

22C-8

レンジファインダと複数の照明条件を用いた  
物体の反射係数の推定

町田貴史 岩佐英彦 竹村治雄 横矢直和

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

## 1 はじめに

近年, CG 分野において現実物体と同様の写実性をもつ仮想物体を作成するための手法が盛んに研究されている. その中でも仮想物体の表面に実写画像をテクスチャとして張り付ける手法は, モデリングに必要なコストが低い上に写実性の高い仮想物体が生成可能な手法として注目されている. しかし, この手法では画像が撮影時の照明条件に依存するため, 仮想環境内での照明条件が撮影時と異なる場合に違和感が生じるという問題がある.

この問題を解決するために, カメラ位置と光源位置が既知のもとで, 物体の法線情報とテクスチャ画像から物体の反射特性を推定し, 仮想環境の照明条件による影響を忠実に表現する手法がある. その一つとして佐藤らは複数枚の実画像と距離データから, 物体の2つの反射特性である拡散反射係数と鏡面反射係数の推定を行っている [1]. しかし, レンジファインダと CCD カメラで計測したときに得られるサンプリング間隔の異なる距離データと実画像を使用するため, 両データ間の位置合わせ誤差が反射係数の推定値の誤差として現われる. また, 鏡面反射が画像内で密に観測できないことから, 鏡面反射係数が求まらなかった画素に関しては, 鏡面反射係数が求まった画素を用いて補間するため, 鏡面反射係数の推定に関して忠実性に欠ける.

本稿では, 位置合わせの問題を解決するため, 全周計測レンジファインダを使用する. また, 異なる照明条件を用いて画像内で鏡面反射を密に観測し, 2つの反射成分を分離して, それぞれの反射係数を独立に推定する手法について述べる. そして最後に, 単純な形状に対して提案手法の実験を行う.

## 2 物体の反射係数の推定

## 2.1 使用する反射モデル

一般に物体の反射特性は拡散反射と鏡面反射の2つの成分の和で表される. 拡散反射は光が物体表面に到達した場合に全方向に均一に反射する特性を持ち, 観測方向には依存しない. 鏡面反射は光が物体表面での正反射方向で強く観測され, 観測方向と正反射方向との間の角度が大きくなるにつれて, しだいに観測されなくなる特性を持ち, 観測される色は物体色によらず, ほぼ光源の色で観測される. 本稿では, この物体の反射特性を忠実にモデル化した次式の Torrance-Sparrow モデル [1][2][3] を用い反射係数

の推定を行う.

$$I = I_d + I_s \quad (1)$$

$$I_d = P_d \cdot \cos\theta_d \quad (2)$$

$$I_s = P_s \cdot \frac{1}{\cos\theta_v} \cdot \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (3)$$

ここで,  $I$  は観測された画像内の1画素の輝度で RGB 値 ( $I_r, I_g, I_b$ ) を持ち,  $I_d, I_s$  はそれぞれ拡散反射成分, 鏡面反射成分,  $P_d, P_s$  はそれぞれの成分の反射係数であり, RGB 値 ( $P_{dr}, P_{dg}, P_{db}$ ), ( $P_{sr}, P_{sg}, P_{sb}$ ) を持つ.  $\theta_d$  は光の照射方向と物体面の法線との間の角度,  $\theta_v$  は観測方向と物体面の法線との間の角度,  $\theta_r$  は正反射方向と観測方向との間の角度,  $\sigma$  は物体表面上の粗さをそれぞれ表している. ここで推定する未知変数は  $P_d, P_s, \sigma$  の3つである.

## 2.2 複数の照明条件と幾何形状を用いた反射成分の分離と拡散反射係数の推定

前節のモデルを使用するには, 反射係数を推定する対象物体の幾何形状と, その幾何形状に対応したテクスチャ画像の取得が必要となる. そこで本稿では, その2つを位置ずれなく, 物体の全周にわたって同時に計測可能な全周計測レンジファインダ Cyberware 3030RGB を使用する.

係数を推定する計算手法として, 観測される輝度値等を反射モデルに代入して最小2乗誤差法を適用する方法がある [2]. しかし, この手法では鏡面反射成分の輝度値が微小である場合, 解が不安定になることが報告されている. そこで本稿では, 画像内の輝度情報を式 (1) で表される  $I_d, I_s$  の2つの反射成分に分離した上で, それぞれの反射係数に対して信頼性の高い推定値を得るアプローチ [1] を採用する.

2つの反射成分を分離するためには, 2つの成分が個々に観測された画像が生成できればよい. しかし, 拡散反射成分は物体の表面で均一に観測される特性を持つため, 鏡面反射成分のみを観測することは不可能である. そこで, レンジファインダの周辺に複数の光源を設置して異なる照明条件で画像を取得する. この複数の画像における同じ位置の画素から, 拡散反射成分のみを含むものを用いて, 拡散反射係数を推定し, 拡散反射成分と鏡面反射成分の両方を含むものから, 拡散反射成分の輝度値の差分をとることで, 鏡面反射成分を抽出する. ここで, カメラと光源の位置および方向は既知であり, 光源は点光源とする. 以下に具体的な手順を示す.

複数の照明条件下での画像の取得:

図1のように, カメラの周囲に  $m$  個の点光源を配置する. 光源  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) を点灯して得た画像を  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  ( $x_{ik}$  は輝度値) とする.

拡散反射成分のみを含む情報 ( $X_{Id}$ ) の保存:

Estimation of Reflectance Parameters Using a Rangefinder under Multiple Illumination Conditions

Takashi Machida, Hidehiko Iwasa, Haruo Takemura, and Naokazu Yokoya

Nara Institute of Science and Technology (NAIST)  
8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-0101, Japan

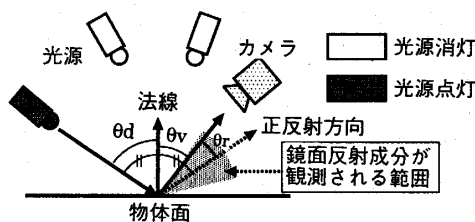


図1: 複数の照明条件下での物体計測

注目画素  $x_{ik}$  ( $i = 1, \dots, m$ ) における図1の角度  $\theta_r$  があるしきい値  $\theta_{th}$  より大きい場合, 注目画素は拡散反射成分のみを含む. 一般に  $\theta_d$  が大きくなると, 拡散反射成分の輝度値は小さくなり, 推定値の信頼性が低くなるため,  $\theta_r > \theta_{th}$  となる輝度値の中から  $\theta_d$  が最小のものを選択し, 拡散反射成分を表す輝度値と  $\theta_d$  を  $X_{Id}$  の  $k$  番目の値として保存する.

両反射成分を含む情報 ( $X_I$ ) の保存:

注目画素  $x_{ik}$  ( $i = 1, \dots, m$ ) における  $\theta_r$  がしきい値  $\theta_{th}$  以下の場合, 注目画素は両反射成分を含む. 一般に  $\theta_r$  が大きくなると, 鏡面反射成分の輝度値は急激に小さくなり, 推定値の信頼性が低くなるため,  $\theta_r \leq \theta_{th}$  となる輝度値の中から  $\theta_r$  が最小のものを選択し, その輝度値と  $\theta_d, \theta_r$  を  $X_I$  の  $k$  番目の値として保存する.

拡散反射係数の推定と鏡面反射成分の抽出:

以上により保存された  $X_{Id}$  の輝度値を式(2)の  $I_d$  とし,  $X_{Id}$  に保存された  $\theta_d$  から次式により各画素ごとに拡散反射係数  $P_d$  を求める.

$$P_d = \frac{I_d}{\cos\theta_d} \quad (4)$$

次に, 求めた  $P_d$  と  $X_I$  に保存された  $\theta_d$  から式(2)により,  $X_I$  の輝度値に関する拡散反射成分を求め,  $X_I$  の輝度値から, 求めた拡散反射成分の輝度値を引くことにより, 各画素の鏡面反射成分が抽出できる.

### 2.3 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

$\theta_r$  は, 前節で保存された値を用い, 法線とカメラの位置が既知であることから  $\theta_v$  が求まり, 前節で抽出した鏡面反射成分の各画素の輝度値を  $I_s$  として, 次の条件を満足する2つの画素に対して, 鏡面反射係数と物体の表面粗さ係数の推定を行う.

条件1:  $I_s$  の大きさが, あるしきい値より大きな画素.

条件2: 画素同士の距離が最小となる画素.

条件1は  $I_s$  が微小な場合の, 丸め誤差による0での除算を避けるため, 条件2は鏡面反射は物体色によらず, ほぼ光源の色で観測される特性から, 近傍にある画素は, 同様の鏡面反射係数と表面粗さを持つと仮定できるためである. これらの2つの輝度値とそれぞれの  $\theta_v, \theta_r$  を式(3)へ代入し, 次式の連立方程式から, 鏡面反射係数  $P_s$  と物体の表面粗さ係数  $\sigma$  の推定を行う. 番号1, 2の添字の付いた変数は, それぞれの画素に依存した値であることを表す.

$$\begin{cases} I_{s1} \cdot \cos\theta_{v1} = P_s \cdot \exp(-\theta_{r1}^2/2\sigma^2) \\ I_{s2} \cdot \cos\theta_{v2} = P_s \cdot \exp(-\theta_{r2}^2/2\sigma^2) \end{cases} \quad (5)$$

上述の条件外の画素や, 鏡面反射成分の求まらなかった画素に関しては, その画素の近傍で求まっている係数を用い, 線形に補間する.

### 3 実験

反射成分の分離手法の妥当性を確認するために, 3つの光源を用いて実験を行った. 鏡面反射成分を画像の広い範囲で観測するために物体はほぼ円筒状のマグカップとした. 物体は相互反射が発生しないものと仮定し, 2.2節のしきい値  $\theta_{th}$  は60度とした.

光源の位置はレンジファインダの左右で, 物体と光源との間の角度が120度より大きくなる位置にそれぞれ1つずつと, カメラの左隣に1つ設置した. これらの照明条件からほぼ全面に拡散反射成分と鏡面反射成分を観測できた. 図2はこれら3つの照明条件により得られた3枚の全周テクスチャ画像であり, これらから2つの反射成分の分離を行った.

図3は同じ照明条件に対しての, 左はデジタルカメラの撮影画像, 右は仮想物体のレンダリング画像である. 拡散反射成分がテクスチャとして観測されることや, 観測方向において実環境でのほぼ同じ位置に鏡面反射が発生していることから, 提案手法による反射係数の推定が妥当であることが確認できた.

### 4 まとめ

本稿では複数の照明条件を用いることにより, 拡散反射成分と鏡面反射成分を分離した画像と距離データから, 物体の反射係数を推定する手法を提案した. 今回は円筒形状の物体を計測対象としたが, 今後はより複雑な形状に対応するため, 光源の配置や数について再検討する予定である.

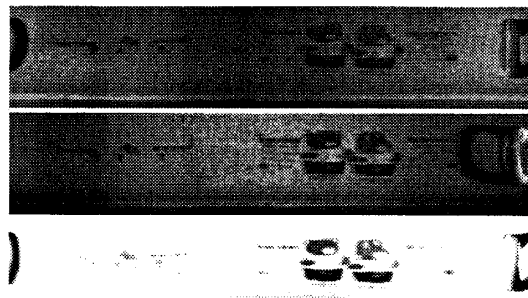


図2: 3つの照明条件下での全周テクスチャ画像

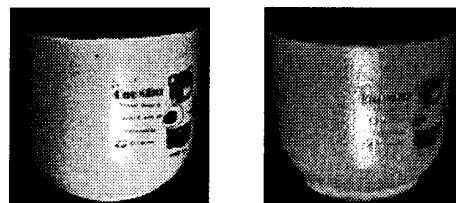


図3: 実画像(左)とレンダリング結果(右)

### 参考文献

- [1] Y. Sato, Mark D. Wheeler, and K. Ikeuchi: "Object shape and reflectance modeling from observation," SIGGRAPH '97, pp.379-387, 1997.
- [2] G. Kay and T. Caelli: "Inverting an illumination model from range and intensity maps," CVGIP: Image Understanding, Vol.59, pp.183-201, 1994.
- [3] K. Ikeuchi and K. Sato: "Determining reflectance properties of an object using range and brightness images," IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.13, No.11, pp.1139-1153, 1991.