

L3 相互反射を考慮した物体表面反射率計測法

松澤利夫¹ 石井郁夫¹ 高橋章² 今井博英³ 牧野秀夫³

新潟大学大学院自然科学研究科¹ 長岡工業高等専門学校² 新潟大学工学部情報工学科³

1 まえがき

実環境の物体のデータを取得し、高い現実感で仮想空間に再現するために、物体表面の反射率特性を取得する方法について検討した。複雑な形状の物体では、相互反射の影響により、単に反射光強度の計測だけでは正しい反射率特性が得られない場合がある。そこで、反射率計測時の光源位置を推定し、それに基づいて相互反射の検出とその影響の除去を行うことによって正確な反射率特性を導出する手法を提案する。

2 反射モデル

本研究ではグラフィックスライブラリで実装されている phong の鏡面反射モデルを使用する。反射モデルは拡散反射成分とハイライト成分の和によって表される。

$$I = L(r)(R_d \cos \alpha + R_s \cos^n \beta) \quad (1)$$

$$L(r) = k_q r^2 + k_l r + k_c$$

I は画像から得られる輝度値、 $L(r)$ は距離 r における光源色、 k_q, k_l, k_c は光源の減衰を表す係数である。図 1 に示すように α は入射角であり、 β は光源方向ベクトルと視点方向ベクトルの二等分ベクトルと法線ベクトルがなす角である。 R_d, R_s, n は物体の反射率特性を表すパラメータであり、それぞれ拡散反射率、鏡面反射率、鏡面反射の鋭さを表す。 $R_d, R_s, I, L, k_q, k_l, k_c$ は RGB 値をもつ。

3 物体表面反射率計測法

反射率計測対象としている物体上の領域は反射率特性が一様であると仮定する。反射率計測には物体の形状と、撮影時の視点位置、光源位置、光源色の情報が必要である。物体の形状取得、撮影には非接触 3D デジタル VIVID910(MINOLTA) を使用する。光源位置と光源色以外は VIVID910 による計測で取得できるため、3.1 節で光源位置を、3.2 節で光源色を計測する方法について述べる。光源はハロゲンランプを使用し、点光源として扱う。

3.1 光源位置推定

光源位置の推定にはハイライト・ピークから光源位置を推定する手法 [1] があるが、ハイライトが CCD レン

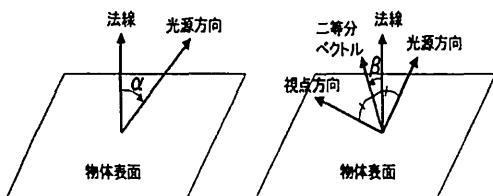


図 1 反射モデル

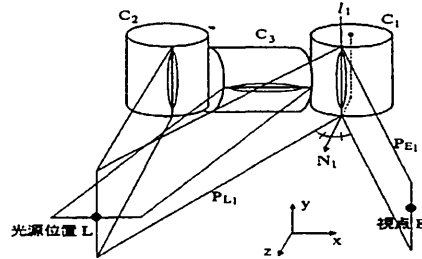


図 2 光源位置推定

ジを越えて飽和している場合、ピーク点の推定誤差が生じる。そこで、ハイライト全体の形状から光源位置を推定する。そのために、図 2 のように 3 つの円筒物体 C_1, C_2, C_3 を用いる。円筒物体の 3 次元座標、表面点の輝度値、視点位置は VIVID910 による計測で取得する。各円筒物体表面に細長く現れるハイライトの両端を結ぶ直線をハイライト直線 $l_i (i = 1, 2, 3)$ とする。円筒の中心軸を通り、 l_i と直交する方向ベクトル N_i は l_i 上の円筒面法線ベクトルになる。 l_i と視点 E を含む平面 P_{E_i} が、 N_i に対して正反射方向に向かう光源方向平面 P_{L_i} を求める。3 つの光源方向平面 $P_{L_1}, P_{L_2}, P_{L_3}$ の交点が推定される光源位置 L である。

3.2 光源色計測

式 (1) における光源色 $L(r)$ を以下の方法で計測により求める。白色のプラスチック板を基準色 (拡散反射率 $R_d(R, G, B) = (1, 1, 1)$) とし、光源との距離を変えながら複数枚の画像を撮影する。ハイライトが現れていない画素における光源色は $L(r) = I / \cos \alpha$ で表されるため、各距離 r における光源色 $L(r)$ を計算し、2 次曲線で近似することにより光源色のパラメータ k_q, k_l, k_c を求める。

3.3 反射率パラメータ計算

3.3.1 成分分離、相互反射の検出

ハイライト成分の誤差を小さくするため、拡散反射成分とハイライト成分を分離して計算式を単純化する。分離方法は式 (1) の β が閾値角 θ_c に対して、 $\beta \leq \theta_c$ ならば輝度値が拡散反射成分とハイライト成分を含み、 $\beta > \theta_c$ ならば拡散反射成分のみと判定する。

ラジオシティ法を用いた相互反射成分計算 [2] では、非常に多くの処理時間を必要とするため、成分分離した輝度値を利用して相互反射成分の検出を容易にする。拡散反射成分のみの場合、輝度値は α に対して \cos のカーブを描くが、相互反射が影響している輝度値はこのカーブからずれた分布をとる。そこで \cos カーブからのずれにより相互反射を検出し、その輝度値を反射率パラメータの計算から除外する。

3.3.2 拡散反射率 R_d

拡散反射成分のみを含む J_d 個の輝度値 I_d から、式 (1) の拡散反射のみを考慮した式 (2) で R_d を求める。

$$R_d = \frac{1}{J_d} \sum_{i=0}^{J_d-1} \frac{I_{d_i}}{L(r_i) \cos \alpha_i} \quad (2)$$

3.3.3 鏡面反射の鋭さ n

求めた R_d を用いて、以下の式からハイライト成分のみの輝度値 I_s を求める。

$$I_s = I - L(r)R_d \cos \alpha \quad (3)$$

J_s 個の I_{s_i} を β が小さい順に整理する。 n に依存するハイライト成分の減少の割合を得るため、式 (4) から比率 p_i を求める。

$$p_i = \frac{I_{s_i}}{I_{s_{i+1}}} \quad (i = 0, 1, \dots, J_s - 2) \quad (4)$$

n を想定される範囲で変化させて、式 (5) で最小となる n を求める。

$$\min \left\{ \sum_{i=0}^{J_s-2} \left| p_i - \frac{\cos^n \beta_i}{\cos^n \beta_{i+1}} \right| \right\} \quad (5)$$

3.3.4 鏡面反射率 R_s

以下の式により R_s を求める。

$$R_s = \frac{1}{J_s} \sum_{i=0}^{J_s-1} \frac{I_{s_i}}{L(r_i) \cos^n \beta_i} \quad (6)$$

4 相互反射を考慮したレンダリング

計測した反射率パラメータを用いて仮想空間で物体を忠実に再現するためには、相互反射を考慮した描画法が必要である。物体表面上のある点 V_0 の相互反射成分 I_{IV_0} を式 (7) から求める (図3参照)。相互反射は2次反射までを考慮している。

$$I_{IV_0} = k \sum_{i=1}^x L(r_{i,L}) \frac{H_{i,0}}{D_i \pi r_{i,0}^2} (R_{d_i} \cos \alpha_i + R_{s_i} \cos^n \beta_i) (R_{d_0} \cos \alpha_{i,0} + R_{s_0} \cos^n \beta_{i,0}) \quad (7)$$

x は全表面点数、 D_i は表面点密度 (1/パッチ面積)、 $H_{i,j}$ は点 i, j 間の遮断物の有無 (0 or 1) を表す。 k は相互反射光の減衰を実空間と同様にするための係数である。

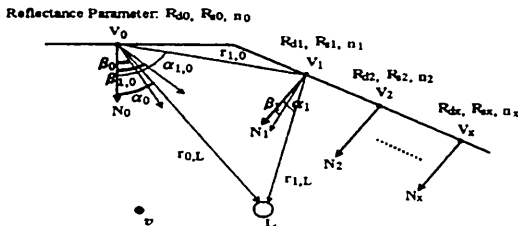


図3 相互反射モデル



図4 撮影画像



図5 CGによる再現画像

5 実験

提案手法の有効性を確認するため、図4の物体に対して反射率計測の実験を行った。撮影は暗室で行い、物体の前方よりハロゲンランプで照明している。左側の円筒物体 (白) と右側の円筒物体 (赤) の境界部分に相互反射が影響している

事前に行った光源位置推定の結果は、視点位置 $[0, 0, 20]$ に対し $[-131.8, -41.4, -112.8]$ (VIVID 座標系) であり、光源色計測の結果は $k_q = [4 \times 10^{-7}, 6 \times 10^{-7}, 7 \times 10^{-7}]$, $k_l = [1.8 \times 10^{-3}, 1.9 \times 10^{-3}, 2.1 \times 10^{-3}]$, $k_c = [2.3, 1.8, 1.8]$ であった。

成分分離に使用する閾値角 θ_t は、物体に映っているハイライトの大きさから $\theta_t = 20^\circ$ に設定した。相互反射の影響を調べるため、図4の四角で囲んだ範囲を参照する。参照した画素数は1448であり、成分分離をした結果は、拡散反射成分のみの画素:652、ハイライト成分を含む画素:796、相互反射が検出された画素:302である。相互反射を検出せずに反射率パラメータを計算した結果 $R_d = [0.852, 0.902, 0.936]$ に対し、相互反射を検出して計算した結果は $R_d = [0.809, 0.844, 0.884]$ であった。これは、相互反射が生じないように円筒物体単体で反射率パラメータを計算した結果 $R_d = [0.813, 0.841, 0.881]$ に近い値であるため、相互反射の影響を受けずに反射率特性が正確に求められていることが確認できる。また、 R_s, n はそれぞれ $R_s = [0.084, 0.192, 0.112]$, $n = 103$ であった。同様に右側の円筒物体の反射率パラメータを計算し、物体を仮想空間で再現した結果が図5である。

6 まとめ

実物体に生じる相互反射を考慮した反射率計測法を提案した。成分分離を行い相互反射を検出することにより、正確な反射率特性の導出が可能であることを実験で確認した。

今後の課題として、計測範囲すべてに相互反射が影響している場合においても計測できるような相互反射モデルの導入を考えている。

参考文献

- [1] 原健二, 西野恒, 池内克史 "透視投影と点光源下の鏡面反射からの光源位置と反射特性の推定," 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.SIG11, 2002.12
- [2] 町田貴史, 横矢直和 "相互反射を伴う物体表面反射特性の推定," 信学技法, Vol.101, 2002.2
- [3] 富永昌治, 岡山敏之 "ハイライトや相互反射の影響を含むカラー画像の解析法," 信学論 D-II, Vol.J80, No.6, 1997.6