

NAIST-IS-MT9851099

修士論文

物体の CG 表現のための
照明条件の選択による表面反射特性の推定

町田 貴史

2000年2月14日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

町田 貴史

審査委員： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

物体の CG 表現のための 照明条件の選択による表面反射特性の推定*

町田 貴史

内容梗概

実環境の物体をコンピュータグラフィクス (CG) で表現する際の有効な手法として、実写画像をテクスチャとして幾何形状に張り付けるテクスチャマッピング法がある。この手法では実写画像が撮影時の照明の影響を受けているため、物体を CG で表現する際に、仮想環境内の照明条件と実環境での照明条件が大きく異なる場合に合成結果が不自然なものとなる。従来からこの問題に対して、仮想環境内の照明による影響を忠実に表現するために、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推定する研究がいくつか行われている。しかし反射成分の 1 つである鏡面反射成分は観測方向、光の照射方向、物体の形状に依存して観測されるため、物体面上のすべての点で鏡面反射成分を観測することは困難であり、反射特性を推定する際、物体の形状や物体表面の特性に対して様々な仮定が設定されている。そこで本論文では、物体の形状や表面特性を限定しない手法を提案する。反射成分を密に観測するために物体の形状をもとに光の照射方向に関する照明条件を決定する。そして決定された複数の照明条件下で表面のテクスチャ画像を取得し、カラー反射モデルを計測データに当てはめることで物体表面の反射特性を物体面上の各点で推定する。このため、従来手法と比べ様々な形状や複数の材質から構成された物体に対しても忠実な推定が可能である。実験では、推定された反射特性をもとに物体を CG 合成することで、様々な仮想環境内の照明条件に対して忠実に物体が表現されることを示す。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9851099, 2000 年 2 月 14 日.

キーワード

コンピュータグラフィクス, 画像処理, 反射特性の推定, Torrance-Sparrow モデル,
照明条件, 全周計測レンジファインダ

Estimation of Surface Reflectance Properties by Selecting Multiple Illumination Conditions for Realistic Representation*

Takashi Machida

Abstract

Texture mapping is effective to reproduce a real object in computer graphics(CG), because it does not require a detailed geometry of the object. However, since a real image of the object is used as a texture of the object, a problem occurs, i.e., the appearance of the object is not reproduced appropriately when lighting conditions of real and CG environments are not consistent. To overcome this problem, it is necessary to estimate reflectance properties of object surfaces. This paper describes a method of densely estimating non-uniform surface reflectance properties of an object with convex and concave surfaces using registered range and surface color texture images obtained by a laser rangefinder. The proposed method determines positions of light to take color images for discriminating diffuse and specular reflection components of surface reflection. The Torrance-Sparrow model is employed to estimate reflectance parameters by using color images under multiple illumination conditions. Experiments show the usefulness of the proposed method.

Keywords:

computer graphics, image processing, estimation of reflectance properties, Torrance-Sparrow model, illumination condition, 3D digitizer

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9851099, February 14, 2000.

目次

1. はじめに	1
2. 光学的整合性に関する従来研究と本研究の方針	3
2.1 光学的整合性に関する技術課題	3
2.2 反射特性推定の従来手法	5
2.2.1 物体表面の反射モデル	5
2.2.2 一様な反射特性の推定法	9
2.2.3 非一様な反射特性の推定法	10
2.3 本研究の方針	10
3. 物体の反射特性の推定	12
3.1 物体形状と物体表面テクスチャ画像の取得	14
3.2 反射成分の計測のための照明条件の選択	14
3.2.1 反射光が観測されるための条件	18
3.2.2 拡散反射成分の観測条件	23
3.2.3 鏡面反射成分の観測条件	23
3.3 反射特性の推定	24
3.3.1 拡散反射係数の推定	25
3.3.2 鏡面反射成分の抽出	25
3.3.3 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定	26
4. 実験	28
4.1 実物体の計測	28
4.2 反射係数の推定	33
4.3 物体のCG合成	39
4.4 実験結果のまとめと考察	43
4.4.1 光源の特性に関する問題	43
4.4.2 相互反射による問題	44

5. むすび	45
謝辞	46
参考文献	47

目 次

1	シェーディングの有無による物体表現の比較	4
2	シャドウイングの有無による物体表現の比較	4
3	拡散反射成分の性質	7
4	鏡面反射成分の性質	7
5	提案手法における処理の流れ	13
6	形状計測装置の概観と物体の計測	15
7	実物体の計測結果と 3 次元再構成例	16
8	形状計測装置周囲の光源設置候補位置	17
9	物体面に光が到達するかの判定	19
10	影が検出されるかの判定	20
11	影が生じる場合の光源と物体面との位置関係	21
12	ポリゴン内に交点が含まれる場合と含まれない場合	22
13	拡散反射成分の観測範囲	23
14	強い鏡面反射成分の観測範囲	24
15	各反射係数の平均値による補間	26
16	実験 1 に用いる計測物体と計測結果	29
17	実験 2 に用いる計測物体と計測結果	30
18	実験 3 に用いる計測物体と計測結果	31
19	湯のみの各反射係数	36
20	植木鉢の各反射係数	37
21	貯金箱の各反射係数	38
22	任意光源位置でのレンダリング結果 (湯のみ)	40
23	任意光源位置でのレンダリング結果 (植木鉢)	41
24	任意光源位置でのレンダリング結果 (貯金箱)	42
25	相互反射の原理	44

表 目 次

1	光源選択の際の各パラメータ	28
2	各計測物体に対する光源選択における結果	33
3	反射特性推定の際の各パラメータ	33

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が盛んに行われており [1], 現実物体と同様の写実性をもつ仮想物体を作成するための手法が研究されている [2]. これらの研究では現実物体を仮想環境で再現する際に, 物体の見え方に対する光学的な特性を忠実に再現する必要性が報告されている. この問題は複合現実感の分野では光学的整合性問題として扱われている.

コンピュータグラフィクス (CG) の分野では, 2次元平面上に描画される物体の3次元的な奥行きを表現したり, 質感を与えるために陰影処理と呼ばれる手法が用いられている. 陰影処理には, 陰付け (シェーディング) と影付け (シャドウイング) の2種類がある. シェーディングは照明による物体表面の明暗を表現する処理である. これを忠実にを行うためには, 物体面の反射特性を設定する必要があり, 煩雑な作業となるため自動化が切望されている. Blanz らは人間の顔を CG で再現する際, 実環境との光学的な整合性を保つため, 顔表面のテクスチャ画像を仮想環境内の照明条件に応じて変化させている [3]. この手法では顔表面の反射特性を推定し, シェーディングのためのパラメータの決定を自動化することで実環境同様の写実性を容易に再現している. 一方, シャドウイングは物体により光が遮られる部分に影を付ける処理である. 従来研究として実環境における照明条件を推定し, 仮想物体がおとす影や物体自身による影を表現する手法 [4, 5] などがある. このように, 仮想物体が実環境と同様の写実性を持つためには, 物体表面の陰影が忠実に再現される必要がある. なかでもシェーディングは物体の見え方に直接影響を及ぼすため, 実物体の CG 表現の高品位化のための重要な問題とされ, そのために物体の反射特性を推定する研究がなされている.

物体表面の反射特性を推定する従来手法では, カメラ位置と光源位置が既知のもとで反射モデルを適用し, 物体の幾何形状と表面のテクスチャ画像から物体の反射特性を推定している [2]. 一般に物体に光を照射した場合の表面の反射光は, カメラ, 光源, 物体表面の法線の幾何学的関係で決定されるため, 物体の反射特性を推定するためには, それらの位置関係を変化させて反射光を観測する必要がある. しかし反射光には, カメラ, 光源, 物体表面の法線が, ある一定の幾何学的な関係においてのみ観測される成分が存在する. これは鏡面反射成分とよばれ, 得ら

れた観測画像内に鏡面反射成分が含まれない場合、実物体に忠実な反射特性の推定が不可能となる。そこで従来研究では、カメラと光源を固定し、計測物体をターンテーブル上で回転させ、複数のカメラ位置で物体を計測することにより物体面上の各点について多くの観測結果を得ている [6, 7]。しかし、これらの従来研究においても物体面全体ですべての反射光を観測することは困難である。特に鏡面反射成分はその幾何学的な性質上、強い反射光が観測できないため、反射特性の推定値を求めることは困難である。ここで、強い反射光とは画像上の輝度値が高いことを指し、画像上の輝度値が低い場合は推定の解を得ることは困難となる。このため、形状が円筒状である物体や単一の材質の物体などに限定される。また、複数の距離画像と表面のテクスチャ画像との位置合わせが困難であり推定値に誤差が含まれるなどといった問題がある。

本研究では、複雑な形状の物体や複数の材質が混在する物体を仮想環境内で忠実に表現することを目的とする。そのために、物体の幾何形状と表面のテクスチャ画像を厳密な位置合わせのもとで複数回取得可能な全周計測レンジファインダを使用する。この装置を使用して物体を計測する際、強い反射光を観測するために物体の形状に応じて複数の異なる照明条件を決定し計測する。これにより、計測物体の形状に依存せず、あらゆる形状の物体に対して強い反射光を観測することを可能とする。また、複雑な形状の物体では計測時に物体自身により影が生じ、反射光が観測できない問題がある。そこで、計測時に発生する影を求めることで、反射特性の推定に物体自身の影の影響を考慮する。以上の提案手法を用いて実験を行い、提案手法の有効性を検証する。

以下、2章において実物体のCG表現における光学的整合性に関する従来研究と本研究の方針について述べ、3章では物体計測時の最適な照明位置の決定手法と物体表面の反射特性の推定手法を説明する。4章では提案手法を用いた物体表面の反射特性の推定実験について述べ、最後に考察と本論文のまとめを述べる。

2. 光学的整合性に関する従来研究と本研究の方針

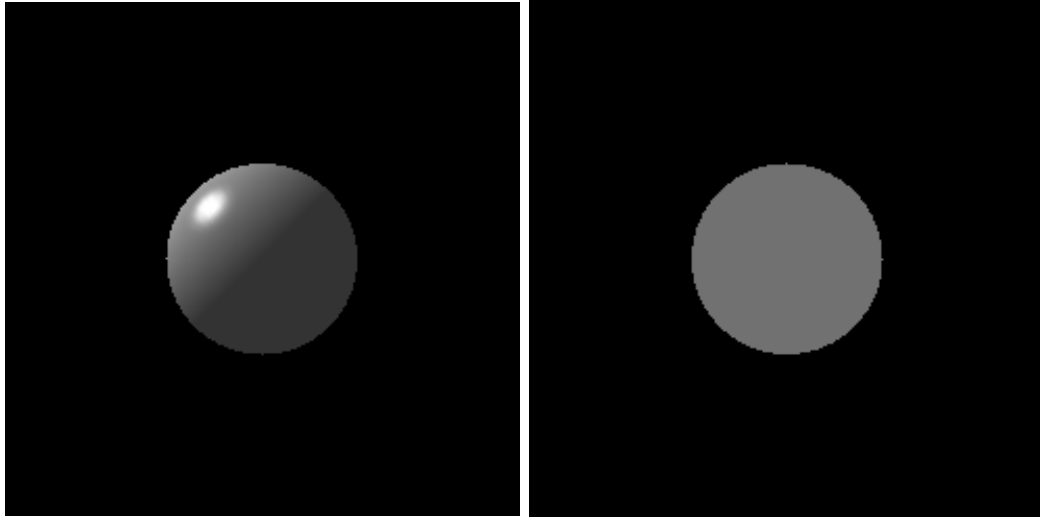
複合現実感における光学的整合性問題は仮想物体に現実環境と同様の写実性を与えるための重要な問題である。例えば、実画像を物体に張り付けるテクスチャマッピング法 [8] は、仮想物体を作成するために必要なコストが低い上に写実性の高い仮想物体が生成可能である。しかし、テクスチャ画像が撮影時の照明条件の影響を含んでいるため、仮想環境内での照明条件がテクスチャ撮影時と異なる場合に違和感が生じるという問題がある。この問題が光学的整合性問題であり、これを解決する手法としては、一般には物体表面の陰影処理を行う必要がある。

2.1 光学的整合性に関する技術課題

光学的整合性問題を解決するためには、照明の影響による物体表面の見え方を再現する必要がある。CG ではこれは陰影処理とよばれる。陰影処理は表示物体に対して実環境中の光学的現象を表現する処理であり、シェーディングとシャドウイングに分類される。

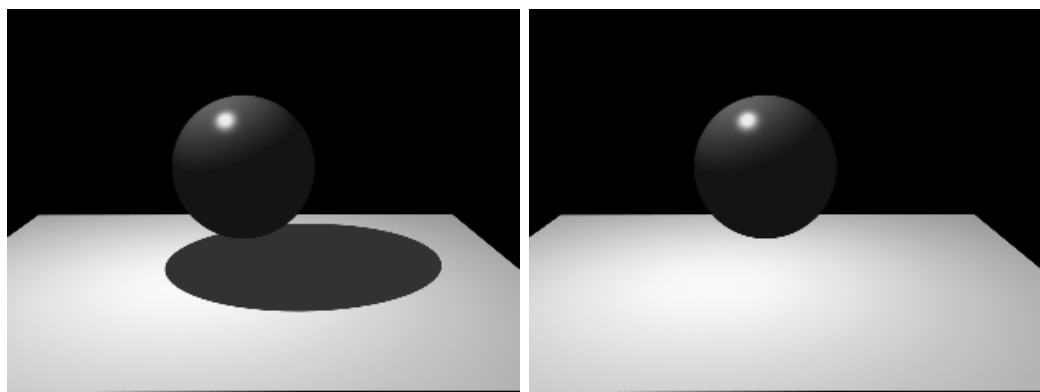
シェーディングとは図 1(a) のように光源の位置や光の強度によって物体表面に明暗をつける処理である。図 1(b) のようにシェーディングを行っていない場合、仮想物体に立体感がなく現実環境の光学的現象を忠実に表現しているとはいえない。シェーディングは物体の形状と表面の反射特性に影響されるものであり、実環境中の現実物体と同様に表現するためには対象物体の反射特性を忠実に再現する必要がある。シャドウイングとは図 2(a) のように物体に光があたる場合にその物体が光を遮ぎることで影を生じさせる処理である。図 2(a) はシャドウイングを行っていない図 2(b) に比べて仮想環境内に高い写実性を持っているといえる。この処理は物体の形状と照明条件が既知であれば容易に行うことが可能である。このように、物体を CG で表現する際に陰影処理は重要であり、とくにシェーディングは物体の見え方に大きく影響するため、光学的整合性の問題を解決するため考慮しなくてはならない問題とされている [1]。

陰影処理は一般的に物体の形状、物体表面の反射特性、光源の位置が既知であれば表現することができ、仮想環境内で任意視点、任意光源位置での物体表現を行



(a) シェーディングを考慮した場合 (b) シェーディングを考慮しない場合

図 1 シェーディングの有無による物体表現の比較



(a) シャドウイングを考慮した場合 (b) シャドウイングを考慮しない場合

図 2 シャドウイングの有無による物体表現の比較

うことが可能である。そのため、CGによる陰影処理を行うためには、ポリゴンの各頂点ごとに反射特性が設定される必要がある。しかし、仮想物体に現実物体と同様の表面反射特性を設定することは手動では困難であるため、自動的に反射特性を推定する試みがなされている [2, 3, 7, 22]。以下では光学的整合性問題を解決する方法として物体表面の反射特性を推定する従来研究について概観する。

2.2 反射特性推定の従来手法

物体表面の反射特性とは、光源から発せられた光線が物体表面にあたった際に、どの方向にどのような強さで反射するのかを表す性質のことである。物体表面の反射特性を推定する手法は、対象物体の形状を既知とする場合と未知とする場合の2種類に大別される。1つは形状が未知の物体に対して照度差ステレオ法 [9] を利用する手法であり、対象物体を複数の異なる照明条件で計測し、得られた複数の画像のみから物体の形状と表面の反射特性を推定する [10, 11, 12]。これらの手法では物体形状が滑らかな曲面で構成されている物体に限定されるという問題がある。もう1つの手法は形状が既知である物体に対して、対象物体を異なる照明条件で計測し、得られた複数の画像と物体の幾何形状から表面の反射特性を推定する手法である [6, 7, 19, 22]。これらの手法では物体面上の各点において物体表面の法線、照明の照射方向、カメラの観測方向、その点に対応する実写画像内の画素値を、反射モデルの各パラメータに当てはめることで、さまざまな形状の物体の反射特性の推定が可能である。しかし、形状が未知である場合の反射特性の推定法は、形状の法線情報が滑らかに変化することが必要であり、対象とする物体の形状が限定されるため、実環境におけるさまざまな形状の物体には対応することが困難である。そこで以下では、物体の形状は既知である場合について、物体表面の反射モデルを用いて、物体の幾何形状と表面のテクスチャ画像から物体表面の反射特性の推定を行う従来研究について述べる。

2.2.1 物体表面の反射モデル

物体表面の反射光は拡散反射成分と鏡面反射成分の2つの成分の和として考えるのが一般的である [13, 14]。以下にそれぞれの反射成分について説明する。

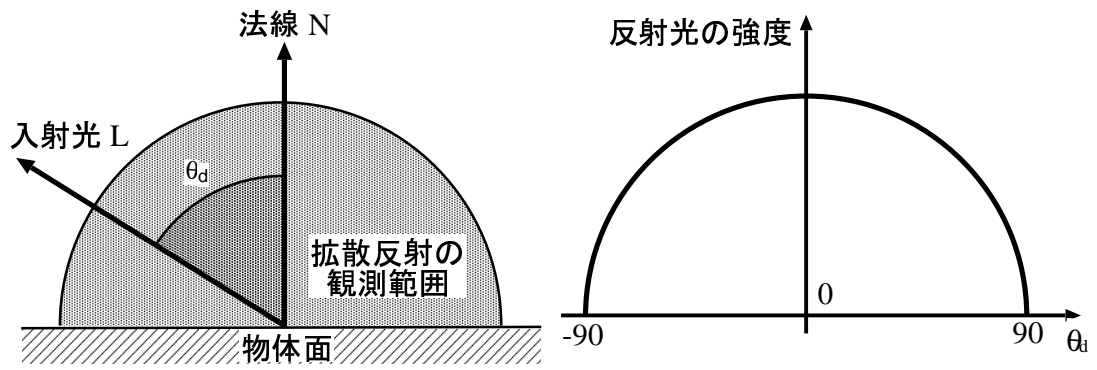
【拡散反射成分】

拡散反射成分は光が物体表面に到達した場合に全方向に均一に反射する成分であり、物体表面の材質の色を表している。図 3(a) は拡散反射成分の幾何学的な性質を表しており、物体表面の法線を \mathbf{N} 、光の照射方向を \mathbf{L} として物体面上で全方向に光が反射することを示している。図 3(b) は横軸を \mathbf{N} と \mathbf{L} の角度 θ_d とし、縦軸を観測される光の強度とした場合のグラフである。これらの性質はランバートの法則 [15] として CG 分野では一般的に陰影処理に使用されている。

【鏡面反射成分】

鏡面反射成分は光が物体表面の正反射方向で強く観測される成分であり、観測方向と正反射方向との角度が大きくなるにつれて、小さくなる性質を持つ。ここで正反射方向 \mathbf{L}' とは図 4(a) で示すように、物体表面の法線に対して入射方向 \mathbf{L} に対称な方向のことである。また、鏡面反射成分の色は物体が持つ色に依存せず、光源の色が強く影響する特徴がある。図 4(a) は鏡面反射成分の幾何学的な性質を表しており、物体の法線 \mathbf{N} 、光の入射方向 \mathbf{L} 、観測方向 \mathbf{V} 、正反射方向 \mathbf{L}' として正反射方向付近で強く観測されることを示している。図 4(b) は、横軸を \mathbf{V} と \mathbf{L}' の角度 θ_r とし、縦軸を鏡面反射成分の強度とした場合のグラフであり、 θ_r が 0 から大きくなるにつれて反射光の強度が急激に減少することを示している。

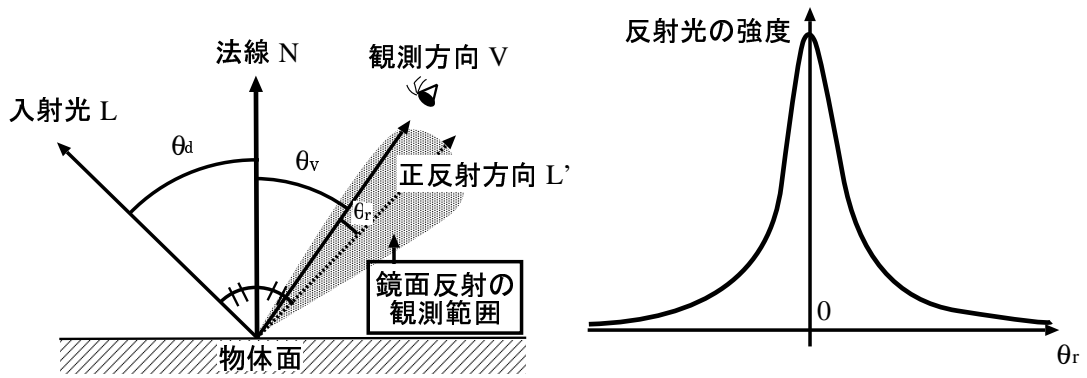
鏡面反射成分のモデル化は拡散反射成分と異なり、いくつか存在する [16, 17, 18]。代表的な反射モデルとして Phong モデル [16] がある。このモデルは経験的に求めたモデルであり、計算にかかるコストが低いため、CG 分野では多用されている反射モデルである。しかし、経験的なモデルであることから、金属面などの強い光沢を表現することは困難である。Torrance-Sparrow モデル [18] は物理法則に従って物体表面の反射特性を忠実にモデル化したものであり、様々な材質において適用することが可能である。Torrance-Sparrow モデルでの物体表面の反射特性は次式で表される。



(a) 拡散反射成分の幾何学的な性質

(b) 拡散反射成分の強度に関する性質

図 3 拡散反射成分の性質



(a) 鏡面反射成分の幾何学的な性質

(b) 鏡面反射成分の強度に関する性質

図 4 鏡面反射成分の性質

$$i = \frac{Y}{C^2} \cdot (i_d + i_s) \quad (1)$$

$$i_d = P_d \cdot \cos\theta_d \quad (2)$$

$$i_s = P_s \cdot \frac{1}{\cos\theta_v} \cdot \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (3)$$

- i : 反射光の強度 (RGB 値) P_d : 拡散反射係数 (RGB 値)
 i_d : 拡散反射成分 (RGB 値) P_s : 鏡面反射係数 (RGB 値)
 i_s : 鏡面反射成分 (RGB 値) σ : 表面粗さ係数
 Y : 照射光の強度 C : 光源と物体との距離

ここで、 i, i_d, i_s はそれぞれ反射光の強度を表しており、画像中ではこれらの値は画素の輝度値として与えられる。式 (1) は観測された光が拡散反射成分と鏡面反射成分の和となっていることを示している。式 (2)、式 (3) はそれぞれ拡散反射成分、鏡面反射成分の式を示している。拡散反射成分の性質はランバートの法則にしたがっている。鏡面反射成分では P_s は鏡面反射成分の色を表し、これは光源の色に強く影響される。また、 σ のは鏡面反射成分の正反射方向への集中度を表し、値が小さい場合、鏡面反射成分は鋭いハイライトとして観測される。この P_d, P_s, σ が物体の反射特性を表しており、このパラメータを決定することで、陰影処理を行うことが可能となる。ここでカメラ、光源、物体表面の法線の幾何学的な関係は以下の式 (4)~(7) で表される。

$$\cos\theta_d = \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} \quad (4)$$

$$\cos\theta_v = \mathbf{N} \cdot \mathbf{V} \quad (5)$$

$$\mathbf{L}' = 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})\mathbf{N} - \mathbf{L} \quad (6)$$

$$\cos\theta_r = \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}' \quad (7)$$

ここで、 θ_d は光源ベクトル L と法線ベクトル N の間の角度、 θ_v は観測方向ベクトル V と法線ベクトル N の間の角度、 θ_r は正反射方向ベクトル L' と観測方向ベク

トル V の間の角度をそれぞれ表している (それぞれのベクトルは単位ベクトルとする).

反射モデルを使用して拡散反射係数 P_d , 鏡面反射係数 P_s , 物体の表面粗さ係数 σ を推定するためには, 一般的には計測された物体表面の画像の各画素につき未知変数以上の連立方程式を解くことが考えられる. そのためには観測位置, 光源位置の様々な位置関係において表面の複数のテクスチャ画像を取得する必要がある. しかし, 物体面上の各点で反射光を観測するシステムの構築は難しいため, 反射係数を物体面上で一様と仮定することにより, 未知変数以下の方程式によって物体の反射特性を推定することが考えられている [19, 20, 6]. この場合, さまざまな色や材質が混在する物体の反射特性の推定は困難であり, これを解決するために物体表面の反射特性を非一様とする研究がある. 以下では反射特性を推定する従来研究について表面の反射特性を一様とする場合と非一様とする場合について説明する.

2.2.2 一様な反射特性の推定法

物体の反射特性を一様として推定する場合の利点は, 少ない画像枚数を用いるという点である. 佐藤ら [19] は, 物体の反射特性を一様と仮定することで, 正面からの 1 枚の距離画像と表面のテクスチャ画像から物体表面の反射特性を推定した. また, 特殊な装置を用いて一様な表面反射特性を持つ物体に対して, 反射特性を計測する装置も開発されている [20]. 未知変数以上の式が構築できた場合でも, 前節で述べたように鏡面反射成分は観測方向と正反射方向の角度が大きくなると急激に減少し, 観測されなくなる性質を持っており, 鏡面反射成分の輝度値が微小である場合には係数推定の計算において解が安定して求まらない. そこで, 推定が行えた点の推定値を用いて線形補間を行う手法 [6] や, 観測画像において彩度をもとに領域分割を行い, その領域内で反射特性を一様とする手法 [21] がある. また, 反射係数の推定計算において解を安定に求めるための手法 [22, 23] があるが, 物体の表面特性が金属物質で強いハイライトを含むものに限定される.

以上の手法では表面反射特性が一様であるために対象物体が限定され, 模様が付いた物体や異なる材質が混在する物体では反射係数を忠実に推定することが困

難となる問題がある。

2.2.3 非一様な反射特性の推定法

物体面上の反射特性を一様と仮定する従来手法では異なる材質や異なる色が混在する物体に対しては反射係数の推定が困難であった。そこで、反射特性を非一様として推定する手法 [7] がある。この手法では計測物体をロボットアームに固定し、ロボットアームを回転させることで、ある位置に固定されたレンジファインダと CCD カメラを用い、時系列での多数のテクスチャ画像と多方向からの距離画像を取得している。この計測方法では、画像に撮影された物体表面上の各点におけるカメラ、光源、物体表面の法線の様々な位置関係での観測結果が 1 回の計測で得ることができ、拡散反射成分について物体面上での非一様な反射係数の推定が可能である。また、複数画像内の輝度情報を特異値分解により式 (1) で表される i_d, i_s の 2 つの反射成分に分離することで、それぞれの反射係数の推定計算において安定した解を得ている。このため、細かい模様や異なる色の入ったテクスチャに対しても忠実に推定が可能となっている。しかし、多数の画像内において物体の各点の位置合わせが困難であり、係数の推定値に誤差が含まれる。また、観測位置と光源位置の相対的な位置関係が固定されていることから、複雑な形状に対しては鏡面反射成分が観測されない場合が多く、鏡面反射係数と表面粗さ係数の密な推定に関しては線形補間を行う。このため、忠実な反射係数の推定には計測物体の形状を限定する必要がある、あらゆる物体に対して光学的整合性問題を解決するには至っていない。

2.3 本研究の方針

物体表面の反射特性を非一様として推定する研究 [7] では、それまでの従来研究に比べ、物体を忠実に仮想環境内で表現可能である点で優れたものであった。しかし、物体の形状と表面のテクスチャ画像同士の位置合わせが困難であることや、鏡面反射成分が観測できない場合は線形補間によって推定するしかなく、複雑な形状をもつ物体や異なる材質から構成される物体に対しては反射特性の推定が困難であるという問題があった。

そこで本論文では、複雑な形状の物体や複数の材質が混在する物体を仮想環境で表現する際に、光学的整合性問題を解決し現実物体と同様の写実性を再現するため、物体面上の各点で物体表面の反射特性を非一様として推定するための手法を提案する。

提案手法では、物体の形状と表面のテクスチャ画像から表面反射特性を推定するため、物体の幾何形状と複数の表面テクスチャ画像との位置合わせに関しては反射特性の推定値に誤差がないよう、両者の位置合わせが厳密な装置である全周計測レンジファインダを用いる。また、反射特性の推定の際の計算で解が安定して求まるように観測画像から各反射成分の分離を行う。表面反射特性の推定に使用する反射モデルは、より忠実な推定を行うために Torrance-Sparrow モデルを使用する。

物体面上の各点で反射特性を推定するために、対象物体の形状をもとに各反射成分を密に観測できるよう、最適な光源位置を決定する。また、複雑な形状の物体に対する計測では、物体自身の影が観測される場合があり、影の影響により正しく反射特性が推定できない可能性がある。そこで、対象物体の形状と計測時に使用する光源位置に対して影となる部分を予測し、影となると予測された画素については反射特性の推定計算の際に観測画素として使用しない。

本手法により、従来法では観測することが困難であった鏡面反射成分を物体面全体で密に観測することで、計測物体の形状や表面特性に制限を設けない。このため、あらゆる形状や材質の物体に対して忠実に反射特性の推定が行えると考えられる。

3. 物体の反射特性の推定

本章では物体の反射特性を密に推定する手法を提案する。図 5 は提案手法の処理の流れを示している。提案手法では処理は光源選択部 (図 5 中 A) と反射特性の推定部 (図 5 中 B) に分けられる。以下に提案手法における各処理の流れについて説明する。

1. 光源選択部 (図 5 中 A)

物体の形状、カメラ位置が固定されていれば、各反射成分を密に観測するための光源位置を求めることが可能である。そこで、提案手法では、計測装置の周囲に複数の光源設置位置を設定し、物体の形状をもとに各反射成分が密に観測できる光源位置の選択を行う。そのため光源選択部では、まず全周計測レンジファインダで対象物体の形状を計測する。次に、取得された距離画像、カメラ位置、光源位置をもとに距離画像内の反射成分の数を調べる。これにより、物体面上の各点で各反射成分を密に観測するための光源位置が選択される。

2. 表面反射特性の推定部 (図 5 中 B)

反射特性の推定部では、選択された光源位置に光源を設置し、複数回計測することにより、複数の照明条件下での表面テクスチャ画像を取得する。光源選択部の処理により、これらのテクスチャ画像から、物体面上の各点で各反射成分が密に観測されたと判断することが可能である。次に、あらかじめ取得した物体の距離画像と計測により得られた複数の表面テクスチャ画像から反射モデルを用いて物体表面の反射特性を推定する。

以下、3.1節では、物体の距離画像とテクスチャ画像が厳密に位置合わせされている装置として全周計測レンジファインダについて説明する。3.2節では提案手法における計測時の光源選択について述べ、3.3節では選択された光源位置に光源を設置して計測し、物体表面の反射特性を推定する方法について述べる。

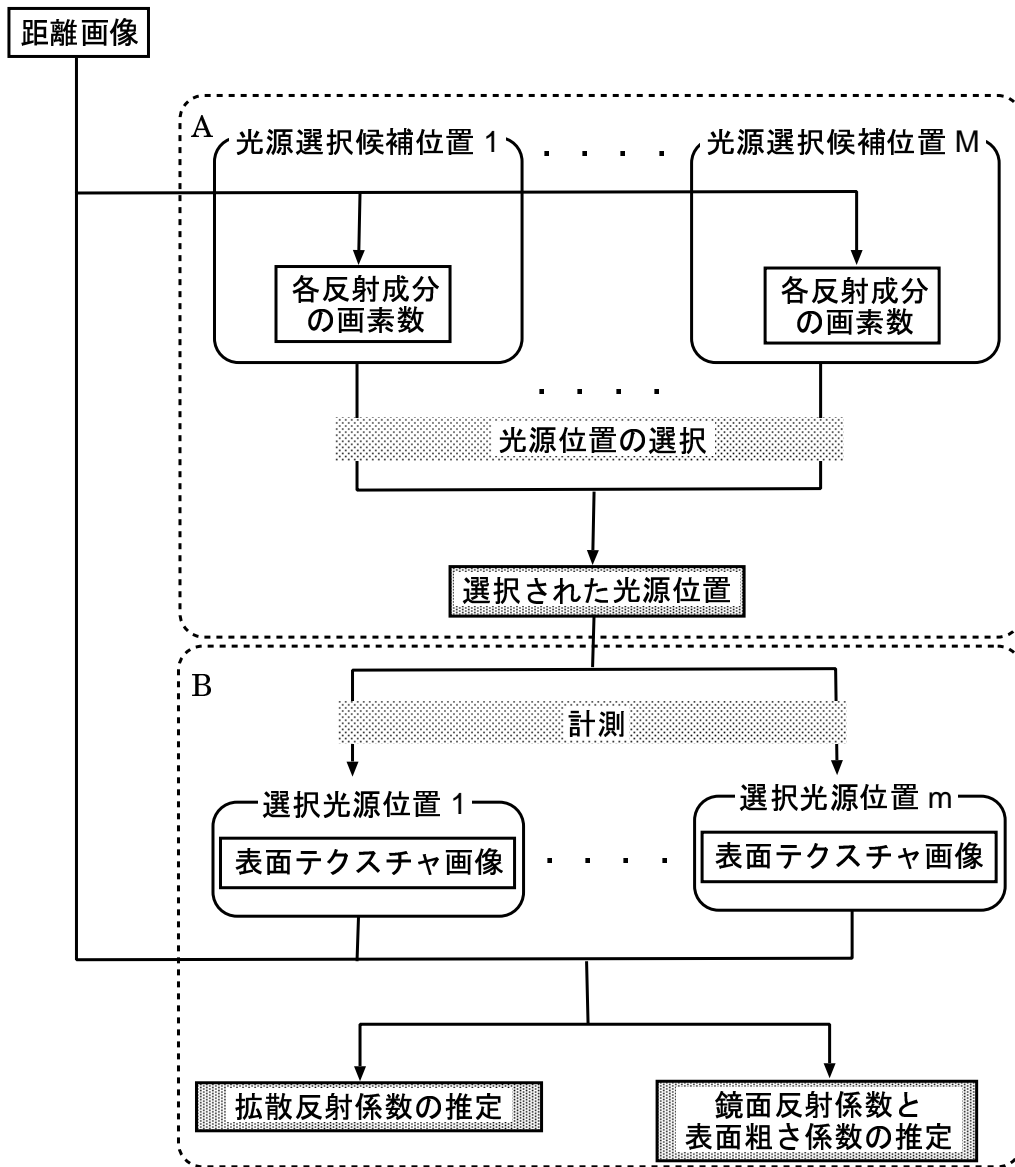


図 5 提案手法における処理の流れ

3.1 物体形状と物体表面テクスチャ画像の取得

本論文では物体の幾何形状と表面のテクスチャ画像を取得するための装置として全周計測レンジファインダ (Cyberware3030RGB) を使用する. 図 6(a) は全周計測レンジファインダの概観であり, 図 6(b) のように装置が計測物体の周りを 360 度回転しながら計測物体にレーザ光を照射し, その反射光を内蔵されている CCD カメラで撮像することで 3 角測量の原理から, 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, 物体面上の各点の画像間での誤対応による誤差なく物体表面の反射特性が推定可能である. また, 計測する際に計測物体の位置を固定すれば, 複数回の計測において得られる複数のテクスチャ画像間においても位置ずれが発生せず, 光源位置を変更して複数回計測することが可能である.

図 7 は全周計測レンジファインダにおける計測画像とそれらを用いた 3 次元再構築例を示している. 図 7(a) は計測に使用した実物体であり, 図 7(b), 図 7(c) はそれぞれ全周計測レンジファインダから得られた全周距離画像と全周テクスチャ画像であり, 2 つの画像は画素単位で位置合わせされている. 図 7(d), 図 7(e) は全周距離画像と全周テクスチャ画像を用いて 3 次元再構築したものであり, テクスチャ画像の形状に対して正確にマッピングされている.

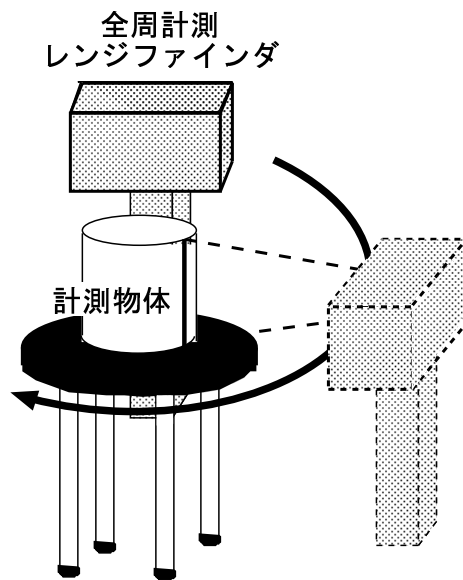
3.2 反射成分の計測のための照明条件の選択

本研究では, 反射特性の推定計算の際に解が安定に求まるように 2 つの反射成分を分離する. このために 2 つの反射成分が独立に観測された画像の取得を考える. 鏡面反射成分は正反射方向付近のみで観測される性質を持つため, 光源位置を変えることによって拡散反射成分のみを含む反射光が観測可能である. しかし, 拡散反射成分は物体全体で観測されるため, 鏡面反射成分のみから成る反射光を観測することは不可能である. そこで, はじめに鏡面反射成分を含む反射光を観測し次に, 同じ位置の画素において拡散反射成分のみから成る反射光を観測する. そして, それぞれの画素において, カメラ, 光源, 物体表面の法線の幾何学的関係を用いて, 2 つの観測画素の差から鏡面反射成分を抽出する.

物体面上の各点で反射特性を推定するために必要な各点の 2 つの反射成分の観



(a) 全周計測レンジファインダ Cyberware 3030RGB

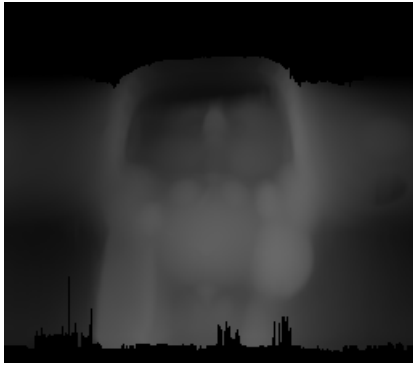


(b) 計測時のレンジファインダの動作

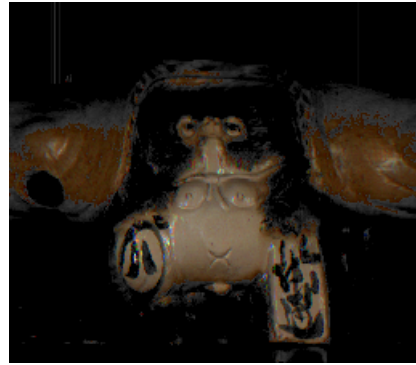
図 6 形状計測装置の概観と物体の計測



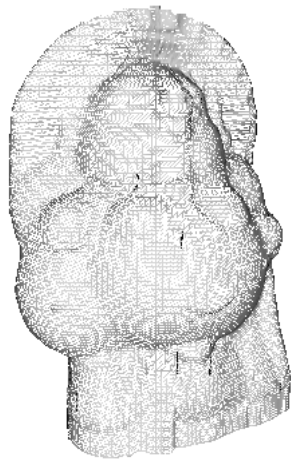
(a) 実物体



(b) 全周距離画像



(c) 全周テクスチャ画像



(d) ワイヤフレーム表示



(e) テクスチャマッピング表示

図 7 実物体の計測結果と 3 次元再構成例

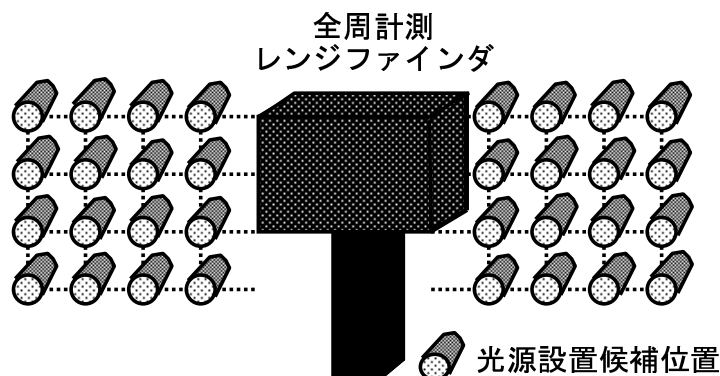


図 8 形状計測装置周囲の光源設置候補位置

測回数 は Torrance-Sparrow モデルの反射成分の未知変数の数に対応する。拡散反射成分は未知変数が拡散反射係数 P_d のみであるため、観測回数は 1 回以上必要である。鏡面反射成分は未知変数が鏡面反射係数 P_s 、表面の粗さ係数 σ の 2 つであるため、2 回以上観測される必要がある。この条件を満足するために、予め計測した物体の形状をもとに図 8 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。このとき光源は点光源でモデル化可能であると仮定する。また、カメラと光源は全周計測レンジファインダに取り付いており、計測の際に位置情報を取得することは可能であるとする。

以下では光源選択に関する詳細を述べる。その際、光源設置候補位置を p ($p = 1, \dots, M$)、光源位置 p に光源を設置して観測される画像を $I_p = (i_{p1}, i_{p2}, \dots, i_{pn})$ (i_{pk} は輝度値)、画像 I_p 内で拡散反射成分のみから成る画素の総数を D_p 、強い鏡面反射成分を含む画素の総数を S_p とする。また、光源 p において k 番目の画素が影の影響を受けるかどうかを表す指標を R_{pk} とする。

本手法では、鏡面反射成分を反射光から抽出するが、鏡面反射成分の強度が弱い場合、反射特性の推定計算において解が安定に求まらない可能性がある。また、物体の形状が複雑になると光源の位置によって物体自身による影が生じ、その部分が計測物体の色であると判断され、反射係数の推定において影の輝度が反射係数に反映される。これらの問題を避けるため、物体からの反射光に対して観測さ

れるテクスチャ画像内の各画素を次の4つの場合に分類する.

- 影となり反射光はない
- 拡散反射成分のみを含む
- 拡散反射成分と弱い鏡面反射成分を含む
- 拡散反射成分と強い鏡面反射成分を含む

ここで、影となる場合は反射光は観測されていないので推定に使用すること避ける必要があり、また弱い鏡面反射成分を含む場合は推定計算における解が安定に求まらない可能性があるため使用しない。すなわち、物体の反射特性を推定するために必要な情報は拡散反射成分のみを含む場合と拡散反射成分と強い鏡面反射成分を含む場合である。この分類を行うため、全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必要がある。

1. 注目画素が反射光を含んでいるか
2. 注目画素が拡散反射成分のみから成るか
3. 注目画素が強い鏡面反射成分を含んでいるか

以上の条件判定の結果、各光源位置に対する各反射成分の観測数 D_p, S_q において $D_p = \text{Max}\{D_1, \dots, D_p, \dots, D_M\}$ となる光源位置 p と $D_q = \text{Max}\{S_1, \dots, S_q, \dots, S_M\}$ となる光源位置 q を選択する。選択操作は物体の各頂点毎に拡散反射成分のみが1回、強い鏡面反射成分が2回観測できる画素の画像全体に対する割合があるしきい値 th より大きくなるか、選択可能な光源位置がなくなるまで繰り返す。以下、それぞれの処理の詳細について述べる。

3.2.1 反射光が観測されるための条件

光源位置 p に設置した光源について、物体面上の各点が物体からの反射光を観測できるかを判定する。このための条件は2つ存在する。以下にその2つの条件について説明する。

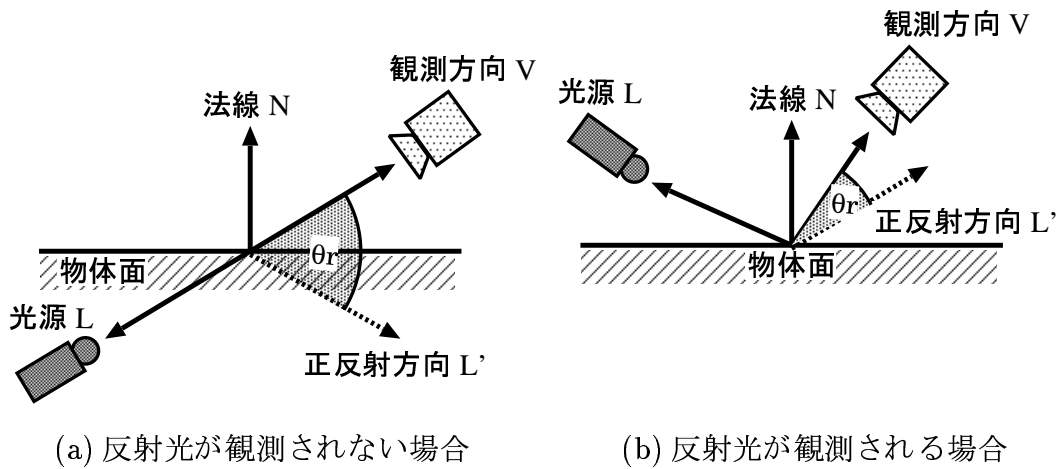


図 9 物体面に光が到達するかの判定

[条件 1] 光が物体面の表からあたっており, かつカメラが面を表から観測する

[条件 2] 物体自身によって遮られることなく反射光が観測される

まず, 条件 1 について説明する. 観測方向 \mathbf{V} と正反射方向 \mathbf{L}' の角度 θ_r のみで各反射成分を分類すると, 図 9(a) のように光源からの光が物体面の裏からあたる場合でも反射成分が観測されると判断される. このため, 光が面の表からあたるかを判定する必要がある. また, 反射光を観測するためにはカメラが面の表から観測することが必要である. k 番目の画素に反射光が観測されるための条件は, その位置の観測方向ベクトル \mathbf{V}_{pk} , 法線ベクトル \mathbf{N}_{pk} , 光の照射方向ベクトル \mathbf{L}_{pk} が以下の式を満足する場合である.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{pk} \cdot \mathbf{N}_{pk} &> 0 \\ \mathbf{L}_{pk} \cdot \mathbf{N}_{pk} &> 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) を満たす場合, カメラ, 光源, 物体の法線は図 9(b) の関係となり, 光源からの光が物体面に到達し, 反射光がカメラで観測されると判定される.

条件 1 を満足した場合, 次の条件 2 の判定を行う. 光源により物体面上の点が影とならない場合, 光源と物体面上の点を結ぶ線分が物体自身の面と交差しない.

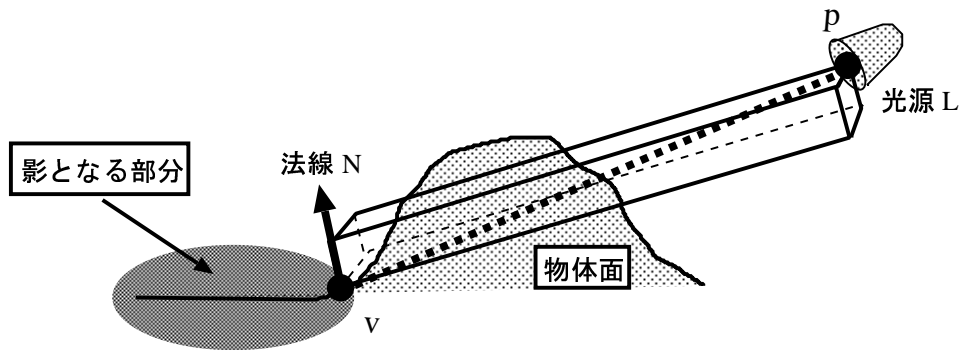


図 10 影が検出されるかの判定

そこで、式 (8) により物体面が観測可能である場合に線分の方程式と物体を構成するポリゴンにおける面の方程式との交差判定を行う。図 10 は光源位置 p において注目する頂点 v が影となる場合を示している。このとき点 v に対応する全周テクスチャ画像の k 番目の画素における R_{pk} に影となる光源位置として記録しておく。この判定を物体の全点、全光源設置候補位置について行う。 R_{pk} において光源位置が記録されている場合は k 番目の画素における反射係数の推定の際に光源 p は選択されない。

いま物体面上の注目点 v の 3 次元座標を $(x, y, z) = (v_x, v_y, v_z)$ とし、光源の 3 次元座標を $(x, y, z) = (p_x, p_y, p_z)$ とする。影の部分の判定のために注目点 v と光源位置 p を結ぶ線分が物体の面と交差判定を行うが、計算量が膨大であるため、まず図 10 で示すように、この 2 つの点を結ぶ線分を対角線とする直方体内部に物体面上の各点が存在するかを判定する。これにより、面と線分が交差する可能性のある点がある。この判定には以下の式 (9) を使用する。各頂点の 3 次元座標は $(x, y, z) = (a_x, a_y, a_z)$, $v_x \leq p_x$, $v_y \leq p_y$, $v_z \leq p_z$ とし、物体の各面を構成する 1 辺は注目点と光源との距離より十分小さいとする。この仮定により、直方体内に

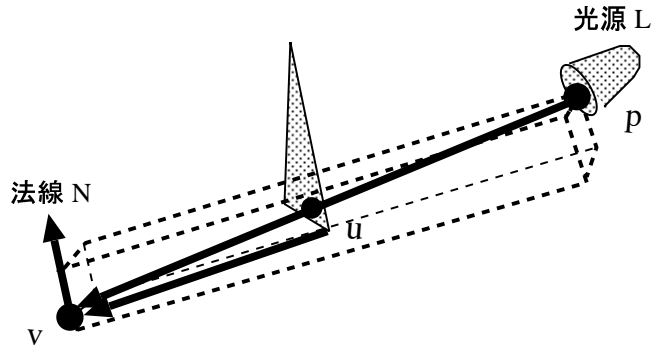


図 11 影が生じる場合の光源と物体面との位置関係

あるポリゴンは必ず 1 つの頂点が直方体内に存在する.

$$\begin{cases} v_x \leq a_x \leq p_x \\ v_y \leq a_y \leq p_y \\ v_z \leq a_z \leq p_z \end{cases} \quad (9)$$

次に直方体内に物体面上の点が存在する場合, 頂点 v と光源位置 p を結ぶ線分と物体自身の面が交差している可能性があるため, その点に対して次の判定を行う. まず, 直方体内に存在すると判定された点を u とし, その座標を $(x, y, z) = (u_x, u_y, u_z)$ とすると, u を含むポリゴンに対して, 面の方程式を計算する. 面の方程式は法線が既知であるので法線ベクトルを (N_x, N_y, N_z) とすると以下の式となる.

$$N_x(x - u_x) + N_y(y - u_y) + N_z(z - u_z) = 0 \quad (10)$$

また, 頂点 v と光源位置 p を結ぶ線分の方程式は以下である.

$$\begin{cases} t = \frac{x - v_x}{p_x - v_x} \\ t = \frac{y - v_y}{p_y - v_y} \\ t = \frac{z - v_z}{p_z - v_z} \end{cases} \quad (11)$$

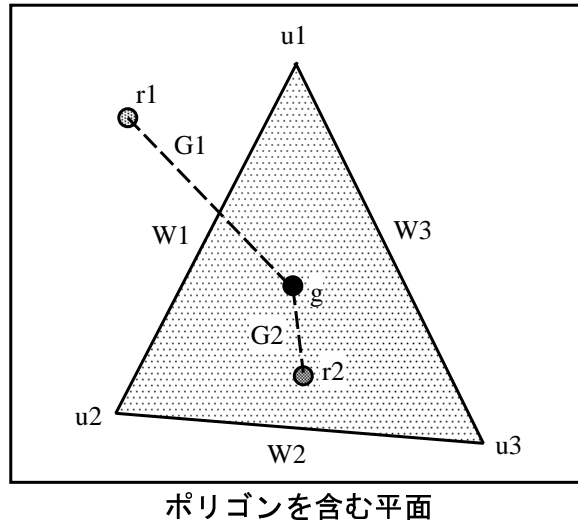


図 12 ポリゴン内に交点が含まれる場合と含まれない場合

式 (11) を式 (10) へ代入し t について解くことにより次式から面と線分の交点 r が求まる.

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{N_x(u_x - v_x) + N_y(u_y - v_y) + N_z(u_z - v_z)}{N_x(p_x - v_x) + N_y(p_y - v_y) + N_z(p_z - v_z)} \\
 &= \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{U}_v}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{P}_v}
 \end{aligned} \tag{12}$$

ここで \mathbf{U}_v は図 11 中に示す点 u から物体面上の注目点 v へのベクトル, \mathbf{P}_v は光源位置 p から物体面上の注目点 v へのベクトル, \mathbf{N} は物体面上の注目点 v の法線ベクトルを表している. 最後にこの t の値が $(0 \leq t \leq 1)$ であり, かつ交点 r がポリゴン内に存在する場合, 式 (11) の線分は物体と交差すると判定される.

図 12 のように, 交点 r がポリゴン内に存在するための条件はポリゴンを形成する 3 つの点を u_1, u_2, u_3 とし, u_1 と u_2 を結ぶ線分を W_1 , u_2 と u_3 を結ぶ線分を W_2 , u_1 と u_3 を結ぶ線分を W_3 , 交点 r とポリゴンの重心 g を結ぶ線分を G とする. G と各線分 W_1, W_2, W_3 の内 1 つでも交わる場合, 交点 r はポリゴン内には存在しないことになる. どの線分とも交わることがない場合は交点 r はポリゴン内に存在し, 光源位置 p に設置された光源において k 番目の画素は影であると判

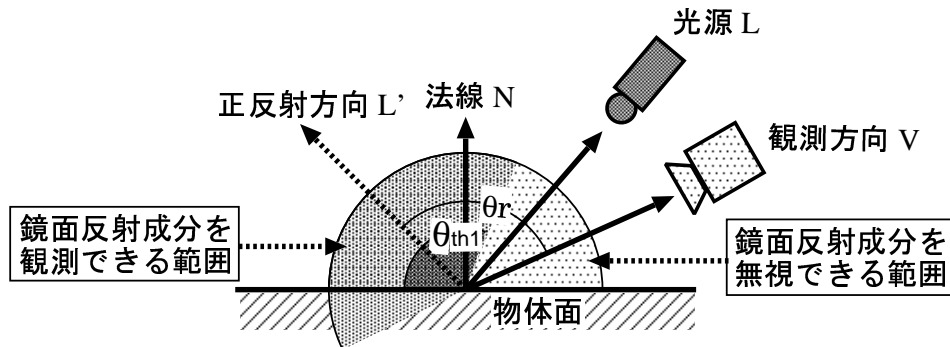


図 13 拡散反射成分の観測範囲

断される. すなわち, 交点 r_1 は線分 W_1 で交差するためポリゴン内には存在せず, 交点 r_2 はどの線分とも交差しないためポリゴン内に存在する.

以上により, テクスチャ画像内の注目画素に反射光が観測されたと判断され, 画素に含まれる反射成分を知ることが可能である.

3.2.2 拡散反射成分の観測条件

k 番目の画素に拡散反射成分のみが含まれるための条件は, 式 (8) を満足し, かつ式 (6) で求まる正反射方向ベクトル \mathbf{L}'_{pk} が以下の式を満足する場合である.

$$\theta_r = \cos^{-1}(\mathbf{V}_{pk} \cdot \mathbf{L}'_{pk}) > \theta_{th1} \quad (13)$$

これは図 13 のように観測方向と正反射方向との間の角度 θ_r がしきい値 θ_{th1} より大きい場合で, 2 章で述べた鏡面反射成分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, 影を観測しない指標 R_{pk} に記録がなければ, 注目画素が拡散反射成分のみから成る画素として判断され, D_p に数えられる.

3.2.3 鏡面反射成分の観測条件

k 番目の画素が強い鏡面反射成分を含むための条件は式 (8) と以下を満足する場合である.

$$\theta_r = \cos^{-1}(\mathbf{V}_{pk} \cdot \mathbf{L}'_{pk}) \leq \theta_{th2} \quad (14)$$

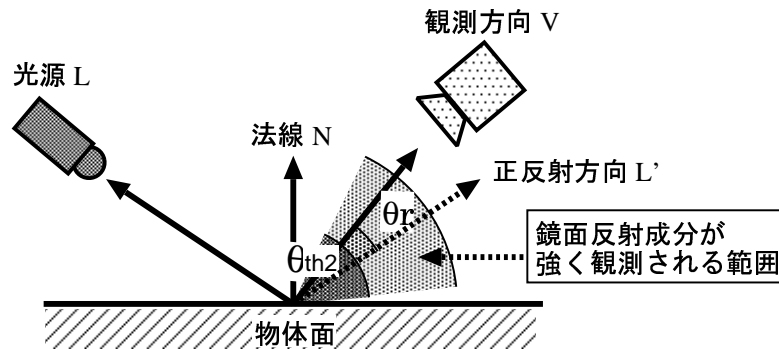


図 14 強い鏡面反射成分の観測範囲

これは図 14 のように角度 θ_r がしきい値 θ_{th2} 以下となる場合で、観測方向は正反射方向付近にある。この場合、影を観測しない指標 R_{pk} に記録がなければ、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。

3.3 反射特性の推定

物体の反射特性の推定には前節で決定された m 個の光源設置候補位置に光源を設置し物体の計測を行う。得られた物体の複数の全周テクスチャ画像を利用して画像内における同じ位置の画素において反射特性を推定する。拡散反射成分のみを含むものを用いて Torrance-Sparrow モデルにおける拡散反射係数を推定し、拡散反射成分と鏡面反射成分の両方を含む画素値から拡散反射成分の輝度推定値の差分をとることで、鏡面反射成分を抽出する。Torrance-Sparrow モデルにおける鏡面反射係数と表面粗さ係数については抽出された情報を用いて推定を行う。使用する光源は点光源でモデル化が可能であるとする。以下では光源位置 $p(p = 1, \dots, m)$ 、拡散反射成分のみを含むと判断される画素の集合を $I_{diff} = (i_{diff,1}, i_{diff,2}, \dots, i_{diff,n})(i_{diff,k}$ は輝度値)、2 つの反射成分を含み、かつ鏡面反射成分が強く観測されると判断される画素の集合を $I_{both} = (i_{both,1}, i_{both,2}, \dots, i_{both,n})(i_{both,k}$ は輝度値) とする。以下に反射特性推定の具体的な手順を示す。

3.3.1 拡散反射係数の推定

拡散反射係数 P_d の推定では, k 番目の画素が拡散反射成分のみを含む場合, 物体の法線 \mathbf{N}_{pk} , 光の照射方向 \mathbf{L}_{pk} を利用することで式 (1), 式 (2) から拡散反射係数 P_d を求めることが可能である. このとき, 式 (1) において $i_s = 0$ とする. しかし, 注目画素が影となる場合, 影を物体の色として判断することを避けるため, 前節で求めた R_{pk} を用いて影とならない光源位置 p から得られた画素の輝度値を用いる. また, 一般に θ_d が大きくなると, 拡散反射成分の輝度値は小さくなり, 推定値の信頼性が低くなるため, $\theta_r > \theta_{th1}$ となる輝度値の中から θ_d が最小のものを選択し, 拡散反射成分のみを含む輝度値 $i_{diff,k}$ とする. このとき $i_{diff,k}$ の輝度値を式 (2) の $i_d, i_{diff,k}$ を観測時の角度を θ_d とし, 以下の式から拡散反射係数 P_d を推定する.

$$P_d = \frac{C^2 \cdot i_d}{Y \cdot \cos\theta_d} \quad (15)$$

3.3.2 鏡面反射成分の抽出

強い鏡面反射成分を含む画素が異なる 2 つの照明条件に対して観測される場合, 鏡面反射成分に含まれる 2 つの未知変数である鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を求めることが可能である. しかし, 物体表面の粗さに関して θ_{th2} 以下となる角度でも鏡面反射成分の輝度値が微小である場合があり, 推定値の信頼性を上げるためには, $\theta_r \leq \theta_{th2}$ となる輝度値の中から θ_r が小さいものを 2 つ選択し, 輝度値 $i_{both,k}$ とする. このとき, 前節の R_{pk} を利用して影ではない画素を選択する.

次に, 先で求めた拡散反射係数 P_d と計測時の光の照射方向 \mathbf{L}_{pk} と物体の法線 \mathbf{N}_{pk} との間の角度 θ_d から式 (2) により $i_{both,k}$ の輝度値に関する拡散反射成分の推定値を求める. 次に, $i_{both,k}$ の輝度値と求めた拡散反射成分の輝度値との差分 ($i_{both,k} - i_{diff,k}$) をとることにより, 各画素の鏡面反射成分の輝度値 i_s を抽出する. このとき, 輝度値 i_s がしきい値 $th2$ 以下である場合, 物体面に鏡面反射は生じないと判断し, 以下で説明する鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ の推定は行わない.

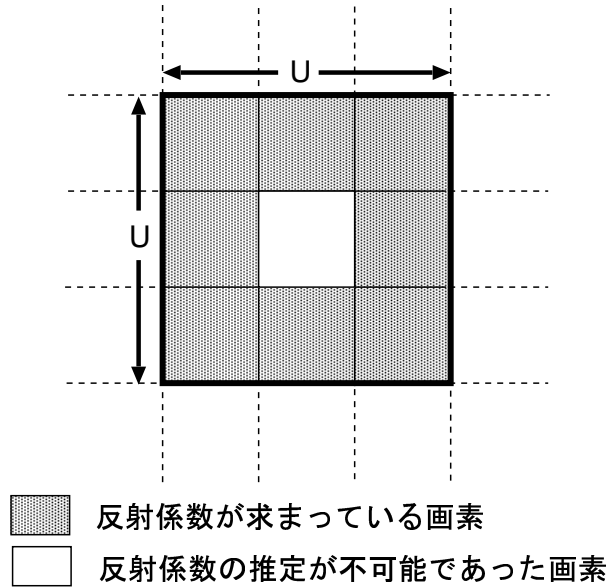


図 15 各反射係数の平均値による補間

3.3.3 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ の推定では、2 つ未知変数を推定するため、異なる照明条件下で計測した鏡面反射成分を 2 つ抽出し、その 2 つの輝度値をそれぞれ $i_{s,a}, i_{s,b}$ とする。次に 2 つの輝度値とそれぞれの計測時の \mathbf{V}_{pk} と \mathbf{N}_{pk} の間の角度 θ_v 、 \mathbf{V}_{pk} と \mathbf{L}'_{pk} との間の角度 θ_r を式 (3) へ代入し、次式の連立方程式を構築する。そして、鏡面反射係数 P_s と物体の表面粗さ係数 σ の推定を行う。添字 a, b は 2 つの異なる光源で計測したときの便宜上の値である。

$$\begin{cases} i_{s,a} = \frac{Y}{C_a^2} \cdot P_s \cdot \frac{1}{\cos\theta_{v,a}} \cdot \exp\left(-\frac{\theta_{r,a}^2}{2\sigma^2}\right) \\ i_{s,b} = \frac{Y}{C_b^2} \cdot P_s \cdot \frac{1}{\cos\theta_{v,b}} \cdot \exp\left(-\frac{\theta_{r,b}^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (16)$$

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 $U \times U$ (U は奇数) 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している。図 15 は $U = 3$ として係数の値を

画素値とした画像に対して補間する様子を示したものである。補間に関しては以下の式を用いる。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{s,ij} = \frac{1}{U^2} \sum_{x=\lceil i-\frac{U}{2} \rceil}^{\lceil i+\frac{U}{2} \rceil} \sum_{y=\lceil j-\frac{U}{2} \rceil}^{\lceil j+\frac{U}{2} \rceil} P_{s,xy} \\ Q_{\sigma,ij} = \frac{1}{U^2} \sum_{x=\lceil i-\frac{U}{2} \rceil}^{\lceil i+\frac{U}{2} \rceil} \sum_{y=\lceil j-\frac{U}{2} \rceil}^{\lceil j+\frac{U}{2} \rceil} \sigma_{xy} \end{array} \right. \quad (17)$$

ここで、 $Q_{s,ij}$, $Q_{\sigma,ij}$ はそれぞれ画像上での位置 (i, j) において推定することが不可能であった鏡面反射係数, 表面粗さ係数を表している。 $P_{s,ij}$, σ_{ij} は画像上での位置 (i, j) において推定された各反射係数の推定値である。

4. 実験

4.1 実物体の計測

実験では全周計測レンジファインダの周囲に 60 箇所の光源設置候補位置を設定した。それらの位置は既知であり、その 3 次元座標を用いて 2 つの反射成分が密に観測できるよう光源位置選択を行った。また、物体は相互反射が発生しないものと仮定した。実験装置として全周計測レンジファインダは Cyberware 3030RGB を用い、出力する全周距離画像、全周テクスチャ画像の解像度は両者とも横 512 画素、縦 450 画素であり、各画素ごとに 1 対 1 に対応している。計算機は SGI Onyx2 IR2(MIPS R10000 195MHz 16CPU) を用いた。実験では 1CPU を使用し、並列処理は行っていない。また、実験に用いた光源は市販の蛍光灯にフードをかぶせたものであり、疑似スポットライトとしている。光源色は白色である。

物体の計測に関して 3.2 節の光源選択の際のパラメータを表 1 にまとめる。

表 1 光源選択の際の各パラメータ

照射光の強度 (Y)	1.0
拡散反射のみを観測可能なしきい値 (θ_{th1})	60.0°
鏡面反射を強く観測可能なしきい値 (θ_{th2})	20.0°
光源選択の終了条件 (th)	80.0%

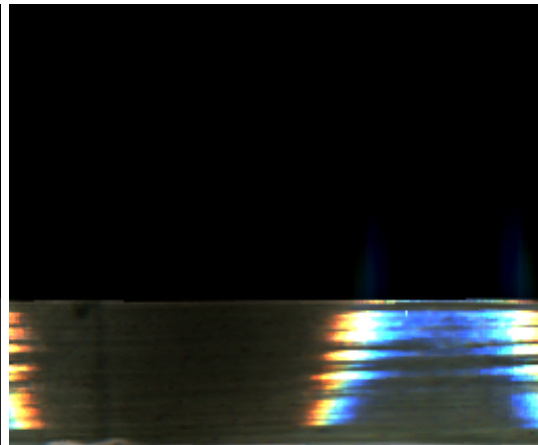
図 16, 図 17, 図 18 はそれぞれ物体の概観と、全周計測レンジファインダで得られる距離画像とテクスチャ画像である。テクスチャ画像に関しては、光源位置を物体に向かって左側に固定し計測したものである。また、距離画像とテクスチャ画像は装置の回転中心からの距離として円筒座標系に投影されている。距離画像内とテクスチャ画像内の黒い部分は物体の形状、表面のテクスチャが取得できなかった部分である。この部分については表面反射特性や、3 次元再構築の際には使用されない。それぞれの物体に対して以下の実験を行った。



(a) 有田焼きの湯のみ



(a) 全周距離画像

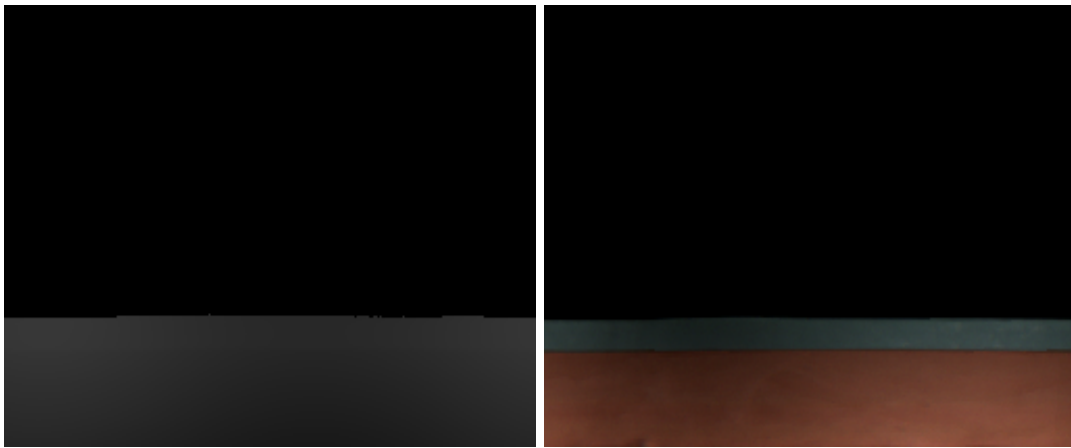


(b) 全周テクスチャ画像

図 16 実験 1 に用いる計測物体と計測結果



(a) 素焼きとタイル製の植木鉢



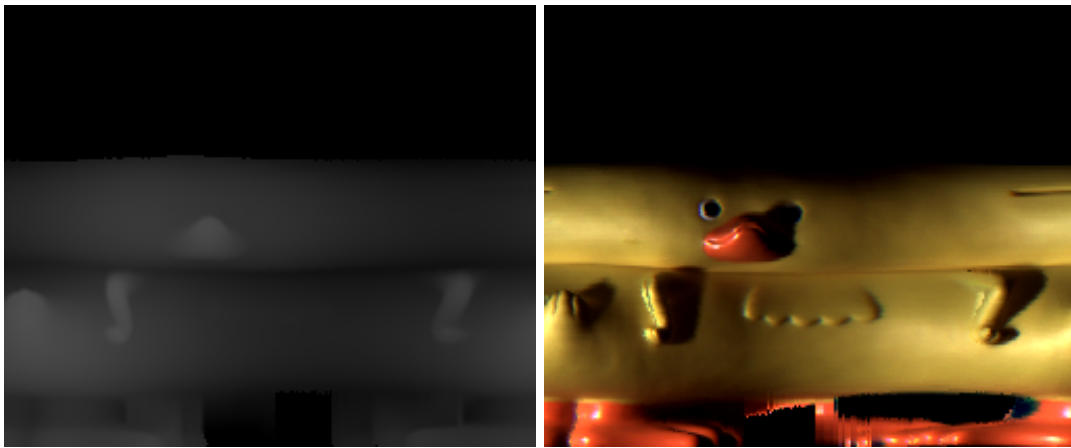
(a) 全周距離画像

(b) 全周テクスチャ画像

図 17 実験 2 に用いる計測物体と計測結果



(a)プラスチック製の貯金箱



(a) 全周距離画像

(b) 全周テクスチャ画像

図 18 実験 3 に用いる計測物体と計測結果

実験 1 ほぼ一様な表面粗さを持つ物体 (形状が単純)(図 16 有田焼きの湯のみ)

実験 2 複数の異なる反射特性を持つ材質から構成される物体 (形状が単純)(図 17 素焼き+塗装した植木鉢)

実験 3 複数の異なる反射特性を持つ材質から構成される物体 (形状が複雑)(図 18 プラスチック製の貯金箱)

ここで、単純な形状と複雑な形状の分類は次のようになる。全周計測レンジファインダは物体の周り 360° 回転することで全周の距離画像とテクスチャ画像を得る。このため、形状が円筒状である場合、鏡面反射成分を観測するために、光源とカメラの位置関係を変化させることなく物体面全体で観測することが容易である。そこで、単純な形状とは円筒状の物体とする。実験 1 では、各反射係数が一様として推定できているかを確認するために、表面の色、材質がほぼ一様である円筒状の物体を用いる。実験 2 では、異なる材質から成る円筒状の物体に対して反射特性の推定を行い、それぞれの材質で一様として推定されていることを確認する。反対に複雑な形状とは鏡面反射成分を観測することが困難である物体を指し、実環境におけるほとんどの物体がこれに当てはまる。この場合、物体自身による影が発生する場合もあり、実験 3 では、提案手法における光源選択の妥当性を検証するために複雑な形状の物体を用いる。

表 2 はそれぞれの実験で物体を計測した場合の 3.2 節の光源位置の決定に関する結果である。この表では、それぞれの物体に対して光源選択に要した時間、選択された光源数、各反射成分の観測が成功した物体表面の割合を示している。ここで観測が成功した物体表面の割合とは、全頂点のうち、各反射成分が観測された頂点数の割合である。この表から物体全体の 90% 以上で観測可能であり、物体の形状に応じた計測時の光源の位置選択が物体の表面反射特性の推定に有効であることがわかる。しかし、湯のみのような円筒状の物体に比べ貯金箱の光源数は増加しており、形状が複雑になると光源位置の選択数は増加し、結果として計測回数が増加する。そのため、より効率的な光源選択が要求される。

表 2 各計測物体に対する光源選択における結果

計測物体	頂点数	光源選択の 処理時間 (分)	選択光源数	拡散反射成分 の観測割合 (%)	鏡面反射成分 の観測割合 (%)
湯のみ	84888	20.6	3	100.0	100.0
植木鉢	76336	17.3	4	100.0	100.0
貯金箱	155316	51.4	12	100.0	81.6

4.2 反射係数の推定

3.3節の表面反射特性の推定に用いたパラメータを表 3にまとめる.

表 3 反射特性推定の際の各パラメータ

完全拡散面のしきい値 (th2)	1.0
平均化の窓の大きさ (U)	3

前節のそれぞれの計測物体に対して表面反射特性の推定を行った結果を示す. 図 19, 図 20, 図 21では, 解像度は得られる距離画像, テクスチャ画像と同様に横 512 画素, 縦 450 画素であり, 黒い部分は計測対象外の部分である. それぞれ (a) は物体表面の拡散反射係数 P_d , (b) は鏡面反射係数 P_s , (c) は表面粗さ係数 σ の推定結果を表している. (a) 拡散反射係数 P_d , (b) 鏡面反射係数 P_s については RGB 値を画素の値としている. (c) 表面粗さ係数 σ は最小値を 0, 最大値を 255 にスケールした 256 階調で表しており, 明るいほど表面の材質は粗く, 暗いほど滑らかである. (d) は観測することが困難である鏡面反射成分について, それぞれの物体で観測できた領域を画像で示しており, 灰色の部分は観測が行えた部分である.

以下にそれぞれの計測物体に対する反射係数の推定結果について述べる.

【実験 1】

図 19(a) では、拡散反射係数 P_d が物体表面のテクスチャとして推定されており、画像上にハイライトは発生していない。これは 3.2 節の光源選択により、拡散反射成分と鏡面反射成分が分離されていることを示している。この図には虹色の部分があり、これは計測時に物体の中心とレンジファインダの回転の中心が、位置合わせされていないことが挙げられる。図 19(b) から鏡面反射係数 P_s は画像全体で一様な色となっていることが確認できる。これは鏡面反射成分は光源の色に大きく影響されることに合致する。図 19(c) から表面粗さ係数 σ についても画像全体で一様となっていることが確認できる。これは物体全体が単一の材質から構成されていることを表しており、鏡面反射成分に関して反射特性が一様であると判断できる。図 19(d) は前節の表 2 からわかるように、鏡面反射成分が物体面全体で観測できていることを示している。

【実験 2】

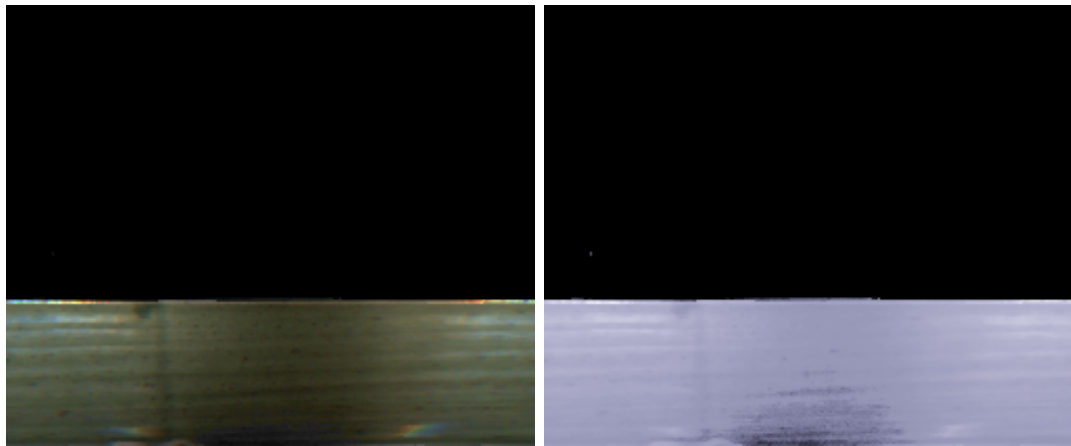
図 20(a) では、図 19(a) と同様に拡散反射係数 P_d が物体表面のテクスチャとして推定されており、各反射成分が分離されているのがわかる。この物体では上部と下部で色が 2 分されており、図 20(a) においても色が 2 分されているのがわかる。また、図 20(b) の鏡面反射係数 P_s が材質ごとに 2 つの色に分離されているのが確認できる。図 20(c) の表面粗さ係数 σ の推定結果も同様であり、図 20(b) と図 20(c) から鏡面反射係数 P_s は物体上部で値が高く、物体下部で値が低い。表面粗さ係数 σ は物体上部では鏡面反射成分の値が低く、物体下部では値が高い。これらの結果から、物体上部では強いハイライトが発生し、物体下部では鏡面反射は発生せず、拡散反射成分のみが発生することを示している。このように異なる材質から構成される物体に対しても、表面反射特性が非一様として推定されていることがわかる。図 20(d) は実験 1 と同様に、鏡面反射成分が物体面全体で観測できていることを示している。

【実験 3】

図 21(a) では複雑な形状の物体に対しても拡散反射係数 P_d が物体表面のテ

クスチャとして推定されている。この物体の場合、形状が複雑であり、計測時に物体自身により影が発生する可能性があるが、図 21(a) では黒い部分がなく、影の位置の予測により忠実に再現できているのがわかる。図 21(b) の鏡面反射係数 P_s は部分的に実験 2 の物体下部の推定結果と同様で、くちばしや足以外の部分で鏡面反射成分が起こりにくい材質であることがわかる。これは図 21(c) の表面粗さ係数 σ においても同様であり、異なる材質から成る物体の反射係数が異なる色として現れていることが確認できる。この図では計測物体のくちばしの部分と足の部分で同じ材質であり、強いハイライトが発生することが予測できる。反対にその他の部分については完全拡散面に近い材質であり、鏡面反射成分は観測されないことがわかる。また、図 21(d) から鏡面反射成分について頭、くちばし、足の部分で法線が鉛直上向き、あるいは鉛直下向きになっているために、鏡面反射成分が観測不可能な領域があり、この部分に関しては補間により反射特性が推定されている。

以上の推定結果より、物体面上の各点で反射特性が推定されていることが確認できた。しかし、各反射係数の推定結果では明るい領域と暗い領域が混在しているように見える。この原因には光源特性のモデル化が忠実でないことが挙げられる。反射モデルでは光源と物体面上の頂点との距離による減衰係数が組み込まれているが、光源が球体でないため、全方向に均一に拡散する光とはならず、点光源としてのモデル化が困難となっている。また、光源の位置合わせが正確でないことも挙げられる。他の反射係数に関してもこの影響が伺え、一様な材質である物体において、その推定値にばらつきが見られる。このことから光源のモデル化および色、位置などのキャリブレーションが必要であることがわかる。



(a) 拡散反射係数 P_d

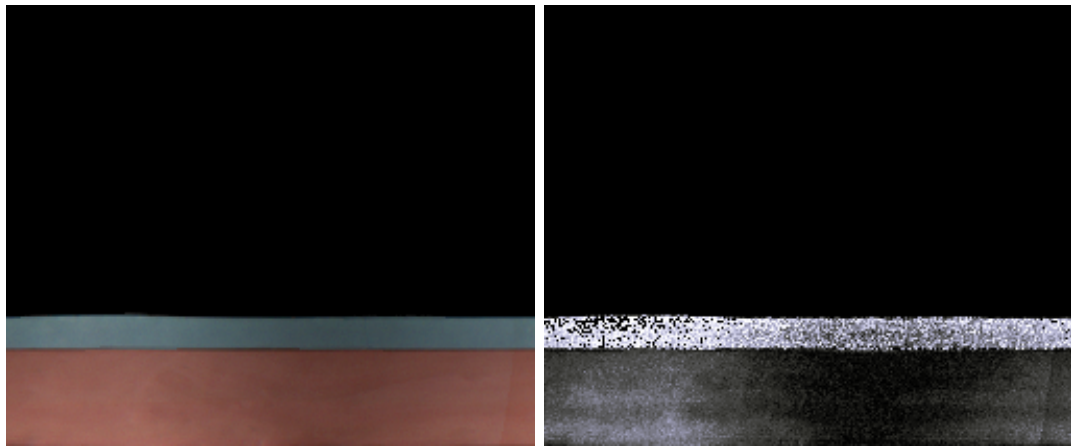
(b) 鏡面反射係数 P_s



(c) 表面粗さ係数 σ

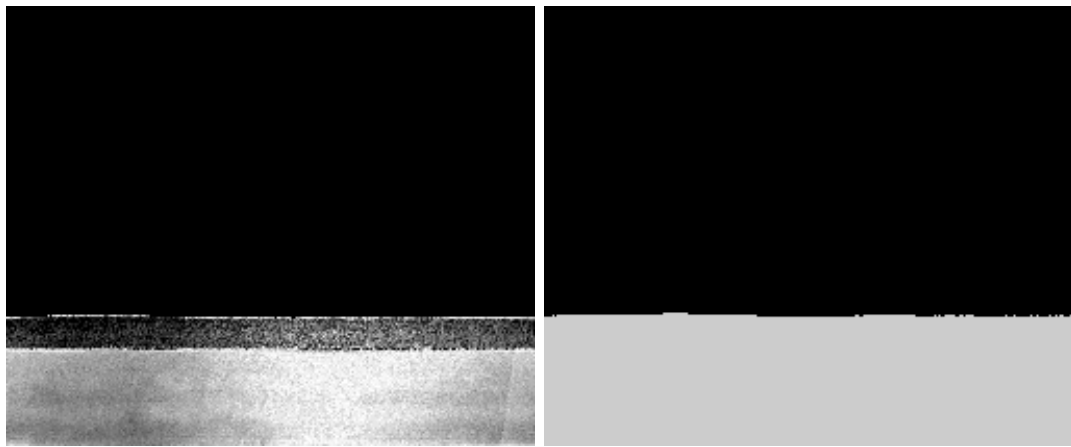
(d) 鏡面反射成分の観測領域

図 19 湯のみの各反射係数



(a) 拡散反射係数 P_d

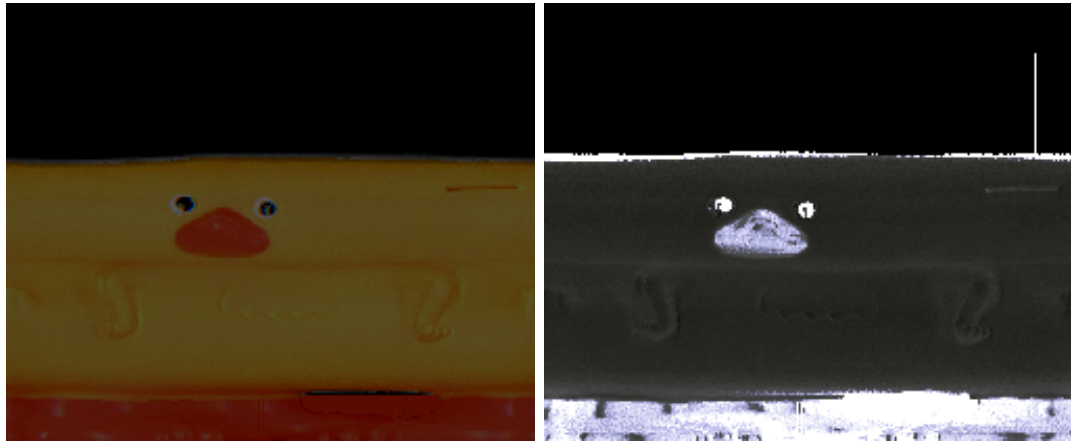
(b) 鏡面反射係数 P_s



(c) 表面粗さ係数 σ

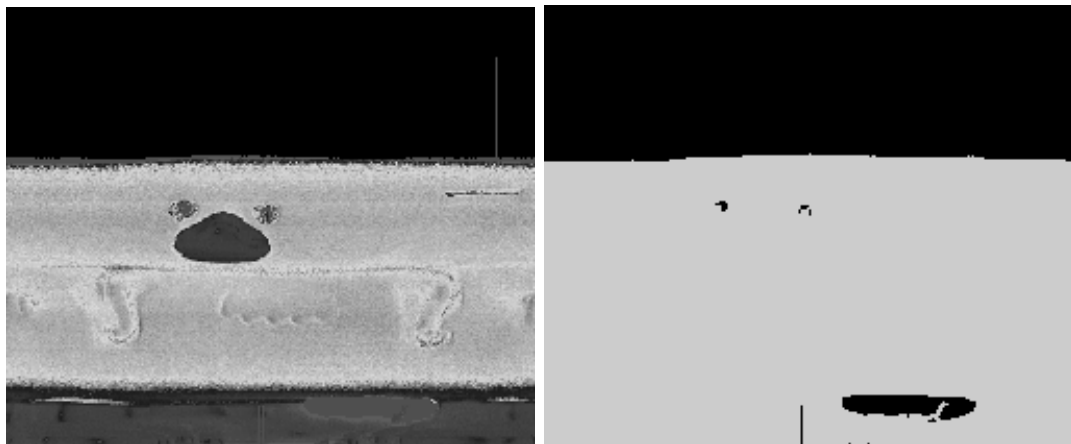
(d) 鏡面反射成分の観測領域

図 20 植木鉢の各反射係数



(a) 拡散反射係数 P_d

(b) 鏡面反射係数 P_s



(c) 表面粗さ係数 σ

(d) 鏡面反射成分の観測領域

図 21 貯金箱の各反射係数

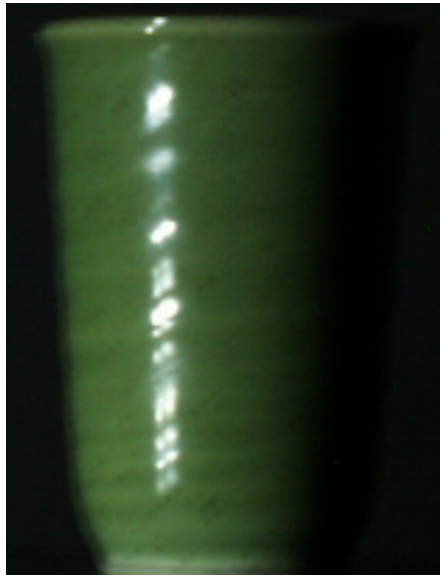
4.3 物体の CG 合成

次に実写と CG の比較実験を行う。比較実験では、実写画像は全周計測レンジファインダの光源設置候補位置の内、2つの位置にそれぞれ1つずつ光源を取り付け、デジタルカメラで撮影したものである。このとき、光源位置 p は物体の重心を原点とした場合の座標系で表される。2つの光源位置は物体に対して左右に固定されている。また、CG による表現では実写画像を取得したときの光源位置 p に仮想光源を設置し、明るさが実写画像と同様になるように光の強度を調節した。以上の2つの光源位置に対して、実写と CG の画像を図 22、図 23、図 24に掲載する。それぞれの図では左が実写画像、右が3次元再構築した結果である。

図 22では、図 19(b) の鏡面反射係数の輝度値は高く、図 19(c) の表面の粗さ係数が小さな値であり、生成画像、実写画像ともに強いハイライトが観測できているのが確認できる。

図 23では、図 20(b) の鏡面反射係数や図 20(c) の表面粗さ係数が物体の上部と下部で異なる値をもっており、異なる材質で構成されている。前節の実験結果では、物体の上部では表面の粗さ係数は小さく、鏡面反射係数の輝度は高いため、強いハイライトが確認できる。また、物体の下部では鏡面反射係数の輝度値が小さく、表面粗さ係数が大きいため、図 23の物体の下部では鏡面反射は発生しておらず、拡散反射のみによる影響がでているのが確認できる。

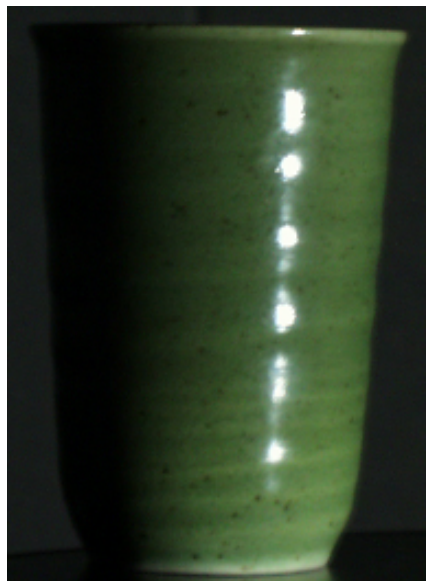
図 24では、植木鉢と同様、異なる材質の部分では異なる反射特性となっており、図 21(b) の鏡面反射成分はくちばしの部分では輝度値が高く、その他の部分では輝度値が低い。また、図 21(c) の表面粗さ係数はくちばしの部分では小さな値であり、その他の部分では大きな値を持っている。このことから、くちばしの部分では強いハイライトが観測され、その他の部分では鏡面反射成分は観測されず、拡散反射のみが観測されているのが確認できる。また、影により物体面に不自然に黒い部分がなく、影の予測が行えているのが確認できる。しかし、提案手法では光の2次反射については考慮していないため、実写と CG 画像を比較した場合、CG 画像では首の部分で暗くなっている。これは、実写では光があごや胸の部分からの反射をうけており、物体全体で一様に明るく見えるためである。このことから、計測時にも同様の現象が起こっていると考えられ、反射係数の推定に相互反射を考



(a) 実写



(b) 3次元再構築結果



(c) 実写



(d) 3次元再構築結果

図 22 任意光源位置でのレンダリング結果 (湯のみ)



(a) 実写



(b) 3次元再構築結果

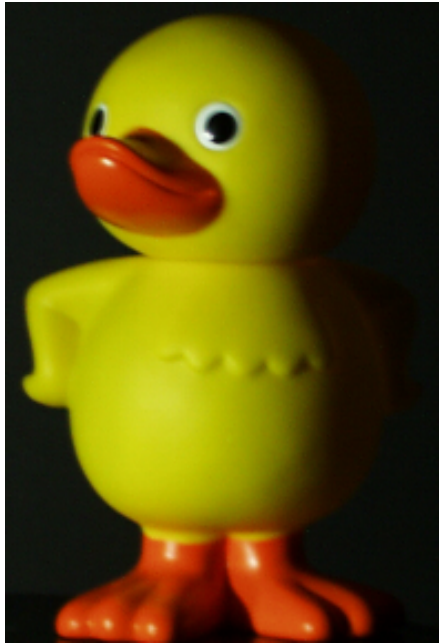


(c) 実写



(d) 3次元再構築結果

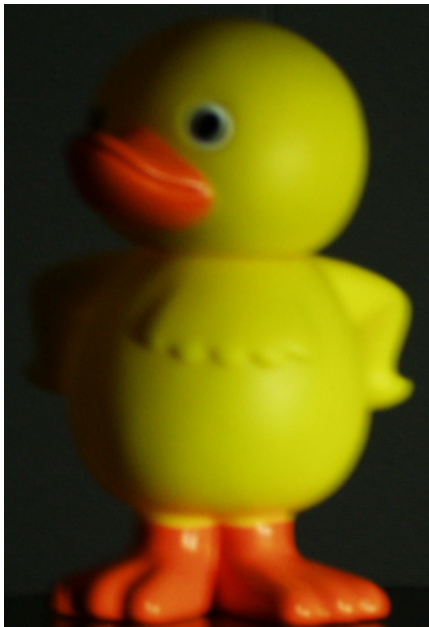
図 23 任意光源位置でのレンダリング結果 (植木鉢)



(a) 実写



(b) 3次元再構築結果



(c) 実写



(d) 3次元再構築結果

図 24 任意光源位置でのレンダリング結果 (貯金箱)

慮する必要があることがわかる。

以上の3次元再構築結果では表面の色の違いがあることがわかる。これは光源の色のキャリブレーションが正確でないためであり、カメラのホワイトバランスの問題である。

4.4 実験結果のまとめと考察

提案手法では光源位置が既知である仮定のもとで、複数の照明条件を用いて推定を行っている。しかし、光源のモデル化や光源の位置の正確さに関する問題や物体面での相互反射の問題が挙げられる。以下では4.2節、4.3節の実験に関するまとめと考察を述べる。

4.4.1 光源の特性に関する問題

全周計測レンジファインダでは物体が装置の回転の中心にない場合、光源と物体との距離による光の減衰を考慮しなければ、計測される表面のテクスチャ画像が一様な明るさで観測されない。そのため光源の位置と物体との間の距離による減衰を反射モデルに組み込んでいる。しかし、4.2節における結果では一様な明るさとはなっておらず、原因として光源の位置合わせが正確でないことや、光源を点光源としてモデル化している部分に問題があると考えられる。また、全周計測レンジファインダに搭載されているカメラのホワイトバランスは蛍光灯に調整されており、光の強度に関して自由に設定することが困難であるため、計測される物体表面の色が実物体とは異なっている。

そこで、光源の位置に関して正確なキャリブレーションが必要となる。光源の色については、近年、あらゆる物体の色が計測可能な分光輝度計とよばれる装置が普及しており、この装置を用いることによって光源の色が識別可能である。物体表面の反射特性を推定する従来研究[11]では分光輝度計が有用であることが報告されている。この装置により、カメラのホワイトバランスに対して、自動で色補正を行うことが可能となると考えられる。

さらに、この装置を使用する利点として、鏡面反射係数 P_s に着目すると、鏡面反射成分は光源の色に大きく影響される性質を持っているため、反射モデル内の

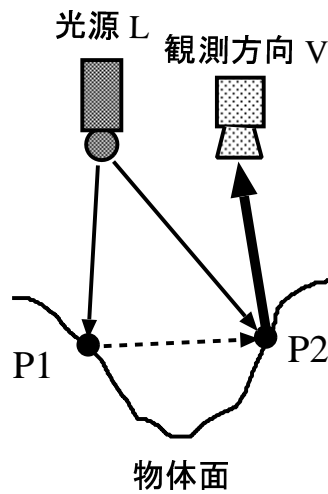


図 25 相互反射の原理

未知である 3つのパラメータ, P_d , P_s , σ のうち, P_s が既知となることが挙げられ, 結果として計測に使用する光源数が減少することとなる. この場合, 3.2節における光源位置の選択において, 選択数が減少することとなり, 結果として少ない計測回数で物体表面の反射特性を現実物体に忠実に推定することが可能であると考えられる.

4.4.2 相互反射による問題

本論文では物体に当たった光は物体自身に遮られなければ, そのまま観測位置に反射すると仮定している. しかし, 物体が複雑な形状を持つ場合, 光の照射に対して相互反射が起こる可能性が高い. 相互反射とは図 25のように P_1 で反射した光が P_2 へ到達し, もう一度反射をして観測方向へ照射する現象を指す. このとき, P_2 からの反射光は P_2 に直接入射する光と P_1 からの反射光の和となっている. 従来研究として, 複数の物体間での相互反射を検出する研究 [25, 26] があり, 相互反射の解析が必要であると報告されている. このことから, 4.3節でも述べたように複雑な形状の物体では物体自身の反射が物体自身の面に再度入射することにより, 物体が一様に明るくなっており, 計測時において相互反射を検出し反射特性の推定を行うことが必要であることがわかる.

5. むすび

本論文では、複雑な形状の物体や複数の材質が混在する物体を仮想環境で表現する際に、光学的整合性問題を解決し現実物体と同様の写実性を再現するため、物体面上の各点で物体表面の反射特性を非一様として推定する手法を提案した。

提案手法では、物体の形状と表面のテクスチャ画像から表面反射特性を推定するため、物体の幾何形状と複数の表面テクスチャ画像との位置合わせに関しては反射特性の推定値に誤差がない装置として、両者の位置合わせが厳密な全周計測レンジファインダを用いた。また、反射特性の推定の際の計算で解が安定して求まるように観測画像から各反射成分の分離を行い、Torrance-Sparrow モデルにおける3つの反射係数を物体全体で非一様として推定した。複雑な形状の物体に対する計測では、物体自身の影が観測される場合を考慮し、光源位置に対して影となる部分を予測することで、忠実な推定を行った。実験では提案手法について従来法では反射特性を推定することが困難であると考えられる物体に対して忠実な反射特性の推定が行えたことを確認した。これにより、現実物体を仮想環境で表現するための反射特性の設定が自動化され、実環境との合成表示に対して違和感のない表現を行うための有効性が示された。

今後の課題としては、計測の際に光源の位置や色に対するキャリブレーションが必要であることや、相互反射の問題があり、より忠実な推定結果を得るためにはこれらの問題を解決する必要がある。また、仮想物体を表示する際に仮想光源に関するパラメータは手動による入力となっており、実環境に仮想物体を合成表示するためには仮想環境内の光源に関するパラメータを試行錯誤で決定する必要がある。この煩雑な作業を軽減するため、実環境における照明条件を推定することにより、簡単に物体表示を行うことが可能であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なご助言，御指導を頂きましたソフトウェア基礎講座 横矢 直和 教授 に厚く御礼申し上げます。

副指導教官として御助言を頂いた 像情報処理講座 千原 國宏 教授，並びに ソフトウェア基礎講座 竹村 治雄 助教授 に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり，あらゆる面において厳しくも暖かい指導を頂きましたソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦 助手に深く感謝致します。

また，本研究に関する貴重な助言や指摘を頂きました 山澤 一誠 助手，佐藤 哲氏，神原 誠之 氏，松宮 雅俊 氏 に深く感謝致します。

日々の研究室の活動を支えて下さった福永 博美 女史に心より感謝申し上げます。

ソフトウェア基礎講座の諸氏には，本研究を進めるにあたり多大なる御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] R. T. Azuma: “A Survey of Augmented Reality,” *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [2] 富永 昌治: “色彩メディア処理研究とその動向”, 信学技報, PRMU98-121, 1998.
- [3] V. Blanz and T. Vetter: “A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces,” *Proc. SIGGRAPH '99*, pp. 187–194, 1999.
- [4] 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史: “実物体のソフトシャドウにもとづく実照明環境の推定”, 情処研報, 98-CVIM-110-3, 1998.
- [5] Y. Yu and J. Malik: “Recovering Photometric Properties Of Architectural Scenes From Photographs,” *Proc. SIGGRAPH '98*, pp. 207–217, 1998.
- [6] G. Kay and T. Caelli: “Inverting an Illumination Model from Range and Intensity Maps,” *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 59, pp. 183–201, 1994.
- [7] Y. Sato, M. D. Wheeler and K. Ikeuchi: “Object Shape and Reflectance Modeling from Observation,” *Proc. SIGGRAPH '97*, pp. 379–387, 1997.
- [8] E. Angel: *Interactive Computer Graphics: A Top-down Approach with OpenGL*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1997.
- [9] R. J. Woodham: “Reflectance Map Techniques for Analyzing Surface Defects in Metal Casting,” MIT AI-TR 457, 1978.
- [10] F. Solomon and K. Ikeuchi: “Extracting the Shape and Roughness of Specular Lobe Objects Using Four Light Photometric Stereo,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 4, pp. 449–454, 1996.
- [11] 田中 法博, 富永 昌治, 河合 利幸: “カラー画像から反射パラメータの推定法と CG 応用”, 情処全大, pp. 105–112, 1999.

- [12] 楊 駿, 大西 昇, 杉江 昇: “2 光源ホトメトリックステレオ法による多面体の形状復元と反射率の推定”, 信学論, Vol. J78-D-II, No. 2, pp. 292–301, 1995.
- [13] 蓮沼 宏: “拡散反射と表面の光沢”, 応用物理 23, 1954.
- [14] S. A. Shafer: “Using Color to Separate Reflection Components,” *Color Res. and Appl.*, Vol. 10, pp. 210–218, 1985.
- [15] J. D. Foley, A. V. Dam, S. K. Feiner and J. F. Hughes: *Computer Graphics: Principles and Practice - second edition*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1993.
- [16] B. T. Phong: “Illumination for Computer Generated Pictures,” *Commun. ACM*, Vol. 18, No. 6, June, pp. 311–317, 1975.
- [17] P. Beckmann and A. Spizzichino: *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, MacMillan, Pergamon Pres, Oxford, 1963.
- [18] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: “Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces,” *Jour. Optical Society of America*, Vol. 57, pp. 1105–1114, 1967.
- [19] K. Ikeuchi and K. Sato: “Determining Reflectance Properties of an Object Using Range and Brightness Images,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 11, pp. 1139–1153, 1991.
- [20] R. Baribeau, M. Rioux and G. Godin: “Color Reflectance Modeling Using a Polychromatic Laser Range Sensor,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 263–269, 1992.
- [21] Y. Sato and K. Ikeuchi: “Reflectance Analysis for 3D Computer Graphics Model Generation,” *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 58, No. 5, pp. 437–451, 1996.

- [22] S. Lin and S. W. Lee: "A Representation of Specular Appearance," Proc. Int. Conf. on Computer Vision, Vol. 2, pp. 849–854, 1999.
- [23] S. Lin and S. W. Lee: "Estimation of Diffuse and Specular Appearance," Proc. Int. Conf. on Computer Vision, Vol. 2, pp. 855–860, 1999.
- [24] 町田 貴史, 岩佐 英彦, 竹村 治雄, 横矢 直和: "複数の照明条件下での全周計測レンジファインダを用いた物体の反射係数の推定", 信学技報, PRMU99-162, 1999.
- [25] 眞鍋 佳嗣, 佐藤 宏介, 井口 征士: "光源移動による相互反射の検出", 信学論, Vol. J78-D-II, No. 1, pp. 86–93, 1995.
- [26] 富永 昌治, 岡山 敏之: "ハイライトや相互反射の影響を含むカラー画像の解析法", 信学論, Vol. J80-D-II, No. 6, pp. 1360–1369, 1997.