

物体の陰影に基づく光源環境の推定

佐藤 いまり[†] 佐藤 洋一^{††} 池内 克史^{†††}

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。提案される手法では、まず実世界の光源環境を空間的に均等なサンプリング方向の光源輝度の総和として近似する。次に光源輝度分布と画面上に観察されるシャドウの明るさの関係式に基づき、シャドウ内の各画素より各光源サンプリング方向の光源輝度が未知数となるような方程式を導く。最後にシャドウ内の画素より導かれた連立方程式を解くことにより、各サンプリング方向の光源輝度を推定する。このようにして推定された光源輝度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。

Illumination Distribution from Shadows

IMARI SATO,[†] YOICHI SATO^{††} and KATSUSHI IKEUCHI^{†††}

In this paper, we propose a new method for estimating the illumination distribution of a real scene from image brightness observed on a real object surface in that scene. More specifically, we recover the illumination distribution of the scene from a radiance distribution inside shadows cast by an object of known shape onto another object surface of known shape and reflectance. The approach employed in this study is as follows. The illumination distribution of a scene is first approximated by discrete sampling of an extended light source; whole distribution is represented as a set of point sources equally distributed in the scene. Then this approximation leads each image pixel inside shadows to provide a linear equation with unknown radiance of those sources. Finally, unknown radiance of each source is solved from the obtained set of equations. By using the occlusion information of the incoming light, we are able to reliably estimate the illumination distribution of a real scene, even in a complex illumination environment. The estimated illumination distribution is then used for rendering virtual objects superimposed onto images of the real scene.

1. はじめに

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)を融合させる複合現実感¹⁾は、現実・仮想の2つの世界の事象を自由に操ることができる融合の世界として注目を集めている。また、すべてコンピュータグラフィックスで構成される仮想現実感に対し、合成画像の一部に実画像を利用する複合現実感²⁾は、より現実感高い画像が生成できるという点においても、その技術応用に期待が高まっている。

この複合現実感において、現実と仮想の2つの世界を違和感のなく融合させるためには、現実世界と仮想世界の間の3つの整合性を実現することが重要である^{1),3)}：

1. 正しい位置関係のための幾何学的整合性
2. 違和感のない陰影を実現するための光学的整合性
3. 動きを一致させるための時間的整合性

3つの整合性のうち、幾何学的整合性の実現に関しては、画像中のマーカーなどの特徴点を利用した手法や、磁気センサ、ジャイロなどを用いた手法などが提案され、カメラの位置・姿勢を実時間で計測し合成処理を行うなど、時間的整合性と幾何学的整合性の両方を実現する手法も提案されてきている^{5)~7),14),15)}。

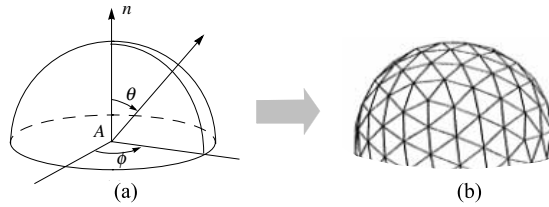
しかしながら、光学的整合性の実現に関しては、実世界の光源環境が一般に非常に複雑であることなどの理由から、過去に開発された手法では、入力画像中に観察される光源のみ考慮にいれることができたり、手

[†] 東京大学大学院学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

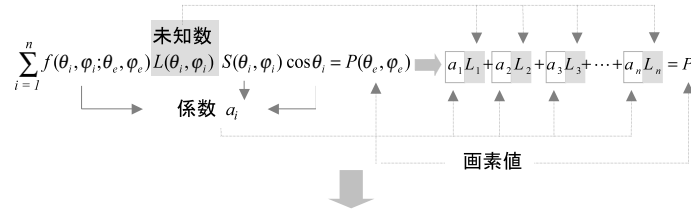
^{††} 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

^{†††} 東京大学大学院情報学環
Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

1. 光源環境を空間的に均等な光源サンプリング方向により近似する



2. シャドウ内の各画素の明るさより、各サンプリング方向の光源輝度を未知数とする1次方程式を導く



3. シャドウ内の画素より導かれた連立1次方程式を解く

$$\begin{cases}
 a_{11}L_1 + a_{12}L_2 + a_{13}L_3 + \dots + a_{1n}L_n = P_1 \\
 a_{21}L_1 + a_{22}L_2 + a_{23}L_3 + \dots + a_{2n}L_n = P_2 \\
 a_{31}L_1 + a_{32}L_2 + a_{33}L_3 + \dots + a_{3n}L_n = P_3 \\
 \vdots \\
 a_{m1}L_1 + a_{m2}L_2 + a_{m3}L_3 + \dots + a_{mn}L_n = P_m
 \end{cases}
 \left. \begin{array}{l} \text{実光源環境を近似する光源輝度分布} \\ L_i (1, 2, \dots, n) \text{ を推定する} \end{array} \right\}$$

図1 提案手法における光源環境推定の手順

Fig. 1 Basic steps of the proposed approach.

作業により光源の位置を入力する必要があるなど、なかなか簡便なものが存在しなかった^{4),9),10)}。

最近、Sato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手法を開発した。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¹³⁾。また、Devebecにより、球面状の鏡上における反射光を測定することにより、実空間の光源分布を推定する方法も発表された⁸⁾。Satoらの手法とDevebecの手法では、従来の光源推定手法とは異なり、実環境内の光源輝度分布を広範囲にわたり直接的に測定できるという点が特徴となっている。

しかしながら、これらの手法は、魚眼レンズ付きカメラもしくは球面状の鏡という特殊なデバイスを必要とするため、過去の映像など、新たに機材を持ち込むことが不可能な場合には適用できないという制限が存在した。

本報告では、3次元形状が既知である物体により生じた影を利用することにより実世界の光源環境を間接的に推定する手法を提案する。一般に、物体からおとされる影は光源（あるいは光源の一部）が物体により

遮蔽されることにより生じ、そのシーンの光源環境と非常に密接な関係を持っている。本研究では、光源の遮蔽と影の生成の關係に注目し、実物体による光源の遮蔽とシャドウ内の明るさ分布の關係を解析することにより、実世界の複雑な光源分布を推定する手法を提案する。

従来の手法では、画像内に観測され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のに対し、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。

提案される手法では、以下のとおり実世界の光源分布を推定する（図1に概念図を示す）。

- (1) 実世界の光源環境を空間的に均等なサンプリング方向の光源輝度の総和として近似する。
- (2) 光源輝度分布と画像面に観察されるシャドウの明るさの關係式に基づき、シャドウ内の各画素より各光源サンプリング方向の光源輝度が未知数となるような方程式を導く。
- (3) シャドウ内の画素より導かれた連立方程式を解くことにより、各サンプリング方向の光源輝度

を推定する．

また、本報告では、提案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章で画像上に観察される実物体の影と光源分布との関係式を導く．次に、3章で、得られた関係式と実物体の影を利用して光源分布を推定する方法について述べる．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説明する．5章で実験結果を示し、6章で結ぶ．以下の章では、影を投影する物体を遮蔽物体、遮蔽物体の影が観察される画像をシャドウ画像と呼ぶことにする．

2. 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、光源からの光は実空間内の点 A で反射され画像面上の点 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．本章では、この明るさの入力過程に基づいて、光源分布と画像の明るさの関係式を求める．

2.1 実光源の輝度分布 実空間点 A における照度

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．ここでは、全方向からの光源の寄与分をモデル式に加えるため、図 1 (1) (a) のような面光源を考え、この面光源と画像面の明るさとの関係式を導いていく．

図の中心点 A から、 (θ_i, ϕ_i) の方向に存在し、微小角度 $\delta\theta$ と $\delta\phi$ に対応する微小領域を考えると、点 A からこの微小領域を望む微小立体角は $\delta\omega = \sin\theta_i \delta\theta_i \delta\phi_i$ となる．また、 (θ_i, ϕ_i) の方向からの単位立体角あたりの輝度を $L_0(\theta_i, \phi_i)$ とすると、上記の微小領域からの輝度は、 $L_0(\theta_i, \phi_i) \sin\theta_i \delta\theta_i \delta\phi_i$ 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¹¹⁾．

$$E_1 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

ここで、 $\cos\theta_i$ の項は、微小領域からの輝度の入射角度による強度の変化を表している．

さらに、シャドウ画像においては、実光源分布の一部が遮蔽物体により遮蔽される．この遮蔽物体と光源との遮蔽関係を式 (1) に加え、遮蔽を考慮した場合の点 A における照度 E_2 を求める．

$$E_2 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (2)$$

$S(\theta_i, \phi_i)$ は光源輝度の遮蔽関係を表し、実光源輝度 $L_0(\theta_i, \phi_i)$ が遮蔽物体により遮蔽される場合は、 $S(\theta_i, \phi_i) = 0$ 、そうでない場合は、 $S(\theta_i, \phi_i) = 1$ とする．

ここで注意しなければならないことは、式 (2) で導かれる光源分布と点 A における照度との関係式では、面光源からの一次反射のみを考慮に置いており、遮蔽物体と点 A の間の相互反射の影響はないと仮定されていることである．そのため、遮蔽物体からの相互反射が点 A の照度に大きな影響を与える場合には、提案手法を用いて安定に光源分布を推定することはできない．このような場合にも安定に光源分布を推定するためには、遮蔽物体からの相互反射をも考慮に置いて光源分布と物体表面の明るさとの関係式を導き、その関係式に基づいて光源分布を推定する必要がある．遮蔽物体との相互反射の影響を考慮にいたした光源分布の推定方法については、提案手法の今後の拡張の 1 つとして考えていきたい．

2.2 実空間点 A における照度 画像面点 B における照度

面光源全体から点 A への入射光は、点 A においてある輝度を持つ光として反射され、入力画像面上の点 B における照度として観測される．ここでは、双方向性反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function: BRDF) $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ を用いて、点 B の照度を求める．

BRDF は、入射方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光照度と視線方向 (θ_e, ϕ_e) への反射光輝度の比率を示す関数である．よって、面光源のすべての方向にわたって、BRDF と放射照度の積を積分することにより、視線方向 (θ_e, ϕ_e) に対応する画像面の照度を求める式を得る．

$$P(\theta_e, \phi_e) = k \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (3)$$

ここで、 k は実空間点 A における反射光輝度と画像面点 B における照度の比を表わす定数とする．この係数 k のため、本報告で提案する手法では光源輝度分布を係数 k を含むところまで求めることができる．係数 k を求めるためには、光学的なキャリブレーション

この定数は点 A の反射光の輝度と画像面照度との比例関係を表す定数とデジタル処理の際のスケージングの要素を含む．

ンを行い、画素値と輝度の物理単位 (watt/m²) との関係を求める必要がある。

3. 画像面の照度からの光源分布の推定

本章では、光源分布と画像の明るさの関係式に基づいて、シャドウ画像の明るさ分布より各サンプリング方向の光源輝度を推定する。

まず、式 (3) で与えられる 2 重積分の項を離散的な積分で近似する。本手法では、geodesic dome (図 1 (1) (b)) の頂点方向を用いて離散的なサンプリングを行う。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 ($\omega = \frac{2\pi}{n}$) 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。

このような離散的近似により、式 (3) より、照度 $P(\theta_e, \phi_e)$ を与える式を得る。

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (4)$$

ここで、 $L(\theta_i, \phi_i)$ は、 (θ_i, ϕ_i) 方向から入射される立体角 ($\omega = \frac{2\pi}{n}$) あたりの光源輝度とし、また、上記の定数 k を含むものとする。

式 (4) では、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と平面の物体表面反射率の積として表されている。以下では、平面の物体表面反射率が既知の場合 (3.1, 3.2 節) と未知の場合 (3.3 節) の 2 通りを考え、それぞれの場合における光源輝度分布の推定方法を説明する。

また、本手法では、光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ 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、以下の処理は各バンド単位で行われるものとする。

3.1 物体表面反射率が既知の場合の解：Lambertian モデル

まず、実物体表面における反射は拡散反射のみであり Lambertian モデルに従う場合を考える。

Lambertian 面では、式 (4) 内の双方向性反射率分布関数、 $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ は定数となるため、 $P(\theta_e, \phi_e)$ を求める式を以下のとおり得る。

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n K_d L(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (5)$$

ここで、 K_d は拡散反射の色と強度を示す定数を表す。

式 (5) より、シャドウ画像の各画素に対し、以下の方程式を得る (図 1 (2) 参照)。

$$a_1 L_1 + a_2 L_2 + a_3 L_3 + \dots + a_n L_n = P \quad (6)$$

未知数 L_i は光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ 、右辺数 P は画素の明るさ $P(\theta_i, \phi_i)$ 、係数 a_i は $K_d S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i$ を表す。ここで、 $S(\theta_i, \phi_i)$ 、 $\cos \theta_i$ は、幾何的な情報から計算することができる。また、 K_d に関してもあらかじめ与えられるものとする。

よって、シャドウ画像から m 個の画素を選定するとすると、未知数である光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ を m 個の方程式で関係づけることができる。

$$\begin{aligned} a_{11} L_1 + a_{12} L_2 + a_{13} L_3 + \dots + a_{1n} L_n &= P_1 \\ a_{21} L_1 + a_{22} L_2 + a_{23} L_3 + \dots + a_{2n} L_n &= P_2 \\ a_{31} L_1 + a_{32} L_2 + a_{33} L_3 + \dots + a_{3n} L_n &= P_3 \\ &\dots \\ a_{m1} L_1 + a_{m2} L_2 + a_{m3} L_3 + \dots + a_{mn} L_n &= P_m \end{aligned} \quad (7)$$

したがって、連立方程式を解くのに十分な数のピクセル ($m \geq n$) を選定することにより、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 次方程式として解くことができる²⁾。このようにして、未知数である n 個の光源輝度値 $L(\theta_i, \phi_i)$ を推定することにより、実環境における光源輝度分布を n サンプリング方向の光源輝度として近似することができる。

3.2 物体表面反射率が既知の場合の解：Non-Lambertian モデル

前章における議論のように、本手法では、シャドウ内ピクセルより得た光源輝度を未知数とした連立 1 次方程式を解くことにより光源分布を推定する。よって、そのような 1 次方程式を導くことができれば、どのような反射モデルでも本手法に適用することができる。

ここでは、そのような反射モデルの例として、Torrance-Sparrow モデル^{12), 17)}を簡略化したものを用いる。このモデルに基づき、式 (4) より、画像面の明るさを求める反射モデル式を得る。

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n \left(K_d \cos \theta_i + K_s \frac{1}{\cos \theta_r} e^{-\frac{\gamma(\theta_i, \phi_i)^2}{2\sigma^2}} \right) S(\theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) \quad (8)$$

ここで、 θ_r は物体表面上の点における法線方向と視線方向がなす角度、 K_d と K_s はそれぞれ拡散反射およびに鏡面反射成分の色と強度を示す定数、 $\gamma(\theta_i, \phi_i)$ 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、 σ は Torrance-Sparrow モデルにおける微小

本研究では、Tsai により提案された手法を用いてカメラキャリブレーションを行い、実世界 3 次元座標系と画像面 2 次元座標系の対応づけを求めている¹⁶⁾。また、この際に、遮蔽物体が影を投影する平面に実世界座標系 $z = 0$ 平面を定義している。

面素の傾斜角度の標準偏差となり、物体表面の粗さを表している。

式 (8) より、 $L(\theta_i, \phi_i)$ を未知数 L_i 、 $(K_d \cos \theta_i + K_s \frac{1}{\cos \theta_e} e^{-\frac{\gamma(\theta_i, \phi_i)^2}{2\sigma^2}})S(\theta_i, \phi_i)$ を係数 a_i 、画像面の明るさ $P(\theta_e, \phi_e)$ を右辺数 P として、Lambertian の例と同様に、シャドウ内の各画素の明るさより 1 次方程式を導くことができる。

したがって、 $m \geq n$ のピクセルを選定することにより、未知数である n 個の光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ を推定することができる。

3.3 物体表面反射率が未知の場合の解：Lambertian モデル

遮蔽物体を配置する平面の物体表面反射率が未知の場合には、関係式 (式 (4)) があらたな未知数 $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ を含むことになり、このままでは実光源の輝度分布を解くことができない。

このような場合においても、実物体表面における反射は拡散反射のみであり Lambertian モデルに従うと仮定することができれば、遮蔽物体を配置せずに撮影した画像 (以下、ブレイン画像と呼ぶ) 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ができる。

ブレイン画像においては、遮蔽物体が存在しないため、反射モデル式 (5) の遮蔽テスト $S(\theta_i, \phi_i)$ は必ず $S(\theta_i, \phi_i) = 1.0$ となる。したがって、ブレイン画像における画素の明るさ $P'(\theta_e, \phi_e)$ を以下のように求めることができる。

$$P'(\theta_e, \phi_e) = K_d \sum_{j=1}^n L(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j \quad (9)$$

すると、式 (3) を式 (9) 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 (10) を得る。

$$\begin{aligned} \frac{P(\theta_e, \phi_e)}{P'(\theta_e, \phi_e)} &= \frac{K_d \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i S(\theta_i, \phi_i)}{K_d \sum_{j=1}^n L(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{L(\theta_i, \phi_i)}{\sum_{j=1}^n L(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j} \cos \theta_i S(\theta_i, \phi_i) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\sum_{j=1}^n \frac{L(\theta_i, \phi_i)}{L(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j}$ を推定する未知数 L_i 、 $\cos \theta_i S(\theta_i, \phi_i)$ を係数 a_i 、 $\frac{P(\theta_e, \phi_e)}{P'(\theta_e, \phi_e)}$ を右辺数 P とすると、式 (6) と同様の 1 次方程式を得ることができ、上記の Lambertian の例と同様に未知数 L_i を求めることができる。

ここで、未知数 L_i の上辺 $L(\theta_i, \phi_i)$ は各光源の輝

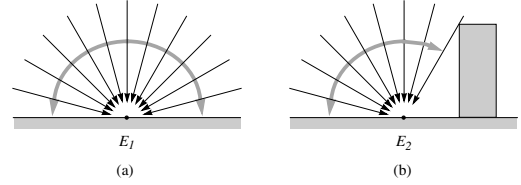


図 2 光源からの照度：(a) 仮想物体なし，(b) 仮想物体あり
Fig. 2 Total irradiance: (a) without occluding object, (b) with occluding object.

度を表し、下辺 $\sum_{j=1}^n L(\theta_j, \phi_j) \cos \theta_j$ 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、 $\frac{\text{光源輝度 } L(\theta_i, \phi_i)}{\text{照度 } E_1}$ という比のみを求めることが可能である。

先に述べたように、本手法では光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ の R, G, B の 3 バンドを各色独立で推定する。したがって、このままでは実光源の輝度分布の R, G, B 各バンド間の相対的な強さを決定することができない。

5 章で示す実験例では、白色のキャリブレーションボードを利用してボード上で観測される色の比を 3 つのバンド間の相対的な強さの比として用いている。このように、白色 (あるいはグレースケール) の物体を利用することができれば、その物体を用いて各バンド間の相対的な強度を求めることができる。そのような参考になる物体を利用できない場合には、各バンド間で強度は一定など、バンド間の相対的な強さに関する仮定が必要となる。

4. 実画像への仮想物体の重ね込み

本章では、3 章で推定した実光源の輝度分布を用いて、入力画像に仮想物体を違和感なく重ね込む処理を行う。

重ね込みの処理は入力画像の画素単位で行われ、まず、各画素に対応する視線と仮想物体表面との交差判定を行うことにより、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。そして、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して以下の合成処理を行う。

4.1 仮想物体表面の色の計算

入力画像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

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。

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、先に述べた Torrance-Sparrow モデル^{12),17)}を簡略化したものを用いる(式(8))。このモデル式に、推定された光源輝度とユーザにより定義された仮想物体の反射特性を代入することにより仮想物体表面の明るさを求めることができる。

4.2 仮想物体からの影の計算

入力画像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、入力画像における実物体表面の明るさを変更する。

まず、入力画像の画素に対応する実空間内の点において、仮想物体がない場合には(図2(a))、光源輝度分布全体からの影響がどれだけの照度 E_1 となるかを推定された光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ を用いて以下のとおり求める。

$$E_1 = \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (11)$$

次に、仮想物体が存在する場合(図2(b))の光源輝度分布からの照度 E_2 を求める。仮想物体を配置した場合の照度 E_2 は、式(2)に3章で推定した光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ 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 $L(\theta_i, \phi_i)$ の総和として求めることができる。

$$E_2 = \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (12)$$

この場合、遮蔽テスト $S(\theta_i, \phi_i)$ は、仮想物体による各光源輝度の遮蔽を表す。

入力画像内での実物体表面上の点において観察される色を P' とすると、この色は光源分布全体からの照度が E_1 のとき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 とすると、 P は光源分布全体からの照度が E_2 のときに観察される色である。そこで、 E_1 と E_2 の比を利用して、 P は以下のように求めることができる。

$$P_c = P'_c \frac{E_{2,c}}{E_{1,c}} \quad (13)$$

$c = R, G, B$

2.1 節と同様に、ここでも仮想物体からの相互反射の影響はないとして照度 E_2 を計算している。

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、研究室で撮影された(a)プレイン画像(遮蔽物体無)、(b)シャドウ画像(遮蔽物体有)を用いて、プレイン画像に仮想物体を重ね込む処理を行った(図3, 図7に入力画像を示す)。

まず、シャドウ画像の明るさ分布より、空間的に均等なサンプリング方向の光源輝度を未知数とする連立1次方程式を導き、この連立1次方程式を解くことにより、実世界の光源分布を近似する光源輝度 L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を推定する。具体的には、まずシャドウ画像内の各画素(遮蔽物体に相当する画素を除く)において、各光源輝度と遮蔽物体との幾何的な関係に基づいて式(6)の連立1次方程式における係数 a_i を求める。次にこの結果に基づき、互いに係数がある閾値以上異なるピクセルを選定し、選定されたピクセルにより導かれる連立1次方程式を解くことにより光源分布を推定している。

次に、推定された光源輝度 L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を用いて、プレイン画像の各画素単位で仮想物体を重ね込む処理を行う。まず、視線と仮想物体との交差判定を行い、各画素が仮想物体表面あるいは実物体表面のどちらを見ているのかを判定する。次に、各画素が仮想物体表面を見ている場合には、仮想物体表面の色を推定された光源分布を用いて計算し、その画素の明るさとして代入し、実物体表面を見ている場合には、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

入力画像を図3に、合成結果を図4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プレイン画像に重ね込んだ。また、推定に用いられた光源方向のサンプリング数を光源数として合成画像の下に示す。上記の画素の選定理由に基づいて、(a)のケースでは300画素、(b)のケースでは3000画素、(c)のケースでは7000画素がシャドウ画像より選定され、光源分布の推定に用いられた。

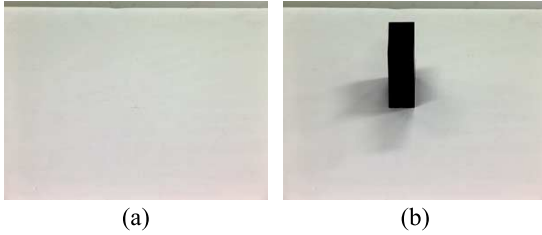


図3 入力画像：(a) プレイン画像，(b) シャドウ画像
Fig. 3 Input images: (a) surface image, (b) shadow image.

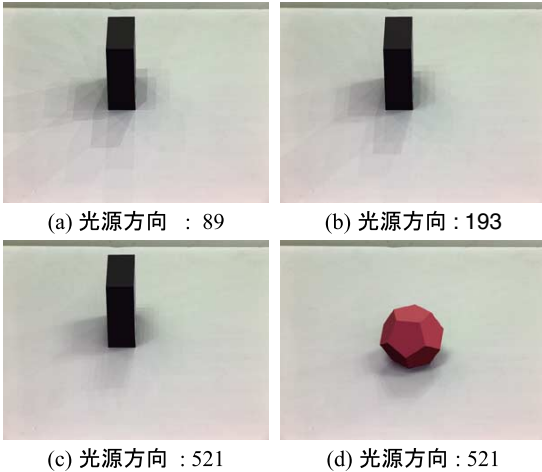


図4 合成結果：物体表面反射特性が既知
Fig. 4 Synthesized images: known reflectance properties.

推定された光源分布を geodesic dome 上に可視化したものを真上から観察した図を図5に示す. この図では, いくつかの直接光源(研究室内に配置された蛍光灯)が観察され, さらに直接光源の周辺部に直接光源と天井の関係により生じた間接的な光源が推定されている様子が分かる.

ここでは, 入力画像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, 合成画像の影がシャドウ画像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.

さらに, どのくらい遮蔽物体の影に近い影が合成画像中に生成できているかということを示すため, シャドウ内の各画素における仮想遮蔽物体の影

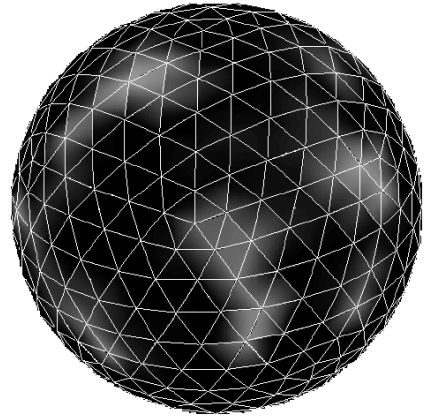


図5 推定された光源分布：geodesic-dome 上に表示
Fig. 5 Estimated illumination distribution: known reflectance properties.

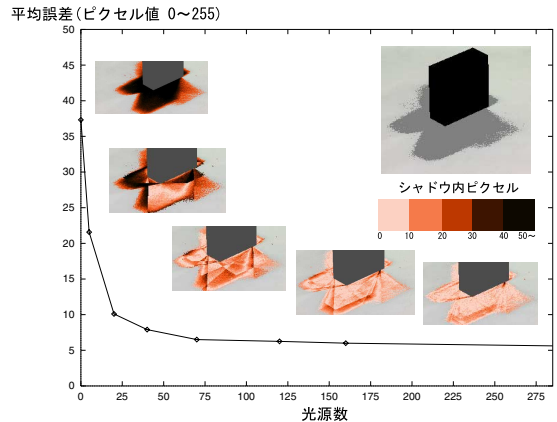


図6 誤差解析：物体表面反射特性が既知
Fig. 6 Error Analysis: known reflectance properties.

(合成画像中)と実遮蔽物体の影(シャドウ画像中)の誤差を調べた. ここでは, 遮蔽物体を推定時とは異なる姿勢で配置し, 推定時とは異なる遮蔽関係が発生した場合においても推定された光源分布が正しい影を生成できるかどうかを検討した. 図6にその解析結果を示す. この図において, 縦軸は生成された仮想遮蔽物体の影と観察される実遮蔽物体の影との画素値における誤差の平均を表し(画素値: 0~255), 横軸は光源方向のサンプリング数を表している. また, 解析に用いられた画素を右上の図に灰色の画素として示す. ここでは, プレイン画像とシャドウ画像の間に15画素値以上差のある画素を選定し解析に用いている.

図6に示す誤差のプロットより, 光源方向のサンプリング数が増加するにつれ, 急速に推定された光源分布の精度が上がり, シャドウ内の誤差が減っている様子がよく分かる. このことは, 推定された光源分布

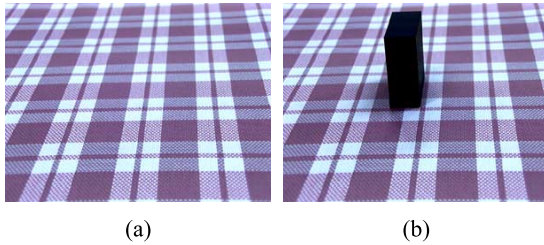


図7 入力画像：(a) プレイン画像，(b) シャドウ画像
Fig. 7 Input images: (a) surface image, (b) shadow image.

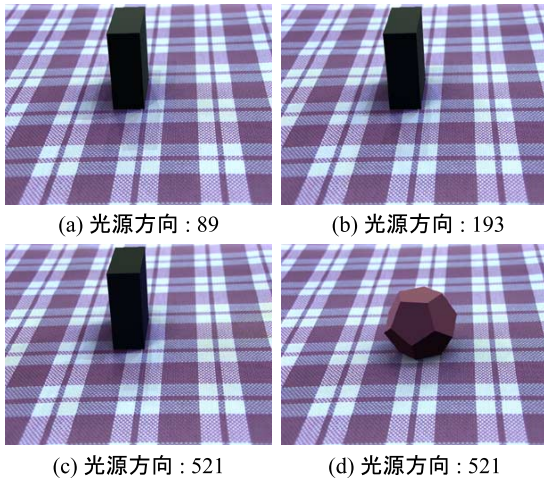


図8 合成結果：物体表面反射特性が未知
Fig. 8 Synthesized images: unknown reflectance properties.

が推定時とは異なる遮蔽関係が発生しても有効なことを示しており，提案手法により推定された光源分布の頑強さを示している．具体的な数値としては，はじめシャドウ画像とプレイン画像の間に平均 37 画素値あった誤差が，推定された光源を利用することにより平均 5.6 画素値まで減っていることがこの図より分かる．

さらに，シャドウ内の誤差分布を可視化したものをグラフの横に示す．可視化された誤差分布では，実際に観察されたシャドウと明るさの差が大きいほど暗く，その差が小さいほど明るく表示されている（誤差分布を可視化した際の誤差のスケールを図内に表示，中心部分の灰色の四角領域は遮蔽物体に対応）．

ここでの誤差が 0%にならない理由としては，カメラのキャリブレーション時の誤差をもたらす遮蔽物体と光源分布の遮蔽関係誤差の影響，遮蔽物体とシャドウ平面との間の相互反射をモデル式に加えずに光源分布を推定していることによる相互反射の影響，実世界の光源環境を無限遠方にある面光源に近似して光源を推定していることによる影響が作用しているものと考

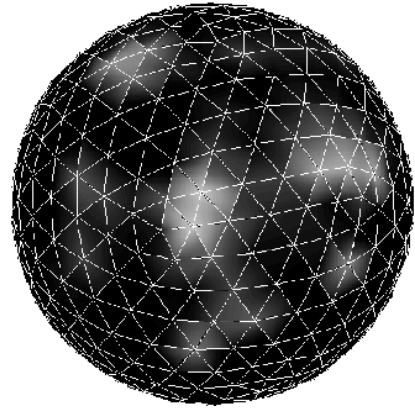


図9 推定された光源分布：geodesic-dome 上に表示
Fig. 9 Estimated illumination distribution: unknown reflectance properties.

えられる．

5.2 物体表面反射率が未知の場合

入力画像を図 7 に示す．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用している．その結果得られた合成画像を図 8 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 (d) 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．ここでも，物体表面反射率が既知の場合と同程度の数の画素が (a)，(b)，(c) のそれぞれに対してシャドウ画像より選定され，光源分布の推定に用いられた．また，推定された光源分布を geodesic dome 上に可視化したものを図 9 に示す．上記の物体表面反射率が既知の例とは異なる位置で入力画像が撮影されたため，推定された光源分布は異なるが，この図においてもいくつかの直接光源とその周辺に間接光源が推定されている様子が分かる．

また，上記の例と同様に，合成画像中に生成された仮想遮蔽物体の影とシャドウ画像中の遮蔽物体の影の画素値の誤差を解析したものを図 10 に示す．この例では，推定時とは形状の異なる遮蔽物体を配置し同様の解析を行った．この図からも，光源方向のサンプリング数が増加するにつれ，急速に推定された光源分布の精度が上がり，シャドウ内の誤差が減っている様子がよく分かる．具体的な数値としては，はじめ，プレイン画像とシャドウ画像の間で平均 36 画素値あった誤差を推定された光源を利用することにより平均 8.2 画素値の誤差までに減らすことができた．ここで，前章の反射特性既知の実験結果よりも誤差が 3 画素値ほど

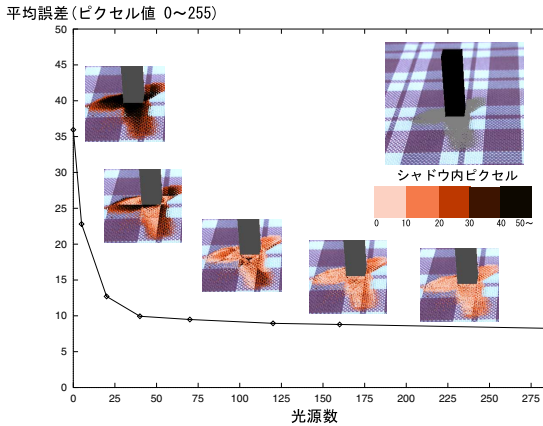


図 10 誤差解析：物体表面反射特性が未知

Fig. 10 Error Analysis: unknown reflectance properties.

多く残った理由としては、上記に述べた理由に加え、遮蔽物体を配置する平面が完全な Lambertian 面でなかったため、その影響が残ったものと考えられる。

6. 結 び

本報告では、実世界に配置した物体から生じる影を利用して 1 枚または 2 枚の画像のみを用いて実世界の光源状況を推定する手法を提案した。また、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。画像内に観測され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りした従来の手法に対し、本報告において提案した手法は、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。

謝辞 本研究は、文部省研究プロジェクト：科学研究費・創成的基礎研究「人間主体のマルチメディア環境形成のための情報媒介機構の研究」(09NP1401)の研究助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 大田友一：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 (1997)。
- 2) 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)。
- 3) 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 年総大会，システムソ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 (1997)。

- 4) 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)。
- 5) 藤井博文，神原誠之，岩佐英彦，竹村治雄，横矢直和：拡張現実のためのジャイロセンサを併用したステレオカメラによる位置合わせ，電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会，信学技報，PRMU99-192，pp.1-8 (2000)。
- 6) Azuma, R.T. and Bishop, G.: Improving static and dynamic registration in an optical see-through HMD, *Proc. SIGGRAPH 94*, pp.197-204 (July 1994)。
- 7) Bajura, M., Fuchs, H. and Ohbuchi, R.: Merging virtual objects with the real world: Seeing ultrasound imagery within the patient, *Proc. SIGGRAPH 92*, pp.203-210 (1992)。
- 8) Debevec, P.: Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, *Proc. SIGGRAPH 98*, pp.189-198 (July 1998)。
- 9) Drettakis, G., Robert, L. and Bougnoux, S.: Interactive Common Illumination for Computer Augmented Reality, *Proc. 8th Eurographics Workshop on Rendering*, pp.45-57 (1997)。
- 10) Fournier, A., Gunawan, A. and Romanzin, C.: Common Illumination between Real and Computer Generated Scenes, *Proc. Graphics Interface '93*, pp.254-262 (1993)。
- 11) Horn, B.K.P.: *Robot Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA (1986)。
- 12) Nayar, S.K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Surface reflection: physical and geometrical perspectives, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.7, pp.611-634 (1991)。
- 13) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.5, No.1, pp.1-12 (1999)。
- 14) Satoh, K., Ohshima, T. and Yamamoto, H.: Case Studies of See-Through Augmentation in Mixed Reality Project, *Proc IEEE IWAR'98* (Nov. 1998)。
- 15) State, A., Hirota, G., Chen, D.T., Garrett, W.F. and Livingston, M.A.: Superior augmented-reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking, *Proc. SIGGRAPH 96*, pp.429-438 (Aug. 1996)。
- 16) Tsai, R.: 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).

- 17) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surface, *Journal of Optical Society of America*, Vol.57, pp.1105-1114 (1967).

(平成 12 年 3 月 23 日受付)

(平成 12 年 9 月 14 日採録)

(担当編集委員 向川 康博)



佐藤いまり (学生会員)

1994 年慶應義塾大学総合政策学部卒業。1992 年 8 月～1993 年 8 月, CMU, Center for Machine Translation, Research Assistant, 1994～1996 年, CMU, The Robotics Institute, Visiting Scholar. 1997 年より東京大学生産技術研究所にてコンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。画像の理解・認識シンポジウム (MIRU2000) 最優秀論文賞, 平成 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞。現在, 東京大学大学院学際情報学府修士課程に在学中。バーチャルリアリティ学会会員。



佐藤 洋一 (正会員)

1990 年東京大学工学部機械工学科卒業。同大学院情報工学専攻を経て, 1991～1996 年まで CMU ロボティクス学科博士課程に在籍。1997 年 1 月 Ph.D. in Robotics 修了。1997 年より東京大学生産技術研究所研究機関研究員, 講師を経て同研究所専任助教授。コンピュータビジョン, ヒューマン・コンピュータ・インタラクション, およびコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。平成 11 年山下記念研究賞, Int. Conf. Shape Modeling and Applications '97 最優秀論文賞, MIRU2000 最優秀論文賞, 平成 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員。



池内 克史 (正会員)

1973 年京都大学工学部機械工学科卒業。1978 年東京大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。MIT 人工知能研究所, 電総研, CMU 計算機科学部を経て, 1996 年より東京大学生産技術研究所教授。人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 人間による組み立て作業の自動認識等の研究に従事。論文賞 (ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, ロボット学会誌-97, IEEE R&A 誌-98, MIRU2000, 平成 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌) 受賞。電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。OSA 会員, IEEE 会員 (Fellow)。