

# RGB-D カメラから得られる部分物体形状と影に基づく光源推定

## Illumination Estimation from Object Shadow and Incomplete Object Shape Information Captured by an RGB-D Camera

池田 拓也<sup>†</sup>, 小山田 雄仁<sup>†</sup>, 杉本 麻樹<sup>†</sup>, 正会員 斎藤 英雄<sup>†</sup>

Takuya Ikeda<sup>†</sup>, Yuji Oyamada<sup>†</sup>, Maki Sugimoto<sup>†</sup> and Hideo Saito<sup>†</sup>

**Abstract** Optical consistency between the real world and virtual objects is an important issue in augmented reality (AR). We propose a method to estimate illumination from an object shadow and incomplete object shape information captured by an RGB-D camera. The environmental illumination can be estimated without any prior knowledge of the object shape. The radiance of each light source is computed by solving linear equations derived from color and depth images. Since prior knowledge of the object shape is not necessary, we can flexibly use/combine any objects. Thus, we can use/combine multiple objects in the target scene to increase the accuracy and flexibility. Our experimental results show the characteristics of our proposed method.

キーワード：拡張現実感, 光源推定, Lambert モデル, RGB-D カメラ, 光学的整合性

### 1. ま え が き

現実空間に仮想環境からの情報や仮想物体を重畳して表示する拡張現実感 (Augmented Reality, 以下 AR) の研究は盛んに行われている<sup>1)</sup>. AR において違和感なく仮想物体を重畳するには, 現実空間との整合性を取ることが必要である. 現実空間との整合性の一つとして光学的整合性が挙げられる. 実空間の光源分布を推定もしくは観測し, その情報を元に仮想物体に対して, 陰影処理や影を重畳することで, 光学的整合性のとれた違和感のない AR を実現することができる.

実空間の光源分布を取得する手法はいくつか提案されており, 二つに大別することができる. 一つ目の手法は周囲の光源分布を直接取得する手法である. 視野角の広い魚眼レンズ付きカメラを用いることで, 周囲の光源分布を撮影する手法<sup>2)3)</sup>や, 実空間上に配置された鏡面球に反射される周囲の環境を観測し, 広範囲の光源分布を取得する手法<sup>4)5)</sup>が挙げられる. しかし, これらの手法では, 魚眼レンズや鏡面球といった特殊な装置が必要というデメリットがある. もう一つの手法は, 画像から間接的に光源分布を推定する手法である. そのような手法として, 物体と光源の遮蔽関

係から生じる影を利用して, 光源分布を推定する手法<sup>6)~8)</sup>が挙げられる. これらの手法は, 画像に写っている物体の3次元形状と, その物体が光源を遮蔽することによって, 物体を配置している平面上に生じる影の情報から周囲の光源分布を推定する. しかし, 3次元形状が既知の物体のみしか光源推定に利用できないという制約がある.

そこで本研究は, 3次元形状が未知の環境から物体の影に基づく光源推定をすることで従来手法<sup>6)</sup>の制約の軽減を目的とする. 簡易的に取得したシーンの距離情報から光源推定をする手法を提案する. RGB-D カメラを利用することで, 簡易的にシーンの RGB 画像と距離画像を取得できる. 提案手法では, 魚眼レンズや鏡面球などの装置は必要なく, 3次元形状が未知である物体を用いるだけで光源推定が行える. 本研究では, 位置と姿勢が固定された RGB-D カメラを用いて得られた物体の距離情報と物体の影に基づく光源推定を行う. 本稿では, このようにして得られた物体の距離情報を部分物体形状として扱う. 入力として RGB 画像と距離画像を用い, 形状が未知の3次元物体, 物体周辺の影領域の点群, 物体による光源の遮蔽関係から周囲の光源分布を推定する.

提案手法では, 位置と姿勢が固定されたカメラを用いるため, 観測している物体背後の3次元形状は取得できない. その結果, 遮蔽関係をすべて正しく求めることはできず, 光源推定結果に誤りが生じると考えられる. 一方で, 様々な

2012年8月26日受付, 2012年12月1日再受付, 2013年1月21日採録  
†慶應義塾大学 大学院 理工学研究科

(〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, TEL.045-563-1141)

†Graduate School of Science and Technology, Keio University  
(3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Kanagawa 223-8522, Japan)

形状の物体\*に対して、物体とカメラの距離を計測できる。そのため、提案手法を適用する際は、身近にある物体を用いることが可能である。さらに、単体の物体を用いるだけでなく、各物体を組合せて行うことも容易である。そこで、提案手法では様々な形状の物体を組合せて光源推定を行う。各物体によって生じる影から、光源推定に必要な情報を多く含めることで、光源の誤推定の軽減が期待できる。

従来手法との差異として、従来の手法では予めシーンの幾何情報が既知であったのに対し、提案手法では RGB-D カメラを用いてシーンの距離情報を観測して光源推定を行う。そのため、部分物体形状から光源推定を行うことになる。また、複数の物体を組合せて光源推定を行うことを本研究で新規に提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章で光源推定に関する関連研究について述べる。3章で提案手法が基本とする既存の理論について説明する。影に基づく光源推定と仮想物体の影重畳について、二つの理論を述べる。4章で我々が新規に提案する手法について述べる。5章で実験結果と評価を示し、6章で実験結果の検討を行う。7章で結論を述べる。

## 2. 関連研究

本章では、直接的に光源分布を取得する手法として魚眼レンズ付きカメラを用いた手法、鏡面球を用いた手法について述べる。また、間接的な手法として物体の影に基づいた光源推定手法について述べる。

### 2.1 光源分布を直接観測する手法

本節では、魚眼レンズ付きカメラを用いた手法、鏡面球を観測する手法を述べる。前者では魚眼レンズを用いることで広視野角画像を撮影可能であり、室内環境を直接観測することで、光源分布を得る。後者の手法では、鏡面球は周囲の環境を反射するため、魚眼レンズ同様広範囲にわたり光源分布を取得することができる。

佐藤らは、魚眼レンズ付きカメラを用いて、室内を撮影した画像から実空間の光源分布を取得している<sup>2)</sup>。また、複数視点から撮影することで、室内の3次元形状を取得し、直接光源から壁や窓などに反射して生じる間接光源の位置および輝度を計算し、直接光源と間接光源を含めて光源分布を求めている。

Knecht らも同様に、魚眼レンズ付きカメラを用いて、光源分布をリアルタイム (20-30fps) に取得し、光学的整合性を実現した AR システムを提案している<sup>3)</sup>。

Debevec らは、High Dynamic Range(以下 HDR) カメラを用いて鏡面球を観測することで、実空間の光源分布を取得している<sup>4)</sup>。HDR カメラにより得た鏡面球の画像からイメージベースドモデリングを行っており、カメラでは

\* 赤外線を投影して距離を取得しているため、赤外線を透過してしまう透明物体や吸収してしまう黒色の物体などは、距離情報の取得は困難である。

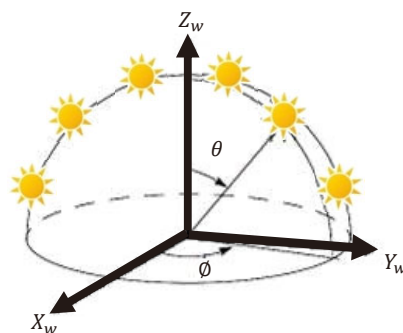


図 1 半球上に分布する光源モデル  
Light distribution model on the hemisphere.

写しきれない周囲の環境も含めて、現実と整合性のとれた仮想物体を生成している。

Derek らは鏡面球から観測される周囲の環境から球面調和関数を用いて光源分布を表現している<sup>5)</sup>。球面調和関数を用いることで、光源輝度を周波数領域で表現し、少ない基底で光源分布を保持できるため、光源推定問題を少数のパラメータ推定問題に置き換えることができる。Derek らの手法では、リアルタイムに光源推定を行い、動的な光源に対しても光源分布を取得し、ARにおける光学的整合性を実現している。

### 2.2 光源分布を間接的に推定する手法

光源分布を間接的に取得する手法として、物体の影を用いた手法を述べる。影は物体による光源の遮蔽によって生じるため、影を観測し、逆問題を解くことで光源分布を推定することができる。佐藤らは、物体から生じる影を用いて、実空間の光源分布を間接的に推定する手法を提案している<sup>6)</sup>。画像中に観測される影の明度と3次元位置、物体の3次元形状からどの方向の光源が遮蔽されているかを考慮し、算出した線型式を光源輝度値に関して解くことで光源推定をしている。このとき、遮蔽関係を算出するため、佐藤らは予め、観測したシーンの3次元モデルを作成している。実空間上に光源のサンプリング点を設け、それらの輝度を推定した佐藤らの手法に対し、岡部らは光源分布を球面調和関数<sup>7)</sup>や、Haar ウェーブレット<sup>8)</sup>を用いて適応的に光源分布を推定している。

## 3. 背景理論

本研究では、佐藤らが行った手法<sup>6)</sup>と同様の理論やモデルを用いる。本章では、それら既存の理論やモデルについて述べる。まず、物体から生じる影と光源分布との関係について述べ、光源推定の際に算出する各変数について説明する。次に、推定された光源分布を用いた仮想物体による影の重畳について述べる。

### 3.1 影の明度と光源分布のモデル

影に基づく光源推定において、光源がどの方向に存在しているかは未知である。全方向からの光源を考慮するために、図1のような無限遠の半径を持つ半球上に光源が存在

すると考える。光源方向を図 1 に示すように仰角  $\theta$  と方位角  $\phi$  で表す。物体による遮蔽関係を考慮した場合、実空間における 3 次元点  $\mathbf{x}$  への光源全体からの照度  $E(\mathbf{x})$  は、

$$E(\mathbf{x}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

となる。ここで、 $L(\theta_i, \phi_i)$  は  $(\theta_i, \phi_i)$  方向に存在する光源の輝度値、 $\theta_i, \phi_i$  は光源方向への仰角と方位角、 $\cos \theta_i$  の項は光源の入射角度による強度、 $\sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$  は点  $E(\mathbf{x})$  からの微小立体角を表している。また、可視性関数  $V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i)$  は、点  $\mathbf{x}$  から見た  $(\theta_i, \phi_i)$  方向の光源が物体によって遮蔽されているかどうかを表す。遮蔽されている場合は  $V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i) = 0$ 、そうでない場合は  $V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i) = 1$  とする。

光源全体から点  $\mathbf{x}$  へ入射した光は輝度を持つ光として反射される。点  $\mathbf{x}$  から  $(\theta_r, \phi_r)$  方向に位置する画像上の点  $\mathbf{u}$  で観測される明度値  $i(\theta_r, \phi_r)$  は、入射方向  $(\theta_i, \phi_i)$  からの入射照度と反射方向  $(\theta_r, \phi_r)$  への反射光輝度の比率を表す双方向性反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF)  $R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$  を用いて、

$$i(\mathbf{u}, \theta_r, \phi_r) = k \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i) R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $k$  は実空間中の反射光輝度と画像面点における明度の比を表す定数であり、カメラに固有のパラメータである。本研究では、光源輝度分布を係数  $k$  を含むかたちで推定する。また、影を落とす平面での光の反射は拡散反射のみであり、Lambert モデルに従うものと仮定する。そのため、BRDF は定数  $R_d$  と置き換えることができる。

$$i(\mathbf{u}) = k \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i) R_d L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta d\phi \quad (3)$$

ここで、 $i(\mathbf{u})$  は画像上の点  $\mathbf{u}$  で観測される明度値である。

次に、2 重積分の項を離散的な積分で近似する。 $\theta_i, \phi_i$  の値を一定値ずつ増やすことで、半球面上に光源のサンプリング点を設ける。サンプリング光源の数を  $N$  個とすると、

$$\begin{aligned} i(\mathbf{u}) &= \sum_{n=1}^N V_n(\mathbf{x}) R_d L_n \cos \theta_n \\ &= \sum_{n=1}^N S_n L_n \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $V_n(\mathbf{x})$  は  $n$  番目の光源に対する点  $\mathbf{x}$  の可視性関数、 $R_d$  は対象とする平面の反射特性、 $L_n$  は係数  $k$  を含む  $n$  番目の光源の輝度値、 $\theta_n$  は  $z$  軸と  $n$  番目の光源へ向かうベクトルが成す角、 $S_n = V_n(\mathbf{x}) R_d \cos \theta_n$  は光源輝度  $L_n$  以外の未知数を表す係数とする。

### 3.2 光源分布の推定

画像上に  $M$  個の画素が観測されると以下の線型式を得

られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= \mathbf{S} \mathbf{L} \\ \rightarrow \begin{bmatrix} i(\mathbf{u}_1) \\ \vdots \\ i(\mathbf{u}_M) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & S_{mn} & \vdots \\ S_{M1} & \cdots & S_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

上式から、1 画素につき一つの線型式を得られることがわかる。そのため、 $S_n$  が既知であるとする、光源数より多くの画素を観測したとき、すなわち  $N \leq M$  を満たす時、式 (5) を光源輝度値  $\mathbf{L}$  に関して解くことで周囲の光源分布を推定することができる。光源輝度は非負の値を持つため、提案手法では非負の最小二乗法<sup>9)10)</sup>を用いて式 (5) を解き、光源輝度を算出する。本研究では、Matlab の関数 lsqnonneg を用いた。ここで、線型式を解くためには、式 (5) の  $\mathbf{S}$  を構成する  $V_n(\mathbf{x})$ ,  $\cos \theta_n$ ,  $R_d$  を求める必要がある。

平面の反射特性  $R_d$  については、物体を配置していない背景画像と物体を配置した画像から、 $R_d$  をキャンセルする。物体を配置していない場合は、 $V_n(\mathbf{x})$  の項を考慮する必要がないので、画像上の点  $\mathbf{u}$  で観測される明度値  $i'(\mathbf{u})$  は以下のようになり、

$$i'(\mathbf{u}) = \sum_{n=1}^N R_d L_n \cos \theta_n \quad (6)$$

式 (4) と比を取ることで、 $R_d$  をキャンセルした以下の式を得る。

$$\frac{i(\mathbf{u})}{i'(\mathbf{u})} = \sum_{n=1}^N \frac{L_n}{\sum_{j=1}^N L_j \cos \theta_j} V_n(\mathbf{x}) \cos \theta_n \quad (7)$$

$R_d$  が未知である場合、式 (7) を用いて  $L_n$  の代わりに  $\frac{L_n}{\sum_{j=1}^N L_j \cos \theta_j}$  という比を求めることで光源分布を推定することができる。このように物体を配置していない背景画像を用いることで、 $R_d$  を直接求めずに、光源推定が可能となる。

次に、 $V_n(\mathbf{x})$ ,  $\cos \theta_n$  の項を算出する。従来手法では、物体を配置したシーンにおいて物体の 3 次元形状や影領域の 3 次元点群が既知であるため、各項を算出可能であったのに対し、本研究では物体の 3 次元形状や影領域の 3 次元点群が未知の環境で光源推定をするため、まず初めにシーンの 3 次元情報を取得する必要がある。提案手法では、RGB-D カメラを用いて、シーンの距離情報を取得し、光源推定を行う。4 章で述べる提案手法では、RGB-D カメラで観測したシーンから  $V_n(\mathbf{x})$ ,  $\cos \theta_n$  の項を算出する手法について述べる。

### 3.3 推定した光源分布を用いた仮想物体の影重畳

本節では、推定して得られた光源分布を用いた仮想物体の影重畳について述べる。仮想物体の重畳は、物体を配置していないシーンを入力画像とし、それに变化を加えることで合成画像を生成する。この時、実空間上に仮想物体を重

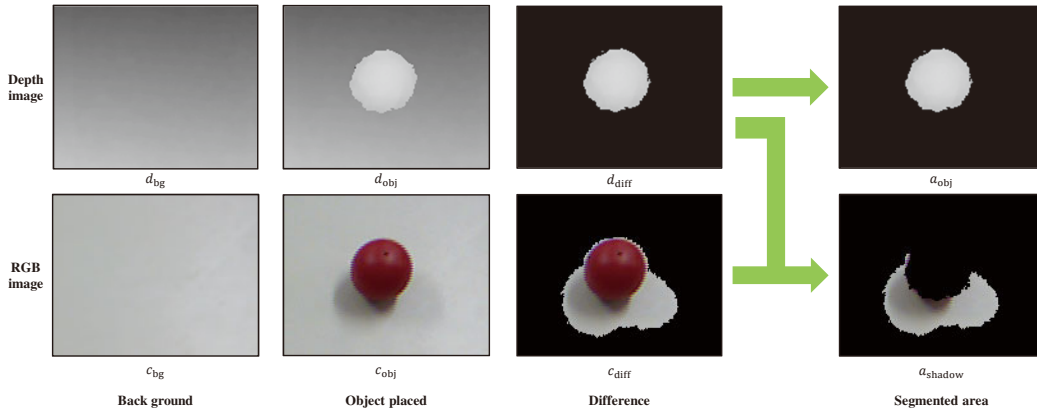


図 2 物体、影領域取得の流れ  
Flow of segmentation.

畳した際、仮想物体による光源の遮蔽によって生じる影を加える必要がある。本研究では、仮想物体を配置する場所は平面に限定し、シーンの反射係数は前節と同様 Lambertian モデルを仮定する。入力画像に対し、シーンの 3 次元情報、仮想物体の 3 次元形状、推定された光源分布を用いて仮想物体から生じる影による明度の変化を加える。なお、シーンの 3 次元情報は RGB-D カメラから取得する。

入力画像では光源を遮蔽する物体が存在しないため、実空間における平面上の点  $\mathbf{x}$  の照度  $E_{in}(\mathbf{x})$  は式 (1) の  $V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i)$  項を除いた形で表すことができる。推定された光源分布を  $\mathbf{L}$  とすると式 (1) から  $V(\mathbf{x}, \theta_i, \phi_i)$  項を除き、離散化して以下のように表される。

$$E_{in}(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N L_n \cos \theta_n \quad (8)$$

次に、仮想物体が存在する場合の照度を求める。仮想物体を配置した場合、仮想物体によって光源が遮蔽されるかどうか考慮する。仮想物体が存在する場合の実空間における平面上の点  $\mathbf{x}$  の照度  $E_{out}(\mathbf{x})$  は、以下のように表される。

$$E_{out}(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N V_n(\mathbf{x}) L_n \cos \theta_n \quad (9)$$

ここで、 $V_n(\mathbf{x})$  は 3 次元点  $\mathbf{x}$  が仮想物体によって  $n$  番目の光源  $L_n$  が遮蔽されているかどうかを表す。式 (8)、式 (9) の  $L_n$  以外の項は以下のように算出する。実空間上の点  $\mathbf{x}$  は、RGB-D カメラから得られるシーンの 3 次元情報より平面を推定し、その平面上の点を用いる。  $\cos \theta_n$  項は 3 次元点  $\mathbf{x}$  と光源  $L_n$  より算出する。  $V_n(\mathbf{x})$  は 3 次元点  $\mathbf{x}$  と光源  $L_n$  および仮想物体の 3 次元形状から算出する。

実空間上の点  $\mathbf{x}$  が入力画像上の点  $\mathbf{u}$  において観測されるとき、その明度  $i_{in}(\mathbf{u})$  は、光源分布全体からの照度が  $E_{in}(\mathbf{x})$  の時に観測される。一方、仮想物体を重畳した合成画像において点  $\mathbf{u}$  で観測される明度  $i_{out}(\mathbf{u})$  は、光源分布全体からの照度が  $E_{out}(\mathbf{x})$  の時に観測される。  $i_{in}(\mathbf{u})$ 、  $i_{out}(\mathbf{u})$  はそれぞれ以下の式で表される。

$$i_{in}(\mathbf{u}) = R_d E_{in}(\mathbf{x}) \quad (10)$$

$$i_{out}(\mathbf{u}) = R_d E_{out}(\mathbf{x}) \quad (11)$$

ここで、式 (10) と式 (11) の比を取ると以下のような式となり

$$\frac{i_{out}(\mathbf{u})}{i_{in}(\mathbf{u})} = \frac{R_d E_{out}(\mathbf{x})}{R_d E_{in}(\mathbf{x})} \quad (12)$$

式変形すると、  $i_{out}(\mathbf{u})$  は次のように求めることができる。

$$i_{out}(\mathbf{u}) = i_{in}(\mathbf{u}) \frac{E_{out}(\mathbf{x})}{E_{in}(\mathbf{x})} \quad (13)$$

したがって、入力画像上の点  $\mathbf{u}$  に対応する実空間上の点  $\mathbf{x}$  において  $E_{in}(\mathbf{x})$ 、  $E_{out}(\mathbf{x})$  を計算し、比を取ることによって  $i_{out}(\mathbf{u})$  を求めることができる。

#### 4. 提案手法

本章では、距離画像から得られたシーンの幾何情報から光源分布を推定する手法を述べる。室内環境を想定し、平面上に物体を配置したシーンを考える。従来手法では、予めシーンの幾何情報が既知であり、画像中の物体や影の領域も既知である。一方、提案手法では初めに物体を配置したシーンにおいて物体や影の領域を取得する必要がある。そこで、入力として物体を配置していない環境と、物体を配置した環境で、それぞれ観測した RGB 画像と距離画像を用いて各領域を取得する。その後、サンプリング光源、物体形状、影領域の 3 次元点群から  $V_n(\mathbf{x})$ 、  $\cos \theta_n$  を算出することで  $L_n$  以外の未知数を求める。提案手法では、位置と姿勢が固定された RGB-D カメラで観測するため、物体の表面の形状しか取得できない。このような部分物体形状から  $V_n(\mathbf{x})$  項を計算する。また、提案手法では複数の物体を用いて線型式を組合せて光源推定を行う。最後に算出された線型式を非負の最小二乗法<sup>9)10)</sup>を用いて線型式を解くことで、光源輝度値  $L_n$  を求める。

##### 4.1 物体、影領域取得

提案手法では、まずカメラから得られる RGB 画像および距離画像から物体、影領域を検出する。各領域を検出す

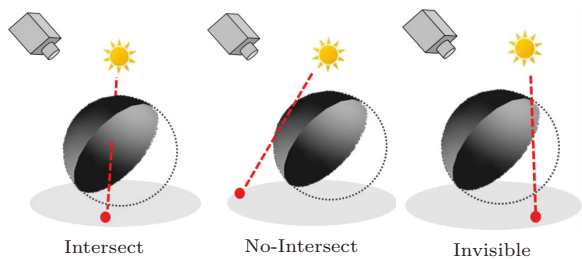


図3 交差判定時の三つのケース  
3 cases of intersect detection.

ることで、物体領域の3次元点群、影領域の3次元点群をそれぞれ得ることができる。そのために、初めに物体の有無によって画像上に生じる変化を利用する。図2に物体、影領域取得の流れを示す。 $c, d$ はそれぞれRGB画像、距離画像を表し、下付き添え字 obj, bg はそれぞれ物体が写りこんだ画像と背景画像である。なお距離画像は、各画素に対する距離情報をグレースケールで示した画像で、距離が近いほど明度は明るく、遠いほど暗く表現している。

各画像の差分画像は下付き添え字 diff によって以下のように定義する。

$$c_{\text{diff}}(\mathbf{u}) = \begin{cases} c_{\text{obj}}(\mathbf{u}) & \text{if } |c_{\text{obj}}(\mathbf{u}) - c_{\text{bg}}(\mathbf{u})| > \tau_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$d_{\text{diff}}(\mathbf{u}) = \begin{cases} d_{\text{obj}}(\mathbf{u}) & \text{if } |d_{\text{obj}}(\mathbf{u}) - d_{\text{bg}}(\mathbf{u})| > \tau_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $\tau_c, \tau_d$ は各画像に対する閾値を表す。物体領域は距離画像のみを用いて検出する。物体の有無により距離画像上に生じる違いは、物体の領域のみに限られる。よって、 $d_{\text{diff}}(\mathbf{u})$ で検出された領域を物体領域  $a_{\text{obj}}(\mathbf{u})$  とする。この時、物体が映りこんでいる画素の集合を  $\mathcal{U}$  とすると物体領域は、

$$a_{\text{obj}}(\mathbf{u}) = d_{\text{diff}}(\mathbf{u}) \quad \mathbf{u} \in \mathcal{U} \quad (16)$$

となる。次に、物体によって生じる影はRGB画像上で観測されるため、RGB画像から影領域の取得を行う。しかし図2の  $c_{\text{diff}}$  に示すように、物体の有無によりRGB画像上に生じる違いには、影領域に加えて物体領域も含まれてしまう。そこで、RGB画像の差分画像  $c_{\text{diff}}(\mathbf{u})$  と距離画像の差分画像  $d_{\text{diff}}(\mathbf{u})$  との排他的論理和を取ることで影領域の検出を行う。

$$a_{\text{shadow}}(\mathbf{u}) = c_{\text{diff}}(\mathbf{u}) \oplus d_{\text{diff}}(\mathbf{u}) \quad (17)$$

ここで、 $a_{\text{shadow}}(\mathbf{u})$ は影領域を表している。 $V_n(\mathbf{x}), \cos \theta_n$ 項は各領域の距離情報を用いて算出する。

#### 4.2 $V_n(\mathbf{x}), \cos \theta_n$ 項算出

前節で取得した物体、影領域は画像面で距離情報を持っており、3次元点群として得ることができる。これらの点

群を用いて  $V_n(\mathbf{x}), \cos \theta_n$  項を算出する。

$V_n(\mathbf{x})$  項を算出するために、まず影領域の3次元点群から物体によって影が生じる平面を推定する。推定された平面上の点  $\mathbf{x}$  から、 $n$  番目のサンプリング光源へ向かうベクトルに対して、物体が交差しているか判定する。この時、図3に示すような三つのケースが考えられる。一つ目は物体と交差する場合 (Intersect) で、この時  $V_n(\mathbf{x}) = 0$  となる。二つ目は物体と交差しない場合 (No-Intersect) で、この時  $V_n(\mathbf{x}) = 1$  となる。三つ目は物体の背後を通過する場合 (Invisible) である。提案手法の場合、単視点で観測するため物体背後の形状を取得できない。そのため、Invisible のように物体背後を通過する場合、正確な  $V_n(\mathbf{x})$  の値を算出できない。このような影の点  $\mathbf{x}$  と光源  $L_n$  の組合せから得られる線型式は式(5)から除くことが考えられる。しかし、このような処理をした場合、図4の青線で示した領域のように、カメラ視点に対して物体の左右から背後にかけて、影の点は Invisible となるケースを含むため、除かれることになる。この時、物体に対する周囲の影の点を線型式に含められず、全方向の光源をうまく推定できない。そのため、Invisible となる影の点も用いる。ここで、 $V_n(\mathbf{x}) = 1$  だとすると、物体背後は崖のように切り取った形状となっており、カメラから観測できない物体の部分は地面に垂直につながっているという想定になる。逆に  $V_n(\mathbf{x}) = 0$  とすると、物体背後の観測できない領域に物体が存在するという想定になる。どちらを定義しても、正確な  $V_n(\mathbf{x})$  の値を算出することは困難であるが、本論文では、物体表面の裏側には物体が存在しない場合よりも、表面の裏側にもある程度の物体領域が存在する場合の方が多くと仮定し、このようなケースは、仮に  $V_n(\mathbf{x}) = 0$  と定義して方程式を算出し、光源推定を行う。妥当な  $V_n(\mathbf{x})$  の値の算出については今後の課題とする。

$\cos \theta_n$  項については、3次元点  $\mathbf{x}$  と  $n$  番目のサンプリング光源との仰角  $\theta_n$  から算出する。

#### 4.3 複数物体の結合

前節で述べたように、Invisible のケースでは  $V_n(\mathbf{x})$  の値が正しいとは限らない。そのため提案手法では線型式にそのような誤った  $V_n(\mathbf{x})$  の値が含まれ、光源の誤推定が生じると考えられる。そこで、一つの物体だけでなく複数の物体を結合して光源推定を行う。各物体から算出した線型式を組合せ、光源輝度に関して解くことで一つの物体を用いた時と同様に光源分布を得られる。 $k$  番目の物体に対して、式(4)は次のように表現できる。

$$i(\mathbf{u}_k) = \sum_{n=1}^N V_n(\mathbf{x}_k) R_d L_n \cos \theta_n \\ = \sum_{n=1}^N S_{kn} L_n \quad (18)$$

さらに、 $K$  個の物体から得られた線形式を組合せると、式(5)は式(19)のように表現できる。ここで、 $i_k(\mathbf{u}_{km})$

$$i = SL \rightarrow \begin{bmatrix} i_1(\mathbf{u}_{11}) \\ \vdots \\ i_k(\mathbf{u}_{km}) \\ \vdots \\ i_K(\mathbf{u}_{KM_K}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{111} & \cdots & S_{11n} & \cdots & S_{11N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{km1} & \cdots & S_{kmn} & \cdots & S_{kmN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{KM_K1} & \cdots & S_{KM_Kn} & \cdots & S_{KM_KN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

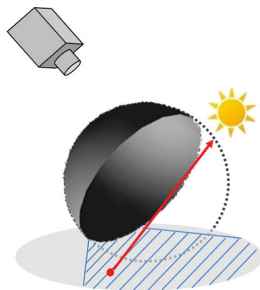


図 4 Invisible ケースを含む影の領域  
A shadow region of Invisible pattern.

は  $k$  個目の物体に対する  $m$  番目の影の点の明度値を示し、 $S_{kmn}$  は  $k$  個目の物体に対する  $m$  番目の影の点と  $n$  番目の光源の  $S$  項を示している。複数の物体を含めることで、式 (19) の行成分を増やすことができる。組合された線型式を解くことで、 $V_n(\mathbf{x})$  の誤値の割合が少なくなり、推定精度の向上が期待できる。

## 5. 実験

本章では、提案手法を用いて行った二つの実験について述べる。正しく光源推定できるか評価するために、形状が異なるいくつかの物体を用いて光源推定を行った。また、提案手法によって推定した光源分布が、AR における光学的整合性に対して与える影響を検討するために、推定された光源分布を用いて仮想物体の影重疊を行った。

### 5.1 実験に用いた物体および実験環境

物体の形状による光源推定精度の評価を行うために、異なる形状を持つ物体に対して、提案手法を適用し、光源推定を行った。実験に使用した物体を図 5 に示す。特徴として形状が単純である物体 (**Box**, **Sphere**, **Hemisphere**) および複雑な物体 (**Duck1**, **Doll1** など) を用いた。各物体を配置したシーンに対し、提案手法を用いて光源推定を行った。また、各物体の結果だけでなく複数の物体を 4.3 節で述べた手法を用いて結合し、光源推定を行った。本実験では、図 5 中の **Box** を除く 7 個の物体を用いて結合した。ここでは、複数の物体を結合して推定した結果を **Combined** と呼ぶことにする。さらに比較のために、佐藤らの従来手法<sup>6)</sup>を **Box** に適用し、光源推定を行った。事前に形状を取得する必要があるため、単純な形状をした **Box** を採用した。

推定するサンプリング光源については  $0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$  の間を 5 度刻みずつ、 $0^\circ \leq \phi < 360^\circ$  の間を 10° 刻みずつサンプリングし、合計 505 個の光源の輝度値を求めた。 $\theta$  に



図 5 実験に用いた物体.  
Eight Objects using out experiments.

ついては、平面に近い高さに光源が分布していることは少ないため  $70^\circ$  までとした。

本実験では、RGB-D カメラとして Microsoft 社の Kinect を用いた。画像の解像度は  $640 \times 480$  (画素) である。RGB カメラと距離カメラは同じ位置ではないため、RGB 画像と距離画像に画素のズレが生じる。そこで、RGB-D カメラに関するライブラリー OpenNI<sup>12)</sup> の使用し、画像間のズレを補正した。また、提案手法の実装環境は以下の通りである。OS: Windows 7, CPU: Intel Core i7-2600 3.40GHz, RAM: 3.49GB, 開発環境: Microsoft Visual C++ 2010.

### 5.2 光源推定実験

本節では、各物体を用いて提案手法および従来手法を適用して光源分布を推定した結果および評価について述べる。背景画像と各物体を配置した画像を入力とし、提案手法を用いて光源分布を推定した。なお、推定された各光源輝度値は 0 から 1 の値を取る。提案手法では、固定された RGB-D カメラから得られる物体の部分形状を用いているため、佐藤らの手法は理想的な結果であり、佐藤らの手法に勝ることは不可能である。そのため本実験では、佐藤らの手法を適用した結果を参照し、提案手法の結果と比較することで評価を行う。従来手法との比較を行うことで、Invisible となるケースの  $V_n(x)$  の値をすべて 0 とする提案手法と、すべての  $V_n(x)$  が正しく設定された従来手法との差異による評価を行う。また、魚眼レンズで撮影された画像から光源分布の真値を算出し、比較評価も行う。真値との比較評価によって、提案手法と従来手法の推定された光源精度について評価を行う。魚眼レンズで観測された全方位画像から光源輝度を取得する際の光源輝度のスケール調整については、従来手法<sup>13)</sup>と同様に、ユーザが行った。

図 6 に光源推定実験の結果を示す。上段は光源推定に

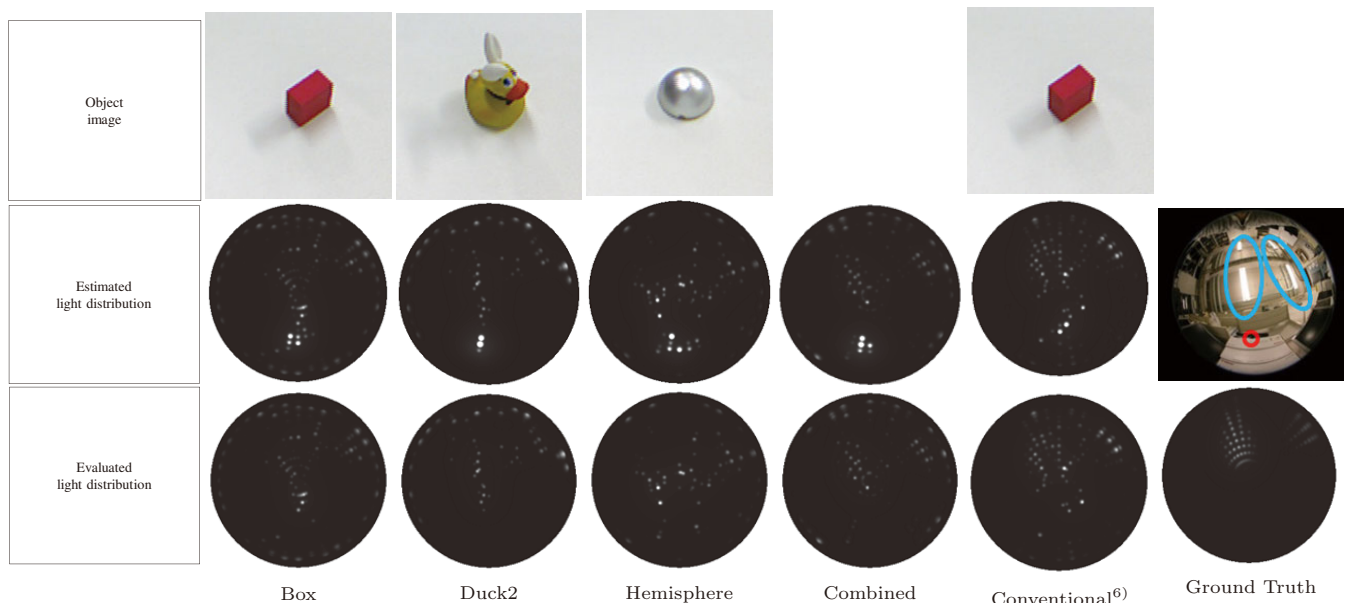


図 6 光源推定結果. 上段：物体画像. 中段：推定された光源分布. 下段：評価に用いた光源分布.  
 Light estimation results : The top row shows object images used in our experiments. The second row shows estimated light distributions and the rightmost column in the second row shows the scene captured by a fish-eye lens camera. The bottom row shows also estimated light distribution ignored 13 light sources around the camera and the rightmost column in the bottom row shows light sources of Ground Truth.

表 1 推定された光源分布における従来手法との比較評価  
 Evaluation values of estimated light distributions compared with Coventional<sup>6)</sup>.

Object name	Box	Duck1	Duck2	PenLight	Doll1	Doll2	Sphere	Hemisphere	Combined
RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	6.9	6.6	6.9	8.3	7.3	7.0	7.6	8.2	<b>6.4</b>
Std.dev. ( $\times 10^{-3}$ )	7.6	7.1	7.5	9.1	8.0	7.0	7.6	8.2	<b>7.0</b>

表 2 推定された光源分布における真値との比較評価  
 Evaluation values of estimated light distributions compared with Ground Truth.

Object name	Box	Duck1	Duck2	PenLight	Doll1	Doll2	Sphere	Hemisphere	Combined	Conventional <sup>6)</sup>
RMSE ( $\times 10^{-3}$ )	14.0	14.1	13.7	15.0	14.4	13.6	13.6	15.1	13.5	<b>7.8</b>
Std.dev. ( $\times 10^{-3}$ )	13.0	13.2	12.8	13.9	12.8	13.6	12.7	14.0	12.6	<b>7.2</b>

使用した物体, 中段は推定された光源分布を可視化した図を示している. なお図 6 では, 考察のために 3 種類の物体 (**Box**, **Duck2**, **Hemisphere**) を用いた結果, 前述の 7 種類の物体を結合して推定した結果 (**Combined**), 従来手法を **Box** に適用した結果 (**Conventional<sup>6)</sup>**), 魚眼レンズ付きカメラで観測された真値 (**Ground Truth**) を示す. 図 6 の 2 段目最右列は, 魚眼レンズ付きカメラで参照する物体を配置した位置から天井方向に撮影した画像である. 図中に示した青丸は, 室内に配置された蛍光灯の位置を示しており, 赤丸はカメラの位置を示している.

図 6 の 2 段目の推定された光源分布は, 撮影された室内環境と比較して見る事ができる. 図 6 の 2 段目最右列の室内環境を撮影した画像から, 実験のシーンでは青丸で示した二つの領域に光源が存在しており, 図 6 の 1 段目に示した物体画像から, それらの光源によって物体中央から左右下方向に向けて影が生じていることがわかる. 図 6 の 2 段目より, 推定結果にばらつきがあるが, すべての結果で, RGB-D カメラが設置されている方向周辺に顕著に明るく推定されていることがわかる. しかし, 撮影された光源環

境にはカメラ周辺に光源はないため, カメラ方向に推定された光源は誤りだと言える. 影に基づく光源推定は, 物体による光源の遮蔽によって生じる影の明るさから光源の値を推定する手法である. 提案手法のようにカメラが単視点である場合, カメラに観測される影は遮蔽物体の側面および背面によって遮蔽される光源によって生じ, これらの影は遮蔽物体の側面および前面に観測される. カメラが存在する方向にある光源に対応する影は, 物体背面に生じるため単視点カメラの画像上にはほぼ映らない. そのため, カメラ方向に存在する光源  $L_n$  に対応する式には,  $L_n$  によって生じる影に関する式がほぼ含まれないことになる. 結果として,  $L_n$  は強い値を持つ光源として推定される. このような誤推定に関する考察は従来の研究<sup>11)</sup>でも述べられている.

次に評価について述べる. 提案手法および従来手法は, 前述した理論的理由に基づきカメラが存在する方向の光源に関して誤推定されるため, そのような光源を除いて評価を行う. 本実験ではカメラ周辺の 13 個のサンプリング光源を除去して評価を行った. 図 6 下段に評価に用いた光源分布お

よび魚眼レンズで撮影された全方位画像から算出した光源分布を示す。従来手法との比較および真値との比較を行う。表 1 に **Conventional** と比較した結果、表 2 に **Ground Truth** と比較した結果を示す。評価値として、平均平方二乗誤差 (RMSE) と標準偏差 (Std. dev.) を計算した。表 1 より、**Hemisphere** や **PenLight** は他の結果に比べ精度が悪いことがわかる。図 6 の物体画像を比較すると、特に **Hemisphere** は中央から左下方向にのみ影が生じており、また影領域も少ないことがわかる。他の物体では、中央から右下方向に影が確認できる。**Hemisphere** では、物体から右下方向の影が観測できないため、本来存在する光源の情報を線型式に含めることができず、推定精度が悪くなったと考えられる。一方で、**Combined** は最も良い数値となっている。各物体で生じている影の形は異なっているため、複数の物体を結合することで、線型式に物体の中央から右下方向に生じる影の情報を含めることができたと考えられる。次に、**Ground Truth** との比較した結果について述べる。表 2 の結果から **Conventional** が最も良い数値であることがわかる。これは、従来手法では物体の形状が既知であるのに対して、提案手法では、部分物体形状を用いているため、光源推定の精度が従来より低くなっている。この評価から、提案手法は従来手法より精度で勝ることは困難であることがわかる。しかし、提案手法の中では、複数物体を用いた **Combined** が最も精度が良い。複数の物体を用いて光源推定を行うことで推定精度が向上したことが伺える。

最後に、**Box** における光源推定の処理時間について述べる。推定に使用した影の画素数は約 4700、物体 3 次元点群は約 1300 点である。それらの情報から提案手法を用いた光源推定までの処理時間は約 40 分であった。

### 5.3 仮想物体の影重畳実験

次に、提案手法によって推定した光源分布が、AR における光学的整合性に対して与える影響を検討する。検討のために、物体の影に基づいて推定された光源分布を用いて、仮想物体の影重畳実験を行った。入力として、前節で推定した光源分布と背景画像を用い、3.3 節で述べた理論に基づき仮想物体の影を重畳する。仮想物体は単純な形状をした **Box** と同様とし、実物体と同様の位置・姿勢で配置した。評価は、光源推定実験と同様に、**Conventional** の結果と **Ground Truth** を参照し、明度値の差分を計算した。

仮想物体の影重畳を行った結果を図 7 に示す。図 6 と同様に、一部の結果を示す。図 7 最右列は実際に **Box** を配置して撮影した **Ground Truth** である。図 7 上段に仮想物体に影を重畳した結果画像、中段に **Conventional** の結果と明度の差分をとったエラーマップ、下段に **Ground Truth** と明度の差分をとったエラーマップを示す。評価値として平均平方二乗誤差 ((RMSE)、標準偏差 (Std. dev.)、最大誤差の値 (Max) を算出した。表 3 に **Conventional** の結果との評価値、表 4 に **Ground Truth** との評価値を

それぞれ示す。

図 7 上段において **Ground Truth** と比較すると、**Conventional** は二つの大きな影が重畳されており、精度よく影が重畳できていると思われる。また、表 3 から **Conventional** が最も良い精度となっている。一方で、**Box** は二つの影が重畳されているが、**Conventional** より影が薄いことがわかる。提案手法は物体の部分形状、従来手法は物体の全周形状を用いて光源推定を行っているため、**Box** での推定誤差は物体形状が一部しか観測できないことが起因している。この考察と同様に、提案手法の推定精度は、前節で述べた画像に写り込んだ影に加え、取得した物体の 3 次元形状に依存すると考えられる。また **Duck2** は、同様に二つの影が現れているが、影重畳画像を見ると **Box** よりさらに影が薄く、評価結果からも **Box** より精度が低いことがわかる。これは、**Duck2** は **Box** に比べ、複雑な形状をしていることが起因していると考えられる。RGB-D カメラから得られる距離情報は各画像面点で保持されているため、離散的に取得していることになる。そのため、観測した物体の形状を正確に取得することは難しく、推定時に算出する  $V_n(\mathbf{x})$  項が誤った値となり推定精度へ影響している。**Hemisphere** については **Box** と同様に単純な形状であるのに対して、推定結果は最も低い。これは、前節で述べたように、観測できる影の情報が少ないことが起因している。

光学的整合性が取れた影の重畳を行うためには、仮想物体の 3 次元形状と正確な光源分布が必要がある。しかしながら、各光源が影の重畳に対して及ぼす影響度は一様ではなく、重畳表示される仮想物体の形状によって異なる。影の重畳表示実験において、**Box** が最も少ない誤差を示した理由は、重畳する仮想物体に直方体である **Box** を選んだからである。実物体に球を選んでいれば、**sphere** の結果が最も少ない誤差を示すはずである。**Combined** の結果が **Box** より誤差が大きい理由は、**Box** を除く七つの物体から得られた線型式に、直方体の影の重畳にとって重要ではない光源推定をするための式が多く含まれたためであると考えられる。一方で、表 3 から **Combined** は結合した七つの物体と比べ、Std.dev. を除く項目で勝っており、単物体を用いるより複数用いた方が精度が向上していることがわかる。これは、光源推定実験と同様に複数の物体を用いることで、線型式に影の情報を含めることができ、誤った値を持つ  $V_n(\mathbf{x})$  項の割合が少なくなったためと考えられる。RGB-D カメラで容易にシーンの 3 次元形状を取得できるため、このように複数用いた精度の向上は提案手法の貢献と言える。

**Ground Truth** と比較評価を行った表 4 から、光源推定実験と同様に **Conventional** が最も良い精度となった。提案手法による結果を相対的に見ると、表 3 と同様な結果となっており、**Box** が最も良く、次いで **Combined** が良い精度を示している。これらの結果からも前述と同様の考



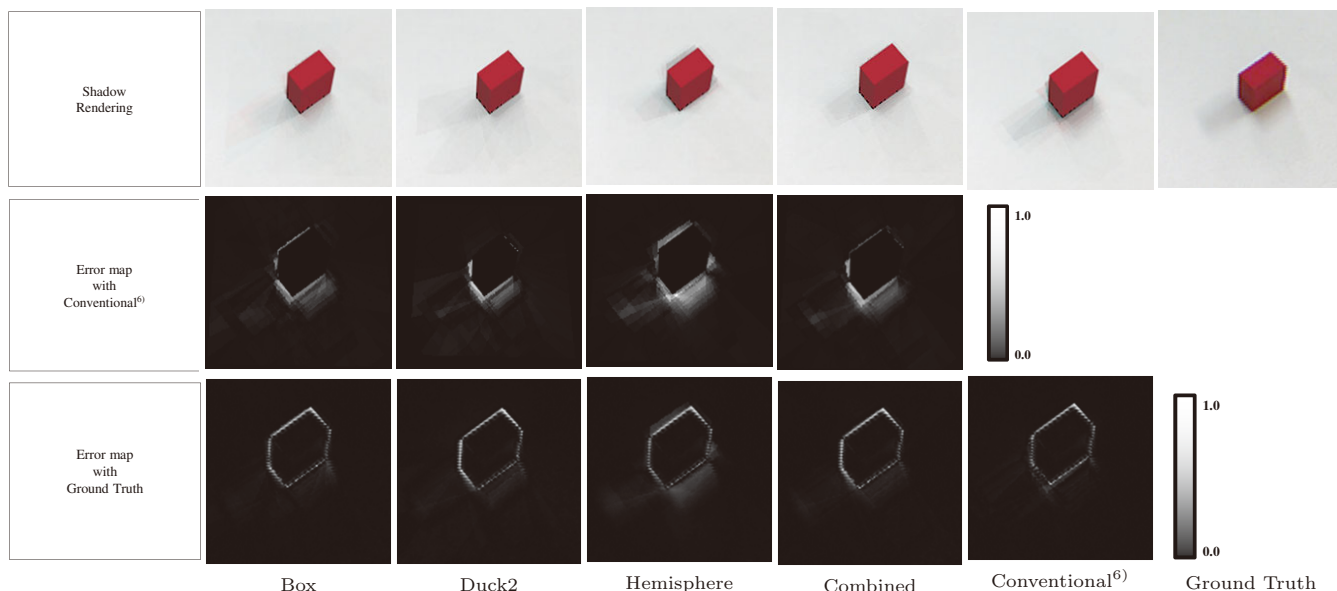


図 7 仮想物体の影重畳結果. 上段: 影重畳画像. 中段: 佐藤らの手法を参照としたエラーマップ. 下段: 真値を参照としたエラーマップ

Shadow rendering results: the top row shows shadow rendering results by using estimated light distributions, the middle row shows error maps with Sato et al.<sup>6)</sup>, the bottom row shows error maps with Ground Truth.

表 3 影重畳結果における従来手法との比較評価  
Evaluation values of shadow rendering results compared with Conventional<sup>6)</sup>.

Object name	Box	Duck1	Duck2	PenLight	Doll1	Doll2	Sphere	Hemisphere	Combined
RMSE [pixel value]	<b>6.1</b>	9.1	7.3	9.1	9.1	7.8	7.6	9.8	7.2
Std.dev. [pixel value]	<b>5.3</b>	8.1	6.4	7.7	8.3	6.3	6.8	8.9	6.4
Max [pixel value]	<b>58.9</b>	128.7	70.6	90.0	140.7	68.6	66.5	82.8	66.0

表 4 影重畳結果における真値との比較評価  
Evaluation values of shadow rendering results compared with Ground Truth.

Object name	Box	Duck1	Duck2	PenLight	Doll1	Doll2	Sphere	Hemisphere	Combined	Conventional <sup>6)</sup>
RMSE [pixel value]	8.4	9.6	9.0	9.8	9.2	10.7	9.0	10.7	8.7	<b>7.2</b>
Std.dev. [pixel value]	7.7	8.8	8.1	8.6	8.0	9.9	8.5	9.7	8.1	<b>6.8</b>
Max [pixel value]	146.2	163.8	167.7	144.9	151.8	175.7	155.2	149.1	158.1	<b>146.2</b>

察が伺える。

最後に、影重畳に要する処理時間について述べる。入力画像に対し、明度を変更した影の画素数は約 28400 で処理時間は約 50 分であった。

## 6. 検 討

本章では、実験より得られた提案手法の特徴および妥当性について検討する。まず、従来手法との比較について述べる。提案手法に対し従来手法の方が光源推定精度が良い結果となった。これは、物体の全周形状を用いて光源推定を行う従来手法に対し、提案手法では物体の一部の形状を用いて推定しているためと考えられる。物体の全周がわかっている場合、線型式における  $V_n(\mathbf{x})$  の項の値は完全に求めることができる。一方で、提案手法では物体背後の形状が不明なため、 $V_n(\mathbf{x})$  の項に誤りが生じ、光源推定結果に影響が出ている。

次に、影領域の範囲における影響について述べる。単純な形状をした **Hemisphere** と **Box** の結果を比較すると **Box** の方が精度が良い結果となった。これは **Hemisphere** のように、単純な形状であっても画像中に映り込んだ影領域が小さいと、線型式に含める情報が不足してしまい、十分な推定結果を得られない。提案手法において、物体単体を用いて光源推定するのであれば、**Box** のような単純な形状で、影領域が広くはつきりと観測できる物体を用いるのが理想的である。

次に物体を複数用いる手法について述べる。着目すべきは、**Combined** の結果が、結合に用いた各物体(図 5 中の **Box** を除く七つの物体) から推定した光源分布に比べて精度が向上している点である。前述した **Hemisphere** のような影領域が他に比べ不足している物体では、光源の誤推定が生じてしまうが、複数用いることで不足した影の情報を補うことができる。このような結果は、提案手法の貢

献と言える。一方で、**Combined**の光源推定結果は、提案手法を適用した中で最も精度が良いものの、従来手法と比べて精度は低い。各物体において、図4のように正しい $V_n(\mathbf{x})$ 項を算出できない領域が存在し、光源との遮蔽係数を求める際にInvisibleとなるケースを含んでしまう。提案手法では、このようなケースの時は $V_n(\mathbf{x}) = 0$ としたため、 $V_n(\mathbf{x})$ 項に誤りが含まれる。また、従来の研究では $V_n(\mathbf{x})$ 項の値を0か1ではなく、0から1の値を決定している<sup>11)</sup>。提案手法の問題点を解決するために、Invisibleとなるケースで $V_n(\mathbf{x})$ 項を0から1の値に適切に決定することで光源の誤推定が緩和されると考えられる。

提案手法では、5章で述べたようにリアルタイム処理は実現できていない。光源推定においては、可視性関数 $V_n(\mathbf{x})$ の算出に処理時間の大半を占めている。特に光源推定よりも、仮想物体の影を重畳する処理に時間がかかっていることはARアプリケーションにとって許容できないことである。従来の手法では、事前に仮想物体の可視性関数を計算することで、ARアプリケーションを70fps以上の速さで実行している<sup>5)</sup>。この研究では、仮想物体の陰影や影を、 $V_n(\mathbf{x})$ および光源分布の線形和で計算している。このように重畳する仮想物体の $V_n(\mathbf{x})$ を事前に計算し、陰影や影をGPUで計算することで、光学的整合性のとれた実時間ARアプリケーションが実現可能だと考えられる。

## 7. むすび

本研究では、固定されたRGB-Dカメラから得られる物体の部分形状と影を用いて、光源分布を推定する手法を提案した。提案手法では、背景と物体を配置した画像との差分を用いて物体と影の領域をそれぞれ検出した。その後、部分的に得られた物体形状を考慮し、 $V_n(\mathbf{x})$ 項を算出し、線型式を形成し非負の最小二乗法で光源輝度値に関して解くことで光源推定を行った。

本実験より物体単体を用いて推定を行った場合、影領域の不足や、物体背後の形状が得られないことが原因で従来手法より光源推定精度は低くなる。しかし、本手法を適用し複数の物体を結合することで、物体単体を用いるより光源の推定精度を向上させることが可能である。

今後は、より推定精度を向上するための妥当な $V_n(\mathbf{x})$ の値の決定や、ARへの適用に向けて光源推定のリアルタイム性の向上が課題である。

最後に、本研究の一部は、科学研究費 基盤研究 (S) 24220004の補助により行われた。

## 【文 献】

- 1) R. Azuma, "A survey of augmented reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **6** (1997)
- 2) 池内克史, 佐藤洋一, 西野恒, 佐藤いまり, "複合現実感における光学的整合性の実現," *VRSJ*, **4**, 4, pp.623-630 (1999)
- 3) M. Knecht, et al., "Differential instant radiosity for mixed reality," in *In Proc. ISMAR* (2010)
- 4) P. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination

- and high dynamic range photography," in *In Proc. ACM SIG-GRAPH*, pp.189-198 (1998)
- 5) N. Derek et al., "Light Factorization for Mixed-Frequency Shadows in Augmented Reality," in *In Proc. ISMAR*, (2011)
- 6) 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, "物体の陰影に基づく光源環境の推定," *情報学論*, **41**, SIG10(CVIM1), pp.31-40(2000)
- 7) 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, "キャストシャドウを用いた光源推定法: 球面調和関数展開に基づく解析," *情報学論*, **CVIM**, **133**, 34, pp.201-208(2002)
- 8) 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, "影に基づく光源推定の周波数解析と Haar ウェーブレットを用いた適応的手法の提案", *信学論. D-II*, 情報・システム, II-パターン処理, **88**, 8, pp.1440-1449(2005)
- 9) Gillm R.E, W. Murray M.H. Wright, "Practical Optimization", Academic Press, London, UK(1981)
- 10) Coleman, R.F, Y. Li, "A Reflective Newton Method for Minimizing a Quadratic Function Subject to Bounds on Some of the Variables", *SIAM Journal on Optimization*, **6**, 4, pp.1040-1058(1996)
- 11) 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, "Stability Issues in Recovering Illumination Distribution from Brightness in Shadows", *In Proc.IEEE CVPR*, pp.400-407(2001)
- 12) OpenNI, <http://openni.org/>
- 13) 佐藤いまり, 林田 守広, 佐藤 洋一, 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", *情報処理学会研究報告. CVIM*, **50** pp.65-72, (2000)



いけだ たくや  
池田 拓也 2012年、慶應義塾大学理工学部情報工学科卒。現在、同大学院理工学研究科前期博士課程に在学中。コンピュータビジョン、特に拡張現実感における光学的整合性に関する研究に従事。



おやまだ たかうじ  
小山田 雄仁 2011年、慶應義塾大学大学院理工学研究科後記博士課程修了。博士(工学)。現在、同大学院理工学研究科博士研究員。2010年1月から6月、マイクロソフトリサーチアジアにてフルタイムインターン。2012年より、ミュンヘン工科大学にて訪問研究員。画像復元を含む画像処理の逆問題、Projector-Camera Systemsに関する研究に従事。



すぎもと まさき  
杉本 麻樹 2006年、電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士(工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師などを経て、現在、慶應義塾大学理工学部情報工学科講師。画像提示装置を用いた計測と制御等の研究に従事。



さいとう ひでお  
斎藤 英雄 1987年、慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1992年、同大学院理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。1992年、同大学助手。同講師。同助教を経て、2006年、同教授。博士(工学)。主にコンピュータビジョンに関する研究に従事。正会員。