

# 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

岡部孝弘 佐藤いまり 佐藤洋一 池内克史

東京大学生産技術研究所  
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1  
E-mail: takahiro@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし：物体形状が既知の場合に画像を手掛かりに光源を推定する逆問題は *inverse lighting* と呼ばれ、物体表面の陰影を利用する手法とキャストシャドウを利用する手法が知られている。陰影からの光源推定は、Lambert モデルを仮定した場合に不安定になることが、実験、理論の両面から報告されている。一方、キャストシャドウからの光源推定は、実画像を用いた実験から、Lambert モデルを仮定した場合でも比較的うまく働くことが知られているが、なぜうまく働くのかという点は必ずしも十分に明らかにされていない。本稿では、キャストシャドウを用いた光源推定について、球面調和関数展開に基づく手法を提案し、うまく働く理由について議論する。また、球面調和関数を基底として光源の輝度分布を表現する提案手法の特長について、簡単な数値実験により検証する。

キーワード：Inverse rendering, 光源推定, 球面調和関数, Lambert モデル, 実効 BRDF

## Illumination Estimation from Cast Shadows: Analysis Based on Spherical Harmonics Expansions

Takahiro OKABE Imari SATO Yoichi SATO Katsushi IKEUCHI

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan  
E-mail: takahiro@iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** : The problem of estimating an incident light distribution from given images is generally called *inverse lighting*. For this problem of inverse lighting, two approaches are known: the one based on shading of an object's surface and the other based on shadows cast by an object in a scene. It has been shown, both experimentally and theoretically, that the problem of estimating illumination based on shading of a Lambertian surface becomes ill-conditioned. On the other hand, estimation of illumination based on cast shadows on a Lambertian surface works in a reliable manner, as has been demonstrated by a number of experiments using real images. However, up until now, the reason why the latter works has been unknown. In this paper, we propose a method based on spherical harmonics expansions for estimation of illumination from cast shadows and discuss why the approach using cast shadows works reliably even in the case of a Lambertian surface. In addition, we report the results of preliminary experiments that we have conducted for demonstrating the effectiveness of the proposed method.

**Keywords** : Inverse rendering, Illumination estimation, Spherical harmonics, Lambertian model, Effective BRDF

# 1 はじめに

物体の形状, 双方向反射関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function:BRDF) および光源が既知の場合にこれらの情報をもとに画像を生成する (forward) rendering に対して, 画像が与えられた場合に物体の性質や光源を推定する逆問題は inverse rendering と呼ばれる. 特に, 物体形状が既知の場合に画像を手掛かりに光源を推定する逆問題は inverse lighting と呼ばれ, 物体表面の陰影 (shading) を利用した手法 [4], ある物体が他の物体に落とす影 (キャストシャドウ) を利用した手法 [7] が提案されている.

前者の陰影を用いた推定法は, 観測する画素に対応する物体表面の法線方向の多様性を利用するものであるが, BRDF として Lambert 反射関数を仮定した場合の光源推定は, 実画像を用いた実験において不安定になることが報告されている [4]. これは直観的には, Lambert 反射関数がなめらかな関数であるために, 複雑な光源下においても, 物体表面の陰影の変化が緩やかであることに起因していると考えられることができるが, 最近になって, 理論的にもその原因が明らかにされた [5].

光源輝度分布, BRDF, 物体表面の輝度分布が各々, 光源方向, 入射, 反射方向, 物体表面の法線方向の関数であり, 単位球上の点で方向を表現できることから, これらを, 単位球上で定義された関数として扱うことができる. したがって, 単位球上で完備な正規直交系をなす球面調和関数を用いてこれらの関数を展開し, 周波数空間で議論することができる. 物体表面の輝度分布が, 光源輝度分布と BRDF の畳み込みで表現されることに基づいて, ある周波数に着目したときの物体表面の輝度分布成分が, BRDF 成分と光源輝度分布成分の積で表されることが示された [5]. したがって, 球面調和関数により表現される周波数空間で考えた場合に, ある周波数の光源輝度分布成分は, 物体表面の輝度分布成分を BRDF 成分で割ることにより求めることができる. ところが, Lambert 反射関数を球面調和関数で展開したときに, 3 次以上の高周波成分が 0 または低周波成分と比べて非常に小さい値を持つことが知られており [6][2], その周波数に対応する光源輝度分布成分の推定は不安定になる. ゆえに, 陰影を利用した光源推定が不安定になるのは, 光源輝度分布の高周波成分を求めることができないことに起因していると考えられる [5].

一方, キャストシャドウを用いた推定法は, ある物体が他の物体に落とす影から光源を推定する直観的な手法であるが, 実画像を用いた実験から, BRDF として Lambert 反射関数を仮定した場合でも, 比較的安定に光源を推定できることが知られている [7]. しかし, Lambert 反射関数

を仮定した場合に, 陰影からの光源推定が不安定になる一方で, キャストシャドウからの光源推定がなぜうまく働くのかという点は, 必ずしも十分に明らかにされていない.

本稿では, キャストシャドウを利用した光源推定法について, 球面調和関数展開に基づく手法を提案してその解析を行うことで, Lambert 反射関数を仮定した場合でもなぜうまく働くのかについて議論する. 具体的には, キャストシャドウを生じる遮蔽物体がある場合には, 遮蔽によるマスクと Lambert 反射関数の積を新たに実効 BRDF (effective BRDF) と見なすことができる点に着目し, 遮蔽状態が不連続に変化することから, effective Lambertian BRDF が高周波成分を持つことを指摘する.

さらに, 微少な面光源を基底としてそれらの和で光源を表現する従来の手法 [7] には, 基底が微少な面光源であることに起因する光源推定の不安定性があるが [9], 単位球上で定義されたなめらかな関数である球面調和関数を基底としてそれらの和で光源を表現する提案手法には, これらの不安定性が現れないという特長があることを述べる.

本稿の構成は以下の通りである. まず第 2 章で従来のキャストシャドウを用いた光源推定法について述べる. 次に第 3 章で, 球面調和関数を用いた定式化を行い, キャストシャドウを利用した推定法がなぜうまく働くのかについて議論する. また, 提案手法の特長についても述べる. 第 4 章では, 仮想光源, 仮想物体を用いた数値実験により, キャストシャドウを利用した推定法が働く理由, および提案手法の特長について検証し, 第 5 章で結ぶ.

## 2 従来手法

本節では,  $xy$  平面上に置かれた物体が作るキャストシャドウから光源を推定する従来手法 [7] について簡単に述べる. BRDF として Lambert 反射関数を仮定すると, 平面上の位置  $x$  における物体の表面輝度は,

$$E(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} M(x, \theta, \phi) L(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

と表すことができる. ここで  $\theta, \phi$  は, 法線ベクトルに対して図 1 のようにとる. また, 光源は十分遠方であると仮定し,  $(\theta, \phi)$  方向の光源輝度を  $L(\theta, \phi)$  で表す.  $M(x, \theta, \phi)$  は物体の遮蔽によるマスクを表し, 位置  $x$  から見て  $(\theta, \phi)$  方向に物体がある場合に 0, ない場合に 1 をとる.

次に, この積分を離散的な積分

$$E(x) = \sum_{i=1}^k M_i(x) L_i \cos \theta_i \quad (2)$$

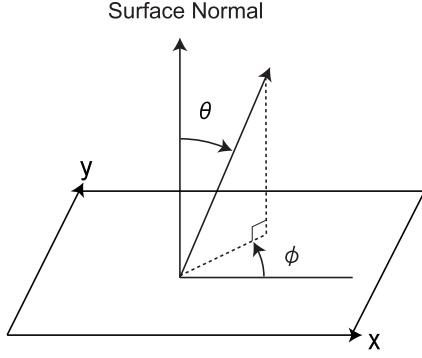


図 1: 座標系

で近似する。ここで  $L_i$  は、 $(\theta_i, \phi_i)$  方向の立体角  $2\pi/k$  あたりの光源輝度で、 $M_i(x)$  は、位置  $x$  から見て  $L_i$  が物体により遮蔽されている場合は 0、そうでない場合に 1 とする。この近似は、微小な面光源  $L_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$  を基底とする線形結合で光源輝度分布を表現していることに対応している。

式 (2) から、 $l (\geq k)$  点で表面輝度値を観測<sup>1</sup> すれば、

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{l1} & a_{l2} & \cdots & a_{lk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(x_1) \\ E(x_2) \\ \vdots \\ E(x_l) \end{pmatrix}$$

$$A \cdot L = E \quad (3)$$

を  $L$  について解くことで、光源輝度分布を求めることができる。ここで  $a_{ij} = M_j(x_i) \cos \theta_j$  である。式 (2) より、各観測点における輝度の変化は、各観測点においてマスクが異なることに起因していることがわかる。したがって、キャストシャドウからの光源推定法は、 $M_j(x_i)$  で表されるマスクの多様性を利用した推定法であると言える。

### 3 球面調和関数展開に基づく解析

#### 3.1 準備

BRDF ならびに光源輝度分布は、単位球上で定義された関数とみなすことができることから、平面上で定義された関数を平面上で完備直交系をなす三角関数を用いて Fourier 級数展開するのと同様に、球面上で完備直交系をなす球面調和関数 [1] を用いて表現することができる。本

<sup>1</sup> ある点の表面輝度値と、その点に対応する画素の値は比例することが知られている [3]。

稿では、 $Y_{nm}(\theta, \phi)$  で、完備な正規直交系をなす球面調和関数

$$Y_{nm}(\theta, \phi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{2\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) \sin(m\phi) & (m = 1, 2, 3, \dots, n) \\ \sqrt{\frac{(2n+1)}{4\pi}} P_n(\cos \theta) & (m = 0) \\ \sqrt{\frac{(2n+1)(n-|m|)!}{2\pi(n+|m|)!}} P_n^{|m|}(\cos \theta) \cos(m\phi) & (m = -1, -2, -3, \dots, -n) \end{cases} \quad (4)$$

を表す。ここで、 $P_n, P_n^m$  はそれぞれ Legendre 多項式、Legendre 陪関数である。

#### 3.2 球面調和関数展開による定式化

式 (1) の定義域は半球であるが、全球で定義された球面調和関数を用いた解析を行うために、

$$E(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \max(\cos \theta, 0) M(x, \theta, \phi) \times L(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (5)$$

のように表現を変える。以後、 $\max(\cos \theta, 0)$  を Lambertian BRDF と呼ぶことにする<sup>2</sup>。

ここで、光源の輝度分布を球面調和関数を用いて、

$$L(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n L^{(nm)} Y_{nm}(\theta, \phi) \quad (6)$$

と表現する。したがって光源推定は、観測から展開係数  $L^{(nm)}$  を求めることに他ならない。

また、遮蔽物体がある場合には、形式的に、Lambertian BRDF とマスクを表す  $M(x, \theta, \phi)$  の積を、新たな BRDF と見なすことができる。本稿では、これを *effective Lambertian BRDF* と呼び、

$$R_{eff}(x, \theta, \phi) \equiv \max(\cos \theta, 0) \times M(x, \theta, \phi) \quad (7)$$

と定義する。これにより、式 (5) で表される表面輝度は、遮蔽されていない方向にある光源からの入射光を Lambertian BRDF により反射した結果得られるものであると同時に、全ての方向からの入射光を実効 Lambertian BRDF で表される反射特性を持つ面により反射した結果得られるもの

$$E(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi R_{eff}(x, \theta, \phi) L(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (8)$$

と見なすことができる。

<sup>2</sup> これは BRDF に  $\cos \theta$  をかけたものであり、BRDF と厳密に区別して、輸送関数 [5] または Lambertian kernel [2] と呼ばれる場合もある。

Effective Lambertian BRDF もまた、球面調和関数を用いて

$$R_{eff}(\mathbf{x}, \theta, \phi) = \sum_{n'=0}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} R_{eff}^{(n',m')}(\mathbf{x}) Y_{n',m'}(\theta, \phi) \quad (9)$$

と表現することができる。キャストシャドウを生じる遮蔽物体の形状が既知の場合には  $R_{eff}(\mathbf{x}, \theta, \phi)$  を計算できることから、この展開係数は、

$$R_{eff}^{(n',m')}(\mathbf{x}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} R_{eff}(\mathbf{x}, \theta, \phi) Y_{n',m'}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (10)$$

から求めることができる。この式から、実効 Lambertian BRDF の展開係数  $R_{eff}^{(nm)}$  は、光源輝度分布が球面調和関数  $Y_{nm}$  に等しいときの表面輝度に相当することがわかる。

式 (6), (9) を式 (8) に代入すると、球面調和関数の直交性から、

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n R_{eff}^{(nm)}(\mathbf{x}) L^{(nm)} \quad (11)$$

が得られる。つまり、位置  $\mathbf{x}$  における物体表面の輝度は、実効 Lambertian BRDF および光源の輝度分布の各周波数成分の積の和で与えられる。

$N$  次までの周波数モードの数は  $(N+1)^2$  個となるので、 $l(\geq (N+1)^2)$  点で表面輝度値を観測すれば、式 (11) より、

$$\begin{pmatrix} R_{eff}^{(00)}(\mathbf{x}_1) & \cdots & R_{eff}^{(NN)}(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{eff}^{(00)}(\mathbf{x}_l) & \cdots & R_{eff}^{(NN)}(\mathbf{x}_l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L^{(00)} \\ \vdots \\ L^{(NN)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ E(\mathbf{x}_l) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$R \cdot L' = E$

の連立方程式が得られ、これを  $L^{(00)}$  から  $L^{(NN)}$  に関して解くことで、 $N$  次までの光源輝度分布を推定することができる。

### 3.3 光源輝度分布の高周波成分の推定

ここでは、キャストシャドウを用いた光源推定法が、光源輝度分布の高周波成分を推定できる可能性について議論する。

まず、遮蔽物体がない場合の Lambertian BRDF の展開係数について考える。Lambertian BRDF の展開係数は、解

析的に、

$$R_{Lambertian}^{(n0)} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\pi}}{2} & (n=0) \\ \sqrt{\frac{\pi}{3}} & (n=1) \\ \frac{(-1)^{n/2+1}(n-2)! \sqrt{(2n+1)\pi}}{2^n (n/2+1)! (n/2-1)!} & (n \geq 2 : even) \\ 0 & (n \geq 2 : odd) \end{cases} \quad (13)$$

で与えられ、 $n \geq 3$  の高周波成分の展開係数がゼロまたは低周波成分のそれと比較して非常に小さい ( $\sim O(n^{-2})$ ) ことが知られている [6][2]。

陰影を用いた光源推定手法 [4] は、ある周波数において、表面輝度分布成分を BRDF 成分で割ることで光源輝度分布成分を求める処理に相当することから、 $L^{(nm)} (n \geq 3 : odd)$  の展開係数は、原理的に求めることができない。逆に、 $R_{Lambertian}^{(n0)} (n \geq 3 : odd)$  が 0 であるということは、対応する光源輝度分布の高周波成分  $L^{(nm)} (n \geq 3 : odd)$  が、物体表面の輝度に全く寄与しないことを意味している。したがって、陰影を用いた光源推定手法における  $L^{(nm)} (n \geq 3 : odd)$  の解は任意となり、推定を不安定にする。

一方、キャストシャドウを用いた光源推定手法の場合、式 (11) より、物体表面の輝度に寄与するのは、Lambertian BRDF と光源輝度分布の各周波数成分の積ではなく、実効 Lambertian BRDF と光源輝度分布の各周波数成分の積であることがわかる。さらに、 $M(\mathbf{x}, \theta, \phi)$  は 0, 1 の離散的な値をとり、不連続に変化することから、一般に、実効 Lambertian BRDF には、式 (13) の Lambertian BRDF の場合と異なり、高周波成分が存在すると考えられる。したがって光源輝度分布は、高周波成分も含めて式 (11) を通して表面輝度に寄与することから、逆に、表面輝度を観測することにより、光源を推定することが可能である。ゆえに、キャストシャドウを用いた光源推定がうまく働くのは、実効 Lambertian BRDF が高周波成分を持つことに起因していると考えられる。

### 3.4 光源輝度分布を表現する基底

ここでは、光源輝度分布を表現する基底として、微小面光源を用いる場合と球面調和関数を用いる場合の違いについて述べる。

まず、従来手法には、実画像に適用するうえで、微小な面光源を基底として利用していることから生じる 2 つの

不安定性の問題、オクルージョンおよびサンプリングの問題があることが指摘されているが [9], 球面調和関数を基底とする提案手法には, これらの不安定性が現れないという特長がある.

オクルージョンの問題とは, カメラから見て, キャストシャドウを生じる物体の背後を観測できないために生じる不安定性である. このとき, 観測可能な領域において, ある基底面光源の遮蔽状態  $M_i(x)$  が変化しない場合がある. これは, 式 (3) の係数行列  $A$  のある列ベクトルの成分が全て等しくなることを意味する. したがって, そのような基底面光源が 2 個以上存在すると, 係数行列  $A$  のランク落ちのために, 光源を推定することは不可能になる. この問題に対して [9] では, ランク落ちの原因となる列ベクトルに対応した基底面光源を合併して一つの基底として扱う手法を提案している.

また, 観測する位置 (画素) を選択する際に生じるのが, サンプリングの問題である. 従来手法では, 微小な面光源を基底としているために, 近傍のある 2 つの画素に着目したときに, それらの画素に対応する位置から見て基底面光源の遮蔽状態が変化しない場合がある. これは, 式 (3) の係数行列  $A$  のある 2 つの行ベクトルが等しくなることを意味する. したがって, 単純に観測画素を選択した場合に, 冗長な画素が大量に含まれるために係数行列  $A$  がランク落ちを起こし, 光源推定が不可能になる場合がある. この問題に対して [9] では, 観測可能な平面を, 行ベクトルが独立になるようなセルにあらかじめ分割して, 各セルから観測点を選択する手法を提案している.

以上のように, 従来提案されているキャストシャドウを用いた光源推定手法の安定性は, 式 (3) の係数行列  $A$  の性質から決まると言える. ところが, 行列の各成分は, 基底面光源の遮蔽状態のみから決定され, 0 またはそれ以外という 2 つの離散的な値しか取ることができないために, 実画像に適用する場合に, ランク落ちが起こりやすくなっている.

一方, 提案手法では, 式 (12) の実効 Lambertian BRDF の展開係数行列  $R$  の性質により, 光源推定の安定性が決まる. 本手法では, 単位球上で定義されたなめらかな関数である球面調和関数の線形結合で光源を表現しているために, 係数行列  $R$  の成分は連続的な値をとり, 各成分は無数の自由度を持つことになる. したがって, 係数行列の各成分が 2 つの離散的な値をとる従来手法と比較して, 係数行列のランク落ちが起こりにくくなる<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> 光源推定の安定性は, 光源輝度分布とは独立に式 (12) の行列の条件数から決まる. 平面上の観測可能な領域が与えられている場合には, 行列の各成分は物体形状のみから決定されるため, 逆に, 光源推定が安定になるような物体形状について議論することが可能であり, 今後の検

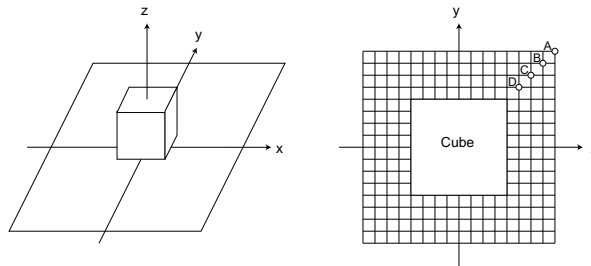


図 2: 仮想立方体とその周囲の観測点

さらに, 微小な基底面光源が空間的に局在化しているのに対して, 球面調和関数は周波数空間で局在化している点でも異なっている. オクルージョンによる情報の欠損は空間的に局在しているために, 微小面光源を基底とする従来手法は影響を受けやすい反面, 球面調和関数を基底とする提案手法は影響を受けにくいと思われる. 一方, 点光源などのような空間的に局在した光源を推定するには, 球面調和関数を基底とするよりも, 微小面光源を基底とした方が, 安定に推定できると考えられる.

## 4 実験結果

キャストシャドウを用いた光源推定法は, キャストシャドウを生じる物体の形状, 実画像において観測可能な範囲および分解能等に依存するために, 一般的に議論するのは困難である. 本節では, 仮想光源, 仮想物体を用いた簡単な数値実験により, キャストシャドウを利用した推定法が働く理由, および提案手法の特長について検証する.

### 4.1 展開係数

ここでは, 実効 Lambertian BRDF の展開係数が, Lambertian BRDF とは異なり, 高周波成分を含むことを確認する. 図 2 に示すように, 平面上に立方体を置き, 平面上の各点において式 (10) をモンテカルロ法<sup>4</sup> を用いて数値積分することで, 実効 Lambertian BRDF の展開係数を求めた.

図 3 に, 図 2 に示した 4 点での, 3 次から 8 次までの展開係数を示す. いずれの点でも,  $R_{eff}^{(nm)}$  が, 計算誤差に対して有意に  $R_{Lambertian}^{(nm)}$  (太線) からずれていることを確

討課題としたい.

<sup>4</sup> サンプル数は  $10^5$  とした. この場合に, 数値積分により得られた Lambertian BRDF 展開係数の, 解析的な解 (13) に対する誤差の標準偏差は  $3 \times 10^{-3}$  であった.

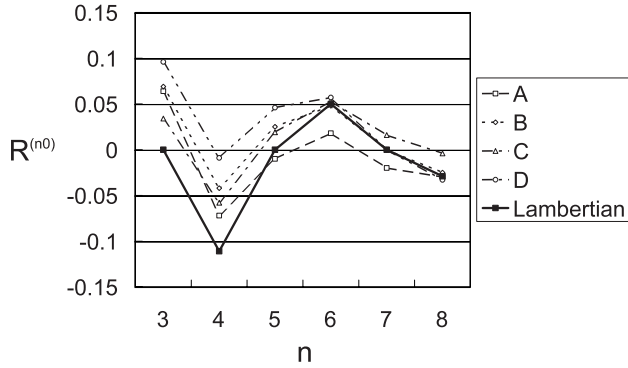


図 3: Effective Lambertian BRDF の展開係数

認することができる。特に、多くの 3 次、5 次、7 次の係数が 0 となっていないことが重要である。物体表面の陰影を用いた光源推定法が不安定になる原因は、式 (13) に示したように、3 次以上の奇数次の展開係数が 0 であるために、同じ周波数の光源輝度分布成分が物体表面の輝度に全く寄与しないためであった。一方、数値計算例が示すように、実効 Lambertian BRDF については、これらの展開係数が 0 になるとは限らないために、式 (11) を通じて同じ周波数を持つ光源輝度分布成分が物体表面の輝度に寄与し、その結果、逆に式 (12) を解くことで光源輝度分布を推定することができる。

## 4.2 光源推定

ここでは、仮想照明に照らされた仮想立方体の作るキャストシャドウに対して提案手法を適用して、仮想照明を推定する。観測点は、立方体の周囲を取り囲んで格子状に並んだ 208 点とし (図 2)、全ての点が観測可能な理想的な状況、つまり、立方体の真上方向にカメラを配置した場合について考える。なお、各点における表面輝度は、式 (1) からモンテカルロ積分により求めた。

まず、光源の輝度がガウス分布となる拡散光源について考える。単光源に対して提案手法を適用した結果を、図 4 に示した。図 4 は、光源の輝度分布を半球上で表現し、 $\theta = 0$  の方向から見たものである。光源を球面調和関数の線形和で表現しているために、推定した光源輝度が負になる場合があることから、輝度 0 を灰色で示している。2 次までの光源輝度分布を求めた場合には、輝度のピークの位置はほぼ一致しているものの、その分布はなだらかになっている。一方、8 次まで求めた場合には、ピークの位置だけでなく、分布全体を推定できている。この精

度の差は、高周波成分まで推定することで、より小さいスケールの分布を正確に決定できることを反映している。また、 $\theta = \pi/2$  に対応する半球の縁付近で、推定が若干不安定になっている部分があるが、これは Lambertian BRDF を仮定していることと関連がある。Lambertian BRDF は  $\max(\cos \theta, 0)$  で与えられるために、光源輝度が同じでも、 $\theta$  が  $\pi/2$  に近づくにつれて物体表面の輝度への寄与が小さくなるために、推定が不安定になると考えられる。しかし、逆に、 $\theta \rightarrow \pi/2$  で推定が不安定になっても、その誤差の物体表面の輝度への寄与も小さくなるために、実際の見えには影響しない。また、複数の拡散光源の推定 (図 5) についても、同様の結果が得られた。

次に、光源の輝度が不連続に変化する面光源について考える。この場合、図 6 に示したように、8 次までの光源輝度分布を求めた場合にも、光源の分布を十分に推定できているとは言えない。特に、半球の縁のあたりで誤差が大きくなっている。これは、不連続に変化する関数を球面調和関数で記述するには、無限の項が必要であることを反映していると考えられる。したがって、面光源や点光源などのように輝度分布が不連続に変化する光源に対しては、十分高周波まで考慮しないとその分布を正確に推定することは困難であると思われる。

この結果は、実環境においても、輝度が不連続に変化する面光源や点光源として近似できるような光源に対しては、十分高周波まで考慮する必要があることを示唆している。提案手法では、 $N$  次まで推定するには  $(N + 1)^2$  個の観測点が必要となるために、観測可能な範囲および分解能に制限のある実画像に適用するうえで、問題となる可能性がある。

従来手法においても、複雑な分布の光源を推定するためには、式 (2) の  $k$  で表される光源の分割数を十分大きくとる必要があった。[8] では、推定結果に基づいて光源方向のサンプリング密度を選択的に上げることで、比較的少数の観測点から、複雑な光源分布を推定している。

## 4.3 オクルージョンを伴う場合の光源推定

前節では、立方体の周囲が全て観測可能な理想的な条件の下で光源を推定したが、ここでは、オクルージョンがある場合について考える。仮想的なオクルージョンとして、図 8 の S1, S2, S3 の領域のいずれかが観測不可能であるとして、残りの点の情報から光源を推定する。仮想光源として図 4 の拡散光源を用いた場合の、3 通りの推定結果を図 7 に示す。いずれの場合にも安定に光源を推定できていることを確認することができる。

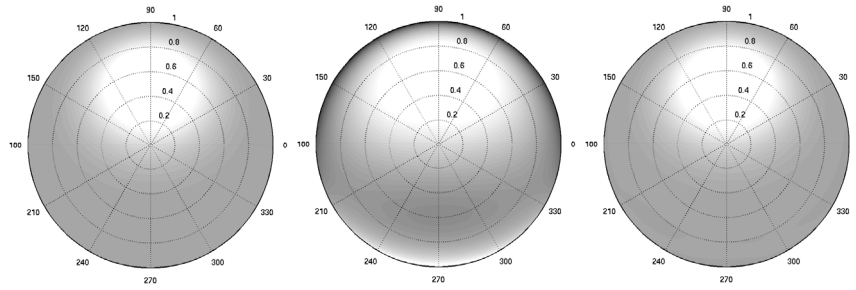


図 4: 拡散光源 (左), 推定結果: N=2 (中), N=8 (右)

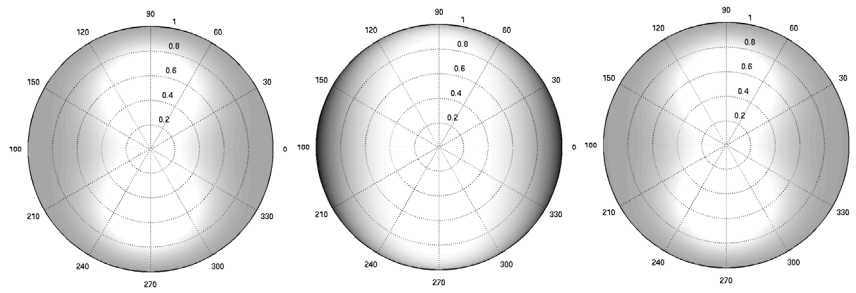


図 5: 拡散光源 (左), 推定結果: N=2 (中), N=8 (右)

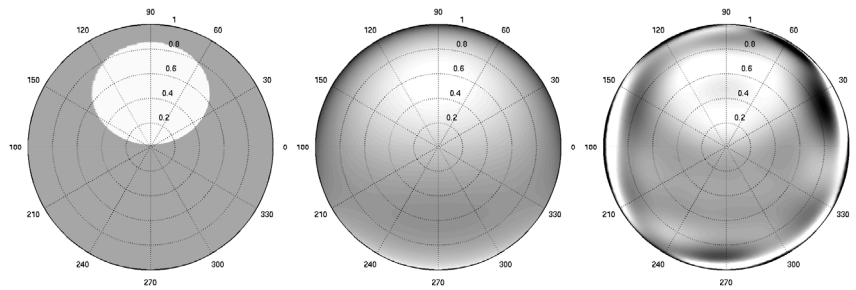


図 6: 面光源 (左), 推定結果: N=2 (中), N=8 (右)

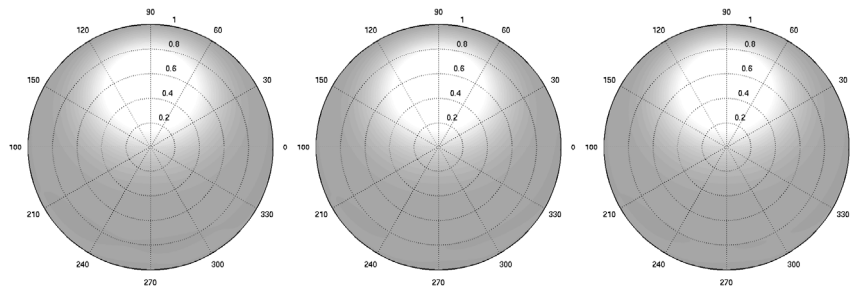


図 7: オクルージョンを伴う場合の推定結果: S1(左), S2(中), S3(右) が観測不可能な場合

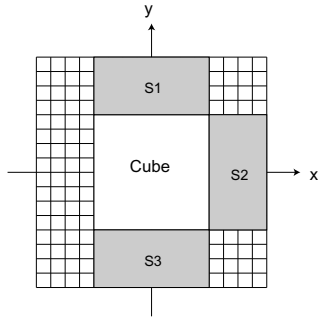


図 8: 仮想的なオクルージョン

3.4 節で述べたように、従来手法は、オクルージョンを伴う場合に、観測可能な領域において遮蔽状態が変化しない基底面光源がランク落ちの原因となるために、それらの基底面光源を合併して一つの基底面光源として扱う。観測可能な領域において、ある基底面光源の遮蔽状態が変化しないということは、その基底面光源の作るキャストシャドウが、オクルージョンのために観測できないことを意味する。したがって、この例では、領域 S3 が観測不可能な場合の推定が不安定になる。

これに対して提案手法は、球面上で定義された各周波数成分ごとに光源輝度分布を拘束しており、ある方向の光源が物体により、遮蔽されている、遮蔽されていないという両方の情報を必要としない。したがって、オクルージョンのために観測不可能な領域がある場合でも、どの観測点からも遮蔽のために見えない方向を除いて、原理的には、光源輝度分布を推定できるという利点があり、この実験においても、安定に光源を推定できている。

## 5 結び

本稿では、キャストシャドウを用いた光源推定について、球面調和関数展開に基づく手法を提案し、実効 Lambertian BRDF が高周波成分を持つことから、キャストシャドウを用いた光源推定が Lambertian BRDF を仮定した場合にもうまく働くことを指摘した。また、微少な面光源を基底として光源輝度分布を表現する従来手法には、オクルージョンおよびサンプリングの問題があったが、提案手法では、これらに対して安定に光源を推定できることを、簡単な数値実験により検証した。

## 参考文献

- [1] G. B. Arfken, and H. J. Weber, *Mathematical methods for physicists*, Harcourt/Academic Press, 2001.
- [2] R. Basri and D. Jacobs, “Lambertian reflectance and linear subspaces”, In *Proc. IEEE ICCV*, pp.383–390, 2001.
- [3] B. K. P. Horn, *Robot vision*, The MIT Press, Cambridge MA., 1986.
- [4] A. R. Marschner, and D. P. Greenberg, “Inverse lighting for photography”, In *Fifth Color Imaging Conference*, pp.262–265, 1997.
- [5] R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, “A signal-processing framework for inverse rendering”, In *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.117–128, 2001.
- [6] R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, “On the relationship between radiance and irradiance: determining the illumination from images of a convex Lambertian object”, *J. Opt. Soc. Am. A*, 18(10), pp.2448–2459, 2001.
- [7] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Illumination distribution from shadows”, In *Proc. IEEE CVPR*, pp.306–312, 1999.
- [8] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Illumination distribution from brightness in shadows: adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions”, In *Proc. IEEE ICCV*, pp.875–882, 1999.
- [9] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Stability issues in recovering illumination distribution from brightness in shadows”, In *Proc. IEEE CVPR*, pp.II-400–407, 2001.