

カラー画像から反射パラメータの推定法とCG応用

3E-5-2

田中 法博* 富永 昌治 河合 利幸
大阪電気通信大学

1 はじめに

光反射モデルはリアルなコンピュータグラフィックス画像の生成に重要な役割を果たす。反射モデルは物体表面を構成する材質に依存する。もし物体表面を不均質誘電体と仮定すれば、反射光は2色性反射の特性を持つ[1]。光反射モデルは、Phongモデル[2]やTorrance-Sparrowモデル[3]が知られているが、これまで反射モデルのパラメータは物体の反射特性から経験的に決められることが多かった。

本稿では、CCDカメラで計測した一枚のカラー画像から対象物体表面に関する種々の反射モデルパラメータを推定する方法を提案する。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。

カメラデータから物体表面の反射モデルを推定するためのこれまでのアプローチとして、(1)精密なレンジファインダを用いて物体形状を知る、(2)物体形状を円筒や球のように限定する、(3)Gonio-metricに光源とカメラの位置関係を変えて多くの画像を獲得する、等の手法がある。これに対して本研究では、一枚のカラー画像から物体形状を限定せずに反射モデルを推定しようとする。具体的には、物体の色、光源の色、表面の粗さ、拡散成分と鏡面成分の比率等の物理パラメータを推定する。我々はカラー画像のヒストグラム特徴を利用する。特にハイライトを含む物体表面の画像から、物体と光源の色情報と物体の表面情報を推測することが可能である。

以下では、まず物体の分光反射率を分光光度計で計測し、Torrance-Sparrowモデルの妥当性を調べる。次に画像からのパラメータ推定を行うが、物体色、光源色、拡散/鏡面比のパラメータはヒストグラム解析から求めることができる。表面の粗さの推定は物体の法線ベクトルの推定を伴うので、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。最後に推定したパラメータによりCG画像を生成し、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、プラスチックなどの不均質誘電体物体に利用できるPhongモデルと金属物体にも適用できるTorrance-Sparrowモデルが知られている[4]。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。しかし反面考慮すべき項数

が多くて、パラメータ推定の立場からは簡略化したモデルで置き換えられることが多い[5]。ここでは分光光度計を用いてサンプル物体の分光反射率を計測し、分光データに基づいてTorrance-Sparrowモデルの妥当性を検証する。

2.1 Torrance-Sparrowモデル

図1にTorrance-Sparrowモデルで使用する反射の幾何学モデルを示す。このモデルでは金属表面適用できるような微小面(facet)の凹凸分布を考慮している。本論文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、物体表面の法線ベクトル N はグローバルは面の法線とする。 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当分線である。 θ_i を入射角、 θ_r を受光角とする。さらに ρ は N と H のなす角である。

物体表面からの反射光の分光輝度分布 $Y(\lambda, x)$ は、位置のパラメータ x と波長 λ の関数で、Torrance-Sparrowモデルでは(1)式のように記述される。

$$Y(x, \lambda) = \alpha \cos\theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{D(\rho) G(N, V, L) F(\theta_i, \lambda)}{\cos\theta_r} E(\lambda) \quad (1)$$

上式右辺第1項は拡散(内部)反射成分で、第2項は鏡面(界面)反射成分である。拡散反射成分の $S(\lambda)$ は物体色を生成する分光反射率である。 $E(\lambda)$ は照明光の分光分布である。第2項の鏡面反射成分はいくつかの成分からなる。

まず $D(\rho)$ は、物体表面を微小面で構成されているとみなすとき、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。分布関数として法線を中心とする一次元の対称関数が仮定される。本稿では、次式のようなガウス関数を仮定した[4]。

$$D(\rho) = \exp\{\log(2)\rho^2/\beta^2\} \quad (2)$$

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

G は、幾何的減衰係数である。微小面は傾きをもって分布しているため、隣接する微小面が互いに他をマスクしたり、光の当たらない陰ができたりする。このような入射光や反射光のさえぎりは当然それらの角度に依存する。これは次式により与えられている。

*"An Estimation Method of Reflection Parameters from a Color Image and Its Application to CG" Norihiro TANAKA, Shoji TOMINAGA, Toshiyuki KAWAI, Osaka Electro-Communication Univ.

$$G(N, V, L) = \min\left\{1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{V \cdot H}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{V \cdot H}\right\} \quad (3)$$

F は物体表面のフレネル分光反射率を示す。一般的に分光反射率は波長のみならず、入射角の関数でもある。分光反射率を求めるためにフレネルの式を用いることは物理的に厳密といえる。しかし、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 0 と仮定できる [6], [4]. ここではこの近似式で分光反射率を求めた。

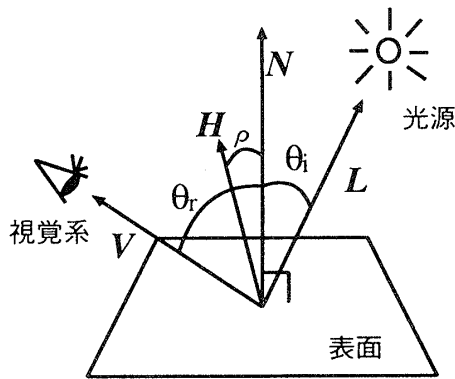


図 1: 反射モデル.

2.2 反射率の計測

分光光度計では任意の入射角と受光角において、反射率、正確には分光放射輝度率 $r(\lambda)$ (spectral radiance factor) を計測することができる。分光放射輝度率とは、対象物体と完全拡散物体の分光放射輝度の比として4式のように定義される。完全拡散物体は対象物体と入射角、反射角等において同一条件で計測される。完全拡散物体の分光放射輝度 $J(\lambda)$ は入射立体角を一定とすれば、 $J(\lambda) \propto (1/\pi)E(\lambda) \cos(\theta_i)$ と書ける。このとき分光放射輝度率は π を無視すれば、次式として求めることができる。

$$r(x, \lambda) = \frac{Y(x, \lambda)}{J(x, \lambda)} = \alpha S(\lambda) + \beta \frac{DGF}{\cos(\theta_i) \cos(\theta_r)} \quad (4)$$

図2に使用した分光光度計の構造を示す。分光光度計は、内蔵する完全拡散面と計測物体を同一条件で同時計測することにより可視光の範囲で分光放射輝度率が得られる。計測は Gonio-metric で光の入射角、反射光の受光角、物体を傾ける角(あおり角)を任意に設定することができる。

2.3 計測データのモデルへの適合

プラスチック物体を用い、入射角を10度から60度の範囲で5度間隔に変化させた。また各入射角において受

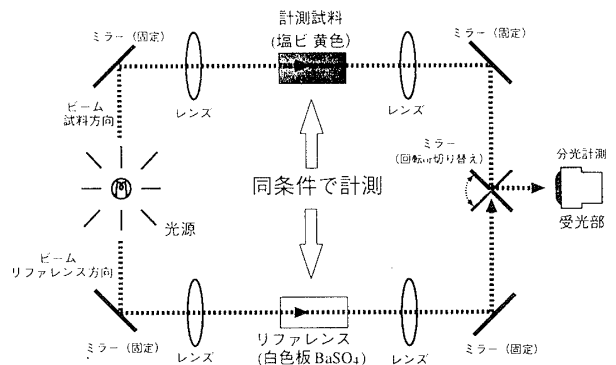


図 2: 分光光度計の構造.

光角は-70度から+70度の範囲で5度間隔に変化させた。ただしハイライト周辺の精度を高めるために、ハイライトピークの-10度から+10度の範囲では0.1度間隔で受光角を変えた。すなわち一つの入射角に対して225の分光放射輝度率を求めた。

次に計測した計測データに反射モデルの各項を次のように適合した。

1. 拡散鏡面比

まず計測した反射率の拡散反射成分は入射角に関して一定値をとる。この性質を用いて計測した反射率を鏡面反射成分に分解する。次に拡散鏡面比 β/α は反射率データの拡散反射成分と鏡面反射成分のベクトル長の比として推定する。

2. 屈折率

通常の不均質誘電体物質の屈折率は1.0から2.0未満までの間に存在する。前述のように簡略化したフレネル反射率 $F(\theta, \lambda)$ は波長に関して一定値を取り、屈折率 n をパラメータとする入射角 θ の関数となる。そこで屈折率 n を変化させて $F(\theta)$ の鏡面反射のハイライトピークにおける関数値を調べた。これより最も良く適合する屈折率を決定した。

3. 表面粗さ

ハイライトピークの半値位置における反射率の形状を用いて推定した。物体表面粗さを表わすのは分布関数 D のパラメータ γ である。本研究では γ の推定にハイライト部分の半値を使用する。半値とはハイライトピークの1/2の高さを示す。ただし波長に関しては可視域400-700nmで平均している。半値位置では次式が成立する。

$$H \exp\{-\log(2) \frac{\rho^2}{\gamma^2}\} = \frac{1}{2} P \quad (5)$$

ただし、 $H = \frac{F_h G_h}{\cos \theta_{rh}}$ 、 $P = \frac{F_p G_p}{\cos \theta_{rp}}$ である。 F_h, G_h は、それぞれ半値位置でのフレネル項、幾何減衰項、 F_p, G_p は、ハイライトピーク位置でのフレネル項、幾何減衰項である。これを γ について解くと次式のようになる。

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho^2}{1 - \frac{\log P/H}{\log 2}}} \quad (6)$$

適合結果を図3に示す。物体は黄色のプラスチックである。分光光度計から得られた反射率データと、上述の方法で求めた各項による Torrance-Sparrow モデルとの比較が図に描かれている。このとき、拡散鏡面比は3.2、屈折率は1.45、 γ は0.087(radian)と推定した。

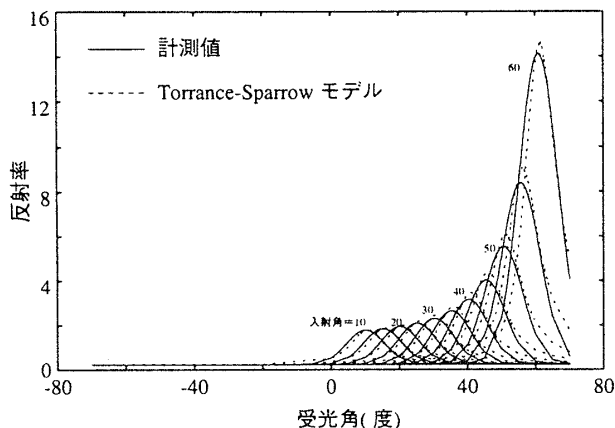


図3: 反射率の計測値とモデルとの比較。

3 カメラモデルと較正

3.1 カラー反射モデル

RGB カラーカメラの出力反射モデルを記述する。カラー反射モデルは(1)式と同様な2色性反射モデルで記述することができる。位置 x で観測される色ベクトル $c(x)$ は(7)式で示される。

$$\begin{aligned}
 c(x) &= W_d(x)c_d + W_s(x)e \\
 &= \alpha \cos(\theta_i)c_d + \\
 &\quad \beta \frac{F(\theta_i)G(\theta_i, \psi) \exp\{-\log(2)\frac{\rho^2}{\gamma^2}\}}{\cos(\theta_r)} e \quad (7)
 \end{aligned}$$

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。 W_d, W_s は、それぞれ、拡散反射と鏡面反射の総合的な重み係数とする。次に c_d は物体色ベクトル、 e は光源色ベクトルを示す。分光関数の場合と同様に F はフレネル関数、 G は幾何的減衰係数、角度の定義の同じである。ここでは特に ρ をハイライト角と呼ぶ。 γ は表面粗さを示す係数、 α と β は、それぞれ、拡散反射成分と鏡面反射成分の重み係数である。フレネル関数は屈折率 n をパラメータをし、この項は無視できないことがわかった。不均質誘電体の屈折率は金属程大きな変化はなく、値はおおよそ接近している。そこで以下では前節で求めた n の値を用いた。

本論文では、カラー画像から凸物体表面の反射モデルのパラメータの推定を行う。表面形状は未知としている。計測系の条件として、視線方向ベクトルは平行投影を仮定してカメラの光軸に平行とする。照明光は平行で、その方向を下記のように別途計測する。

3.1.1 カメラパラメータの決定

いま、3次元空間内の座標を (X, Y, Z) 、カメラによる画像への投影座標を (x, y) 、実際のデジタル画像座標系を (u, v) とおく ([7] 参照)。カメラはピンホールカメラを仮定し、座標系の中心はカメラのレンズ中心にあるとする。デジタル画像は正方ピクセルをもつとする。3次元座標 (X, Y, Z) を画像 (x, y) へ投影する射影行列 P は次式で示すことができる。

$$P = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha = fk$ であり、 f は焦点距離、 k は画素の長さを示す。 u_0, v_0 は (u, v) 座標系での画像中心座標である。

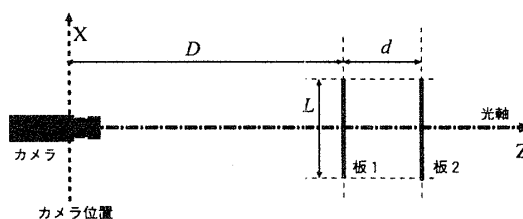
$[X, Y, Z]^t$ から $[x, y]^t$ への射影を実行すれば、次式の関係式が得られる。

$$x = \frac{\alpha X + u_0}{Z}, y = \frac{\alpha Y + v_0}{Z} \quad (9)$$

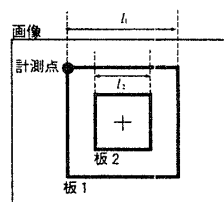
未知パラメータは α のみで、これを求める。 α の推定には、(9)式のうちの一つの関係式を使えば良い。 α を求めるため図4(a)のような計測を行った。形状が既知の同じ大きさの半透明の板を2枚用意する。間隔 d は既知とする。図4(a)、図4(b)の計測点におけるパラメータを代入すると、(10)式のようになり、既知のパラメータのみで表現できる。

$$\alpha = \frac{l_1 l_2 d}{L(l_1 - l_2)} \quad (10)$$

ここで l_1, l_2 は、半透明の板のそれぞれの画像上の長さ、 L は、半透明の板の実際の長さ、 d は、2枚の半透明の板の間の距離である。



(a) 計測見取り図



(b) 撮影画像

図4: カメラパラメータ α の計測。

3.1.2 照明方向の決定

次に α が既知のカメラを用いて、光源方向角を図 5(a) のような環境で計測した。計測には、大きさが同じ球を 2 つと、直方体を用いた。直方体は 2 球に間に接触して おいてある。球は光沢のある真球である。

まず、カメラ位置から球中心間の距離 D を求める。これには、直方体の頂点を用いる。点 A の 3 次元座標を (X_A, Y_A, Z_A) とすると、この点は(11) 式で与えられる。ここで、 $D = Z_A$ であるから、物体間の相対的な位置関係は既知であるため球のカメラ座標系での位置がわかる。

$$(X_A, Y_A, Z_A) = \left(\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L, \frac{\alpha X_A}{x - u_0} \right) \quad (11)$$

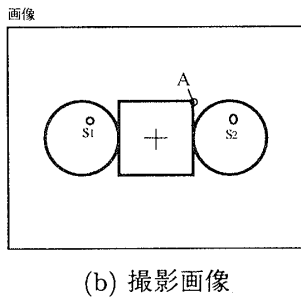
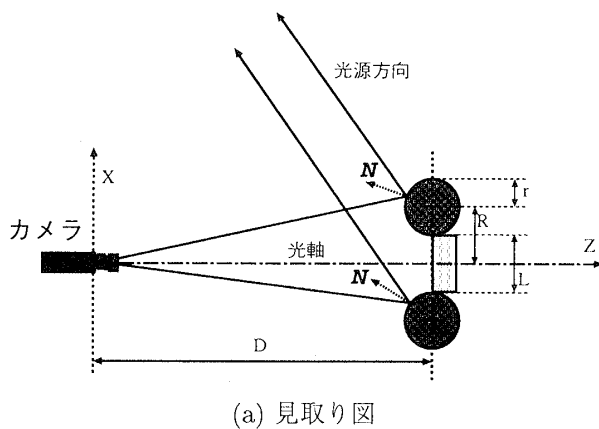


図 5: 球と直方体を用いた光源位置の推定。

図 5(b) で、 s_1, s_2 はハイライト位置である。2 つのハイライトピーク s_1, s_2 の画像上の座標を $(x_{s1}, y_{s1}), (x_{s2}, y_{s2})$ とする。これらの 2 点は球面上にあるので、球面の方程式を満足する。これで変数 X と Y を消去して Z に関して整理すれば、 s_1 については結局(12) 式が得られる。

$$\left\{ \frac{(x_{s1} - u_0)^2}{\alpha^2} + \frac{(y_{s1} - v_0)^2}{\alpha^2} + 1 \right\} Z^2 - \left\{ 2D + \frac{2R(x_{s1} - u_0)}{\alpha} \right\} Z + R^2 + D^2 = r^2 \quad (12)$$

ここで、 R は球の 3 次元座標での X 座標、 r は球の半径である。 x_{s1} は、ハイライトピーク s_1 の画像上の

x 座標である。この 2 次方程式を Z について解き、2 根のうち小さい方を解とする。

ハイライトピークの 3 次元座標が分かれば、ハイライトピーク位置 s_1 での球の法線も容易に求めることができる。そうするとハイライトピーク位置での視線ベクトルの正反射方向に光源は存在する。なお 2 つの球を用いたのは精度を高めるため、方向ベクトルは 2 つの平均値として推定する。

4 パラメータ推定 (その 1)

Torrance-Sparrow 反射モデルで推定されるべきパラメータは $c_d, e, \beta/\alpha, \gamma$ などである。以下では $c_d, e, \beta/\alpha$ を推定するための方法をまず述べる。

4.1 ハイライトピークの法線

物体の屈折率を分光光度計からの推定値を利用する。カラー画像を利用する場合は、照明の入射角を変えてハイライトを含む多数の画像を計測すれば、屈折率の推定は可能である。光源方向ベクトル L がわかり、視線方向ベクトル V と平行投影を仮定するので、物体表面上に存在するハイライトピーク位置での法線を 2 つのベクトルの 2 等分ベクトルとして推定することができる。

4.2 カラーヒストグラムの解析

光反射モデルのパラメータを推定するためにカラーヒストグラムを解析する。図 6 は一つの不均質物体の計測画像から得られた RGB のカラーヒストグラムである。ヒストグラムは物体色クラスとハイライトクラスの 2 つの線形クラスが結合した形で分布している。原点から伸びているクラス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。物体色のクラスから枝分かれしているハイライトクラスは、鏡面反射成分によるものである。照明方向とカメラの視線方向が一致しない一般的な場合には、ハイライトクラスは直線的でなく、広がりをもつ。このように 2 色性反射のカラーヒストグラム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ぶ(図 7 参照)。色信号平面に射影したカラーヒストグラムからいくつかのパラメータを容易に推定することができる。

4.2.1 物体色

物体色ベクトルは、色信号平面上で物体色クラスの最大位置を P_d とする。この位置は拡散反射成分の最大値を示す。そこで原点 O と P_d を結ぶベクトル $\overline{OP_d}$ を求め、これを元の RGB 空間に復元することにより物体色ベクトル c_d が求まる。

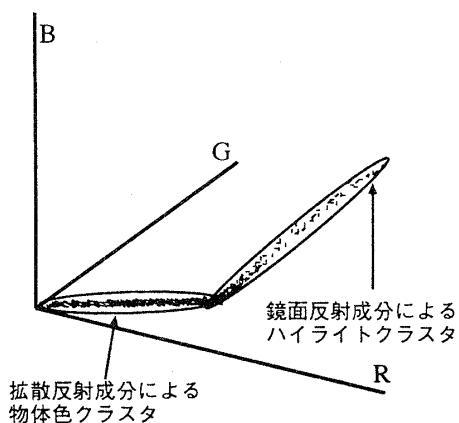


図 6: RGB 空間でのカラーヒストグラム.

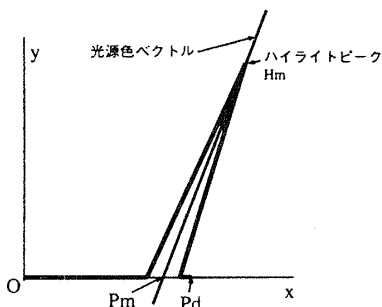


図 7: 色信号平面に射影したカラーヒストグラム.

4.2.2 光源色

物体表面上のハイライトピーク位置での法線ベクトル N_p は

$$N_p = \frac{1}{2}(L + V) \quad (13)$$

として求める。次にハイライト点における拡散反射成分を求める。図 7 のヒストグラムで、 P_m を色信号平面の x 軸上で拡散反射成分の大きさを表す点とする。このとき距離 $\overline{OP_m}$ は次式で求まる。

$$\overline{OP_m} = \overline{OP_d}(N_p \cdot L) \quad (14)$$

点 P_m は x 軸上にあるので鏡面成分は全く含まず、一方点 H_m は最大の鏡面成分を意味している。 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。このように光源色ベクトル e は $\overline{P_m H_m}$ を RGB 空間に復元したものとして推定できる。

4.2.3 拡散対鏡面比

物体表面の反射において、鏡面と拡散の全体的な比率は、図 7 において、拡散成分の長さ $|\overline{OP_m}|$ と鏡面反射

成分の長さ $|\overline{H_m P_m}|$ の比となる。この比率は一定値ではなくて、入射角などに依存することに注意すべきである。しかしハイライトピーク位置ではこのような角度がわかっているので、拡散対鏡面の定数比 β/α は次式のように推定できる。

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{|\overline{OP_m}| \cos \psi}{|\overline{H_m P_m}| FG} \quad (15)$$

5 パラメータ推定（その 2）

光反射モデルのパラメータのうち色ベクトル c_d, e は物体の形状に依存しないのでカラーヒストグラムから求めることができた。拡散対鏡面比 β/α については、ハイライトピーク点のみの法線のみが必要であったため、照明方向ベクトルと視線方向ベクトルを考慮して推定できた。

しかし、物体の表面粗さの推定は鏡面関数の推定になり、鏡面反射成分の変動をつかむ必要がある。つまりハイライトピーク点から離れるにつれてハイライトの減少割合を推定すればよい。本論文ではこれのために特にハイライトピークでの輝度が半分に減少する半値位置の点を見つける。実際には値位置の 3 次元座標は必要なくて、法線ベクトルの情報のみがわかればよいことになる。

このような法線情報は 1 枚のカラー画像のみから求めようとすると、画像上の色情報しか手がかりがないため推定が困難になる。これは、面の傾きの自由度は 2 であるのに対して、色情報はこのとき輝度情報を同レベルで 1 次元しか持たないため、一般的には面の傾きを求めることができない。このため従来では物体の形状は、円筒や球等の既知のものを用いるか [8]、レンジファインダーで物体の形状を予め測定しておく必要があった。

われわれは、この問題に対して拡散反射成分の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。まず初期値点はハイライトピーク位置での法線で、光源方向と視線ベクトルから上で推定できている。この初期地点から 2 種類のデータを反復的に探索しつつ、半値位置の点での法線を推定する。

この手法は、Shape from Shading 問題を解くための一手法としても使われていたが [9]、一般にノイズの影響で初期地点から離れると誤差が大きくなるという問題点があった。我々の反射モデルパラメータ推定は形状復元の問題と本質的に異なる。特にハイライト付近の極めて狭い範囲のみで法線推定が行えればよいのが有利である。

5.1 表面粗さ

画像におけるハイライトピークの半値位置では前述の (5) 式のような関係式が成立する。これより表面粗さは

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho^2}{1 - \frac{\log P/H}{\log 2}}} \quad (16)$$

で算出される。ここで、 $H = \frac{F_h G_h}{\cos \theta_{r,h}}$ 、 $P = \frac{F_p G_p}{\cos \theta_{r,p}}$ である。 F_h, G_h は、それぞれ半値位置でのフレネル項、幾何減衰項、 F_p, G_p は、ハイライトピーク位置でのフレネル項、幾何減衰項である。

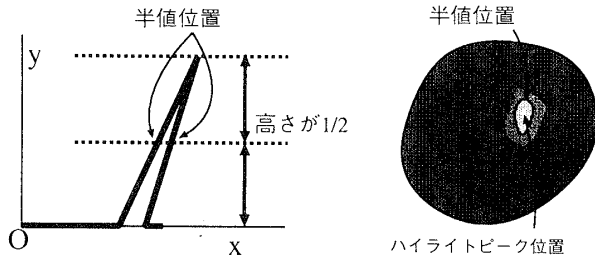


図 8: 半値位置.

5.2 反射率分布図

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。(出力光度/光源光度)をこの勾配空間中にプロットしたものが反射率分布図 (reflectance map) 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 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。このとき面の明るさ分布は表面の勾配 (p, q) の関数として次式で表現できる。

$$\cos(\theta_i) = \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (17)$$

また拡散反射成分の明るさ画像は、カラー画像から得られる明るさ情報で、計測画像より拡散反射成分のみを取り出すことにより得られる。

5.3 法線の探索

拡散反射成分の明るさ画像と反射率分布図との間にはいくつかの重要な性質が存在する。 X, Y, Z, p, q に対する解は次に5つの常微分方程式を解くことにより見出すことができる。

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

ここで (E_X, E_Y) は明るさ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。 ξ は表面の適当な曲線に沿って変動する。

上式を数値計算で解くために、我々は Runge-Kutta 法を用いる。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。ただし表面の高さ Z の初期値

は未知であるから、適当な値に設定してよい。この反復アルゴリズムは半値位置に到達すれば終了する。このときの (p, q) が面の傾きを与える。最後に (16) 式から表面粗さのパラメータ γ が推定される。

6 実験

6.1 計測環境

使用した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 35mm F1.4S)、RGB フィルタ (Kodak ラッテンゼラチンフィルタ) およびパソコン (NEC PC-9821Xa16/W16) からなる。カメラからの各色成分の映像信号は 10 ビットで AD 変換されて、各成分画像は 1024 レベルのデジタル画像として表現されている。図 9 のような環境で計測を行った。カメラの位置あわせには、XY ステージ (シグマ光機 Σ -212PS) を用いた。

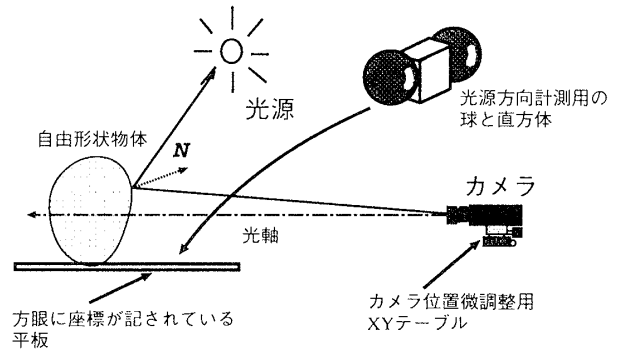


図 9: 実験風景.

6.2 実験方法

計測物体は市販のプラスチック製の黄色の容器である (図 10 参照)。物体は暗室内で黒い布で覆ったテーブル上で計測する。またこのテーブルの上には等間隔に目盛のひいてある光沢のないマットを置き、この上で照明方向推定に用いる球と直方体を計測した。光源として白熱電球 (300W) を用いた。特に平行ビームを仮定するためフラッドタイプの電球を右手上方に約 1.5m 離して配置した。CCD カメラは物体から約 2.5m の距離に配置した。

まず基準物体の球と直方体はリアルタイムでモニタしながら、XY テーブルを用いて精密に基準物体を画像中心に適合させて撮影を行った。これより照明とカメラの較正を行った。次に基準物体を取り除き、計測物体の撮影を行った。

6.3 実験結果

上記の計測画像に基づいて以下のように各種の物理パラメータを求めた。はじめにカメラパラメータ α は

8762.63 と推定された。それをもとに照明方向の推定を行った。方向ベクトル L は、 $[0.764, 0.451, 0.460]$ と推定された。

次に画像より反射モデルパラメータを求めた。図 10 の白い直線で囲まれた部分は物体表面で鏡面ハイライトを含む領域で、この部分を切り出して解析した。図 11 はこの切り出した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。このヒストグラムに基づいて物体色ベクトルと照明光色ベクトルを求めた。物体色ベクトル C_d は、RGB ベクトルで $[0.874, 0.481, 0.761]$ と推定した。照明光色ベクトル e は $[0.525, 0.740, 0.420]$ と推定した。拡散対鏡面比 β/α は 9.1 と推定した。

物体の表面粗さの推定処理において、まず推定した物体色ベクトルと照明光色ベクトルを用いて、計測画像を拡散反射成分と鏡面反射成分に分割した。図 14 は図 10 の切り出した部分画像に対応しており、(a) は拡散成分のみからなる画像で、(b) は鏡面反射成分のみからなる画像である。このとき (a) の拡散反射成分画像から明るさ画像 (図 13) を作成した。また計測した照明光の方向ベクトルに基づいて反射率分布図 (図 12) を作成した。

Runge-Kutta 法では、最急降下方向に移動量 $h = 0.1$ として、ハイライトピークから半値位置まで 314 ステップで探索が終了した。この際の探索経路を反射率分布図 (図 12) と明度画像 (図 13) 上で表示している。

さらに図 15 に計測画像上の探索経路を描く。中心にハイライト点のスタート地点があり、これを囲む曲線がピークの半値位置を表わしている。スタート地点から左上方に到る半直線が探索経路である。ここではパラメータ γ は $0.353(\text{radian})$ となった。

最後に、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 $c_d, e, \beta/\alpha, \gamma$ の推定値を (7) にあてはめた。光源は平行光源、視線ベクトルは平行投影とし、照明方向は推定値を用いた。なお、この妥当性確認には計測物体の形状データが必要になるので、レンジファインダーで対象物体の 3 次元データを別途獲得した。このように推定したパラメータから再現した物体の画像を図 16 に示す。

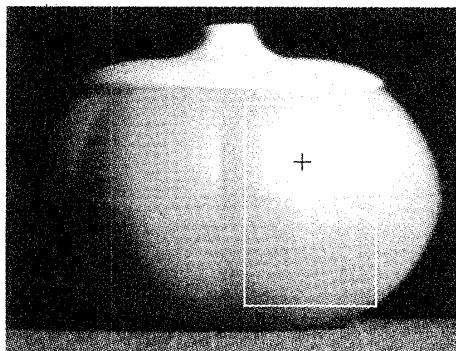


図 10: 計測画像。

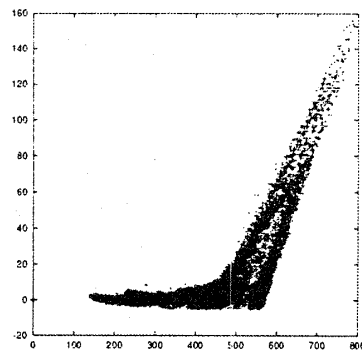


図 11: 画像のヒストグラム。

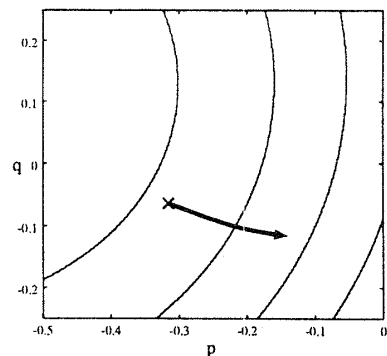


図 12: 計測画像の反射率分布図。

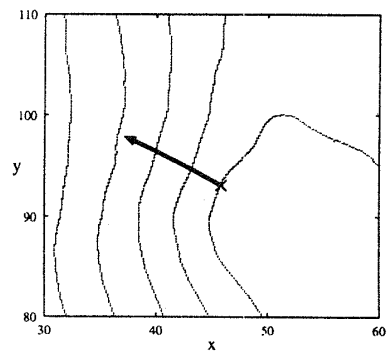


図 13: 計測画像の照度分布図。

7 おわりに

本稿では、CCD カメラで計測した一枚のカラー画像から対象物体表面に関する種々の反射モデルパラメータを推定する方法を提案した。物体表面の材質は非金属材料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。推定したパラメータは物体色、照明色、表面粗さ、拡散対鏡面比である。

このためにまず分光光度計の分光反射率データを Torrance-Sparrow モデルに適合させた。これによりモデルの妥当性がわかり、また屈折率の推定できた。次にカメラによる計測系の較正を行った。画像からのパラメータ推定において、物体色、光源色、拡散/鏡面比は

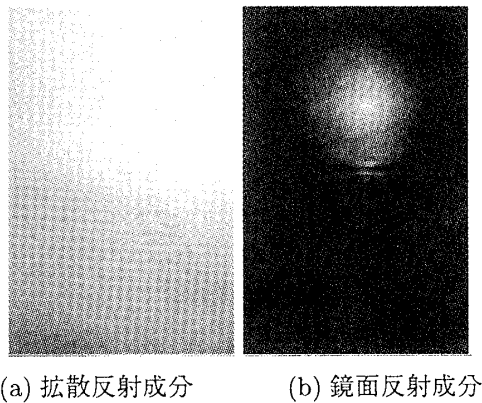


図 14: 鏡面と拡散の成分画像.

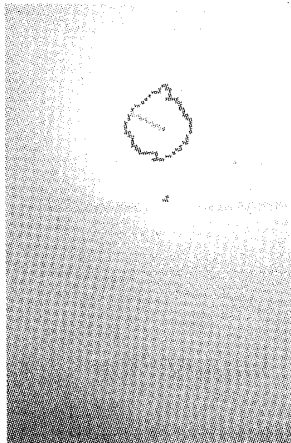


図 15: 画像上の解の探索経路.

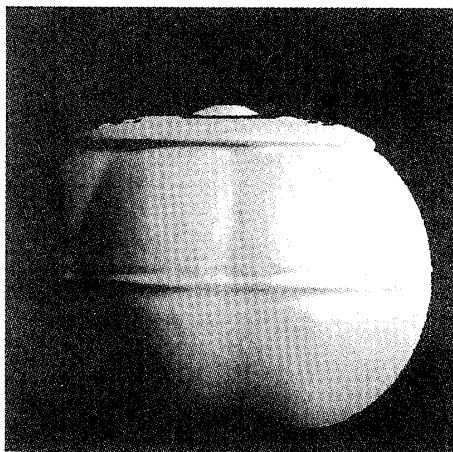


図 16: 推定したパラメータで再現した CG 画像.

カラーヒストグラムの解析から求めることができた。表面の粗さは反射モデルにおいて物体の質感を表示するのに重要な役割を持つ。この表面粗さの推定のために、我々はハイライトピークの近傍の明るさ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の特有の解法である。最後に推定したパラメータ

により CG 画像を生成して視覚的に妥当性を確認した。提案した手法の利点は 1 枚のカラー画像上から物体の全ての反射モデルパラメータを推定できることである。ただし光源は平行光源、カメラは平行投影を仮定している。計測画像にはハイライトが存在し、物体色の最大値を含んでいる必要がある。なお、もしハイライトが物体色に比べて極端に強い場合には、拡散反射成分の画像にノイズが含まることがあり、 k のとき表面粗さの推定精度が低下する。

参考文献

- [1] S.Tominaga and B.A.Wandell: The standard surface reflectance model and illuminant estimation, JOSA, Vol. 6, No.4, pp.576-584, (1989).
- [2] B.T. Phong: Illumination for Computer-Generated Pictures, Comm. ACM, Vol.18, pp.311-317 (1975).
- [3] K.E.Torrance and E.M.Sparrow: Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces, JOSA, Vol. 57, pp.1105-1114, (1967).
- [4] 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, pp.289-301, Feb. (1993).
- [5] Y. Sato and K. Ikeuchi: Temporal-color Space Analysis of Reflection, JOSA, Vol.11, No.11, pp. 2990-3002 (1994).
- [6] R.L.Cook and K.E.Torrance: A Reflection Model for Computer Graphics, Computer Graphics, Vol. 15, pp.307-315, (1981).
- [7] 徐 剛、辻 三朗: 3次元空間ビジョン, 共立出版, Feb. (1998).
- [8] S. Tominaga: Estimation of Reflection Parameters from a Color Image, Computer Vision - ACCV'98, Vol.1, pp. 80-87, R.C. Ting and C. Pong (Eds.), Springer, Jan. (1998).
- [9] R.K.P. Horn, Robot Vision, The MIT Press, pp.245-277 (1986).