

織物のメゾ構造は、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。図5に、朱子織表面の微小面分布を示す。図5(a)に示すように、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、たて糸表面にほぼ垂直な微小面分布となる。図5(b)に示すように、楕円状のフィラメント糸の断面では、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ため、楕円形状をつくる様々な方向の微小面分布となる。



(a) たて糸(warp)方向断面 (b) よこ糸(weft)方向断面

図 5 シルクライク織物の微小面分布

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、織組織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、シルクライク織物のメゾ構造は直交二軸性の微小面分布を持つことが導かれる。

3. シルクライク織物の散乱の観測

図 4 に示した、赤色のポリエステルサテンを観測対象織物とする。これは、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朱子織(サテン)であり、三原組織のうちで、最も強く光学異方性を表すであるため、物体色を持つシルクライク織物の反射および散乱の光学異方性を安定に画像計測できるためである。

3.1 観測環境

図 6 (左)に示す全方位型光学異方性反射測定装置 OGM(Optical Gyro Measuring Machine)を使用する。OGM はカメラと光源を先端に付けた 2 本のアームと水平ステージで構成され、光源 2 軸、カメラ 1 軸、ステージ 1 軸の合計 4 軸の回転自由度を持つ。観測対象織物は、よこ糸方向が図 6 (右)の X 軸、すなわち観測画像の X 軸方向と一致するようにステージの中心に配置される。

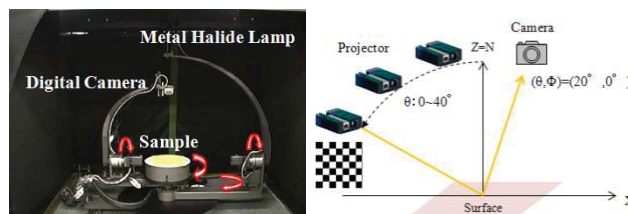
観測用カメラには、Nikon 製 D4(解像度 4928×3280)、レンズには、Nikon 製 AF-S MICRO NIKKOR 105mm と Kenko 製 テレプラス(2倍)を使用する。撮影画像の 1 画素の実寸値は、 $5\mu\text{m}$ となり、織物の単糸の太さ(約 $10\mu\text{m}$)よりも高い分解能を持つ。

図 7(右)に示すように、カメラの撮影角度を垂直方向 N に対して $\theta=20^\circ$ の方向に固定し、プロジェクタ光源方向を変化させて観測画像を撮影する。これは、カメラの分解能が単糸レベルで、画素単位で反射・散乱の変化を解析しており、カメラ角度を変化させると、画素間の対応付けが困難になるためである。また、できるだけ織物の真上から安定に観測するためである。カメラの視線方向は垂直方向に対して傾きがあるため、画像内でピントの合う範囲が限定されてしまう。その結果、本研究ではピントの合う範囲の 400×400 画素サイズの観測画像を取得する。

獲得された観測画像の保存形式は、輝度値が露光時間に対してリニアリティと高分解能を必要とするため、RAW 画像とする。また、露光時間を 10s, 4s, 1s, 0.25s, 0.1s, 0.025s

とする 6 種類の多重露光撮影を行い、それらを統合して HDR (high dynamic range) 画像に変換する。

光源には、高周波格子パターンを投影するために、3M 製小型液晶プロジェクタ MP160 (解像度 800×600) を使用する。水平ステージの中央付近に投影されるプロジェクタの 1 画素の実寸値は 0.2mm 、観測画像では 40 画素となる。



(a) OGM

(b) 高周波格子パターン投影角度

図 6 全方位型光学異方性反射測定装置と撮影角度

3.2 RAW 画像から HDR 画像の生成

撮影された RAW 画像を dcraw[12]を使用して、RAW 画像を一旦高分解能な 16bit Tiff 画像に現像する。dcraw は VGN (variable number of gradients) 補間に基づいたリニアリティな画像に現像可能なソフトウェアである。

dcraw によって変換された 6 枚の多重露光 Tiff 画像を統合して、HDR 画像を生成する。

4. 段階的高周波パターン投影による織物の単一および多重散乱抽出

織物の観測画像における各画素の輝度値には、物体表面の反射と散乱と相互反射が含まれる。散乱には指向性の高い単一散乱と、多方向性のある多重散乱があり、観測点が入射点から近ければ単一散乱の傾向が高く、離れるにつれて多重散乱のみとなる。そこで、Neyer ら[2]により提案された高周波格子パターン投影に基づき、投影格子パターンサイズを段階的に拡大することにより、入射点と観測点の距離を徐々に広げて観測し、散乱変化の特性を抽出する。

以下に、段階的に高周波格子パターンを拡大して投影し観測された HDR 画像から、織物の反射と散乱特性を抽出するためのステップを示す。

- 1) 高周波格子パターン投影法により、織物の観測画像から、直接成分と大域成分を抽出する。
- 2) 大域成分に含まれる相互反射を推定する
- 3) 大域成分から相互反射を分離して散乱を抽出する
- 4) 高周波格子パターンを $3\times 3, 5\times 5, 7\times 7, 9\times 9$ と段階的に拡大し、1)-3)を繰り返す。
- 5) 格子パターン拡大による散乱の変化から散乱特性を抽出する。

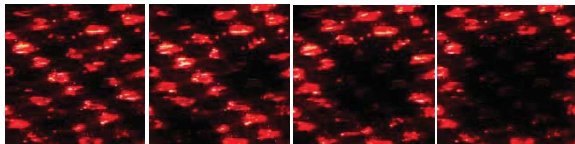
以降の節において、各ステップについて述べる。

4.1 高周波格子パターン投影法による直接成分と大域成分の分離

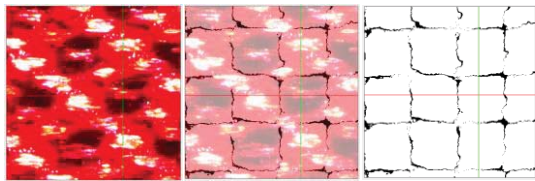
Nayer ら[2]の高周波格子パターン投影法により、織物の観測画像から直接成分と大域成分を抽出する。

観測画像の各画素において、 $n \times n$ (プロジェクタ)画素サイズの格子パターンを白黒を反転させて上下左右にシフトさせて投影することで、 $2n^2$ 枚の観測画像を獲得する。各画素において、得られた $2n^2$ 種類の輝度値の最大値と最小値から、最大輝度画像 I_{max} と最小輝度画像 I_{min} を生成する。

図 7(a)に、 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ の格子パターン投影による織物観測画像を示す。図 7(b)に、 3×3 画素の格子パターン投影時の(プロジェクタの)1 画素の境界を示す。画像の範囲は実寸値で $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、プロジェクタの 1 画素幅は 0.2mm 、プロジェクタの 1 画素は観測画像の 40 画素となる。



(a) 格子パターン $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ の織物観測画像



(b) 3×3 格子パターンでの織物観測画像と境界

図 7 格子パターン観測画像

(画像サイズ 400×400 実寸値範囲 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$)

4.2 直接成分（反射特性）と大域成分の抽出

高周波格子パターン投影により得られた、最大輝度画像 I_{max} と最小輝度画像 I_{min} において、座標 i の最大輝度値 $L^+[i]$ と最小輝度値 $L^-[i]$ は、直接成分 $L_d[i]$ と大域成分 $L_g[i]$ より、次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} L^+[i] &= L_d[i] + (1+b) \frac{L_g[i]}{2} \\ L^-[i] &= bL_d[i] + (1+b) \frac{L_g[i]}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)の b は、プロジェクタの白画素光量の黒画素光量の比で、微小な光の強さを示す。照度計で計測すると、 $0.3\% (=3.73/1208)$ と非常に小さい。そのため本研究では、黒の大域成分は極めて小さいと判断し $bL_g[i]=0$ として扱い、直接成分と大域成分を抽出する。

4.3 相互反射の推定

抽出した大域成分には散乱と相互反射が含まれている。計測環境は暗幕で覆われ、直接反射を防ぐ黒い布を敷いているが、実際にはプロジェクタの投影光の反射を完全に防ぐことができないため、相互反射を推定する必要がある。

相互反射を推定するための前提条件として、プロジェクタの投影光の全範囲が織物の置かれている水平ステージ面に照らされるものとする。水平ステージに置かれた織物の観測点における相互反射を推定するための定義式を提案するために、前実験として、1)プロジェクタの投影パターンを織物以外の部分に均等に投影する場合と、2)織物の観測点を中心に黒の正方形領域を拡大するパターンを投影する場合での、相互反射による輝度変化の傾向を確認する。

まず、プロジェクタの投影パターンを織物以外の部分に均等に投影するために、図 8 に示すように、織物領域を黒、それ以外の領域において、プロジェクタの白画素の割合を 0% から 100% まで、10% ずつ増加させたランダムパターンを織物に投影し、観測する。図 9 (a) はランダムパターンの白の割合を増加させた時の織物の観測画像を示す。また、図 9 (b) は観測画像上での任意の座標 12 点における、輝度値の変化を示したグラフである。この結果から、プロジェクタから白画素を均等に与えた場合では、観測される相互反射は白画素の数に対してほぼ線形に増加することが確認される。図 9 (b) 各点(各系列)の傾きの違いは、メゾ構造の微小面の傾きに基づく入射光量の違いに起因している。

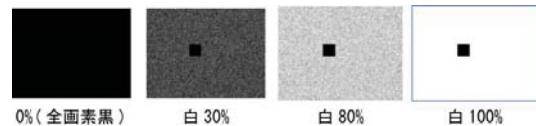
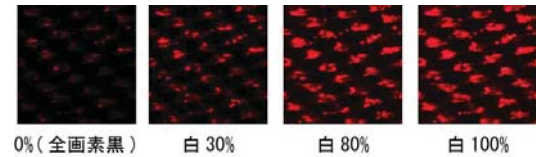
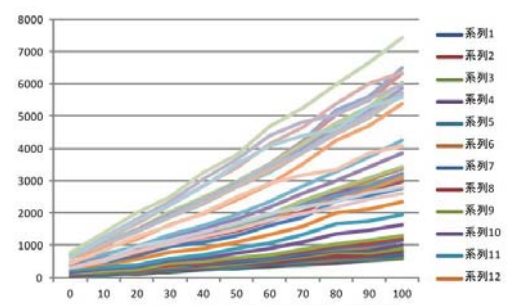


図 8 プロジェクタのランダムパターン(800×600)



(a) ランダムパターン投影時の観測画像



(b) 白の割合に対する輝度変化

図 9 ランダムパターンの白画素の割合に対する相互反射

次に図 10 に示すように、プロジェクタの正方形の黒領域を 3×3 から、縦横 2 画素ずつ拡大してプロジェクタの全画素が黒になるまで変化させたときの、織物の観測画像上の点における輝度変化を示す。こちらの結果では、白領域が徐々に外側のみに減少する場合は、相互反射は非線形に減少することが確認される。例えば、図 9 のランダムパターンの白 50% の時の輝度値は 100% 時の約半分であるが、

図 10 ではプロジェクタの白画素が半分、つまり 240000 画素の時では輝度値は圧倒的に低くなる。このことから、相互反射は投影されるプロジェクタの白画素の数と分布、つまり水平ステージに照らされる白画素と織物上の観測点との距離に関係することが確認される。

以上の結果に基づき、観測画像上の画素(I_x, I_y)において、その画素を照らすプロジェクタの投影光の画素(P_x, P_y)が黒であり、その周辺が異なる材質、あるいは散乱の届かないほど十分に遠い位置にプロジェクタの白画素が投影される場合は、プロジェクタの解像度を $W \times H$ とすると、画素(I_x, I_y)での相互反射の強さ $L_r(I_x, I_y)$ は、以下の式(2)で示される。

$$w(P_x, P_y) = \begin{cases} \frac{1}{(P_x - P_{x0})^2 + (P_y - P_{y0})^2} : G(P_x, P_y) = 1 \\ 0 : G(P_x, P_y) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$L_r(I_x, I_y) = A(I_x, I_y) \cdot \sum_{P_x=1}^W \sum_{P_y=1}^H w(P_x, P_y) + B(I_x, I_y)$$

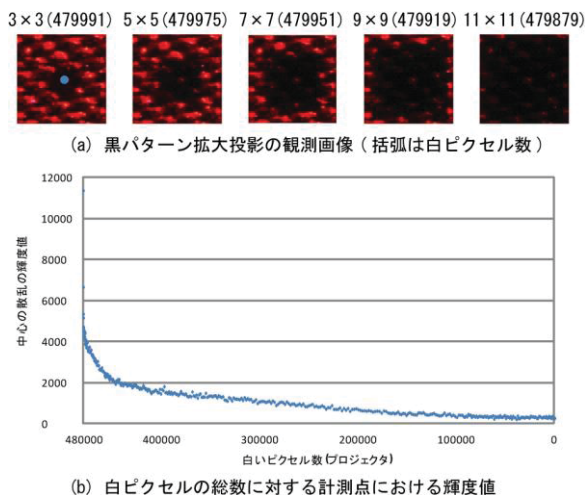


図 10 黒領域拡大による白ピクセル数に対する相互反射

$A(I_x, I_y)$ は相互反射係数であり、各点における微小面の法線の傾きに基づく入射光量に依存した係数である。 $B(I_x, I_y)$ は黒のパターン光による微小な反射の強さを示す。 $w(P_x, P_y)$ は重みを示し、プロジェクタの画素が白($G(P_x, P_y)=1$)の場合に加算され、黒($G(P_x, P_y)=0$)の場合では 0 となる。

したがって、各画素(I_x, I_y)の相互反射を推定するために、式(2)より未知パラメータ $A(I_x, I_y)$ および $B(I_x, I_y)$ を推定する。

推定方法として、図 8 に示す白 0%から 100%までの各ランダムパターンを投影した時に算出される w の総和と、観測画像の輝度値 $L_r(I_x, I_y)$ を入力として、式(2)をフィッティングすることで $A(I_x, I_y)$ および $B(I_x, I_y)$ を推定する。

推定された各画素における相互反射式に基づき、次は格子パターン投影時における重み w の総和を計算することで、観測画像座標(I_x, I_y)における相互反射 $L_r(I_x, I_y)$ を推定する。

4.4 散乱特性の抽出

式(1)の格子パターンでの大域成分 $L_g/2$ と相互反射 L_r と散乱 L_s には以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}L_g = L_r + L_s \quad (3)$$

式(3)より、4.2 節で求めた大域成分 L_g と 4.3 節で推定した相互反射 L_r をそれぞれ代入することで、散乱 L_s を抽出する。

4.3 節で述べた 2 種類の相互反射前実験、1)織物以外の部分の白黒プロジェクタ画素比を均等にして、段階的に拡大した $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ の格子パターンを投影する場合と、2)織物の観測点を中心に黒の正方形領域を拡大するパターンを投影する場合、のそれぞれの大域成分抽出結果を用いて、以下のステップで散乱の特性を推定する。

- 式(2)に基づいて、相互反射におよぼす環境光量を一致させるように、2)の大域成分変化の抽出結果をスケールリングして、1)と 2)の結果を統合し、入射点から観測点までの距離に対する大域成分の減衰を表す大域成分変化曲線を抽出する。
- 抽出した大域成分変化曲線から、環境光量を一致させた相互反射を推定する。
- 大域成分曲線から相互反射を分離し、入射点から観測点までの距離に対する散乱成分の減衰を表す散乱曲線を抽出する。
- 得られた散乱曲線の形状から単一および低次散乱と多重散乱を分離する。

4.5 多方向照明画像を用いる反射と散乱異方性の観測

シルクライク織物は、長く浮いたフィラメント糸の方向の入射面において入射方向を変化させた場合に、安定に効率的に、直交 2 軸の反射異方性を観測できることが報告されている[6]。そこで本研究では、よこ糸方向(長く浮いたフィラメント糸方向)の入射面において、プロジェクタ照明方向を変化させた多方向照明画像を用いて、メゾ構造の微小面の傾きによる散乱の強さの変化を観測し、織物のメゾ構造と散乱異方性の関係を明らかにする。

3.1 節で述べたように、カメラの撮影角度を垂直方向 N に対して $\theta=20^\circ$ の方向に固定し、プロジェクタ光源方向を 0° から 40° の方向へ、つまり、正反射方向からのずれ角を $\pm 20^\circ$ の範囲で 2° 刻みで移動させて観測する。プロジェクタのそれぞれの入射角度において、 3×3 画素サイズの格子パターンとそのシフトパターンと全画素黒パターンを織物に投影し、各画素における、最大輝度値画像 I_{max} と最小輝度値画像 I_{min} を生成し、4.2 節と 4.3 節で述べた方法で、各画素における、直接成分から得られる表面反射と、大域成分から抽出された散乱の相関を推定する。

5. 実験結果

5.1 相互反射の提案式の評価

式(2)を評価するために、図 8 で使用したランダムパターン時の相互反射を算出し、実測データと比較して線形性を評価した。式(2)の A と B は傾きと切片なので、ランダムパターン時の変化については式(2)の重み w のみで評価する。

図 11 に結果を示す。結果のグラフからランダムパターンにおける白画素の割合に増加に対して相互反射は線形に変化していることが確認された。また、グラフデータから算出した近似直線とグラフデータとの $RMSE=0.0105$ と低く、式(2)は適切であることが確認できた。

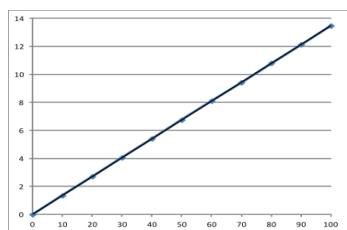


図 11 ランダムパターンの白の割合に対する相互反射

5.2 相互反射と散乱の推定結果

図 9 (a) に示すランダムパターン時による実際の相互反射のデータに対して、式(2)をフィッティングして A, B を求め、相互反射を算出した。図 12 に、各サイズの格子パターン投影による大域成分、相互反射、散乱の推定結果を示す。左から順に格子パターン $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ のサイズで、括弧は入射点からの最短距離を画素単位で示しており、格子サイズが拡大するにつれて入射距離は大きくなる。

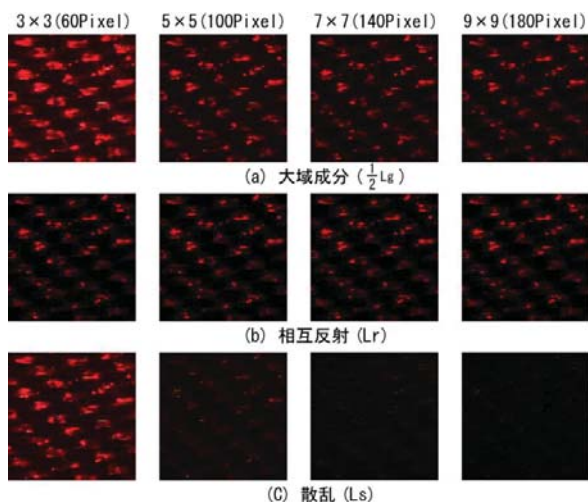


図 12 各格子パターンでの抽出結果

図 12 (a) に示す大域成分は、格子サイズが大きくなるほど入射点からの距離が遠くなるため、輝度値が減少していくことが確認できた。

次に、大域成分に対して相互反射・散乱がどの程度含まれているかを確認する。図 12 (b) に示す相互反射は、各格子パターンにおけるプロジェクトの白画素の数は解像度

の半分であり、全体的に均等に配置されることからほぼ同じ輝度分布の結果となった。図 12 (c) に示す散乱は、入射点の近い 3×3 サイズによる観測点では全体的に高く、入射点から離れた $7 \times 7, 9 \times 9$ サイズによる観測点ではほとんど散乱が見られない、このことから大域成分のほとんどが相互反射であることが確認される。

5.3 散乱減衰曲線の推定結果

よこ糸中心を観測点とした入射点からの距離に対する散乱減衰曲線を推定する。図 13 のグラフの X 軸は入射点からの距離で画像のピクセル数を示す。 3×3 から 9×9 までは格子パターン投影による方法で、それ以降は観測点を中心とする黒パターンの拡大投影により取得したデータである。格子パターン投影による大域成分を青色で、相互反射を緑色で示した。相互反射は図 12 で示した結果と同様にほぼ同値となり、大域成分は指数近似に近い減少を示した。また、パターン拡大投影による方法では、入射範囲が格子と異なり条件が一致していないため、式(2)より格子パターン投影における環境光量を一致させ、相互反射を推定した。相互反射は格子パターンで白黒ほぼ半分であるため、一定の値を示した。大域成分は相互反射よりも低い値がみられるが、カメラのノイズの範囲にとどまった。

図 14 に、図 13 の大域成分より相互反射を分離して推定した散乱減衰曲線の抽出結果を示す。よこ糸中心部分では、入射点の距離が短い時では十分に散乱が観測され、入射点の距離が長くなると減少し、グラフでは 200 ピクセル (実寸値で 1mm) あたりで散乱が消滅していることが確認された。織物の厚み・入射角を考慮すると散乱は比較的広い範囲まで生じており、シルクライク織物は多重散乱の影響が大きいことが考えられる。

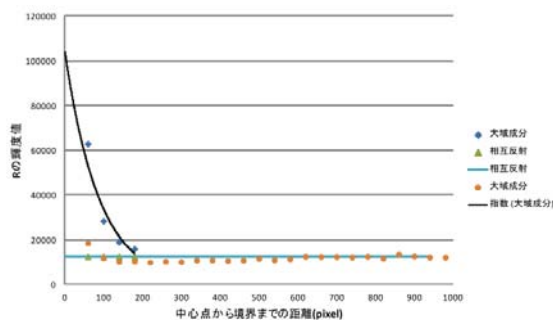


図 13 入射点からの距離に対する大域成分・相互反射

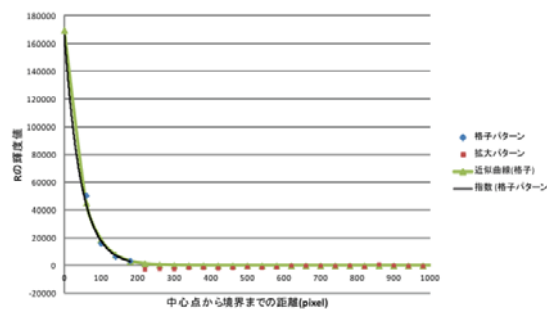


図 14 入射点からの距離に対する散乱特性結果

5.4 散乱異方性の抽出結果

図 15 に、 3×3 の格子パターンを投影することによって得られたプロジェクタの入射角に対する、直接成分と大域成分の分離結果を示す。直接成分をみると、プロジェクタ角度が 20° の時に、よこ糸の中心付近での正反射が多く、全体的な輝度も高い。大域成分にも同様の傾向がある。

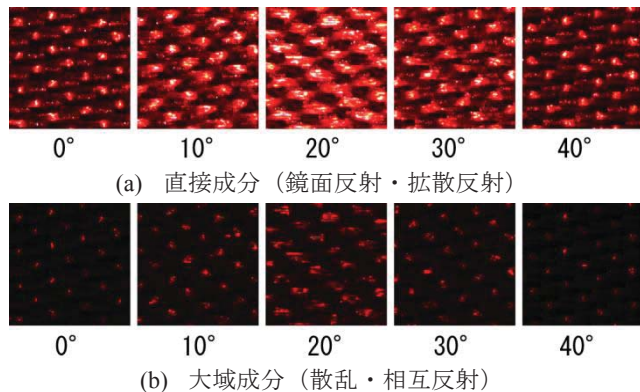


図 15 光源の入射角に対する織物の直接成分・大域成分

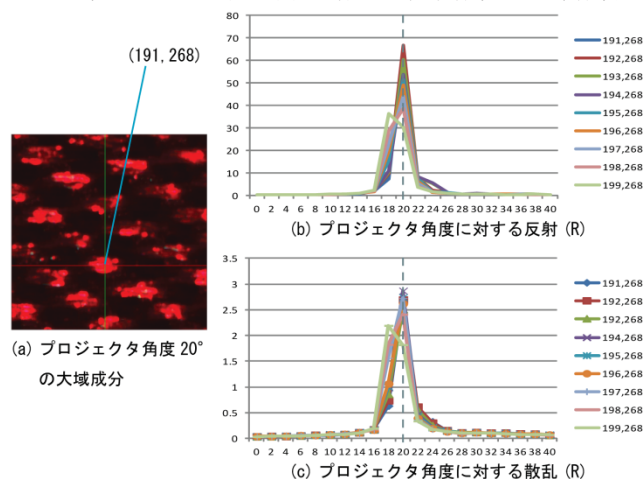


図 16 入射角度に対する反射・散乱の変化

次に、よこ糸中心座標 (191,268) から X 方向の画素における、プロジェクタ角度に対する反射と散乱の変化を比較した。図 16 は、反射と散乱のプロジェクタ角度における変化で、X 軸はプロジェクタ角度、Y 軸は白色版で正規化した値である。複数の折れ線グラフは、よこ糸中心 (191,268) から X 方向に 9 画素分の (199,268) までのデータを示している。

各画素におけるプロジェクタの入射角変化に対する、反射・散乱値の変化は、正反射方向付近(ずれ角 $\pm 2^\circ$) で急激にその値が上昇することが確認される。反射においては鏡面反射による影響であり、散乱に関しては単一散乱の指向性の影響によるものと考えられる。

また、反射・散乱が最大になるプロジェクタ入射角は一致していることが確認できる。最後のデータ (199,268) は、よこ糸がたて糸に潜り込むためによこ糸の X 成分の面方向が変化することによって正反射する角度が 20° から 18° に変化したためで、反射・散乱共に同じ傾向を示した。

図 15 に、各画素において直接成分と大域成分の、最大値となるプロジェクタの角度のマップと差分結果を示す。



図 17 反射・大域成分の輝度が最大の角度マップと差分

画像の輝度値は 20° の時に輝度値を 255、そこから 2° 変化するごとに輝度値を 20 減少するように割り当てている。反射の画像を見ると、よこ糸の中心が 20° で正反射しており、中心から離れるごとに輝度値が減少、すなわち正反射が 20° から 0° 方向、あるいは 40° 方向へ滑らかに変化していることから、よこ糸表面が曲面であることが確認できる。差分結果では、観測の難しいよこ糸のエッジ部分やたて糸部分の差分が目立つだけで、よこ糸の表面部分に関しては差分が目立たず、傾向が類似している結果となった。これは、散乱が反射と同様のメゾ構造に基づく異方性を示すことが確認できる。

6. 考察

織物の表面下散乱は、「絹のプリズム」と表現される半透明のフィラメント糸の透過性に起因していると考えられる。図 16 に、三角柱状の単糸(繊維)の束から成るフィラメント糸の微細断面構造と散乱成分の関係図を示す。

2.2 節で述べたように、表層の単糸は、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。つまり、単糸表面の傾きと下側側面の境界面の傾きはほぼ平行であると考えられる。したがって、フィラメント糸の表層の単糸内部に透過してきた光が、単糸の下側境界面で一回だけ散乱を起し、入射点のごく近傍で出射されれば、入射点での反射光と等しい方向に指向性をもち、かつ、単糸内部に侵入しているため物体色を持つ、単一散乱成分として観測されることが推定できる。

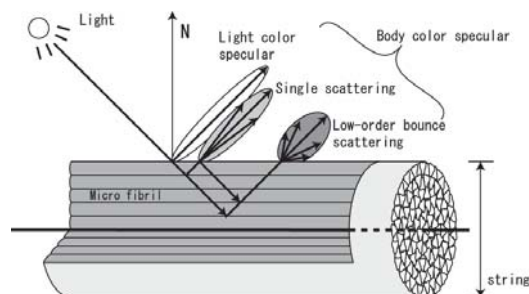


図 18 糸表面での反射と表面下散乱

7. おわりに

反射光および散乱光を安定に観測できる画像計測システムを構築し、得られた高解像度多方向照明 HDR 画像から織物の直接成分と大域成分に分離した。さらに計測環境下における相互反射の推定法を提案し、推定結果を大域成分から分離することで、散乱特性を抽出した。また、光源方向、格子パターンの拡大による入射点からの距離を変更することで、反射および散乱光の方向や強度の変化に着目し、入射点距離が近い場合では低次の散乱による指向性を確認し、光源の方向の変化による解析から、織物の散乱は反射と同様に指向性の強い直交二軸の異方性を持つことを示した。

さらに散乱には単一・多重散乱が含まれていることから、入射点からの距離による散乱特性を解析することで、その境界部分の推定を行った。しかし、プロジェクタの分解能がカメラの分解能よりも低い問題があり、入射点からの距離を高精細に設定することができず、高精度な単一・多重散乱の境界推定が今後の課題としてあげられる。

参考文献

- 1) S. Tominaga, "Dichromatic Reflection Models for a Variety of Materials," Color Research and Application, Vol.19, No.4, pp.277-285, 1994.
- 2) S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination", Proc. SIGGRAPH2006, pp.935-944, 2006.
- 3) H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy, P. Hanrahan, "A Partical Model for Subsurface Light Transport ", Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
- 4) S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec, and G. Turk, "Efficient Estimation of Spatially Varying Subsurface Scattering Parameters", Modeling, and Visualzation 2006.
- 5) Y. Mukaigawa, R. Raskar, and Y. Yagi, "Analysis of Scattering Light Transport in Translucent Media ", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 3, pp.122-133, Dec. 2011.
- 6) 武田祐樹 坂口嘉之 田中弘美: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, 芸術学会論文誌, vol.17, no.4, (2008).
- 7) 尾崎遼 西脇靖洋 武田祐樹 湯原卓広 田中弘美: 多方向 HDR 画像を用いたシルクライク織物の3次元構造モデリング, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.3, pp.315-324 (2009).
- 8) 武田祐樹 田中弘美: 多方向照明 HDR 画像を用いた金襴の多重解像度異方性 BTF モデリング, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J91-D, No.12 (2008).
- 9)
- 10) 矢崎美彦 高寺政行 清水義雄: 平織物の光透過異方性, 繊維学会誌, Vol.60, No.10 (2004).

- 11) シルクレポート, 大日本蚕糸会 No.14, 2010.9
- 12) Dcraw: <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcraw/>