

任意照明条件下におけるカラー画像の高速な生成手法の検討

5 L-6

沈 黎 馬場口 登 北橋 忠宏
大阪大学産業科学研究所

1 はじめに

異なる照明条件で撮影された複数の画像を用いて、仮想照明条件の画像を生成する技術は照明環境シミュレーションなど、様々な分野に応用が期待される。

Image-based Rendering に基づく仮想照明条件下での実画像の生成において、ハイライト部分を合成する処理は、物体形状や反射率などのパラメータを復元しないため、非常に難しい問題である。一方、Model-based Rendering に基づく画像生成は、精密な幾何モデルを必要とするため、モデルの作成に手間がかかるといった問題がある。そこで、3枚の入力画像を用いて、任意照明条件下における実画像を高速に生成する手法を検討する。本研究では、表面が2色性反射モデルを満足する限りいかなる材質にでも対応できる物体表面方向の推定法をルックアップテーブルを用いて実現する。同時に、3枚のカラー画像から拡散反射成分と鏡面反射成分を精度よく分離する方法を採用し、線形合成の係数を調整して目的とする画像を生成する。

2 拡散反射成分と鏡面反射成分の分離

2.1 反射モデル

2色性反射モデルによれば、観察した物体表面色は拡散反射成分 E_{body} と鏡面反射成分 $E_{specular}$ から構成される。これは以下の式によって表現される。

$$E(x) = E_{body} + E_{specular} \quad (1)$$

$$= W_d(x) E_d(x) + W_s(x) L$$

$E(x)$ はある画素 x で観察される物体表面の色ベクトルである。 $E_d(x)$ は拡散反射成分による物体色ベクトルで、 L は RGB 空間で光源色ベクトルである。 $W_d(x)$ と $W_s(x)$ は画素 x で各成分に対する角度による重みの係数である。ベクトル $E_d(x)$ と L は RGB 空間でカラー信号平面を定義し、全ての観察色ベクトル $E(x)$ はこの平面上に存在する。

光源色 L とある画素の物体色 $E_d(x)$ が分かれば、この点 x における $W_d(x)$ と $W_s(x)$ を求めることによって点 x の拡散反射と鏡面反射成分を分離することができる。

2.2 光源色の推定

光源色の推定は多平面の交差の手法[1]を利用する。例えば、同一光源の下で、物体表面に2つ異なった物体色があると仮定する。RGB空間で2つ異なったカラー信号平面を形成し、その交線ベクトルが光源色のベク

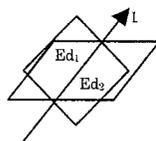


図1. 平面交差法

トルの方向と一致しなければならない。このように光

源色を推定することは、図1のように2つの平面の交線を見出す問題に帰着できる。従って、本手法は物体表面に2つ以上の色が付いている場合を対象とする。

2.3 物体色の推定

hybrid モデル[2]によると、物体表面の反射光 I は以下の式によって表現される。

$$I(\theta_s) = I_{body} + I_{specular}$$

$$= A' \cos(\theta_s \cdot \theta_n) + B' L(2\theta_n, \theta_s)$$

$$A' = \int s(\lambda) I_i(\lambda) C_d(\lambda) d\lambda$$

$$B' = C_s \int s(\lambda) I_i(\lambda) d\lambda$$

ここで、 I_{body} 、 $I_{specular}$ はそれぞれ反射光の拡散は反射成分、鏡面反射成分を表し、 $L(2\theta_n, \theta_s)$ は照明光の反射関数である。 $L(2\theta_n, \theta_s)$ は $2\theta_n < \theta_s - \alpha$ または $2\theta_n > \theta_s + \alpha$ の場合に0である。つまり、上の場合に観察される色は拡散反射成分しか含まない。ここで、入力画像はそれぞれ図2のような3つの一次独立な光源方向で撮る。

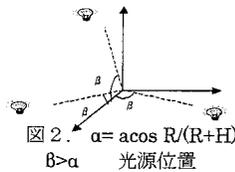


図2. $\alpha = \arccos R/(R+H)$
 $\beta > \alpha$ 光源位置

$\beta > \alpha$ を保証するために θ はできるだけ大きく設定する。その結果、ある画素 x における観察色に反射成分のみを含む画像が、3枚の入力画像のうち必ず1つ存在する。その画素値を利用することにより画素 x の物体色を推定可能となる。

2.4 分離手順

拡散反射成分と鏡面反射成分の分離手順を以下に示す。

1. 光源色 L を推定する。
2. 各画素について 3 枚の画像の中に輝度値が最小のもの観察色を物体色 $E_d(x)$ として推定する。
3. L と $E_d(x)$ に基づく $W_d(x)$ と $W_s(x)$ を求め、各画素の拡散反射成分と鏡面反射成分の分離する。

3 物体表面法線方向の推定

仮想照明条件下の鏡面反射成分を生成するため、物体表面法線方向の推定について述べる。ここで、法線方向を経緯度、すなわち $\vec{N}(\phi_N, \theta_N)$ で表す。

3.1 Photometric Stereo 法

光源方向が一次独立な3枚の拡散反射画像が存在する場合、Photometric Stereo 法を利用することにより、物体表面方向を推定可能である。しかしながら、計算量が多いという問題がある。

池内らはルックアップテーブルによる高速な Photometric Stereo 法[3]を提案した。彼らの手法では、ある球体を位置の異なる3枚の画像として撮影する。球体は表面において拡散反射のみが発生するガウス球面であると仮定し、球体表面の各点における法線方向 $\vec{N}(\phi_N, \theta_N)$ と各画像における輝度の組 (E_1, E_2, E_3) を計測する。この上で、この輝度の組から $\vec{N}(\phi_N, \theta$

n)を導出するルックアップテーブルを計算機に記憶しておくのである。これによって物体の表面方向を計算する処理がルックアップテーブルの探索によって実現されるため、処理の高速化が図れる。

しかし、この手法はルックアップテーブルを作る球体の表面材質と観測物体の表面材質と同じでなければならない、さらに様々な色が含まれる物体表面には対応できないという問題がある。ここで、我々は luminance sphere を用いてルックアップテーブルを作成し、それに基づいて表面方向を計算する手法を提案する。本手法で用いるルックアップテーブルでは、表面が2色性反射モデルを満足する限り、どのような材質の物体にも適用可能となる。

3.2 luminance sphere によるルックアップテーブル

同じ光源組の下で、観測物体表面にある面素と球体表面にある面素の法線方向ベクトル N は一致すると仮定する。 L_1, L_2, L_3 を独立な3つの光源方向ベクトルとする。 E_1, E_2, E_3 をそれぞれこの3つの光源方向下に面素の輝度値とする。 ρ をこの点の反射率とする。 ρ はこの点における材質及び色によって変化する。この2つの点の反射率が異なっている場合、以下の式を満足する。

Sphere	Object
$E_1 = \rho_s L_1 \cdot N$	$e_1 = \rho_o L_1 \cdot N$
$E_2 = \rho_s L_2 \cdot N$	$e_2 = \rho_o L_2 \cdot N$
$E_3 = \rho_s L_3 \cdot N$	$e_3 = \rho_o L_3 \cdot N$

$$\frac{E_1}{e_1} = \frac{E_2}{e_2} = \frac{E_3}{e_3} = \frac{\rho_s}{\rho_o} = C$$

すなわち、 (e_1, e_2, e_3) は必ず (E_1, E_2, E_3) を定義した直線上に存在する。ここで、 (E_1, E_2, E_3) を輝度座標の単位球体表面にマッピングする。本手法で、この単位球体は luminance sphere と呼ぶ。輝度値はすべて正数であるため、luminance sphere を実際には $1/4$ の球体とする。 (ϕ_L, θ_L) を用いて $\vec{E} (E_1, E_2, E_3)$ を表す。このように $\vec{E} (\phi_L, \theta_L) \leftrightarrow \vec{N} (\phi_N, \theta_N)$ の一対一対応関係を得る。これによって作成したルックアップテーブルは反射率に影響されない。

3.3 推定の手順

1. 石膏による球体をガウス球面として用いる。同じ光源組の下で光源方向独立な3枚の画像を撮影し、ルックアップテーブルを作る。
2. ルックアップテーブルを用いて、3枚の物体の拡散反射画像から物体の表面方向を推定する。

2つの光源組が違う場合は、ルックアップテーブルの線形変化によって、2つの光源組を一致させる。さらに、このルックアップテーブルを用いて、物体の表面方向を推定する。

4 実験

本手法を計算機上に実装し、実験的に検証する。実験環境を図3に示す。2.3節に述べたように、 $\theta > \alpha$ を保証するために θ はできるだけ大きく設定する。ここでは、光源位置を $(120, 10, 140)$ cm, $(0, 130, 190)$ cm と $(-120, 10, 140)$ cm に設定する。表面が滑らかな陶器

製の置物を観測対象物体として用いた。

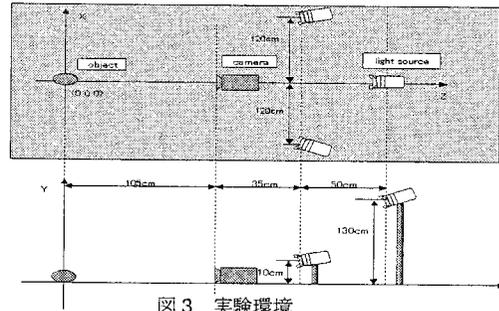


図3 実験環境

1. まず、光源を一つ点灯した状態でガウス球面と仮定した石膏球体に関して、光源方向独立な3枚の画像を撮る。この3枚の画像から $\vec{E}(\phi_L, \theta_L) \leftrightarrow \vec{N}(\phi_N, \theta_N)$ のルックアップテーブルを作って、計算機に保存する。
2. 同じ光源組の下で3枚の物体画像を撮る。この3枚の入力画像から拡散反射成分と鏡面反射成分を分離する。
3. 分離した拡散反射画像を用いて、線形結合により、仮想光源方向 $(50, 100, 90)$ cm の実画像の拡散反射成分を合成する。
4. ルックアップテーブルを用いて、3枚の拡散反射画像から物体の表面方向を推定する。
5. 推定した表面方向と仮想光源を用いて、Phong モデルによって仮想実画像の鏡面反射成分を生成する。合成した画像と実画像は図4に示す。



合成した画像



光源方向(50 100 90)cmの実画像

図4 実験結果

5 まとめ

本研究では、3枚の入力画像を用いて、任意照明条件下における実画像を高速に生成する手法は検討した。本手法は、計算量や入力画像の枚数が少なくてすむという特徴がある。しかしながら、結果が3枚の入力画像における表面方向の推定結果に依存するため物体表面に自身の影が生じる場合や相互反射が発生する物体には適用できない。また、カメラから得られた画素値の変化は非線形となるため誤差が生じることが判明した。

参考文献

- [1] S. Tominaga, "Analysis of object color images using a reflection model," *Journal of Television Engineers*, vol. 50, pp. 575-585, 19
- [2] K. Nishino, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Eigen Texture Method: Appearance Compression based on 3C Model," in *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 618-624, June 1999.
- [3] K. Ikeuchi, *Determination of Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method*, IEEE-PAMI, 1981.