

光源環境と対象物の同時撮影による 屋外物体の拡散反射率推定とその評価

大蔵苑子^{†1} 川上 玲^{†2} 池内克史^{†3}

近年、物体の三次元モデル化に関する研究がさかに行われている。正確なモデル化には、物体の正確な見えの再現が必要であるが、それには光源による影響を取り除いた物体本来の色、すなわち表面反射率を求めなければならない。これは特に屋外の物体について自動化が困難な作業であり、その効率的な手法の開発が課題となっている。そこで本論文では、全周画像が撮影できるカメラを用いて屋外の拡散反射物体の表面反射率を推定する効率的な手法を提案する。提案手法では対象物と光源環境の計測が1地点で済むほか、物体と光源の幾何学的な較正、および光学的な較正も不要である。本手法を用いることにより、撮影画像と物体の形状から、物体本来の見えを求めることに成功した。

Diffuse Reflectance Estimation of Outdoor Objects by Simultaneous Radiance Capture of Surfaces and Illumination Environment

SONOKO OKURA,^{†1} REI KAWAKAMI^{†2}
and KATSUSHI IKEUCHI^{†3}

Recently, demands for more realistic models of a real world object have been increased. To simulate the accurate appearance of an object, it is necessary to acquire not only the object's shape but also the actual surface color, namely, the surface reflectance of the object. It is one of challenging issues specifically for outdoor environments, in which lighting conditions are not under control. This paper proposes a new, efficient method to estimate reflectance parameters of diffuse outdoor objects from only one measurement with a spherical camera. Neither geometrical nor optical calibration is necessary. Using this method, we succeeded to calculate the illumination effect and acquire the surface reflectance.

1. はじめに

近年、物体の三次元モデル化技術への期待が高まっている。三次元モデルは産業、文化、教育、娯楽など多岐にわたる分野において応用可能である。なかでも、文化財のモデル化に対して多くの注目が集まっている。文化財をデジタル情報として保存することによって、より多くの人々がその姿に触れることができ、さらなる知識の普及が期待できる。また、文化財が消失や崩壊の危機にある場合、そのデジタル情報が伝承と修復に役立つ。

実物体を計算機上で完全に再現するには、物体の(1)幾何情報、および(2)光学情報、が必要となる。幾何情報の取得技術は、形状取得センサの発達や、データ統合・処理アルゴリズムの進歩により実用に近づいてきた^{1),2)}。

光学情報の取得技術については、特に屋外の物体について多くの課題が残されている。90年頃から、より正確な見えのモデル化手法として、Physics-basedの反射パラメータ推定³⁾⁻⁶⁾、Image-basedレンダリング^{7),8)}などが提案されている。これらは精度の高い見えの再現を可能としたが、基本的には照明、つまり光源環境が制御可能であることを前提としており、屋外の物体に適用することは難しい。一方、屋外に関しては、90年代後半、実物体の見えのモデリング手法がいくつか提案されたが、多視点からの画像の重みつき平均でテクスチャを生成するにとどまっている⁹⁾⁻¹³⁾。

一般的に、反射特性を推定するには、(1)対象物の幾何形状、(2)光源環境、(3)対象物の見え、が必要となる。形状と見えは、それぞれレンジセンサおよびイメージセンサで取得可能である。光源環境の取得については、屋内ならば照明の制御により可能である一方、屋外ではそれが難しい。

屋外の光源環境の取得にはいくつかの方法がある。Yuらは通常のカメラで周囲の建物が写り込むように上空を撮影し、建物の特徴点を利用して光源環境を復元した¹⁴⁾。太陽の位置は日時から計算し、空の放射輝度分布はCIEモデルにあてはめた。一方、Debevecらは金属球、光沢のある黒色球、白色拡散球を組み合わせた装置を用いて光源環境を撮影し、これと多視点の対象物の画像から、事前に獲得したBRDFモデルのパラメータを反復計算で決

^{†1} 東京大学大学院学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

^{†2} 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

^{†3} 東京大学大学院情報学環
Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

定した¹⁵⁾。これらの手法では、光源環境と対象物は独立に撮影されるので、複数回の計測と光学的較正が必要となる。また、Satoらは全方位ステレオを用いることにより、幾何情報と光源環境を復元することに成功した¹⁶⁾が、対象物の表面反射率を求めるまでには至っていない。

本論文では、全周カメラを用いて対象物と光源環境を同時に撮影し、ただ1度の計測から屋外拡散反射物体の表面反射率を推定する手法を提案する。使用カメラは全周360度をほぼ網羅でき、物体と光源環境を同時に、同一特性で取得することが可能である。これにより物体と光源環境の撮影が1度で済むほか、物体と光源の幾何学的較正、および、光学的較正も不要である。

章立ては以下のとおりである。次の章では、全周カメラを用いてシーン内の輝度分布を求める手法を示す。3章ではシーン内の輝度と対象物の幾何形状から表面反射率を推定するアルゴリズムを説明する。実験およびその結果を4章に、それらに基づく本手法の限界と考察を5章に記す。そして6章で、本論文のまとめを行う。

2. 全周カメラによる輝度の取得

2.1 対象物と光源の輝度分布の取得

全周カメラを用いて対象物および周囲の光源の輝度分布を得ることの利点は、対象物と光源とを同一のカメラ感度で、また、幾何学的な較正が不要な環境で同時撮影できるということである。これにより、アルゴリズムが単純化され、カメラの露出の較正が不要になる。またカメラ姿勢の較正は1度でよい。ただし、対象物と光源環境を同時に撮影するため、幅広い輝度範囲を取得する必要がある。対象物の幾何形状およびカメラ姿勢は既知であるとし、また、光源は無遠くにあると仮定する。

本手法ではPoint Grey Research社のLadybug2¹⁷⁾というカメラを使用した。図1のように、このカメラは6個のレンズを持ち、そのうちの1個は垂直方向、残りの5個は水平方向を向いている。Ladybug2で撮影された画像の例を図2に示す。画像の縦軸および横軸は、それぞれ方位角と天頂角に対応している。このカメラは360度の視野のうち約75%を撮影できるので、空と対象物の輝度分布を1度に取得できる。

対象物の表面反射率は、Ladybug2で撮影された画像と幾何形状から計算される。周囲の光源から対象物へと届く入射スペクトルは、対象物へ届く光源の輝度分布を全方向において積分することにより得られる。これにより、対象物体表面の照度が計算できる。表面の輝度値をその照度値で割ることにより、表面反射率を求めることができる。



図1 全周カメラ Ladybug2
Fig.1 Ladybug2 camera.



図2 Ladybug2により撮影された画像
Fig.2 An image taken by Ladybug2.

以下、2.2節において光源の放射輝度の計算方法、2.3節において対象物表面の放射輝度の計算方法について、それぞれ述べる。

2.2 光源の放射輝度

図3に示すように、全周カメラは、カメラ中心Cにおいて、全方向における光源の輝度分布を記録する。ここで、光源の放射輝度分布を $L(\lambda, \theta, \phi)$ とする。 λ は波長、 θ と ϕ はそれぞれ方位角と天頂角を表している。光源とは、本論文では太陽光と天空光を意味し、地上の物体からの反射光は光源として考慮しない。

カメラで撮影される際、光はカメラの感度のフィルタ $q_k(\lambda)$ を通過し、さらに可視光範囲 Ω 分の積分となる。これより、画像輝度 I_k は次式のように表される。

$$I_k(\theta, \phi) = \tau_k \int_{\Omega} L(\lambda, \theta, \phi) q_k(\lambda) d\lambda \quad k = \{r, g, b\} \quad (1)$$

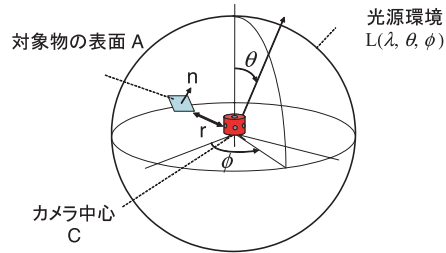


図 3 全周カメラによるシーン内の輝度の取得
Fig. 3 Scene radiance acquisition by the spherical camera.

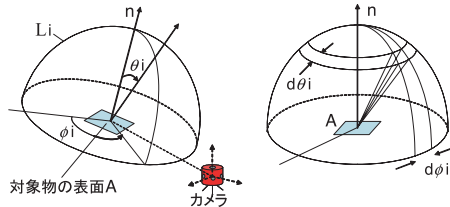


図 4 (a) 投射する光線方向, (b) (θ_i, ϕ_i) 方向の立体角
Fig. 4 (a) the direction of incident light rays, (b) solid angle at the direction (θ_i, ϕ_i) .

ここで, k と τ はそれぞれ RGB のチャンネルと各チャンネルにおけるゲインを表しており, τ はレンズの口径, 電気的な増幅などにより決定されるものである.

カメラ感度が Dirac のデルタ関数により近似されるとすると (カメラの narrow-band 仮定), 波長 λ は定数と見なせる. これより, 式 (1) は次式のように書くことができる.

$$I_k(\theta, \phi) \simeq \tau_k L(\lambda_k, \theta, \phi) \quad (2)$$

2.3 対象物表面の放射輝度

カメラはまた, 対象物の表面の輝度も記録する. ここで, 微小立体角 $d\omega_i$ を考える. 点 A から見ると, 図 4 に示すように, 微小立体角 $d\omega_i$ は微小方位角 $d\phi_i$ と微小天頂角 $d\theta_i$ の大きさからなる.

$$d\omega_i = \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (3)$$

よって, 点 A が微小立体角 $d\omega_i$ から受け取る光エネルギーは,

$$L_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (4)$$

と表される. ここで, $L_i(\lambda, \theta_i, \phi_i)$ は, 物体表面から見る光源の放射輝度分布とする.

点 A における照度 E は, 入射光エネルギーを全方向において積分したものである.

$$E^A(\lambda) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (5)$$

ここで, 対象物の表面は Lambertian 面だと仮定することにより, 点 A で反射する光は, 視点方向によらず一定となる. よって, 点 A における輝度 I は, 照度 E と対象物表面の反射率 S との積で表される.

$$\begin{aligned} I^A(\lambda) &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} S^A(\lambda) L_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \\ &= S^A(\lambda) E^A(\lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

カメラで記録される際, 画像輝度はカメラの感度関数による影響を受ける. ここで, カメラの narrow-band 仮定を用いることにより, 式 (2) で示したとおり, 波長 λ は一定となる. それゆえ, 点 A における画像輝度 I_k は次式のように表される.

$$I_k^A = \tau_k S_k^A E_k^A \quad k = \{r, g, b\} \quad (7)$$

対象物と光源の輝度分布は同一カメラで取得されるため, 式 (2) と式 (7) のカメラゲイン τ_k は等しい.

3. 輝度と形状からの反射率推定

3.1 対象物表面の照度

ここで再度, 点 A が受ける照度について考える. 光源は無限遠にあるという仮定より, 図 3 内のカメラと点 A の間の距離 r は, 光源までの距離 R に比べて十分小さく, 0 と近似できる. これにより, カメラから見る周囲の光源と, 物体の表面から見る光源は, ほぼ同じであると考えられる.

$$L(\lambda, \theta, \phi) \simeq L_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \quad (8)$$

よって, 点 A における照度 E (式 (5)) は, 式 (8) を用いることにより次式のように表される.

$$E^A(\lambda) = \int_{\Phi} \int_{\Theta} L(\lambda, \theta, \phi) \cos \psi \sin \theta d\theta d\phi \quad (9)$$

ここで, ψ は対象物表面の法線方向と入射光の方向 (θ, ϕ) とのなす角度であり, Θ と Φ は, 座標系の変化にあわせて新たに導入した積分範囲である.

カメラの narrow-band 仮定を式 (9) に適用することにより,

$$\tau_k E_k^A = \tau_k \int_{\Phi} \int_{\Theta} L(\lambda_k, \theta, \phi) \cos \psi \sin \theta d\theta d\phi \quad (10)$$

となる．さらに式 (2) を用いて，

$$\tau_k E_k^A = \int_{\Phi} \int_{\Theta} I_k(\theta, \phi) \cos \psi \sin \theta d\theta d\phi \quad (11)$$

となる．ここで，カメラ姿勢と物体の形状は既知であるので， ψ ， Θ ， Φ の値を得ることができる．このようにして，光源の輝度 $I_k(\theta, \phi)$ から照度 $\tau_k E_k^A$ を得ることができる．

3.2 表面反射率の推定

表面反射率は，その輝度値を照度値で割ることにより得ることができる．本論文では，対象物の表面上の点における照度（式 (11)）をレンダリングソフトにより計算した．具体的には，光源分布 $I_k(\theta, \phi)$ の下において，カメラ位置から見た対象物の見えをレンダリングした．表面の反射率 S_k^A は，すべての点 A において値を 1.0 とした．この計算はすなわち，式 (7) において S_k^A に値 1.0 を代入したことと等しい．式 (11) より，レンダリング画像の画像輝度 I_k^A は次式のように表現できる．

$$I_k^A = \tau_k E_k^A \quad (12)$$

レンダリングされた画像は， $\tau_k E_k^A$ の画像である．いま，対象物と光源の輝度分布を同一のカメラ感度にて取得しているので，式 (7) と式 (12) のカメラゲイン τ_k は等しい．よって，得られた画像輝度 I_k^A を，レンダリングした画像の輝度 I_k^A で割ることにより（式 (7)/式 (12)），表面の反射率 S_k^A が得られる．

$$S_k^A = I_k^A / I_k^A \quad (13)$$

4. 実 験

4.1 輝度の計測

撮影には，Point Grey Research 社の全周デジタルビデオカメラである Ladybug2 を使用した．このカメラを用いて，対象物および周囲の光源の輝度分布の取得を行った．

撮影の際，カメラ内部でのガンマ補正機能をオフにすることにより，入力値と出力値が線形な関係を持つ画像を得た．

広範囲にわたる輝度を得るため，ND フィルタを用い，カメラのシャッタースピードを様々な変化させながら撮影を行った．フィルタには Fujifilm 製の，それぞれ光を 1/10000 と 1/1000 に減少させる ND-4.0 と ND-3.0 の 2 種類を用いた．ND フィルタは図 5 のようにカメラのレンズの外側に取り付けた．また，幅広い輝度範囲を記録するために，ND フィルタと連動

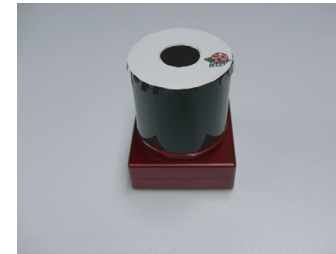


図 5 ND フィルタを取り付けた Ladybug2
Fig. 5 Ladybug2 with an ND filter.

させながらシャッタースピードを変化させ，図 6 のような画像を撮影した．

4.2 ビネッティング補正

レンズの外側に取り付けられた ND フィルタは，ビネッティングのような効果をもたらす．撮影画像の明るさが，画像の中心から縁にいくにつれて徐々に減少する（図 7(a)）．これは，フィルタ境界面での反射が原因で，ND フィルタ表面で反射される光が，入射角が大きくなるほど増していくためと考えられる．

この効果の補正のため，ND フィルタを付けたとき，および付けなかったときの 2 通りの場合において，Ladybug2 による白色板の撮影を行った．カメラの 6 個のレンズそれぞれで撮影された画像を出力とし，経験的な数学モデルにこれらをあてはめ，最小二乗法によりパラメータを計算した．図 7(b) は推定したビネッティング効果を示している．ND フィルタを用いて撮影した画像を，この推定された効果の画像で割ることにより，図 7(c) に示すような補正画像を得ることができた．

4.3 HDR 画像の作成

HDR (High Dynamic Range) 画像を作成した．このとき，黒つぶれと考えられる，輝度値が 10 以下のピクセル，また，サチュレーションと考えられる，輝度値が 210 以上のピクセルを取り除いた．また撮影画像内で，レンズフレアが起きているピクセルに対し補正を行った．

ND フィルタを通して撮影された画像は，フィルタにより，多少の色がつく．これを補正するため，白色板を，ND フィルタありとなしの 2 通りについて Ladybug2 により撮影した．これら 2 種類の画像を比較することで，色スケールを計算し，これを用いることにより，色のついた画像を補正することができた．

36 光源環境と対象物の同時撮影による屋外物体の拡散反射率推定とその評価

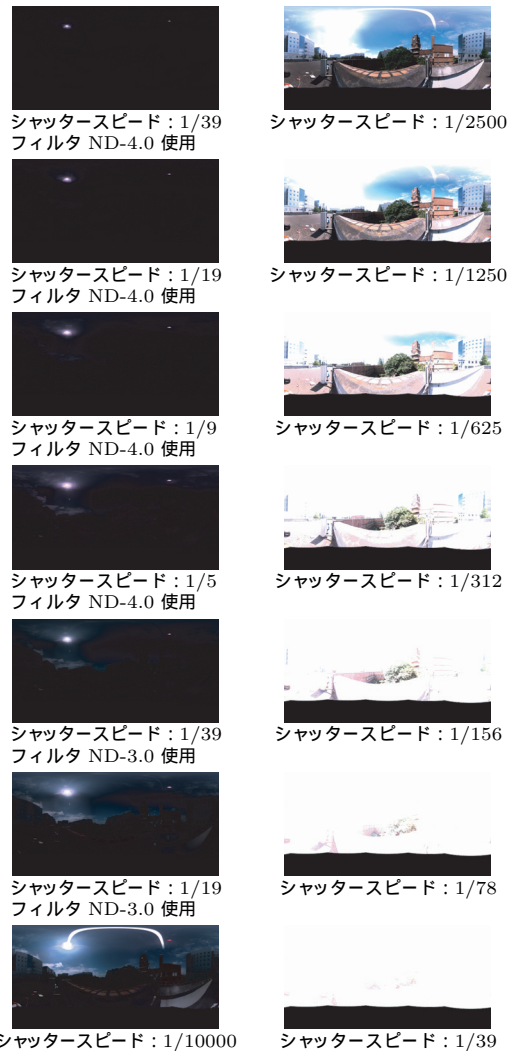
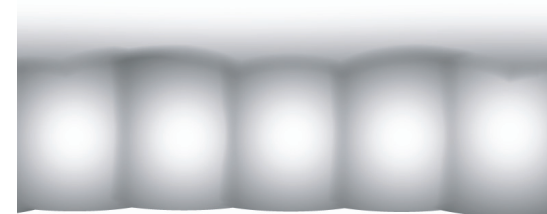


図 6 晴れの日撮影した画像の一部。シャッタースピードの単位は [ms] である。平均で晴れの日に 20 枚、曇りの日に 10 枚撮影した

Fig. 6 A set of images taken on a sunny day. Shutter speeds are expressed in microseconds. Normally, about twenty images were taken on a sunny day and ten on a cloudy day.



(a)



(b)



(c)

図 7 ビネッティング補正。(a) ビネッティングのような効果が見られる画像。右上部で画像が暗くなっているのが分かる。(b) 推定したビネッティング効果。(c) 補正画像。明るさが回復している

Fig. 7 Vignetting effect rectification. (a) an image with vignetting effect. See the upper right of the image. The reduction of the image is highly visible. (b) the estimated vignetting effect. (c) an image rectified. Image brightness is recovered.

4.4 対象物の形状の計測

レンジセンサ Cyrax 2500 を用いて、屋外の拡散反射物体の形状を取得した。相互反射を避けるため、なるべく凹部分の少ない物体を選んだ。センサから対象物までの距離は約 25 m である。この物体に対し、約 1 cm 間隔で三次元座標の測定を行った。なお、センサの測定誤差は、距離方向は 4 mm 以下で計測距離に依存しない。また、縦および横方向の誤差は主に角度エンコーダの精度で決まり、その値は 50 m ごとに 3 mm である。

位置の較正を容易にするため、周囲の環境の形状も含めた。これにより、実世界に近い周囲の光源の輝度分布を得ることができる。

次に、物体座標とカメラ座標の較正を行った。物体の幾何形状と撮影画像との対応点とをとり、Tsai¹⁸⁾ の手法を Ladybug2 の投影方法に拡張して、物体座標とカメラ座標間の回転行列、および移動行列の初期値を計算した。そして、手動でとった画像上の点と、初期値を用いて計算した点との誤差の二乗が最小となるような回転行列、および移動行列を、レーベンバーグ・マルカート法により求めた。これより、視点とカメラ姿勢を推定した。

4.5 反射率の推定

Ladybug2 で記録された光源環境の下、表面反射率を 1.0 に設定した対象物の形状をレンダリングした。ここで視点は、推定されたカメラ位置に設定してある。

レンダリングソフトには Radiance を使用した。このソフトは、対象物の幾何形状を中心とし、その表面の法線方向に球を設定する。そして、与えられた HDR 画像を環境マップとして球の内側に貼り付けてレンダリングを行う。そのため、太陽光と天空光が光源として計算され、HDR 画像に写りこんでいる周囲の建物、および対象物自身からの光は、幾何形状に遮られ、対象物の表面には届かない。

HDR 画像を、上記のレンダリングした画像で割ることにより、表面反射率の画像を作成した。

4.6 評価

異なる日時において、3 回の実験を行った、図 8 において、(a)、(b) および (c) は輝度を記録した撮影画像である。これらはそれぞれ、曇りの日の 14:35、夕暮れ時の 17:52、晴れの日の 11:50 に撮影した。(d)、(e) および (f) は、曇り、夕暮れ、晴れの光源下における対象物をそれぞれレンダリングしている。これらの画像では、物体表面の反射率はすべて 1.0 に設定されている。(g)、(h) および (i) は推定した表面反射率を表した画像であり、それぞれ、(a) と (d)、(b) と (e)、および (c) と (f) から計算されている。

(a)、(b)、(c) の 3 画像では対象物の見えに大きな差異があるが、推定した表面反射率の画

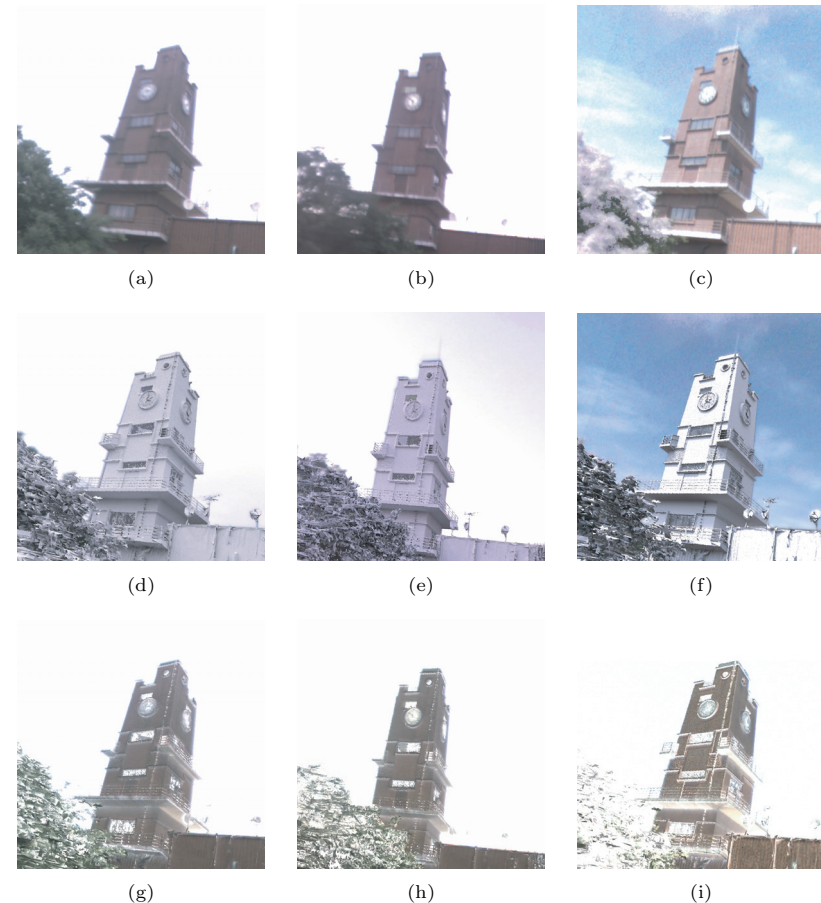


図 8 実験結果。1 行目：(a) 8 月 29 日 14:35 (曇り) の撮影画像、(b) 9 月 20 日 17:52 (夕暮れ) の撮影画像、(c) 9 月 15 日 11:50 (晴れ) の撮影画像。
2 行目：(d) 曇りの日の画像をもとにレンダリングした対象物の画像。表面反射率を 1.0 に設定してある、(e) 夕暮れ時の画像をもとにレンダリングした対象物の画像、(f) 晴れの日の画像をもとにレンダリングした対象物の画像。
3 行目：(g) (a) と (d) から推定した物体の表面反射率の画像、(h) (b) と (e) から推定した物体の表面反射率の画像、(i) (c) と (f) から推定した物体の表面反射率の画像

Fig. 8 Results of experiment, Top row: the captured images, Middle row: the images of the rendered object's shape, Bottom row: the estimated surface reflectance images.

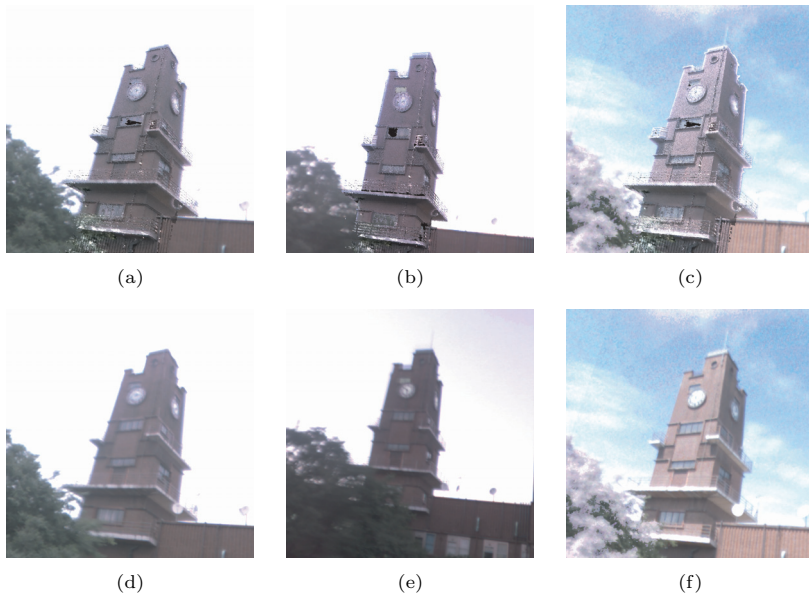


図 9 合成結果．1 行目：(a) 曇りの日の光源環境下で合成した画像，(b) 夕暮れ時の光源環境下で合成した画像，(c) 晴れの日の光源環境下で合成した画像．
2 行目：(d) 8 月 29 日 14:35 (曇り) の撮影画像，(e) 9 月 20 日 17:52 (夕暮れ) の撮影画像，(f) 9 月 15 日 11:50 (晴れ) の撮影画像

Fig.9 Results of synthesis, First row: the synthesized images, Second row: the captured images.

像である (g), (h) および (i) は互いに表面の色が近くなっている．対象物一部の RGB 中央値を比較すると，(g) では (123, 114, 114)，(h) では (123, 112, 107)，そして (i) では (127, 115, 106) となった．輝度にわずかな違いがある一方，色度を計算すると，(g) では (0.350, 0.325, 0.325)，(h) では (0.360, 0.328, 0.313)，および (i) では (0.365, 0.330, 0.305) と，非常に近い値となった．また，それぞれの標準偏差は (g) で (10.22, 9.54, 11.91)，(h) で (8.50, 9.04, 9.95)，そして (i) で (16.40, 15.28, 16.34) となり，ばらつきは 6.9% から 12.8% の範囲内に収まっている．

この結果をさらに評価するため，ある日の撮影画像を，推定した表面反射率の画像と別の日の光源環境から，再合成できるか実験した．曇りの日の画像をもとに推定した表面反射率の画像である図 8 (g) を対象物の形状に貼り付け，3 通りの光源環境下でレンダリングした．



図 10 (a) 9 月 25 日 17:07 (夕暮れ) の撮影画像，(b) 推定したマクベスチャートの表面反射率の画像
Fig.10 (a) the captured image illuminated by twilight, (b) the estimated surface reflectance image.

表 1 反射率における，真値と実験結果の色度の比較
Table 1 Chromaticities of the ground truth and the experimental results.

	真値	本手法による推定値
dark skin	(0.546, 0.295, 0.160)	(0.447, 0.315, 0.238)
blue sky	(0.245, 0.370, 0.385)	(0.269, 0.337, 0.394)
blue flower	(0.323, 0.292, 0.385)	(0.320, 0.302, 0.378)
bluish green	(0.215, 0.503, 0.283)	(0.227, 0.411, 0.362)
purplish blue	(0.187, 0.227, 0.586)	(0.239, 0.295, 0.466)
red	(0.760, 0.146, 0.095)	(0.752, 0.149, 0.100)

図 9 (a), (b), (c) がその結果であり，これらはそれぞれ曇りの日・夕暮れ時・晴れの日の光源環境から合成している．図 9 (d), (e), (f) は，それぞれの日における撮影画像である．(a) と (d), (b) と (e), および (c) と (f) とを比較すると，互いに見えが近く，推定した表面反射率が真値に近いことを示している．

4.7 反射率既知の物体を用いた実験

表面反射率が既知であるマクベスチャートを用いて，屋外で同様の実験を行った．その結果の画像を図 10 に示す．(a) が Ladybug2 により撮影したマクベスチャートの画像，(b) が推定した表面反射率の画像である．

マクベスチャート内の 18 色について，各色ごとに，本手法を用いて推定した反射率の値と，その真値との比較を行った．その結果の一部を表 1 に示す．2 つの色度の値が近くなったのは blue sky, blue flower および red のみとなり，その他の色については正しく反射率が推定されなかった．

5. 考 察

5.1 結果についての考察

図 8 (i) において、塔の 1 つの側面と、もう一方の側面との見えが大きく異なっている。この理由の 1 つに、晴れの日での撮影画像から、正確な HDR 画像が作成されなかったことがあげられる。晴れの日では、ND フィルタを用いたとしても、太陽光の輝度をカメラのレンジ内に記録できなかった。また、幅広い輝度範囲を記録するために撮影枚数を増やすので、時間がかかり、撮影の間に光源環境が変化してしまう。これらの原因から、図 11 のような誤った HDR 画像が作成される。今後は、より正確なシーン内の輝度を取得する必要がある。たとえば、フレアを起こさない高品質な魚眼レンズを、より幅広い露出の設定が可能なカメラに搭載し、それを雲台に取り付け、高速に回転させながら撮影することにより、全方向の画像を取得する手法が考えられる。

通常、ある光源下で物体をレンダリングする際は、相互反射を考慮しなければならない。本論文では、シーン内のすべての物体表面を白色と仮定している。よって、白色表面間の相互反射を計算していることになるが、実際の物体は白色ではないので、これは正確な計算ではない。周囲の建物の形状にも表面色をつけてレンダリングを行うことで、より正確な相互反射を計算し、より正確な対象物の表面反射率の推定を行うことができる。

5.2 本手法の適用範囲

本論文の実験で対象物とした時計塔に対して、カメラの narrow-band 仮定が成立しているかどうか検証した。対象物である時計塔の表面のスペクトルをマルチ分光測色計 PR-655 を用いて計測したところ、図 12 に示すとおりとなった。この図より、対象物表面のスペク



図 11 誤った HDR 画像
Fig. 11 An inaccurate HDR image.

トルはなめらかに変化し、波長 680 nm 以下の部分についてはほぼ直線で近似できる。一方、Ladybug2 の感度は図 13 のとおりであり、G および B のチャンネルに対する感度はそれぞれガウス関数で近似できる。

近似した関数を用いて、カメラが観測する輝度を計算した。カメラの 1 つのチャンネルに対する感度をガウス関数 $e^{-\lambda^2}$ 、対象物表面のスペクトルを直線 $a\lambda + b$ で表すとすると、カメラが観測する輝度 I は、

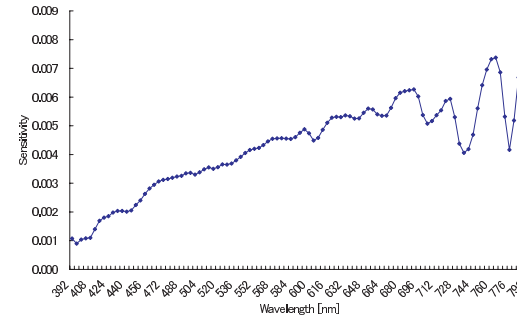


図 12 対象物表面の反射光

Fig. 12 Reflected light from the surface of the target object.

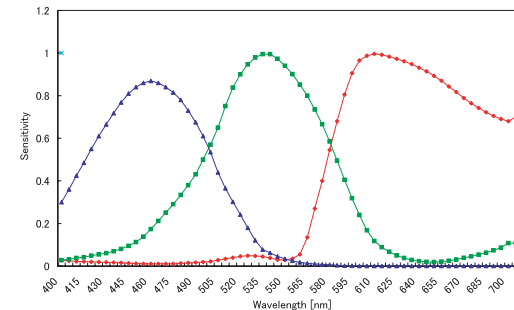


図 13 Ladybug2 の感度

Fig. 13 The sensitivity of Ladybug2.

$$\begin{aligned}
 I &= \int_{-\infty}^{\infty} (a\lambda + b)e^{-\lambda^2} d\lambda \\
 &= -\frac{a}{2} \left[e^{-\lambda^2} \right]_{-\infty}^{\infty} + b \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \\
 &= b\sqrt{\pi}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

となり、直線の傾きによらず、直線の y 切片 b の値の定数倍となる。以上より、対象物表面のスペクトルが直線によって近似でき、カメラの感度がガウス関数である場合、カメラの narrow-band 仮定を適用できる。

次に、本実験で使用した Ladybug2 カメラが、narrow-band 仮定からどれだけ外れているのかを計算した。カメラの narrow-band 仮定が成立する場合、カメラの感度はデルタ関数と見なして輝度を計算した。一方、Ladybug2 カメラの輝度は、感度関数と対象物表面のスペクトルとの積を、全波長にわたって積分して求めた。計算した 2 つの輝度の色度を比較したところ、narrow-band 仮定が成立する場合は (0.423, 0.350, 0.227), Ladybug2 カメラの輝度は (0.351, 0.358, 0.291) となった。R の値に少し誤差があるが、G と B の誤差はほとんどない。このような誤差を生む原因としては、対象物表面の 680 nm 以上の高波長に対

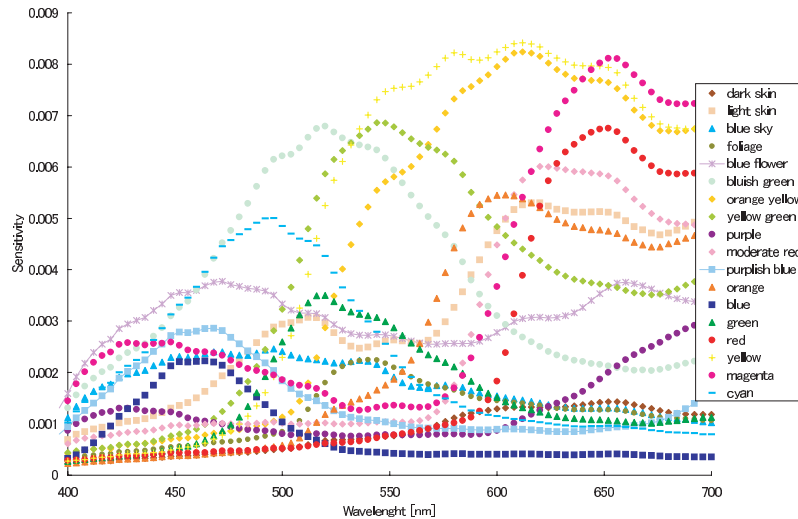


図 14 マクベスチャートの反射率
Fig. 14 Reflectance of the macbeth chart.

するスペクトルが直線で近似できないこと、また、Ladybug2 の R チャンネルに対する感度がガウス関数の形でないことがあげられる。

一方、表面反射率が既知であるマクベスチャートを用いた実験では、18 色中 15 色の値が正しく推定されなかった。これは、図 14 に示すように、正しい結果の得られなかった 15 色のスペクトルが、直線で近似できないことが原因である。

本手法では対象物表面を拡散反射面であると仮定しているが、現実には鏡面反射成分を持つ物体が数多く存在する。そのような物体に対し本手法を適用することを考えてみる。対象物表面が鋭い鏡面反射成分を持つ場合は、異なる 2 方向から対象物を撮影し、より暗い画像を用いればよい。一方、対象物の表面が粗く、鏡面反射が広がって観測される場合は、表面反射率が真値より高く推定される。

6. ま と め

本論文では、全周画像が撮影できるカメラを用いて、対象物と光源環境を同時に撮影し、屋外拡散反射物体の表面反射率を推定する効率的な手法を提案した。この手法を用いることにより、特殊な装置を使用する従来の手法と比べて、計測およびデータ処理のコストを大幅に削減することができる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省の「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」の補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) Ikeuchi, K. and Miyazaki, D.: Digitally Archiving Cultural Objects, *Springer science+Business Media, LLC* (2008).
- 2) Ikeuchi, K., Oishi, T., Takamatsu, J., Sagawa, R., Nakazawa, A., Kurazume, R., Nishino, K., Kamakura, M. and Okamoto, Y.: The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects, *Int'l J. Com. V. 75-1*, pp.189-208 (2007).
- 3) Dana, K.J., van Ginneken, B., Nayer, S.K. and Koenderink, J.J.: Reflectance and texture of real-world surfaces, *Proc. CVPR*, pp.151-157 (1997).
- 4) Sato, Y., Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K.: Object shape and reflectance modeling from observation, *Proc. SIGGRAPH*, pp.379-387 (1997).
- 5) Lin, S. and Lee, S.W.: Estimation of diffuse and specular appearance, *Proc. ICCV, II*. pp.855-860 (1999).
- 6) Machida, T., Yokoya, N. and Takemura, H.: Surface reflectance modeling of real

objects with interreflections, *Proc. ICCV*, I. pp.170–177 (2003).

- 7) Sato, I., Okabe, T., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Appearance sampling for obtaining a set of basis images for variable illumination, *Proc. ICCV*, II. pp.800–807 (2003).
- 8) Winnemoller, H., Mohan, A., Tumblin, J. and Gooch, B.: Light waving: Estimating light positions from photographs alone, *Computer Graphics Forum*, 24-3, pp.433–438 (2005).
- 9) Pulli, K., Cohen, M., Duchamp, T., Hoppe, H., Shapiro, L. and Stuetzle, W.: View-based rendering: Visualizing real objects from scanned range and color data, *Proc. EUROGRAPHICS Workshop*, pp.23–34 (1997).
- 10) Neugebauer, P.J. and Klein, K.: Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views, *Computer Graphics Forum*, 18-3, pp.245–256 (1999).
- 11) Lensch, H.P.A., Heidrich, W. and Seidel, H.P.: Automated texture registration and stitching for real world models, *Proc. Pacific Graphics*, pp.317–326 (2000).
- 12) Wang, L., Kang, S.B., Szeliski, R. and Shum, H.Y.: Optimal texture map reconstruction from multiple views, *Proc. CVPR*, pp.347–354 (2001).
- 13) Bernardini, F., Martin, I.M. and Rushmeier, H.: High-quality texture reconstruction from multiple scans, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 7-4, pp.318–332 (2001).
- 14) Yu, Y. and Malik, J.: Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs, *Proc. SIGGRAPH*, pp.207–218 (1998).
- 15) Debevec, P., Tchou, C., Gardner, A., Hawkins, T., Poullis, C., Stumpfel, J., Jones, A., Yun, N., Einarsson, P., Lundgren, T., Fajardo, M. and Martinez, P.: Estimating surface reflectance properties of a complex scene under captured natural illumination, *USC ICT-TR-06* (2004).
- 16) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 5-1, pp.1–12 (1999).
- 17) Point Grey Research. <http://www.ptgrey.com>
- 18) Tsai, R.Y.: An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision, *Proc. CVPR*, pp.364–374 (1986).

(平成 20 年 4 月 23 日受付)

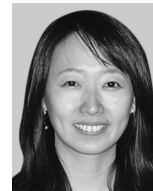
(平成 20 年 11 月 28 日採録)

(担当編集委員 眞鍋 佳嗣)



大蔵 苑子

2007年早稲田大学理工学部コンピュータ・ネットワーク工学科卒業。現在、東京大学大学院学際情報学部学際情報学専攻修士課程に在学。物理ベースビジョンの研究に従事。



川上 玲

2003年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2008年同大学院博士課程修了(情報理工学)。現在、同生産技術研究所特任助教。色恒常性、スペクトル解析、コンピュータビジョンにおける光学的解析と応用に関する研究に従事。



池内 克史(正会員)

京都大学工学部機械工学科卒業。1978年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。MIT人工知能研、電総研、CMU計算機科学科を経て、1996年より東京大学生産技術研究所教授。2000年より東京大学大学院情報学環教授。人間の視覚機能、明るさ解析、物体認識、人間による組み立て作業の自動認識等の研究に従事。電子情報通信学会、ロボット学会、人工知能学会、IEEE各会員。