

インバースレンダリングによる物体表面反射特性の推定

町田 貴史[†] 竹村 治雄[†] 横矢 直和^{††}

実環境に仮想物体を合成表示する複合現実感において、より写実性の高い表現を行うために現実物体を仮想化する仮想化現実の研究がさかんに行われている。特に、物体の表面反射特性を推定することは実環境と仮想化された物体との間の陰影矛盾を解決するために重要である。近年、この問題に対する1つの解決法としてインバースレンダリングが注目されており、著者らは、物体の距離画像と表面のテクスチャ画像から物体の反射特性を密に推定する研究を行ってきた。また複雑な形状を有する物体に関しては、物体表面上での二次反射による相互反射の影響を考慮した手法を提案してきた。本総合論文では、これらの物体表面反射特性の推定をインバースレンダリングという枠組みで解決する一連の手法についてまとめる。具体的には3つの推定手法について詳細を述べ、その推定結果を比較することで大局的なインバースレンダリング手法の有効性を明らかにする。また、様々な仮想環境内の照明条件に対して忠実に物体を表現できることを示す。

Estimating Surface Reflectance Properties by Inverse Rendering

TAKASHI MACHIDA,[†] HARUO TAKEMURA[†] and NAOKAZU YOKOYA^{††}

In augmented virtuality, it is important to estimate object surface reflectance properties to render objects under arbitrary illumination conditions. There exist a number of methods to estimate reflectance properties of object surfaces densely. To estimate surface reflectance properties, there are *inverse rendering* techniques. This paper describes three new methods categorized in *inverse rendering* for densely estimating non-uniform surface reflectance properties of real objects constructed of convex and concave surfaces. Moreover, we enable to estimate reflectance parameters without an influence of diffuse and specular interreflections. We use registered range and surface color texture images obtained by a laser rangefinder. First, we select optimum light sources to take color images for discriminating diffuse and specular reflection components of surface reflection. Surface reflectance parameters are then estimated based on an *inverse rendering* framework. Experiments show the usefulness of the proposed method.

1. はじめに

近年、実環境と仮想環境を融合する複合現実感の研究において、現実物体と同様の写実性を持つ仮想物体を生成する技術が注目されている¹⁾。一般に、写実的な仮想物体を表現するためには、実物体の形状、表面反射特性、その物体を取り巻く環境(光源、カメラ)などの情報が必要である。これらの情報が取得できれば、コンピュータグラフィックス(CG)の分野におけるレンダリング技術により、物体の「見え」は写実的なものとなる。そこで、このような情報を推定する手法が数多く研究されており、実写画像から物体や環境情報を逆にレンダリングするという意味

で「インバースレンダリング」と呼ばれる³³⁾。インバースレンダリングに関する研究は大きく分けて3つに分類できる。1つ目はフォトメトリックステレオ法に代表されるように物体の形状取得を目的とするもの^{4),10),16)}。2つ目は点光源やスポットライトといった限定的な光源状況ではなく、屋外や室内の散乱した光源情報の推定を目的とするもの^{6),11),26),27)}。3つ目は物体の表面反射特性の推定を目的とするものである^{2),3),12),15),18),19),21)~23),28),31),32),34),35)}。著者らはこのインバースレンダリングの枠組みの中で物体の表面反射特性の推定についていくつかの手法を提案してきた^{22),34),35)}。本論文では、一連の手法を系統立てて説明し、その有効性を検証する。

物体の表面反射は拡散反射成分と鏡面反射成分に分けることができる。拡散反射成分は物体の色を表し、入射光に対して全方向に均一に反射する特性を持つため、観測が容易である。一方、鏡面反射成分は入射光、

[†] 大阪大学

Osaka University

^{††} 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

法線、視点に依存したある限定された範囲でしか観測することができず、反射係数の推定のためには、様々な光源位置での観測を必要とする。このような特性を持つ反射成分に対して、物体表面上における反射現象を再現するための局所反射モデルを用いたインバースレンダリングが数多く研究されている。ここで問題となるのは、鏡面反射特性の推定である。上記のように鏡面反射成分は観測が行える場合でもその値が微小である場合が多く、反射係数を安定に推定することは困難という問題がある^{18),19),28)}。そこで著者らは、そのような表面反射の特性をふまえ、様々な形状や表面反射特性を有する物体に対して効率良く鏡面反射成分を観測できるように、まず物体計測の際の光源位置の最適な選択を行うことで、少ない表面テクスチャ画像から両反射特性に関わる係数を物体面上の大部分で密に推定することを行った³⁴⁾。しかし、物体表面の反射特性の推定時に物体面上での一次反射のみを仮定すると、複雑な形状を有する物体の場合、二次反射の影響が大きくなり、正しい反射係数推定は難しいという問題が残っていた³⁴⁾。

相互反射を考慮するためには先に述べた局所的な反射モデルを用いる手法では不可能であり、新たなレンダリング技術を取り入れる必要があった。一般的に相互反射の影響を考慮したレンダリング技術は対象となる物体表面だけでなく、その物体を取り巻く環境すべてを考慮してレンダリングするため、大局的なレンダリングと呼ばれる。この技術により大局的なインバースレンダリングが開発されるようになった^{3),7),9),20),31)}。これらの従来法の多くはラジオシティ法に基づいて物体の表面反射特性の推定を行っている。Fournierら⁹⁾はシーンの幾何形状、光源位置を手動で与え、部屋の壁や扉などの反射係数をラジオシティ法に基づいて推定した。しかし、幾何形状が粗く作成されていることと、物体の反射係数が一様であり、拡散反射成分のみしか仮定しないことから、厳密な反射係数の推定は困難であった。また Yuら³¹⁾は、あらかじめモデル化された部屋の幾何形状と表面の色情報を取得し、モンテカルロ光線追跡法¹⁴⁾に基づいて鏡面反射成分を含む相互反射を考慮した反射特性の推定を行った。しかし、鏡面反射特性が一様なものを対象としており、不均一な表面反射特性を持つ物体に適用することは困難である。また計算量が膨大になるという問題もあった。Boivinら³⁾は厳密な形状をもとにラジオシティの計算を導入し、反射特性についても多くの状態を仮定することにより、現実世界に存在するすべての反射特性を推定しようと試みた。しかし、分割するパッチの数

には限界があり、表面反射特性がパッチ単位で一様であることから、複雑な模様が入った物体の表面反射特性の推定は不可能であった。著者らも表面反射特性の推定を行ううえで、CGの分野で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に基づいた反射特性の推定を行った²²⁾。しかしながら、ラジオシティ法は拡散反射成分による相互反射の影響のみを扱う手法であり、鏡面反射成分による相互反射の影響が誤差として現れるという問題があった。

次に著者らは、物体表面の相互反射については両反射成分の相互反射による影響を考慮したフォトンマップ法¹³⁾に基づいて物体表面反射特性の推定を行った³⁵⁾。フォトンマップ法は光源から放射される光子(フォトン)の物体面上での分布に基づいて物体をレンダリングする手法である。この方法を反射特性の推定に用いることにより、不均一な表面反射特性を持つ物体に対して、物体面上のほぼ全点で各反射成分の相互反射の影響を考慮した厳密な物体表面反射特性の推定が可能となる。さらにレンダリングにおける計算時間を大幅に短縮するために、近年注目されているグラフィックハードウェア(GPU)を用いる。これによりこれまでなかった新しい応用分野を形成することが期待される。

以下、2章では2つの反射成分を密に観測するための光源位置選択について述べ、3章では、Torrance-Sparrowモデルによる局所的な表面反射特性の推定、また4章と5章では、それぞれ大局的なレンダリング法としてラジオシティ法とフォトンマップ法に基づいた反射特性の推定法について述べる。特に、フォトンマップ法については最近の研究によりGPUでの実装が注目されており、本論文においてもGPUによる計算速度の向上について述べる。最後に考察と今後の課題について述べる。

2. 幾何形状と表面反射特性の密な観測

2.1 インバースレンダリング・アプローチの概要

本研究でのインバースレンダリングの枠組みにおける処理の流れを図1に示す。処理は3次元画像計測(図1中A, C)、光源位置の選択(図1中B)、表面反射特性の推定(図1中D)に分けられる。各処理の概要は次のとおりである。

(1) 3次元画像計測

A. では全周計測レンジファインダで対象物体の形状を計測し、距離画像を得る。また、C. では選択された光源設置候補位置に光源を設置し、複数回計測することで、それぞれの照明条件下での表面テクスチャ画像を得る。

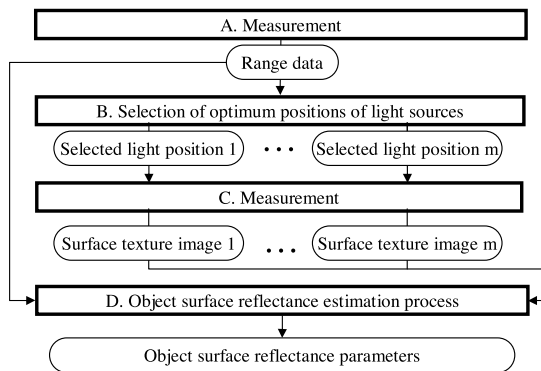


図 1 物体の表面反射係数推定における処理手順

Fig. 1 Flow diagram of estimating surface reflectance properties.

(2) 複数の照明条件のための光源位置選択

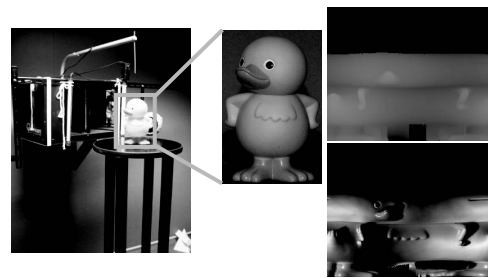
物体の形状とカメラ位置を既知として、計測装置の周囲に複数の光源設置候補位置を設定し、物体の形状をもとに各反射成分をより多く観測できる光源位置を選択する。

(3) 表面反射特性の推定

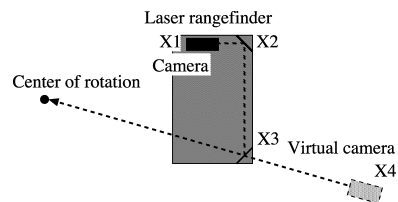
物体の形状と表面のテクスチャ画像から表面反射特性の推定を行う。本論文では 3 つの推定法について述べる（後述）。

2.2 3次元画像計測

物体の幾何形状と表面のテクスチャ画像を取得する装置として全周計測レンジファインダ（Cyberware3030RGB）を使用する。全周計測レンジファインダの外観を図 2 (a) に示す。全周計測レンジファインダは装置が計測物体の周りを 360 度回転することにより、全周の距離画像とテクスチャ画像を同時に得ることができる。2 つの画像は画素単位で 1 対 1 に対応しているため、計測の際に計測物体の位置を固定すれば、複数回の計測を行ってもテクスチャ画像間における位置ずれが発生しない。装置内のカメラは図 2 (b) に示すように、 $X1$ の位置に設置されており、 $X2$ 、 $X3$ の位置にある鏡を通して物体の表面テクスチャを得ている。そこで本論文では、仮想的にカメラは $X4$ の位置にあると考え、計測時のカメラの方位はこの仮想カメラと回転の中心を結ぶ方向とする。なお、本装置で得られる距離画像とテクスチャ画像は、円筒座標系で表現されており、レンジファインダの回転軸、回転角に対して、それぞれ物体表面の回転軸からの距離と RGB 値を値として持つ画像である。なお、距離画像におけるノイズ除去のために、文献 30) に基づく選択的局所曲面あてはめを適用している。



(a) Appearance of 3D-Digitizer



(b) Direction of camera

図 2 3次元画像計測装置

Fig. 2 3D-Digitizer.

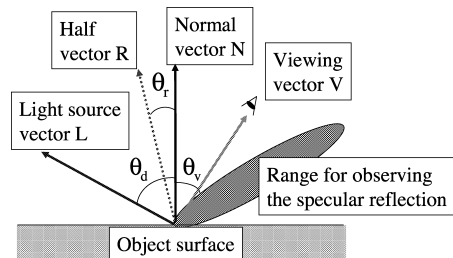


図 3 Torrance-Sparrow モデルにおける幾何学的な関係

Fig. 3 A geometrical situation in the Torrance-Sparrow model.

2.3 複数の照明条件のための光源位置選択

物体表面の反射特性を推定する場合、物体表面上での拡散反射成分と鏡面反射成分を観測する必要がある。特に鏡面反射成分はその観測範囲が限定されるため、従来研究においては物体面上で一様な鏡面反射特性を仮定したうえで補間により推定されていた。そこで、本研究では両反射成分が密に観測可能となるように物体計測時の最適な光源位置選択を行う。これにより、物体面上で一様な鏡面反射特性を仮定することなく、反射特性の推定が可能となる。ここで、光源選択には、物体表面の局所的な反射現象を物理的な側面からモデル化した Torrance-Sparrow モデル²⁹⁾ に基づき、光源位置、カメラ位置、物体の法線を考慮して反射成分が密に観測できるよう選択する。

2.3.1 Torrance-Sparrow モデル

Torrance-Sparrow モデルは以下の式で表される。また、各ベクトルの幾何学的な関係を図 3 に示す。

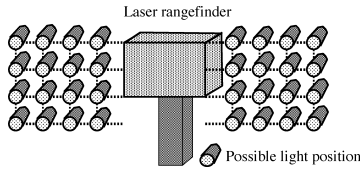


図4 光源設置候補位置

Fig. 4 Possible positions of light source.

$$i_x = \frac{Y}{D^2} \left\{ P_{dx} \cos \theta_{dx} + \frac{P_{sx}}{\cos \theta_{vx}} \exp \left(-\frac{\theta_{rx}^2}{2\sigma_x^2} \right) \right\}, \quad (1)$$

ここで、 i_x は物体面上の点 x に対応する画素の輝度値、 θ_{dx} 、 θ_{vx} 、 θ_{rx} はそれぞれ入射光 L と法線 N 、視線 V と法線 N 、光源と視線の二等分方向 R と法線 N のなす角度を表す。 Y 、 D はそれぞれ光の強度と光源から物体面までの距離を表す。 P_{dx} 、 P_{sx} 、 σ_x 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ている。また、光の減衰を表す Y/D^2 については物体面上のある点までの減衰量を 1 とし、その他の点における減衰量は相対的なものとする。

2.3.2 光源選択の概要

あらかじめ計測した物体の形状をもとに、図4のように位置が既知の M 個の光源設置候補位置の中から光源位置を選択する。光源設置候補位置は全周計測レンジファインダの周囲に格子状に用意する。光源は装置に固定されるため、物体計測時は装置と同様に回転する。実際には、光源設置候補位置は縦方向に 5 個、横方向に 12 個、合計 60 個 ($M = 60$) の位置を上下左右 5 cm 間隔で用意する。このとき、装置の仮想カメラと各光源設置候補位置の位置関係は一定に保たれる。各反射係数の推定に必要な各点の観測回数は式 (1) の未知変数の数に対応し、拡散反射成分は 1 回以上、鏡面反射成分は 2 回以上の観測が必要である。さらに、各点において自己による影が生じる場合を考慮し、このときの光源位置は反射係数の推定には用いない。

以降では、光源設置候補位置の数を M 、選択された光源位置の数を m とし、光源 p ($1 \leq p \leq l, m \leq M$) で計測されたテクスチャ画像を $I_p = (i_{p1}, \dots, i_{p\gamma})$ (i_{px} は物体面上の点 x に対応する画素の輝度値、 γ は総画素数) とする。また、画像 I_p 内で拡散反射成分のみからなる画素の総数を D_p 、強い鏡面反射成分を含む画素の総数を S_p とする。ここで、画素 i_{px} は、観測される反射成分によって 3 つに分類される。拡散反射成分のみを含む画素は T_{diff} として分類され、 $i_{px,d}$ と表す。強い鏡面反射成分を含む画素は T_{both} に分類され、 $i_{px,b}$ と表す。最後にどちらにもあてはまらない画素は T_{none} に分類され、 $i_{px,none}$ と表す。な

お、 $i_{px,b}$ から拡散反射成分を取り除いた画素は $i_{px,s}$ と表す。

まずすべての光源設置候補位置 p においてテクスチャ画像内の各画素について以下の判定を行う。

- (1) 反射光が観測できるか。
- (2) 拡散反射成分のみを観測しているか。
- (3) 強い鏡面反射成分を観測しているか。

以上の判定の結果、各光源位置に対する各反射成分の観測数 D_p 、 S_p が、 $D_p = \text{Max}(D_1, \dots, D_M)$ となる光源位置 p と $S_p = \text{Max}(S_1, \dots, S_M)$ となる光源位置 q を選択する。2 回目以降の選択は、これまでに選択された光源位置を除いた残りの候補位置の中から、同様の条件を満足する光源位置を選択する。選択処理の終了条件としては、鏡面反射成分の観測は困難となる場合があるため、まず全光源位置で計測した場合に、物体面全体に対して強い鏡面反射成分を含む点の数の割合を調べる。この割合をもとに光源選択の打ち切りのための閾値 th を決定する。閾値処理により、選択光源位置を増やしても推定可能な点が増加することはないと判断でき、少ない画像枚数で各反射係数を物体面上の大部分で推定可能となる。以上の処理により、最適な光源位置として m 個の光源位置が選択される。以下、それぞれの条件判定処理の詳細を述べる。

2.3.3 反射光の観測条件

反射光を観測するためには、物体面上の点 x がカメラと光源から観測可能である必要がある。そこで、点 x における反射光を観測するための条件は、その位置の観測方向ベクトル V_x 、法線ベクトル N_x 、光の照射方向ベクトル L_{px} が以下の式を満足する場合である。ここで、 V_x と N_x は光源位置 p には依存しない。

$$V_x \cdot N_x > 0, L_{px} \cdot N_x > 0. \quad (2)$$

式 (2) が成り立つ場合でも、物体の形状が複雑になると光源の位置によっては自身により影が生じ、影が計測物体の色であると判断される。そこで、一般的な計算幾何学的手法⁸⁾を用いて物体面上の点が影かどうかを判定する。具体的には、注目している点と光源との間に物体自身の他のポリゴンが存在するかどうかの交差判定を行っている。

2.3.4 拡散反射成分のみの計測

物体面上の点 x で拡散反射成分のみが観測されるための条件は、式 (2) を満足し、かつ 2 等分ベクトル R と法線 N の間の角度 θ_{rx} が以下の式を満足する場合である。

$$\theta_{rx} = \cos^{-1}(R_x \cdot N_{px}) > \theta_{th1}. \quad (3)$$

これは図5のように、法線方向と二等分ベクトル

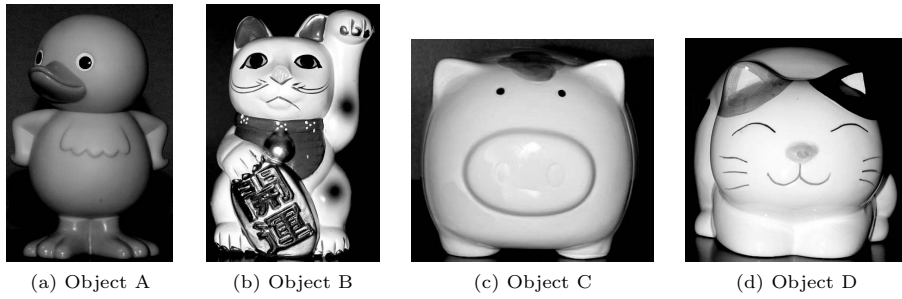
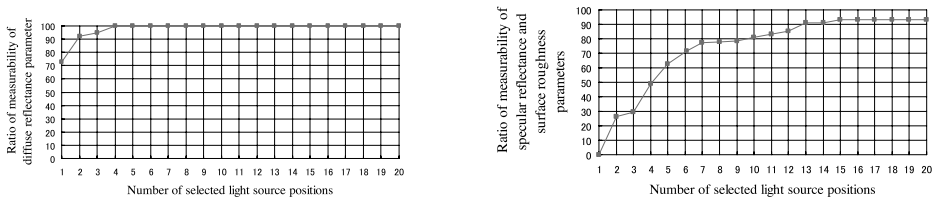


図 7 実験に用いた物体

Fig. 7 Four objects used in the experiment.



(a) Possibility of estimating the diffuse reflectance parameter

(b) Possibility of estimating the specular reflectance and the surface roughness parameters

図 8 物体 A における各反射成分の観測割合

Fig. 8 Measurability of both reflection components for Object A.

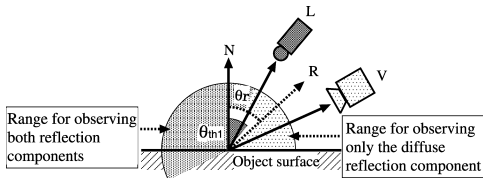


図 5 拡散反射成分の観測範囲

Fig. 5 An observation range of diffuse reflection.

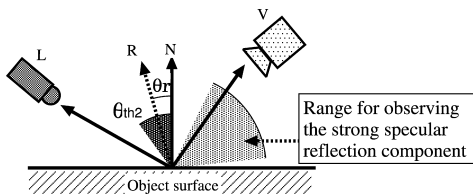


図 6 鏡面反射成分の観測範囲

Fig. 6 An observation range of specular reflection.

との間の角度 θ_{rx} が閾値 θ_{th1} より大きい場合で、鏡面反射の性質から鏡面反射成分による影響は無視できる。この場合、注目画素は拡散反射成分のみからなる画素として判断され、 D_p に数えられる。

2.3.5 強い鏡面反射成分の計測

物体面上の点 x で強い鏡面反射成分を観測するための条件は式 (2) と以下を満足する場合である。

$$\theta_{rx} = \cos^{-1}(\mathbf{R}_x \cdot \mathbf{N}_{px}) \leq \theta_{th2}. \quad (4)$$

これは図 6 のように、角度 θ_{rx} が閾値 θ_{th2} 以下

となる場合で、観測方向が正反射方向付近にあり、この場合、鏡面反射成分の性質から注目画素が強い鏡面反射成分を含む画素として判断され、 S_p に数えられる。

2.4 実験

光源選択手法の有効性を確認するために実験を行った。実験に用いた計算機は CPU : Pentium4 3.06 GHz, メモリ : 2GB, グラフィックカード : ATI Radeon X800pro である。ここで、各反射成分の観測における角度の閾値は文献 [23] など強い鏡面反射成分の観測は θ_{th2} が 20 度ほどであるとの報告があり、その値を利用する。また θ_{th1} については弱い鏡面反射成分も含めて 30 度の幅を持たせることで 60 度とした。また、Torrance-Sparrow モデルにおける光の強度 Y は 1 とした。また、図 7 に実験に使用した物体を示す。

図 8 は、物体 A に対して選択光源数と反射係数の推定可能な点の数との関係を示したものである。実験で選択された光源設置候補位置は 12 個であり、グラフの横軸は選択された光源位置の数、縦軸は各反射係数が推定可能である点の数である。図 8 (a) は拡散反射係数が推定可能な点の数と選択光源位置の数との関係を、図 8 (b) は鏡面反射係数と表面粗さ係数が推定可能な点の数と選択光源位置の数との関係をそれぞれ示している。図 8 (b) では、選択された光源位置の数

表 1 各物体における選択光源数と各反射成分の観測割合

Table 1 Measurability of both reflection components and the number of selected light sources for estimating the reflectance parameters of Objects A, B, C and D.

Measurement object	Object A	Object B	Object C	Object D
Number of selected light positions	12(5)	14(4)	10(3)	9(4)
Diffuse reflection component	100.0%	100.0%	100.0%	100%
Specular reflection component (with our method)	85.46%	91.02%	89.17%	91.72%
Specular reflection component (with 60 light positions)	92.23%	93.56%	91.27%	94.90%

が 1 個で鏡面反射特性に関する割合は 0%となっているが、これは鏡面反射係数、表面粗さ係数は 2 つの異なる鏡面反射成分が必要であるためである。拡散反射成分に関しては選択光源位置の数が 5 個で画像全体の 100%に達している。また、鏡面反射成分に関しては、全光源設置候補位置で計測した場合には全体の 92.23%で推定可能であり、本手法により最終的に 12 個の光源位置が選択され、物体面上の 85.46%で鏡面反射係数と表面粗さ係数が推定可能となった。これらの結果から 60 個すべての光源設置候補位置を使用することに比べ、大幅に少ない画像枚数で限界に近い推定率（密度）が得られることが分かる。表 1 は物体 A～D の各反射成分の観測割合と 60 個の光源設置候補位置のすべてでシミュレーションを行った場合の比較を表したものである。なお、括弧内の数は拡散反射成分を物体の全域で観測可能と判断するのに使用された光源の数を表している。この表からも分かるように、60 箇所すべての光源設置候補位置で物体を計測しなくても光源選択手法から少ない光源数で物体面上の各反射成分を密に観測できていることが確認できる。

2.5 考察

本章では実験環境における 60 個の光源位置から物体表面上で密に各反射成分が観測できるように適切な光源位置を選択する手法を提案した。ただ、光源位置がレンジファインダに対して固定してあることから、物体の形状によっては密に各反射成分を観測可能な割合が少なくなる場合があることを確認している。また、物体の形状のみから各反射成分の分離を行っているため、一方の反射特性に他方の反射特性が混在していることによる推定誤差もあると考えられる。これらを回避するためには、より自由度の高い光源設置や効果的な反射特性の分離法などが考えられ、今後、文献 17) などの手法を参考に光源選択法を検討する必要があると考えられる。

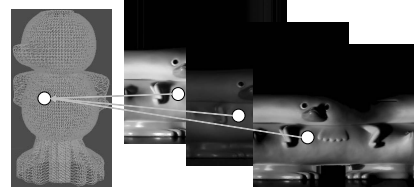


図 9 複数の画像上での対応

Fig. 9 The object point in multiple texture images.

3. Torrance-Sparrow モデルに基づく局所的な表面反射特性の推定

本章では前章で述べた光源選択手法により選択された光源位置で実際に物体を計測することにより、各反射成分を密に観測した情報から局所的なレンダリングモデルである Torrance-Sparrow モデルを用いて物体表面反射特性の推定を行う。なお、物体面上の点 x における物体表面反射特性の推定は図 9 に示すように、複数の画像上で対応する点をもとに計算される。

3.1 拡散反射係数の推定

画像 I_p において、 $i_{px,d}$ と観測時の N_x, L_{px} を式 (1) に代入することにより、拡散反射係数 P_d を求める。この画素は鏡面反射成分を含まないと考えられるため、式 (1) における鏡面反射の項は 0 とし、次式により拡散反射係数を推定する。

$$P_{dx} = \frac{C^2 i_{px,d}}{Y \cos \theta_{dx}}, \quad (5)$$

ここで、 $\theta_{rx} > \theta_{th1}$ となる画素の中から θ_{dx} が最小の画素を選択する。これにより、拡散反射成分がより強く観測可能な画素を選択できるため、推定値の信頼性が上がると考えられる。

3.2 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

2 つの異なる光源位置 p, q で得られた画像 I_p, I_q において、 $i_{px,b}$ と $i_{qx,b}$ から抽出された鏡面反射成分と観測時の N_x, L_{px}, V_x を式 (1) に代入することにより、鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を求める。ここで、推定値の信頼性を上げるため、先に示した 2

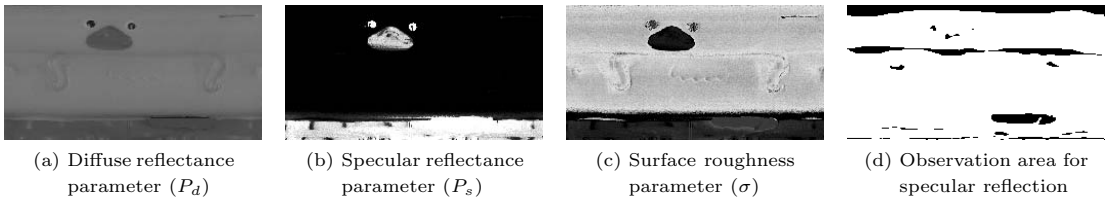


図 10 物体 A における推定された反射係数と観測割合

Fig. 10 Estimated reflectance parameters and measurability for Object A.

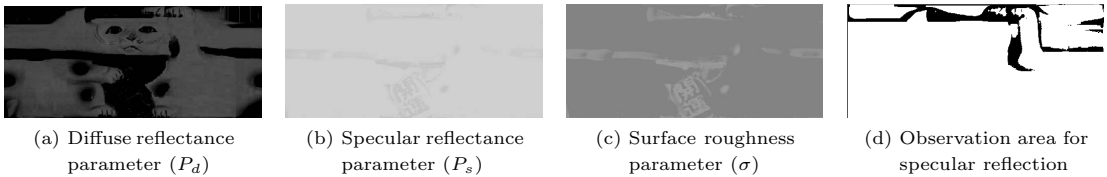


図 11 物体 B における推定された反射係数と観測割合

Fig. 11 Estimated reflectance parameters and measurability for Object B.

つの画素は輝度値の高い画素として $\theta_{rx} \leq \theta_{th2}$ となる画素の中から θ_{rx} が小さい画素とする。

まず、3.1 節で求めた拡散反射係数 P_d を用いて、2 つの画素に含まれる拡散反射成分を推定する。式 (1) から $i_{px,b}$, $i_{qx,b}$ と、この拡散反射成分の強度との差分を次式から算出することで、各画素の鏡面反射成分を抽出する。

$$\begin{cases} i_{px,s} = i_{px,b} - i_{px,d} \\ i_{qx,s} = i_{qx,b} - i_{qx,d} \end{cases} \quad (6)$$

次に、抽出した 2 つの鏡面反射成分を、式 (1) の鏡面反射項に代入することによって得られる次の連立方程式から、鏡面反射係数と物体の表面粗さ係数を計算する。

$$\begin{cases} i_{px,s} \cos \theta_{vx} = P_{sx} \exp(-\theta_{rx1}^2 / 2\sigma_x^2) \\ i_{qx,s} \cos \theta_{vx} = P_{sx} \exp(-\theta_{rx2}^2 / 2\sigma_x^2) \end{cases} \quad (7)$$

なお、物体面上では部分的に 2 回以上の強い鏡面反射成分が観測可能な点が存在するが、すべてのデータを使用することは冗長であると判断し、現状では輝度値の高い 2 つの点の情報のみを用いている。また、各画素につき鏡面反射成分の観測回数が 1 回以下である場合は係数の推定が不可能であるため、注目画素を中心とする $W \times W$ の窓内で求まっている係数の平均を注目画素の反射係数とする。また、全周計測レンジファインダの特性上、物体上部では横方向に広くテクスチャ画像が計測できない点が存在するため、上記の窓が小さい場合や値が広い範囲で欠損している場合、係数の補間が行えないため全周テクスチャ画像を縦に探索し、間の点における係数を線形に補間する。

3.3 実験

局所的な物体表面反射特性の推定法を検証するために、2 章で使用した物体 A, B についてそれぞれ図 10, 図 11 に推定結果を示す。この図は推定された各反射係数を画素値として円筒座標系で表現したものである。(a) は拡散反射係数、(b) は鏡面反射係数、(c) は表面粗さ係数であり、最大値を白としたスケールリングを行っている。(d) は鏡面反射係数と表面粗さ係数が推定された割合を視覚的に表現したものであり、黒い部分は反射係数が推定不可能であったため補間により求めたことを表している。物体 A は非一様な鏡面反射特性を持つ物体であるため、くちばし、足の部分とその他の部分では鏡面反射に違いがあることが分かる。これは図 7 (a) から明らかである。一方、物体 B はほぼ一様な鏡面反射係数を持つ物体であり、図 11 (b), (c) においてほぼ一様な係数となっている。また、図 10, 図 11 の (d) で鏡面反射成分が観測不可能であった部分に関しては、各物体において法線が鉛直上向き、あるいは鉛直下向きであることが原因であり、光源設置位置や光源選択法においてさらに検討が必要であると考えられる。なお、これらの部分の反射特性は線形補間により推定されている。

3.4 考察

本章における推定法は物体表面上での相互反射の影響については考慮されていない。なぜなら Torrance-Sparrow モデルは局所的な物体表面反射モデルであるため、物体面上での相互反射を考慮できないからである。ここでは、物体面上の相互反射の影響を調べるため、図 12 (a) に示す物体 E で反射係数の推定を行った。物体 E が計測される際には図 12 (b) に示すよう

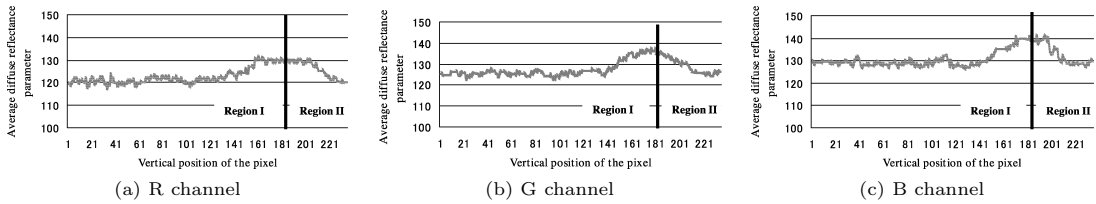


図 13 設定 1 における拡散反射係数

Fig. 13 Estimated diffuse reflectance parameter in the experimental setup 1.

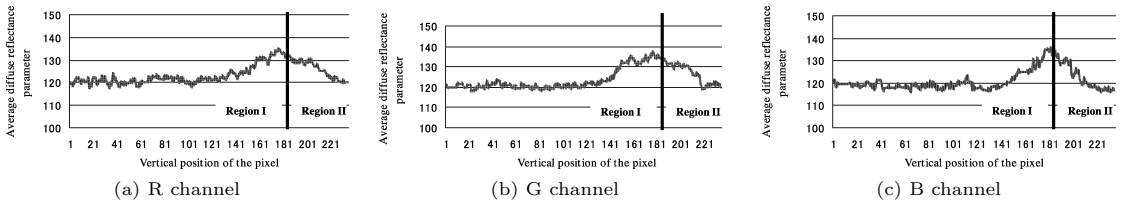


図 14 設定 2 における拡散反射係数

Fig. 14 Estimated diffuse reflectance parameter in the experimental setup 2.

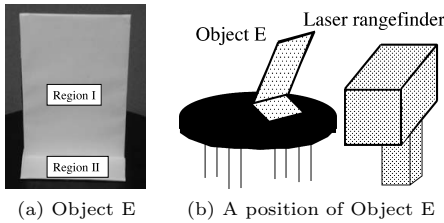


図 12 相互反射をともなう物体

Fig. 12 An object with interreflections.

に全周計測レンジファインダに対して傾け、領域 I と II の境界付近で相互反射が起こりやすい状況にしている。また、物体 E を上部の面（領域 I）と物体下部の面（領域 II）に分け、それぞれの領域に様な拡散反射特性のみを持つ紙を貼り付けた場合（設定 1）と鏡面反射特性を持つ紙を貼り付けた場合（設定 2）について実験を行う。図 13（設定 1）、図 14（設定 2）はそれぞれ物体 E における拡散反射係数の推定結果である。各グラフはそれぞれ推定された拡散反射係数の赤（R）、緑（G）、青（B）の各成分を示している。横軸は物体を計測した際の全周画像の縦方向の画素の位置を表し、縦軸は全周テクスチャ画像のある縦方向の位置に対して、横にスキャンしたときの推定された拡散反射係数の平均値であり、256 階調で表現している。ここで、様な反射成分からなる材質を貼り付けたため、推定結果は様な値になると予想されるが、領域 I と II の間で推定値が大きく変化していることが確認できる。これはその部分で相互反射が生じているためであると考えられる。

このように物体の形状が複雑になると相互反射の生

じる割合も多くなり、推定値に大きな誤差となって現れることが分かる。このような問題を解決するためには局所的なレンダリングモデルではなく、大局的なレンダリングモデルの導入が必要不可欠であると考えられる。次章以降では上記の問題をふまえ、大局的なレンダリングモデルとしてラジオシティ法とフォトンマップ法を用いた反射係数の推定法について述べる。

4. ラジオシティ法に基づく表面反射特性の推定 インバースラジオシティ法

本章では物体面上の相互反射の影響の除去を目的として、大局的なレンダリングモデルであるラジオシティ法³¹⁾に着目する。ラジオシティ法は拡散反射成分による相互反射の影響を表現するために提案されたレンダリング方式であり、インバースレンダリングの分野では拡散反射成分による相互反射の影響を除去するために有効であると考えられる。以降ではラジオシティ法に基づいた表面反射係数の推定について詳細を述べる。なお、本章では拡散反射成分は物体面上で全方向に均一に反射するため、相互反射は拡散反射成分の影響が大きいと考え、鏡面反射成分による相互反射の影響はないものと仮定する。

4.1 ラジオシティ法

ラジオシティ法は物体表面を有限個のパッチに分割したうえで、そのパッチ間の熱エネルギー（ラジオシティ）の伝達を考慮することにより相互反射を含めた反射現象を再現する手法である。ラジオシティ法における式は以下に示すものとなっている。

$$B_u = E_u + P_{du} \sum_{v=1}^{\epsilon} B_v F_{uv}, \quad (8)$$

ここで、 B_u, B_v ($1 \leq u, v \leq \epsilon$, ϵ は物体を表現する総パッチ数) はそれぞれ u 番目と v 番目のパッチ (四角形パッチ) のラジオシティ, F_{uv} はパッチ u とパッチ v のフォームファクタと呼ばれ, 両パッチ間のラジオシティの割合となる. この値はパッチの面積, 距離, 遮蔽パッチの有無などが考慮されている. E_u はパッチ u に影響を及ぼす環境光である. P_{du} はパッチ u の拡散反射係数を表す.

4.2 拡散反射係数の推定

式 (8) を変形することにより, 次の式からパッチ u の拡散反射係数 P_{du} を推定する.

$$P_{du} = \frac{B_u - E_u}{\sum_{v=1}^{\epsilon} B_v F_{uv}}, \quad (9)$$

ここで, 物体上のパッチ u における表面反射特性を求める場合には, 物体の自己発光はないものと仮定し $E_u = 0$ とする. また, ラジオシティ方程式は適用する空間が閉じている必要がある. これは周囲からの環境光を考慮するためである. しかし, 本研究では暗室で物体計測を行うため, 物体面から反射した光や光源からの光は暗室壁面に吸収されると仮定し, 暗室壁面の反射係数を 0 とすることで物体面と暗室壁面との間の環境光による影響はないものとする. この仮定はラジオシティ法的前提条件であるエネルギー保存の点には矛盾しないと考えられる. また, 光源パッチの放射照度に関してはあらかじめレンダリング画像と実画像を比較することで補正しているものとする.

提案手法では物体の形状を全周計測レンジファインダで計測するため, パッチ u, v のフォームファクタ F_{uv} は hemi cube 法⁵⁾ により既知とする. また, 計測によって得られる距離画像と表面テクスチャ画像は画素単位で 1 対 1 に対応しているため, パッチ u に対応するラジオシティ B_u は, 対応するテクスチャ画像内の画素の輝度値をもとに計算される. そこで, B_u の計算方法を説明する. 各パッチは 4 点からなり, B_u は 4 点の輝度値の和で表す. ここで, 図 15 に示すようにパッチ u が画素 s と画素 t を含んでいるとする. このとき, 全周計測レンジファインダに取り付けた光源は同時に回転しているため, 画素 s を計測したときの光源位置は $p(s)$, 画素 t を計測したときの光源位置は $p(t)$ となる. つまり, 画素 s と画素 t では計測時の光源位置が異なるため, B_u を求めるためには光源位置が $p(s)$ のときの画素 t の輝度値が必要とな

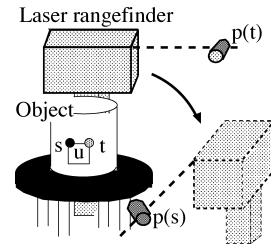


図 15 ラジオシティの算出
Fig. 15 Calculation of radiosity.

る. そこで, 注目画素が拡散反射成分のみを含むことから, ランバートの法則²⁹⁾ に基づき以下の式を用いることで, 光源位置が $p(s)$ のときの画素 t の輝度値 e_t を求める.

$$e_t = \frac{N_t \cdot L_{p(s)t}}{N_s \cdot L_{p(s)s}} e_s, \quad (10)$$

ここで, e_s は光源位置が $p(s)$ のときの画素 s の輝度値であり, N_s, N_t はそれぞれ画素 s, t の法線ベクトル, $L_{p(s)s}, L_{p(s)t}$ は光源位置 $p(s)$ での画素 s, t からの光源ベクトルを表す. なお, 観測点に光が当たっていない場合を考慮するため, $N \cdot L \leq 0$ の場合は画素 t の輝度値 e_t は 0 とする. 以上により, B_u が求まる.

以上の計算から, 式 (9) からパッチ u の拡散反射係数 P_{du} が推定される. ここで, 式 (9) の分母のラジオシティの総和に関しては, B_u を計算したときの光源位置とパッチ u との間の距離, B_v を計算したときの光源位置とパッチ v との間の距離の関係から相対的なスケールリングを行いラジオシティの総和を計算する. 最終的には, 隣接するパッチの拡散反射係数の平均を物体面上の各点の拡散反射係数とする.

4.3 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

鏡面反射係数と表面粗さ係数は式 (1) で与えられる Torrance-Sparrow モデル²⁹⁾ の鏡面反射成分の式 (第 2 項) を用いて推定する. ここで, P_d はパッチの頂点の拡散反射係数を表しているため, 先に求めたパッチの拡散反射係数 P_{du} を P_d に変換する必要がある. このため, まず各頂点が共有している 4 つのパッチの拡散反射係数の平均を求める. 次に, あらかじめ相互反射の生じない CG 物体を Torrance-Sparrow モデルでレンダリングした結果とラジオシティ法でレンダリングした結果とを比較し, 光源の強度に関するスケールリングファクタを求める. これは, Torrance-Sparrow モデルでレンダリングした場合とラジオシティ法でレンダリングした場合には光源の定義が異なるためスケー

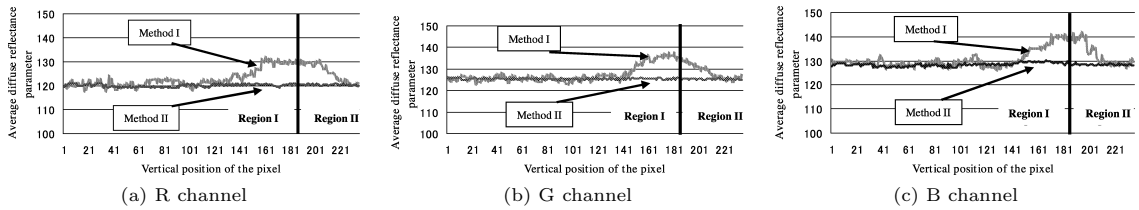


図 16 設定 1 における拡散反射係数の推定結果の比較

Fig. 16 A comparison with previous works for Object E with diffuse surfaces (experimental setup 1).

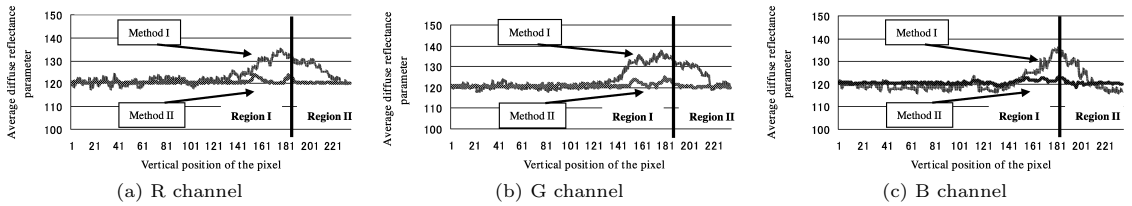


図 17 設定 2 における拡散反射係数の推定結果の比較

Fig. 17 A comparison with previous works for Object E with glossy surfaces (experimental setup 2).

リングが必要となるからである．先に求めた推定値にスケールファクタを適用することで最終的な P_d とする．

式 (1) を用いて鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を推定するためには，少なくとも点 x に対して 2 つの異なる光源位置 p, q で強い鏡面反射成分を観測した画素 $i_{px,b}, i_{qx,b}$ が必要となる．そこで，まず 2 つの異なる光源位置 p, q で得られた画像 I_p, I_q において， $i_{px,b}$ と $i_{qx,b}$ から先に推定した拡散反射係数 P_d を用いて，ラジオシティに基づき相互反射を考慮した拡散反射成分を求める．なお，式 (8) の拡散反射係数は先に述べたように最終的なレンダリング結果が等しくなるようにあらかじめスケールされている．次に，抽出された鏡面反射成分と観測時の N_x, L_{px}, V_x を式 (1) に代入することにより，鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を求める．ここで，推定値の信頼性を上げるため， $i_{px,b}$ と $i_{qx,b}$ の輝度値は複数の光源位置での観測値の集合内で高い順から 2 つを用いる．

4.4 実験

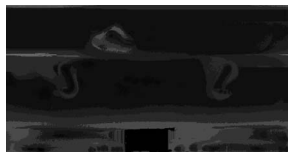
インバースラジオシティ法による反射係数推定の有効性を検証するための実験を行う．まず，相互反射の影響が除去できているかを確認するために 3 章の物体 E を用いた予備実験を行う．また，2 章の物体 A, B に対してインバースラジオシティ法を適用した結果について述べる．

4.4.1 予備実験

3 章と同様の実験環境において拡散反射係数の推定結果を図 16 (設定 1)，図 17 (設定 2) に示す．グラ

フの縦軸，横軸は 3 章で示したものと同様である．また，比較のため，3 章の局所的な推定法を適用した場合 (手法 I) の結果とインバースラジオシティ法 (手法 II) を載せている．

一様な拡散反射面に対する推定結果である図 16 において，手法 I では領域 I, II の境界付近で推定値が高くなっており，手法 I が相互反射を考慮していないために反射係数の忠実な推定が行えていないことが確認できる．一方，提案手法では領域 I, II の境界付近において手法 I に比べ推定値に変化がなく，相互反射を考慮することによって反射係数の正しい推定が行えていることが分かる．また，一様な鏡面反射面を対象とした推定結果である図 17 においても，図 16 と同様に手法 II が手法 I に比べ相互反射の影響が除去できていることが分かる．しかし，これは拡散反射特性に基づく相互反射の影響を除去したものであり，鏡面反射成分による相互反射の影響が若干残っていることが確認できる．たとえば，図 17 の領域 I, II の境界線付近で手法 II における推定値がやや高い値を示している部分がある．これは鏡面反射成分による相互反射が生じたものと考えられる．鏡面反射成分は指向性を持ち，図 17 (a) ~ (c) において偏った部分でその影響が現れているのが分かる．なお，図 16，図 17 において，手法 I に比べ手法 II による拡散反射係数のグラフが滑らかになっている．これは，手法 II ではラジオシティ法をもとにパッチ単位で係数を推定し，頂点単位の係数に変換する場合に頂点を囲むパッチの平均値を最終的な係数値にしているためである．



(a) Object A



(b) Object B

図 18 推定された拡散反射係数における手法 I と手法 II の比較

Fig. 18 Difference between estimated diffuse reflectance parameters with Method I and II.

4.4.2 一般的な物体における反射特性の推定

次に、図 7(a), (b) の物体 A, B について各反射係数の推定を行った。ここでは物体 A, B に関して手法 I と手法 II での推定値の差について考察を行う。図 18(a), (b) は物体 A, B の拡散反射係数の推定値において手法 I との推定値の差を全周画像で表したものである。この差は各 RGB 成分の差の合計の最大値が 255 になるようにスケールし、グレースケールで表現している。図 18(a) では、嘴周辺、首、足などの部分で手法 I と比べて推定値の差が大きくなっている。これは手法 I で問題となった拡散反射による相互反射の影響が手法 II では除去できていることを示している。また、図 18(b) でも同様に相互反射が生じていると考えられる部分で手法 I との差が大きく、手法 II が拡散反射成分による相互反射の影響を除去できていることが確認できる。また、図 16, 図 17 の結果でも述べたように、手法 II では頂点の拡散反射係数の推定値は周りのパッチの平均値となっている。そのため、鏡面反射成分による相互反射の影響を含んだ値が平滑化され、手法 I と比べやや大きな差になったと考えられる。

4.5 考察

本章では相互反射の影響を除去するためにラジオシティ法に基づく推定法を述べた。ラジオシティ法は拡散反射成分による相互反射を計算するうえで有効なレンダリング方式であるため、インバースレンダリングの手法においても良好な結果となったことが確認できた。しかしながら、ラジオシティ法は鏡面反射成分による相互反射の影響は考慮しないために、別途鏡面相互反射のためのレンダリングが必要となる。実験においても鏡面反射が生じる部分で相互反射の影響が残っていることが分かる。これは本研究における光源選択法で拡散反射成分を観測した場合、各反射成分の相互反射の影響が含まれており、ラジオシティ法では鏡面相互反射の影響を取り除くことができないため、誤差の原因になっていると考えられる。そこで、次章ではすべての反射現象を忠実に再現するレンダリング方式であるフォトンマップ法に着目し、インバースレンダ

リングの枠組みで各相互反射の影響を除去した推定結果を得ることを考える。

5. フォトンマップ法を用いた表面反射特性の推定 インバースフォトンマップ法

あらゆる反射現象を忠実に再現するためのレンダリング方式として様々な手法が存在するが、なかでもフォトンマップ法¹³⁾ はメモリ使用量、計算速度、画質などがこれまでのレンダリング方式よりも優れており、近年様々な研究で注目されている。さらに、グラフィックハードウェア (GPU) の発達により、これまでは不可能であった大局的レンダリング方式の実時間化が進められている。本章では、インバースレンダリングの次のステップとして、前章で問題となった鏡面反射成分による相互反射の影響の除去を目的とする。さらに、フォトンマップ法によるレンダリング計算を GPU 上で行うことにより、反射係数の推定時間が大幅に減少することを示す。

以下ではまず、フォトンマップ法を説明し、次にフォトンマップ法を用いて初期値から反復法によって推定値の精度を上げる方法について説明し、最後に GPU による計算速度の向上について述べる。

5.1 フォトンマップ法

フォトンマップ法¹³⁾ は、次に示す Kajiya のレンダリング方程式¹⁴⁾ に基づいて物体のレンダリングを行う手法である。

$$L(x, \vec{\omega}) = L^e(x, \vec{\omega}) + L^r(x, \vec{\omega}), \quad (11)$$

$$L^r(x, \vec{\omega}) =$$

$$\int_{\Omega} f(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L^o(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}', \quad (12)$$

ここで、 L^e , L^r , L^o , f はそれぞれ、発光照度、反射照度、入射照度、BRDF を表している。なお、物体は自己発光はしないものと仮定し、放射照度 L は L^r に等しいとする。また、その他の変数を表 2 に示す。フォトンマップ法は上記の式を用いた 2 パスレンダリング方式となっており、まず多数のフォトン光源の位置から環境へ散布する。このとき散布されたフォトンは到達した物体面上の点での反射特性に従って、物

表 2 フォトンマップ法における変数の定義
Table 2 Symbols in photon mapping.

x	Surface point
\vec{n}	Unit vector of surface normal at x
$\vec{\omega}$	Direction from outgoing radiance
$\vec{\omega}'$	Direction of incoming radiance
$d\vec{\omega}$	Differential solid angle
Ω	Hemisphere of directions

体面上で反射するか吸収されるかが決定される．なお，フォトンがどのような経路を進むかはモンテカル口光線追跡法¹⁴⁾によって追跡される．モンテカル口光線追跡法では反射したフォトンに対してのみ再帰的な追跡が行われる．2パス目の処理としては，環境中へのどの程度フォトンが散布されているのかを推定する．このときカメラ位置からモンテカル口光線追跡法を用いて光線が当たった物体面上の点でのフォトンの数を計算する．このようにフォトンマップは環境中へのフォトンの分布として与えられている．

式 (11), (12) は理論的なモデルであり，計算の際にそのまま用いることは不可能であるため，物体面上の点 x における輝度値 \hat{i}_x は，実際には以下のように表される．

$$\hat{i}_x = I_x \left\{ \frac{P_{dx}}{\pi} + P_{sx} K(\theta_{vx}, \theta_{rx}, \sigma_x) \right\}, \quad (13)$$

ここで， I_x は入射照度を表し， $K(\theta_{vx}, \theta_{rx}, \sigma_x)$ はレンダリング方程式における鏡面反射の項を表している． I_x については，その強度は物体面上の点 x に到達したフォトンの数によって確定される．本手法では計算量が膨大にならないよう，1個のフォトン は物体面上で最大3回まで反射するように設定する．なお，式 (13) 中の $K(\theta_{vx}, \theta_{rx}, \sigma_x)$ は，対象とする物体が異方性反射となるか，等方性反射となるかによって推定すべき係数の数が変化する．本研究では物体が等方性反射の場合のみを扱うが，異方性反射の場合であっても，若干の式変形で対応できるため将来的には拡張は容易であると考えられる．

なお，フォトンマップ法を用いるためには物体表面の反射特性が既知である必要がある．そのため，本手法では前章で述べたインバースラジオシティ法により，初期値 $P_{dx}^0, P_{sx}^0, \sigma_x^0$ を求めている．

5.2 表面反射係数の反復推定

本手法では表面反射係数の推定に反復計算を用いる．この場合，複数の変数を一度に推定することも可能であるが，収束が遅く計算量が膨大になるという問題がある³⁾．そこで，推定処理を各成分ごとの2つの処理に分ける．図19はフォトンマップ法による表面反射

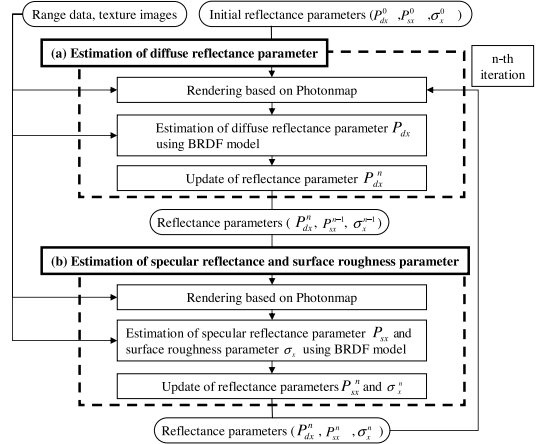


図 19 フォトンマップ法による反射係数推定処理の流れ
Fig. 19 Flow diagram of estimating surface reflectance properties based on photon mapping.

係数の推定における処理の流れを示しており， n 回目の繰返しで推定される各反射係数は $P_{dx}^n, P_{sx}^n, \sigma_x^n$ と表す．これらの処理を繰り返し適用することで，表面反射係数がある値に収束する．次の式は図19中の(a), (b) 2つの処理において用いられ，テクスチャ画像内の各画素ごとに式 (14) を最小化することで各反射係数の推定を行う．

$$E(P_{dx}, P_{sx}, \sigma_x) = \sum_{j=1}^q (i_{jx} - \hat{i}_{jx})^2, \quad (14)$$

ここで， i_{jx} は， j 枚目のテクスチャ画像 I_j 内の物体面上の点 x に対応する画素値を表す． \hat{i}_{jx} は，式 (13) を用いて光源位置 j における物体面上の点 x で算出された放射照度を表している． q は点 x において選択された光源で計測した画像のうち， T_{none} 以外に分類される画素となる画像枚数を表しており，光源推定に使用するサンプル数である．

拡散反射係数の推定

拡散反射係数 P_{dx} は T_{diff} だと判断された画素を用いて推定される．ここで， $P_{dx}^0, P_{sx}^0, \sigma_x^0$ は初期値として最初の \hat{i}_{jx} を決定するために使用される．また，この場合，鏡面反射成分は観測されていないと判断されているため，式 (13) における鏡面反射の項は無視される ($K(\theta_{vx}, \theta_{rx}, \sigma_x) = 0$)．なお，インバースラジオシティ法で求めた初期値とフォトンマップ法における係数との間にはスケールファクタを設定しており，その値は両レンダリング法でレンダリングした際のサンプル画像を比較することによって求めている．

鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

先に求めた拡散反射係数は、微小であるが鏡面反射成分を含んでいる可能性がある。これは物体面上の点 x に到達する光子は、点 x 以外の他の点で鏡面反射成分としての性質を有したものが点 x に到達したと考えられるためである。そのため、実際に観測される画素値と計算により推定された画素値には差がある。そこで、ここでは求めた拡散反射係数を用いて新たに鏡面反射係数と表面粗さ係数を推定する。具体的には、まず、注目する点 x に関する q 個のサンプル画素に対して、レンダリング結果の画素値と実画像の画素値を比較する。ここで、その差の大小によって、鏡面反射係数と表面粗さ係数のどちらか一方を σ_{step} だけ変更した場合、どちらの変更が誤差を減少させるかを比べ、誤差が小さくなる方の係数の更新を行う。推定された係数は再び拡散反射係数を推定するために用いられる。

なお、鏡面反射係数 P_{sx}^n 、表面粗さ係数 σ_x^n は T_{both} と判断された画素を用いて推定される。ここで、先に推定された P_{dx}^n は新しい拡散反射係数として使用される、また P_{sx}^0, σ_x^0 は、この処理での初期値として最初の \hat{i}_{jx} を決定するために使用される。

ここで、上記の 2 つの処理は各反射係数を推定するために反復されるが、実画像とレンダリング画像との差が必ずしも収束するとは限らない。そこで、経験的に反復回数の上限を 50 回とし、その中で式 (14) の値が最小となるときに反射係数を最終的な結果とする。

5.3 GPU による計算速度の向上

グラフィックハードウェア (GPU) の進歩にともない、これまで CPU で計算していた部分を GPU で行わせることによって大幅に計算時間を短縮することが可能となっている。特に CG の分野におけるレンダリング技術の高速化が目立っており、これまで多大な時間を要していた大局的レンダリング法のレンダリング時間を劇的に短縮することが可能となっている。最近では光子マップ法におけるレンダリング計算を GPU 上で行う研究がさかんであり、大局的なレンダリングが実時間でできるほどにまでなっている^{24),25)}。本研究において、表面反射特性の推定をインパース光子マップ法で行う場合、実画像とレンダリング画像の比較を行っているため、推定結果を得るまでに多大な時間を要するという問題がある。そこで、GPU による光子マップ法を用いることにより、大幅に推定時間を短縮することが可能であると考え、その実

装を行った。これにより計算時間を最大で 90%ほど短縮することができた。具体的な GPU 上での実装としては、直接光によるレンダリングにパースペクティブシャドウマップ (PSM) 法を用い、相互反射などの間接光によるレンダリングに GPU の高い並列計算性を利用して CPU で行う場合よりもさらに多くのサンプリングによる計算を高速に行っている。通常的光子マップ法では少ない光子や少ないサンプリング数の下では低周波のノイズが観測されることが問題となっていたが、この方法を用いることでノイズの少ないレンダリング結果を得ることが可能となっている。なお、現状では光線追跡の部分は CPU で行っているが、この部分についても最近の研究²⁴⁾ で実装が進んでいるため、今後の課題としたい。

5.4 実験

本節では、インパース光子マップ法の有効性を検証する。まず、4 章と同様に物体 E を用いた予備実験を行い、相互反射の影響の除去を確認する。次に、図 7(c), (d) の物体 C, D について反射係数の推定実験を行った。これらの物体は複雑な形状を有し、鏡面反射特性を持つ物体である。また、光子の散布量が少ない場合、低周波のノイズが誤差として現れるため経験的に光子の数はすべての物体において 200 万個とした。なお、各画素につき鏡面反射成分の観測回数が 1 回以下である場合は係数の推定が不可能であるため、全周テクスチャ画像を横に探索し、推定不可能な点に対して反射係数を線形補間した。

5.4.1 予備実験

まず、3 章と同様の実験環境で物体 E に対して予備実験を行った。ここでは比較のため、次に示す 3 つの手法による推定を行う。

手法 I 局所的レンダリング法による推定法³⁴⁾

手法 II インパースラジオシティ法による推定法²²⁾

手法 III インパース光子マップ法による推定法³⁵⁾

図 20, 図 21 (a) ~ (c) が予備実験 1, 2 における比較結果である。各グラフは 3 章, 4 章の予備実験と同様である。図 20 では、手法 I において領域 I と領域 II の境界付近で推定値が高くなっており、相互反射をまったく考慮していないために反射係数の忠実な推定が行えていないことが分かる。一方、手法 II と手法 III では正しく反射係数の推定が行えていることが確認でき、両者に差は見られない。図 21 では、手法 II においても領域 I と領域 II の境界付近で推定値がやや高くなっている。これは手法 II では拡散反射による相互反射の影響は除去できてはいるが、鏡面反射によ

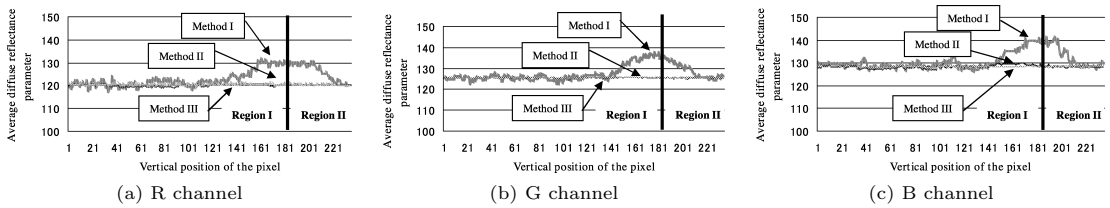


図 20 設定 1 における各手法の比較結果

Fig. 20 A comparison among three methods for Object E with diffuse surfaces (experimental setup 1).

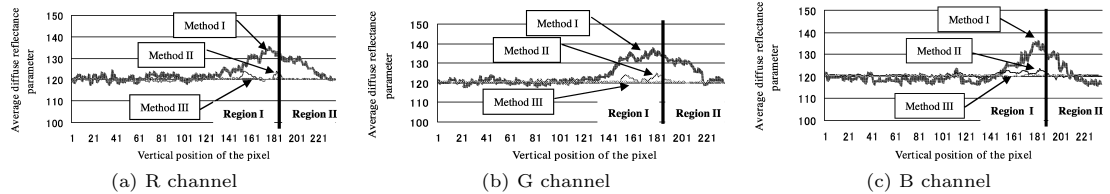


図 21 設定 2 における各手法の比較結果

Fig. 21 A comparison among three methods for Object E with glossy surfaces (experimental setup 2).

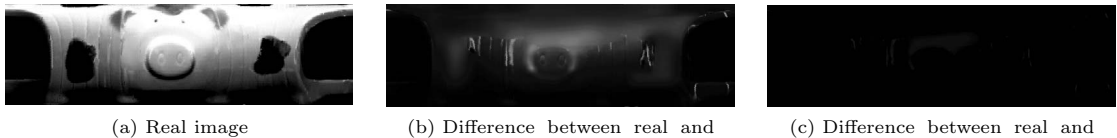


図 22 物体 C における実画像と合成画像との比較

Fig. 22 Differences between real and synthetic cylindrical images for Object C.

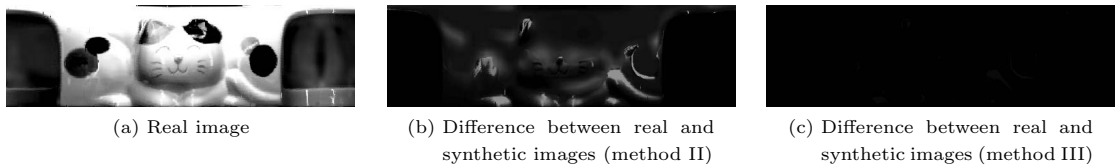


図 23 物体 D における実画像と合成画像との比較

Fig. 23 Differences between real and synthetic cylindrical images for Object D.

る相互反射の影響が残っているためである．手法 III では領域 I と領域 II の境界付近において手法 II に比べ推定値に変化がなく，両反射成分による相互反射の影響を考慮することによって反射係数の正しい推定が行えていることが分かる．

5.4.2 一般的な物体における反射特性の推定

次に，図 7(c)，(d) の物体 C，D に関して手法 II と手法 III での推定値の差について考察を行う．

図 22，図 23 は物体 C，D において手法 II と手法 III による推定値をもとにレンダリングした結果と実画像との差を全周画像で表したものである．それぞれの図において，(a) はレンジファインダで計測された全周実画像，(b)，(c) は手法 II と手法 III による推定

値をもとに，(a) を計測したときの実際の光源位置に仮想光源を設定し，仮想光源を回転させたときのレンダリング結果から作成した全周画像と (a) との差を表している．レンダリング手法はいずれの場合もフォトマップ法を使用している．

物体 C，D は表面が非一様な拡散反射特性とほぼ一様な鏡面反射特性を持っている．図 22，図 23 の両物体ともに，手法 II では首，足などの相互反射が生じる部分で実写画像との差が大きくなっている．手法 II は鏡面反射による相互反射の影響を除去していないため，拡散反射係数の推定値が大きくなり正しくレンダリングできなかったと考えられる．一方，手法 III ではそのような影響は除去できており，ほぼ実写画像と

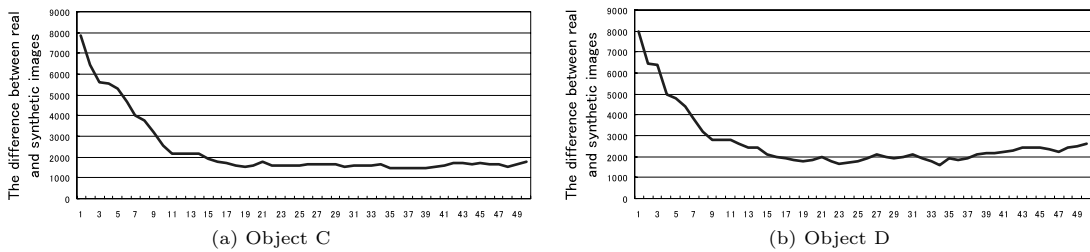


図 24 物体 C と D の誤差と反復回数

Fig. 24 Relation between the differences and the count of iteration for Object C and D.

表 3 実画像と合成画像との比較結果

Table 3 Average and variance of differences between real and synthetic images.

		Object A	Object B	Object C	Object D
Average	Method I	30.3	40.1	21.7	29.3
	Method II	17.7	20.1	8.7	13.3
	Method III	1.11	1.06	0.51	0.92
	Method III with GPU	0.99	1.12	0.44	0.90
Variance	Method I	709.1	812.9	653.3	698.0
	Method II	501.9	485.4	493.3	375.2
	Method III	6.8	8.0	3.2	9.8
	Method III with GPU	5.5	7.7	3.3	8.6
Computational cost (hh:mm)	Method I	0:20	0:26	0:23	0:18
	Method II	3:32	3:51	3:11	2:34
	Method III	4:39 (1:07)	4:58 (1:07)	4:43 (1:32)	4:21 (1:47)
	Method III with GPU	3:48 (0:16)	3:59 (0:16)	3:27 (0:08)	2:47 (0:13)

同様の結果となっている。しかしながら、まだ部分的には誤差がある。これは、複雑な形状を有している場合、多重反射の回数が増加するためである。手法 III では相互反射の回数は計算量の増加を防ぐために 3 回という制約を設けている。そのため、相互反射の回数が増えるような形状の場合は実画像との差が大きくなると考えられる。また、仮想光源のモデル化における誤差もあると考えられる。図 24 は物体 C, D における実画像と合成画像の差とパラメータ推定における反復回数との関係を表している。誤差が最小となる場合の反復回数は物体 C, D についてそれぞれ 35 回と 34 回であった。このグラフから、処理の反復回数により誤差は減少していくが、途中で振動が起きていることが分かる。これについては各反射係数の推定を独立して行うのではなく、一度に計算することによって軽減できる可能性があると考えられる。表 3 は手法 I~III における実画像と合成画像の差の平均と分散を RGB の合計として表している。なお、それぞれの手法における推定時間を表すとともに、手法 III においては GPU を利用した場合の結果について示している。ここで、手法 III は手法 II の結果が初期値とな

るため、初期値が求まってからのインバースフォトンマップ法にかかった推定時間を括弧内に表している。この表から明らかなように手法 III は手法 I, II に比べ誤差が大幅に減少しており、手法 III は各反射成分による相互反射の影響をうまく除去できていることが確認できる。また、GPU を利用した手法 III の結果については、推定結果がそれほど変わらないにもかかわらず、計算時間が減少していることが分かる。このことからフォトンマップ法のレンダリングを GPU 上で計算することは有効であることが確認できる。

最後に、仮想化物体の任意光源下でのレンダリング結果を示す。図 25 (a), (b) はそれぞれ物体 C, D において推定された各反射係数をもとに、仮想光源を用いてレンダリングを行った例である。それぞれの図は仮想光源を物体の正面に配置し、物体の重心を中心として点光源を回転させたものである。また、これらのレンダリング結果はフォトンマップ法を用いてレンダリングされている。各物体とも計測時の光源の影響が除去され仮想光源による照明の影響をほぼ忠実に表現している。

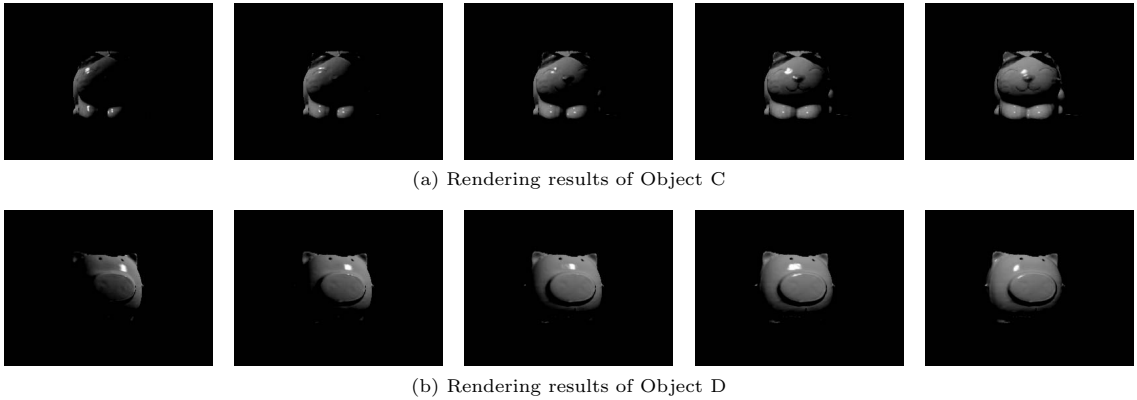


図 25 任意照明条件下での物体 C, D のレンダリング画像

Fig. 25 Rendering results of Object C and D under arbitrary illumination conditions.

6. あとがき

本論文では、物体の反射成分が密に観測可能となるように物体計測時の最適な光源位置を複数決定し、複数のテクスチャ情報と距離画像から、物体表面反射特性を密に推定する手法を提案した。具体的にはインバースレンダリングの枠組みで 3 つの手法を述べた。1 つは局所レンダリングモデルによるフィッティング手法と残りの 2 つは大局的なレンダリング手法（ラジオシティ法とフォトンマップ法）である。これにより物体面上での各反射成分による相互反射を考慮した反射特性の推定が可能となった。本手法により、複雑な形状を有する物体や部分的に異なる表面反射特性を持つ物体を仮想化した場合に仮想環境内で陰影矛盾のない忠実な物体表現が可能となる。さらに、フォトンマップ法に関しては GPU を用いることによって計算時間が減少することを確認した。

今後は、距離画像などのノイズ除去によるロバストな処理を施す。また、フォトンマップ法の計算時間が GPU により減少したことを確認したので、光線追跡部分の GPU 上での実装や推定の初期値を手法 I の結果をもとに効率的に設定し、実時間で忠実な反射特性の推定を行えるよう、アルゴリズムの改良を行う予定である。さらに、現状では推定の反復処理中に誤差の振動が見られるが、この点に関しては各反射係数の高速な同時推定などのアルゴリズムの改良を行う予定である。今回の実験では物体を鉛直方向の軸周りでしか測定しないため、物体に欠損部が見られるが、今後、より自由度の高い物体計測を行うことによって物体全体の形状を得るとともに反射特性を厳密に推定する手法を開発する予定である。

参考文献

- 1) Azuma, R.T.: A survey of augmented reality, *Presence*, Vol.6, No.4, pp.355–385 (1997).
- 2) Baribeau, R., Rioux, M. and Godin, G.: Color reflectance modeling using a polychromatic laser sensor, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.14, No.2, pp.263–269 (1992).
- 3) Boivin, S. and Galgalowicz, A.: Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image, *Proc. SIGGRAPH '01*, pp.107–116 (2001).
- 4) Brooks, M.J. and Horm, B.K.P.: Shape and Source from a Single Image, *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp.932–936 (1985).
- 5) Cohen, M.F. and Greenberg, D.P.: A radiosity solution for complex environments, *Proc. SIGGRAPH '85*, pp.31–40 (1985).
- 6) Debevec, P.E. and Malik, J.: Recovering high dynamic range radiance maps from photographs, *Proc. SIGGRAPH '97*, pp.369–378 (1997).
- 7) Drettakis, G., Robert, L. and Bougnoux, S.: Interactive common illumination for computer augmented reality, *Proc. Eurographics Rendering Workshop '97*, pp.45–56 (June 1997).
- 8) Foley, J., van Dam, A., Feiner, A. and Hughes, J.: *Computer Graphics Principles and Practice*, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company (1993).
- 9) Fournier, A., Gunawan, A.S. and Romanzin, C.: Interactive common illumination for computer augmented reality, *Proc. Graphics Interface '93*, pp.254–262 (1993).
- 10) Horm, B.K.P.: Height and Gradient from Shading, *Int. Journal of Computer Vision*,

- Vol.5, No.1, pp.584–595 (1990).
- 11) Hougen, D. and Ahuja, N.: Estimation of the Light Source Distribution and Its Use in Integrated Shape Recovery from Stereo and Shading, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision '93*, pp.148–155 (1993).
 - 12) Ikeuchi, K. and Sato, K.: Determining reflectance properties of an object using range and brightness images, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.13, No.11, pp.1139–1153 (1991).
 - 13) Jensen, H.W.: *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, 1st edition, A K Peters, Ltd. (2001).
 - 14) Kajiyama, J.T.: The rendering equation, *Proc. SIGGRAPH '86*, pp.143–150 (1986).
 - 15) Kay, G. and Caelli, T.: Inverting an illumination model from range and intensity maps, *CVGIP: Image Understanding*, Vol.59, pp.183–201 (1994).
 - 16) Lee, C.H. and Rosenfeld, A.: Improved Methods of Estimating Shape from Shading Using the Light Source Coordinate System, *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Vol.26, pp.125–143 (1985).
 - 17) Lensch, H.P.A., Lang, J., Sa, A.M. and Seidel, H.P.: Planned Sampling of Spatially Varying BRDFs, *Proc. Eurographics '03*, pp.473–482 (2003).
 - 18) Lin, S. and Lee, S.W.: Estimation of diffuse and specular appearance, *Proc. 7th Int. Conf. on Computer Vision*, Vol.2, pp.855–860 (1999).
 - 19) Lin, S. and Lee, S.W.: A representation of specular appearance, *Proc. 7th Int. Conf. on Computer Vision*, Vol.2, pp.849–854 (1999).
 - 20) Loscos, C., Drettakis, G. and Robert, L.: Interactive virtual relighting of real scenes, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.6, No.4, pp.289–305 (2000).
 - 21) Lu, J. and Little, J.: Reflectance function estimation and shape recovery from image sequence of a rotating object, *Proc. 5th Int. Conf. on Computer Vision*, pp.80–86 (1995).
 - 22) Machida, T., Yokoya, N. and Takemura, H.: Surface reflectance modeling of real objects with interreflections, *Proc. 9th Int. Conf. on Computer Vision*, pp.170–177 (Oct. 2003).
 - 23) Marschner, S.R.: Inverse Rendering for Computer Graphics Algorithm for Progressive Radiosity, Ph.D. Thesis, Cornell University (1998).
 - 24) Purcell, T.J., Buck, I., Mark, W.R. and Hanrahan, P.: Ray Tracing on Programmable Graphics Hardware, *ACM Trans. Graphics*, pp.703–712 (2002).
 - 25) Purcell, T.J., Donner, C., Cammarano, M., Jensen, H.W. and Hanrahan, P.: Photon Mapping on Programmable Graphics Hardware, *Proc. Graphics Hardware*, pp.265–272 (2003).
 - 26) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: On the Relationship Between Radiance and Irradiance: Determining the Illumination from Images of a Convex Lambertian Object, *Journal of the Optical Society of America*, Vol.18, No.10, pp.2448–2459 (2001).
 - 27) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Illumination from Shadows, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.25, No.3, pp.290–300 (2003).
 - 28) Sato, Y., Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K.: Object shape and reflectance modeling from observation, *Proc. SIGGRAPH '97*, pp.379–387 (1997).
 - 29) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *Journal of Optical Society of America*, Vol.57, No.9, pp.1105–1114 (1967).
 - 30) Yokoya, N. and Levine, M.D.: Range image segmentation based on differential geometry: A hybrid approach, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.11, No.6, pp.643–649 (1989).
 - 31) Yu, Y., Debevec, P.E., Malik, J. and Hawkins, T.: Inverse global illumination: Recovering reflectance models of real scenes from photographs, *Proc. SIGGRAPH '99*, pp.215–227 (1999).
 - 32) Yu, Y. and Malik, J.: Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs, *Proc. SIGGRAPH '98*, pp.207–217 (1998).
 - 33) 佐藤洋一, 向川康博: インバースレンダリング, 情報処理学会研究報告 CVIM-145, pp.65–76 (2004).
 - 34) 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和: 複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定, 信学論 (D-II), Vol.J84-D-II, No.8, pp.1873–1881 (2001).
 - 35) 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和: 実物体のモデル化のための相互反射を考慮した表面反射特性の推定, 信学論 (D-II), Vol.J88-D-II, No.8, pp.1450–1459 (2005).

(平成 17 年 8 月 31 日受付)

(平成 18 年 3 月 17 日採録)

(担当編集委員 齋藤 英雄)



町田 貴史

平成 12 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。平成 14 年同大学中退。平成 14 年より大阪大学サイバーメディアセンター助手。博士(工学)。コンピュータビジョン・コンピュータグラフィックスの研究に従事。電子情報通信学会, ACM, IEEE 各会員。



竹村 治雄(正会員)

昭和 57 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 62 年同大学大学院博士後期課程単位取得退学。同年(株)ATR 入社。3 次元ユーザインタフェース, CSCW, 仮想現実の研究に従事。平成 6 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。工学博士。平成 13 年大阪大学サイバーメディアセンター教授。電子情報通信学会, IEEE, ACM, 日本 VR 学会各会員。



横矢 直和(正会員)

昭和 49 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 54 年同大学大学院博士後期課程修了。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。昭和 61~62 年マツギル大学知能機械研究センター客員教授。平成 4 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, 同大学情報科学研究科教授。平成元年本学会論文賞受賞。工学博士。電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本認知科学会, 映像情報メディア学会, 画像電子学会, 日本 VR 学会, IEEE, ACM SIGGRAPH 各会員。