

カメラレスポンス関数未知の光源分布推定

大田秀弥 岡部孝弘

九州工業大学 情報工学部 知能情報工学科

1 はじめに

シーンの光源環境を計測・推定することは、拡張現実感や複合現実感などにおいて光学的整合性を実現するために重要である。シーンの形状と反射特性を既知として、画像からシーンの光源環境を推定する技術は、**インバースライティング** [3] と呼ばれる。鏡面球などを用いた能動的な光源環境の計測 [1] に対して、インバースライティングは、受動的な光源環境の推定であり、比較的単純なシーンに限定されるものの、与えられた一枚の画像からでも光源環境を推定できるという利点がある。

従来、インバースライティングは、画素値がシーンの放射輝度、つまり、シーンの物理的な明るさに比例していることを仮定していた。画素値と放射輝度の関係は、**カメラレスポンス関数** (以下、簡単のためにレスポンス関数と呼ぶ) により記述され、上記の仮定はレスポンス関数が線形であることを意味する。しかしながら、一般に、民生用カメラはレスポンス関数が非線形であることから、従来手法は、線形のレスポンス関数を持つマシンビジョン用カメラを用いるか、民生用カメラのレスポンス関数を事前に較正する必要があった。そこで本研究では、未知で非線形のレスポンス関数を持つ民生用カメラで撮影された一枚の画像から光源分布を推定する手法を提案する。

2 従来手法

インバースライティングでは、被写体が無限遠方にある光源に照らされていると仮定する。そして、被写体を中心とする球座標において (θ, ϕ) の方向から被写体に入射する光の強度 $L(\theta, \phi)$ を推定する。

具体的には、まず、光源分布 $L(\theta, \phi)$ を基底光源 $L_n(\theta, \phi)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) の線形結合

$$L(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \alpha_n L_n(\theta, \phi) \quad (1)$$

で表現する。ここで α_n は光源分布の結合係数である。

次に、被写体の形状と反射特性を既知として、基底光源に照らされた被写体の画像 $\mathbf{R}(L_n(\theta, \phi))$ を生成する。このとき、重ね合わせの原理により、入力画像の p ($p = 1, 2, 3, \dots, P$) 番目の画素の画素値 (線形のレス

ポンス関数を仮定すると放射輝度に等しい) I_p は、

$$I_p = \sum_{n=1}^N \alpha_n R_p(L_n(\theta, \phi)) \quad (2)$$

のように表現される。

一枚の画像の各画素について式 (2) の拘束が得られるので、 $P > N$ のとき、一般に、光源分布の結合係数 α_n を推定することができる。推定された係数を式 (1) に代入することで、光源分布 $L(\theta, \phi)$ が得られる。

3 提案手法

提案手法では、未知のレスポンス関数と未知の光源分布を、一枚の画像から**同時に推定**する。

3.1 基底光源

被写体の反射特性が Lambert モデル従い、かつ、被写体の形状が凸であると仮定する。このとき、任意光源分布における被写体の画像は、低次の**球面調和関数**を基底光源としたときの 9 枚の画像の線形結合で近似的に表現できることが知られている [4]。提案手法でも、Lambert モデルと凸物体を仮定して、低次の球面調和関数 $Y_n(\theta, \phi)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, 9$) を基底光源とする。但し、Lambert モデルと凸物体を仮定すると、光源分布の高周波数成分が画素値にほとんど寄与しないために、逆に、画像から光源分布の高周波数成分を推定することもできない。

3.2 カメラレスポンス関数

レスポンス関数 f により、放射輝度 I が画素値 I' に $I' = f(I)$ のように変換されるものとする。関数 f は単調増加関数なので、画素値を放射輝度に $I = g(I')$ のように変換する逆変換 g (逆レスポンス関数) が存在する。提案手法では、逆レスポンス関数を表現するために、Grossberg ら [2] の**統計モデル** (Empirical Model of Response: EMoR) を用いる。EMoR は、実際の逆レスポンス関数のデータに主成分分析を適用して求めたモデルで、逆レスポンス関数を

$$I = g(I') = g_0(I') + \sum_{m=1}^M \beta_m g_m(I') \quad (3)$$

のように近似的に表現することができる。ここで g_m は固有ベクトル、 β_m は逆レスポンス関数の結合係数である。また、逆レスポンス関数も単調増加 $g(I') <$

$g(I'+1)$ であることから, 任意の画素値 I' に対して, 結合係数は

$$g_0(I') + \sum_{m=1}^M \beta_m g_m(I') < g_0(I'+1) + \sum_{m=1}^M \beta_m g_m(I'+1) \quad (4)$$

を満たさなくてはならない.

3.3 同時推定

式 (2) の左辺に逆レスポンス関数の線形結合表現を, 右辺に球面調和関数を基底光源とする光源分布の線形結合表現を用いると,

$$g_0(I'_p) + \sum_{m=1}^M \beta_m g_m(I'_p) = \sum_{n=1}^N \alpha_n R_p(Y_n(\theta, \phi)) \quad (5)$$

が得られる. したがって,

$$\sum_{p=1}^P \left[g_0(I'_p) + \sum_{m=1}^M \beta_m g_m(I'_p) - \sum_{n=1}^N \alpha_n R_p(Y_n(\theta, \phi)) \right]^2 \quad (6)$$

を式 (4) の拘束条件の下で最小化することで, 光源分布の結合係数 α_n と逆レスポンス関数の結合係数 β_m が得られる.

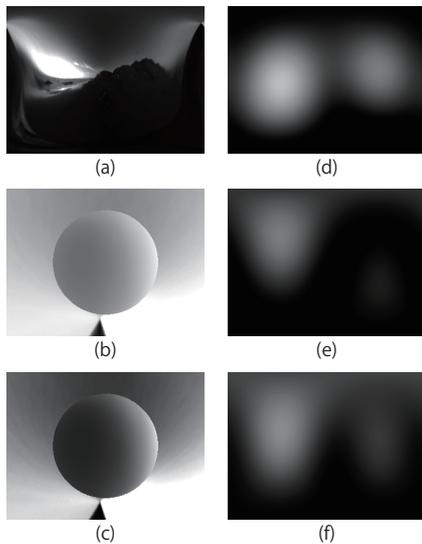


図 1: 入力画像と推定結果 (beach)

4 実験

合成画像を用いたシミュレーション実験を行った. 図 1(a) に示した HDR の光源データ [1] を用いてレスポンス関数が線形の場合の入力画像 (b) と非線形の場合の入力画像 (c) を作成した. レスポンス関数が線形の画像に従来手法を適用して得られた光源分布を (d) に, レスポンス関数が非線形の画像に従来手法と提案手法を適用して得られた画像を (e) と (f) に示した.

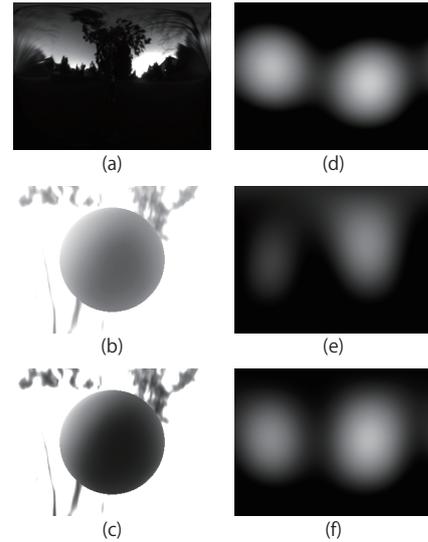


図 2: 入力画像と推定結果 (campus)

Lambert モデルと凸物体を仮定した光源分布推定では, 3.1 節で述べたように光源分布の高周波数成分を推定することができない. そのため, 従来手法をレスポンス関数が線形の画像に適用した理想的な場合であっても, 図 1(d) のような低周波数成分までしか推定できない. レスポンス関数が非線形の場合の結果を比較すると, 従来手法 (e) よりも提案手法 (f) の方が, 理想的な場合 (d) により近い光源分布が得られることが分かる. 図 2 に示したように, 他の光源分布についても, 同様の結果が得られた. これらの結果から, 定性的には, 提案手法が従来手法よりうまく働くことが分かる.

5 最後に

本稿では, 未知で非線形のレスポンス関数を持つ民生用カメラで撮影された一枚の画像から光源分布を推定するための手法を提案した. 実画像実験と定量的評価は今後の課題である.

参考文献

- [1] P. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography", ACM SIGGRAPH 98, pp.189–198, 1998.
- [2] M. Grossberg and S. Nayar, "What is space of camera response functions?", In Proc. of CVPR2003, pp.602–609, 2003.
- [3] S. Marschner and D. Greenberg, "Inverse lighting for photography", IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference, pp.262–265, 1997.
- [4] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, "An efficient representation for irradiance environment maps", SIGGRAPH 2001, pp.497–500, 2001.