

屋外の複合現実感における 1枚の実画像を用いた光源推定手法

工藤 雷太[†] 角田 哲也[†] 川上 玲^{††} 大石 岳史[†] 池内 克史[†]

[†] 東京大学大学院 情報学環
^{††} 東京大学 生産技術研究所

あらまし 本研究では、屋外の複合現実感において、1枚の実画像から光源分布を推定する手法を提案する。従来手法では、環境に設置した鏡面球に写りこんだ画像を解析する方法やビデオカメラを用いる方法などにより光源の方向と輝度を求めていたが、光源推定用の機器を設置するコストや手間などが生じていた。そこで提案手法ではまず、光源色によらない物体の反射率から求められる不変量から、形状が既知の物体の影領域を検出する。続いて、物体の影領域の照度を解析することにより、実光源環境を推定する。そして、あらかじめ生成しておいた仮想物体の影を表す基礎画像を合成することにより、実光源環境に対応した仮想物体のソフトシャドウを表現する。最後に、本提案手法を用いて仮想物体の合成実験を行った。これより、従来のように新たな機器を必要とせず、1枚の実画像から自動的に正確な光源環境の推定と陰影表現を行うことが可能になり、本手法の有効性を確認した。

Illumination Distribution from Shadow Using a Single Real Image for Outdoor Mixed Reality

Raita Kudo[†] and Tetsuya Kakuta[†] and Rei Kawakami^{††} and Takeshi Oishi[†] Katsushi Ikeuchi[†]

[†] Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo
^{††} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Abstract In this paper, we propose a method of estimating illumination distribution from shadow in Mixed Reality (MR), using a single real image. We label four regions in real image for shadow extraction with log F value calculated from the pixel value and the spectral sensitivity characteristic of the camera. Then we estimate shadow image by these four regions, using Bayesian optimization which allows for the optimal extraction of smooth shadow. Finally we estimate the illumination distribution of a real scene from shadow image. We represent whole distribution as a set of point light sources, and solve linear equations which leads relations between each pixel value of shadow image and a point light source. The estimated illumination distribution of an outdoor Mixed Reality is reliable in a real scene.

1 はじめに

近年、コンピュータグラフィックス (CG) などを現実世界に重畳することで、現実世界と仮想世界を融合する複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術に関する研究が盛んに行なわれている [1]。MR では、現実の撮影画像に CG を重ね合わせることで、あたかも CG で描いた仮想物体が現実世界に出現したかのように見せることが可能である。MR は、教育・建築・エンターテインメント分野等への応用が期待されており、現実感の高い合成画像が求められている。たとえば、失われた文化財を仮想的に復元する試みが行われている。

この複合現実感技術において、現実世界と仮想世界を違和感なく融合させるための大きな課題として、光学的整合性の問題が挙げられる。たとえば、仮想物体に正しく陰影表現を施して現実世界と合成しなければ、現実世界と仮想物体の間に違和感が生じる [12] [13]。

光学的整合性を実現するためには、仮想世界の CG を現実世界の光源環境に合わせてレンダリングする必要がある。

光学的整合性実現のために、現実世界の光源環境を推定する手法が数多く提案されている。Sato らは現実世界を撮影した 2 枚の全方位画像を用いることにより、光源輝度と光源までの距離を推定する手法を開発している [7] [11]。Debevec や Kanbara らは球面鏡における反射光を測定することにより現実世界の光源分布を推定する方法を提案している [2] [4]。また Matsuoka らは光センサを用いた光源分布推定手法を提案している [6]。

これらの手法の問題点として、第一に、魚眼レンズ付きカメラや球面鏡、光センサなどの特殊な機器を必要とする点が挙げられる。第二に、実画像を撮影する観測地点と光源推定のための対象物体が近い場合に

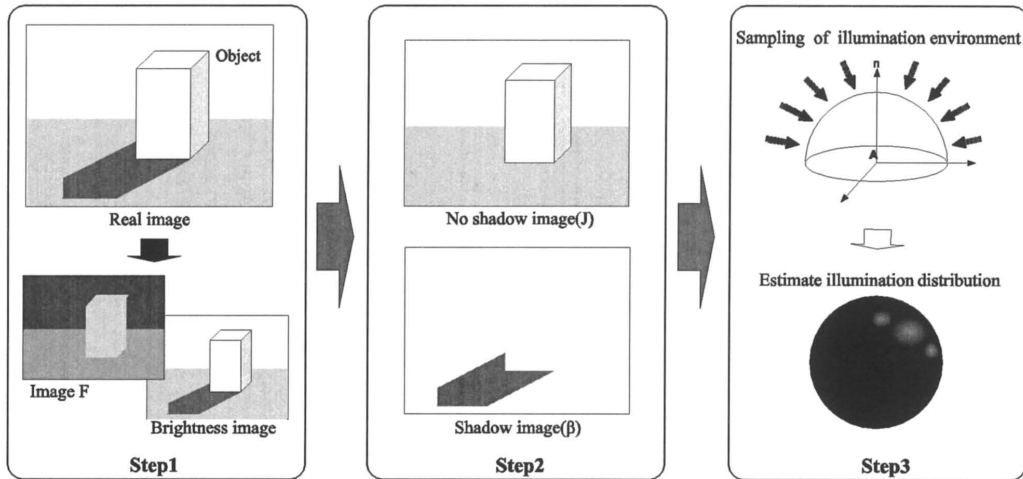


Fig. 1: 提案手法

か適用できない点が問題である。たとえば、角田らの提案する飛鳥京 MR コンテンツでは、実画像を撮影する観測地点と、光源環境を推定する対象地点が遠く離れているため、正確な光源環境の推定ができない。

Satoらは、これらの問題について、三次元形状が既知である対象物体により生じた影の濃淡画像を利用することで解消した [8]。しかしこの手法では、影がおちる面の表面反射率を求めるために、複数枚の画像が必要になるという点で煩雑である。

そこで本稿では、Wuらの手法 [9]を用いて、対象物体により生じた影画像を、1枚の実画像から分離することで、影の濃淡画像を取得する。しかし Wuらの手法では、ユーザーの初期入力として、影領域・非影領域などの4領域を必要とする。そこで、光源色によらない物体の反射率から求められる不変量 [5]を用いて初期領域を指定する。これにより、入力が不要となり、自動的に影領域の抽出から光源環境の推定を行うことを可能とした。

本稿の内容は以下のとおりである。まず2章で本稿で提案する手法の概要について述べる。次に、3章で光源色によらない物体の反射率から求められる不変量を用いた領域のラベリング手法を示す。4章では、3章で得られた領域を初期条件とした影の濃淡画像の抽出手法について述べる。5章では4章で得られた影の濃淡画像をもとに、実世界での光源環境を推定する手法について述べる。6章で提案手法を用いた光源環境の推定実験結果を示し、7章で結ぶ。

2 手法の概要

本稿で提案する手法の手順を以下に示す (Fig. 1)。

1. 実画像の各画素から算出した光源不変量により画像 F を構成する。画像 F と輝度画像を用いて、影

画像を抽出する処理における4つの初期領域をラベリングする。

2. 実画像を影画像と影なし画像の積とするモデルで表す。初期領域から暫定的な影なし画像 J を計算する。画像 J の画素値を初期値として、ベイズ推定式に基づいて反復計算することで正確な影画像を抽出する。
3. 実世界の光源環境を離散的な光源輝度の総和として近似し、各画素の明るさと光源サンプリング方向の光源輝度が未知数となる連立方程式に基づき、光源環境を推定する。

3 初期領域のラベリング

本章では次章で影画像を抽出する際に初期領域として必要となる4領域をラベリングする方法について述べる。4領域とは、Fig.2に示すように、影領域 S 、あいまいな影領域 U 、非影領域 \bar{S} 、影画像の推定から除外する領域 E である。

影領域 S とは、影領域からソフトシャドウなどの曖昧な境界を除外した領域をあらわす。非影領域 \bar{S} は、影を全く含まない地面領域をあらわす。あいまいな影領域 U とは、曖昧な境界を含む影領域をあらわす。影画像の推定から除外する領域 E とは、たとえば実画像中の影と影を落とす対象物体との境界近辺のような領域である。次章で述べる手法では領域 E を除外する必要がある。従来手法ではこれらの4領域を手入力で指定していた。

3.1 非影領域 \bar{S} 及び除外領域 E のラベリング

まず、領域 \bar{S} ・領域 E をラベリングするために、屋外 MR において以下の2条件を仮定する。

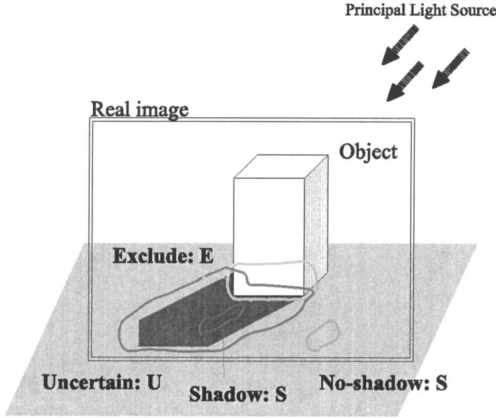


Fig. 2: ラベリングする 4 領域

- 実世界において、カメラと対象物体の位置関係は既知である。
- 実画像の最下端の画素列は地面領域である。

前者の仮定より、実画像中の対象物体の位置が分かることから、その周辺を領域 E とする。後者の仮定より、実画像の最下端の画素列を領域 S とする。

3.2 影領域 S 及びあいまいな影領域 U のラベリング

次に、領域 S ・領域 U をラベリングする。領域各画素において観測された色情報から、光源色によらない物体の反射率から求められる不変量を用いて領域 S, U を自動的に求める手法を提案する。

光源から放射された光は、反射表面により反射し、撮影カメラにより感知される。カメラで撮影された画像輝度はカメラのナローバンド仮定を適用することで実画像の各画素値 I_K は次式のように表される。

$$I_K = G_K \int S_K(\lambda) \rho(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (K = R, G, B)$$

$$= G_K S_K(\lambda_{cK}) E_{cK}(\lambda_{cK}) \quad (1)$$

ここで、 $S_K(\lambda)$, $\rho(\lambda)$, $E(\lambda)$ はそれぞれ反射表面の分光感度特性、カラーフィルタの分光感度、光源の分光分布を表し、 G_K はカメラ特性(絞り・シャッタースピード・電氣的な増幅)などによるゲインを表す。

ここで、カメラなどのカラーセンサにおける各フィルタ (R,G,B) の輝度値の比(色度)を、次式のように B の輝度値により正規化する。

$$i_R = \frac{I_R}{I_B}, i_G = \frac{I_G}{I_B} \quad (2)$$

この式(2)を式(1)に代入することで、次式を得る。

$$i_R = s_R e_R, i_G = s_G e_G \quad (3)$$

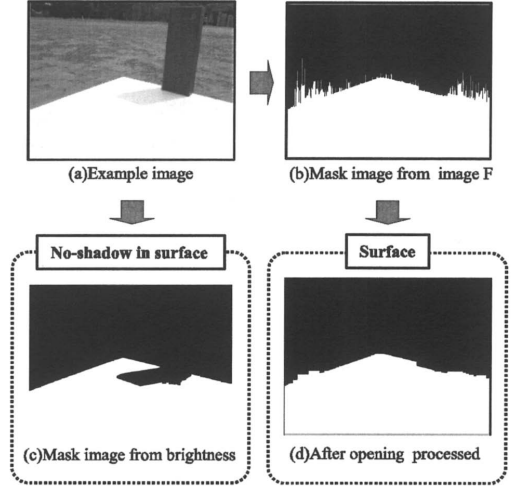


Fig. 3: マスク画像例

また今回は、光源分布は黒体放射によるものであると近似する。多くの自然光源は黒体放射で近似できることが実験的に報告されている [3]。黒体放射の仮定と、式(3)(2)より、Marchantらは、画像色度と物体の反射率の色度と光源の色度についての以下の関係式を求めた。[5]

$$i_R = \frac{s_r}{(s_g)^A} (i_G)^A \quad (4)$$

$$A = \frac{\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B}}{\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_B}} \quad (5)$$

式(4)における $\frac{s_r}{(s_g)^A}$ は光源の色によらない不変量であり、以降、F 値と呼ぶことにする。F 値は、式(4)より $\frac{i_R}{(i_G)^A}$ を計算することで求められる。

F 値は光源によらない不変量であるため、影が落とされる面が均質であれば影領域と非影領域の F 値は同じ値になるはずである。そこで、画像内の各画素の F 値が、地面領域の F 値と近い領域を地面領域としてラベリングする。

ここで、本稿においては実画像の下側が地面であると仮定しているため、最下端の画素からそれぞれ上方向に走査し、ある閾値範囲を外れるまで地面領域のラベリングを行う。ただしそれだけでは Fig.3(b) のように誤ったラベリングが残るため、得られたラベリング画像を、膨張・収縮を同じ回数行うオープニング処理・クロージング処理を行うことで地面領域を抽出する (Fig.3(d))。

そして、得られた地面領域内の画素の輝度について、閾値処理を行い、輝度の暗い画素を影領域としてラベリングする (Fig.3(c))。このようにして得られた影領域を大まかに膨張処理を行うことであいまいな影領域 U

を、収縮処理を行うことで影領域 S のマスク画像を得る。

4 実画像からの影画像抽出

4.1 画像モデル

本章では、実画像から影画像と影なし画像に分離する Wuらの手法 [9] について述べる。まず、ここでは実画像 I が影画像 β と影なし画像 J を用いて以下のように表せるモデルを用いる

$$I = \beta J \quad (6)$$

Wuらの手法で影画像を得る手順は大きく以下の2つである。

1. 影領域 S と非影領域 \bar{S} をもとに、あいまいな影領域 U 内の影らしさを求め、影なし画像の初期値 \hat{J} を求める
2. 確率モデルを定義し、おおまかな影なし画像 \hat{J} の画素値を初期値として反復計算することで、より正確な影画像 β を求める。

実際の MR システムを想定すると、フレーム毎にユーザーが初期領域を入力することは難しく、また非現実的である。提案手法では、初期領域である 4 領域を自動的に求めることが出来る。

4.2 \hat{J} の推定

まず、影領域 S 内においては影画像 β の値は概ね一定である。そこで影領域 S 内の β を、影領域 S と非影領域 \bar{S} の平均輝度 I_{mS} ・ $I_{m\bar{S}}$ を用いて次式で与えられる。

$$\beta = \frac{I_{m\bar{S}}}{I_{mS}} \quad (7)$$

一方、あいまいな影領域 U 内においては、影画像 β は一定にはならず、影領域 S から離れるにつれて値は小さくなる。そこで、 U 内の各ピクセルについて、影領域となる確率密度関数を計算した affinity map $\chi_s(x)$ を生成する。 S 内と \bar{S} 内の画素輝度のヒストグラムをガウス混合モデルにあてはめた結果を $\{G_S(i; \mu_S(i), \sigma_S(i))\}, \{G_{\bar{S}}(i; \mu_{\bar{S}}(i), \sigma_{\bar{S}}(i))\}, (i = 1, 2, \dots)$ とすると、affinity map を次式のように定義する。

$$\chi_s(x) = \frac{d_S^i(x)}{d_S^i(x) + d_{\bar{S}}^i(x)} \quad (8)$$

ここで、 $d_S^i(x) = (I(x) - \mu_S^i) / \sigma_S^i$, $d_{\bar{S}}^i(x) = (I(x) - \mu_{\bar{S}}^i) / \sigma_{\bar{S}}^i$ である。

得られた affinity map は各画素の輝度が領域 S ・領域 \bar{S} のどちらの分布に近いかを表している。領域 U 内の β の推定に使うため、affinity map の範囲を β の範囲に

正規化し、 β の暫定値とする。この β の暫定値とモデル式 (6) より得られた暫定的な J の推定結果を J_{est} とする。

さらに、領域 $S \cap U$ 内の画素値を境界 $\Omega = \partial(S \cap U) \setminus E$ 内の最も近い画素値で置き換えた画像 $D(x)$ を生成し、次式のように J_{est} と $D(x)$ を合成し、おおまかに推定した影なし画像 \hat{J} を得る。

$$\hat{J}(x) = (1 - \frac{d(x)}{d_{max}})D(x) + (\frac{d(x)}{d_{max}})J_{est}(x) \quad (9)$$

ここで $d(x)$ は領域 $S \cap U$ 内の画素と、画像 D 生成時に置き換えた画素の距離を、 d_{max} は最大距離を表し、 $\frac{d(x)}{d_{max}} \in [0, 1]$ である。

4.3 確率モデル

この問題を解くために、影画像 β に関する尤度とベイズの公式を用いると、ここで求めたい影画像 β の推定画像 β^* は次式のように表せる

$$\begin{aligned} \beta^* &= \arg \max P(\beta | S, \bar{S}, U, E) \\ &= \arg \max P(S, \bar{S}, U, E | \beta) P(\beta) \end{aligned} \quad (10)$$

一方、影なし画像 J について、領域 S と領域 \bar{S} はテクスチャは似ているが輝度が異なる点において画像 J と密接な関係を有している。これらを元に推定した最終的な影なし画像 \hat{J}^* は次式のように表される。

$$\hat{J}^* = \arg \max P(\hat{J} | S, \bar{S}, U, E) \quad (11)$$

式 (10), 式 (11) より、最終的に我々が解く問題は次式に帰着することができる。

$$\beta^* = \arg \max P(\hat{J}^* | \beta) P(\beta) \quad (12)$$

ただし、 $P(\hat{J}^* | \beta)$, $P(\beta)$ は次の 2 項により定義する。

推定画像 \hat{J}^* に関する尤度項: $P(\hat{J}^* | \beta)$

\hat{J}^* は推定画像であるためこの尤度モデルには誤差が含まれる。その誤差はガウス分布に近似できるとし、 $P(\hat{J}^* | \beta)$ 項を以下のように定義する。

$$P(\hat{J}^* | \beta) = \exp\left(-\frac{\sum_{x \in U \cap S} [I(x) - \beta(x)\hat{J}^*]^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (13)$$

影の滑らかさに関する事前確率項: $P(\beta)$

影画像 β は影の境界を除いて滑らかで低周波成分のみで構成されていると仮定し、滑らかさに関する項を次式のように定義する。

$$\exp\left(-\frac{\sum_{\langle x, y \rangle \in N} [\beta(x) - \beta(y)]^2 k(x, y)}{2\sigma_1^2}\right) \quad (14)$$

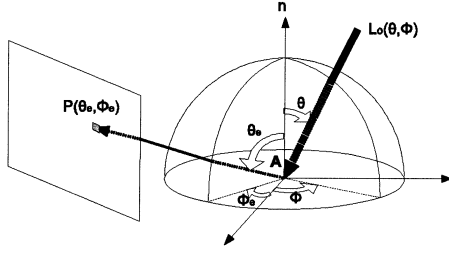


Fig. 4: 均等にサンプリングした光源環境と実画像輝度

しかし、影の境界が明瞭なハードシャドウの場合、このモデルだけでは不十分であるため、次式のように拡張したモデルを用いることで解消する。

$$\exp\left(-\frac{\sum_{\{x,y\} \in N} \chi_s(x) \bar{\chi}_s(y) (\beta(y)I(x) - \beta(x)I(y))^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (15)$$

最終的に $P(\beta)$ は式 (14) と式 (15) の積で定義する。式 (13)(14)(15) により式 (12) を反復計算することで、 $\hat{\beta}^*, \beta^*$ を得ることが出来る。

式 (13)(14)(15) に含まれているパラメータ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_c, \sigma_p$ の中で最も重要なパラメータは、影の滑らかさに関するパラメータ σ_1 である。ここでは Wu らと同様に、 $\frac{1}{2\sigma_1^2} = 1000$ とした。 σ_2 は十分大きな値とし、 $\sigma_c \cdot \sigma_p$ については、それぞれ 1 と 0.0005 とした。

5 光源環境推定

5.1 光源輝度と画像輝度の関係

前章で求めた影画像を用いて Sato らの手法 [8] により実環境での光源分布を推定する。ここではまず、実光源の輝度分布と画像輝度の関係について概説する。 Fig.4 のように、反射点 A から (θ_i, ϕ_i) 方向に微小角度 $\delta\theta$ と $\delta\phi$ に対応する微小面光源が存在する場合を考える。このとき微小面光源の単位立体角あたりの輝度を $L_0(\theta_i, \phi_i)$ とすると点 A における照度は次式のように表せる。

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (16)$$

特に、影画像については実光源分布の一部が遮蔽物体により遮蔽されることから、遮蔽関係を表す $S(\theta_i, \phi_i)$ を導入している。 $S(\theta_i, \phi_i)$ は、点 A から見て実光源 $L_0(\theta_i, \phi_i)$ が遮蔽される場合は $S(\theta_i, \phi_i) = 0$ を、そうでない場合は $S(\theta_i, \phi_i) = 1$ をとる。

なお、この関係式は、光源からの一次反射のみを考慮しており、遮蔽物体による相互反射の影響はないと仮定している。

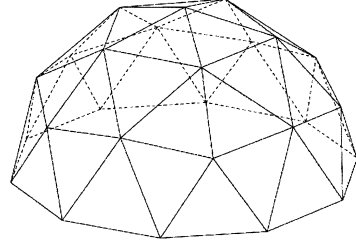


Fig. 5: geodesic dome

このようにして点 A における入射光は点 A において反射され、カメラ画像上の点 B における照度として観測される。この過程を双方向性反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function: BRDF) $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ で近似することで次式を得る。

$$P(\theta_e, \phi_e) = k \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (17)$$

ここで k は実空間点 A における反射光輝度と実画像上の点 B における照度の比を表す定数である。佐藤らの手法では、光源輝度分布を定数 k を含むところまで求めることが出来る。

5.2 光源分布推定

前節で述べた光源分布と画像の明るさの関係式に基づき、影画像の明るさ分布から各サンプリング方向の光源輝度を推定する。本手法では、Fig.5 のような geodesic dome の頂点方向を用いて実環境の光源分布を空間的に均等に離散サンプリングを行う。このような離散的近似により、照度 $P(\theta_e, \phi_e)$ は以下のように表せる。

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (18)$$

また、反射表面における反射が拡散反射のみであり、Lambertian モデルに従うと仮定できる場合、 $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ は定数となる。 geodesic dome を用いて n 方向に離散サンプリングを行う場合、 $P(\theta_e, \phi_e)$ は以下のように表せる。

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n K_d L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (19)$$

$$= a_1 L_1 + a_2 L_2 + \dots + a_n L_n + \quad (20)$$

ここで K_d は Lambertian モデルにおける拡散反射の色と強度を表す定数である。式 (20) は式 (19) を定数項 (a_i) と変数項 (L_i) に分離したものである。

Sato らの手法では、 K_d が未知である場合、実画像 P に対して、さらにカメラの位置姿勢が同じで遮蔽物

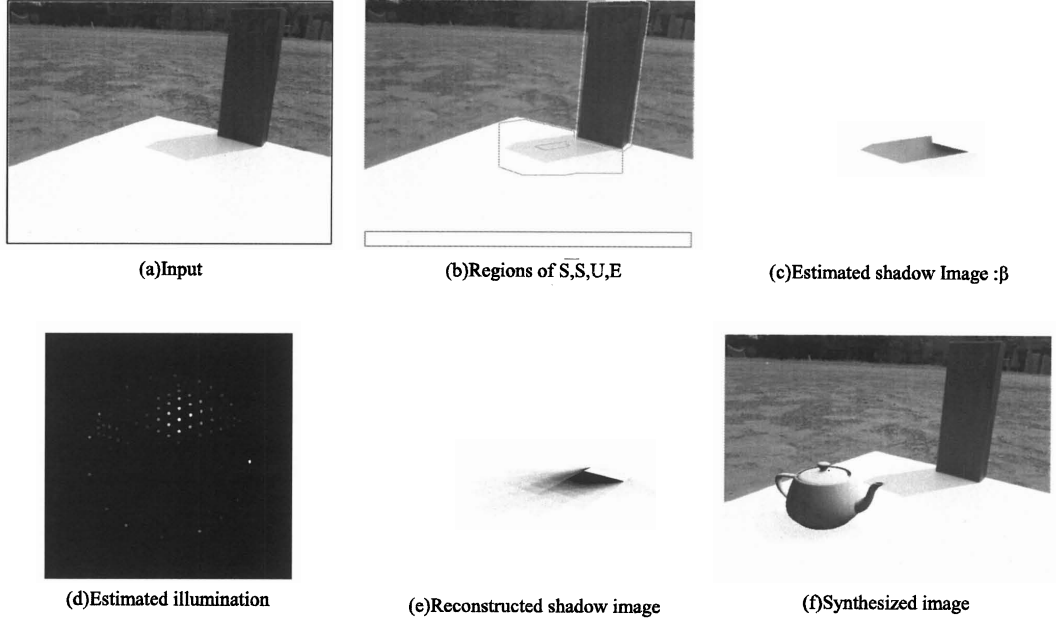


Fig. 6: 実験結果 1

体がない場合の画像(プレイン画像) P' を用いていた。 $P'(x)$ は次式で表される。

$$P'(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n K_d L_0(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (21)$$

よって、式(19)を式(21)で割ることにより、 K_d パラメータを打ち消した次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{P(\theta_e, \phi_e)}{P'(\theta_e, \phi_e)} &= \frac{\sum_{i=1}^n K_d L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i}{\sum_{j=1}^n K_d L_0(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{L_0(\theta_i, \phi_i)}{\sum_{j=1}^n L_0(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j} \cos \theta_i S(\theta_i, \phi_i) \end{aligned} \quad (22)$$

我々の手法では、前章で求めた影画像 $\beta (= I/J)$ の画素値が式(22)の左辺と等しいことから、 K_d パラメータが未知であっても1枚の実画像のみで光源環境を推定することが出来る。従来の方法では、 K_d パラメータを打ち消すために、実画像とプレイン画像の2枚が必要であったため、実際のMRシステムにおいては実装が難しい。

一方、式(22)の右辺は、 $\frac{L_0(\theta_i, \phi_i)}{\sum_{j=1}^n L_0(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j}$ を推定する未知数 L_i 、 $\cos \theta_i S(\theta_i, \phi_i)$ を既知の係数 a_i とすることで、式(22)は n 変数一次方程式とみる事が出来る。ただし未知数 L_i は実光源環境の照度に対する各サンプリング方向の輝度比を表している。

影画像から $m (> n)$ 個の画素を選定することで m 個の連立方程式生成する。その連立方程式を解くことで離散近似した光源環境を推定することが出来る。

6 実験

6.1 実験方法

本章では、これまで述べた提案手法を実画像に適用し、本手法の有効性を確認する。今回の実験では、晴れた屋外において、影を生成する3次元形状が既知の対象物体とその物体により落とされる影が撮影された1枚の実画像を用いて、光源環境を推定した。

まず、屋外で撮影された1枚の実画像をF値と輝度を用いて影領域 S と、あいまいな影領域 U をラベリングする。このときF値画像と輝度画像にはノイズがのっており誤ったラベリングの原因となる。今回はそのような要因に対しメディアンフィルタや膨張収縮処理を行うことで適切なラベリングが行えるようにした。非影領域 \bar{S} と、除外する領域 E については、3章の仮定に基づいてラベリングした。

次に、これらのラベリング結果を用いて影画像の抽出を行った。反復計算により β を求める際、4.3節と同じパラメータを用いた。

そして、影画像の各画素において、離散サンプリングした各光源輝度と遮蔽物体との幾何学的な関係に基づいて式(22)の定数項 a_i を求める。[8]によると、サンプリング数 n を増やすことで精度は良くなるが、 n

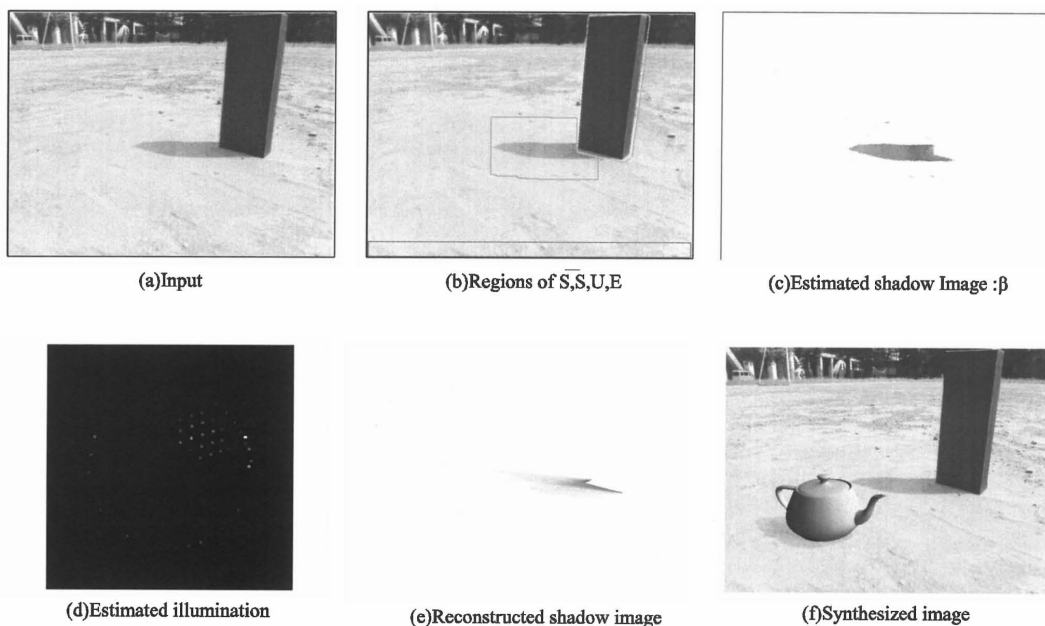


Fig. 7: 実験結果 2

が 300 以上になると再構成した影画像と本来の影画像の誤差はほとんど変わらない実験結果が示されている。そこで本稿では、処理時間を考慮して $n = 301$ として光源環境を geodesic dome の頂点上に離散化した。サンプリング数 n に対して、連立方程式を解くのに十分な m 個の画素を、影画像からランダムに選定し、それらにより導かれる連立方程式を解くことで光源分布を推定する。

最後に、得られた光源分布をもとに仮想物体との合成実験を行った。仮想物体の陰影画像は、離散サンプリングした各光源が生成する陰影画像を基礎画像とし、光源輝度で重み付けした基礎画像の線形和を計算することにより求めた [10]。

6.2 実験結果

実験結果を Fig.6・Fig.7 に示す。実際に屋外で撮影した画像 (Fig.6(a)) を入力画像として 3 章～5 章で述べた手法を適用した。

まず、影画像推定に必要な 4 領域を求める (Fig.6(b))。処理から除外する領域 E は対象物体の領域をカメラ座標から導出し、非影領域 \bar{S} は入力画像の下端から 30 ピクセル幅の画素列とした。このとき、 \bar{S} の輝度分布の平均値・分散値を用いて適切に閾値を設定することで影領域 S 、あまいな影領域 U を求めることができた。

次に、これら 4 領域を用いて影画像 β を推定した (Fig.6(c))。影の濃淡も正しく推定できていることが分かる。

そして、得られた画像を元に近似した離散光源の各照度を連立方程式を解くことで推定した。Fig.6(d) は geodesic dome 上に各光源の推定照度を配置したものを平面上に投影している。光源環境の推定結果は、実際の光源環境の特徴をよく反映していることが分かる。

また、この推定結果を元に対象物体の影画像を再構成した (Fig.6(e))。再構成画像は、概ね影画像 (Fig.6(c)) と似ているが、まったく同じにはならない。その理由として、光源環境を離散サンプリングしている点、遮蔽物体表面と影が落とされる平面との間の相互反射を考慮していない点などが考えられる。

最後に、推定した光源輝度分布をもとに仮想物体の陰影処理を施し、実画像の合成実験をおこなった (Fig.6(f))。実環境に即した陰影処理を行うことで、現実世界と仮想世界を違和感なく合成することが出来ることが分かる。

Fig.6 では地面領域が白い板であったのに対し、Fig.7 では、地面領域の表面反射率が未知である場合の実験結果である。このように、影がおとされる表面反射率が未知の場合でも、本手法を用いることで初期領域のラベリング・影領域の抽出・光源環境の推定が正しく行える。

このように、提案手法を適用することにより、影画像の推定・光源輝度分布の推定の一連の流れを自動化できることを確認した。また、表面反射率が未知の表面に対しても本手法が有効であることが確認できた。

7 まとめ

本稿では、屋外 MR において 1 枚の実画像から影画像抽出のためにラベリングした各領域を用いて影画像を抽出し、その影画像の明るさ分布を利用することで実際の光源環境を推定する手法を提案した。

本手法では、光源によらない物体の表面反射率により決まる不変量を用いて領域指定をすることで、ユーザーの入力を不要とした。それにより 1 枚の実画像のみで全工程を処理することができ、従来手法のような光源推定用の機器を設置するコストや手間を省略することができた。

今後の課題としては、実時間で実環境の光源分布を推定できるようにアルゴリズムを高速化することや、より複雑なテクスチャーを持つ表面に落ちた影にも適用することなどが挙げられる。

References

- [1] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6):34–47, November 2001.
- [2] Paul Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series):189–198, 1998.
- [3] D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. Wyszecki. Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 54:1031–+, August 1964.
- [4] M. Kanbara and N. Yokoya. Geometric and photometric registration for real-time augmented reality. In *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02)*, pages 279–280, September 2002.
- [5] J. A. Marchant and C. M. Onyango. Shadow-invariant classification for scenes illuminated by daylight. *Journal of the Optical Society of America A*, 17:1952–1961, November 2000.
- [6] H. Matsuoka, A. Onozawa, and E. Hosoya. Environment mapping for objects in the real world: a trial using ar-toolkit. In *Proc. Int. Augmented Reality Toolkit Workshop*, September 2002.
- [7] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 1999.
- [8] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Illumination from shadows. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003.
- [9] Tai-Pang Wu and Chi-Keung Tang. A bayesian approach for shadow extraction from a single image. In *ICCV '05: Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1*, pages 480–487, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [10] 角田哲也, 大石岳史, and 池内克史. 影付け平面を用いた複合現実感における高速陰影表現手法. *映像情報メディア学会誌*, 62(5):788–795, 2008.
- [11] 佐藤いまり, 林田守広, 甲斐郁代, 佐藤洋一, and 池内克史. 実光源環境下での画像生成: 基礎画像の線形和による高速レンダリング手法. *電子情報通信学会論文誌 D-II*, J84-D-II(8):1234–1242, August 2001.
- [12] 学 中野, 格 北原, 能成 亀田, and 友一 大田. D-12-53 複合現実感における影の不整合に関する実験的検討 (d-12. パターン認識・メディア理解, 一般講演). *電子情報通信学会総合大会講演論文集*, 2007(2):169, 20070307.
- [13] 学 中野, 格 北原, and 友一 大田. 複合現実感における自然なソフトシャドウの提示に必要な光源マップのサイズ評価. *IPSI SIG Notes. CVIM*, 2008(3):191–198, 20080118.