

インバースレンダリング

佐藤 洋一[†] 向川 康博^{††}

コンピュータグラフィックスでは物体の幾何形状、反射特性、光源分布が与えられた上で如何にして物体の画像を描画するかという問題が取り扱われるのに対し、一枚もしくは複数枚の実画像が与えられた場合に如何にして物体の幾何形状や反射特性、それに光源分布を推定するかという問題はコンピュータグラフィックスにおけるレンダリングの逆問題という意味でインバースレンダリングと呼ばれ、コンピュータグラフィックスやコンピュータビジョンの分野において近年活発に研究が進められてきている。本稿ではインバースレンダリングの基本的な考え方を紹介するとともに、この分野における代表的な研究例をサーベイする。

Inverse Rendering

YOICHI SATO[†] and YASUHIRO MUKAIGAWA^{††}

Conventional computer graphics techniques deal with a problem of how to synthesize realistic images of an object when the shape and reflectance properties of the object, as well as the lighting condition of an environment where the object is placed, are provided. On the other hand, techniques called *inversed rendering* deal with an inverse problem of traditional rendering: how to estimate the shape and reflectance properties of an object and a scene illumination when one or more of images of the object and the scene are given. Such techniques recently attracted much attention in the fields of computer graphics and computer vision. In this survey paper, we present the basic concept of inverse rendering and summarize works developed in this area.

1. はじめに

視覚的に現実感の高い画像の生成はコンピュータグラフィックス (CG) の分野における中心的な課題であり、これまでにさまざまな描画アルゴリズムやハードウェアなどが開発されてきた。その結果、非常に複雑な形状を持つ物体などについても、その微妙な質感も含めて実時間で描画するといったことが可能となっている。ところが、このような描画技術の進歩の一方で、生成画像のリアリティを追求し複雑かつ微妙な部分まで再現しようとすればするほど、その物体の見え方に関するモデルを手作業などで準備することが困難になってしまうという問題が顕在化してきている。

このような背景のもと、描画対象となる物体に関するモデルをどのようにして準備すればよいかという問題に対して、現実存在する物体を観察することにより、その物体の見え方に関するモデルを自動的に獲得

するというアプローチ、いわば *modeling from reality*²⁴⁾ と呼ぶべきアプローチが注目されるようになってきた。このような技術のうち画像を対象としたものはイメージベースドモデリング (image-based modeling) と呼ばれ、90年代後半に入ってから主にコンピュータビジョン (CV) と CG の分野において活発に研究が進められてきた結果、インバースレンダリング (inverse rendering) とイメージベースドレンダリング (image-based rendering) の2つの技術分野として確立されつつある。

従来の CG では物体の幾何形状、反射特性、物体が置かれた環境における光源の配置などが与えられた上で、その物体の画像を描画するのに対し、インバースレンダリングでは実物体やその周辺環境を撮影した一枚もしくは複数枚の画像をもとにして、物体の形状、反射特性、環境の光源分布などを推定していく。このような技術は従来の CG における描画 (レンダリング) の逆問題 (inverse problem) という意味においてインバースレンダリングと総称される。本稿ではインバースレンダリングの基本的な考え方とともに、代表的な研究例をサーベイする。

一方、イメージベースドレンダリングでは、物体の見え方を物体が置かれた3次元空間中における反射光

[†] 東京大学 生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
ysato@iis.u-tokyo.ac.jp

^{††} 筑波大学 機能工学系 先端学際領域研究センター
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba
mukaigaw@image.esys.tsukuba.ac.jp

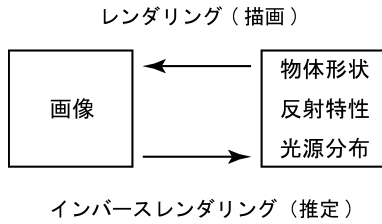


図1 インバースレンダリング

(光線)の分布として表現する。イメージベースドレンダリングは実画像をもとにして物体の見えに関するモデルを獲得するという点においてインバースレンダリングと密接に関係しているが、インバースレンダリングでは物体の反射特性と光源分布を別々に取り扱うのに対し、イメージベースドレンダリングではある光源下で観察された物体の反射光そのものを記録するため、環境における光源の影響と物体固有の反射特性を分離して取り扱うことができず、入力画像撮影時と異なった光源環境下における物体の見えを生成することが容易ではないといった違いも存在する。イメージベースドレンダリング技術の基本的な考え方および最近の研究例などは別のサーベイ論文^(65),78)に詳しく述べられており、本稿では取り扱わないこととする。

以下、第2章でレンダリング方程式²⁷⁾にもとづきインバースレンダリングの基本的な考え方と手法の分類を紹介した後に、第3章以降でインバースレンダリング手法を各分類ごとに説明していく。

2. インバースレンダリングの基本的な考え方

物体表面上の鏡面反射、影、物体間の相互反射などを含めて、シーン内における光の反射を計算するという問題は全域照明問題 (global illumination) と呼ばれ、基本となる数学モデルとして Kajiyama により提案されたレンダリング方程式 (rendering equation)²⁷⁾ が良く知られている。CGにおける画像の生成はこのレンダリング方程式を解くことに相当し、具体的な方法としてラジオシティ法やモンテカルロ光線追跡法⁶⁶⁾、最近ではフォトンマッピング法²⁶⁾などが用いられる。

シーン中の物体表面上の点 \mathbf{r} において方向 ω へ放射される光の輝度 L (radiance, 単位は $W/(m^2 sr)$) は次式のレンダリング方程式により与えられる。

$$L(\mathbf{r}, \omega) = L_e(\mathbf{r}, \omega) + \int_{S_i} f_r(\mathbf{r}, \omega, \omega_i) L_i(\mathbf{r}, \omega_i) \cos\theta d\omega_i \quad (1)$$

ここで、 $L_e(\mathbf{r}, \omega)$ は点 \mathbf{r} において物体表面が光源として発する光の輝度、 $f_r(\mathbf{r}, \omega, \omega_i)$ は点 \mathbf{r} における光の反射を表す双方向性反射率分布関数 (bidirectional reflection distribution function, BRDF)、 $L_i(\mathbf{r}, \omega)$

は方向 ω から点 \mathbf{r} へ入射する光の輝度、 θ は点 \mathbf{r} における面法線方向と光に反射方向 ω とがなす角、 S_i は点 \mathbf{r} における光の入射方向 ω_i の範囲を意味する。

このレンダリング方程式は local reflection operator K と field radiance operator G と呼ばれる2つの演算子を導入することにより次式のように簡潔に表現することができる^{1),2),40)}。

$$L = L_e + KGL \quad (2)$$

ここで field radiance operator G はシーン中の各点からの放射光輝度分布をある点 \mathbf{r} における入射光輝度分布 $L_i(\mathbf{r}, \omega)$ に変換する役割を持ち、シーンの幾何形状により決定される演算子である。一方、local reflection operator K は点 \mathbf{r} における入射光輝度分布 $L_i(\mathbf{r}, \omega)$ を反射光輝度分布 $L(\mathbf{r}, \omega)$ に変換する役割を持ち、点 \mathbf{r} における物体表面の反射特性により決定される。CGにおけるレンダリングはシーンの光源 L_e 、反射特性 K 、幾何形状 G を与えられた上でシーン内の各点からの光の輝度の分布 L を求めることに相当する。

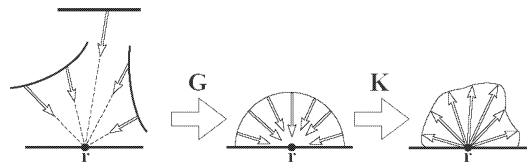


図2 local reflection operator G と field radiance operator K

インバースレンダリングの問題を式 (2) にもとづいて考えてみると、画像中に観察されたシーン内の物体表面の明るさ L をもとに、光源 L_e 、反射特性 K 、幾何形状 G を推定することに相当する。

ここで、レンダリング方程式をそのまま用いて L_e 、 K 、 G の全てを推定することは不可能であるため、これらのうち幾つかは既知であると仮定した上で、残りを推定するということが行われるが、どの変数を既知とし、どの変数を推定するかによってインバースレンダリングの手法を3つに分類することができる (表1)。 L_e が未知、 L 、 K 、 G が既知もしくは部分的に既知という場合は画像にもとづく光源推定 (inverse lighting) の問題となり、 K が未知、 L 、 L_e 、 G が既知という場合には画像にもとづく反射特性の推定の問題 (inverse reflectometry) となる。また、 G が未知で K 、 L 、 L_e が既知もしくは部分的に既知という場合は画像にもとづく形状推定の問題 (inverse geometry) となる。

shape from shading や photometric stereo など、CV の分野で古くから扱われてきた明るさにもとづく

表 1 インバースレンダリング手法の分類

	L_e	K	G
光源推定	未知	既知	既知
反射特性推定	既知	未知	既知
形状推定	既知	既知	未知

物体の形状推定は inverse geometry に相当し、対象とする光源の種類や表面反射特性など、さまざまな設定に対し多くの手法が開発されている。本稿におけるサーベイではこれらを対象とせず、残りの 2 分類 (inverse lighting と inverse reflectometry) について関連研究を紹介することとする。

その他、CV の分野では shape from shading による形状復元を目的として光源方向の推定が 80 年代前半から研究されてきている^{(6),(21),(31),(49),(55),(79)}。これらもインバースレンダリングにおける光源推定と考えることができるが、均一なランバート面において面法線方向が全ての方向に等しく分布しているなどといった強い仮定を置いた上で単一光源の方向を推定するといったものであり、一般的なシーンの解析に利用するのは難しかった。

以下、インバースレンダリングについて、光源の推定 (第 3 章)、反射特性の推定 (第 4 章) の順に代表的な研究例の概要を述べることにする。

3. 光源の推定

3.1 明るさの線形性にもとづく光源推定

インバースレンダリングによる光源推定として明るさの線形性を用いた手法が提案されている。ここでいう明るさの線形性とは複数の光源が存在する環境において観察される物体の明るさは、それぞれの光源の下における物体の明るさの和に等しいということを意味する。

シーン内の光源 I を単位輝度を持つ n 個の基底光源 $I^{(i)}$ の線形和により $I = \sum_{i=1}^n \alpha_i I^{(i)}$ と表現する。ここで α_i は各基底光源の強さを表す光源分布係数である。また各基底光源 $I^{(i)}$ の下で観察されるシーン内のある点 x_j の明るさ $R_j(I^{(i)})$ が与えられているとすると、シーン内の光源 I の下において観察される明るさ x_j は

$$x_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i R_j(I^{(i)}) \quad (3)$$

と表すことができる。十分多い数の点における明るさ x_j を考慮することにより、

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ x_j \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \cdots R_j(I^{(i)}) \cdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \alpha_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{X} = \hat{R}\hat{I}$$

となり、これを未知数 α_i について解くことにより画像として観察された明るさ x_j をもとに光源分布 $I = \sum_{i=1}^n \alpha_i I^{(i)}$ を求めることができる。これが明るさの線形性にもとづく光源推定における基本的な考え方となっている。なお、現実には負の明るさを持つ光源が存在することはないため、式 (4) は光源分布係数 α_i が負にならないといった条件の下で解かれることが多い。

ここで、各基底光源下におけるシーン内のある点 x_j の明るさを表す $R_j(I^{(i)})$ は光源からの 1 次反射だけでなく相互反射や影などの各要因も含んでいるとしても基本的な枠組みは変わらない点が重要である。例えば、シーン内の物体の幾何形状や反射特性が正しく与えられているとすれば、各基底光源下において観察される明るさは、大局照明問題のための CG の描画手法 (フォトンマッピング法など) を用いてあらかじめ計算しておくことができる。また、シーン内の物体の形状や反射特性が与えられていないとしても、各基底光源下において実物体の画像を撮影すれば、そこで観察された明るさは相互反射などの全ての要因を含んだものとなる。このことから、明るさの線形性にもとづく光源推定は非常に一般的な枠組みであると言える。

Marschner らはこの枠組みにもとづいて、単光源の方向を変えながら撮影した物体の画像の集合が与えられた場合に、未知の光源分布下で撮影された物体の画像から光源分布を表す係数 α_i を推定している^{(39),(40)}。しかしながら、人の顔など比較的拡散反射成分が強く観察される物体を対象とし、主に 1 次反射成分のみを取り扱ったために光源分布係数を安定に求めることが難しかった。

CV の分野では比較的早い段階で Hougen らが明るさの線形性にもとづく光源推定を紹介している⁽²²⁾。ここでは、複数光源下における shape from shading を目的とし、光源からの直接光による 1 次反射成分のみを考慮して光源分布係数を求めている。面白いことに、Hougen らは既にこの研究において物体反射特性と推定される光源分布との定性的な関係を述べている。具体的には、物体表面が拡散面である場合には光源分布係数の推定が不安定になるのを避けるために、基底光源の数を減らさなければならず、鏡面反射成分を含めばより多くの基底光源を考慮した推定が可能になると説明されている。

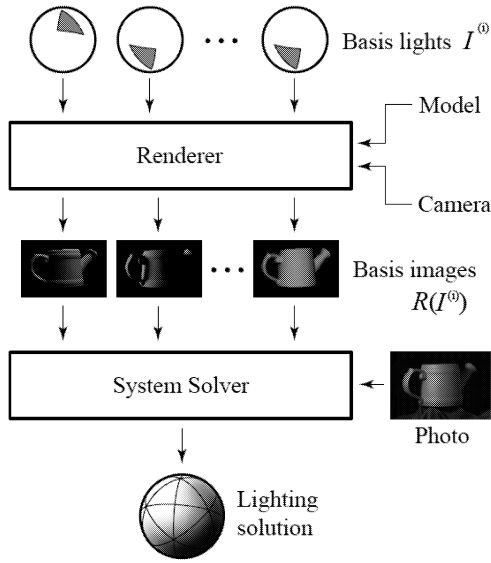


図3 明るさの線形性にもとづく光源推定

3.2 インバースレンダリングの周波数解析

凸物体表面における1次反射光にもとづく光源推定の安定性について、Ramamoorthiらは理論的な解析を報告している⁵²⁾。

彼らは、凸物体表面上のある点における反射光強度の分布は環境の光源輝度分布と物体表面のBRDFとの畳み込みにより記述されるということに着目し、これらの関係は周波数領域において次のように簡潔に表現されることを示した。

$$B_{lmpq} = \Lambda_l L_{lm} \hat{\rho}_{lpq} \quad (5)$$

ここで B_{lmpq} は反射光強度分布を球面調和関数で展開した展開係数、 L_{lm} は光源分布の展開係数、 $\hat{\rho}_{lpq}$ はBRDFの展開係数、 Λ_l は正規化定数、 l, m, p, q はそれぞれ球面調和関数の次数を表している。式(5)から、観察された反射光分布から計算される展開係数 B_{lmpq} をBRDFの展開係数 $\hat{\rho}_{lpq}$ で割ることにより光源分布の展開係数 L_{lm} 、すなわち光源分布が求められることが分かる。

$$L_{lm} = \Lambda_l^{-1} \frac{B_{lmpq}}{\hat{\rho}_{lpq}} \quad (6)$$

しかしながら、Lambert反射モデルに従う完全拡散反射面では99%以上のエネルギーが2次以下の周波数成分に集中していることが示されており^{4),53)}、低次の $\hat{\rho}_{lpq}$ 以外はほぼゼロに等しく光源展開係数 L_{lm} を安定に求めることができない。Marschnerら³⁹⁾が報告している光源推定の際の不安定さはこれに起因している。逆に、完全鏡面物体の場合にはBRDFの展開係数 $\hat{\rho}_{lpq}$ が高次まで値を持つために、高次の光源展開係数を安定に求めることができる。これは鏡状の球

体の反射光をもとに高周波成分を含んだ光源分布がうまく計測できることを説明している。

3.3 影にもとづく光源推定

Marschnerらの手法やHougenらの手法では主に凸物体表面上の拡散反射光を扱っていたため光源分布を安定に推定することが難しかったのに対し、Satoらは影を利用することで複雑な光源分布も安定かつ正確に推定できることを示した^{59),60)}。

この手法では、影を落とす遮蔽物体の形状は予め与えられているとし、明るさの線形性にもとづき平面上に落とされる影内の明るさ分布と光源分布係数との関係を式(4)と同様に表現し光源分布を推定している。拡散反射面における1次反射成分のみを考慮した場合と異なり、影を考慮した場合には式(4)の \hat{R} がランク落ちしにくく、結果として光源分布係数を安定に求めることが可能となる。

さらにSatoらは式(4)の \hat{R} の逆行列を求める際の計算コストの増大を抑えるために、少ない数の基底光源による推定から必要に応じて基底光源を分割していく coarse-to-fine による工夫も紹介している。また、影が落とされる平面としては、Lambert面だけでなく Torrance-Sparrow 反射モデル⁷⁰⁾ に従う鏡面反射を含む面も取り扱われており、模様などを持った不均一な反射特性を持った平面の場合には遮蔽物体を置いた場合と置かない場合との2枚の画像の比を用いて不均一な反射特性の影響を補正する手法が用いられている。このように2枚の画像の比を用いて光源分布を推定する手法は、対象物体の姿勢を変えながら撮影した複数画像をもとにした複雑光源分布の推定¹⁴⁾ や、複数視点方向から撮影されたテクスチャの陰影を合わせることを目的とした光源分布推定⁷¹⁾ などにも用いられている。

さらに佐藤らは影を用いた光源推定法の応用として、絵画に描かれた影の明るさを手がかりに画家の陰影特徴を解析するという研究を行っている⁶¹⁾。この例では、絵画中の影をもとにして描かれたシーンの光源を推定し、その影のもとで観察されるべき物理的に正しい影と実際に描かれた影との間の色や陰影の関係を手がかりに、画家特有の色使いの特徴を定量的に求めている。

Ramamoorthiら⁵²⁾が凸物体表面上の1次反射光にもとづく光源推定の安定性について理論的な解析を報告したのに対し、岡部らは影にもとづく光源推定が経験的にうまく働く理由について周波数領域における理論的な解析を報告している⁴⁵⁾。更に彼らは複雑な光源分布を安定かつ効率よく推定するために Harr Wavelet 基底を用いた推定手法を開発している。

3.4 光源設計を目的とした光源推定

明るさの線形性にもとづく光源推定に関連した技術として、CGの分野において開発された光源設計 (lighting design) のための手法がある。Schoenemanらはシーン内の光源の輝度をいかにして調整するかという光源設計の問題を、ユーザが指定されたシーンの明るさを最も良く再現するような光源の輝度を求める問題と捉え、*painting with light* と呼ばれる手法を開発した⁶²⁾。この研究ではシーン内の物体の幾何形状や反射特性が全て予め手作業などで与えられているCG画像のみが取り扱われており、実画像からの光源推定は行われなかったが、光源推定の問題を明るさの線形性にもとづいた制約付き最小二乗問題として定式化した先駆的な例としてこの研究の意義は大きいといえる。

Costaらは単にユーザが指定したシーンの明るさを最も良く再現するというだけでなく、シーン内のある特定の机面ができるだけ均一に照らされている、ある視点からユーザがシーンを見た場合にまぶしい鏡面反射光が目に入らない、といったより複雑な制約条件をも考慮した光源設計法を提案している⁸⁾。さらに、Shackedらは人間の視知覚特性をも考慮した上で最も良いと思われる光源分布を決定するという興味深い手法を開発している⁶³⁾。

3.5 専用のキャリブレーション物体を利用した光源推定

実環境の光源分布を計測するために専用のキャリブレーション物体を利用する方法が幾つか提案されている。3次元形状と表面反射特性が分かっている物体上の反射光により光源分布を求めるという点で、これらの方法もインバースレンダリングによる光源推定の一つと考えることができる。

このような方法では鏡面球がよく用いられる。例えばDebevecらは*light probe* と呼ばれる鏡面球をシーン内に設置して撮影し、鏡面球上の反射光強度をもとに環境内の光源分布を決定している¹¹⁾ (図4)。ただし、このままでは球と光源までの距離は決まらないため、予め手入力で与えられている部屋の形状を利用している。最近では神原らが複合現実感における光学的整合性の実現を目的として、小型の球面球を利用した実時間計測・描画システムを構築している²⁸⁾。

なお、鏡面球をもちいた光源分布計測において鏡面上の反射光強度を正しく求めるには十分広いダイナミックレンジを持った計測が必要とされることから、シャッター速度を変えながら撮影した複数枚の画像をもとに生成する高ダイナミックレンジ画像^{10),42)} が用いられることが多い。

1個の参照球だけでは光源の方向しか分からず光源までの距離が計測できないという課題に対して、Pow-

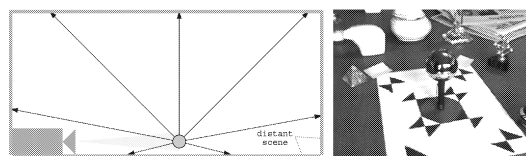


図4 鏡面球を利用した光源分布の計測

ellらは鏡面反射が強く観察される参照球を2個用いることにより、2つの参照球上のハイライトの対応づけを行い光源の位置を求める手法を提案している⁵¹⁾。ただし、この例では幾つかの点光源の位置を求めるとどまっておき、より複雑な光源分布の推定へは適用できなかった。

鏡面反射するキャリブレーション球を用いる方法に対し、均一な反射特性を持った完全拡散球を利用した方法も幾つか提案されている。十分遠方にある1個の光源で拡散球を照らした場合、光源により照らされる領域と陰になる領域との間に円状の境界線が観察される。Zhangらは拡散球状でこのような境界線を複数見つけることにより複数の方向光源の方向と強度を推定する手法を開発した⁷⁷⁾。さらにWangらは、このZhangらの手法をもとに、ノイズなどの影響を受けにくく任意形状を持つ完全拡散物体の利用を可能とするように拡張している⁷²⁾。

Takaiらは2個の完全拡散球を利用して光源の3次元位置を求める手法を提案している⁶⁷⁾。キャリブレーション球上のハイライトの位置を利用するPowellらの方法⁵¹⁾とは異なり、Takaiらの方法では各々の拡散球上の等輝度線の分布から推定された光源方向をもとに近接光源の位置と強度を求めている。しかしながら、拡散球を利用したこれらの手法^{67),72),77)}では、球面上で境界線や等輝度線を安定に見つけることが難しく、数個程度の点光源など比較的単純な光源分布にし適用できないという共通の問題が存在する。

また最近では、反射光ではなく影を利用した光源推定用のキャリブレーション物体も提案されている⁶⁸⁾。影にもとづく光源推定では遮蔽物体の後ろに落とされる影が観察できないことが原因となり、遮蔽物体から見てカメラ側の光源分布がうまく求められないという欠点が存在する。これに対し、中空の立方体の内壁に落とされるセルフシャドウを利用するというアプローチが取られている。また、この例では無限遠方光源だけでなく近接光源の推定も試みているが、推定する未知数が極端に多くなるために光源を安定に推定することが難しいということが報告されている。

4. 反射特性の推定

次に、インバースレンダリングによる物体の反射特

性の推定について考えることにする。ここで入力画像をもとにした物体の反射特性の推定を式(2)のレンダリング方程式にもとづいて考えてみると、 L, G, L_e を既知とし K を求める問題に相当する。また、凸物体表面上の1次反射を利用した反射特性の推定について周波数領域で考えた場合、式(5)から、次のようにBRDFの展開係数を求めることになる。

$$\hat{\rho}_{lpq} = \Lambda_l^{-1} \frac{B_{lmpq}}{L_{lm}} \quad (7)$$

そのため、光源推定の場合と同様に、高周波成分を持たない光源分布の下で観察された画像ではBRDFの展開係数の低次項しか安定に求めることができないということが分かる。インバースレンダリングによる反射特性の推定では暗い環境内で単一の点光源のみが用いられることが多いのはこのためである。

また、物体の反射特性を推定するためには、光の入射方向や視線方向を変化させたときに反射光強度がどのように変化するかということを知ることが必要となるが、入力画像の撮影の仕方として幾つかの方法を考えることができる。BRDFを完全に計測しようとした場合、光源方向(2自由度)と視線方向(2自由度)の全てを変化させながら反射光強度を計測する必要があり、ゴニオフォトメータなどの専用計測装置を用いても非常に時間のかかる作業を要する。それに加え、4自由度全てについてBRDFを記録するためには必要とされるデータ量が膨大になってしまう。そのため、インバースレンダリングによる反射特性推定では等方性反射を仮定して図5(a)のように1自由度減らしたサンプリングとすることが一般的である。また、図5(b)のように移動もしくは固定された光源の下で物体の姿勢を変えながら計測する手法も多い。さらに、図5(c)に示す計測方法は、対象物体が均一な反射特性を持つものと仮定することにより、一枚の画像において物体表面上の各点で異なる入射方向と反射方向に対する反射光強度をまとめて計測するというものである。後述するMarschnerらのimage-based BRDF measurement⁴¹⁾などはこれに相当する。

インバースレンダリングによる反射特性の推定手法は多く提案されているが、光源からの1次反射光のみを考慮したものとシーン内の相互反射まで考慮したものとに大別される。以下、1次反射光のみを考慮した手法と相互反射を考慮した手法のそれぞれについて代表的な研究例を紹介する。

4.1 1次反射光を用いた反射特性の推定

インバースレンダリングによる反射特性の推定では、Lambertモデル、Phong反射モデル⁵⁰⁾、Cook-Torrance反射モデル⁷⁾、Torrance-Sparrow反射モデル⁷⁰⁾(以下、TS反射モデル)など、少数のパラメタ

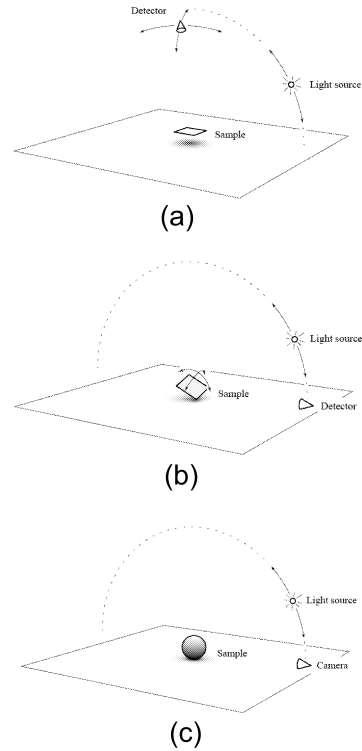


図5 反射特性推定のための画像計測

で表現されるパラメトリック反射関数モデルを用いて物体表面の反射特性を近似することがよく行われる。一方、パラメトリック反射関数による近似を用いること無しに、BRDFそのものを画像から計測するという手法も幾つか報告されている。以下、パラメトリック反射関数を用いる手法と用いない手法について述べる。

4.1.1 パラメトリック反射関数による近似にもとづく手法

物体形状を仮定した上でランバート面以外の反射特性を計測した先駆的な研究としてIkeuchiらによる手法²³⁾がある。この手法では、物体表面が均一の反射特性を持つ場合について、一組の距離画像と濃淡画像からTS反射モデルのパラメタを推定している。また、物体表面の反射モデルパラメタに加え、単光源の方向も同時に推定している点が特徴となっている。

Kayらは1枚の距離画像と異なる光源方向から照らされた4枚の濃淡画像を利用して均一でない反射特性を持った物体の反射モデルパラメタを推定する手法を提案している²⁹⁾。Ikeuchiらの手法と同様にして距離画像により直接計測された3次元形状から面法線方向を決定した後、4枚の濃淡画像の明るさにもとづき物体表面上の各点に対してTS反射モデルのパラメタを非線形最適化により求めている。反射関数のパラメタを安定に求めるための工夫として、鏡面反射成分が観察される点とそうでない点とに分けて、それぞれに

別のパラメタ推定法を適用している。

同様に物体表面における反射特性が均一でない場合を取り扱ったものとして、大槻らの手法⁴⁷⁾がある。ここでは、既知の場所に設置した単光源下において物体を回転させながら取得した形状情報とカラー画像列をもとに、物体表面各点に対して簡略化した Cook-Torrance 反射モデルのパラメタを推定している。物体表面上のハイライトとして観察される鏡面反射成分は物体表面の一部においてのみ観察されるために、大槻らの手法では鏡面反射パラメタが部分的にのみ推定されていた。

Sato らは鏡面反射光が光源と同一色となること⁶⁴⁾を利用して拡散反射成分と鏡面反射成分を分離⁵⁶⁾した後、拡散反射成分の色に基づき物体表面を領域分割し、各領域内で均一の鏡面反射特性を仮定することで物体表面全体で TS 反射モデルのパラメタを推定する手法を提案している⁵⁷⁾。この手法はその後、鏡面反射パラメタ推定に適した部分を物体表面上で特定し、それらの部分において推定されたパラメタを表面上で補間することにより表面全体で反射モデルパラメタを獲得する方法へと拡張された⁵⁸⁾。

この他にも反射成分の分離を利用した反射特性推定法として Nishino らの手法⁴³⁾がある。単一光源下での撮影画像を仮定した従来法に対し、この手法は幾つかの光源が存在する場合でも対応できる点が特長となっている。Sato らの手法^{57),58)}では色にもとづく反射成分分離が用いられていたのに対し、Nishino らの手法では異なる方向から反射光を観察した場合に鏡面反射成分の強度のみが変動するというに基づいて反射成分を分離している。さらに分離された鏡面反射成分を利用して、鏡面球で光源輝度分布を直接測定するのと同じ要領¹¹⁾で光源分布を求めている。ただし、反射光として物体表面上で観察される鏡面反射成分の広がりや光源自体の大きさと物体表面の粗さの両方に依存するために、物体表面全体で均一な鏡面反射特性を仮定して鏡面反射パラメタと光源分布の両方を誤差最小化により求めている。

無限遠方の光源ではなく近接光源下において反射パラメタを推定した例として原らの研究が報告されている¹⁸⁾。まず、近接光源下で平面状物体を撮影した透視投影画像から拡散反射成分と鏡面反射成分の偏光状態の違いを利用して両成分を分離⁷⁵⁾する。その後、分離された鏡面反射成分に対して対数変換により線形化された TS 反射モデルを考慮することにより、光源位置と鏡面反射パラメタの両方を推定している。原らはその後、色にもとづく反射成分分離を用いることにより、一枚の入力画像から近接光源位置と反射パラメタを推定することができるように拡張している¹⁹⁾。

最近では、Lensch ら³²⁾により、比較的少数の入力画像をもとに物体表面上で変化する反射モデルパラメタをうまく推定する手法が紹介されている。この手法では、色にもとづく物体表面上の領域分割を行なった Sato らの手法⁵⁷⁾とは異なり、反射関数のパラメタ空間におけるクラスタリングを行ない、物体表面を分割している。さらに各クラスタ内における微妙な反射特性の変化を表現するために、各クラスタに対して基底となる反射関数のセットを求め、これらの線形結合として物体表面各点の反射特性を表現している。このような一連の工夫により、少ない枚数の入力画像のみを利用して非常に現実感の高い合成画像を生成することに成功している。

TS 反射モデルや Phong 反射モデルを利用することにより鏡面反射成分としてのハイライトが面の滑らかさに応じてどの程度の広がりを持って観察されるかを表現することができるが、より大きなスケールにおける面の荒さに起因する反射光のばらつきを表すことができない。そのため、これらのパラメトリック反射モデルにもとづく反射特性の推定法ではザラザラした表面上の鏡面反射がうまく表現できなかった。この問題に対し、馬場らは微細な面の凹凸を考慮した反射特性推定法を開発している³⁾。この手法では、TS 反射モデルにおける微細なマイクロファセットレベルでの面方向のばらつきと、レンジセンサなどの 3 次元形状測定器で計測できるレベルでの面の凹凸との中間のレベルでの面方向のばらつきを表現するために、TS 反射モデルからの誤差を生じさせるバンプモデルを導入し、このパラメタを画像から推定している。

ここまでで紹介した反射特性推定法はレンジセンサなどによって別途計測された 3 次元形状を利用するものであった。一方、濃淡画像もしくはカラー画像から面法線方向と反射パラメタの両方を推定する手法も幾つか提案されている。

Tominaga らにより提案された一枚のカラー画像から物体の反射パラメタを推定する手法⁶⁹⁾では、予め幾何形状が与えられている場合には、2 色性反射モデルにもとづく色解析により反射成分を分離した後、鏡面反射光の強度が最大の点と半減する点との面法線から Phong 反射モデルの係数を推定する。さらに形状が未知の物体の場合には、分離された拡散反射成分の明るさに対して **shape from shading** と同様の手法を用いることにより面法線を推定している。しかしながらこの手法では不均一な反射特性を持つ物体には適用できないという制限も存在した。

日浦ら²⁰⁾の手法では、固定視点・固定光源の下で物体を回転させた際に観察される時空間画像上での特徴点軌跡の解析とシルエット解析により物体形状

を得ているが、この形状から計算される面法線方向では誤差が大きすぎる傾向があるために、**photometric stereo**と同様の方法で計算した面法線方向を利用して物体表面上の各点で拡散反射係数を推定する方法を提案している。

日浦らの手法では固定視点・固定光源の下で物体を視線方向に垂直な軸周りに回転させるのに対し、小俣ら⁴⁶⁾は視線方向周りに物体を回転させた画像列から面法線方向と反射パラメタの両方を推定する手法を提案している。この方法では、物体を視線方向周りに回転させた場合には物体のある点からの反射光強度が正弦波状に変化することにもとづき、正弦波の大きさおよび位相のずれから面法線方向と拡散反射率を求めている。さらに、また、正弦波状の明るさ変化の外れ値として鏡面反射や影を検出し、ランバート反射モデルからの残差として分離された鏡面反射成分から Phong 反射モデルのパラメタを推定している。

Debevec ら¹²⁾は、任意視点、任意光源下における顔画像を生成するための手法を提案している。この手法では、光源方向を変化させながら撮影した多数枚の入力画像をもとに **reflectance field** と呼ばれる反射光の分布を獲得するのに加え、撮影時と異なる視点からの画像を生成するために、反射成分の分離とパラメトリック反射関数にもとづく **reflectance field** の加工が提案されている。

Georghiadis は **photometric stereo** の枠組みで、未知の光源方向下で撮影された複数の入力画像から顔形状と TS 反射モデルのパラメタの両方を推定する手法を報告している¹⁶⁾。

4.1.2 パラメトリック反射関数を仮定しない手法

反射特性を表現するためにパラメトリック反射関数による近似を利用する手法とは別に、BRDF そのものを画像から計測するという試みが幾つか報告されている。

Marschner ら⁴¹⁾は複数の入力画像をもとにして物体表面の BRDF を測定することを試みている。ここで問題となるのは、BRDF が 4 自由度（入射方向、反射方向それぞれ 2 自由度ずつ）を持つという点である。法線に関して回転対称な反射特性 (**isotropic**) を持つ物体のみに制限することにより BRDF の自由度は 3 となるが、やはり画像のみを用いて十分なサンプリングを行なうことは容易ではない。このため、Marschner らは表面全体で均一な反射特性を持つ物体を仮定することにより、一枚の画像中に観察された物体の明るさをもとにさまざまな入射方向・反射方向での反射光強度を計測している。このような手法は **image-based BRDF measurement** と呼ばれ、幾何・光学両面のキャリブレーションを慎重に行なうことにより、精度良く

BRDF を測定することが可能であることが示された。

Marschner らの手法では均一な反射特性を持った物体のみを対象としたのに対し、西山らは大理石のようにテクスチャを持った物体に対しても BRDF を直接計測する方法を開発している⁴⁴⁾。ただし、計測に必要な画像枚数を減らすために、実際に報告されている例では一般の BRDF よりも自由度を減らした 2 自由度の反射分布関数が用いられた。この手法では反射分布関数を予め幾つかのクラスに分類しておき、各クラスごとに分布関数のテーブルを作り、物体表面上におけるクラスの分布をマルコフモデルに基づき学習するという興味深いアプローチが取られている。なお、BRDF の自由度を減らすという考え方に関しては、Ramamoorthi らも複雑照明下における高速な描画を目的として、入射方向と反射方向を表す角度の座標系の取り方の工夫することにより、より少ない自由度で効率よく BRDF を表現する方法を提案している⁵⁴⁾。

4.1.3 センサプランニング問題の取り扱い

インバースレンダリングによる反射特性の推定では、入力画像を撮影する場合の光源の配置や撮影方向は経験的に決められることが多い。しかしながら、限られた枚数の入力画像からより効率よく反射特性を推定するためには、光源の配置や撮影方向をどのようにすべきかというセンサプランニング問題が重要となる。この点に対して、町田ら³⁶⁾は入力画像を撮影する際の光源方向の選択に関する手法を報告している。この例では、物体周囲に円筒格子状に配置された光源位置候補から、反射光が観察されるか、拡散反射成分のみが観察されるか、強い鏡面反射成分が観察されるか、という 3 つの条件をもとに最も良い光源位置を選択している。

最近になって、Lensch らにより反射パラメタ推定のためにカメラ撮影方向と光源方向の両方を最適に配置するための手法が開発されている³³⁾。この手法では、アクティブビジョンシステムのためのセンサプランニング手法として開発された Whaite らのアルゴリズム⁷⁴⁾にもとづき、物体表面上の各点で推定される Lafortune 反射モデル³⁰⁾のパラメタの不確かさにもとづく評価尺度を定義し、この尺度にもとづいて最適な撮影条件を求めている。この研究では熟練したユーザが経験的に選択した撮影条件よりも本手法で選択された撮影条件の方がより正確に反射パラメタを推定できることが実験的に示されており、提案手法の有効性は高いと思われる。

4.2 相互反射を考慮した反射特性の推定

物体の反射特性を解析する際に、光源からの光が物体表面において一度だけ反射された直接反射光のみを考慮するのではなく、シーン内の物体表面間の相互反

射などの2次反射光までを考慮した上で物体表面の反射モデルパラメタを推定する手法も幾つか提案されている。

このような手法の多くはラジオシティ法⁶⁶⁾に基づいている。式(1)のレンダリング方程式により表現される大局照明は、シーンが均一な反射特性および明るさを持った完全拡散反射面素のみにより構成されているという仮定を導入することにより次式のように簡略化される。

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_j F_{ij} B_j \quad (8)$$

ここで、 B_i, E_i, ρ_i はそれぞれ i 番目の面素の反射光強度、直接光源である場合の放射光強度、反射係数を表す。また、 F_{ij} は j 番目の面素からの光が i 番目の面素への入射光として寄与する割合 (フォームファクタ) である。

インバースレンダリングによる反射特性の推定を考えた場合、この式に基づいて各面素の反射係数 ρ_i を求めればよいということになる。フォームファクタ F_{ij} はシーンの幾何形状から計算することができ、画像中の明るさとして面素の反射光強度 B_i と光源強度 E_i が観察されたとする、

$$\rho_i = (B_i - E_i) / \sum_j F_{ij} B_j \quad (9)$$

として反射係数を求めることができる。これがラジオシティ法にもとづいた反射特性推定の基本的な考え方である。しかし、少数の画像しか与えられていない場合などはシーンを構成する全ての面素の反射光強度 B_i を直接観測することができない。また、実際のシーンが完全拡散面のみで構成されていることは稀であり、鏡面反射成分の影響も考慮する必要がある。

相互反射を考慮したインバースレンダリングとしてラジオシティ法を利用するというアプローチは Fournier らにより初めて提案された¹⁵⁾。この手法は、1枚の画像のみを入力として、完全拡散反射物体により構成されるシーン内の光源強度および面素の反射係数の両方が推定されるのが特長となっている。Fournier らはこの手法により実シーン中に相互反射や影を含めた形で新たな物体を配置することができることを示した。しかし一枚の入力画像ではシーンの一部の明るさしか観測されないため、彼らの手法では平均反射光強度、平均反射率などを用いた大まかな近似にもとづいて光源強度と反射率が推定されていた。その後、Drettakis らはカメラパラメタの自動取得や実時間描画などの点で Fournier らの手法を拡張している¹³⁾。

Loscos らは複数の入力画像から形状を復元し、ラジオシティ法にもとづき拡散反射係数を推定する手法を提案している^{34),35)}。この手法の特長は、シーンの

形状と反射係数を求めた後に、階層ラジオシティ法によるレンダリングの工夫などにより光源や物体の配置を動的に変えながら実時間で描画することを可能としている点であった。しかしながら、鏡面反射成分は考慮されておらず、シーンは全て拡散反射面で構成されているという制限があった。

Machida らは円筒座標系レンジスキャナにより計測された詳細形状と多くの光源方向から照らされた多数枚の入力画像を用いて拡散反射係数と TS 反射モデルのパラメタを推定している³⁷⁾。この例でも相互反射を考慮した上で拡散反射係数の推定にラジオシティ法が利用されている。また、拡散反射成分との残差として1次反射光の鏡面反射成分を求め、TS 反射モデルのパラメタを推定している。この手法では、密な形状データを利用することにより、物体表面上の各点で拡散反射係数と TS 反射モデルパラメタを推定している点の特長となっている。

Yu ら⁷⁶⁾ は、室内空間を撮影した多数の画像から室内形状と撮影時のカメラ位置を復元⁹⁾ した後に、直接観測された光源輝度と物体表面各面の明るさから物体表面の拡散反射係数と Ward 反射モデル⁷³⁾ のパラメタを推定している。この方法では、各面素からの反射光強度を拡散反射に相当する部分と鏡面反射成分に相当する部分とに分けて取り扱い、観察された反射光強度とモデルにより予測される反射光強度のずれが減少するように繰り返すによりパラメタを推定している。このような枠組みにより、同じように拡散反射と鏡面反射の両方を取り扱った Machida らの方法³⁷⁾ とは異なり、鏡面反射成分の相互反射への寄与も考慮されているのが特徴となっている。

Boivin ら⁵⁾ は1枚の画像だけを利用して完全拡散面から鏡のような反射特性を持つ面までさまざまな反射特性を持った物体により構成されるシーンの反射特性を相互反射を考慮した上で推定する手法を提案している。さまざまな反射特性を持つ物体で構成されているシーンの場合、反射パラメタの推定が不安定になってしまうという問題に対し、完全拡散面のみを仮定した初期解から開始し、観察された明るさとモデルが予測する明るさの差が大きな部分に対してのみ反射特性に関するより複雑なモデルを導入していくというアプローチが取られている。モデルが予測する明るさの計算にはどのようなレンダリングアルゴリズムでも利用可能となるが、この研究例では Boivin らが独自に開発したプログラムが利用されていた。

入力画像中で観察された明るさとモデルが予測する明るさの差を減少する方向にパラメタを調整していくという考え方にもとづく別の手法としては町田らの手法も報告されている³⁸⁾。この例ではモデルによる予測

する明るさはフォトンマッピング法²⁶⁾を用いて計算されており、鏡面反射成分による相互反射を生じているような場合にも精度良く反射パラメータが推定できることが示されている。

5. ま と め

本稿では、一枚もしくは複数枚の画像をもとにシーンの光源環境や物体の表面反射特性を推定するインバースレンダリングの問題について、その基本的な考え方とともにCGやCVの分野における代表的な研究例を紹介した。インバースレンダリングの問題はCVにおけるphotometric stereoやshape from shadingなどとも密接に関連しており古くから研究例が報告されているが、従来は単一光源下における完全拡散反射面などが中心であったのに対し、90年代後半に入ってから複雑な照明分布や鏡面反射や相互反射なども考慮した手法へと急速に発展してきた。リアリティの高い画像を生成するために如何にしてモデルを獲得するかという問題は今後も更に重要性を増していくものと思われる。この分野の研究の更なる発展に期待したい。

参 考 文 献

- 1) Arvo, J.:The role of functional analysis in global illumination, *Proc. the Sixth Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 115-126 (1995).
- 2) Arvo, J.:Analytic methods for simulated light transport, Ph.D. thesis, Yale University (1995).
- 3) 馬場雅志, 岡本崇弘, 椋木雅之, 浅田尚紀: バンプモデルを用いた実物体の反射特性のモデル化とパラメータ推定, 画像の認識と理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, pp. II-175-180 (2004).
- 4) Basri, R. and Jacobs, D.:Lambertian reflectance and linear subspaces, *IEEE Trans. FAMI*, 25(2), pp. 218-233, (2003).
- 5) Boivin, S. and Gagalowicz, A.:Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image, *Proc. ACM SIGGRAPH 01*, pp. 107-116 (2001).
- 6) Brooks, M. J. and Horn, B. K. P.:Shape and source from shading, *Proc. Int'l Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 932-936 (1985).
- 7) Cook, R. L. and Torrance, K. E.:A reflectance model for computer graphics, *Computer Graphics*, 15(3), pp. 307-316 (1982).
- 8) Costa, A., Sousa, A. and Ferreira, F.:Lighting design: A goal based approach using optimization, *Proc. the 10th Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 317-328 (1999).
- 9) Debevec, P. E., Taylor, C. J. and Malik, J.:Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach, *Proc. ACM SIGGRAPH 96*, pp. 11-20 (1996).
- 10) Debevec, P. E. and Malik, J.:Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *Proc. ACM SIGGRAPH 97*, pp. 369-378 (1997).
- 11) Debevec, P.: Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, *Proc. ACM SIGGRAPH 98*, pp. 189-198 (1998).
- 12) Debevec, P., Hawkins, T., Tchou, C., Duiker, H-P., Sarokin, W. and Sagar, M.:Acquiring the reflectance field of a human face, *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 145-156 (2000).
- 13) Drettakis, G., Robert, L. and Bugnoux, S.:Interactive common illumination for computer augmented reality, *Proc. Eighth Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 45-56 (1997).
- 14) 杜菲, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 杉本晃宏:複雑照明下における運動物体の反射特性の推定, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2004) 論文集, pp.II-229-234 (2004).
- 15) Fournier, A., Gunawan, A. S. and Romanzin, C.:Common illumination between real and computer generated scenes, *Proc. Graphics Interface '93*, pp. 254-262 (1993).
- 16) Georgiades, A. S.:Incorporating the Torrance and Sparrow model of reflectance in uncalibrated photometric stereo, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, pp. 816-823 (2003).
- 17) Hanrahan, P., Salzman, D. and Aupperle, L.:A rapid hierarchical radiosity algorithm, *Proc. ACM SIGGRAPH '91*, pp. 197-206 (1991).
- 18) 原健二, 西野恒, 池内克史:透視投影と点光源下の鏡面反射からの光源位置と反射特性の推定, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 43, No. SIG 11 (CVIM 5), pp.121-129 (2002).
- 19) 原健二, Robby T. Tan, 西野恒, 中澤篤志, 池内克史:単一画像からの光源位置・色と表面反射特性の推定, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, vol. 44, No. SIG 9 (CVIM7), pp.94-104 (2003).
- 20) 日浦慎作, 佐藤宏介, 井口征二:対象物体の回転による形状と反射率の同時計測, 情報処理学会論文誌, 36(10), pp. 2295-2302 (1995).
- 21) Horn, B. K. P.:Height and gradient from shading, *Int. J. Computer Vision*, 5(1), pp. 584-595 (1990).
- 22) 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 (ICCV '95)*, pp. 148-155 (1993).
- 23) Ikeuchi, K. and Sato, K.:Determining re-

- reflectance properties of an object using range and brightness images, *IEEE Trans. FAMI*, 13(11), pp. 1139-1153 (1991).
- 24) Ikeuchi, K. and Sato, Y. (ed.): *Modeling from Reality*, Kluwer Academic Press (2001).
 - 25) Jacobs, K. and Loscos, C.: Classification of illumination methods for mixed reality, to appear in Eurographics 2004, (2004).
 - 26) Jensen, H. W.: *Realistic image synthesis using photon mapping*, AK Peters Ltd. (2001).
 - 27) Kajiyama, J.: The rendering equation, *Proc. SIGGRAPH '86*, pp. 143-150 (1986).
 - 28) 神原誠之, 横矢直和: 現実環境の照明条件と奥行きの実時間推定による仮想物体の陰影表現が可能な拡張現実感, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, pp. II-247-252 (2004).
 - 29) Kay, G. and Caelli, T.: Inverting an illumination model for range and intensity maps, *CVGIP: Image Understanding*, 59(2), pp. 183-201 (1994).
 - 30) LaFortune, E. P., Foo, S.-C., Torrance, K. E. and Greenberg, D. P.: Nonlinear approximation of reflectance functions. *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, pp. 117-126 (1997).
 - 31) Lee, C. H. and Rosenfeld, A.: Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system, *Artificial Intelligence*, vol. 26, pp. 125-143 (1985).
 - 32) Lensch, H. P. A., Kautz, J., Goesele, M., Heidrich, W. and Seidel, H.-P.: Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail, *ACM Transactions on Graphics*, 22(2), pp. 234-257 (2003).
 - 33) 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).
 - 34) Loscos, C., Frasson, M. C., Drettakis, G., Walter, B., Grainer, X. and Poulin, P.: Interactive virtual relighting and remodeling of real scenes, *Proc. the 10th Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 329-340 (1999).
 - 35) Loscos, C., Drettakis, G., and Robert, L.: Interactive virtual relighting of real scenes, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 6(4), pp. 289-305 (2000).
 - 36) 町田 貴史, 竹村 治雄, 横矢 直和: 複数の照明条件の組み合わ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).
 - 37) Machida, T., Yokoya, N. and Takemura, H.: Surface reflectance modeling of real objects with interreflections, *Proc. 9th Int. Conf. on Computer Vision (ICCV'05)*, pp. I-170-177 (2003).
 - 38) 町田貴史, 横矢直和, 竹村治雄: 実物体の仮想化のための相互反射を考慮した表面反射特性の推定, 画像の認識と理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, pp. I-9-14 (2004).
 - 39) Marschner, S. R. and Greenberg, D. P.: Inverse lighting for photography, *Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference*, pp. 262-265 (1997).
 - 40) Marschner, S. R.: *Inverse rendering in computer graphics*, PhD thesis, Program of Computer Graphics, Cornell University, Ithaca, NY (1998).
 - 41) Marschner, S. R., Westin, S. H., LaFortune, E. P. F., Torrance, K. E. and Greenberg, D. P.: Image-based brdf measurement including human skin, *Proc. the 10th Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 131-144 (1999).
 - 42) Mitsunaga, T. and Nayar, S. K.: Radiometric self calibration, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '99)*, pp. II-374-380 (1999).
 - 43) Nishino, K., Zhang, Z. and Ikeuchi, K.: Determining reflectance parameters and illumination distribution from a sparse set of images for view-dependent image synthesis, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV'01)*, pp. 599-606 (2001).
 - 44) 西山正志, 向川康博, 尺長健: 仮想光学環境のための局所反射特性分布の学習と再現, 情処研報 CVIM 2002-132-9, pp. 61-68 (2002).
 - 45) Okabe, T., Sato, I. and Sato, Y.: Spherical harmonics vs. Haar wavelets: basis for recovering illumination from cast shadows, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '04)*, pp. I-50-57 (2004).
 - 46) 小俣和子, 斎藤英雄, 小沢慎治: 光源の相対的回転による物体形状と表面反射特性の推定, 信学論 D-II, VOL. J83-D-II, No. 3, pp. 927-937 (2000).
 - 47) 大槻正樹, 三浦淳, 佐藤幸男: 多方向測定による物体形状と表面反射特性の計測, 信学論 D-II, J76-D-II-8, pp. 1536-1543 (1993).
 - 48) Patow, G. and Pueyo, X.: A survey of inverse rendering problems, *Computer Graphics forum*, 22(4), pp. 663-687 (2003).
 - 49) Pentland, A. P.: Finding the illuminant direction, *J. Opt. Soc. America*, 72(4), pp. 448-455 (1982).
 - 50) Phong, B. T.: Illumination for computer generated pictures, *Comm. ACM*, vol. 18, pp. 311-317 (1975).
 - 51) Powell, M., Sarkar, S. and Goldgof, D.: A simple strategy for calibrating the geometry of light Sources, *IEEE Trans. FAMI*, 23(9), pp. 1022-1027 (2001).
 - 52) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: A signal processing framework for inverse rendering, *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 117-128 (2001).
 - 53) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: On the

- relationship between radiance and irradiance: determining the illumination from images of a convex Lambertian object, *J. Opt. Soc. Am. A*, 18(10), pp. 2448-2459, (2001).
- 54) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: Frequency space environment map rendering, *Proc. ACM SIGGRAPH 2002*, pp. 517-526 (2002).
 - 55) Samaras, D. and Metaxas, D.: Incorporating illumination constraints in deformable models for shape from shading and light direction estimation, *IEEE Trans. FAMI*, 25(2), pp. 247-264 (2003).
 - 56) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Temporal-color space analysis of reflection, *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(11), pp. 2990-3002 (1994).
 - 57) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Reflectance analysis for 3d computer graphics model generation, *CVGIP Graphical Models and Image Processing*, 58(5), pp. 437-451 (1996).
 - 58) Sato, Y., Wheeler, M. D. and Ikeuchi, K.: Object shape and reflectance modeling from observation. *Proc. ACM SIGGRAPH '97*, pp. 379-387 (1997).
 - 59) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Illumination distribution from brightness in shadows: adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV'99)*, pp. 875-882 (1999).
 - 60) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Illumination from shadows, *IEEE Trans. FAMI*, 25(3), pp. 290-300 (2003).
 - 61) 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史: 絵画の陰影特徴解析に基づく仮想物体の絵画への重ね込み, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, No. SIG9 (CVIM7), pp. 132-141 (2003).
 - 62) Schoeneman, C., Dorsey, J., Smits, B., Arvo, J. and Greenberg, D.: Painting with light, *Proc. ACM SIGGRAPH '93*, pp. 143-146 (1993).
 - 63) Shackled, R. and Lischinski, D.: Automatic lighting design using a perceptual quality metric, *Computer Graphics Forum (Eurographics 2001)*, 20(3), pp. 215-227 (2001).
 - 64) Shafer, S. A.: Using color to separate reflection components, *COLOR Research and Application*, 10(4), pp. 210-218 (1985).
 - 65) Shum, H. Y., He, S. B. and Chan, S. C.: Survey of image-based representations and compression techniques, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 13(11), pp. 1020-1037 (2003).
 - 66) Sillion, F. and Puech, C.: *Radiosity and global illumination*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA (1994).
 - 67) Takai, T., Niinuma, K., Maki, A. and Matsuyama, T.: Difference sphere: an approach to near light source estimation, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '04)*, pp. I-98-105 (2004).
 - 68) 高井勇志, 牧淳人, 松山隆司: スケルトンキューブを用いた光環境推定, 画像の認識と理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, pp. II-241-246 (2004).
 - 69) Tominaga, S. and Tanaka, N.: Estimating reflection parameters from a single color image, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(5), pp. 58-66 (2000).
 - 70) Torrance, K. E. and Sparrow, E. M.: Theory for off-specular reflection from roughened surface, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 57, pp. 1105-1114 (1967).
 - 71) Unten, H. and Ikeuchi, K.: Color alignment in texture mapping of images under point light source and general lighting condition, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '04)*, pp. I-234-239 (2004).
 - 72) Wang, Y. and Samaras, D.: Estimation of multiple illuminants from a single image of arbitrary known geometry, *Proc. European Conf. Computer Vision (ECCV '02)*, pp. III-272-288 (2002).
 - 73) Ward, G. J.: Measuring and modeling anisotropic reflection, *Proc. ACM SIGGRAPH 92*, pp. 265-272 (1992).
 - 74) Whaite, P. and Ferrie, F. P.: Autonomous exploration: Driven by uncertainty, *IEEE Trans. FAMI*, 19(3), pp. 193-205 (1997).
 - 75) Wolff, L. B. and Boulton, T. E.: Constraining object features using a polarization reflectance model, *IEEE Trans. FAMI*, 13(7), pp. 635-657 (1991).
 - 76) Yu, Y., Debevec, P., Malik, J. and Hawkins, T.: Inverse global illumination: recovering reflectance models of real scenes from photographs, *Proc. ACM SIGGRAPH '99*, pp. 215-224 (1999).
 - 77) Zhang, Y. and Yang, Y.: Multiple illuminant direction detection with application to image synthesis, *IEEE Trans. FAMI*, 23(8), pp. 915-920 (2001).
 - 78) Zhang, C. and Chen, T.: A Survey on Image-based rendering - representation, sampling and compression, *EURASIP Signal Processing: Image Communication*, 19(1), pp. 1-28 (2004).
 - 79) Zheng, Q. and Chellappa, R.: Estimation of illuminant direction, albedo and shape from shading, *IEEE Trans. FAMI*, 13(7), pp. 680-702 (1991).