

## 3次元反射モデルの解析と推定

田中法博<sup>†</sup> 富永昌治<sup>†</sup>

3次元光反射モデルを解析して、モデルパラメータを推定する手法を述べる。物体表面の材質は非金属の不均質誘電体を仮定し、3次元反射モデルとしては Torrance-Sparrow モデルを採用する。まず、モデルの妥当性を実験的に調べる。このために三次元変角光度計による反射率データに Torrance-Sparrow モデルを適合させ、最適な適合に必要な成分項とモデルパラメータを決定する。この結果、Torrance-Sparrow モデルは Phong モデルよりも鏡面反射の部分で実測値への適合がかなり優れ、またフレネル反射率の項も無視できないことが分かる。さらに Torrance-Sparrow モデルを使って物体の屈折率が推定できることを示す。次に、CCD カメラによるカラー画像から Torrance-Sparrow モデルを推定する方法を提案する。校正した撮影系から得られた対象物体のカラー画像 1 枚からパラメータを推定する。物体色や光源色に関する色成分パラメータはカラーヒストグラムの解析から求めることができる。表面粗さパラメータの推定のために、鏡面ピークの近傍の輝度画像と反射率分布図を用いるアルゴリズムを提示する。最後に、推定したパラメータで CG 画像を生成して総合的な妥当性を視覚的に確認する。

### Analysis and Estimation of a Three-Dimensional Reflection Model

NORIHIRO TANAKA<sup>†</sup> and SHOJI TOMINAGA<sup>†</sup>

A method is described for analyzing a three-dimensional reflection model and estimating the model parameters. An object surface is assumed to be composed of non-conducting materials called inhomogeneous dielectric materials, and the Torrance-Sparrow model is used as the three-dimensional reflection model. First, we examine the validity of the model. The model is fitted to the reflectance data measured by a gonio-photo meter. We determine the components and parameters needed for the best fitting. It is shown that the Torrance-Sparrow model is much better than the Phong model in fitting at the specular reflection, and the Fresnel reflectance term can not be neglected. The index of refraction of an object can also be estimated using the model. Next, we propose algorithms for estimating the Torrance-Sparrow model from a color image by a CCD camera. The model parameters are estimated using a color image acquired by a calibrated imaging system. Color parameters are then determined on the color histogram analysis. Moreover to estimate the surface roughness parameter, we present an algorithm using a reflectance map and a brightness image for the specular reflection. Finally, CG images are generated with the estimated parameters in order to visually confirm the feasibility of the proposed method.

#### 1. はじめに

3次元光反射モデルはコンピュータグラフィックスで重要な役割を果たすとともに、コンピュータビジョンの分野でも物体を認識するうえで有用な道具となっている。反射モデルは物体表面の反射特性を記述し、物体の色の見えや質感を決定する。したがって反射モデルは物体表面の材質に依存する。物体表面が不均質誘電体で構成されているとすれば、反射モデルは2色性反射の特性を持つことになる<sup>1)</sup>。一般に知られる3次

元光反射モデルとして、Phong モデル<sup>2)</sup> や Torrance-Sparrow モデル<sup>3)</sup> があげられる。これらの反射モデルを実用する際には、次のような2つの問題を考慮する必要がある。

まず第1はモデルの妥当性の問題で、使用する反射モデルが現実の物体の反射特性にどの程度適合しているかを調べる必要がある。光反射の過程は物理的に複雑であり、その詳細なモデル化には、考慮すべき項目が多くなって、一般にはパラメータを多く含む数学的に複雑なモデルにならざるをえない。しかし実用的なモデルはあくまでも実測データに基づいて採用されるべきである。

第2は反射モデルのパラメータを決定する問題である。反射モデルに含まれるパラメータの値を厳密に定

<sup>†</sup> 大阪電気通信大学総合情報学部情報工学科

Department of Engineering Informatics, Faculty of Information and Computer Sciences, Osaka Electro-Communication University

めることは容易でない．コンピュータグラフィックスでは，物体の画像を生成しつつ試行錯誤でパラメータの値を決めたり，反射特性から経験的に決めることが多かった．つまり実測データに基づいていなかった．そこで最近では，物体を撮影した画像を用いて反射モデルのパラメータを推定する研究がさかんになってきた．カメラデータから反射モデルパラメータを推定するには，物体表面の色情報と幾何学的情報が必要である．特に，物体表面の形状・法線といった幾何学的情報の取得する手法として，これまで (1) レンジファインダを用いて物体形状を知る<sup>4)</sup>，(2) 物体形状を円筒や球のように限定する<sup>5),6)</sup>，(3) 光源とカメラの位置関係を変えて複数の画像を獲得する<sup>7)</sup>，などの手法が提案されている．

さて本論文では，まず反射モデルの妥当性を実験的に検証する．物体表面の材質を非金属の不均質誘電体と仮定し，3次元反射モデルとして Torrance-Sparrow モデルを採用する．この反射モデルを構成する関数とパラメータを吟味し，実測データに適合する主要関数とパラメータを決める．そして他のモデルとの比較も行う．

次に，第2の問題の解法として，1枚のカラー画像から Torrance-Sparrow モデルのパラメータを推定する方法を提案する．対象物体の前提条件として次の3点を仮定する．(1) ハイライトが生じること，(2) ハイライトの周辺で表面の法線が滑らかに変化していること，(3) 表面にテクスチャがなく表面状態と物体色は均一であること．このような条件の下で，物体の色，照明光源の色，表面の粗さ，拡散成分と鏡面成分の比率などの物理パラメータを推定する．この方法の最大の特徴は1枚の画像のみから反射モデルを決定できるという計測系の簡便さである．

以下では，まず2章で分光光度計の計測データに基づいて Torrance-Sparrow モデルの妥当性を調べる．3章で物体の撮影環境を述べる．4章でカラー画像のヒストグラム解析から物体色，光源色，拡散/鏡面比のパラメータを求める．表面の粗さについては物体の法線ベクトルの推定をともなうので，5章で輝度画像と反射率分布図を利用したアルゴリズムを提案する．6章では，推定の実験結果を示し，推定したパラメータにより物体のカラー画像を生成して視覚的な評価をする．

## 2. 反射モデルの検証

一般に知られている代表的な光反射モデルとして，Phong モデルはプラスチックなどの不均質誘電体物

体に利用でき，Torrance-Sparrow モデルは金属物体にも適用できることが知られている．通常 Torrance-Sparrow モデルの方が物理的記述が詳細で，現実の物体表面の反射率との適合性も高いといわれる．反面，考慮すべき項目数が多くて，モデル推定の立場から簡略化したモデルが利用されることが多い<sup>4),7)</sup>．ここでは三次元変角分光光度計を用いてサンプル物体を3次元計測し，得られた3次元反射率のデータに Torrance-Sparrow モデルを適合させた．そして適合に必要な成分項とモデルパラメータを決定した．

### 2.1 反射モデルの記述

図1に本研究で使用した反射の幾何学モデルを示す．Torrance-Sparrow モデルでは完全鏡面の微小面 (facet) の分布を考慮している．ここではこのような微小面は画素サイズに比べて十分小さく，観測できる物体表面の法線は微小面の法線ではなく，グローバルな面法線と仮定する．これを  $N$  と記す． $L$  と  $V$  は，それぞれ，光源と視覚系を向く単位方向ベクトルで， $H$  は，それらの2等分線である． $\theta_i$  を入射角， $\theta_r$  を受光角とする．さらに  $\rho$  は  $N$  と  $H$  のなす角である．

Torrance-Sparrow モデルに基づいて，物体表面からの反射光の分光放射輝度分布  $Y(\lambda)$  を波長  $\lambda$  の関数で次式のように記述する．

$$Y(\lambda) = \alpha \cos(\theta_i) S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(\theta_i, n(\lambda), k(\lambda)) D(\rho)}{\cos(\theta_r)} E(\lambda) \quad (1)$$

上式右辺第1項は拡散反射成分で，第2項は鏡面反射成分である． $\alpha$  と  $\beta$  はその重み係数である．拡散反射成分の  $S(\lambda)$  は物体色を生成する分光反射率， $E(\lambda)$  は照明光の分光分布である．第2項の鏡面反射成分はフレネル反射率と表面状態を表す関数からなる．

まず  $D$  は鏡面の微小面の向きを表す分布関数である．これで  $H$  の方向を向く微小面の割合が定まる．分布関数としてグローバルな面法線を中心とする一次元の対称関数として次式のようなガウス関数を仮定した．

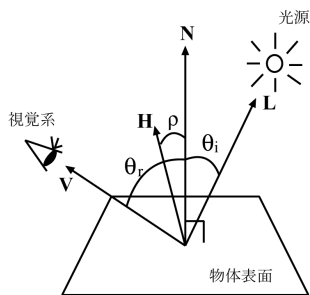


図1 反射の幾何学モデル

Fig. 1 Geometric model of reflection.

$$D(\rho) = \exp\{-\ln(2)\rho^2/\gamma^2\} \quad (2)$$

この項が物体表面の粗さを表す指標となる．シャープな関数はなめらかな表面を意味する． $\gamma$  は定数で， $D(\rho)$  の値が  $1/2$  に落ちる角度を意味し，したがって鏡面反射の鋭さを表す．

$F$  は物体表面のフレネル反射率を示す．この項は一般には入射角のみならず，屈折率  $n(\lambda)$  と吸収係数  $k(\lambda)$  の関数である．現実の物体では屈折率や吸収係数が既知であることは少ない．ただ不均質誘電体の場合は，吸収係数  $k(\lambda)$  を波長に関係なく  $0$  と仮定でき，屈折率  $n(\lambda)$  の波長による変化も少ない<sup>(8),9)</sup>．これより屈折率を波長に依存しない定数  $n$  とし，吸収係数はつねに  $0$  と仮定することにした．フレネル反射率は，入射角  $\theta_i$  と屈折率  $n$  の関数として次式のように記述できる．

$$F(\theta_i, n(\lambda), k(\lambda)) = F(\theta_i, n) \\ = \frac{1}{2} \frac{(g - \cos(\theta_i))^2}{(g + \cos(\theta_i))^2} \\ \cdot \left\{ 1 + \frac{[\cos(\theta_i)(g + \cos(\theta_i)) - 1]^2}{[\cos(\theta_i)(g - \cos(\theta_i)) + 1]^2} \right\} \quad (3)$$

ただし， $g^2 = n^2 + \cos^2(\theta_i) - 1$  である．

なお元の Torrance-Sparrow モデルでは鏡面の微小面が互いをマスクする遮蔽係数が考慮されているが，本研究の計測環境でこの効果は非常に少ないと判断して遮蔽係数を無視した．

## 2.2 分光光度計による反射率計測

分光光度計の一般的な機能として，任意の入射角と受光角において，分光放射輝度率 (spectral radiance factor) を計測することができる．分光放射輝度率とは，対象物体と基準白色の完全拡散物体のそれぞれの分光放射輝度の比として定義される．この際，基準の完全拡散物体はすべての入射角，反射角において対象物体と同一条件で計測される．完全拡散物体の分光放射輝度  $Y_R(\lambda)$  は式 (1) の拡散成分において  $S(\lambda) = 1$  に対応するので

$$Y_R(\lambda) = \alpha \cos(\theta_i) E(\lambda) \quad (4)$$

と書ける．実際に計測される分光放射輝度率  $r(\lambda)$  は式 (1) と式 (4) の比として次式のように表される，

$$r(\lambda) = \frac{Y(\lambda)}{Y_R(\lambda)} = S(\lambda) + \beta' \frac{F(\theta_i, n) D(\rho)}{\cos(\theta_i) \cos(\theta_r)} \quad (5)$$

ここで  $\beta'$  は鏡面成分の係数  $\beta' = \beta/\alpha$  である．つまり対象物体の分光反射率  $S(\lambda)$  は反射率  $1$  の完全拡散体との比較で得られる．

## 2.3 計測データへの適合

三次元分光光度計 (村上色彩, GSP-2) を用いて，プラスチック物体の反射率計測を行った．入射角は  $10$

度から  $60$  度の範囲で  $5$  度間隔に変化させ，また各入射角において受光角は  $-70$  度から  $+70$  度の範囲で  $5$  度間隔で変化させた．ただし鏡面ハイライト周辺の精度を高めるために，鏡面ピークの  $-10$  度から  $+10$  度の範囲では  $0.1$  度間隔で受光角を変えた．すなわち  $1$  つの入射角に対して  $225$  の分光放射輝度率を求めた．分光情報は波長を  $10$  nm おきに  $31$  次元で表示した．

分光光度計による鏡面ピークの計測値は黒ガラスで較正されている．測定器の開き角は光源側で約  $2$  度，受光側で約  $1.5$  度である．本研究で使用する計測サンプルでは鏡面反射の幅は半値幅で  $20$  度以上と広いので，開き角の影響で鏡面反射がなまることは少ない．つまり鏡面反射の広がりには物体表面の粗さに大きく依存する．

### (1) 拡散と鏡面の分離

図 2 は計測結果の一例である．黄色のプラスチック板を入射角  $30$  度とし，さまざまな受光角で計測された分光反射率の分布を表す．図 2 でみられるように，受光角を変化させるとき，拡散反射成分は一定値をとり，鏡面反射成分は受光角が入射角と一致する鏡面角度付近のみで顕著になる．したがって，拡散反射成分をバイアス項として，計測した反射率を拡散反射  $S(\lambda)$  と鏡面反射の両成分に分離できる．

### (2) 鏡面係数の推定

完全鏡面となる角度  $\theta_r = \theta_i$  において，鏡面の反射成分は波長に依存せず

$$r_S = \beta' F(\theta_i, n) / \cos^2(\theta_i) \quad (6)$$

と記述できる．つまり鏡面ピークの強さ (高さ)  $r_S$  は屈折率  $n$  と鏡面係数  $\beta'$  をパラメータとする入射角の関数となる．ただし  $\beta'$  は，単純なゲイン係数であるが， $n$  は複雑な非線形の影響を  $r_S$  に与える．この特徴を利用して  $\beta'$  と  $n$  を推定する．

さて反射モデルで鏡面係数  $\beta'$  ( $= \beta/\alpha$ ) は物体表面

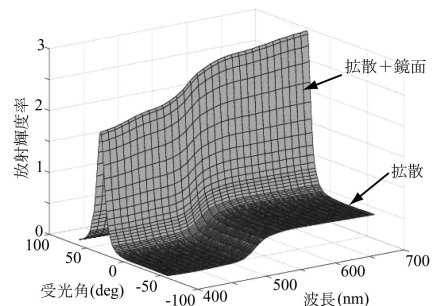


図 2 黄色のプラスチック板から計測された分光反射率分布の例  
Fig. 2 Example of the spectral reflectance distribution measured from a yellow plastic plate.

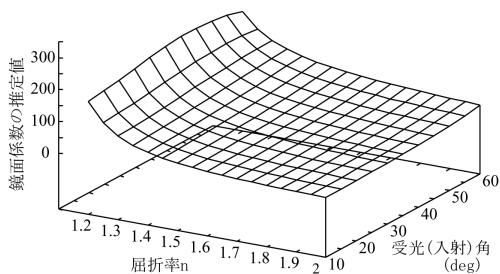


図 3 異なった屈折率に対して推定した鏡面係数の例

Fig. 3 Example of the estimated specular reflection coefficient for different values of the index of refraction.

に固有で、入射角に依存しない定数である。実際、屈折率を適当に設定して、 $\beta' = r_S \cos^2(\theta_i) / F(\theta_i, n)$  から鏡面係数を推定でき、この推定値は  $\theta_i$  にほとんど依存しないことが実験的に確認できる。図 3 に異なった屈折率を仮定したときの鏡面係数の推定例を示す。材料は図 2 と同じ黄色のプラスチックである。受光（入射）角の比較的小さい領域では  $\beta'$  はほぼ一定値をとることが分かる。そこで本論文では、まず異なった屈折率  $n$  に対して小さい角度における  $\beta'$  の推定値を求め、その候補集合を作る。次に以下の 3 章に述べた手順で推定した屈折率を用いて、それに対応するユニークな  $\beta'$  の推定値を決定する。

### (3) 屈折率の推定

不均質誘電体の屈折率はおおよそ 1.3 から 1.7 の間であると推測できる<sup>10)</sup>。そこでまず、屈折率  $n$  の値を可能性のある範囲で変化させ、各  $n$  の値に対して上述のように鏡面係数を推定して  $\hat{\beta}'$  とする。このとき鏡面反射成分のピークの強度  $r_S$  は式 (6) から  $\theta_i$  の関数である。次に、 $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots$  の実測データから得られる鏡面ピークを各  $n$  の値において適合した残差を次式で求める。

$$e_n = \sum_j (r_{Sj} - \hat{\beta}' F(\theta_{ij}, n) / \cos^2(\theta_{ij}))^2 \quad (7)$$

最後に  $e_n$  が最小となる  $n$  の値を屈折率の推定値とする。

### (4) 表面粗さの推定

物体の表面粗さを表すのは分布関数  $D$  のパラメータ  $\gamma$  である。本論文では、 $\gamma$  の推定に鏡面反射ピークにおける反射率の形状を用いた（図 4 参照）。図 4 はピーク付近の形状を描く。ただし、計測した分光反射率を拡散成分と鏡面成分に分離し、鏡面成分に対して波長の可視域 400 ~ 700 nm で平均している。さてピークの  $1/2$  の高さを半値位置と呼び、ここでパラメータを決定する。半値位置では次式が成立する。

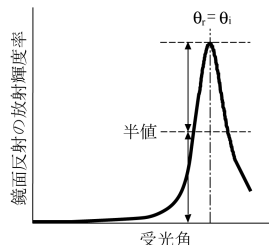


図 4 鏡面ピーク付近の反射率の形状

Fig. 4 Shape of reflectance around the specular peak.

$$H \exp \left\{ -\ln(2) \frac{\rho^2}{\gamma^2} \right\} = \frac{1}{2} P \quad (8)$$

ただし、 $H = F_h / \{\cos(\theta_{ih}) \cos(\theta_{rh})\}$ 、 $P = F_p / \{\cos(\theta_{ip}) \cos(\theta_{rp})\}$  と定義した。ここで  $F_h$  は半値位置でのフレネル反射率を、 $F_p$  は鏡面ピークでの同反射率を意味する。また  $\theta_{ip} = \theta_{rp} = \theta_{ih}$  が成立する。上式を  $\gamma$  について解くと、表面粗さは次式で推定できる。

$$\gamma = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \ln(H/P) / \ln(2)}} \quad (9)$$

### (5) 実験結果

図 5、図 6 に図 2 と同じ黄色のプラスチックに対するモデルの適合結果を示す。まず図 5 は各入射角における鏡面ピークの強さを、 $n$  をパラメータとして描いている。ただし  $\beta'$  を基準化して  $\theta_i = 10$  (deg) でピークを一致させている。このような適合から屈折率は  $n = 1.45$  と推定した。

図 6 にこのときの精度を示し、また他のモデルとの比較を示す。推定した  $n$  を持つモデル（破線）と計測値（実線）はかなりよく一致している。これに対して点線はフレネル反射率の項を無視して、フレネル反射率をつねに 1 とした場合の結果である。さらに一点鎖線は Phong モデルを用いて適合した結果を描いている。

Phong モデルでは輝度率の鏡面反射成分は  $\beta' \cos^m(\rho') / \cos(\theta_i)$  と記述される。ここで  $m$  は表面粗さを表す指数であり、 $\rho'$  は光源の反射ベクトルと視線ベクトルのなす角で、本計測では  $\theta_r - \theta_i$  で求まる（ $\rho$  とは異なる）。指数  $m$  の推定には、各入射角において鏡面反射のピークの半値を用いた。半値位置における角度  $\rho'$  から指数  $m$  は  $m = -\ln(2) / \ln\{\cos(\rho')\}$  で推定できる。なお  $\beta'$  は入射角に依存する。モデルの比較をするために、 $\beta'$  を基準化して  $\theta_i = 10$  (deg) でピークを一致させている。このように図 6 の比較から、Phong モデルは鏡面反射への適合性が悪く、また Torrance-Sparrow モデルではフレネル反射率の項を

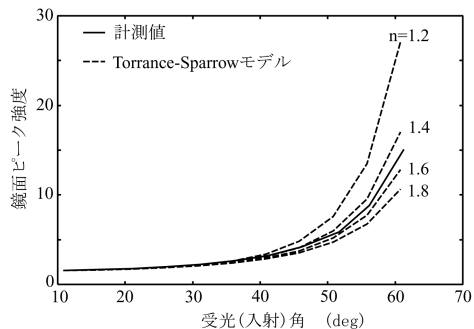


図 5 屈折率を変化させたときの鏡面ピークの強さ  
Fig. 5 Intensity of specular peak as the index of refraction changes.

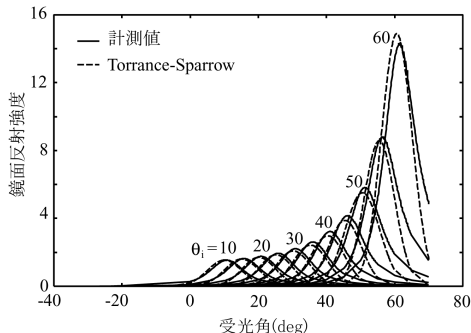


図 7 鏡面反射全体に対するモデル適合の結果  
Fig. 7 Results of model fitting to the whole specular reflection.

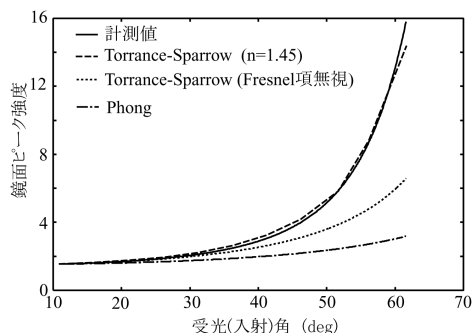


図 6 鏡面ピークにおけるモデル適合の精度  
Fig. 6 Accuracy of model fitting at specular peak.

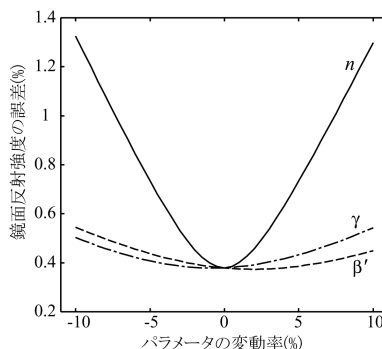


図 8 推定パラメータの変動と鏡面反射の適合誤差との関係  
Fig. 8 Relationship between variation of the estimated parameters and the fitting error on specular reflection.

無視できないことが分かる。

なお Torrance-Sparrow モデルでは鏡面係数は  $\beta' = 48$  , 表面粗さは  $\gamma = 0.045$  (radian) と推定した。図 7 は、鏡面反射の全体の形状について、推定したパラメータを用いた Torrance-Sparrow モデルと計測値との比較を示す。受光角が大きいところを除いて、モデルによる予測値と計測値がよく適合していることが分かる。このようにフレネル反射率を含む Torrance-Sparrow モデルは妥当であると結論できる。

さらに、得られたパラメータの推定値 ( $n = 1.45$  ,  $\beta' = 48$  ,  $\gamma = 0.045$ ) がどの程度正確なら図 7 のような一致が得られるかを調べた。すなわち推定値に誤差が含まれるとし、この誤差が輝度率との一致をどの程度劣化させるかを調べた。具体的には、各推定値を  $\hat{n} = n + \Delta n$  ,  $\hat{\beta}' = \beta' + \Delta \beta'$  ,  $\hat{\gamma} = \gamma + \Delta \gamma$  のように変化させるとき、図 7 に示した鏡面反射強度の適合の劣化を算出した。図 8 は各推定値を  $\pm 10\%$  の範囲で変化させたときの鏡面反射強度の適合誤差を % で表示している。3 種類の曲線は、 $\hat{n}$  ,  $\hat{\beta}'$  ,  $\hat{\gamma}$  それぞれの変化に対応し、予測した鏡面反射強度  $\hat{r}$  と計測値  $r$  の残差 ( $r - \hat{r}$ ) を入射角  $\theta_i = 10, 20, 30, \dots, 60$  の範囲

で平均化したものをプロットしている。これより  $n$  ,  $\beta'$  ,  $\gamma$  の値がたとえ 5% 変動したとしても、鏡面反射強度は 1% 以内の誤差となるだけで、適合精度は大きく影響せず、推定値は安定しているといえる。さらに 3 つのパラメータのうちで  $n$  の感度が最も高く、他の 2 つと比べて高い推定精度を要求することが分かった。

### 3. カラー画像の計測系

#### 3.1 カメラシステム

カラーカメラシステムはモノクロ CCD カメラ (SONY model XC-75) , 標準レンズ (Nikon Nikkor 35 mm F1.4S) , RGB フィルタ (Kodak ラッテンフィルタ) およびパソコンからなる。カメラからの映像信号は 10 ビットで AD 変換され、RGB 各画像は 1024 レベルのデジタル画像として表現される。図 9 はカメラによる撮影風景である。カメラは XY ステージ (シグマ光機  $\Sigma$ -212PS) 上に設置しており、較正のためのカメラの位置あわせを厳密にした。

#### 3.2 計測と較正

対象物体は一樣な物体色を持つ不均質誘電体で、表

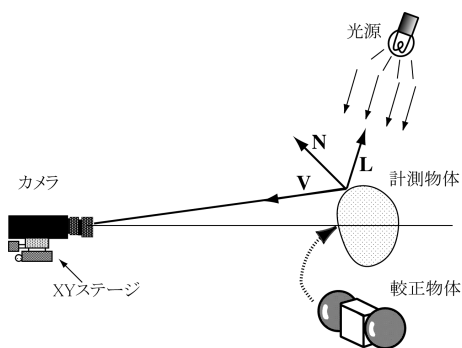


図 9 推定パラメータの変動と鏡面反射の適合誤差との関係

Fig. 9 Relationship between variation of the estimated parameters and the fitting error on specular reflection.

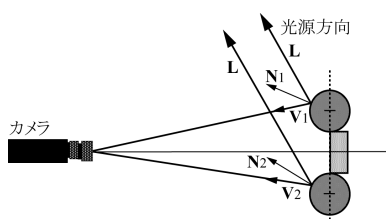


図 10 較正用物体の計測風景

Fig. 10 Scene of measuring a calibration object.

面形状は滑らかな自由曲面である。暗室内の黒い布で覆ったテーブル上で物体を計測する。光源は白熱電球 (300 W) で、その照明光を平行ビームにするために写真撮影用のフラッドタイプの電球を物体から 1.5~2.0 m 離して配置した。CCD カメラは物体から 2.0~2.5 m の距離である。

さて照明ビームの方向を較正用物体を用いてあらかじめ求めた。較正用物体は、鏡面の真球と考えられるビリヤード球 2 個と精密に加工された金属製の直方体 1 個からなる。これを計測物体と同一場所に配置する。図 10 は較正用物体の計測風景である。球はその表面上の鋭い鏡面反射から光源方向を求めるために使用し、直方体はカメラの焦点位置から球の中心までの距離を求めるために用いた。

処理手順は次のとおりである。まず、カメラ較正でカメラパラメータを求め、射影行列を決定する<sup>11)</sup>。これによって計測画像から較正用物体の 3 次元座標が分かる。次に、画像上の鏡面反射のピークから球面上の鏡面反射点の座標が分かり、これより光源方向のベクトルが算出できる。なお実際には 2 つの球それぞれについて光源方向を求め、これらの平均値を採用した。

画像データから色ベクトルを推定する際、現実の色と矛盾しないように、RGB センサの元データをホワイトバランスをとったデータに変換した。本論文で

は特に RGB 各チャンネルの感度が一定になるようにし、分光分布が一定値をとる理想的な光源に対して、 $R=G=B$  の白色となるようにバランスした。

### 3.3 カラー反射モデル

カラー画像から物体の反射特性を求めるために、反射モデルをカメラ出力の RGB 値で記述する。3 次元色ベクトルの Torrance-Sparrow モデルは

$$c = \alpha \cos(\theta_i) c_d + \beta \frac{F(\theta_i, n) \exp\{-\ln(2)(\rho^2/\gamma^2)\}}{\cos(\theta_r)} e \quad (10)$$

で記述される。上式右辺第 1 項は拡散反射成分で、第 2 項は鏡面反射成分である。 $c_d$  は物体色ベクトル、 $e$  は光源色ベクトルを表す。その他の関数とパラメータの説明は式 (1) の分光関数モデルと同様である。

前章の結果でフレネル反射率の項は無視できないことが分かった。一般に不均質誘電体の屈折率の材質による変化は金属ほど大きくなく、屈折率の値はおおよそ接近している。そこで分光光度計の計測データから求めた屈折率の推定値を式 (10) のカラー反射モデルで  $n$  の値として用いた。

したがって、画像から推定すべき反射モデルのパラメータは物体色ベクトル  $c_d$ 、光源色ベクトル  $e$ 、係数  $\alpha$ 、 $\beta$  および表面粗さ  $\gamma$  である。ここで光源色はあらかじめ較正した基準白色サンプルを用いて推定することも可能である。しかし本研究ではこのような間接的な手法をとらず、対象物体の鏡面反射から直接推定する方法を提案する。

## 4. 色成分パラメータの推定法

推定すべきパラメータのうちで物体色、光源色、係数  $\alpha$ 、 $\beta$  は表面状態に依存せず、おもに反射の色成分に関係しており、計測画像のカラーヒストグラムを解析することによってこれらを推定することができる。なお基準白色を用いないので絶対的な色ベクトルを求めることができず、 $\|c_d\| = \|e\| = 1$  のように正規化して求める。

### 4.1 カラーヒストグラムの特徴

図 11 は黄色のプラスチック物体の計測画像から得られた RGB 空間での画素の分布、すなわちカラーヒストグラムである。ヒストグラムはマットクラスタとハイライトクラスタの 2 つの線形クラスタが結合した形をなす。原点から伸びているクラスタは拡散反射成分によるもので、物体色のベクトル方向に一致する。物体色のクラスタから枝分かれしているハイライトクラスタは鏡面反射成分によるものである。マットクラスタは直線的であるが、ハイライトクラスタは一般に

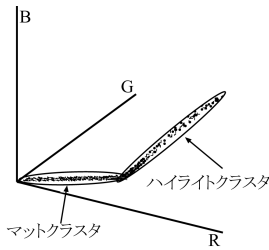


図 11 RGB 空間でのカラーヒストグラム  
Fig. 11 Color histogram in a RGB space.

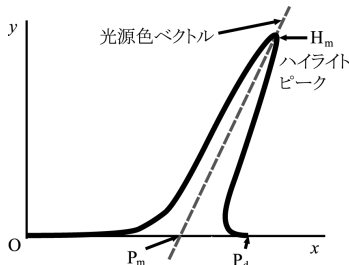


図 12 色信号平面上に射影したヒストグラムの形  
Fig. 12 Histogram shape projected on the color-signal plane.

広がりを持つ。

このように 2 色性反射の性質から画素は物体色ベクトルと光源色ベクトルで張る平面上に分布する。この平面を色信号平面と呼び、これに射影したヒストグラムから色成分のパラメータを効率良く推定することができる。

#### 4.2 物体色の推定

我々は以前、カラーヒストグラムが 2 つの直線的なクラスタからなるとき、その特徴を利用して物体色と光源色を分離して推定するアルゴリズムを提案した<sup>12)</sup>。これはクラスタの主成分の直線を反復的に抽出するという手法に基づいている。ここでは、このアルゴリズムを適用し、マツクラスタの主成分ベクトルを物体色ベクトル  $c_d$  として推定した。

さてカラーヒストグラムを色信号平面上に射影し、推定した物体色ベクトルで基準化すれば、ヒストグラムの形状は図 12 のように描ける。ここで物体色ベクトルは  $x$  軸に一致し、 $P_d$  はマツクラスタの最大位置とする。この位置は拡散反射成分の最大点を意味する。つまり原点  $O$  と  $P_d$  を結ぶ線分  $\overline{OP_d}$  は  $\alpha c_d$  に対応する。これより係数  $\alpha$  が求まる。

#### 4.3 光源色の推定

対象物体の表面に現れる鏡面ハイライトを利用する。まずハイライトのピーク位置での法線ベクトル  $N_p$  は

$$N_p = (\mathbf{L} + \mathbf{V})/2 \quad (11)$$

より求まる。次に表面のハイライト位置における拡散反射成分の大きさを求める。図 12 のヒストグラムの  $x$  軸上の点  $P_m$  はこの大きさを表す点である。このとき線分  $\overline{OP_m}$  は次式で求まる。

$$\overline{OP_m} = \overline{OP_d} (N_p \cdot \mathbf{L}) \quad (12)$$

点  $P_m$  は  $x$  軸上にあるので鏡面成分はまったく含まない色座標である。一方、点  $H_m$  は鏡面成分の最大点である。 $P_m$  と  $H_m$  は空間的に同じ点である。それゆえ線分  $\overline{P_m H_m}$  は鏡面反射ベクトルの方向を指示する。この方向ベクトルを RGB 空間に復元すれば  $\mathbf{e}$  が得られる。なお、線分  $\overline{P_m H_m}$  の長さは次式で表される。

$$\overline{P_m H_m} = \beta F / (N_p \cdot \mathbf{V}) \quad (13)$$

鏡面ピーク位置での  $F$  の値は算出できるので、係数  $\beta$  の値は式 (13) から推定することができる。

### 5. 表面粗さパラメータの推定法

物体の表面粗さを推定するには、鏡面反射成分の変動をつかむ必要がある。つまり鏡面ピーク点から離れるにつれて鏡面成分が減少するが、この割合を求めればよい。ここでは以前と同様にガウス関数の特徴を利用して、鏡面反射成分がピークの 1/2 となる半値位置を見つける。実際には半値位置の 3 次元座標は必要なく、法線ベクトルのみが分かればよいことになる。

しかし、このような法線情報を 1 枚のカラー画像のみから求めることは、色情報しか手がかりがないため困難になる。つまり面の傾きの自由度が 2 であるのに対して、色情報はこのとき輝度と同じで 1 自由度しか持たないため、一般的には面の傾きを求めることができない。

この問題を解決するために、我々は拡散反射のみの成分画像と反射率分布図を用いることにより物体の法線情報を推定することを提案する。これは、物体の法線ベクトルが連続的に変化するという拘束条件を与えることにより、法線が既知の初期地点から連続的に法線を求めていくというものである。まず初期値は鏡面ピーク位置での法線で、すでに推定できている。この初期値から 2 種類のデータを反復的に探索しつつ、鏡面成分が半分になる位置での法線を求める。

この手法をアルゴリズム面からみれば、Shape from Shading 問題を解くための手法と同じである<sup>13)</sup>。しかし Shape from Shading 問題はノイズの影響で初期値から離れると誤差が大きくなるという難しさがある。これに対して、本推定問題は形状復元とは本質的に異なり、鏡面ピーク付近のきわめて狭い範囲のみで法線推定が行えればよい。つまりノイズの影響をあまり受

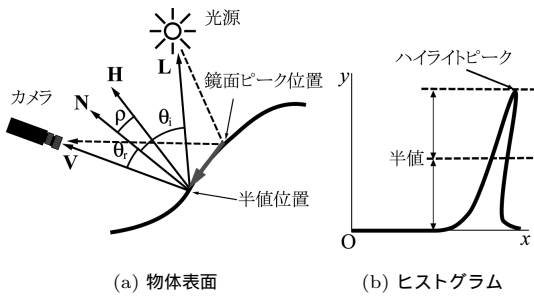


図 13 鏡面ピークと半値位置の関係

Fig. 13 Relationship between the specular peak and the half-maximum point.

けないのが利点である。

### 5.1 表面粗さと面法線の関係

鏡面ピークの半値位置で満足されるべき関係式を導く。図 13 は鏡面ピークと半値位置の関係を示している。鏡面ピークの近くの半値位置における面法線  $N$  が推定できれば、角度  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\rho$  が分かり、これより表面粗さは

$$\gamma = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \ln(H/P)/\ln(2)}} \quad (14)$$

で算出される。ここで  $H = F_h / \cos(\theta_{rh})$ ,  $P = F_p / \cos(\theta_{rp})$  である。 $F_h$  と  $F_p$  は、それぞれ、半値位置とピーク位置でのフレネル反射率である。なお式 (14) は式 (9) と同形であるが、2 章では放射輝度率を扱い、ここでは輝度を扱うので  $H$  と  $P$  の定義が異なることに注意する。

### 5.2 反射率分布図と輝度画像

カメラ方向を基準とした面の方向を表示する空間を勾配空間と呼ぶ。反射率分布図 (Reflectance map) はこの勾配空間で拡散反射成分の輝度の分布をプロットしたものである。勾配空間の座標を  $(p, q)$  とする。 $p$  と  $q$  は空間座標の  $X$  方向と  $Y$  方向に関する奥行き  $Z$  の傾きである。同様に照明方向を勾配空間で指定するために勾配ベクトルの記号  $(p_s, q_s)$  を用いる。このとき面の輝度分布は物体表面の勾配  $(p, q)$  の関数として次式で表現できる。

$$R(p, q) = \cos(\theta_i) = \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (15)$$

他方、輝度画像は計測画像の拡散反射成分から求める。計測画像から拡散反射成分のみを抽出するために、推定した物体色ベクトルと光源色ベクトルを用いて、 $(X, Y)$  における色ベクトルを

$$c(X, Y) = C_1(X, Y)c_d + C_2(X, Y)e \quad (16)$$

のように最小 2 乗法を使って分割する。このとき式

(16) 右辺第 1 項から拡散反射の成分画像が得られ、次式で正規化した輝度画像に変換される。

$$R(X, Y) = C_1(X, Y)/\alpha \quad (17)$$

### 5.3 法線の探索

反射率分布図と輝度画像の間で対応する点の関数値は同じである。反射率分布図と輝度画像から半値位置での  $X, Y, Z, p, q$  を推定する。これまでに反射率分布図と輝度画像との間に重要な関係が存在することが分かっている (たとえば文献 13) 参照)。5 つの変数  $X, Y, Z, p, q$  に対する解は次の 5 つの常微分方程式を解くことにより求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial \xi} &= R_p, \quad \frac{\partial Y}{\partial \xi} = R_q, \quad \frac{\partial Z}{\partial \xi} = pR_p + qR_q, \\ \frac{\partial p}{\partial \xi} &= B_X, \quad \frac{\partial q}{\partial \xi} = B_Y \end{aligned} \quad (18)$$

ここで  $(B_X, B_Y)$  は輝度画像における勾配で、 $(R_p, R_q)$  は反射率分布図の勾配である。 $(R_p, R_q)$  は表面の適当な曲面に沿って変動する。

式 (18) を数値計算で解くために、我々は Runge-Kutta 法を用いた。これは  $X, Y, Z, p, q$  の初期値から出発して反復的に解を求める。初期値は鏡面ピークである。 $(X, Y)$  の初期値は鏡面ピークの画素位置から求める。ただし  $Z$  はカメラから較正物体までの距離に対応させた。 $(p, q)$  の初期値は鏡面ピークの法線ベクトル  $N_p$  である。この反復アルゴリズムは半値位置に到達すれば探索を終了する。このときの  $(p, q)$  が法線ベクトルを与える。最後に式 (14) から表面粗さのパラメータが求まる。

## 6. 実験結果

### 6.1 自由形状物体を用いた検証実験

まず較正物体を用いて照明光源の方向を求め、 $L = [-0.704, -0.242, -0.668]$  を得た。図 14 は一般に市販されている緑色のトレイの計測画像である。白い直線で囲まれた部分を切り出して反射モデルのパラメータを推定した。図 15 はこの切り出し部分に対する色信号平面上でのカラーヒストグラムである。これより物体色と光源色は  $c_d = [0.472, 0.872, 0.127]$ ,  $e = [0.844, 0.494, 0.207]$  と推定した。係数は  $\alpha = 572$ ,  $\beta = 28132$  と推定した。

物体の表面粗さを求めるために、まず計測画像を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離した。図 16 (a) は拡散反射成分の画像で、(b) は鏡面反射成分の画像である。図 17 (a) は図 16 (a) の画像を等高線表示した輝度分布図である。また照明光の方向ベクトルに基づいて、図 17 (b) のような反射率分布図を作成した。



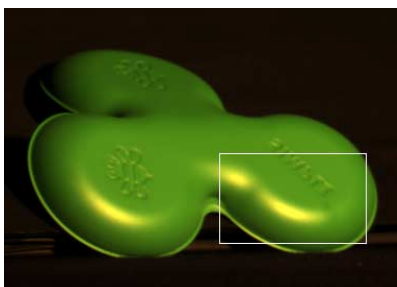


図 14 緑色のトレイの計測画像

Fig. 14 Measured image of a green tray.

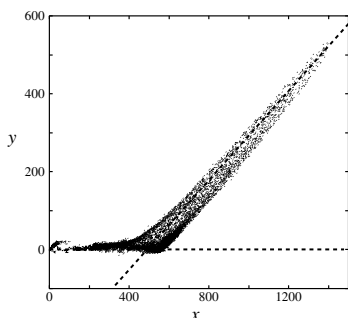
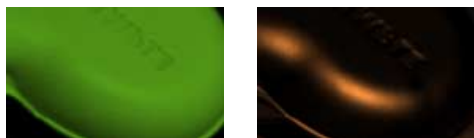


図 15 切り出された計測画像のヒストグラム

Fig. 15 Histogram of the measured image cut-out.



(a) 拡散成分

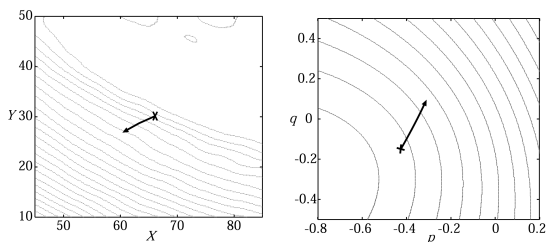
(b) 鏡面成分

図 16 拡散と鏡面反射の成分画像

Fig. 16 Component images for diffuse and specular reflection.

法線探索では Runge-Kutta 法で最急降下方向に探索する．画素サイズを 1 に，移動の増分を 0.1 にした．鏡面ピークの初期値から半値位置まで 760 ステップで探索が終了した．このときの探索経路を図 17 の実線で示した． $x$  印は初期値である．さらに図 18 に計測画像上での探索経路を描く．中心に鏡面ピークの出発点があり，これを囲む曲線がピークの半値位置を表す．出発点から左下方に至る半直線が探索経路である．表面粗さのパラメータは  $\gamma = 0.251$  (radian) と推定した．

ここで  $\gamma$  の推定に対して，光源の大きささとカメラの開口による広がりが影響を与えるかどうかを調べる．まず白熱電球の直径は約 10 cm，距離は約 2 m で，このとき光源の開き角は約 2.9 度になる． $\gamma$  の推定値が



(a) 輝度

(b) 反射率

図 17 輝度と反射率の分布図

Fig. 17 Brightness and reflectance map.

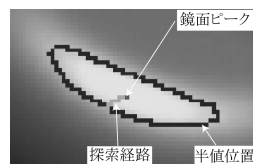


図 18 画像上での解の探索経路

Fig. 18 Trajectory of solution on the image.

ら物体表面の鏡面反射の半値幅は 50 度以上になるので，光源の開き角の影響は少ないといえる．次にカメラについては，解析領域は約 5 cm で，開き角は約 1.4 度になる．したがって，この開口の影響は光源のそれよりもさらに少ないと考えられる．

次に，推定したパラメータの妥当性をコンピュータグラフィックスで画像を生成し，視覚的に確認することにした．反射モデルパラメータの  $c_d, e, \alpha, \beta, \gamma$  の推定値を式 (10) に代入した．光源は平行光源，視線ベクトルは平行投影とし，照明方向も得られた推定値を用いた．なお，計測物体の形状データが必要になるので，レンジファインダでトレイの 3 次元データを別途獲得した．このようにして推定パラメータから生成したトレイの画像を図 19 に示す．図 14 と図 19 の比較から，トレイの色および質感が良好に再現できていることが分かる．

### 6.2 同一材料を用いた比較実験

さらに，2 章の分光光度計による実験で使用した材料と同じ材料から作ったもので，画像からパラメータ推定を行った．材料は同じ黄色のプラスチックシートで，これから直径 16 cm の円筒物体を作った．この円筒を縦に配置し，左約 40 度方向から白熱電球で照明した．図 20 はこの円筒を正面方向から撮影した画像で，白い直線で囲まれた部分を推定に使用した．自由形状と違って，円筒の場合，表面上の法線は探索することなく簡単に求まる（たとえば文献 5）参照）．そして式 (14) から表面粗さ  $\gamma$  を算出する．ただしハイライトピークの左右 2 個所の半値位置で  $\gamma$  を求め，これらの平均

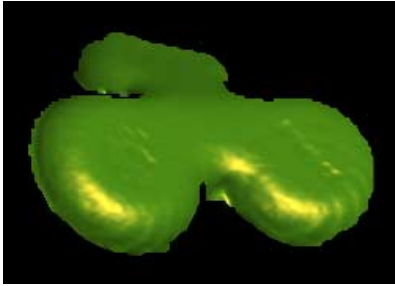


図 19 推定したパラメータで生成したトレイの CG 画像  
Fig. 19 CG image of the tray generated with estimated parameters.

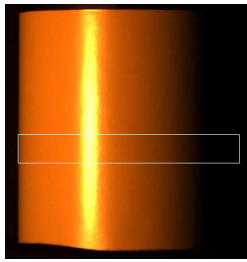


図 20 黄色の円筒の計測画像  
Fig. 20 Measured image of a yellow cylinder.

値を推定値とした．推定結果は以下のとおりである． $\mathbf{c}_d = [0.919, 0.394, 0.016]$ ， $\mathbf{e} = [0.828, 0.523, 0.211]$ ， $\gamma = 0.054$ ， $\beta/\alpha = 83$ ．これらの値を 2 章の推定結果と直接比較することはできない．2 章では分光放射輝度率をモデル化したのに対して，ここではカメラ出力の RGB 値で反射モデルを記述しているからである．前者は物体表面に固有の反射モデルであるのに対して，後者は特定の照明光源とカメラを含む反射モデルである．しかし後者で使用した光源の分光分布とカメラの分光感度が既知であれば，前者の反射モデルから後者のカメラ出力のモデルを予測することが可能である．そこで撮影に用いた白熱電球の分光分布と RGB カメラの分光感度分布を別途計測し，これらを用いて，分光放射輝度率の Torrance-Sparrow モデルを色ベクトルのモデルに変換した．この変換により予測したパラメータの値は以下のとおりである． $\mathbf{c}_d = [0.912, 0.407, 0.033]$ ， $\mathbf{e} = [0.813, 0.531, 0.238]$ ， $\gamma = 0.045$ ， $\beta/\alpha = 79$ ．この結果は画像からの推定値とほぼ一致していることが分かり，提案手法の信頼性が確認できる．

最後に，Phong モデルとの比較を行った．3 次元色ベクトルの Phong 反射モデルは

$$\mathbf{c} = \alpha \cos(\theta_i) \mathbf{c}_d + \beta \cos^m(\rho') \mathbf{e} \quad (19)$$

で記述される．ここで指数  $m$  はピークの半値位置に

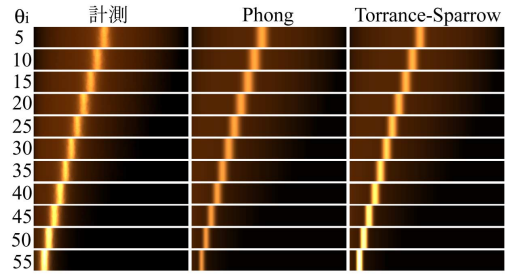


図 21 異なる入射角での円筒の計測画像と 2 つの反射モデルによる CG 画像の比較

Fig. 21 Comparison between the measured images and CG images using two models for a cylinder at different angles of incidence.

基づく手法で，その他のパラメータは 4 章の手法で推定した（詳細はたとえば文献 5）参照）．この結果，色ベクトル  $\mathbf{c}_d$  と  $\mathbf{e}$  の推定値は上と同じ値となり，さらに  $m = 101$ ， $\beta/\alpha = 2.8$  が得られた．モデルの有用性を調べるために，推定したパラメータを用いて照明光源の方向を変えた画像を生成し，これを実際に撮影した計測画像と比較した．図 21 に Phong モデルと Torrance-Sparrow モデルで生成した円筒の一部の CG 画像と対応する計測画像を示す．照明光源の入射角を 5 度から 55 度まで変化させた．図 21 では 3 者を比較するために拡散部分を暗くしている．なお  $\theta_i = 20$  での計測画像からパラメータを推定した．したがって，このあたりの角度では Phong モデルの画像と Torrance-Sparrow モデルの画像の間には大きな違いは見出されない．しかし角度を変えた一連の画像を比較するとき，Torrance-Sparrow モデルの画像と計測画像とは，特にハイライト領域で良好に一致している．一方 Phong モデルの画像はハイライト領域の明るさがつねに一定で，実際と異なることは明らかである．

## 7. おわりに

本論文では，3 次元光反射モデルを解析して，モデルパラメータを推定する手法を述べた．物体表面の材質は非金属の不均質誘電体を仮定し，3 次元反射モデルとしては Torrance-Sparrow モデルを採用した．

まずモデルの妥当性を実験的に調べた．このために三次元変角分光光度計を用いてサンプル物体を 3 次元計測した．得られた反射率データに Torrance-Sparrow モデルを適合させ，最良な適合に必要な成分項とモデルパラメータを決定した．この結果，Torrance-Sparrow モデルは Phong モデルよりも鏡面反射の部分で実測値への適合がかなり優れ，またフレネル反射率の項も無視することができないことが分かった．さらに

Torrance-Sparrow モデルを使って物体の屈折率が推定できることが分かった。

次に、CCD カメラによるカラー画像から Torrance-Sparrow モデルを推定する方法を提案した。較正したカメラ系から得られた対象物体のカラー画像 1 枚からモデルのパラメータを推定した。物体色や光源色に関する色成分パラメータはカラーヒストグラムの解析から求めることができた。表面の粗さは物体の質感を表示するのに重要な役割を持つ。この表面粗さパラメータの推定のために、我々は鏡面ピークの近傍の輝度画像と反射率分布図を用いる手法を提案した。このアルゴリズムは法線の探索に特有の解法といえる。

最後に、推定したパラメータで CG 画像を生成して総合的な妥当性を視覚的に確認した。特に Phong モデルによる CG 画像との比較により Torrance-Sparrow モデルが実物の撮影画像を良好に再現できることが分かった。

本論文では Torrance-Sparrow モデルと Phong モデルの比較検討を行ったが、これら以外のモデルについても今後検討すべきと考える。しかし厳密な検証には反射率計測器の精度向上がまず必要である。

謝辞 分光光度計による 3 次元反射率計測にご助力いただいた日本ペイント(株)桑野浩一氏と浅野尚郎氏ならびに CV 全般にわたって有益な議論をしていたいただいた本学 Michael Hild 先生に深謝いたします。

### 参 考 文 献

- 1) Tominaga, S. and Wandell, B.A.: The standard surface reflectance model and illuminant estimation, *J. of Optical Society of America A*, Vol.6, No.4, pp.576-584 (1989).
- 2) Phong, B.T.: Illumination for computer-generated pictures, *Comm. ACM*, Vol.18, No.6, pp.311-317 (1975).
- 3) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. of Optical Society of America A*, Vol.57, No.9, pp.1105-1114 (1967).
- 4) Sato, Y., Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K.: Object shape and reflectance modeling from observation, *Proc. SIGGRAPH '97*, pp.379-387, ACM (1997).
- 5) Tominaga, S.: Estimation of reflection parameters from a color image, *Computer Vision - ACCV '98*, Ting, R.C. and C.P. (Eds.), Springer (1998).
- 6) Tominaga, S., Takahashi, E. and Tanaka, N.: Parameter estimation of a reflection model from a multi-band image, *Proc. Workshop on*

*Photometric Modeling for Computer Vision and Graphics*, pp.56-63 (1999).

- 7) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Temporal-color space analysis of reflection, *J. of Optical Society of America A*, Vol.11, No.11, pp.2990-3002 (1994).
- 8) 富永昌治: 3次元空間における物体色のリアルな生成とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.2, pp.289-301 (1993).
- 9) Cook, R.L. and Torrance, K.E.: A Reflection Model for Computer Graphics, *Computer Graphics*, Vol.15, pp.307-315 (1981).
- 10) 国立天文台(編): 理科年表, 丸善(1992).
- 11) 徐剛, 辻三朗: 3次元ビジョン, 共立出版(1998).
- 12) 富永昌治, 西辻順一: カラーヒストグラムからの直線検出に基づいた色ベクトル推定法, テレビジョン学会誌, Vol.50, No.11, pp.1790-1797 (1996).
- 13) Horn, R.K.P.: *Robot Vision*, The MIT Press (1986).

(平成 12 年 3 月 21 日受付)

(平成 12 年 9 月 14 日採録)

(担当編集委員 中村 裕一)



田中 法博(正会員)

平成 7 年大阪電気通信大学経営工学科卒業。平成 9 年同大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。平成 12 年同博士後期課程単位取得後退学。現在大阪電気通信大学客員研究員。コンピュータグラフィックス, コンピュータビジョン, 特に光反射モデル推定の研究に従事。電子情報通信学会, 日本色彩学会各会員。



富永 昌治(正会員)

昭和 45 年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。昭和 50 年同大学院博士課程修了。工学博士。電総研大阪支所を経て, 昭和 51 年大阪電気通信大学講師。昭和 61 年教授。昭和 62 年より 1 年間スタンフォード大学心理学科客員教授。色彩情報処理, コンピュータカラービジョン, 画像処理等の研究に従事。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本色彩学会, テレビジョン学会, IEEE, OSA 等会員。