

## 全周画像を用いた屋外拡散反射物体の表面反射率の推定

大蔵苑子<sup>†</sup> 川上玲<sup>†</sup> 池内克史<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所

E-mail : {okura, rei, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** 近年、物体の三次元モデル化に関する研究が盛んに行われている。物体の正確な見えを再現するには、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ねばならない。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、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対象物と光源環境を同時に撮影し、ただ一度の計測から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。これにより計測が一度で済むほか、特殊な装置の必要がない。また、物体と光源の幾何学的な較正、さらに、カメラの露出の較正も不要である。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。

## Surface Reflectance Estimation of Diffuse Outdoor Objects using Spherical Images

Sonoko Okura<sup>†</sup>, Rei Kawakami<sup>†</sup>, Katsushi Ikeuchi<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

E-mail : {okura, rei, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Today, requirements for more realistic models of a real world object have been increased. To simulate the accurate appearance of the object, it is necessary to acquire 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 specific apparatus nor calibration of the camera gain factor is needed. 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。その応用分野は産業、文化、教育、娯楽など多岐にわたる。とりわけ、文化財のモデル化は多くの注目を集めている。文化財をデジタル情報として保存することによって、通信網を通して、より多くの人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、及び(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。

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年代後半、レンジセンサの発達に伴い実物体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留まっている [1][2][3][4][5]。一方、90年頃から、より正確な見えのモデル化手法として、Physics-based の反射パラメタ推定 [6][7][8][9]、Image-based レンダリング [10][11] 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 [12]。

一般的に、対象物が屋外である場合、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)対象物見え、が必要となる。形状と見えは、それぞれレンジセンサ及びイメージセンサで取得可能であり、光源環境の取得が問題となる。

筆者らの知識によれば、初めて屋外物体の反射特性を復元したのは Yu らであるが、彼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 [13]。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 モデルのパラメタを反復計算で決定した [14]。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、カメラの露出の較正が必要となる。

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、ただ一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



図 1: 全周カメラ Ladybug2

環境の同時取得が可能である。これにより撮影が一度で済むほか、特殊な装置を用いる必要がない。また、物体と光源の幾何学的較正、及び、カメラの露出の較正も不要である。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。対象物の幾何形状及びカメラ姿勢は既知であるとし、また、光源は無遠慮であると仮定する。

章立ては以下の通りである。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。第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。実験及びその結果を第4章に、それらに基づく本手法の限界と考察を第5章に記す。そして第6章にて、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及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にて、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一度でよい。



図 2: Ladybug2 により撮影された画像

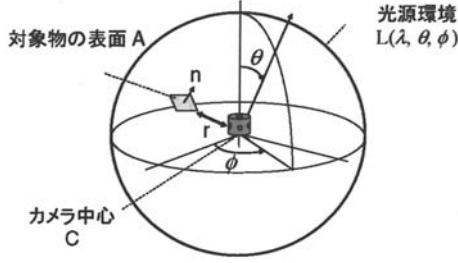


図 3: 全周カメラによるシーン内の輝度の取得

本手法では Point Grey Research 社の Ladybug2[15] というカメラを使用した。図 1 のように、このカメラは六個のレンズを持ち、そのうちの一個は垂直方向、残りの五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。画像の縦軸及び横軸は、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一度に取得できる。

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。

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。

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。

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

ここで、k と τ はそれぞれセンサの種類とカメラのゲインを表しており、τ はレンズの口径、電気的な

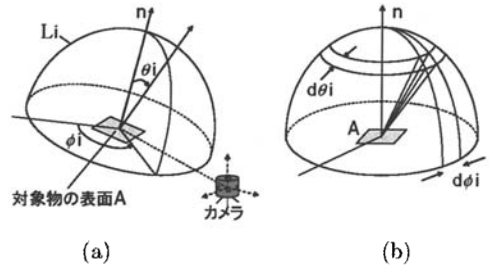


図 4: (a) 投射する光線方向 (b)  $(\theta_i, \phi_i)$  方向の立体角

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 は定数とみなせる。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  $d\omega_i$  を考えてみる。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  $d\theta_i$  と微小天頂角  $d\phi_i$  の大きさから成る。

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

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。

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 との掛け算で表される。

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

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) で示した通り、波長  $\lambda$  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。

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

### 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。光源は無遠慮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、 $\psi$  は対象物表面の法線方向と入射光の方向  $(\theta, \phi)$  とのなす角度であり、 $\Theta$  と  $\Phi$  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、 $\psi, \Theta, \Phi$  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、全ての点 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、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。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、対象物及び周囲の光源の輝度分布の取得を行った。

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に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 に示すように、カメラのレンズの外側に取り付けられた。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。

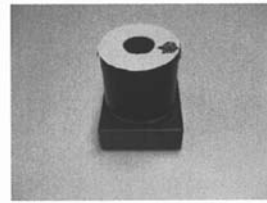


図 5: ND フィルタを取り付けた Ladybug2

#### 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、ビネッティングの様な効果をもたらす。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





シャッタースピード:1/39  
フィルタ ND-4.0 使用



シャッタースピード:1/19  
フィルタ ND-4.0 使用



シャッタースピード:1/9  
フィルタ ND-4.0 使用



シャッタースピード:1/5  
フィルタ ND-4.0 使用



シャッタースピード:1/39  
フィルタ ND-3.0 使用



シャッタースピード:1/19  
フィルタ ND-3.0 使用



シャッタースピード:1/10000



シャッタースピード:1/2500



シャッタースピード:1/1250



シャッタースピード:1/625



シャッタースピード:1/312



シャッタースピード:1/156



シャッタースピード:1/78



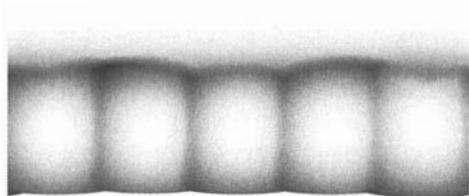
シャッタースピード:1/39

射による。ND フィルタ表面で反射される光は、入射角が大きくなるほど増す。

この効果の補正のため、ND フィルタを付けた時、及び付けなかった時の二通りの場合において、Ladybug2 による白色板の撮影を行った。カメラの六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。



(a)



(b)



(c)

図 7: (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わかる。(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。

図 6: 晴れの日に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。

### 4.3 HDR 画像の作成

HDR (High Dynamic Range) 画像を作成した。この時、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 フィルタ有り無しとの二通りについて Ladybug2 により撮影した。これら二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。

### 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、平面から成る凸物体を選んだ。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、Tsai らの手法を用いて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を取り、これらを用いて視点とカメラ姿勢を計算した。

### 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。

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、三回の実験を行った。図8において、(a)、(b)及び(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)及び(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全て1.0に設定さ

れている。(g)、(h)及び(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)、及び(c)と(f)から計算されている。

(a)、(b)、(c)の三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像である(g)、(h)及び(i)は互いに表面の色が近くなっている。対象物の一部のRGB中間値を比較すると、(g)では(120, 108, 105)、(h)では(120, 107, 98)、そして(i)では(141, 127, 111)となった。輝度に僅かな違いがある一方、色度を計算すると、(g)では(0.360, 0.324, 0.315)、(h)では(0.369, 0.329, 0.302)、及び(i)では(0.372, 0.335, 0.292)と、非常に近い値となった。これはカメラの narrow-band 仮定が、この物体に関しては問題無く成立していることを表している。

## 5 考察

### 5.1 問題点

図8(i)において、塔の一つの側面と、もう一方の側面との見えが大きく異なっている。この理由の一つに、晴れの日の撮影画像から、正確なHDR画像が作成されなかったことが挙げられる。これには、晴れの日は空が明るすぎて、空の一部が正確に記録できなかったことが考えられる。これより、図9のような誤ったHDR画像が作成される。

また、図8(i)において、時計塔の明るい方の側面に、多くのノイズが見られる。対象物の粗い表面が、このノイズを生み出している。明るい光が平らでなく粗い平面を照らすと、直接光を受ける面と、そうでない面があらわれる。それゆえ、明るい面と暗い面との見えの違いが顕著となり、ノイズのように見える。

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、シーン内の全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。白色表面間での相互反射は、色のついた表面間での相互反射よりも明るいものとなり、それゆえ、推定された対象物の表面反射率は、正しい値よりも低くなっていると考えられる。

### 5.2 今後の課題

正確なHDR画像を作成するためには、より正確なシーン内の輝度を取得する必要がある。これを実

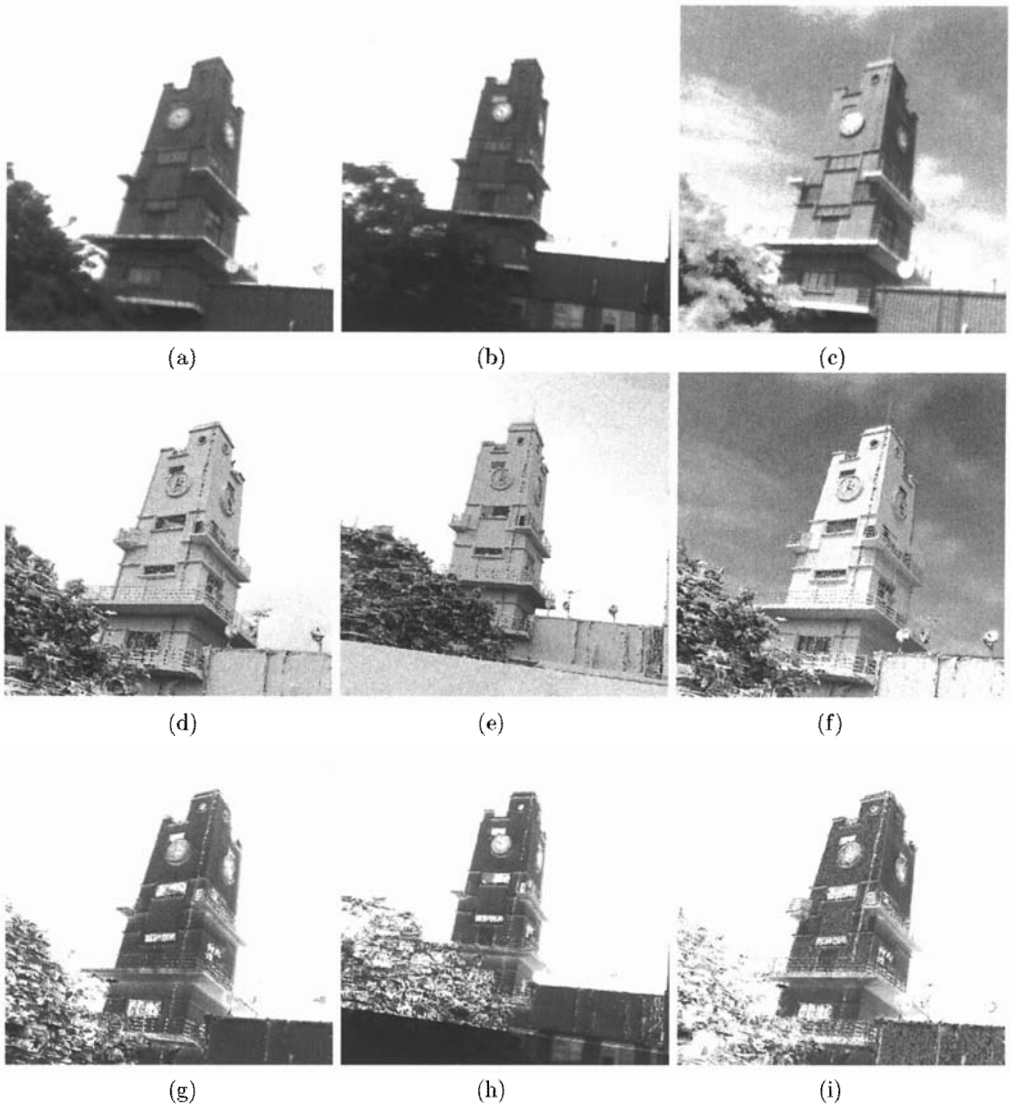


図 8: 一行目: (a) 曇りの日の 14:35 に撮影された画像 (8 月 29 日, 東京で) (b) 夕暮れ時, 17:52 に撮影された画像 (9 月 20 日, 東京で) (c) 晴れた日の 11:50 に撮影された画像 (9 月 15 日, 東京で)  
 二行目: (d) 曇りの日の画像を元にレンダリングした対象物の画像. 表面反射率を 1.0 に設定してある (e) 夕暮れ時の画像を元にレンダリングした対象物の画像 (f) 晴れの日の画像を元にレンダリングした対象物の画像  
 三行目: (g) (a) と (d) から推定した物体の表面反射率の画像 (h) (b) と (e) 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



図 9: 誤った HDR 画像

現するために、幅広く露出を制御でき、かつ全周撮影ができるカメラを設計することが考えられる。

さらなる課題は、より正確な対象物の形状の取得や、また、相互反射の影響の考慮により実現される。

## 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、計測及びデータ処理のコストを大幅に削減できる。

## 参考文献

- [1] K. Pulli, M. Cohen, T. Duchamp, H. Hoppe, L. Shapiro and W. Stuetzle, "View-based rendering: Visualizing real objects from scanned range and color data," in *Proc. EUROGRAPHICS Workshop*, pp.23-34, 1997.
- [2] P. J. Neugebauer and K. Klein, "Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views," *Computer Graphics Forum* 18-3, pp.245-256, 1999.
- [3] H. P. A. Lensch, W. Heidrich and H. P. Seidel, "Automated texture registration and stitching for real world models," in *Proc. Pacific Graphics*, pp.317-326, 2000.
- [4] L. Wang, S. B. Kang, R. Szeliski and H. Y. Shum, "Optimal texture map reconstruction from multiple views," in *Proc. CVPR*, pp.347-354, 2001.
- [5] F. Bernardini, I. M. Martin and H. Rushmeier, "High-quality texture reconstruction from multiple scans," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 7-4, pp.318-332, 2001.
- [6] K. J. Dana, B. van Ginneken, S. K. Nayer and J. J. Koenderink, "Reflectance and texture of real-world surfaces," in *Proc. CVPR*, pp.151-157, 1997.

- [7] Y. Sato, M. D. Wheeler and K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation," in *Proc. SIGGRAPH*, pp.379-387, 1997.
- [8] S. Lin and S. W. Lee, "Estimation of diffuse and specular appearance," in *Proc. ICCV*, II. pp.855-860, 1999.
- [9] T. Machida, N. Yokoya and H. Takemura, "Surface reflectance modeling of real objects with interreflections," in *Proc. ICCV*, I. pp.170-177, 2003.
- [10] I. Sato, T. Okabe, Y. Sato and K. Ikeuchi, "Appearance sampling for obtaining a set of basis images for variable illumination," in *Proc. ICCV*, II. pp.800-807, 2003.
- [11] H. Winnemoller, A. Mohan, J. Tumblin and B. Gooch, "Light waving: Estimating light positions from photographs alone," *Computer Graphics Forum* 24-3, pp.433-438, 2005.
- [12] K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume, K. Nishino, M. Kamakura and Y. Okamoto, "The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects," *Int'l J. Com. V.* 75-1, pp.189-208, Oct. 2007.
- [13] Y. Yu and J. Malik, "Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs," in *Proc. SIGGRAPH*, pp.207-218, 1998.
- [14] P. Debevec, C. Tchou, A. Gardner, T. Hawkins, C. Poullis, J. Stumpfel, A. Jones, N. Yun, P. Einarsson, T. Lundgren, M. Fajardo and P. Martinez, "Estimating surface reflectance properties of a complex scene under captured natural illumination," *USC ICT-TR-06*, 2004.
- [15] Point Grey Research. <http://www.ptgrey.com>
- [16] R. Y. Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision," in *Proc. CVPR*, pp.364-374, 1986.