

# 表面下の微粒子構造を考慮した多重法線反射モデルの提案

池本 祥<sup>1</sup> 向川 康博<sup>2</sup> 八木 康史<sup>1</sup>

**概要:** これまで、コンピュータビジョン分野では、物体表面上で観測される反射光に反射モデルを当てはめることで物体の表面状態を定量化し、物体表面の荒さ推定やコンピュータグラフィックス (CG) に利用してきた。しかし、近年、産業界では製品の差別化のために高級感を持たせた加飾技術が発達し、従来の反射モデルではうまく表現できない表面状態が増えてきた。例えば、自動車の外装では、微細な雲母の粒子を混ぜたパールマイカ塗装によって高級感をつくりだしている。また、冷蔵庫などの家電製品では、金属の微粒子を含む層を持った加飾フィルムによって高級感を出している。そこで、本論文では、これらのように表面下の微粒子などによって法線の分布が独特に変化する表面を対象とし、表面下の微粒子が作り出す複雑な反射を扱える多重法線反射モデルを提案する。表面下の微粒子などによる鏡面反射に、混合ガウス分布を当てはめることで表面下の法線分布を解析する。

## 1. はじめに

物体の反射特性は表面の微視的形狀に依存し、物体の見え方を決定づける大きな要因である。我々人間も、視覚情報から得られた反射の様子から物体の質感を感じることができる。

これまで、コンピュータビジョン分野では、計測された明るさに反射モデルを当てはめることで、物体の表面状態を定量化し、物体表面の荒さ推定や CG に役立てられてきた。産業界でも、反射特性に影響を与えるパラメータを設定することで物体表面の品質管理をして、高級感などの質感を表現しており、反射特性は重要な観点であるといえる。反射特性は様々な手法で計測され、計測機器も数多く開発されてきた。例えば、楕円鏡とプロジェクタを用いることで BRDF をサンプリングできる計測システムが開発されている [1]。このシステムは楕円鏡を用いることで、投影画像を変えるだけで光源方向を自由に制御でき、あらゆる角度への反射光を一度に撮影できるため、高速な反射率計測が可能である。そのため、物体表面上の計測点に対して、照明方向と観測方向を様々に変化させた場合の反射光強度を密にサンプリングし、その値をそのまま反射特性の参照テーブルとして利用することもできる。また、こうした手法により計測された反射特性はモデル化され、拡散反射や鏡面反射のモデルも提唱されてきた。さらに、そのモデル

を利用することで、物体の表面状態を定量化したり、CG への応用もされてきた。

しかし、従来の反射モデルでは表現しきれない複雑な構造を持った物体も存在する。例えば、近年の工業製品は、製品の差別化のために「高級感」を持たせた加工技術が用いられる場合がある。具体的には、自動車の外装は微細な雲母の粒子をクリア層に混ぜたパールマイカ塗装を用いて高級感を出している。また、近年の家電製品などに用いられている金属微粒子を含む層をもった加飾フィルムでも、同じような構造が観測される。これらは産業界において、高級感を表現する上で関心が高いものではあるが、その高級感の定量化をすることは難しいとされている。これらの物体表面では法線の分布が独特に変化するため、製品の品質管理が難しく、反射特性を定量化することは重要な課題である。

そこで、本研究では、家電製品の高級感を演出するために用いられる加飾フィルムなどの独特の質感を持った表面を対象とし、その反射モデルを提案し、実際の物体にモデルを当てはめることにより、モデルの妥当性について述べる。

## 2. 関連研究

物体の反射特性は、双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) によって表現される。BRDF とは、図 1 で示すように、光源方向  $(\theta_i, \phi_i)$  からの入射光照射度に対する視点方向  $(\theta_r, \phi_r)$  への反射光の強さの比として定義される。

この BRDF を実際に CG 等のアプリケーションで利用

<sup>1</sup> 大阪大学  
Osaka University

<sup>2</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology

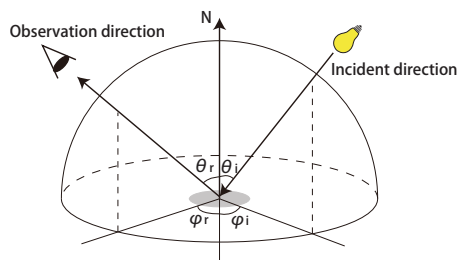


図 1 入射方向と反射方向で定義される BRDF

できるように、多くの反射モデルが提唱されてきた。木や石膏など、強い拡散反射成分が観測される物体に対して、理想的な拡散反射表面が持つべき性質を表現したものが Lambert モデルである。理想的な拡散反射はどの角度から観測しても明るさが一定であるという性質を表現できている。これをさらに微小面によって生じるマスキングやシャドーイングの影響を考慮したより正確なモデルが Oren-Nayar モデル [2] である。

鏡面反射のモデルでは、古典的なモデルでは Phong モデル [3] がある。これは、光沢のあるプラスチックなどの鏡面反射に用いられるが、経験に基づくモデルであり、物理的には正確ではない。しかし、簡単に計算ができるため CG などで利用され、Phong シェーディングとして知られている。

Torrance-Sparrow モデル [4] は、物体表面を完全鏡面反射する微小面の集合で構成されると仮定したモデルである。微小面による遮蔽やフレネル反射を解析することでオフスペキュラーを表現できる物理現象を反映したモデルである。オフスペキュラーとは、鏡面反射の際に反射角と入射角が等しい正反射方向の反射が一番強くなるのではなく、実際は少しずれた角度でピークを持つ現象のことを言う。このモデルはその後、Blinn[5] によって簡潔に再定義され、容易に CG などに用いることができるようになった。

これまで、照度方向と観測方向の両方を固定し、対象物体を法線方向を軸に回転させても明るさが変化しない、いわゆる等方性反射をする物体を対象としたモデルについて述べてきた。しかし、金属製品などは表面につけられた細かいヘアライン加工の傷の方向に対応して、光沢がある方向に伸びるように見える。つまり、対象物体を法線方向を軸に回転させたときに明るさが変化してしまう、いわゆる異方性反射をする物体も存在する。そして、これらに対する反射モデルも Ward モデル [6] などが提唱されたが、これらは法線の構造を分布で表したものである。カメラで撮影したときに 1 画素に複数の法線を持つ物体を表現できるモデルはこれまでなかった。

### 3. 多重法線反射モデル

#### 3.1 表面下の微粒子構造

自動車の塗装で用いられているパールマイカ塗装は図 2

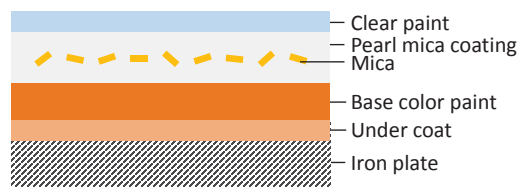


図 2 パールマイカ塗装の構造

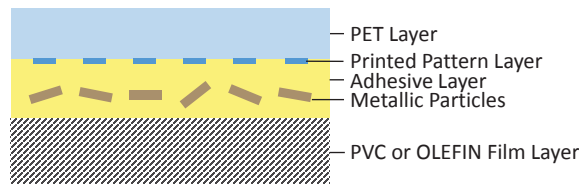


図 3 加飾フィルムの構造

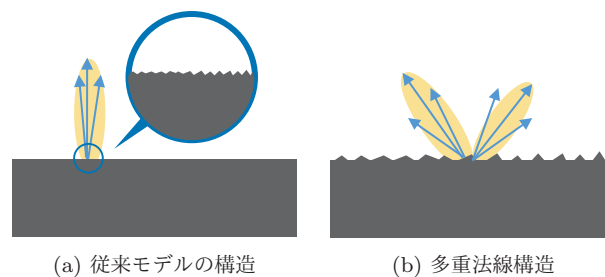


図 4 表面の微細形状

のような構造をしている。この塗装は、表面下に微細金属粒子や雲母を混入することで複雑な反射が起こり、独特な深みや高級感を表現している。同様に、家電製品などに用いられている加飾フィルムの中にも図 3 のように、このような構造を持つものがあり、家電製品に高級感を付与している。これらは、表面は一つの法線が定まるが内側は複数の法線を持っている複雑な構造をしている。すなわち、一点を観測した時に表面と内部で法線の方向が異なるということであり、カメラで撮影したときの 1 画素内でも複数の粒子が存在することで複数の法線を含むことになる。

本論文で取り扱うような、表面下の微粒子などの影響で画像内の 1 画素に複数の法線に対応する構造を多重法線構造と呼ぶこととする。

#### 3.2 多重法線の表現

これまで、1 画素に複数の法線を含む物体表面の反射特性の研究はほとんどされてこなかった。図 4 で示されるように、従来のモデルでは物体表面の法線は一つと定められていた。厳密には、ひとつの法線を中心に、微小面の傾きを考慮して一つの分布として取り扱っていた。本論文で取り扱う多重法線構造物体では、その中心となる法線が複数存在するため、複数の法線分布で表現される。

近年、Tan[7] らは物体表面の微細形状を混合ガウス分布で表現し、フォトメトリックステレオに利用して、より詳細な物体形状の再構築をした。このように、複数の法線分布は混合ガウス分布を用いて表現する考え方もある。

### 3.3 反射モデルの定式化

ここで、多重法線物体の反射モデルを定式化する。まず、物体が二色性反射モデルに従っていると仮定すれば、反射光は拡散反射と鏡面反射の和で構成される。また、多重法線構造物体の表面による反射は物体表面上で一様であるが、表面下の微粒子による反射は観測点ごとに変化すると仮定する。そのため、鏡面反射成分は、物体の表面の反射と表面下の微粒子による反射の2つに分けて考える。表面下の微粒子による反射に関して、1画素に  $K$  個の法線を含むと考えると、 $K$  個それぞれについての反射を考える必要がある。これらを考慮し、多重法線反射モデルによる表面の明るさ  $i$  を式 (1) で定義する。

$$i = \rho_d \max(0, \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + \rho_{s1} R_1 + \rho_{s2} (F^t)^2 R_2 \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{DGF^{r1}}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}} \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}$$

$$R_2 = \sum_{k=1}^K \frac{D_k G_k F_k^{r2}}{\mathbf{N}_k \cdot \mathbf{V}} \mathbf{N}_k \cdot \mathbf{L}$$

$$D = e^{-(\alpha n)^2}$$

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

$$F^r = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left( 1 + \frac{(c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2} \right)$$

$$F^t = 1 - F^r$$

$$c = \mathbf{V} \cdot \mathbf{H}$$

$$g = \sqrt{\eta^2 + c^2 - 1}$$

$\mathbf{N}, \mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{H}$  はそれぞれ、法線ベクトル、光源ベクトル、視線ベクトル、ハーフベクトルとする。なお、ハーフベクトルは光源ベクトルと視線ベクトルの二等分方向である。式 (1) の第1項は拡散反射成分を表しており、一般的に広く用いられている Lambert モデルに従うものと仮定する。ここで、 $\rho_d$  は拡散反射率である。第2項は物体表面の鏡面反射成分を表しており、広く用いられている Torrance-Sparrow モデルに従うと仮定する。ここで、 $\rho_{s1}$  は表面層の鏡面反射率である。 $D$  は法線分布項であり、物体の法線のばらつきを表す。 $\alpha$  は法線ベクトルとハーフベクトルの角度を表す。 $G$  は幾何減衰項であり、物体表面の形状によるマスキングとシャドウイングを表す。 $F^r$  はフレネル項であり、屈折率の異なる物体の境界面で生じるフレネル反射を表現する。ここで、 $F^{r1}$  は表面層の境界面で生じるフレネル反射のふるまいを表す項である。また、 $\eta$  は相対屈折率であり、光が二つの媒質の境界面で屈折するときの屈折率を表す。第3項は表面下の微粒子による鏡面反射成分を表しており、1画素に  $K$  個の表面下層の法線を含む時に、 $K$  個それぞれの表面下の反射の和を Torrance-Sparrow モデルで表したものである。このとき観測される反射は、図5で示すように、表面層を透過した光が表面下層で反射し、表面

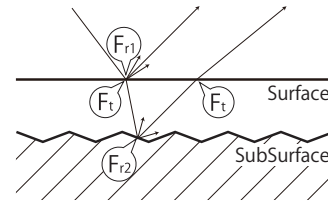


図5 多重法線構造の反射と透過のふるまい

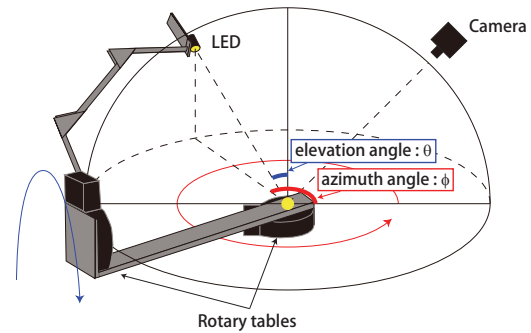


図6 計測装置

層を透過したものである。そのため、フレネル透過項を2回乗じる必要がある [8]。ここで、 $F^{r2}$  は表面下層の境界面で生じるフレネル反射のふるまいを表す項であり、 $F^t$  は表面層の境界面で生じるフレネル透過のふるまいを表す項である。

## 4. 反射光の計測とモデル当てはめ

### 4.1 反射光の計測

一般に、反射特性を計測するためには、物体表面上の点において、照明方向と観測方向の両方を変化させた時の反射強度を取得する必要がある。しかし、多重法線構造のように1画素に複数の法線が対応付く場合は、物体表面とカメラの位置関係をサブピクセル単位で厳密に対応付ける必要がある。そのため、カメラを回転させてしまうと観測点を対応させることが難しくなる。そこで、計測方法として、カメラと観測物体は固定し、光源のみを回転させる。すなわち、図6に示すようなセッティングで光源方向  $(\theta, \phi)$  ごとに反射光を計測する。

### 4.2 拡散反射成分の推定

観測した反射光から、式 (1) で述べた多重法線モデルを元に、法線分布の推定を行いたい。そのためには拡散反射成分を抽出して、鏡面反射成分のみにする必要がある。拡散反射項である第1項に着目すると、 $\mathbf{N}$  と  $\mathbf{L}$  を正規化すると、この項は  $\cos \theta$  に比例するため、それを手がかりに拡散反射項を求める。まず、 $\cos \theta$  に比例する  $\rho_d$  の関数  $\rho_d \cos \theta$  を用意し、取得した反射光の画素値とその関数  $\rho_d \cos \theta$  の差の絶対値が閾値以下の要素をサポートとして数える。サポート数が多いほど、 $\rho_d \cos \theta$  に従うと言えるので、最もサポート数が増える係数  $\rho_d$  を求めることで、拡散



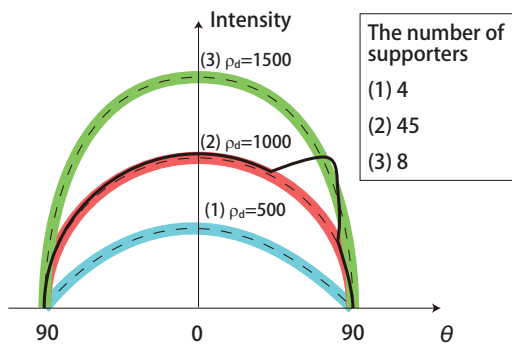


図 7 拡散反射成分推測の例

反射光を導出することができる。

図 7 は、鏡面反射成分と拡散反射成分の両方を持つ物体のある方位角に対しての輝度値を取り出した例にこの手法を適応させたときの結果である。黒の実線で描かれているのが計測された輝度値であり、青、赤、緑で示される線が  $\rho_d$  を変化させたときの  $\rho_d \cos \theta$  である。各色の幅は、サポーターとみなす値の範囲を表している。この例では、サポーターの数が多い  $\rho_d = 1000$  と定まる。この手法では、鏡面反射成分を外れ値として扱うことができ、外れ値の影響を少なくして求めることができる。この手法を、本論文では便宜上、ロバスト推定と呼ぶこととする。元の輝度値からロバスト推定で求めた拡散反射成分を引くことで、鏡面反射成分を求めることができる。

#### 4.3 表面反射成分の推定

観測された輝度値から拡散反射成分を引くと、鏡面反射成分のみが残る。鏡面反射成分は表面の反射と表面下の反射に分けられるが、前節で述べた手法と同様にロバスト推定によって、多重反射モデルの第 2 項である表面反射成分が推定できる。もし、物体の材質が既知であれば屈折率も既知となるので、第 2 項の未知パラメータは  $\rho_{s1}$  と幾何減衰項の  $n$  の二つである。これら二つのパラメータを変化させたときの、第 2 項の値から、未知のパラメータを推定することができる。この際、パラメータを設定したときの第 2 項の値が鏡面反射のサポーターとみなす値より低い場合は、モデルとして正しくないため、サポーター数を  $-1$  とすることとすることで、モデルの妥当性を高めている。

#### 4.4 混合ガウス分布による表面下法線の表現

前節までで反射モデルの第 3 項以外の値は求めることができているので、表面下反射の成分を求めることができる。しかし、微細表面の幾何減衰だけでなく、各微粒子間のマスキングとシャドウィングも考慮しなければならないことや、フレネル透過も考慮しなければならない、計測した明るさをモデルに当てはめることは困難である。そこで、本論文ではモデルを直接当てはめるのではなく、表面下反射の輝度値から 1 画素中の表面下法線の分布を解析すること

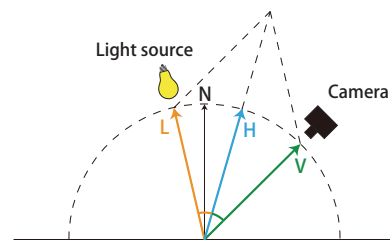


図 8 ハーフベクトル

で、多重法線構造物体の表面下構造の複雑さを表現する。具体的には、1 画素に複数の法線があることから複数の分布で表現できると予想し、法線分布を混合ガウス分布で表現することとする。

簡単化のために鏡面反射のオフスペキュラーを無視すると、法線方向は簡単に求めることができる。具体的には、視線ベクトル  $\mathbf{V}$  と光源ベクトル  $\mathbf{L}$  の 2 等分方向を示すハーフベクトル  $\mathbf{H}$  を求めればよい。ハーフベクトル  $\mathbf{H}$  は図 8 のように、式 (2) で求めることができる。

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{V} + \mathbf{L}}{|\mathbf{V} + \mathbf{L}|} \quad (2)$$

つまり、観測された反射強度が強い点に対するハーフベクトル方向が法線方向であるとみなすことができる。

ただし、ハーフベクトルの方向を仰角と方位角  $(\theta_h, \phi_h)$  とすると、 $\phi_h = 0^\circ$  と  $\phi_h = 360^\circ$  が同じ角度になり、また、 $\theta_h = 0^\circ$  では  $\theta_h$  を変化させても同じ角度になるなど、扱いが煩雑になる。そこで、半径 1 の単位球を天頂方向から見たときの 2 次元平面で考えたときの座標系に変換して扱う。具体的には式 (3)、式 (4) で表せられる。

$$x = \sin \theta \cos \phi \quad (3)$$

$$y = \sin \theta \sin \phi \quad (4)$$

このようにして得られた法線尤度を混合ガウス分布に当てはめる。最尤推定の手法として、EM アルゴリズム (期待値最大化法) が利用されることが多い。EM アルゴリズムとは、不完全データからの最尤推定値を求める手法である。EM アルゴリズムは、E(期待値) ステップと M(最大化) ステップから構成される。E ステップでは、現在推定されている潜在変数の分布に基づいて、モデルの尤度の期待値を計算する。M ステップでは、E ステップで求めた尤度の期待値を最大化するようなパラメータを求める。M ステップで求めたパラメータは、次の E ステップで使われる潜在変数の分布を決定するために用いられる。E ステップと M ステップを収束条件を満たすまで交互に繰り返すことで、構成する正規分布のパラメータである平均と分散を求めることができる。

混合ガウス分布は構成するガウス分布の数を設定する必要がある、その構成数が多ければすべてのデータをカバーすることは簡単になるが、冗長な表現になってしまう。そのため、成分数が指定されていない場合に、モデルに対す

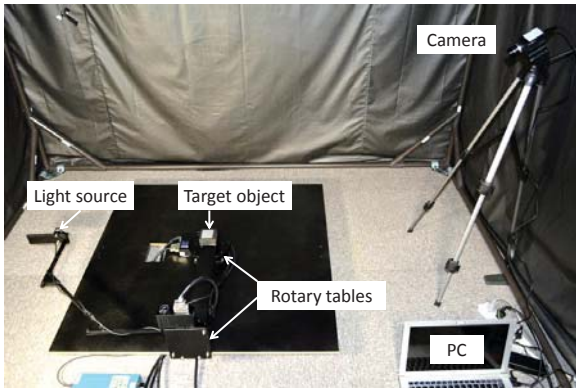


図 9 実験装置

る適切な成分数を決定するための指標が必要である。そのために、AIC(赤池情報量)やBIC(ベイズ情報量)がよく用いられる。これらはいずれも、推定されたパラメータ数に対してペナルティ項をもつデータに対する負の対数尤度である。本研究では式(5)で表されるBICを使う。

$$BIC = -2\ln(L) + K \ln(N) \quad (5)$$

ここで、 $L$ は最大尤度、 $K$ はパラメータ数、 $N$ は標本数を表す。このBICの値が小さいものが最適なパラメータであり、混合ガウス分布の構成数を求めることができる。

## 5. 実験結果

### 5.1 計測環境

対象物体に対して半球状に光を照射する必要があるため、実験装置として図9で示すような、半球状に光源(日進電子工業株式会社 W3VP-8)を動かして撮影できるシステムを作製した。なお、物体と光源までの距離は50cm離れた。多重法線構造を持った物体の詳細な反射の変化を観測するため、カメラはモノクロカメラ(PointGrey GS3-U3-28S4M-C)を使用する。これは、カラーカメラだと撮像素子にベイヤーフィルタをかぶせてカラー画像を作るため、デモザイキングによって解像度が低下してしまうからである。カメラの位置は物体の法線方向だと、表面の鏡面反射の影響を大きく受けすぎてしまい微細構造の法線の反射が計測しにくいので、仰角を $45^\circ$ ずらした $(45, 0)$ の位置から撮影する。このとき、多重法線構造では隣り合った画素でも法線方向が異なることによって反射が異なってくるので、 $5 \times 5$ の隣接25画素分の反射光を計測し、それぞれ比較することとする。カメラの設定はISO感度は100、F値は8、シャッター速度は観測結果に合わせて設定する。カメラの有効ビット数は14bitである。なお、撮影画像の枚数が膨大になってしまうので、保存の際はROIによって $5 \times 5$ 画素分保存して、メモリの削減を図る。本システムにより、角度 $\theta$ と $\phi$ をそれぞれ $3^\circ$ ずつ回転させて反射光を計測する。

問題点として、システムの構成上、光源を支えているアー

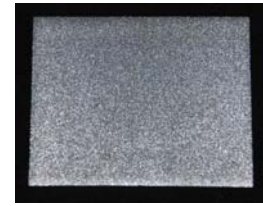


図 10 計測物体

表 1 拡散反射係数  $\rho_d$

	加飾フィルム
平均	324
標準偏差	43

ムがある角度ではカメラに対して観測物体を遮ってしまうことがある。その際、撮影された光源位置のデータが欠落してしまう。そのため、欠落した光源座標 $(\theta, \phi)$ のデータに関しては、等方性の反射では方位角方向に光源が移動しても大きく反射が変化しないと仮定し、 $(\theta, \phi - 1)$ のデータを代用して扱うこととする。なお、データが欠落してしまうのは、カメラと同方向に光源があるときなので、再帰性反射や強い拡散反射物体以外には大きく影響することはない。

### 5.2 計測結果

今回の実験では、家電製品に用いられている加飾フィルムのサンプル(図10)を計測した。各物体の計測輝度値を半球状にプロットした図を示す。また、25画素分のうち、代表的なものを3画素分抜粋して図11に掲載する。この図から、表面下の金属微粒子の影響で反射のピークが複数存在し、各画素間で不規則に散らばって観測されることが分かる。

### 5.3 反射成分分離

得られた計測輝度値から、多重法線反射モデルの各項における成分に分離する。まず、拡散反射項は、未知であるパラメータ $\rho_d$ を推定する必要がある。 $\rho_d$ を0~16384に変化させてロバスト推定した。また、サポーターとみなす範囲の閾値を300に設定した。このときの拡散反射成分の25画素分の $\rho_d$ の平均値と標準偏差を表1に示す。

次に、表面反射項の推定では、未知であるパラメータ $\rho_{s_1}$ と $n$ を求める必要がある。 $\rho_{s_1}$ は1000~200000まで、 $n$ は0.01~10.0まで変化させて、ロバスト推定した。このとき、サポーターとみなす範囲の閾値を300に設定した。また、材質は既知のため、相対屈折率 $\eta$ は定数で表すことができる。このときの鏡面反射成分を図12に示す。また、推定した $\rho_{s_1}$ と $n$ の25画素分の平均値を表2に示す。

ここで、結果では表面反射成分が実際より弱くなってしまっている。これは、撮影の際にカメラの位置が厳密に $45^\circ$ 方向にないことやオフスペキュラー現象によって、計

表 2 表面反射成分のパラメータ

	$\rho_{s_1}$	$n$
平均値	13040	0.041

表 3 表面下法線の混合ガウス分布の構成数

	構成数
平均	2.96
標準偏差	1.31

表 4 加飾フィルムの共分散の値 ( $\times 10^{-2}$ )

構成数	1	2	2	4
$(\sigma_{xx}^1, \sigma_{yy}^1)$	(0.62, 1.24)	(0.84, 2.73)	(0.25, 0.25)	(0.37, 0.37)
$(\sigma_{xx}^2, \sigma_{yy}^2)$		(0.20, 0.42)	(0.55, 0.55)	(0.11, 0.11)
$(\sigma_{xx}^3, \sigma_{yy}^3)$				(0.36, 0.36)
$(\sigma_{xx}^4, \sigma_{yy}^4)$				(0.11, 0.11)

測したデータにおいて正反射方向に反射のピークがないことから、モデルと観測値がずれていて、ロバスト推定の際に正確に推定できていないことが原因と考えられる。そのため、カメラ方向をより厳密にキャリブレーションする必要があると考えられる。

元の輝度値から求めた拡散反射成分と表面反射成分を引くと、表面下反射成分を求めることができる。求めた表面下反射成分を図 13 に示す。

このデータから、表面下法線の分布を解析することで、多重法線構造物体の表面下構造の複雑さを表現する。入力として、ガウス分布の個数や共分散行列の制限を設定する必要があり、ガウス分布の個数は 1~7 と定める。また、共分散行列の制限を以下のように定める。

- spherical : 共分散行列が対角成分に制限され、その両者が等しくなる
- diag : 共分散行列が対角成分に制限される
- full : それ以外

BIC スコアによって選択されたパラメータで表される混合ガウス分布を図 14 に示す。また、このときの混合ガウス分布の個数の 25 画素での平均と標準偏差を表 3 に示す。各ガウス分布の共分散行列の値を見ることで、各分布の広がりが見える。例えば、 $\sigma_{xx}$  が大きければ大きいほど  $x$  軸方向への広がりが大きく、 $\sigma_{yy}$  が大きければ大きいほど  $y$  軸方向への広がり大きい。加飾フィルムは、ガウス分布の構成数によって共分散の値も異なるので、構成数ごとに抜粋して表 4 に示す。 $k$  個目の共分散の値を  $(\sigma_{xx}^k, \sigma_{yy}^k)$  と表すことにする。

ガウス分布の個数の標準偏差を見てわかるように、加飾フィルムはガウス分布の構成数が画素間で一定でないことがわかる。また、構成数が同じでも、その分布の広がりには異なり、その構造の複雑さが分かる。表面下の法線分布を混合ガウス分布で表現することで、表面下の金属粒子の法線の散らばりを定量化することができる。

## 6. おわりに

本論文では、加飾フィルムなどの多重法線構造物体を対象とし、表面と表面下の反射に着目し、表面下の微粒子などの鏡面反射を混合ガウス分布を用いて表すことで、複雑な表面状態を定量的に表現できる多重法線反射モデルを提案した。また、計測結果からモデルに当てはめ、反射成分を分離することでモデルの妥当性について述べた。その結果、反射成分の分離が一部正確にできておらず、計測方法を見直す必要があると考えられる。また、推定した表面下反射から表面下法線分布を混合ガウス分布に当てはめることで、その複雑な表面状態を定量化することができた。

今後は、このモデルに基づいて CG レンダリングに拡張することも検討している。CG レンダリングによって、車の塗装面などのサンプルを CG で表現でき、産業応用が期待できる。そのためにより詳細なモデル当てはめが必要のため、現状のキャリブレーションの問題を解決し、実用化を進めていく予定である。

## 謝辞

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端・次世代研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

## 参考文献

- [1] 向川康博, 角野皓平, 八木康史, “楕円鏡とプロジェクタを用いた BRDF 計測のための照明の多重化”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), pp.295-301, Jul.2007.
- [2] M. Oren, S.K. Nayar, “Generalization of lambert’s reflectance model”, SIGGRAPH ’94, pp. 239-246, 1994.
- [3] B.T. Phong, “Illumination for computer generated pictures”, Commun. ACM, Vol. 18, No. 6, pp. 311-317, June 1975.
- [4] K.E. Torrance, E.M. Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces”, J. Opt. Soc. Am., Vol. 57, No. 9, pp. 1105-1112, Sep 1967.
- [5] J.F. Blinn, “Models of light reflection for computer synthesized pictures”, SIGGRAPH Comput. Graph., Vol. 11, No. 2, pp. 192-198, July 1977.
- [6] G.J. Ward, “Measuring and modeling anisotropic reflection”, SIGGRAPH Comput. Graph., Vol. 26, No. 2, pp. 265-272, July 1992.
- [7] P. Tan, S. Lin, L. Quan, “Resolution enhanced photometric stereo”, In Proc. European Conf. Computer Vision, pp. 58-71, 2006.
- [8] 馬場葉子, 向川康博, 八木康史, “散乱媒体内における物体の反射特性モデルの提案”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J95-D, No.2, pp.287-296, Feb. 2012.
- [9] 向川康博, コンピュータビジョン最先端ガイド 4, アドコム・メディア, 八木康史, 齊藤英雄編, 総ページ 156, 第 5 章「反射・散乱の計測とモデル化」, pp.121-150, ISBN978-4-915851-43-8, Dec. 2011.



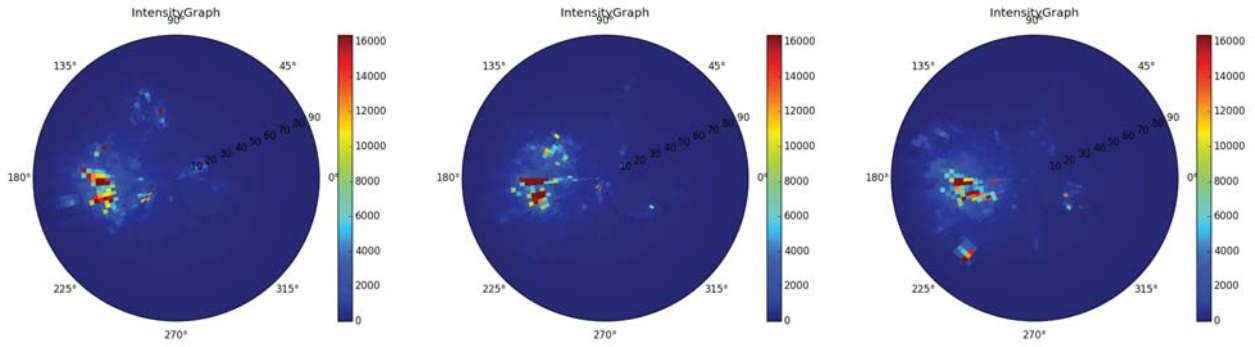


図 11 加飾フィルムの計測輝度値

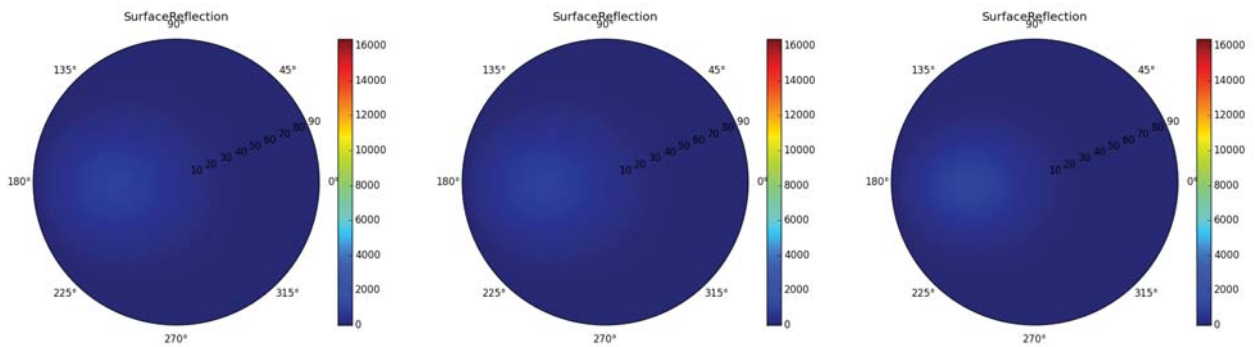


図 12 加飾フィルムの表面反射成分

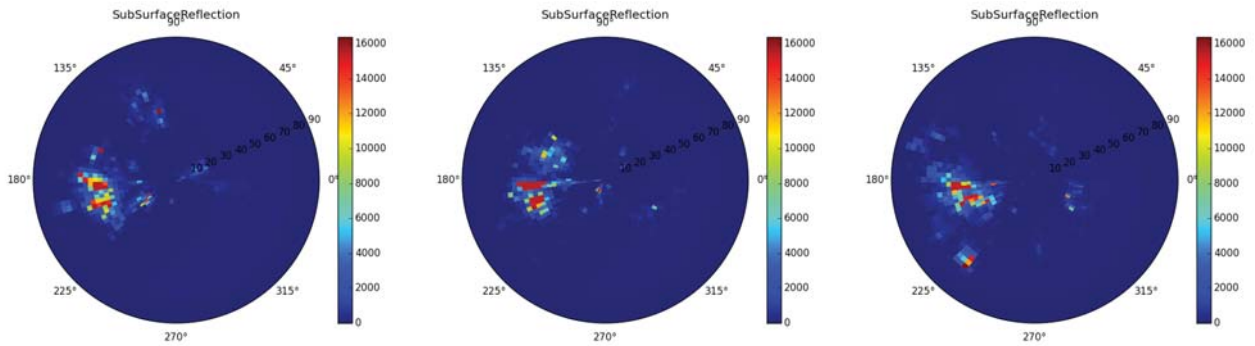


図 13 加飾フィルムの表面下反射成分

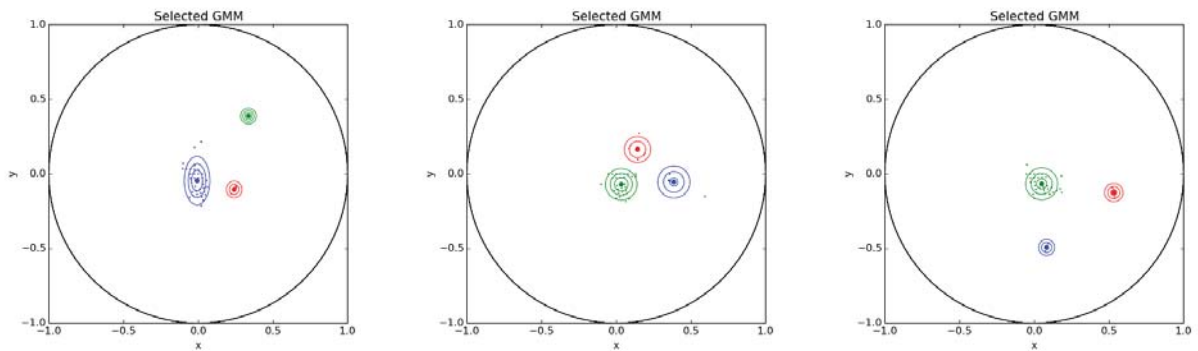


図 14 加飾フィルムの表面下法線の混合ガウス分布