

カメラの光学的校正を伴う光源の放射強度分布推定

河村 拓哉^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)} 佐藤 洋一^{1,c)}

概要: 光源情報の獲得は写実的画像生成やイメージベースモデリングなどの画像解析に重要である。従来、微小光源の放射強度分布を推定するにはゴニオフォトメータが用いられている。しかし、この計測機器では測定に時間がかかり、また、機器自体が特殊であり、簡便な計測には向いていない。これに対し、カメラで一度の撮影で広範囲な分布を獲得するため画像から光源の放射強度分布を獲得する研究が行われている。一方、カメラを用いて画像から解析を行う場合、カメラレスポンス関数の非線型性や周辺減光等が測定に大きな影響を与えるという問題があり、既存の手法ではこれらを事前に校正しなければならない。そこで本稿では、事前の校正を必要としない、カメラの光学的特性を推定すると同時に光源の放射強度分布を獲得する手法を提案する。そして、提案手法の基礎的な検討をするとともに、実験を通して提案手法の精度を検証し、物体の反射率推定への応用を通して提案手法の有用性を確認する。

1. はじめに

実世界の光源情報の獲得は、CVにおけるイメージベースモデリングやCGにおける写実的画像生成などにおいて重要となっている。光源情報を獲得する手法としてシーンへの入射光分布と光源からの放射光分布の2つのアプローチが存在するが、本研究では実世界の非等方的な光源の放射光分布、特に、微小光源の放射強度の角度分布を獲得することを目的とする。

従来、微小な光源の放射光分布を獲得する手法ではゴニオフォトメータを用いて角度毎の放射強度を測定するのが一般的だが、ゴニオフォトメータでは一度に一方向しか計測できないため、測定に非常に時間がかかり、また、測定機器が高価である。そのため、計測を簡略化するためにカメラを用いて画像から放射光分布を獲得する研究がおこなわれている。

一方、多くのカメラには画像の周辺部が中心部より暗くなるという周辺減光や入射光と画素値が非線型となるカメラレスポンス関数の問題があり、既存の光源放射強度分布を獲得する手法では露光や周囲の光源環境が制御された環境下で事前に校正を行う必要がある。

そこで、本稿では簡便な放射強度の角度分布の測定を目

的とし、複数の姿勢の異なる拡散反射板の画像を手掛かりにして、カメラの周辺減光、カメラレスポンス関数、光源の放射強度分布を同時に推定する。提案手法では、光源からある方向に放射される光の放射強度が一定であることを利用し、それらの入射光の比からカメラの光学的特性を先に推定し、推定した特性を用いて光源の放射強度分布を獲得する。そして、合成画像、実画像を用いた実験を通して、提案手法の精度を確認するとともに、テクスチャ推定への応用を通して、実世界光源の放射強度分布を獲得することの有用性を示した。

本章の構成は以下の通りである。2章では光源の放射光分布を推定する研究及びカメラの光学的特性を推定する研究に関する関連研究を紹介する。3章では提案手法について説明する。4章では提案手法の実験結果を示し、評価を行う。最後に5章で結ぶ。

2. 関連研究

2.1 カメラの特性

画像からカメラへの入射光を求める際様々な問題が存在する。特に、カメラレスポンスの非線型性と周辺減光の問題は画像解析に大きな影響を与える。通常カメラは入射光を電気信号に変換し、画像の画素値となる。多くのカメラでは変換の際に輝度変化の情報を効率よく表現するため入射光に対して非線型な変換を加えられ、画素値から入射光を求めるのは難しい。また、周辺減光とはセンサーへの入射角の違いやカメラの開口径の大きさなどが原因となり、画像の中心部に比べ周辺部へ入射する光量が少なくなることで、理想的なカメラモデルでの入射光に対し実際に入射

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

² 九州工業大学
Kyusyu Institute of Technology

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

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

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

される光の量が異なってくる。それゆえ、画像からこれらの特性を校正する様々な研究が行われている。ここではカメラの光学的特性を推定する研究を三つに分類する。一つはカメラ応答関数のみを獲得する研究、もう一つは周辺減光のみを推定する研究、最後はカメラ応答関数と周辺減光を同時に推定する研究である。

一つ目として、カメラレスポンス関数を推定する古典的な手法では露光を精確に制御した状態で、露光を変えながら同じシーンを撮影した複数枚の画像、もしくは、Macbeth チェッカーボードを様な光源下で撮影した画像を用いて校正を行う。いずれの手法でもカメラに入射する入射光を制御し、入射光の比と画像の画素値の関係からカメラレスポンス関数を推定する。Man ら [9] の手法ではカメラレスポンス関数をガンマ関数で近似し、露光と画素値の関係からガンマを推定した。しかし、現実のカメラの多くは単純なガンマ関数ではないので多くのカメラでは近似に適していない。Devebec ら [4] は平滑化拘束を加え、ノンパラメトリックなカメラレスポンス関数を求めた。彼らの手法では多様なカメラに対応しているものの、ノイズの影響を受けやすく、また、表現するための変数が多い。これらの手法の間をとって、Mitsunaga ら [11] は少数のパラメータでカメラレスポンス関数を適切に近似出来る様に、カメラレスポンス関数を多項式近似で表現し、カメラレスポンス関数を推定した。Grossberg ら [6] は現実のカメラのデータベースから主成分分析を用いて、現実のカメラを効率よく表現できる基底を求め、これらの基底関数でカメラレスポンス関数を近似する手法を提案し、多項式近似より精度良く近似できることを示した。

二つ目の周辺減光を求める手法では、一般的には、様な明るさを持つ物体を撮影することで、同じ入射光に対する画素間の画素値の比を獲得することで求める。周辺減光の古典的な表現方法として画素毎にノンパラメトリックに定義される。ノンパラメトリックな表現は前述した様な条件を抱えており、それゆえ、周辺減光でも少数の変数で記述する手法が提案されている。周辺減光はカメラの開口径や入射角など構造上の問題が原因となっており、それらの物理的なモデルに基づき近似する手法 [13][7] が存在する。しかし、物理的なモデルでは近似式が複雑となるため、中心からの距離の多項式 [5] や画像の位置のテイラー展開 [16] で近似する手法も存在する。

三つ目の手法として、前述の2種類の手法では制御された実験環境下で測定を必要があるが、簡便な計測のため自然画像からカメラレスポンス関数と周辺減光を推定する手法が提案されている。Litvinov ら [8] は画像間に共通する領域を示す画素を抽出し、カメラレスポンス関数、周辺減光、ゲインをノンパラメトリックに推定した。Goldman ら [5] はカメラレスポンス関数を PCA 基底で近似、周辺減光を中心からの距離の多項式で近似して、Litvinov らと同

様に画素を抽出して推定を行う手法を提案した。これらの手法では放射輝度の等しい領域を抽出し、その領域を指す画素値の関係からカメラの光学的特性の推定を行っている。

2.2 光源分布

光源の分布を獲得する手法はシーン中のある点（領域）に入射する光源の分布を獲得するアプローチとある点（領域）から放射される分布を獲得するアプローチと2つに分類することができる。前者の手法として、Devebec ら [3] は半球面鏡の画像を撮影することで、Sato ら [15] は全方位カメラを用いて、それぞれ計測器に入射する光を直接捉えることでシーンへの入射光分布を推定する。また、前者の手法としてシーンを撮影した画像から受動的に推定するインバースレンダリングという手法も提案されている。Marschner ら [10] はシーンの幾何やそこに存在する物体の反射特性が既知であるとし、実際の画像とレンダリングした画像の関係から光源の分布を推定した。これらのこれらの入射光分布を獲得する研究は光源が無限遠方光源や等方的な光源を仮定しており、AR での陰影付けなど、特定の条件下では有用であるものの、非等方的な光源を扱うことができず、複雑なシーンでの光源の表現は難しいという問題がある。

後者の手法としては微小光源、すなわち、点から放射される二次元ライトフィールドと獲得する手法と領域から放射される4次元ライトフィールドを獲得する手法が存在する。微小光源から放射される光を計測するにはゴニオフォトメータを用いるのが一般的となっている。ゴニオフォトメータは光源を中心とする球の全周の任意の位置にセンサーを動かすことができる。しかし、ゴニオフォトメータによる計測は一度に一方向しか計測できず、全方向の分布を計測するには時間がかかる。これに対して Rykowski ら [14] は imaging sphere という内面が拡散反射板でコーティングされた半球型のドームの中心部に光源を設置し、同じく内部に設置された球面鏡を、ドームに空けた穴から撮影することで一度に 2π ステラジアン放射光分布を獲得できる。

これらの手法では、特殊な実験機器が必要となるので、カメラやスキャナから放射光分布を求める研究も行われている。Tan ら [17] はスキャナの上に拡散透過板を設置し、その上から光源を照射することで、光源の分布を獲得した。彼らの手法では光源の位置、スキャナ及び拡散透過板の位置が既知であり、スキャナで検出した入射光から拡散透過スクリーンの透過の性質、光の減衰の影響を考慮して光源の放射強度分布を獲得する。Moreno ら [12] は光源を拡散透過スクリーンに照射し、スクリーンの様子を画像として撮影することで放射光分布を獲得する手法を提案した。彼らの手法では事前に露光を変えて撮影した画像からガンマ関数で近似したカメラのレスポンス関数を獲得し、また、

周辺減光や距離の減衰などを光軸からの視線の角度 θ の関数で記述し、この関数を事前にゴニオメータの様な方法で獲得し、得られた画像にこの関数の補正を加えて分布を獲得する、

これらの点から放射される放射強度の角度分布は光源が十分小さいときに有用であるが、大きい光源を表現することは難しい。そのような光源に対しては4次元のライトフィールドとして獲得する。Ashdownら[2]はゴニオフォトメータのセンサとしてカメラを用いることでこのようなライトフィールドを獲得した。また、簡便なライトフィールドの獲得する手法としてAotoら[1]は拡散反射板を動かしながらカメラで撮影して、拡散反射板の位置と画像の明るさからライトフィールドを獲得した。

従来の入射光分布では平行光源や等方的な光源を仮定しており、現実世界の光源を表現できる状況が限定されている。本研究ではより現実に近い分布を獲得するため提案手法では放射光分布の獲得を試みる。また、ゴニオフォトメータやImaging sphereを用いた測定は、特殊な機器が必要となり、簡便な光源情報の獲得を目的とし、カメラからの放射強度分布の獲得を目指す。一方、Tanらのように一枚の画像から光源の放射強度分布を獲得する場合、カメラの光学的特性が問題となる。一枚の画像からでは光源の分布とカメラの光学的特性は一意に定まらず、光源の分布に対して何らかの制約を加えない限りこれらを同時に推定するのは難しい。それゆえ、従来のカメラで微小光源の放射光分布を測定するには事前にカメラの光学的特性を計測する必要がある。そこで、本稿では複数枚の画像を用いることで事前の校正を必要としない光源の放射強度の角度分布を推定する手法を提案する。なお、4次元ライトフィールドの獲得は、イメージベースドモデリングなどの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への応用には重要であることから、今後の課題である。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では異なる姿勢の拡散反射板の画像を用いることで、事前にキャリブレーションを必要としない光源の放射強度分布、カメラの応答関数、周辺減光の成分を同時に推定する手法を提案する。具体的には、カメラや光源を固定し、拡散反射板を動かしながら撮影する。そして、撮影した画像の明るさ及びカメラ、光源、拡散反射板の位置から光源の放射強度分布、カメラレスポンス関数、周辺減光を推定する。

画像から放射強度分布とカメラの光学的特性を推定する際、画像の陰影の変化が光源とカメラの光学的特性両方に依存しており、それらの成分を分離するのは難しい。そこで、提案手法では光源から同方向に存在する点間の関係を

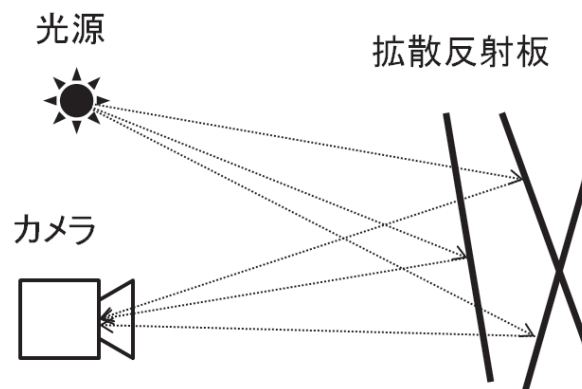


図1 提案手法

用いて、まず、カメラレスポンス関数と周辺減光を推定し、その推定した値に基づきカメラの放射強度分布を獲得する。光源から同じ方向への放射強度は一定であり、位置や反射特性が既知である物体に光が照射されると、それらの点からカメラへ入射光の比が計算でき、光源の分布に関わらず、光源から同じ方向に存在する領域からの入射光の関係が既知となる。提案手法ではこれらの入射光の比と画素値の関係からカメラレスポンス関数と周辺減光を線型和で近似すること安定して推定を行う。そして、推定したカメラの光学的特性を用いることで画像の画素値から光源の放射強度分布を計算する。

本研究では光源は点と見なすことができる微小光源として扱い、放射光分布は放射強度の角度分布で記述する、そして、その光源の位置は既知であるとする。また、拡散反射板の姿勢は拡散反射板に描かれたマーカーから推定することができる、これも既知であるとする。

3.2節では放射強度と画像の画素値の関係式について説明し、推定するパラメータについて明らかにする。そして、3.3節でパラメータを求める手法について説明する。

3.2 問題の定式化

本節では光源の分布及び光の減衰、拡散反射板での反射、カメラに入射する光と画像の画素値の関係について説明する。

光源が微小光源であれば、光が空間中の一点から放射されていると考えることができ、その位置(光源の位置)を c とする。光源から放射される光の強さは (θ, ϕ) 方向へ放射される単位立体角辺りの放射束、つまり、放射強度の角度分布 $L(\theta, \phi)$ を用いて記述する。このとき、光源から (θ, ϕ) 方向に存在し、光源の位置 c を中心とする単位球面上の進行方向に垂直な領域での単位面積当たりの放射束、すなわち、放射照度の分布は $L(\theta, \phi)$ の定数倍となる。放射強度分布のスケールが不定であるとする、この放射照度分布と光源の放射強度分布は等しく、以下の議論ではこの放射照度を求めることで光源の放射強度の分布を求める。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 $\phi = 0$ の方向はカメラの方向と同じように定める。

光源から放射され、単位面積当たりを通過する放射束は、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。

拡散反射板では理想的な拡散反射をし、ランバート反射則に従うとする、すなわち、あらゆる方向に等しい強さで反射し、その強さは入射光と法線の角度に比例すると仮定する。したがって、拡散反射板の法線を \mathbf{n} 、入射光ベクトルを \mathbf{l} 、拡散反射板の拡散反射率を ρ とすると、放射光の強さ I は以下の式に従う。

$$I = \rho \mathbf{n}^T \mathbf{l} \quad (3)$$

ここで入射光の大きさ $|\mathbf{l}|$ は放射照度、反射光の強さ I は放射輝度を示している。

カメラのセンサへの入射光は周辺減光の影響によって減衰し、カメラレスポンス関数により画像の画素値に変換される。周辺減光は画像上の位置 \mathbf{u} の関数 $M(\mathbf{u})$ とし、入射光を画素値に変換するカメラレスポンス関数を f と記述する画像上の位置 \mathbf{u} への入射光を $I(\mathbf{u})$ 、 \mathbf{u} の画素値を $V(\mathbf{u})$ とすると以下の関係式が成り立つ。

$$V(\mathbf{u}) = f(M(\mathbf{u})I(\mathbf{u})) \quad (4)$$

ここで入射光 $I(\mathbf{u})$ は画像上の位置 \mathbf{u} に対応するセンサへの入射照度を意味しているが、簡単のため入射光と呼ぶ。

提案手法ではカメラレスポンス関数、周辺減光は後述の最適化で安定して解を求めるため、以下のように近似式で表現する。カメラレスポンス関数はガンマ関数では近似の精度が悪く、ノンパラメトリックに表現すると求める変数が多くなり、最適化を行うには多くのサンプルが必要となる。多項式による近似より主成分分析を用いて推定した基底による近似の方が近似精度が良いことが知られているため、提案手法では PCA 基底による近似を行う。したがって、カメラレスポンス関数の逆関数 $g = f^{-1}$ を PCA 基底で近似すると位置 \mathbf{u} での画素値 $V(\mathbf{u})$ 、入射光 $I(\mathbf{u})$ とするとこれらの関係は以下の式で記述される。

$$g(V(\mathbf{u})) = h_0(V(\mathbf{u})) + \sum_{i=1}^{N_a} a_i h_i(V(\mathbf{u})) \quad (5)$$

ここで、 h_i は i 次の基底、 a_i は i 次の基底の係数、 N_a は近似の次数を表す。周辺減光はノンパラメトリックな手法ではカメラレスポンス関数と同様に難しく、物理ベースの近似は式が複雑となり、後述の最適化で安定して求めるのは難しい。そこで、提案手法では中心からの距離 r の多項式で近似する。すなわち、周辺減光 $M(\mathbf{u})$ は中心からの距離 $r(\mathbf{u})$ を用いると以下の式で記述される。

$$M(\mathbf{u}) = 1 + \sum_{i=1}^{N_b} b_i r(\mathbf{u})^i \quad (6)$$

ここで、 b_i は i 次の多項式の係数、 N_b は近似の次数を表す。

提案手法では拡散反射板をカメラで観察するが、周囲に対象とする光源以外に光はなく、相互反射も無視できると仮定すると、カメラに入射する光は光源から放射され拡散反射板で反射した光のみとなる。したがって、 (θ, ϕ) 方向の放射強度 $L(\theta, \phi)$ と画像の画素値 $V(\mathbf{u})$ は以下の関係となる。

$$g(V(\mathbf{u})) = M(\mathbf{u}) \frac{\mathbf{n}^T(\mathbf{c} - \mathbf{x})L(\theta, \phi)}{|\mathbf{x} - \mathbf{c}|^3} \quad (7)$$

ここで、拡散反射板上では一律な反射率を持つので、カメラレスポンス関数内の定数に含めることができ、 ρ を無視することができる。拡散反射板の姿勢は既知であるとするので、画像上の位置 \mathbf{u} 、 \mathbf{u} が示す点 \mathbf{x} 、 \mathbf{x} の光源からの方向 (θ, ϕ) の内一つが定めれば、他の変数も一意に定まる。

3.3 パラメータ推定

画像の画素値 $V(\mathbf{u})$ と光源分布 $L(\theta, \phi)$ の関係は式 (5)、式 (6)、式 (7) より

$$\begin{aligned} & h_0(V(\mathbf{u})) + \sum_{i=1}^{N_a} a_i h_i(V(\mathbf{u})) \\ &= \left(1 + \sum_{i=1}^{N_b} b_i r(\mathbf{u})^i\right) \frac{\mathbf{n}^T(\mathbf{x} - \mathbf{c})L(\theta, \phi)}{|\mathbf{x} - \mathbf{c}|^3} \end{aligned} \quad (8)$$

となり、上式の関係が成り立つような \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{L} を推定する。しかし、式 (8) の左辺と右辺の二乗誤差は変数に対し非線型となるので安定して解を求めるのは難しい。

しかしながら、光源からの方向が等しい点ではその方向への放射強度 $L(\theta, \phi)$ は等しく、それらの点の画像の画素値の関係はカメラレスポンス関数と周辺減光のみで表すことができる。すなわち、光源から (θ, ϕ) に存在する 2 点 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 に着目すると、2 点でへの放射強度 $L(\theta, \phi)$ が等しく、式 (7) を用いると以下の式が成り立つ。

$$\frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{c})^2}{\mathbf{n}(\mathbf{x}_1)^T \mathbf{l}} (g(V(\mathbf{u}_1))) (M(\mathbf{u}_2))$$

$$= \frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{c})^2}{\mathbf{n}(\mathbf{x}_2)^T \mathbf{l}} (g(V(\mathbf{u}_2))) (M(\mathbf{u}_1)) \quad (9) \quad (12)$$

ここで、 \mathbf{u}_i は \mathbf{x}_i の画像上の位置で、カメラレスポンス関数と周辺減光は表記の簡単のためそれぞれ g 、 $M(\mathbf{u})$ で記述している。

式 (9) の左辺 - 右辺を $E(x_1, x_2)$ とすると、 $E(x_1, x_2)$ は a 、 b に対して非線型ではあるものの、それぞれの変数に対しては線型であり、どちらかの初期値が分かれば交互に線型最適化をすることで最適解を求めることができる。

画像の中心部では周辺減光による入射光の減衰は少なく、中心部に存在する点をサンプリングした点の組み合わせを用いることで十分妥当な初期値が得られると考えられる。したがって、それらの点の組み合わせに対して、初期値 $\mathbf{b} = 0$ を与え、係数 \mathbf{a} と係数 \mathbf{b} の解を交互に最適化することで推定する。最適化の際には平滑化項を導入し、また、カメラレスポンス関数は単調増加関数であるので単調増加の拘束を加えて計算を行う。2点の組み合わせは全ての組み合わせを用いるには組み合わせの数が膨大になるので、各画像から光源から同じ方向に存在する点をランダムに抽出して行う。なお、抽出の際にはカメラレスポンス関数の推定時には画素値に対して、周辺減光の推定時には中心からの距離にたいしてなるべく均等になるようにサンプリングする。

したがって、以下の計算を交互に行うことでカメラレスポンス関数と周辺減光を推定する。

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \sum_{(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in X_a} E(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)^2 + \lambda_v \sum_{v=0}^{255} g'(v)^2 \quad \text{s.t. } g'(V) > 0 \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min_{\mathbf{b}} \sum_{(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in X_b} E(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)^2 + \lambda_r \sum_{r=0}^R M'(r)^2 \quad (11)$$

ここで、 X_a 、 X_b はサンプリングした点の組み合わせを表し、 g' はカメラレスポンス関数の微分関数、 M' は周辺減光の微分関数、 λ_v 、 λ_r は平滑化項にかかる定数を示す。

3.4 放射強度分布の獲得

前節ではカメラレスポンス関数と周辺減光を求めた。次に、推定した値に基づき光源の放射強度分布を獲得する。 (θ, ϕ) 方向の光源の放射強度分布 $L(\theta, \phi)$ は、複数の (θ, ϕ) 方向に存在する領域の画像の画素値から求めた放射強度の二乗誤差が最小となるような値を算出する。すなわち、以下の式で求める。

$$L(\theta, \phi) = \arg \min_L \sum_{\mathbf{x} \in X_{\theta, \phi}} \left(L - \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{c})^3}{\rho \mathbf{n}^T(\mathbf{x} - \mathbf{c})} \frac{f^{-1}(V(\mathbf{u}))}{M(\mathbf{u}))} \right)$$

ここで、 $X_{\theta, \phi}$ は (θ, ϕ) 方向に存在する点の集合を表す。

4. 実験

提案手法の精度を検証し、有用性を示すため実験を行った。実験ではまず、理想的な環境下での精度を検証するため、計算機上で生成した合成画像から行った。そして、実世界の光源やカメラでの精度を検証するため実画像の実験を行った。

4.1 合成画像実験

合成画像実験では、入力画像として予め定めた放射強度分布、カメラレスポンス関数、周辺減光、光源の位置、拡散反射板の姿勢の情報に基づきレンダリングした画像を入力として提案手法によってカメラ特性と光源の放射強度分布を推定した。レンダリングでは対象とする光源以外に光源は存在しないと仮定し、また、相互反射の影響は十分小さいと考えられるので無視している。実験に用いたカメラレスポンス関数は [6] らのデータベースから Canon Optura のレスポンス関数を、周辺減光として中心からの距離の指数関数を用いた。

入力画像はレンダリング画像を 140 枚ほど用いた。入力画像の一部を図 5 上段に示す。実験では式 (9) でカメラの光学的特性を求め、式 (9) で放射強度分布を求める。カメラレスポンス関数と周辺減光の次数は $N_a = 5$ 、 $N_b = 3$ で推定を行った。これは、パラメータを変化させ放射強度分布の誤差を比較した結果、 $N_a \geq 5$ 、 $N_b \geq 3$ で誤差が少なくなったためである。推定したカメラレスポンスを図 2 に、周辺減光を図 3 に示す。カメラレスポンス関数のグラフの横軸は放射照度、縦軸は画素値を示し、青線は真値を表し、緑線は推定結果を示す。周辺減光では左図が真値を示し、右図が推定結果を示す。周辺減光の画像は画像の中心部を 255 にスケールした画像を示す。次に、これらの推定結果を基に光源の放射強度分布を獲得し、結果を図 4 に示す。放射強度分布は最大が 1 になるようスケールしており、 ϕ を固定して θ について極座標プロットを行った。放射強度分布の誤差は 0.01/pixel となり、高い精度で獲得できている。獲得した光源の放射鏡御分布を用いてリライティングを行った結果を図 5 に示す。図 5 の上段が入力画像例、下段が結果画像例を示す。入力画像とリライティング結果に差は見られず、また、画素値の二乗誤差は 8bit の画像で 0.46/pixel と精度良く再現できている。

4.2 実画像実験

実画像実験では周囲に光源のない暗室環境下で実験を行った。拡散反射板としてマーカの描かれたマット紙を用い、拡散反射板の姿勢は画像上のマーカの位置から求める

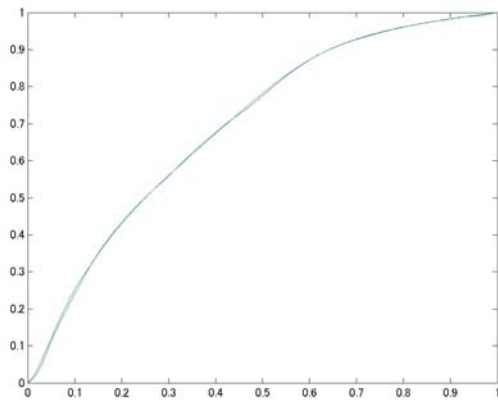


図 2 カメラレスポンス関数
青：真値. 緑：推定値.

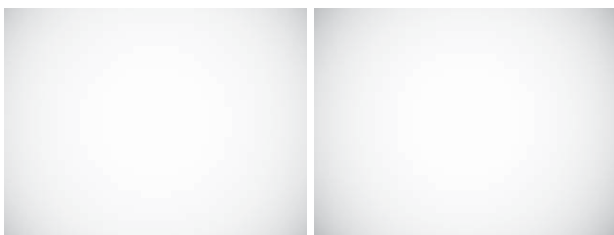


図 3 周辺減光
左：真値. 右：推定値

ことができる. 実験にはカメラ Chameleon CMLN13S2C を用いて 2 種類の光源に対して行った. 入力画像の枚数は光源 A に対して 71 枚, 光源 B に対して 100 枚の画像を撮影した.

カメラレスポンス関数と周辺減光の推定では $N_a = 5$, $N_b = 5$ で推定を行い, カメラレスポンス関数の結果を図 6 に, 周辺減光の結果を図 7 に示す. なお, カメラレスポンス関数の真値は露光を制御した環境下で複数枚の画像を撮影し Debevec[4] らの手法で求め, 周辺減光の上図は太陽光の下一様な拡散反射率を持つと考えられるマット紙をカメラの視野角全体に収まるように撮影し, 画素値の比から求めた. カメラレスポンス関数は真値と概ね形は同じであるが, 全体的に真値より入射光に対して画素値が大きくなっている. また, 周辺減光は光源 A での推定結果は中心部は真値と変わらないものの, 周辺部は暗くなっている. これは光源が指向性を持ち入力画像の周辺部の画素値が低いため正しく求められていないと考えられる. 光源 B では実測値と同じような周辺減光が推定された.

次に, 獲得したカメラの特性を用いて光源の放射強度分布を求めた. 結果を図 8 に示す. 放射強度分布の図は上図では光源 A について, 下図では光源 B について合成画像での実験と同様に光源の放射強度分布を極座標プロットした. 放射強度分布の真値を測定するのが難しいため, 獲得した光源を用いてリライティングした画像と撮影した画像を比較することで評価を行った. 図 9 に結果の一例を示す. 図

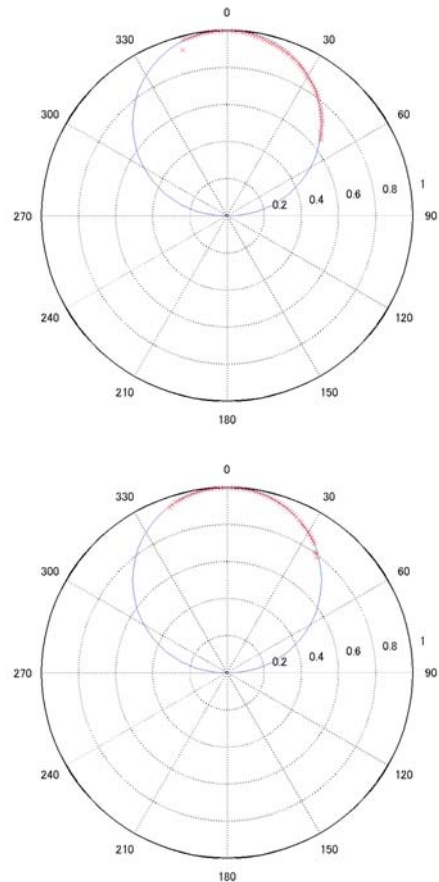


図 4 放射強度分布
上段： $\phi = 0, 180$ 平面の断面図. 下段： $\phi = 90, 270$ 平面の断面図.

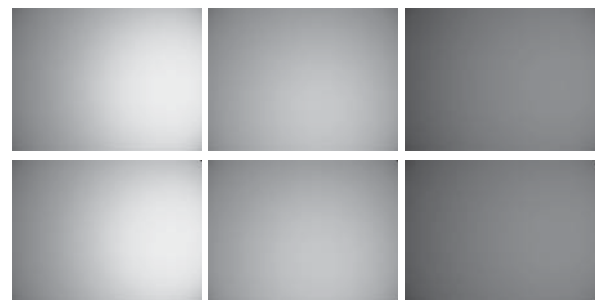


図 5 リライティング
上段：入力画像. 下段：リライティング画像

上部は光源 A, 図下部は光源 B の実験であり, それぞれの上段が入力画像で, 中段が入力画像の中の拡散反射板領域を抽出した画像, 下段がリライティング画像となっている. リライティング結果は人の目では違いが分からず, 画素値の平均二乗誤差も 8bit の画像で光源 A で 0.87/pixel, 光源 B で 0.61/pixel と非常に小さく, 獲得した光源を用いたレンダリングは十分な精度で再現できていると考えられる.

5. 応用

獲得した放射強度分布を用いたインバースレンダリングの有用性を示すため, 簡単なテクスチャ推定の実験を行っ

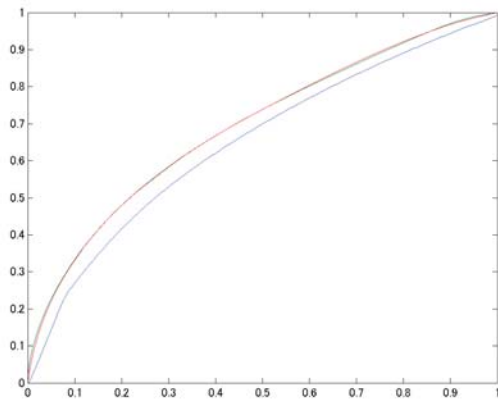


図 6 カメラレスポンス関数

青：真値．緑：光源 A の下推定した値．赤：光源 B の下推定した値．

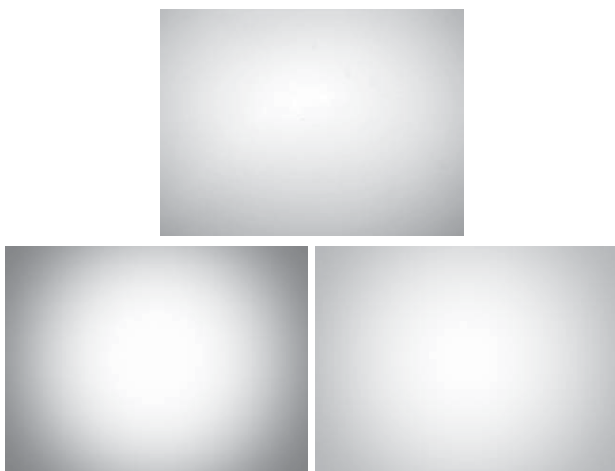


図 7 周辺減光

上：実測値．左下：光源 A の下推定した値．右下：光源 B の下推定した値

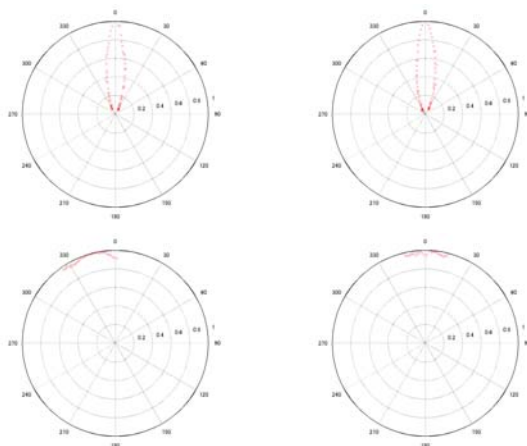


図 8 放射強度分布

上段：光源 A．下段：光源 B．左： $\phi = 0, 180$ 平面の断面図．右： $\phi = 90, 270$ 平面の断面図．

た．具体的には，実験では前述の実験で獲得した光源の下，形状，位置が既知であり，表面で拡散反射をすると仮定できる物体の拡散反射率を推定した．すなわち，画素 u が示

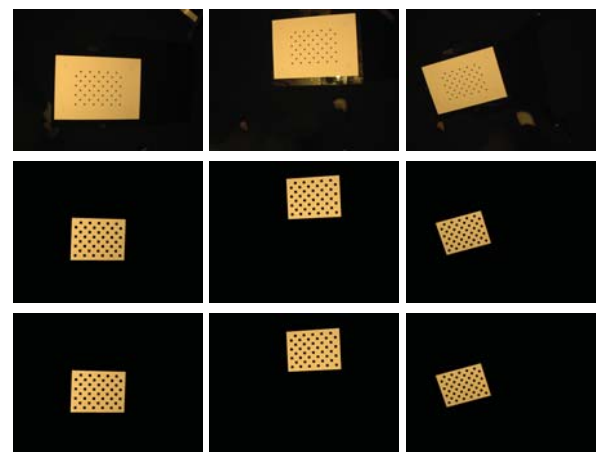
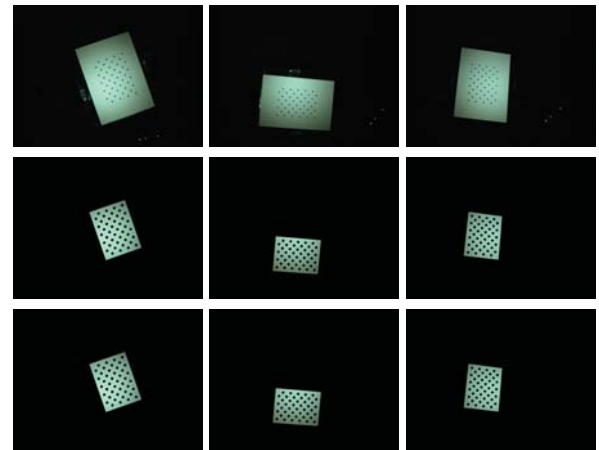


図 9 リライティング

上：光源 A．下：光源 B 上段：入力画像．中段：拡散反射領域．下段：リライティング画像

す領域での拡散反射率を $\rho(\mathbf{u})$ とすると，式 (2)，式 (3)，式 (4) より以下の式で与えられる．

$$\rho(\mathbf{u}) = \frac{g(V(\mathbf{u}))|\mathbf{x} - \mathbf{c}|^3}{\mathbf{n}^T(\mathbf{c} - \mathbf{x})M(\mathbf{u})L(\theta, \phi)} \quad (13)$$

実験機器として前章の実画像実験で使用したカメラ，光源 A を用い，テクスチャ推定の図 10 のような対象物体は和紙を張り付けた立方体を用いた．入力画像として撮影した画像が図 11 左であり，この画像から推定した拡散反射率の画像を図 11 右に示す．推定結果の画像は拡散反射率を画像に変換するためスケーリングを行っている．推定結果は入力画像に見られる陰影の変化を除去できており，平行光源下で撮影した場合には立方体の面によって明るさが異なるが推定結果ではどの面でも同じスケールの拡散反射率を求めることができる．

6. おわりに

本稿では，光源の周囲で拡散反射板を動かしながら複数枚撮影し，それらの画像を解析することで，微小な光源の放射強度の角度分布，カメラ応答関数，周辺減光を同時に求める手法を提案した．

既存の微小光源の放射強度分布を画像から獲得する手法

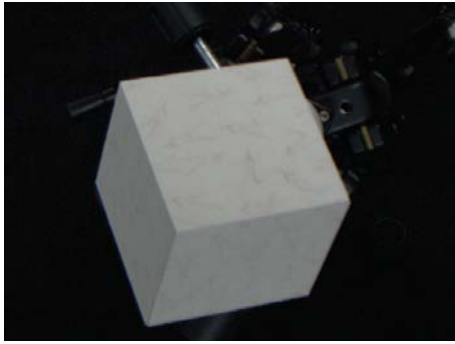


図 10 反射率推定における対象物体

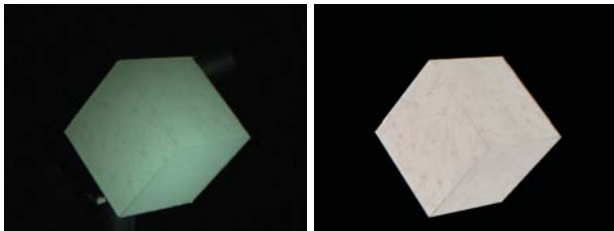


図 11 反射率推定の結果
左：入力画像．右：拡散反射率．

ではカメラの応答関数や周辺減光は事前にキャリブレーションしなければならぬが、本手法ではキャリブレーションを必要とせず光源の分布を求めると同時にそれらの光学的特性を校正できる。これにより、従来より簡便な光源の放射強度分布の獲得が可能となった。

また、シミュレーション画像による実験を通して理想的な環境で十分な精度で測定できることを示し、本手法では、実画像の実験を通して本手法が実世界の環境で実用に耐えうることを示した。そして、応用として獲得した光源下に存在する形状が既知の物体の反射特性を獲得する実験を行い、本手法がインバースレンダリングなどの他のコンピュータビジョンのアルゴリズムへの応用することでより現実に即した解析が可能となることを示した。

一方、提案手法には検討すべき課題も存在する。視野角の都合上獲得する光源分布の範囲は制限されており、実験のセットアップを工夫して獲得する光源の範囲を拡大する、並びに、獲得した光源分布を統合する手法に関して検討の余地がある。また、提案手法では妥当な解に収束しているものの、最適化は大域的な解であることは保障されていない。そのため、最適化手法や近似モデル、最適化の評価関数、外れ値の処理など検討を重ねていく必要がある。今回インバースレンダリングの応用として簡単な反射率推定を行ったが、形状復元などより複雑な問題に対して応用に取り組みたい。

参考文献

[1] Aoto, T. and Sato, T.: Linear estimation of 4-D illumination light field from diffuse reflections, *Proc. of Asian Conference on Pattern Recognition* (2013).

[2] Ashdown, I.: Near-field photometry: a new approach, *Journal of Illuminating Engineering Society*, Vol. 22, No. 1, pp. 163–180 (1993).

[3] Debevec, P.: Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, *Proc. ACM SIGGRAPH 1998*, pp. 189–198 (1998).

[4] Debevec, P. E. and Malik, J.: high dynamic range radiance maps from photographs., *Proc. Computer Graphics and Interactive Techniques*, p. 369378 (1997).

[5] Goldman, D. B. and Chen, J.: Vignette and Exposure Calibration and Compensation, *Proc. of International Conference on Computer Vision*, pp. 899–906 (2005).

[6] Grossberg, M. and Nayar, S.: What is the Space of Camera Response Functions?, *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 602–609 (2003).

[7] Knag, S. B. and Weis, R.: Can We Calibrate a Camera Using an Image of a Flat, Textureless Lambertian Surface?, *Proc. European Conference on Computer Vision*, p. 640653 (2000).

[8] Litvinov, A. and Schnier, Y. Y.: Addressing radiometric nonidealities: A unified framework, *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, p. 5259 (2005).

[9] Mann, S. and Picard, R. W.: On Being ‘undigital’ With Digital Cameras: Extending Dynamic Range By Combining Differently Exposed Pictures, *Proc. IS&T*, pp. 442–448.

[10] Marschner, R. and Greenberg, D.: Inverse lighting for photography, *Proc. IS&T SID Fifth Color Imaging Conference*, pp. 262–265 (1997).

[11] Mitsunaga, T. and Nayar, S.: Radiometric Self Calibration, *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 374–380 (1999).

[12] Moreno, I. and Sun, C.-C.: Three-dimensional measurement of light-emitting diode radiation pattern: a rapid estimation, *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 7, pp. 1–6 (2009).

[13] N. Asada, A. A. and Baba, M.: Photometric calibration of zoom lens systems, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 1, No. 11, pp. 186–190 (1996).

[14] Rykowski, R. and Kostal, H.: Novel approach for LED luminous intensity measurement, *Proc. SPIE*, Vol. 6910, No. 1 (2008).

[15] 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*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–12 (1999).

[16] Sawchuk, A. A.: Real-time Correction of Intensity Non-linearities in Imaging Systems, *IEEE Transactions on Computer*, Vol. 26, No. 1, pp. 34–39 (1977).

[17] Tan, H. and Ng, T.: Light-emitting-diode inspection using a flatbed scanner, *Optical Engineering*, Vol. 47, No. 10 (2008).