

## 実物体のソフトシャドウにもとづく実照明環境の推定

佐藤いまり 佐藤 洋一 池内 克史

東京大学生産技術研究所 電子情報系  
〒 106 東京都港区六本木 7-22-1  
{imarik,ysato,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし: 室内など、一般の照明環境のもとでは、物体からおとされる影は明確な輪郭線を持たないソフトシャドウとして観察される。本報告では、このソフトシャドウ内の明るさ分布を利用することで、実照明の光源分布を推定する手法を提案する。本手法により推定される光源分布を利用することにより、実世界の画像中に仮想物体を違和感無く重ね込むことが可能となる。ここでは、提案する手法を実画像に適応し、本手法の有効性を示す。

キーワード: 複合現実感, 光源分布推定, コンピュータグラフィックス, 画像解析

## Estimation of illumination distribution by using soft shadows

Imari Sato Yoichi Sato Katsushi Ikeuchi

Institute of Industrial Science, University of Tokyo  
7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo JAPAN 106  
{imarik,ysato,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract:** This paper describes a new method for estimating an illumination distribution of a real scene. Shadows in a real scene are usually observed as soft shadows that do not have sharp edges. In the proposed method, illumination distribution of the real scene is estimated based on radiance distribution inside soft shadows cast by objects in the scene. Then the estimated illumination distribution is used for rendering virtual objects superimposed onto images of the real scene. We successfully tested the proposed method by using real images to demonstrate its effectiveness.

**Keyword:** computer graphics, computer vision, augmented reality, illumination distribution measurement

## 1 まえがき

電子的に構築された仮想世界の像（仮想物体）と実世界の像（実画像）を違和感なく融合させるための技術は複合現実感技術と呼ばれ、通信・交通・娯楽などの多岐にわたる分野において重要な役割を果たすものとして期待されている。

この複合現実感と呼ばれる融合世界を違和感なく構築するためには、以下にあげるような現実世界と仮想世界の3つの整合性を実現することが不可欠である [1][2]。

1. 幾何的整合性：正しい位置関係
2. 光学的整合性：違和感ない陰影
3. 時間的整合性：動きの一致

これらの整合性のうち、幾何学的整合性の実現に関しては、従来より、図学の理論やカメラキャリブレーションを利用した手法などが提案されてきた。一方、光学的整合性の実現に関しては、実世界の光源環境が一般に非常に複雑であることなどの理由から、今だ簡便な手法が存在しない。

宮間らは1枚の画像から図学の理論にもとづいて、視点の位置、光源情報の推定を行った。しかし、推定される光源は、画像内に存在する直接光源に限られ、画像外の光源や天井の照り返し等の相互反射による間接光源を表現することができなかった。また、光源の位置情報の入力等、手作業に頼るところが大きかった [3]。

Fourmierらは、コンピュータグラフィックスにおいて物体間の拡散相互反射を計算するために用いられるラジオシティ法にもとづいて、実世界内での光源分布を推定する手法を提案した。この手法は宮間らの手法に比べて、直接光源のみならず間接光源を表現できる点で有効であった。しかし、実世界の物体が拡散反射のみを持つと仮定している点や、入力画像に写る範囲外での光源からの影響を表現できないという点、ユーザーによる手作業が要求されるという点において限られたものであった [4]。

最近、佐藤らは、2枚の全方位画像により実空間を撮影することにより、画像内に写る光源のみならず、より広い範囲の直接光源と間接光源の分布を推定することに成功した。この手法は、屋内環境と屋外環境の両方で有効であることが実験的に確かめられている。しかし、魚眼レンズ付きカメラという特殊なカメラを必要とするという制限が存在した [5]。

本研究では、3次元形状が既知である物体を実世界に配置し、その際に生じる影を利用することにより、実世界の光源分布を推定する手法を提案する。先に述べたように、従来の手法では、画像内に見えている光源のみを扱うことが可能であったり、特殊な撮影装置を必要とした。それに対し、本報告において提案する手法は、通常のビデオカメラを用いて撮影された画像をもとに、広範囲の直接・間接光源を推定することが可能である点において優れている。また本報告では、本手法により推定される光源分布を用いることにより、実世界と仮想世界の光学的整合性を実現し、違和感なく仮想物体を実画像に重ね込むことが可能となることを示す。

本報告の構成は以下のとおりである。まず、2章で本研究で用いる入力画像の撮影系について説明する。次に、

3章で実物体の影を利用した光源分布推定方法について、4章で推定された光源分布による合成画像の生成方法について述べる。5章で実験結果を示し、6章で結ぶ。

## 2 入力画像の撮影系

本研究で用いた入力画像の撮影系の概念図を図1に示す。この撮影系を用いて、以下の3種類の入力画像を取り込む。

1. キャリブレーション画像 仮想物体を重ね込む平面上にキャリブレーションボードを配置したもの。3.2章で投影変換を求める際に用いる。
2. 入力画像 A：キャリブレーションボードを除き、3次元形状が既知の物体（以下、遮蔽物体）を配置させたもの。この推定用物体の3次元位置は既知とする。
3. 入力画像 B：入力画像 A から遮蔽物体を除いた画像。仮想物体を重ね込む先の画像として用いる。

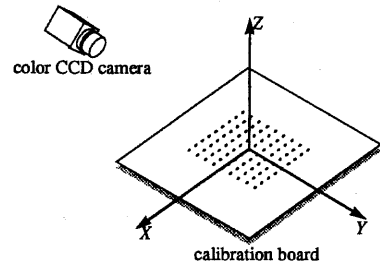


図1：画像撮影系：キャリブレーションボード上の格子点の数は81個（縦9×横9）、格子点の中心の間隔は20mmとする。

## 3 実光源環境の推定

室内など、一般の照明環境のもとでは、物体からおとされる影は明確な輪郭線を持たないソフトシャドウとして観察される。このようなソフトシャドウは、光源の一部が物体により遮蔽されることにより生じる（図2）。本章では、入力画像Aで観察されるソフトシャドウ内の明るさ分布と遮蔽物体による遮蔽関係を利用して、実世界の光源分布を推定する方法について述べる。

まず、画像の入力過程にもとづいて、画像上に観察される色と光源分布との関係式を導く（3.1章）。次に、入力画像A中の色情報を関係式に代入することにより、光源

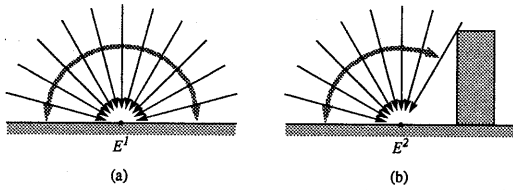


図 2: 光源からの照度 : (a) 遮蔽物体なし (b) 遮蔽物体あり

分布を未知数とする連立方程式を立てる。最後に、この連立方程式を解くことにより、光源分布を推定する(3.3章)。また、代入の際に必要な画像面の点と3次元空間内の点の対応づけを行うための投影変換を、3.2章で求める。

### 3.1 実光源の輝度分布と画像面の照度との関係

実空間内の点  $A$  が画像上の点  $B$  に投影されるとすると、光源からの光は、以下の2つの過程を経て、画像面上の点  $B$  へと到達し、入力画像において点  $B$  の明るさとして観察される。これを図3に示す。

1. 実光源分布から点  $A$  へ (実光源の輝度分布 → 点  $A$  における照度)
2. 点  $A$  から点  $B$  へ (点  $A$  における輝度 → 点  $B$  における照度)

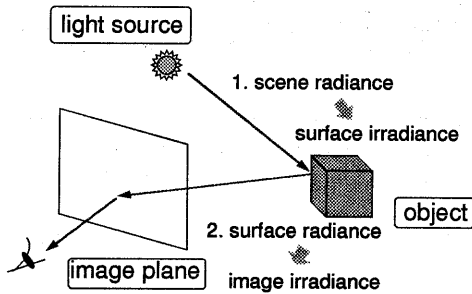


図 3: 画像入力過程

本章では、この明るさの入力過程にもとづいて、光源分布と画像の明るさの関係式を求める。

室内などの複雑な光源環境下では、蛍光灯などの直接光源のみならず、壁からの反射なども間接光源として考慮する必要がある。そのため本研究では、図4のような面光源を考え、全方向からの光源の寄与分をモデル式に加える。

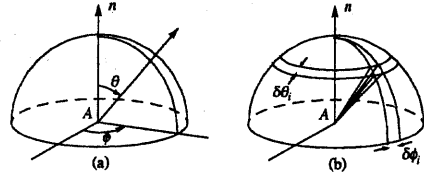


図 4: (a) 極座標による光源方向 (b) 半球面上の微少面素

中心点  $A$  から、 $(\theta_i, \phi_i)$  の方向に存在し、微少角度  $\delta\theta$  と  $\delta\phi$  に対応する微少領域を考えると、点  $A$  からこの微少領域を望む微少立体角は  $\delta\omega = \sin\theta_i \delta\theta_i \delta\phi_i$  となる。また、 $(\theta_i, \phi_i)$  の方向からの単位立体角あたりの輝度を  $L(\theta_i, \phi_i)$  とすると、上記の微少領域からの輝度は、 $L(\theta_i, \phi_i) \sin\theta_i \delta\theta_i \delta\phi_i$  となる。したがって、面光源全体からの点  $A$  への照度  $E^1$  は、以下の式により表現される [6]。

$$E_m^1 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_m(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

$m = R, G, B$

ここで、 $\cos\theta_i$  の項は、 $(\theta_i, \phi_i)$  方向から見たときの表面の投影ひずみの影響を表す。

式(1)で与えられる照度を実際に計算するためには、2重積分の項を離散的な積分で近似する必要がある。本手法では、geodesic dome の頂点方向によるサンプリングを行うことにより、この2重積分を近似する。geodesic dome は、その頂点が球面上で等密度で分布するという性質を持つため、 $n$  個の頂点を利用することにより、等立体角 ( $\delta\omega = \frac{2\pi}{n}$ ) での均等なサンプリングを行うことができる。また、頂点数  $n$  は可変なので、頂点数を変えることで、密なサンプリングから粗なサンプリングまで行うことができる。

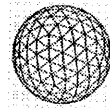


図 5: geodesic dome

このようなサンプリングの際の等立体角  $\delta\omega$  を光源輝度  $L(\theta_i, \phi_i)$  に含めるとすると、照度  $E^1$  を与える式(1)は以下のように求まる。

$$E_m^1 = \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \quad (2)$$

m = R, G, B

更に、入力画像 A を撮影する際に配置する遮蔽物体により、実光源分布の一部が遮蔽される点を考慮することにより、遮蔽を考慮した場合の点 A における照度  $E^2$  は以下のように得られる。

$$E_m^2 = \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i S_i \quad (3)$$

m = R, G, B

ここで、実光源輝度  $L(\theta_i, \phi_i)$  が遮蔽物体により遮蔽される場合は、 $S_i = 0$ 、そうでない場合は、 $S_i = 1$  とする。

面光源全体からの点 A への照度  $E$  は、点 A において反射され入力画像面上の点 B における照度として観測される。本手法では、実物体表面における反射は拡散反射であり Lambertian モデルに従うと仮定する。これにより、点 B の照度  $P$  を求める反射モデル式 (4) を得る。

$$P_m = K_{d,m} \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i S_i \quad (4)$$

m = R, G, B

ここで、 $K_{d,m}$  は拡散反射の色と強度を示す定数を表す。

### 3.2 画像面上の点 B と実空間内の点 A との間の投影変換

反射モデル式 (4) のうち、遮蔽物体による遮蔽テスト ( $S_i$ ) を実際に入力画像 A より計算するためには、画像面点 B に対応する 3 次元空間内点 A を求めることが必要である。本章では、Tsai により提案されたカメラキャリブレーション手法 [9] を用いて、画像面 2 次元座標系から実世界 3 次元空間への投影変換を求め、点 B と点 A の対応づけを行う。

Tsai のキャリブレーション手法は、3 次元空間内の点の 3 次元座標と、その点の画像面内のピクセル座標の対を用いることで、カメラパラメータを推定する。本研究では、キャリブレーションボード上に配置された 81 個の格子点の画像面 2 次元座標と実世界 3 次元座標を用いて、カメラパラメータを推定する。

推定されたカメラパラメータを用いることにより、実世界 3 次元空間から画像面への投影変換、またその逆変換 (すなわち、2 次元画像面上の点から、投影中心とその点を通る実世界 3 次元空間内の直線への変換) を求めることができる。

ここで、入力画像 A とキャリブレーション画像の関係により、画像面点 B に対応する 3 次元空間内の点 A は、

少なくともキャリブレーションボードと同じ  $z = 0$  平面上に存在することが分かっている。したがって、求めた 2 次元画像面上の点 B から実世界 3 次元空間への直線と  $z=0$  平面との交点として、点 A を求めることができる。

### 3.3 画像面の照度からの光源分布の推定

本章では、3.1 章の反射モデル式 (4) にもとづいて、入力画像 A より実光源環境の輝度分布  $L(\theta_i, \phi_i)$  を推定する方法を説明する。

3.1 章で述べたように、入力画像 A の各画素において、 $n$  個の光源輝度値  $L(\theta_i, \phi_i)$  を未知数とする 1 次方程式 (4) を得る。よって、 $m$  個の画素を考慮することにより、光源輝度値  $L(\theta_i, \phi_i)$  は  $m$  個の方程式で関係づけられることになる。よって、 $m > n$  とすれば、この連立 1 次方程式を解くことにより、 $n$  個の光源輝度値  $L(\theta_i, \phi_i)$  を求めることができる。

ここで気を付けなければならないのは、画像として観察される実空間内の平面の明るさは光源輝度  $L_m$  と平面の物体表面反射率  $K_{R,i}$  の積として表されるという点である。そのため、光源輝度と物体表面の反射率がどのような割合で影響して、画像の明るさとして観察されているのかということは決定できない。

そこで、平面の物体表面反射率が既知の場合と未知の場合の 2 通りを考え、以下にそれぞれの場合における光源輝度分布の推定方法を述べることにする。

#### 3.3.1 物体表面反射率が既知の場合の解

本手法では、光源輝度  $L_m(\theta_i, \phi_i)$  の red, green, blue の 3 バンドを各色独立で推定する。各バンドの推定方法は同じであるので、以下では、 $L_m(\theta_i, \phi_i)$  の red バンドのみを取りあげて説明する。

入力画像 A が  $m$  個の画素を持つとすると、式 (4) より、光源輝度  $L_R(\theta_i, \phi_i)$  を以下のような連立方程式として、 $m$  個の方程式で関係づけることができる。

$$\begin{aligned} a_{11} L_{R,1} + a_{12} L_{R,2} + a_{13} L_{R,3} + \dots + a_{1n} L_{R,n} &= P_{R,1} \\ a_{21} L_{R,1} + a_{22} L_{R,2} + a_{23} L_{R,3} + \dots + a_{2n} L_{R,n} &= P_{R,2} \\ a_{31} L_{R,1} + a_{32} L_{R,2} + a_{33} L_{R,3} + \dots + a_{3n} L_{R,n} &= P_{R,3} \\ &\dots \\ a_{m1} L_{R,1} + a_{m2} L_{R,2} + a_{m3} L_{R,3} + \dots + a_{mn} L_{R,n} &= P_{R,m} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、未知数  $L_{R,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は光源輝度  $L_R(\theta_i, \phi_i)$  の分布、右辺数  $P_{R,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は各画素の red バンドの明るさ、係数  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ) は  $K_{R,i} \cos\theta_i S_i$  を表す。ただし、物  $K_{R,i}$  は物体表面反射率をあらわす拡散反射パラメータ、 $S_i$  は遮蔽物体による各光源  $L_i$  の遮蔽テスト、 $\cos\theta_i$  は各光源の投影歪みである。ここで、 $S_i$  と  $\cos\theta_i$  は計算することができ、 $K_{R,i}$  に関しては、物体表面反射率は既知の場合を考えているので、あらかじめ与えられるものとする。

式 (5) は行列を用いて、以下のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{M1} & a_{M2} & a_{M3} & \cdots & a_{Mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{R,1} \\ L_{R,2} \\ L_{R,3} \\ \vdots \\ L_{R,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{R,1} \\ P_{R,2} \\ P_{R,3} \\ \vdots \\ P_{R,n} \end{bmatrix}$$

$$A \cdot L = P \quad (6)$$

この連立1次方程式は、未知数より方程式が多い優決定の連立1次方程式である。本章では、特異値分解により、優決定の連立1次方程式の最小2乗解を求める。

まず、特異値分解を用いて、式 (6)、行列  $A$  を以下の3つの行列の積の形に分解する [11]。

- $m \times n$  の列直行列  $U$
- $m \times n$  の対角行列  $W$  (対角成分は非負)
- $n \times n$  の直行列  $V$  の転置  $V^T$

$$\begin{bmatrix} A \\ m \times n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ m \times m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 & & & \\ & w_2 & & \\ & & \cdots & \\ & & & w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^T \\ n \times n \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $W$  が対角行列であることに注目すると、この  $W$  に左側より掛け合わせる行列  $U$  の場合、 $m$  行  $n$  列だけが有効であり、他の要素は結果になんら影響を与えない。そこで、 $U$  と  $W$  のうち、計算に有効な要素、 $\bar{U}$  (行列  $U$  の  $m$  行  $n$  列)、 $\bar{W}$  (行列  $W$  の  $n$  行  $n$  列と行列  $V^T$ ) のみを用いて、 $A$  を表すと、

$$\begin{bmatrix} A \\ m \times n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U} \\ m \times n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{W} \\ n \times n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^T \\ n \times n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (6) に式 (8) を代入すると、

$$\bar{U} \cdot \bar{W} \cdot V^T \cdot L = P \quad (9)$$

ここで、 $\bar{U}$ 、 $V^T$  は直行列なので、 $\bar{U}^T \cdot \bar{U} = I$ 、 $V \cdot V^T = I$  であり、また、対角行列  $W$  の逆行列  $W^{-1}$  は対角要素

$\bar{w}_j$  を逆数にすることにより得られる。したがって、以下のとおり光源輝度分布を表す  $L$  を求めることができる。

$$L = V \cdot \bar{W}^{-1} \cdot \bar{U}^T \cdot P \quad (10)$$

### 3.3.2 物体表面反射率が未知の場合の解

一方、遮蔽物体を配置する平面の物体表面反射率  $K_d$  が未知の場合には、式 (6) の行列  $A$  が未知数を含むことになり、このままでは実光源の輝度分布の解は求めることができない。

そこで、遮蔽物体を配置せずに撮影した入力画像  $B$  を用いることにより、以下に述べるような解を求めていくことにする。

入力画像  $B$  においては、遮蔽物体が無いために反射モデル式 (4) の遮蔽テスト  $S_i$  は必ず  $S_i = 1.0$  となる。よって、入力画像  $B$  での画素の明るさ  $P'$  は以下のようになる。

$$P'_m = K_{d,m} \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (11)$$

式 (4) を式 (11) で割ることにより、拡散反射パラメタ  $K_d$  をキャンセルした式 (12) を得る。

$$\begin{aligned} \frac{P_m}{P'_m} &= \frac{K_{d,m} \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i S_i}{K_{d,m} \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i} \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{L_m(\theta_i, \phi_i)}{\sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i} \cos \theta_i S_i \quad (12) \end{aligned}$$

$\frac{L_m(\theta_i, \phi_i)}{\sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i}$  を推定する未知数  $L_i (i = 1, 2, \dots, n)$  として、 $\frac{P_i}{P'_i} (i = 1, 2, \dots, n)$  を右辺数  $P_i$ 、 $\cos \theta_i S_i$  を係数  $a_{ij} (i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m)$  とすると、式 (6) と同様の式を得ることができ、3.3.1 章と同様にして未知数  $L_i$  を求めることができる。

この未知数  $L_i$  の上辺  $L_m(\theta_i, \phi_i)$  は各光源の輝度を表し、下辺  $\sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i$  は全光源の照度の総和  $E^1$  (図 2.a) を表している。よって、物体表面反射率が未知の場合には、実光源の輝度分布の代わり、 $\frac{L_m(\theta_i, \phi_i)}{\text{照度 } E^1}$  という比のみを求めることが可能である。したがってこのままでは、実光源の輝度分布の red, green, blue 各バンド間の相対的な強さを決定することができない。そのため本手法では、 $\sum_{i=0}^n L_{R,i} = \sum_{i=0}^n L_{G,i} = \sum_{i=0}^n L_{B,i} = \text{定数 } E_{sum}$ 、つまり各バンドにおける照度の総和が等しいと仮定することにする。このことにより、例えば赤色の光源のみが存在するような場合など、照度の総和が各色バンドで異なるような光源分布には本手法を適用することはできない。

## 4 実画像への仮想物体の重ね込み

3.3章で推定した実光源の輝度分布を用いることにより、入力画像Bに仮想物体を違和感なく重ね込むことが可能となる。以下にその方法について述べることにする。

### 4.1 実物体表面または仮想物体表面の判定

この重ね込みは、入力画像Bの画素単位の処理により行われるため、入力画像Bの各画素が仮想物体表面を見ているのか、実世界の物体表面(以下、実物体表面)を見ているのかを判断する必要がある。

まず、3.2章で求めた実世界3次元空間と画像面との投影変換を用いて画像投影中心からピクセルを通る視線を求める。次に、仮想物体表面とその視線との交差判定により、視線が仮想物体表面に当たるかどうかの判定を行う。視線が仮想物体表面上の点に当たる場合には、仮想物体表面を見ているとし、それ以外の場合には実物体表面を見ているとする。ここで、仮想物体は常にカメラの視点(投影中心)と実物体の間に存在すると仮定して、視線の判定を行う。すなわち、ここでは仮想物体の前に実物体が存在し、その実物体により仮想物体の一部の見えを遮ることはないとする。

### 4.2 仮想物体表面上の色の計算

入力画像Bの画素が仮想物体表面を見ている場合には、推定された光源輝度分布を用いて、仮想物体表面上で観測されるべき色を計算し、その画素の明るさとする。

本研究では、仮想物体表面上の色を計算するための反射モデルとして、Torrance-Sparrowモデル[7]を簡略化したものを用いる。このモデルにもとづき、3章で求めた全方向の光源輝度からの寄与分を考慮に入れると、画像面の明るさを求める反射モデル式を得る。

$$I_m = K_{d,m} \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i + K_{s,m} \sum_{i=0}^n L_m(\theta_i, \phi_i) \frac{1}{\cos\theta_r} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

$$m = R, G, B$$

ここで、 $\theta_i$ は仮想物体表面上の点における法線方向と各点光源への方向とがなす角度、 $\theta_r$ は仮想物体表面上の点における法線方向と視線方向とがなす角度、 $K_{d,m}$ と $K_{s,m}$ はそれぞれ拡散反射および鏡面反射成分の色と強度を示す定数、 $\alpha$ は光源方向と視線方向の2等分方向と法線方向とがなす角度、 $\sigma$ はTorrance-Sparrowモデルにおける微少面素の傾斜角度の標準偏差となる。この $\sigma$ は物体表面の粗さを表している。

### 4.3 仮想物体からの影の計算

入力画像Bの画素が実物体表面を見ている場合には、実世界に仮想物体を配置したことにより生じるべき変化を加える。すなわち、実物体表面上に仮想物体からの影が生成される場合には、その影に応じて、入力画像Bにおける実物体表面の明るさを変更する。

まず最初に、入力画像Bの画素に対応する実空間内の点において、仮想物体が無い場合には、光源輝度分布全体からの影響がどれだけの照度 $E^1$ となるか計算する(式(2))。

次に、仮想物体が存在する場合の光源輝度分布からの照度 $E^2$ (図2.b)を求める。仮想物体を配置した場合の照度 $E_m^2$ は、式(3)に3章で推定した光源輝度 $L_m(\theta_i, \phi_i)$ を代入することにより、仮想物体により遮蔽されない光源輝度 $L_m(\theta_i, \phi_i)$ の総和として求めることができる。この場合、式(3)における遮蔽テスト $S_i$ は、仮想物体による各光源輝度の遮蔽を表す。

最後に、入力画像Bで観察された実物体表面上の色と、 $E^1$ 、 $E^2$ の比を利用することにより、影を考慮した結果の物体表面上の点における色を計算する。

入力画像B内での実物体表面上の点において観察される色を $P_m$ とすると、この色は光源分布全体からの照度が $E_m^1$ の時に観察される色である。一方、実世界に仮想物体を融合させた合成画像において、その実物体上の点で観察されるべき色を $P'_m$ とすると、 $P'_m$ は光源分布全体からの照度が $E_m^2$ の時に観察される色である。そこで、 $E_m^1$ と $E_m^2$ の比を利用して、 $P'_m$ は以下のように求められる。

$$P'_m = P_m \frac{E_m^2}{E_m^1} \quad m = R, G, B \quad (14)$$

## 5 実験結果

本研究では、実画像のソフトシャドウ内の明るさ分布を利用することで、実際の照明環境を推定する手法を提案した。また、本手法により推定される照明環境を利用することにより、実世界画像中に仮想物体を違和感なく重ね込む方法について述べた。本章では、提案する手法を実画像に適用し、手法の有効性を示した例を紹介する。

今回の実験では、研究室内で撮影された(a)入力画像A、(b)入力画像B、(c)キャリブレーション画像を用いて、入力画像Bに仮想物体を重ね込む処理を行った。まず、(a)入力画像Aと(c)キャリブレーション画像、の3枚の画像を用いて、以下のように光源分布を推定する。

- (c)キャリブレーション画像を用いて、カメラキャリブレーションを行い、画像面から3次元空間への投影変換を求める。
- 入力画像Aの色情報より、光源輝度 $L_i (i = 1, 2, \dots, n)$ を未知数とする連立1次方程式を導く。この際に必要な画像面の点と3次元空間内の対応付けを1章で求めた投影変換により行う。
- 連立1次方程式を解くことにより、光源輝度 $L_i$ を求める。

次に、推定された光源輝度  $L_i (i = 1, 2, \dots, n)$  を用いて、入力画像 B の各画素単位で、以下のとおり仮想物体を入力画像 B に重ね込む。

1. 投影変換を用いて、各画素が仮想物体表面を見ているのか実物体表面を見ているのか判断する。
2. 仮想物体を見ている場合、仮想物体表面の色を推定された光源分布を用いて計算する。
3. 実物体表面見ている場合、仮想物体により生じた影を推定された光源分布を用いて実物体上に生成する。

以下、実物体表面反射率が既知の場合と未知の場合とにおいて、それぞれの合成結果を示す。

### 5.1 物体表面反射率が既知の場合

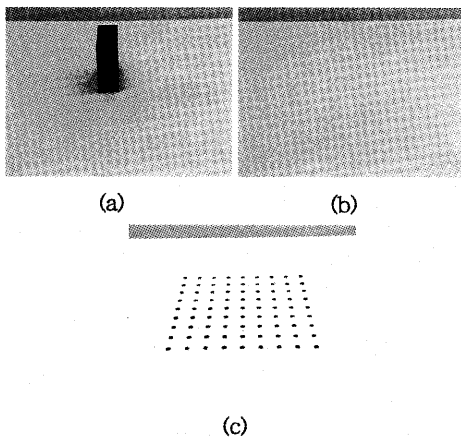


図 6: 入力画像: (a) 入力画像 A (b) 入力画像 B (c) キャリブレーション画像

合成結果を図 7 に示す。この実験では、推定された光源を評価するため、遮蔽物体と同じ形の仮想物体を入力画像 B に重ね込んだ。また、推定に用いられた geodesic dome の頂点数を光源数として合成画像の下に示す。

ここでは、入力画像 A 内の遮蔽物体によりおとされた影と、合成画像内の仮想物体によりおとされた影を比較することにより本手法により推定された光源を評価する。

合成結果より、(a), (b), (c) と光源数が増えるにつれ、合成画像の影が入力画像 A の影に近づいていることが分かる。このことは、光源数が増すにつれ光源推定の精度が上がっていることを示している。

また、遮蔽物体とは形の異なる仮想物体を重ね込んだ例を (d) に示す。例 (d) においても、実世界の光源を合成画像生成に用いているため、仮想物体を違和感なく実画像に重ね込むことができた。

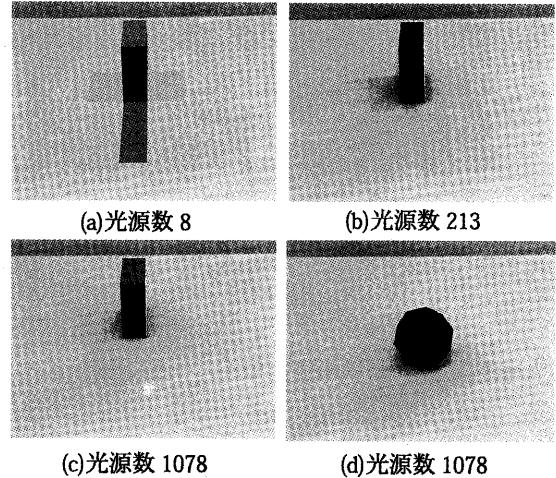


図 7: 合成結果

### 5.2 物体表面反射率が未知の場合

この例では、物体表面反射率が未知であるような場合に本手法を適応している。その結果得られた合成画像を図 9 に示す。

物体表面反射率が既知の場合と同様に、(a), (b), (c) と光源数が増すにつれ、光源推定の精度が上がっていることが分かる。また、他物体の例 (f) においても、違和感なく重ね込むことができた。このような自然な重ね込みは、実世界の光源を合成画像に利用しない限り不可能である。

## 6 結び

本論では、実世界に配置した物体から生じる影を利用して実世界の光源状況を推定する手法を提案し、提案する手法を実画像に適応することで、本手法の有効性を示した。

また、本手法により推定された光源分布を合成画像生成に用いることにより、従来より困難であった実世界と仮想世界の光源条件の一致が可能となり、仮想物体を違和感のない明るさ・陰影で実画像に重ね込むことが可能となった。

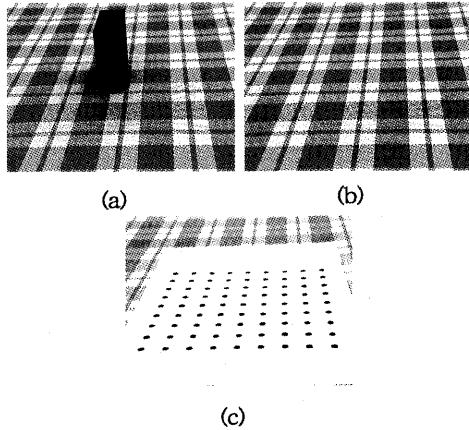


図 8: 入力画像 : (a) 入力画像 A (b) 入力画像 B (c) キャリブレーション画像

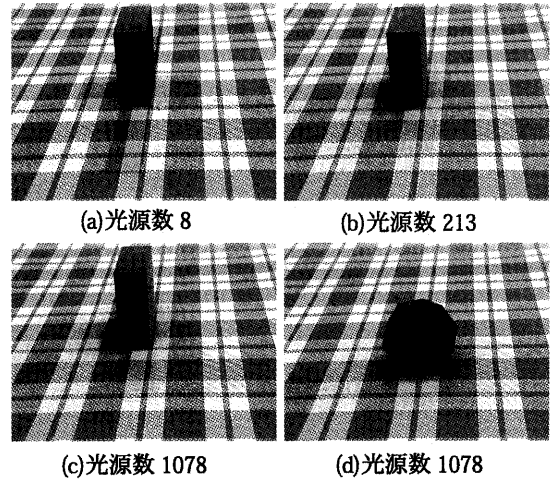


図 9: 合成結果

## 参考文献

- [1] 太田友一, “複合現実感技術への期待と課題,” 第 1 回 VR 学会複合現実感技術研究会 '97 資料
- [2] 田村秀之, “複合現実感研究プロジェクト,” 電子情報通信学会 1997 年総合大会, システムサイエティ特別企画シンポジウム「人工現実感から複合現実感へ」ISS-1-4
- [3] 宮間美奈子, 小澤庄次, 近藤邦雄, “撮影条件の推定法を用いた実写画像と CG 画像の合成,” 第 2 回知能情報メディアシンポジウム, pp.113-118, 1996.
- [4] A. Fournier, A. Gunawan and C. Romanzin, “Common Illumination between Real and Computer Generated Scenes,” *Proceedings of Graphics Interface '93*, pp.254-262, 1993.
- [5] 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史, “光学的整合性を考慮した実画像への仮想物体の重ね込み” 第 3 回知能情報メディアシンポジウム, pp.23-32, 1997.
- [6] B. K. P. Horn, *Robot Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [7] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surface,” *Journal of Optical Society of America*, vol.57, pp.1105-1114, 1967.
- [8] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, “Surface reflection: physical and geometrical perspectives,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 7, pp. 611-634, 1991.
- [9] R. Tsai, “A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses,” *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [10] H. C. Lee, “Illuminant color from shading,” *Proceedings of Perceiving Measuring and Using Color*, SPIE Proceedings Vol. 1250, pp. 222-235, 1990.
- [11] 大野豊, 磯田和男, 数値計算ハンドブック, オーム社, 東京都, 1990.