

拡散反射板を用いた光源の放射輝度分布の計測

河村 拓哉^{1,a)} 岡部 孝弘^{1,b)} 佐藤 洋一^{1,c)}

概要: 光源環境の計測・推定は、CVにおけるイメージベースドモデリングやCGにおける写実的画像生成などにおいて重要である。従来、CVやCGの分野では、無限遠方光源（平面波/平行光線）や点光源（球面波）などの理想的な光源を仮定した画像の解析・生成が行われてきた。ところが、実世界の光源は、被写体から有限の距離に存在し、かつ、非等方的に光を放射することが多い。そこで本稿では、実世界光源からの放射輝度を推定する手法を提案する。具体的には、光源の周囲で拡散反射板を動かしたときに観察される反射光の明るさを手掛かりにして、光源からの放射輝度の角度分布を計測する。実画像実験により、提案手法がうまく働くことを確認するとともに、テクスチャ推定への応用を通して、実世界光源の放射輝度分布を獲得することの重要性を示した。

1. はじめに

物体の見えは、物体の形状や反射特性だけでなく、シーンの光源環境にも依存する。したがって、物体の形状や反射特性の推定などのCVにおけるイメージベースドモデリング、および、CGやAR・MRにおける写実的画像生成・融合において、光源環境を計測・推定することは極めて重要である。

従来、CVやCGの分野では、無限遠方光源（平面波/平行光線）（図2a）や点光源（球面波）（図2b）などの理想的な光源を仮定した画像の解析・生成が行われてきた。例えば、物体の形状復元や反射特性の推定においては、平行光線や点光源などの理想的な光源を仮定して、それらの明るさと方向・位置を予め校正したり計測・推定したりしていた。ところが、実世界の光源は、被写体から有限の距離に存在し、かつ、非等方的に光を放射することが多く、理想的な光源とは異なる特性を有する。

そこで本稿では、実世界光源からの放射輝度の角度分布を推定する手法を提案する。具体的には、大きさの無視出来る微小な光源を仮定して、拡散反射板・半球面鏡・マーカーからなるサンプリングボードを光源の周囲で動かしながら画像を撮影して、半球面鏡上のハイライトを手掛かりにして光源の位置を、拡散反射板上の拡散反射光の明るさを手掛かりにして放射輝度分布を推定する（図1）。提案手法には、ゴニオフォトメーターなどの特殊な機器を必要

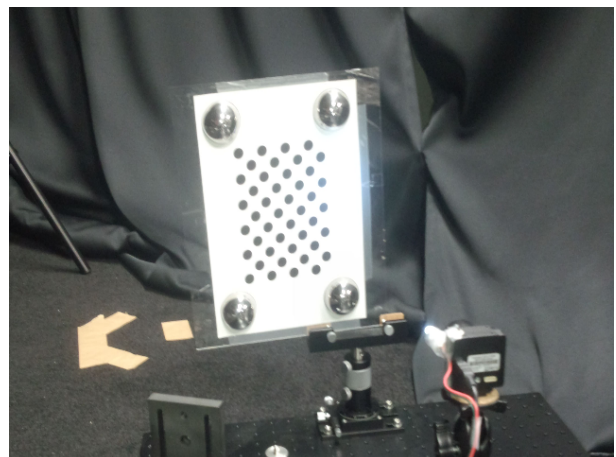


図1 計測システム。カメラでサンプリングボードの画像を撮影する。

とせずに、放射輝度分布を簡便に獲得出来るという利点がある。

実画像実験により、提案手法が実世界光源の放射輝度分布を精度良く獲得できることを確認した。また、テクスチャ推定への応用を通して、実世界光源の非等方的な放射輝度分布を獲得することが、CVへの応用に重要であることを示した。

本稿の構成は以下の通りである。2節では、光源環境の計測・推定に関する従来研究をまとめる。3節で本研究で用いる光源のモデルについて述べ、4節で提案手法を説明する。5節で実験結果を示し、6節でテクスチャ推定への応用を紹介する。最後に、7節でむすぶ。

2. 先行研究

光源環境の計測・推定手法は、(i) シーン中のある点（傾

¹ 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

a) t-kawa@iis.u-tokyo.ac.jp

b) takahiro@iis.u-tokyo.ac.jp

c) ysato@iis.u-tokyo.ac.jp

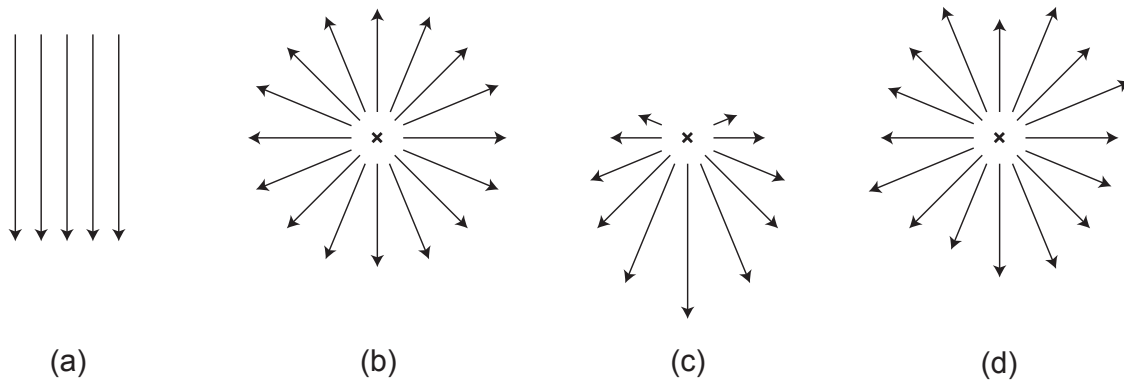


図 2 放射輝度モデル. (a) 平行光線. (b) 等方的に放射する光源. (c) 砲弾型 LED. (d) 斑のある点光源

域) への入射輝度を計測・推定するアプローチと, (ii) シーン中のある点 (領域) からの放射輝度を計測・推定するアプローチの二つに分類することが出来る.

前者として, 光源環境を能動的・直接的に計測する手法がある. Debevec [1] は, 球面鏡のハイダイナミックレンジ画像から, シーンから球面鏡への入射輝度の角度分布を求めている. また, シーンの形状が既知の場合には, 獲得した入射輝度分布をシーンの形状に貼り付けることで, 3次元的光源分布が得られることを示している. Sato ら [2] は, 全方位カメラを用いて撮影した画像から, シーンから全方位カメラへの入射輝度の角度分布を求めている. また, ステレオ撮影することで, 3次元シーンの光源分布が得られることを示している. これらの研究は, 仮想物体への入射輝度を獲得して仮想物体に違和感の無い陰影を与えるといった AR への応用に有効であることが示されている. と
ところが, これらの研究は, 光源が等方的に光を放射することを仮定しており, 非等方的に光を放射する光源を扱うことが出来ない.

前者として, 光源環境を受動的に推定する, いわゆるインバースライティングと呼ばれる手法もある. 例えば, Marschner と Greenberg [3] は, ランバートモデルに従う物体の形状が既知のときに, 物体表面上で観察される拡散反射成分を手掛かりにして光源環境を推定する手法を提案した. 近年, インバースライティングの研究は盛んに行われているが, いずれの手法も無限遠方光源や点光源などの理想的な光源を仮定しており, 非等方的に光を放射する光源を扱うことが出来ない.

後者として, 提案手法と同じく, 大きさの無視出来る微小な光源からの放射輝度分布を獲得している研究がある. Verbeck と Greenberg [4] は, ゴニオフォトメーターを用いて, 光源から放射輝度を方向ごとに計測している. しかしながら, この手法はゴニオフォトメーターという特殊な機器を必要とし, また, 方向ごとに計測を行うために膨大

な時間を必要とする.

上記の関連研究と比較して, 提案手法は, 実世界光源からの放射輝度を計測する手法であり, 非等方的に光を放射する光源を扱うことが出来る. また, 提案手法には, 特殊な機器を必要とせず, 放射輝度の角度分布を簡便に獲得出来るという利点がある.

なお, 後者として, 大きさの無視出来ないような光源からの放射輝度分布, つまり, 4次元ライトフィールドを獲得している研究もある. Goesele ら [5] は, 光源からの放射光が2次元のフィルタを透過した様子を2次元画像を撮影することで, ある程度の大きさを持つ実世界光源の放射輝度の4次元ライトフィールドを計測している. 本稿では, 大きさの無視出来る光源を扱っていることから, 光源の特性は4次元ではなく2次元のライトフィールド (放射輝度の角度分布) で記述される. 4次元ライトフィールドの獲得は, 物体の形状や反射特性の推定などの CV への応用には必ずしも重要ではないと思われるが, 写実的画像生成などの CG への応用には極めて重要であることから, 今後の課題である.

3. 光源のモデル

本研究では, 大きさの無視出来る光源を扱う. 図2に示したように, 理想的な点光源 (b) が光を等方的に放射するのに対して, 実世界の光源は光を等方的に放射しては限らない. 例えば, 砲弾型 LED のような光源 (c) から放射される光の強さは, 指向性が強いことが知られている. また, 白熱電球のような光源 (d) から放射される光の強さは, 指向性は比較的弱いものの, ガラスバルブの不均一さに起因するムラを有することが多い. 本研究の目的は, 実世界光源から放射される光の強さの角度分布を計測すること, つまり, 上記のような非等方性を捉えることにある.

本研究では, 光が空間中の一点から放射されていると仮定して, その位置 (光源の位置) を c とする. 光源から放

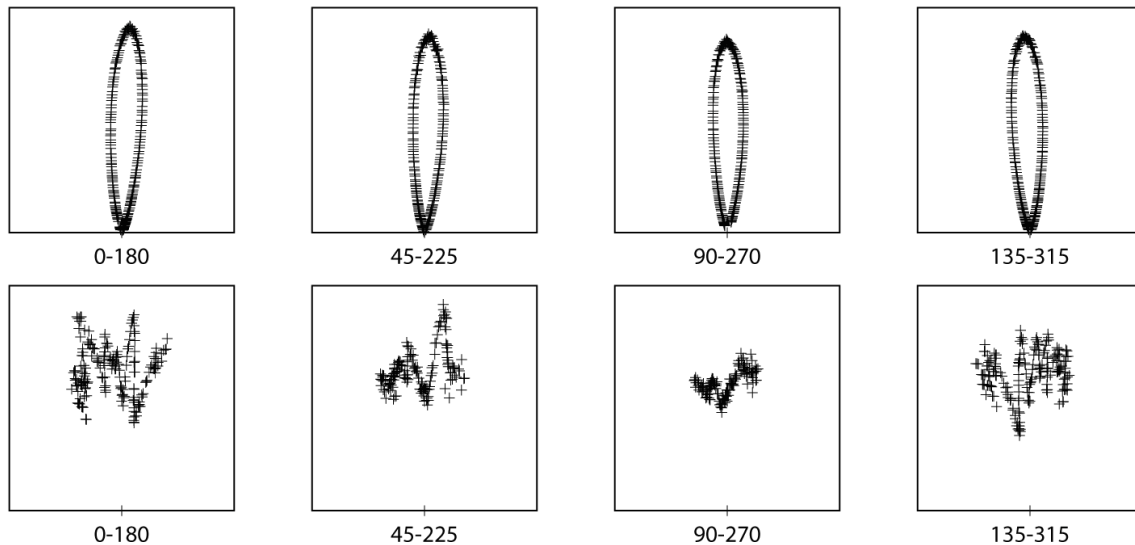


図 3 実験によって獲得した放射輝度分布. 上段: 砲弾型 LED. 下段: 白熱電球

射される光の強さは、光源の位置 \mathbf{c} を中心とする単位球面上を (θ, ϕ) 方向に通過するイラディアンズ、つまり、単位球面上の単位面積あたりの放射束 $L(\theta, \phi)$ を用いて記述する。ここで θ と ϕ は、光源の位置 \mathbf{c} を中心とする極座標系の天頂角と方位角であり、 $\theta = 0$ の方向と $\phi = 0$ の方向は 4.3 節で述べるように定める。以下の議論では、簡単のために、 $L(\theta, \phi)$ を放射輝度の角度分布、もしくは、放射輝度分布と呼ぶ。

光源から放射される光のイラディアンズは、光源からの距離の二乗に反比例して減衰する。したがって、空間中の位置 \mathbf{x} を通過する光の進行方向を表す単位ベクトル $\mathbf{l}(\mathbf{x})$ を

$$\mathbf{l}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{x} - \mathbf{c}}{|\mathbf{x} - \mathbf{c}|} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

とすると、光の強さ、つまり、進行方向に垂直な単位面積あたりの放射束 $E(\mathbf{x})$ は

$$E(\mathbf{x}) = \frac{L(\theta, \phi)}{|\mathbf{x} - \mathbf{c}|^2} \quad (2)$$

で与えられる。以下の議論では、簡単のために、 $E(\mathbf{x})$ と $-\mathbf{l}(\mathbf{x})$ をそれぞれ、位置 \mathbf{x} から見た光源の明るさと方向と呼ぶ。

4. 提案手法

4.1 概要

本節では、光源からの放射輝度の角度分布 $L(\theta, \phi)$ と光源の位置 \mathbf{c} を推定するための手法を提案する。提案手法では、光源とカメラを固定して、サンプリングボードと呼ばれる被写体を光源の周囲で動かしながら画像を撮影する (図 1)。

サンプリングボードは、図 1 のように、位置と姿勢のキャ

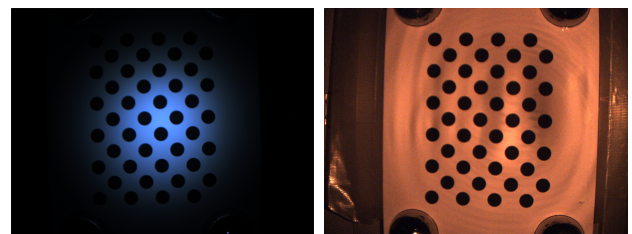


図 4 入力画像例. 左: 砲弾型 LED. 右: 白熱電球

リブレーションのためのマーカー、光源の位置を推定するための 4 つの半球面鏡、イラディアンズを観察するための拡散反射板からなる。実際には、白のマット紙に黒のドットパターンを印刷して、白い領域を拡散反射板とみなす。

提案手法では、以下の手順で光源の位置と放射輝度の角度分布を推定する。まず、Zhang [6] の手法を用いて幾何学的キャリブレーションを行い、サンプリングボードの位置と姿勢を求める。次に、4.2 節で述べるように、半球面鏡上で観察されるハイライトを手掛かりにして、光源の位置を推定する。最後に、4.3 節で述べるように、拡散反射板上で観察される拡散反射光の明るさを手掛かりにして、放射輝度の角度分布を推定する。以下、特に断りのない限り、カメラ座標系を仮定する。

4.2 光源位置の推定

サンプリングボード上の半球面鏡の位置を既知とする。 n 枚目 ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) の画像における m 番目 ($m = 1, 2, 3, 4$) の半球面鏡上でハイライト領域を検出して、その重心 (反射点) の 3 次元座標を \mathbf{p}_{nm} とする。光源からの光は反射点において鏡面反射することから、反射点 \mathbf{p}_{nm} から見た光源の方向 \mathbf{l}_{nm} は

$$\mathbf{l}_{nm} = \frac{\mathbf{p}_{nm}}{|\mathbf{p}_{nm}|} - 2 \left(\frac{\mathbf{p}_{nm}^T \mathbf{n}_{nm}}{|\mathbf{p}_{nm}|} \right) \mathbf{n}_{nm} \quad (3)$$

で与えられる。ここで \mathbf{n}_{nm} は、反射点 \mathbf{p}_{nm} における半球面鏡の法線である。

光源は、 t_{nm} を適当なスカラーとしたとき、 $\mathbf{p}_{nm} + t_{nm}\mathbf{l}_{nm}$ で表現される直線上に存在する。合計で $4N$ 本の直線が得られるが、キャリブレーションの誤差などのために、これらの直線は一点では交わらないので、

$$\hat{\mathbf{c}} = \arg \min_{\mathbf{c}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^4 [\mathbf{c} - (\mathbf{p}_{nm} + t_{nm}\mathbf{l}_{nm})]^2 \quad (4)$$

のようにして、二乗誤差を最小とするような光源位置を求める。

n 枚目の画像の m 番目の半球面鏡に関する二乗誤差は、 $t_{nm} = (\mathbf{p}_{nm} - \mathbf{c})^T \mathbf{l}_{nm}$ のときに最小になる。この t_{nm} を式 (4) に代入すると、光源位置 \mathbf{c} の推定は線形最小二乗法に帰着するため、容易に最適解を得ることが出来る。

4.3 放射輝度の角度分布の推定

提案手法では、光源からの放射輝度の角度分布 $L(\theta, \phi)$ の離散的なデータ (ルックアップテーブル) を獲得する。光源位置を中心とする極座標系 (θ, ϕ) について、カメラ座標系の z 軸方向を $\theta = 0$ 、 x 軸方向を $\phi = 0$ とする。このとき、ある方向 (θ_s, ϕ_s) ($s = 1, 2, 3, \dots, S$) における放射輝度 $L(\theta_s, \phi_s)$ は、以下のようにして求められる。

サンプリングボードの位置と姿勢が校正済みで、かつ、光源の位置が推定済みであることから、光源位置 \mathbf{c} から (θ_s, ϕ_s) 方向に伸びる直線と n 枚目の画像における拡散反射板との交点 \mathbf{x}_{sn} 、ならびに、その点の画素値 $I(\mathbf{x}_{sn})$ が得られる。拡散反射板の反射特性がランバートモデルに従うと仮定すると、3節の議論から、画素値は

$$I(\mathbf{x}_{sn}) = -E(\mathbf{x}_{sn}) \mathbf{l}^T(\mathbf{x}_{sn}) \mathbf{n}_n \quad (5)$$

$$= \frac{L(\theta_s, \phi_s)}{|\mathbf{c} - \mathbf{x}_{sn}|^2} \frac{(\mathbf{c} - \mathbf{x}_{sn})^T \mathbf{n}_n}{|\mathbf{c} - \mathbf{x}_{sn}|} \quad (6)$$

のように記述される^{*1}。ここで \mathbf{n}_n は、 n 枚目の画像における拡散反射板の法線である。したがって、 n 枚目の画像から推定される放射輝度 $L_n(\theta_s, \phi_s)$ は

$$L_n(\theta_s, \phi_s) = \frac{|\mathbf{c} - \mathbf{x}_{sn}|^3 I(\mathbf{x}_{sn})}{(\mathbf{c} - \mathbf{x}_{sn})^T \mathbf{n}_n} \quad (7)$$

で与えられる。

合計で N 枚の画像を用いるため、例えば、全ての交点 \mathbf{x}_{sn} ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) が拡散反射板上に存在する場合には、

$$L(\theta_s, \phi_s) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_n(\theta_s, \phi_s) \quad (8)$$

のようにして平均を取って、放射輝度の推定値とする。

^{*1} 拡散反射板の拡散反射率は一律であると仮定して考慮しない。また、物理的な明るさ (撮像素子に入射する光のエネルギー) と画素値の間の比例係数も考慮しない。したがって、提案手法により得られる放射輝度分布は、標準的な単位系で記述される放射輝度分布と比例関係にある。

5. 実験

実験では、前節で述べたように、サンプリングボードを動かしながら撮影した画像 (図4) を用いて、半球面鏡上のハイライトを手掛かりにして光源の位置を、拡散反射板上の明るさを手掛かりにして放射輝度分布を推定した。撮影には、Point Grey 社の Chameleon を用いた。

図3に、2種類の光源について、獲得した放射輝度分布を示す。図は、放射輝度分布のスライスを2次元空間で表現したものであり、方位角 ϕ を固定して天頂角 θ を動かしたときの $(L(\theta, \phi) \sin \theta, L(\theta, \phi) \cos \theta)$ をプロットしている。左から順に、 $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ 、 $\phi = 45^\circ, 225^\circ$ 、 $\phi = 90^\circ, 270^\circ$ 、 $\phi = 135^\circ, 315^\circ$ である。なお、 $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ であるが、一部の θ に関しては、カメラの視野角等の制限のために、データが欠損している。上段は、砲弾型LEDに対する結果であり、放射輝度分布が強い指向性を持つことが分かる。下段は、白熱電球に対する結果であり、放射輝度分布の指向性は比較的弱いものの、局所的なムラが大きいことが分かる。

提案手法により放射輝度分布が正確に獲得出来ていることを確認するために、簡単な画像合成の実験を行った。具体的には、放射輝度分布の獲得のために用いた画像とは異なるサンプリングボードの画像を、獲得した放射輝度分布を用いて再現した。図6に、実画像 (左) と合成画像 (右) を示す。ただし、下段の白熱電球から合成した画像は視認しやすくするため実際の画像より明るく表示している。画素値の二乗誤差は、255階調の画像に対してそれぞれ1.93と1.43であり、提案手法によって放射輝度を精度良く獲得出来ていることが分かる。

6. 応用

実世界光源の放射輝度分布を獲得することの重要性を示す応用として、テクスチャ推定を行った。実験では、被写体の反射特性がランバートモデルに従うと仮定して、被写体表面上の各点における拡散反射率を推定した。具体的には、被写体の形状・位置・姿勢が既知であると仮定して、位置と放射輝度分布が既知の光源の下で撮影された一枚の画像から、拡散反射率を推定した。

被写体表面上の点 \mathbf{x} における画素値 $I(\mathbf{x})$ は、拡散反射率を $\rho(\mathbf{x})$ 、法線を $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ として、

$$I(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) \times \frac{L(\theta, \phi)}{|\mathbf{c} - \mathbf{x}|^2} \frac{(\mathbf{c} - \mathbf{x})^T \mathbf{n}(\mathbf{x})}{|\mathbf{c} - \mathbf{x}|} \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 (θ, ϕ) は $(\mathbf{x} - \mathbf{c})$ の方向を表す極座標である。被写体の形状・位置・姿勢と光源の位置・放射輝度分布が既知であることから、 \mathbf{x} 、 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ 、 \mathbf{c} 、および、 $L(\theta, \phi)$ も既知である。したがって、被写体表面上の点 \mathbf{x} における拡散反射率 $\rho(\mathbf{x})$ は、

$$\rho(\mathbf{x}) = \frac{I(\mathbf{x}) |\mathbf{c} - \mathbf{x}|^3}{L(\theta, \phi) (\mathbf{c} - \mathbf{x})^T \mathbf{n}(\mathbf{x})} \quad (10)$$

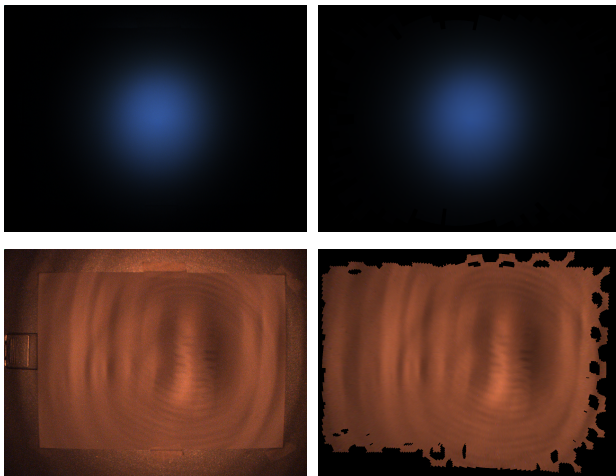


図5 画像合成の結果. 左: 実画像. 右: 獲得した放射輝度分布で合成した画像.

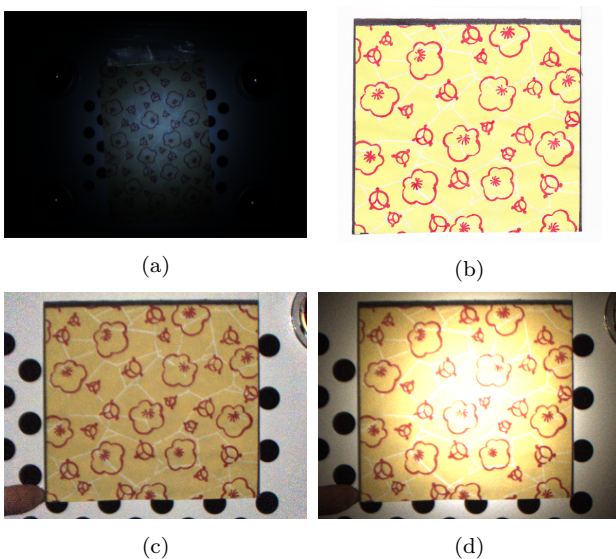


図6 テクスチャ推定の結果. (a) 入力画像. (b) 平行光線の下で撮影された画像. (c) 獲得した光源を用いて推定した結果画像. (d) 理想的な点光源を仮定した推定結果.

で与えられる.

実験では, 平面に和紙を貼り付けたものを被写体とし, 5節で放射輝度分布を獲得した砲弾型LEDを光源とした. 図6に, (a) 入力画像, (b) 平行光線の下で撮影された画像, (c) 提案手法により推定した結果, および, (d) 理想的な点光源を仮定して推定した結果を示す. なお, 理想的な点光源は, 式(10)において $L(\theta, \phi)$ を一定にしたものに相当する. 提案手法による推定結果は, 入力画像の陰影をうまく除去出来ており, 光源色の違いによる若干の差異を除けば, 平行光線下の画像と類似している. 一方, 理想的な点光源を仮定した推定結果は, 強い指向性を持つLED光源による陰影を除去出来ておらず, 中央部分の反射率が大きく推定されている.

7. むすび

本稿では, 特殊な機器を用いずに, 大きさの無視出来る

光源からの放射輝度分布を推定するための手法を提案した. 具体的には, 拡散反射板, 半球面鏡, および, マーカーで構成されるサンプリングボードを光源の周囲で動かしながら画像を撮影して, 半球面鏡上のハイライトを手掛かりにして光源の位置を, 拡散反射板上の拡散反射光の明るさを手掛かりにして放射輝度分布を推定した. 獲得した放射輝度分布を用いて合成した画像と実画像を比較することで, 提案手法が放射輝度分布を精度良く獲得出来ることを確認するとともに, テクスチャ推定への応用を通して, 理想的な点光源を仮定するのではなく, 実世界光源の放射輝度分布を獲得することが重要であることを示した.

5節で述べたように, 現在のセットアップでは, 放射輝度を獲得出来る角度に制限がある. より広範囲の放射輝度分布を獲得するための複数カメラの利用やカメラ・光源配置の最適化については, 検討の余地がある. また, 実世界光源の放射輝度分布を獲得することは, 写実的画像生成などのCGへの応用や形状復元などのCVへの応用にも極めて重要であると考えられることから, テクスチャ推定以外の応用にも取り組みたい.

参考文献

- [1] Debevec, P.: *Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography*, In Proc. ACM SIGGRAPH1998, pp.189–198, (1998).
- [2] Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: *Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume 5, No.1, pp.1–12, (1999).
- [3] Marschner, R. S and Greenberg, D. P.: *Inverse lighting for photography*, In Proc. IS&T SID Fifth Color Imaging Conference, pp.262–265, (1997).
- [4] Verbeck, C. P and Greenberg, D. P.: *A comprehensive light-source description for computer graphics*, IEEE Computer Graphics and Applications, Volume 4, Issue 7, pp.66–75, (1984).
- [5] Goesele, M., Granier, X., Heidrich, W. and Seidel, H.: *Accurate light source acquisition and rendering*, In Proc. ACM SIGGRAPH2003, pp.621–630, (2003).
- [6] Zhang, Z.: *A flexible new technique for camera calibration*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 22, Issue 11, pp.1330–1334, (2000).