

# 表面反射特性の推定による 仮想化現実環境の対話的な照明シミュレーション

Virtual Relighting of a Virtualized Scene by Estimating Surface Reflectance Properties

福 富 弘 敦<sup>†</sup>, 町 田 貴 史<sup>††</sup>, 正 会 員 横 矢 直 和<sup>†</sup>

Hironobu Fukutomi<sup>†</sup>, Takashi Machida<sup>††</sup> and Naokazu Yokoya<sup>†</sup>

**Abstract** In mixed reality that merges real and virtual worlds, it is required to interactively manipulate the illumination conditions in a virtualized space. In general, specular reflections in a scene make it difficult to interactively manipulate the illumination conditions. Our goal is to provide an opportunity to simulate the original scene, including diffuse and specular reflections, with novel viewpoints and illumination conditions. Thus, we propose a new method for estimating diffuse and specular reflectance parameters using the geometries and images of real scenes. The experiment results show several estimates of surface reflectance properties and the relighting of scenes under novel viewpoints and illumination conditions.

キーワード：表面反射特性，ラジオシティ法，Torrance-Sparrow モデル，仮想化現実，照明シミュレーション

## 1. ま え が き

近年，仮想環境と現実環境を融合する複合現実感やコンピュータグラフィックスの分野において，仮想環境内で現実環境を忠実に再現し，計算機上で照明の位置や明るさなどの照明条件を操作して，照明による影響を仮想的に表現する研究が行われている<sup>1)2)</sup>．これらの研究では対象とするシーンの幾何形状や光源条件などの現実環境を仮想化する必要があり，なかでもシーンの表面反射特性を仮想化することは現実環境における陰影を忠実に表現するために重要である．

仮想環境において照明の位置や明るさなどの照明条件を操作する研究では，現実環境の表面反射特性を仮想化するために，光の相互反射をモデル化したレンダリング手法であるラジオシティ法<sup>3)4)</sup>が用いられている．ラジオシティ法は光の熱エネルギーの伝播に基づき，光の相互反射による影響を忠実に再現可能な手法である．Fournierら<sup>5)</sup>はシーンの3次元形状と光源の位置や輝度値は手動で与え，シーンの反射特性を推定することにより，現実環境の仮想化を

行った．この手法では，ラジオシティ法により相互反射の影響も考慮しているが，シーンの反射成分は拡散反射成分のみと仮定していることから，鏡面反射成分を含んだ現実環境を仮想化することは困難であった．Loscosら<sup>6)</sup>は，ラジオシティ法を導入して，仮想環境における対話的な照明シミュレーションを行った．この手法では，現実環境の仮想化に固定視点のテクスチャを用いているため，仮想環境内での視点移動を行うためには，移動した位置でのテクスチャが必要となり，仮想的な自由な視点移動が困難であった．またBoivinら<sup>7)</sup>は，あらかじめモデル化されたシーンの厳密な3次元形状を基に，写りこみのある鏡面反射など現実環境に存在する複雑な反射特性の推定を行った．しかしながら，数多くの反射特性を仮定し，複雑な反射までも再現しようと試みたため，仮想環境におけるシーンの描画に要する計算時間が膨大となり，実時間で対話的に照明操作を行うことは困難であった．また，鏡面反射成分を含む物体では，実写画像内の鏡面反射を含む画素が拡散反射推定時にはサンプリングされている．そのため，拡散反射係数の推定値に鏡面反射成分の影響が含まれ，各反射係数の推定値に比較的大きな誤差が生じるという問題があった．

以上をふまえ，本研究では拡散反射成分だけでなく，鏡面反射成分を含んだ環境においても，物体の拡散反射係数と鏡面反射係数および表面粗さ係数を推定し，現実環境の仮想化を行う．ここで，文献<sup>7)</sup>における問題を回避するため拡散反射成分と鏡面反射成分を精度よく分離を行った上で，より正確な反射係数の推定を可能とする．これにより，

2003年3月3日受付，2003年7月28日最終受付，2003年9月4日採録

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

(〒630-0192 奈良県生駒市高山町8916-5, 0743-72-5296)

<sup>††</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター

(〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-32, 06-6850-6824)

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

(8916-5, Takayama-cho, Nara 630-0192, Japan)

<sup>††</sup> Cyber Media Center, Osaka University

(1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi 560-0043, Japan)

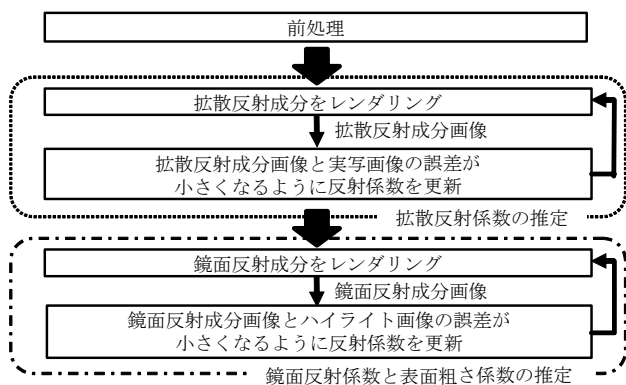


図 1 反射特性推定の処理の流れ  
Flow diagram of estimating reflectance properties.

仮想化された環境内において、照明条件や視点位置を仮想的に操作可能な実時間対話的照明シミュレーションを実現する。

## 2. 幾何形状と実写画像からの反射特性の推定

本章では現実環境の反射特性の推定法について述べる。推定手法の処理の流れを図1に示す。処理は大きく三つに分けられ、まず前処理として入力データを準備する。次にシーン内の拡散反射係数を推定し、最後に鏡面反射係数と表面粗さ係数を推定する。各処理の概要は次のとおりである。

### (1) 前処理

推定手法の入力として、実シーンの幾何形状と光源条件の仮想化を行い、実写画像を準備する。幾何形状の仮想化のために実シーンの幾何形状を取得し、光源条件の仮想化のために実シーンにおける光源の位置および輝度値を手動で与える。また、推定手法の入力である実写画像の枚数を少なくするために、シーンを反射特性の違いによってあらかじめグループに分割する。

### (2) 拡散反射係数の推定

シーンの3次元形状と実写画像を用い、ラジオシティ法に基づいて、相互反射を考慮した拡散反射係数の推定を行う。具体的には、推定途中に得られる拡散反射係数を用いて、シーンの拡散反射成分を描画した画像（以下、拡散反射成分画像と呼ぶ）とシーンの実写画像の誤差が最小となるように分割された、各グループの拡散反射係数を最適化する。また、拡散反射成分画像とシーンの実写画像の差分画像（以下、ハイライト画像と呼ぶ）を用いることで、拡散反射係数の推定精度の向上を図る。つまり、ハイライト画像は拡散反射係数の推定時に鏡面反射成分による影響が含まれないように、各反射成分を精度よく分離するために用いられる。ここで、実験で用いたミニチュアの部屋に対する拡散反射成分画像とハイライト画像の例を図2に示す。

### (3) 鏡面反射係数および表面粗さ係数の推定

拡散反射係数の推定部で出力されるハイライト画像と

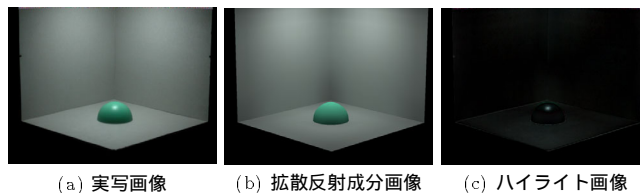


図 2 反射特性推定で用いられる画像例  
Example images in estimating reflectance properties.

シーンの3次元形状を用いて、鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定を行う。具体的には、推定途中に得られる鏡面反射係数と表面粗さ係数を用いて、シーンの鏡面反射成分を描画した画像（以下、鏡面反射成分画像と呼ぶ）と、ハイライト画像の誤差が最小となるように分割された各グループの鏡面反射係数と表面粗さ係数を最適化する。

### 2.1 前処理

シーンの幾何形状に関しては、モデリングツール（New Tek社・Lightwave 7.0）と3次元形状計測装置（ミノルタ社・VIVID900）を用いて取得し、得られたシーンの幾何形状をラジオシティ法に適用するために適当な数のパッチに分割する。その際に、パッチの分割数に関して、拡散反射用と鏡面反射用の2種類のモデルを作成する。一般に現実環境においては、拡散反射表面の明るさが急激に変化することは少なく、一方、輪郭が際立ったハイライトなど鏡面反射表面の明るさは、急激に変化することが多い。このようなハイライトを忠実に描画するため、鏡面反射用のモデルは、拡散反射用のモデルよりも細かいパッチに分割する。

この3次元形状を構築する行程において、シーンに含まれる物体表面をあらかじめ手作業でグループに分類しておく。グループは、物体表面の反射特性が同様である範囲とする。このように反射特性に従って、シーンをグループ化することにより、シーンの実写画像にグループの一部さえ写っておれば、そのグループの反射係数を推定することが可能となる。

また、シーンの実写画像に関しては、各グループの少なくとも一部が含まれるようにある固定視点から撮影するが、得られた実写画像にはカメラのガンマ補正の影響が含まれている。そこで、反射係数の推定にカメラによるガンマ補正の影響が含まれないように、あらかじめガンマ補正による影響を取り除いておく。次に、シーンの幾何形状と実写画像に対して位置合わせを行い、佐藤らの手法<sup>8)</sup>により実写画像を撮影したカメラの位置および姿勢と、カメラのレンズによる歪みを補正した画像を取得する。

### 2.2 拡散反射係数の推定

本節ではラジオシティ法に基づいた拡散反射係数の推定を行う。本研究で使用するラジオシティ法の式を以下に示す。

$$B_i = E_i + Rd_i \sum_{j=1}^N B_j F_{i-j} \quad (1)$$

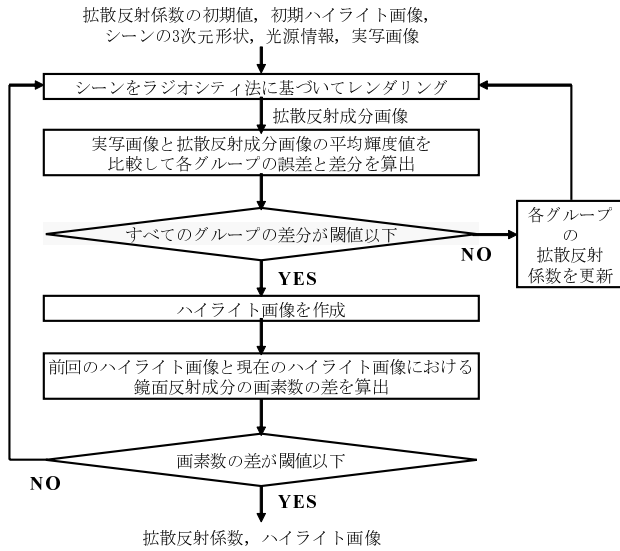


図3 拡散反射係数の推定処理の流れ

Flow diagram of estimating a diffuse reflectance properties.

ここで、 $B_i, B_j$  はパッチ  $i$  と  $j$  の熱エネルギー（ラジオシティ）、 $E_i$  はパッチ  $i$  から放射される光の放射率、 $Rd_i$  はパッチ  $i$  の拡散反射係数である。また、 $F_{i-j}$  はフォームファクタと呼ばれ、パッチ  $j$  全体を離れてパッチ  $i$  全体に到達するエネルギーの割合を示しており、両パッチの形状と相対方向、遮蔽パッチの有無を考慮に入れている。フォームファクタは、シーンの3次元形状を用いてヘミキューブ法<sup>9)</sup>により求めた。

拡散反射係数の推定処理の流れを図3に示す。まず、推定される各グループの拡散反射係数の初期値とハイライト画像の初期画像を定める。各グループの拡散反射係数の初期値に関しては、シーンの実写画像における各グループの平均輝度値を0から1の範囲にスケールした値とする。ハイライト画像の初期画像に関しては、シーンの実写画像と同サイズですべての画素の輝度値が0であるものとする。そして、シーンの実写画像と3次元形状および光源の位置と輝度値の光源情報を入力として、拡散反射係数の推定を開始する。以下、 $i$  と  $n$  はそれぞれグループ番号と処理の繰り返し回数を示す。

まず、推定処理の入力をもとに、シーンをラジオシティ法に基づいてレンダリングし、シーン内の拡散反射成分のみをレンダリングした拡散反射成分画像  $Id_n$  を生成する。次に、各グループ  $i$  に対して、実写画像における平均輝度値  $Br_{i,n}$  と拡散反射成分画像  $Id_n$  における平均輝度値  $Bd_{i,n}$  を算出する。そしてこれらの値を基に、各グループに対して、実写画像と拡散反射成分画像の誤差  $Ed_{i,n}$  と差分  $D_{i,n}$  を以下の式で計算する。

$$Ed_{i,n} = \frac{Br_{i,n}}{Bd_{i,n}} \quad (2)$$

$$D_{i,n} = |Br_{i,n} - Bd_{i,n}| \quad (3)$$

ただし、平均輝度値  $Br_{i,n}$  を算出するために実写画像の画素をサンプリングするが、その際に実写画像の画素に対応するハイライト画像  $M_n$  の画素の輝度値を調べ、輝度値が閾値  $th1$  以上であれば、実写画像の画素は鏡面反射成分をもつとみなして、サンプリングしないようにする。こうすることで、算出された平均輝度値  $Br_{i,n}$  に鏡面反射成分の影響が含まれないようにし、シーン内の拡散反射成分のみからシーンの拡散反射係数の推定を行う。

次に、各グループの差分  $D_{i,n}$  に対して閾値判定を行う。シーン内のすべてのグループにおいて、一つでも差分  $D_{i,n}$  が閾値  $th2$  よりも大きい場合、以下の式を用いてすべてのグループの拡散反射係数  $Rd_{i,n}$  を更新し、処理の最初に戻る。

$$Rd_{i,n+1} = Ed_{i,n} Rd_{i,n} \quad (4)$$

一方、すべてのグループの差分  $D_{i,n}$  が閾値  $th2$  以下である場合、現在の拡散反射成分画像  $Id_n$  と実写画像において、各画素の輝度値の差の絶対値を計算し、その値を画素の輝度値としたハイライト画像  $M_n$  を作成する。次に、ハイライト画像  $M_n$  が前回のハイライト画像  $M_{n-1}$  に比べて、どの程度更新されているかを調べる。そのために、前回のハイライト画像  $M_{n-1}$  と現在のハイライト画像  $M_n$  において、輝度値が閾値  $th1$  以上の画素数  $Nm_{n-1}$  と  $Nm_n$  の差  $|Nm_{n-1} - Nm_n|$  を計算する。算出された画素数の差が  $|Nm_{n-1} - Nm_n| > th3$  の場合は、まだハイライト画像が更新される余地があると見なして処理の最初に戻る。 $|Nm_{n-1} - Nm_n| \leq th3$  の場合は、拡散反射係数の推定処理を終了し、現在のハイライト画像  $M_n$  と各グループの拡散反射係数  $Rd_{i,n}$  を出力する。

### 2.3 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

本節では、以下の Torrance-Sparrow の反射モデル<sup>10)</sup> を用いて、拡散反射係数の推定部で出力されたハイライト画像から鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定を行う。

$$e = \frac{Y}{C^2} \left( R_d \cos \theta_d + R_s \frac{1}{\cos \theta_v} \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma^2}\right) \right) \quad (5)$$

ここで、 $e$  はパッチの輝度値、 $\theta_d, \theta_v, \theta_r$  はそれぞれ入射光と法線、視線と法線、視線と正反射方向のなす角度を表す。正反射方向とは光の入射角に等しい角度で反射する方向を指す。 $Y, C$  はそれぞれ光の強度と光源からの物体までの距離を表す。 $R_d, R_s, \sigma$  はそれぞれ、拡散反射係数、鏡面反射係数、表面粗さ係数を表し、未知数である。

本推定部の処理の流れを図4に示す。まず、推定を行うグループ  $i$  の鏡面反射係数と表面粗さ係数の初期値を設定する。鏡面反射係数の初期値に関しては、鏡面反射係数のRGB成分をそれぞれ1.0, 1.0, 1.0に設定する。表面粗さ係数に関しては、文献<sup>11)</sup>において現実環境における物体の表面粗さ係数は0.001から0.2の範囲であると報告されている。また、本推定部で用いる Torrance-Sparrow の反射モデルは、表面粗さ係数が0に近づくにつれて不安定にな

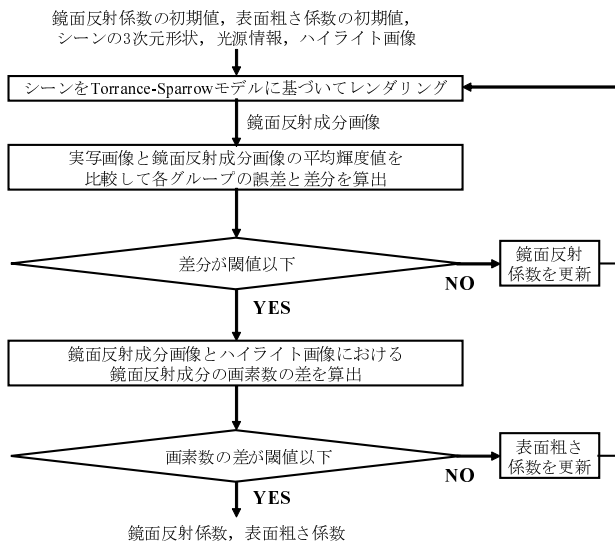


図4 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定処理の流れ  
Flow diagram of estimating a specular reflectance properties.

る性質を有していることから、表面粗さ係数の初期値を0.2に設定する。本推定部では、拡散反射成分を考慮しないので、グループ*i*の拡散反射係数の初期値をRGB成分すべて0.0に設定する。そして、設定された初期値と拡散反射係数の推定部で出力されたハイライト画像とシーンの3次元形状、および光源情報を入力として推定を開始する。なお、ハイライト画像において、処理の対象とする画素は2.2節と同様に閾値  $th1$  より大きい輝度値をもつ画素である。

以上の入力をもとに、シーンを Torrance-Sparrow の反射モデルに基づいてレンダリングし、シーン内の鏡面反射成分のみを描画した鏡面反射成分画像  $I_{s_n}$  を生成する。次に、各グループ  $i$  に対して、実写画像における平均輝度値  $Bm_{i,n}$  と鏡面反射成分画像  $I_{s_n}$  における平均輝度値  $Bs_{i,n}$  を算出する。これらの誤差  $Es_{i,n}$  と差分  $S_{i,n}$  を以下の式で計算する。

$$Es_{i,n} = \frac{Bm_{i,n}}{Bs_{i,n}} \quad (6)$$

$$S_{i,n} = |Bm_{i,n} - Bs_{i,n}| \quad (7)$$

次に、各グループ  $i$  の鏡面反射の色に注目して閾値判定を行う。すなわち、ハイライト画像と鏡面反射成分画像  $I_{s_n}$  の平均輝度値の差分  $S_{i,n}$  が閾値  $th4$  よりも大きい場合、これらの両画像間でグループ  $i$  の鏡面反射成分の色が似ていないとみなし、以下の式で各グループ  $i$  の鏡面反射係数  $R_{s_{i,n}}$  を更新して処理の最初に戻る。

$$R_{s_{i,n+1}} = Es_{i,n} R_{s_{i,n}} \quad (8)$$

差分  $S_{i,n}$  が閾値  $th4$  以下である場合、ハイライト画像の鏡面反射成分（輝度値が閾値  $th1$  以上）の画素数  $Nm_n$  と鏡面反射成分画像  $I_{s_n}$  における鏡面反射成分（輝度値が閾値  $th1$  以上）の画素数  $Ns_n$  の差  $|Nm_n - Ns_n|$  を計算する。

次に、鏡面反射の広がり注目して閾値判定を行う。す

なわち、ハイライト画像と鏡面反射成分画像  $I_{s_n}$  における画素数の差が  $|Nm_n - Ns_n| > th5$  の場合、これらの両画像間でグループ  $i$  の鏡面反射成分の広がり似ていないとみなし、以下の条件で表面粗さ係数  $\sigma_{i,n}$  を更新して処理の最初に戻る。

(1)  $Ns_{i,n} < Nm_{i,n}$  :  $\sigma_{i,n}$  に  $\sigma_{step}$  を加える

(2)  $Ns_{i,n} > Nm_{i,n}$  :  $\sigma_{i,n}$  から  $\sigma_{step}$  を引く

一方、 $|Nm_{i,n} - Ns_{i,n}| \leq th5$  の場合は鏡面反射係数と表面反射係数の推定処理を終了し、現在の鏡面反射係数と表面粗さ係数を出力する。

### 3. 仮想化現実環境の対話的な照明シミュレーション

物体表面の反射係数が推定されると、求められた反射係数とシーンの3次元形状から実シーンを仮想化することができる。本研究では、仮想化現実環境における照明条件の対話的な操作を目的としているため、照明条件を操作した結果を高速にレンダリングする必要がある。

そこで、写実的なシミュレーション結果を生成するために、現実環境において広い領域を占める拡散反射成分に対しては、光の相互反射の影響を考慮に入れた式(1)のラジオシティ法を用いてレンダリングを行うが、鏡面反射成分に対しては式(5)の Torrance-Sparrow の反射モデルに基づいて、光の1次反射のみを考慮してレンダリングを行うことで計算量の増加を防ぎ高速なレンダリングを実現する。

しかしながら、照明シミュレーションの対象となる環境の規模や複雑さの増大に伴い、拡散反射成分をレンダリングするラジオシティ法の計算量が大幅に増加する。すなわち、シーン内で生じる複数回の反射を計算する必要があり実時間レンダリングが困難になる。

そこで本研究では、シーン内における光の反射が収束するまでの複数回の反射を段階的に区切り、各段階での計算結果に基づいて逐次的にレンダリング結果を更新する方法を用いる。図5に逐次的に出力したレンダリング結果の例を示す。これら図において壁の隅や棚の内部に注目すると、反射が繰り返されるにつれてそれらの部分が次第に明るくなり、仮想環境において光が浸透していく様子が確認できる。この逐次的なレンダリング方法を用いることで、視覚的に違和感が少なく対話的に照明操作を行うことが可能となる。

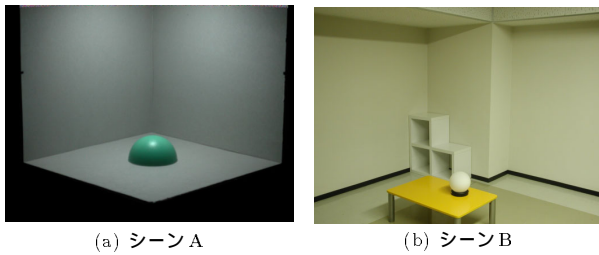
### 4. 実験

対話的な照明シミュレーションにおける提案手法の有



図5 逐次的なレンダリング結果  
Results of incremented rendering.





(a) シーンA (b) シーンB

図6 実験対象のシーン  
Real scenes used in experiments.

効性を確認するために、図6に示すシーンに対して実験を行った。シーンAはミニチュアの部屋で拡散反射性の壁をもち、シーン内に半球の鏡面反射物体を配置した。また、光源は一つで天井の中央に位置し、この光源以外の光の影響を受けないようにするため、実験は暗室で行った。シーンAは反射係数に従って2個のグループに分割されており、シーンの総パッチ数は535である。シーンBは実際の部屋で10個のグループに分割されており、シーンの総パッチ数は2986である。なお、実験にはPentium4 Xeon 1.7GHz Dual, メモリー2GByte, グラフィックカードNVIDIA社・GeForce3 (VRAM 64MByte)の計算機を用い、提案手法における閾値 $th_1 \sim th_5$ は経験的にそれぞれ45, 1, 10, 1, 5とし、 $\sigma_{step}$ は0.000001に設定した。フォームファクタの計算を除いた反射係数の推定に要した時間は、シーンAに対しては約3時間、シーンBに対しては約5時間であった。

#### 4.1 反射係数推定の評価実験

本節では、提案手法を用いて推定された反射係数について評価を行う。物体の反射係数は物体に固有の量であり、照明条件には依存しない。そのため、照明を固定して物体を移動させて計測を行った場合でも推定される反射係数は一定でなければならない。そこで、シーンAに対して図7(a)~(e)のように鏡面反射物体を動かして5種類の異なる環境を作成し、各環境において鏡面反射物体の反射係数を提案手法を用いて推定する。これらの環境では、鏡面反射物体の陰影の状態や物体表面に観測されるハイライトの位置や大きさが異なっている。この状況で推定された物体の反射係数が各シーンで同じ値となるかを検証する。

本実験の結果を表1に示す。表1のAVE, SDは、それぞれ列の平均値と標準偏差を表す。Rd, Gd, Bdは、拡散反射係数のRGB成分を示している。また、Rs, Gs, Bsおよび $\sigma$ は、それぞれ鏡面反射係数のRGB成分と表面粗さ係数を示している。表1より、各反射係数の各成分の標準偏差が小さい値を示しており、反射係数が安定して推定されていることが確認できる。

#### 4.2 照明シミュレーションの評価実験

本節では、シーンAに対して照明シミュレーションを行った後のレンダリング画像と同じ照明条件における現実環境の実写画像を比較することにより主観評価を行う。

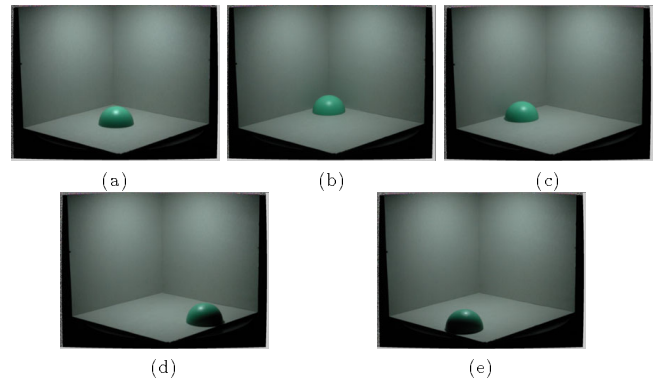


図7 反射係数推定の評価実験環境  
Real scenes used in evaluating the proposed method.

表1 反射係数推定の評価実験結果  
Estimated reflectance parameters.

	Rd	Gd	Bd	Rs	Gs	Bs	$\sigma$
(a)	0.1904	0.8078	0.5579	0.4749	0.6256	0.6185	0.1439
(b)	0.1842	0.8096	0.5573	0.5096	0.6055	0.6113	0.1260
(c)	0.1787	0.8120	0.5556	0.4951	0.6104	0.6184	0.0990
(d)	0.2350	0.7929	0.5623	0.4878	0.6271	0.6073	0.1274
(e)	0.2645	0.7738	0.5756	0.4777	0.6248	0.6176	0.1104
AVE	0.2111	0.7996	0.5623	0.4884	0.6192	0.6149	0.1213
SD	0.0306	0.0131	0.0066	0.0115	0.0082	0.0042	0.0154

図8(a)は提案手法の入力画像、(b)は実際に光源位置を移動させてシーンAを撮影した実写画像、(c)は(a)の画像を基に推定された各反射係数を用いて、光源の位置を(b)と同じ位置に仮想的に移動させた場合のレンダリング画像である。また、図8(d)は、(b)と(c)に対して画素ごとに画素値の差分を計算し、そのRGB成分の和を256段階で表現したグレースケール画像である。なお、図8(d)は最大値でスケールされている。

この結果より、入力画像(a)を用いて推定した係数を基に光源を移動したレンダリング画像(c)が同じ条件下の実写画像(b)に近い結果が得られていることが確認できる。なお、図8(d)の差分画像における画素値(RGB成分の和)の最大値は256段階で99で、平均値は約6であった。これにより、各反射係数の推定値が忠実に推定されていることが確認できる。また、実験に使用した半球は文献<sup>7)</sup>で用いられた鏡面性の物体と類似したものであり、文献<sup>7)</sup>では比較的大きな誤差を生じさせる原因となっていたが、本実験ではそのような誤差はなく、両反射成分が精度よく分離できていることがわかる。

差分の最大値をもつ画素は、レンダリング時におけるエイリアシングが生じるシーンのエッジ部分で観察されている。また図8(d)から、移動後の光源に近い画像の右上部分や半球の鏡面反射物体の影付近に比較的大きな誤差が確認できる。

前者の光源付近における誤差の原因としては、現実環境におけるシーンAの光源条件が正確に与えられていなかったことが考えられる。後者の影周辺における誤差に関して

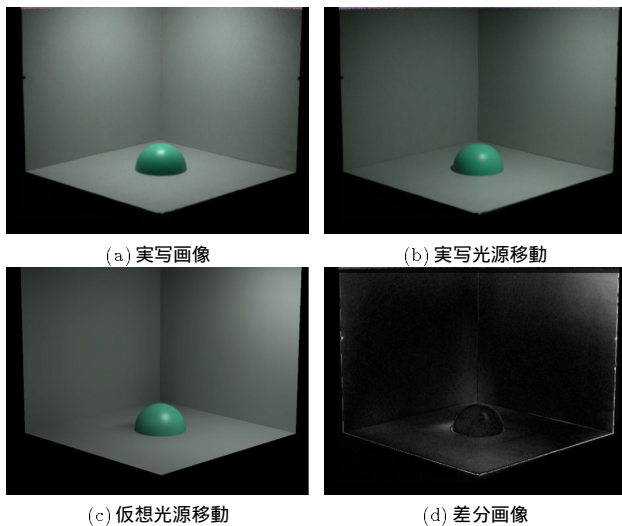


図 8 照明シミュレーションの評価実験結果  
Evaluation of virtual relighting.

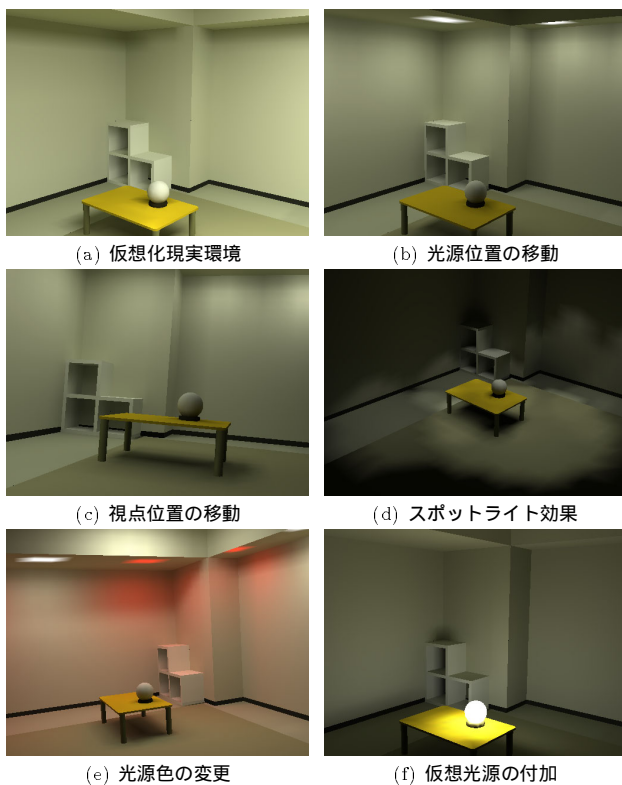


図 9 照明シミュレーション結果  
Results of virtual relighting.

は、半球の鏡面反射物体が落とす影周辺でのパッチの解像度が不十分であったことが原因に挙げられる。

#### 4.3 照明シミュレーション結果

図9はシーンBに対して照明シミュレーションを行った結果である。図9(a)は推定された反射係数を用いてシーンを描画した画像で、(b)は仮想化現実環境において光源位置を移動させた結果である。(c)は、(b)の照明条件下のシーンを異なった視点から見た画像で、(d)はスポットライトによる照明効果をシミュレーションした結果である。また、(e)は、光源の色を変化させた場合の照明シミュレ

表 2 没入型照明シミュレーションシステムの機器構成  
Configuration of immersive virtual relighting system.

球面ディスプレイ	elumens Vision Station
コントローラ	Microsoft Side Winder Game Pad Pro
PC	Pentium4 1.7GHz メモリ 1GByte
グラフィックカード	NVIDIA GeForce4



図 10 没入型照明シミュレーションシステムの操作方法  
Operation method of immersive virtual relighting system.

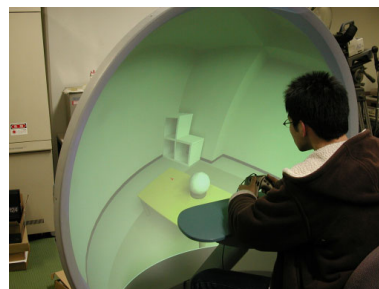


図 11 没入型照明シミュレーションシステムの概観  
Appearance of immersive virtual relighting system.

ーション結果で、(f)はシーンB中央のテーブルの上に配置された卓上ライトに仮想光源を付加し、その他の照明を消した場合のシミュレーション画像である。なお、照明操作に関しては、3章で述べた逐次的なレンダリング方法を用いて約20fpsで実行可能であり、照明操作を伴わない視点移動に関しては、約50fpsで実行可能であった。

#### 4.4 没入型照明シミュレーションシステム

4.3節で述べた照明シミュレーションの表示デバイスとして、球面状のディスプレイを用い、没入型照明シミュレーションシステムのプロトタイプを試作した。本システムの機器構成を表2に示す。図10のように、ユーザはコントローラをの各ボタンを用いて仮想化現実環境の照明操作や見回しを直感的に行うことができる。また図11に示すように、ユーザの視点を球面の中心に置くことで、高い臨場感で照明シミュレーションを行うことが可能となる。

#### 5. あとがき

本論文では、拡散反射と鏡面反射を含んだ現実環境の反射特性を推定し、仮想化された環境において照明条件の対話的な操作を実現する手法を提案した。

実験では、鏡面反射を含んだ現実環境に対して、提案手法を用いて忠実な反射特性の推定が行えたことを確認した。また、提案手法を用いて仮想化を行ったシーンに対して、仮想環境内でシーンの照明条件を対話的に操作可能であることを確認した。

今後の課題としては、現実環境における光源条件を正確に推定する必要がある。また、本論文で提案した照明シミュレーションをより汎用的な現実環境に適用させるためには、テクスチャや写りこみのある鏡面反射など現実環境に存在する複雑な反射にも対応するように提案手法を拡張する必要がある。

#### 〔文 献〕

- 1) 福富 弘敦, 町田 貴史, 横矢 直和: “実写画像を用いた対話的な照明シミュレーション”, 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集, pp. 375-376 (2002)
- 2) 福富 弘敦, 町田 貴史, 横矢 直和: “対話的な照明シミュレーションのための現実環境の仮想化”, 信学技報, PRMU2002-136 (2002)
- 3) C. M. Goral, K. E. Torrance, D. P. Greenberg and B. Battaile: “Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces”, Proc. SIGGRAPH '84, pp. 213-222 (1984)
- 4) T. Nishita and E. Nakamae: “Continuous Tone Representation of Three Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection”, Proc. SIGGRAPH '85, pp. 23-30 (1985)
- 5) A. Fournier, A.S. Gunawan and C. Romanzin: “Common Illumination between Real and Computer Generated Scenes”, Proc. Graphics Interface '93, pp. 254-262 (1993)
- 6) C. Loscos, G. Drettakis and L. Robert: “Interactive Virtual Relighting of Real Scenes”, Trans. Visualization and Computer Graphics, 6, 4, pp. 289-305 (2000)
- 7) S. Boivin and A. Gagalowicz: “Image-Based Rendering of Diffuse, Specular and Glossy Surfaces from a Single Image”, Proc. SIGGRAPH 2001, pp. 107-116 (2001)
- 8) T. Sato, M. Kanbara and N. Yokoya: “Dense 3-D Reconstruction of an Outdoor Scene by Hundreds-Baseline Stereo Using Hand-Held Video Camera”, International Journal of Computer Vision, pp. 119-129 (2002)
- 9) M. F. Cohen and D. P. Greenberg: “The Hemi-Cube: A Radiosity Solution for Complex Environments”, Proc. SIGGRAPH '85, pp. 31-40 (1985)
- 10) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: “Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces”, Jour. Optical Society of America, 57, pp. 1105-1114 (1967)
- 11) G. J. Ward: “Measuring and Modeling Anisotropic Reflection”, Proc. SIGGRAPH '92, pp. 256-272 (1992)

ふくとみ ひろのぶ  
**福富 弘敦** 2001年, 神戸大学工学部卒業。2003年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。在学中, 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。現在, 日本ビクター(株)に勤務

まちだ たかし  
**町田 貴史** 1998年, 大阪大学基礎工学部卒業。2000年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2002年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程退学。コンピュータビジョンに関する研究に従事。現在, 大阪大学サイバーメディアセンター助手。

よこや なおかず  
**横矢 直和** 1974年, 大阪大学基礎工学部卒業。1979年, 同大学院博士後期課程了。同年, 電子技術総合研究所入所。以来, 画像処理ソフトウェア, 画像データベース, コンピュータビジョンの研究に従事。1986~1987年 マツギル大学知能機械研究センター客員教授。1992年 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授。現在, 同大情報科学研究課教授。工学博士。正会員。