

## 逆問題アプローチによる BRDF モデリング

岩崎 慶<sup>†1</sup> 土橋 宜典<sup>†2</sup> 西田 友是<sup>†3</sup>

本稿は逆問題アプローチに基づいた BRDF モデリング手法を提案する。提案法は、ユーザが指定した物体の外観に合うような BRDF を計算する。BRDF を基底関数の線形和で表現することにより、物体表面の放射輝度は基底関数を用いて表現される。これにより、求めたい BRDF の計算は、ユーザが指定した輝度と基底関数で表現された放射輝度の差の二乗和を最小にする係数を求める問題に帰着される。BRDF が満たすべき特徴は線形制約条件として表現される。この最小化問題は、線形制約付き最小二乗法を用いることによりインタラクティブに解くことができる。提案法により、固定された複雑な照明下において直接 BRDF をデザインすることができる。また、得られた BRDF を用いて動的な照明下で視点を移動させた結果をインタラクティブにレンダリングすることができる。

### Inverse Problem Approach for BRDF Modeling

KEI IWASAKI,<sup>†1</sup> YOSHINORI DOBASHI<sup>†2</sup>  
and TOMOYUKI NISHITA<sup>†3</sup>

This paper presents a BRDF modeling method, based on an inverse problem approach. Our method calculates BRDFs to match the appearance of the object specified by the user. By representing BRDFs by a linear combination of basis functions, outgoing radiances of the object surface can be represented using basis functions. The calculation of the desired BRDF results from calculating the corresponding coefficients of basis functions that minimize the sum of differences between the outgoing radiances, represented using basis functions and user specified radiances. The properties that BRDFs must satisfy are described by linear constraint conditions. This minimization problem can be solved, interactively, using a linearly constrained least squares approach. Thus, our method allows the user to design BRDFs directly, under fixed complex lighting and viewpoint, and to view the rendering results interactively, under dynamic lighting and viewpoint.

### 1. Introduction

コンピュータグラフィックスの分野において写実的な画像の生成は重要な研究分野の一つである。物体に入射する照明、双方向反射率分布関数 (BRDF) として記述される物体の反射特性は、物体をレンダリングするうえで重要な要素である。工業デザインや CM、ゲームといったアプリケーションでは、希望する視覚効果を得るために、デザイナーやディレクタが照明情報や物体の反射特性を試行錯誤により修正することがある。照明を修正する手法としてはいくつかの手法<sup>(9),(16),(18),(21),(22),(24),(25)</sup>が提案されている。

近年、固定された照明下での BRDF を編集する手法が提案されている<sup>(4),(5)</sup>。これらの手法では、1 次元パラメータで表現された関数の積に BRDF を分解し、パラメータを調整することにより BRDF を編集する。これらの方法はインタラクティブに BRDF を編集することができるが、ユーザの望む結果を得るためにはパラメータの調整が必要である。

本稿は、環境マップで表現される照明下における、ユーザの指定した外観に合うような BRDF のモデリング手法を提案する。環境マップと外観が指定されたら、逆問題アプローチに基づいて BRDF を自動的に計算する。物体の表面上の点に対応した各ピクセルの色は、基底関数とそれに対応する係数を用いて表現される。ユーザが望む BRDF のモデリングは、ユーザが指定した輝度と、係数と基底関数で計算される輝度との差の二乗和を最小にする係数を求める最適化問題を解くことに帰着される (図 1 参照)。提案法は、各物体は 1 つの BRDF で表現され、異方性 BRDF を表現することができるが、空間的に変化する BRDF は扱わないものとする。提案法は、環境マップで表現される全周波照明を扱う。提案法では、点光源などを追加するなどの照明の修正は行わない。照明の修正はシーン中のすべての物体に影響するため、特定の物体の外観の修正は難しいためである。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章において従来法を紹介する。3 章において BRDF モデリングの手法について説明する。4 章において実装の詳細を説明する。5 章において結果を示し、6 章においてまとめと今後の課題を述べる。

†1 和歌山大学  
Wakayama University

†2 北海道大学  
Hokkaido University

†3 東京大学  
The University of Tokyo

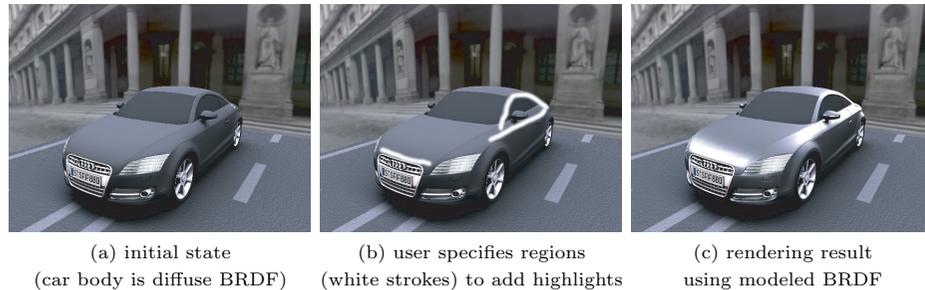


図 1 提案法の概要を示す．左図 (a) は初期状態として拡散 BRDF で車体をレンダリングした例である．中央の画像 (b) に示されるように，ユーザはハイライトを与えたり色を変えたりしたい箇所をストロークで描画する．提案法はユーザが指定した箇所にハイライトを生成させるような BRDF を自動に計算する．右図 (c) は計算された BRDF でレンダリングした結果である．(c) の BRDF の計算速度は 0.26 秒である．(c) に示されるように，提案法はユーザが要求した外観に適するような BRDF をインタラクティブに生成することができる．

Fig. 1 These figures show the overview of our method. The left image (a) shows the car body with diffuse BRDF as the initial state. As shown in the center image (b), the user paints strokes where the user wants to add highlights or change colors. Our method models the BRDF so as to create highlights in the regions specified by the user. The right image (c) shows the result that is rendered by using the calculated BRDF. The computational time of the BRDF in (c) is 0.26 sec. As shown in (c), our method can obtain the BRDF to match the appearance the user requested interactively.

## 2. 従来法

提案法は Precomputed Radiance Transfer (PRT) 法に関連しているため，まず PRT の従来法について述べ，次に BRDF を編集する従来法について述べる．

### 2.1 Precomputed Radiance Transfer (PRT)

照明状況を変化させる手法として前計算ベースの技術が提案されている．Dobashi らは，インタラクティブな照明デザインのために球面調和関数を用いて輝度分布を表現することにより高速なライティング手法を提案した<sup>7)</sup>．さらに，Dobashi らはフーリエ級数を用いて天空光によって照射される物体表面の輝度分布を表現した<sup>8)</sup>．

Ramamoorthi らは球面調和関数を用いることによって環境マップで表現される照明下の物体のレンダリング法を提案した<sup>23)</sup>．Sloan らは，PRT 法を提案し環境マップで表現される照明下のリアルタイムレンダリング法を提案した<sup>25)</sup>．この PRT 法を拡張した手法<sup>11), 26)–28)</sup> が数多く提案されている．これらの手法は基本的に視点と照明状況を実行時に変更すること

はできる．BRDF も実行時に変更できる手法もあるが，前計算した BRDF の大規模なデータが必要である．

Ng らはウェーブレット基底関数を用いて，全周波照明下の拡散反射面のインタラクティブなレンダリング手法を提案した<sup>16)</sup>．この手法を拡張し光沢面をレンダリングする手法がいくつか<sup>30), 31)</sup> 提案されている．これらの手法はリアルな画像を生成することはできるが，前計算した BRDF のデータが必要であり，レンダリング時に任意の BRDF を変更することは難しい．Okabe らは PRT 技術に基づいた照明デザインシステムを提案したが，この手法は BRDF の編集は扱っていない<sup>18)</sup>．

近年，動的に BRDF を変更可能な PRT 法が提案されている．Sun らはレンダリング時に BRDF を変更可能な手法を提案した<sup>29)</sup>．この手法は，前計算した BRDF データをテンソル分解し，前計算伝達テンソル (PTT) を計算した．PTT を用いることによって，レンダリング時に視点，照明および BRDF を変更することができる．しかしながら，この手法では前計算した BRDF を必要とし，あらかじめ計算した BRDF 以外に BRDF を変更することは難しい．

### 2.2 BRDF の編集

Ben-Artzi らは，全周波環境照明下において BRDF をリアルタイムに編集する方法を提案した<sup>4)</sup>．この方法は，Phong の BRDF モデルにおける光沢度のようなパラメータを変更することによって BRDF を編集する．Akerlund らは，前計算したビジビリティカットを用いることによって BRDF をレンダリング時に変更する方法を提案した<sup>1)</sup>．しかしながら，これらの方法は希望する画像を得るためには，パラメータを試行錯誤によって調整する必要がある．

Colbert らは，球面上のキャンパスにハイライトを描画することによって BRDF をモデリングする手法を提案した<sup>6)</sup>．この方法は，Ward BRDF<sup>32)</sup> を用いてハイライトを近似する．しかしながら，この方法はユーザが指定した領域に直接ハイライトを生成することはできない．

Ashikhmin らは，2次元の微小面の方向分布を入力することによって BRDF を生成する手法を提案した<sup>3)</sup>．Jarosziewicz らは，homomorphic factorization を用いて画像から BRDF と材質マップを抽出する手法を提案した<sup>10)</sup>．Lawrence らは，空間的に変化する BRDF (SVBRDF) を 1次元の編集可能な関数に分解する inverse shade tree を提案した<sup>13)</sup>．これらの方法は点光源に限られている．

Pellacini らは，SVBRDF を編集する方法を提案したが，複雑な照明を考慮していない<sup>20)</sup>．

Khan らは画像ベースの編集手法を提案した<sup>12)</sup>。この方法は、ある物体の写真を、材質を変更した物体の写真に変換する。この方法は、物体表面の外観を変更することはできるが、ユーザが望む画像に合った BRDF を計算する方法ではない。Ngan らは、複雑な照明下において解析的な BRDF モデルのナビゲーションシステムを提案したが<sup>17)</sup>、この方法は希望する BRDF を計算する手法ではない。

そこで、本稿ではユーザが指定した輝度に合う BRDF を計算する手法を提案する。

### 3. 提案法

#### 3.1 概要

環境照明下での点  $x$  における方向  $\omega_o$  の輝度  $B(x, \omega_o)$  は以下の式で計算される。

$$B(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L(\omega_i) V(x, \omega_i) f_r(\omega_i, \omega_o) (\omega_i \cdot n(x)) d\omega_i, \quad (1)$$

ここで、 $\Omega$  は半球上の方向、 $\omega_i$  は入射方向、 $L(\omega_i)$  は環境マップで表現される  $\omega_i$  方向の輝度、 $V(x, \omega_i)$  は可視関数、 $f_r(\omega_i, \omega_o)$  は BRDF、 $n(x)$  は  $x$  における法線である (図 2 参照)。式の表現を簡略化するため、可視関数  $V(x, \omega_i)$  に  $(\omega_i \cdot n(x))$  を含めた  $\tilde{V}(x, \omega_i)$  を  $\tilde{V}(x, \omega_i) = V(x, \omega_i) (\omega_i \cdot n(x))$  と定義する。

提案法では、BRDF  $f_r$  を拡散反射成分  $f_d$  と鏡面反射成分  $f_s$  に分けて考える。

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_d + f_s(\omega_i, \omega_o). \quad (2)$$

拡散反射成分  $f_d$  はアルベド  $\rho_d$  を用いて  $f_d = \rho_d/\pi$  と表す。拡散反射に対応する輝度成分  $B_d(x)$  は以下の式で計算される。

$$B_d(x) = \int_{\Omega} L(\omega_i) \tilde{V}(x, \omega_i) \frac{\rho_d}{\pi} d\omega_i = \rho_d E(x), \quad (3)$$

ここで、 $E(x)$  は  $x$  における照度である。拡散反射成分のモデリングを簡単にするために、提案法ではアルベド  $\rho_d$  をユーザが直接指定する。提案法は、鏡面反射成分  $f_s(\omega_i, \omega_o)$  を基底関数の線形結合と静的関数  $s(\omega_i, \omega_o)$  ( $s(\omega_i, \omega_o)$  については 3.2 節において述べる) の積で表現する。

$$f_s(\omega_i, \omega_o) = s(\omega_i, \omega_o) \sum_{j=0}^{J-1} c_j \phi_j(\omega_i, \omega_o), \quad (4)$$

ここで、 $c_j$  は基底関数  $\phi_j$  に対応する係数、 $J$  は基底関数の数である。式 (4) を式 (1) に代入することによって、鏡面反射成分  $f_s$  に対応する放射輝度  $B_s(x, \omega_o)$  は以下の式で計算される。

$$\begin{aligned} B_s(x, \omega_o(x)) &= \int_{\Omega} L(\omega_i) \tilde{V}(x, \omega_i) \left( \sum_{j=0}^{J-1} c_j \phi_j(\omega_i, \omega_o) s(\omega_i, \omega_o) \right) d\omega_i \\ &= \sum_{j=0}^{J-1} c_j \int_{\Omega} L(\omega_i) \tilde{V}(x, \omega_i) \phi_j(\omega_i, \omega_o) s(\omega_i, \omega_o) d\omega_i. \end{aligned} \quad (5)$$

BRDF をモデリングする際は、視点と物体表面は固定とする<sup>\*1</sup>。この仮定の下、視線方向  $\omega_o$  は、位置  $x$  に依存するため  $\omega_o(x)$  と表現する。

伝達関数  $T_j(x)$  を以下の式で定義する。

$$T_j(x) = \int_{\Omega} L(\omega_i) \tilde{V}(x, \omega_i) \phi_j(\omega_i, \omega_o(x)) s(\omega_i, \omega_o(x)) d\omega_i. \quad (6)$$

伝達関数  $T_j(x)$  を用いて  $B_s(x)$  は以下の式で計算される。

$$B_s(x) = \sum_{j=0}^{J-1} c_j T_j(x). \quad (7)$$

物体表面に対応するピクセルの集合を  $\mathbf{X} = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$  と定義する。ここで  $N$  は物体表面に対応するピクセルの数である。これらのピクセルの色を  $\mathbf{B} = \{B_0, B_1, \dots, B_{N-1}\}$  とする。これらの色はユーザがストロークを描画することにより指定される。指定方法は 4.3 節において説明する。求めたい BRDF の鏡面反射成分は、以下の式を最小とするよう

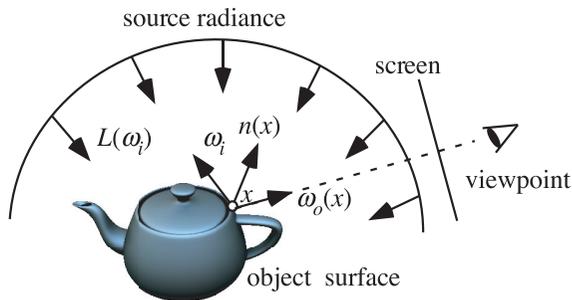


図 2 放射輝度の計算  
Fig. 2 Calculation of outgoing radiance.

\*1 提案法は多視点の伝達関数を計算することによって多視点における BRDF をモデリングすることができる。

な係数  $c_j$  を求めることによって得られる．

$$\arg \min_{c_j} \sum_{i=0}^{N-1} \left( B_i - \sum_{j=0}^{J-1} c_j T_j(x_i) \right)^2. \quad (8)$$

式 (8) で表現される最適化問題を解くうえで、以下の BRDF の特性を満たす必要がある．

- ヘルムホルツ相反性
- エネルギー保存則
- 非負性

ヘルムホルツ相反性は以下の式で計算される．

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i). \quad (9)$$

エネルギー保存則は以下の式で計算される．

$$\int_{\Omega} f_r(\omega_i, \omega_o) (\omega_i \cdot n) d\omega_i \leq 1 \quad \forall \omega_o. \quad (10)$$

非負性は以下の式  $f_r(\omega_i, \omega_o) \geq 0$  が任意の方向  $\omega_i, \omega_o$  について成り立つ必要がある．

次節において、BRDF の特性を満たし鏡面反射成分を表現するのに適した基底関数について述べる．

### 3.2 BRDF を表現する基底関数

BRDF は一般に 4 次元関数（入射方向・射出方向がそれぞれ 2 次元）であり、基底関数で表現する場合多くの基底が必要とされる．必要な基底関数が多い場合、計算データ量が膨大になりレンダリング速度が低下する．少ない数の基底関数で表現するために、提案法では Distribution-based BRDF<sup>2)</sup> (DBRDF) を採用する．DBRDF は以下の式で計算される．

$$f_s(\omega_i, \omega_o) = \frac{p(h)F(\omega_i \cdot h)}{(\omega_i \cdot n) + (\omega_o \cdot n) - (\omega_i \cdot n)(\omega_o \cdot n)}, \quad (11)$$

ここで、 $h$  は  $\omega_i$  と  $\omega_o$  のハーフベクトルであり、以下の式  $h = (\omega_i + \omega_o) / \|\omega_i + \omega_o\|$  によって計算される（図 3 参照）． $p(h)$  はハーフベクトルの分布関数であり、 $F(\omega_i \cdot h)$  はフレネル項、 $n$  は法線ベクトルとする． $\omega_i$  と  $\omega_o$  はハーフベクトル  $h$  に対して対称なため、 $f_r$  は任意の関数  $p(h)$  についてヘルムホルツ相反性を満たす．DBRDF モデルにおいて、反射特性は主に分布関数  $p(h)$  によって影響される．それゆえ、提案法は  $p(h)$  を基底関数  $\phi_j(h)$  の線形和  $p(h) = \sum_{j=0}^{J-1} c_j \phi_j(h)$  で表現する．DBRDF の残りの項  $F(\omega_i \cdot h) / ((\omega_i \cdot n) + (\omega_o \cdot n) - (\omega_i \cdot n)(\omega_o \cdot n))$  は静的関数  $s(\omega_i, \omega_o)$  とする．提案法は分布関数  $p(h)$  を基底関数  $\phi_j(h)$  の線形和で表現する．従来の PRT 手法<sup>16),25)</sup> では、球

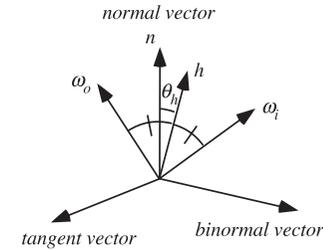


図 3 ハーフベクトル  
Fig. 3 Half vector.

面調和関数や Haar ウェーブレット関数といった正規直交基底関数が関数近似に用いられてきた．提案法では、正規直交性は必要でなく、関数を少数の基底関数で近似することが求められる．解析的な BRDF モデルでは、ハイライトを表現するために分布関数は急なピークを持つ傾向がある．それゆえ、提案法では急なピークを表現できる基底関数  $\phi_j(h)$  が必要である．球面調和関数は低周波関数を表現するのに適しているが、急なピークを持つ高周波関数を表現する場合多くの基底関数を必要とする．

Haar ウェーブレット<sup>16)</sup> や Daubechies ウェーブレット<sup>4)</sup> は高周波関数を表現する際によく用いられる．しかしながら、これらのウェーブレットは負の値をとりうる．ここで、BRDF の特性である非負性を満たすためには、任意の  $h$  において分布関数が正であるという条件を満たす必要がある．もしウェーブレット関数を用いて分布関数を表現する場合、任意の  $\omega_i$  および  $\omega_o$  について分布関数が正であることを満たすために係数  $c_j$  に対して多くの制約条件が必要となる．これは、係数  $c_j$  を計算する時間を増大させることにつながる．

提案法では、分布関数  $p(h)$  を表現するために spherical radial basis function (SRBF)<sup>30)</sup> を用いる．

$$p(h) \approx \sum_{j=1}^{J-1} c_j G(h \cdot \xi_j, \lambda), \quad (12)$$

ここで、 $G$  は SRBF、 $\xi_j$  は  $j$  番目の SRBF の中心であり、 $\lambda$  は SRBF のバンド幅とする．

SRBF を使用する理由は以下のとおりである．第 1 に、高周波関数は少数の SRBF 関数で表現することができる<sup>30)</sup>．第 2 に、BRDF の非負性を表現する制約条件が SRBF の場合容易に表現できる．SRBF は任意のベクトル  $h$  に対して非負（すなわち、任意の方向  $\omega_i$  および  $\omega_o$  に対しても非負）であるため、非負性の制約条件は単に  $c_j \geq 0$  と表現すること

ができる．

エネルギー保存則は，拡散反射成分  $f_d$  と鏡面反射成分  $f_s$  の和として以下の式で表現される．

$$\int_{\Omega} (f_d + f_s(\omega_i, \omega_o)) (\omega_i \cdot n) d\omega_i \leq 1. \quad (13)$$

式 (13) において，拡散成分  $f_d = \frac{\rho_d}{\pi}$  の積分は  $\int_{\Omega} \frac{\rho_d}{\pi} (\omega_i \cdot n) d\omega_i = \rho_d$  と表される．

任意の  $\omega_o$  に対して鏡面反射成分のエネルギー保存則を満たすために，半球上の方向を  $N_l$  方向に離散化する．そして，式 (10) における積分を各離散方向  $\omega_o^l$  ( $0 \leq l \leq N_l - 1$ ) について計算する．

$$\rho_d + \int_{\Omega} \sum_{j=0}^{J-1} c_j G(h \cdot \xi_j, \lambda) s(\omega_i, \omega_o^l) d\omega_i \leq 1. \quad (14)$$

式 (14) において，各方向  $\omega_o^l$  についての積分値を  $g_j^l$  と定義する．

$$g_j^l = \int_{\Omega} G(h \cdot \xi_j, \lambda) s(\omega_i, \omega_o^l) d\omega_i. \quad (15)$$

$N_l$  方向のエネルギー保存則は以下の式で表現される．

$$\sum_{j=0}^{J-1} g_j^l c_j \leq 1 - \rho_d \quad (0 \leq l \leq N_l - 1). \quad (16)$$

最終的に，提案法は以下の式を最小化する係数ベクトル  $\mathbf{c} = (c_0, c_1, \dots, c_{J-1})$  を計算する．

$$\sum_{i=0}^{N-1} \left( B_i - \sum_{j=0}^{J-1} c_j T_j(x_i) \right)^2, \quad (17)$$

ここで，各係数は以下の線形制約を満たす必要がある．

$$c_j \geq 0 \quad (0 \leq j \leq J-1), \quad (18)$$

$$\sum_{j=0}^{J-1} g_j^l c_j \leq 1 - \rho_d \quad (0 \leq l \leq N_l - 1). \quad (19)$$

## 4. Implementation Details

### 4.1 前計算処理

前計算処理として，スクリーンの各ピクセルに対応した物体表面上の点  $x$  において伝達

関数  $T_j(x)$  を計算する．ここで，係数ベクトル  $\mathbf{c}$  の計算時間は，物体表面に対応するピクセルの数  $N$  に依存する．もしスクリーンサイズが  $640 \times 480$  の場合， $N$  は約 300,000 となり， $\mathbf{c}$  の計算時間は膨大となる． $\mathbf{c}$  をインタラクティブに計算するために，低解像度のスクリーンを用意する．線形制約付き最小二乗問題を解くために，ダウンサンプリングした画像を使用する．本稿では， $640 \times 480$  のスクリーンに対してダウンサンプルした画像の大きさは  $160 \times 120$  としており，良好な結果を得ている．

ダウンサンプリングした画像の各ピクセルに対して伝達関数が計算される．式 (6) で表される伝達関数を計算するために，まず球面上に一樣に分布した方向を計算する．次に各方向について関数  $L$ ,  $\tilde{V}$ ,  $\phi_j$ ,  $s$  を計算し，その積を足し合わせることによって式 (6) の積分を計算する．しかしながら，この積分計算には多くの離散方向が必要であるため，計算時間を要する．

伝達関数を効率的に計算するために，提案法は precomputed visibility cuts<sup>1)</sup> を利用する．一般的に，余弦項を乗じた可視関数  $\tilde{V}$  はコヒーレンスが高い領域があるため， $\tilde{V}$  を区分線形関数で近似できる少数のクラスタに球面上の方向を分割する．クラスタ  $C_k$  の  $\tilde{V}$  はクラスタの平均値  $\langle v_k \rangle$  で近似する．

$$\langle v_k(x) \rangle = \frac{1}{|C_k|} \sum \tilde{V}(x, \omega_i), \quad \omega_i \in C_k. \quad (20)$$

伝達関数  $T_j(x)$  は  $v_k$  を用いて以下のように効率的に計算される．

$$T_j(x) = \sum_k |C_k| L(\omega_k) \langle v_k(x) \rangle \tilde{\phi}_j(h_k), \quad (21)$$

$\omega_k$  はクラスタ  $C_k$  の代表方向， $\tilde{\phi}_j$  は  $j$  番目の基底関数と関数  $s$  の積， $h_k$  は  $\omega_k$  と視線方向  $\omega_o(x)$  とのハーフベクトルとする．

物体表面の点  $x$  におけるクラスタの平均値  $\langle v_k(x) \rangle$  を計算するために，物体表面を構成する三角形の頂点  $x_v$  において各クラスタの値を計算する． $x$  におけるクラスタ値  $\langle v_k(x) \rangle$  は， $x$  を含む三角形の 3 頂点における前計算したクラスタ値を補間することによって計算する．

### 4.2 BRDF モデリングとレンダリング

提案法は式 (17) を最小化する係数ベクトル  $\mathbf{c}$  を計算する．提案法では，Numerical Algorithm Group library<sup>14)</sup> を用いて線形制約付き最小二乗法を解いた．提案法では線形制約条件を考慮することによって物理的に正しい BRDF を求めるだけでなく，ユーザの希望によっては線形制約条件を無視することによって物理的に不可能な BRDF を生成することも可能である．

係数ベクトル  $c$  が求まったら, 各頂点における放射輝度を式 (5) を用いて計算する. 提案法では, レンダリング時に視点と照明を変更できるように, 式 (5) をレンダリング時に計算する. 頂点  $x_v$  における放射輝度  $B(x_v, \omega_o)$  は以下の式で計算される.

$$B(x_v, \omega_o) = \sum_k L(\omega_k) \langle v_k(x_v) \rangle \left( \frac{\rho_d}{\pi} + \sum_j c_j \tilde{\phi}_j(h_k) \right). \quad (22)$$

各頂点での輝度計算は GPU で処理される.

### 4.3 インタフェース

提案法は, ストロークを描画することによって物体表面の輝度を指定する. ストロークは点の集合で表現される. ストロークを描画するブラシは, 色  $C$ , 半径  $D$ , ガウスパラメータ  $\kappa$ , スケーリング係数  $S$  の 4 つのパラメータを持つ. ピクセル  $x_i$  の指定された色  $B_i$  は以下の式によって計算される.

$$B_i = w_i C + (1 - w_i) B'_i, \quad (23)$$

$$w_i = \begin{cases} \exp(-\kappa d_i) & d_i \leq D \\ 0 & d_i > D \end{cases},$$

ここで  $d_i$  はピクセル  $x_i$  とストロークとの距離,  $B'_i$  はストローク描画前のピクセル  $x_i$  の色値とする.  $B_i$  の色値はスケーリング係数  $S$  ( $S \geq 0$ ) と  $B'_i$  を用いて  $B_i = w_i S B'_i + (1 - w_i) B'_i$  と指定することも可能である. 提案法ではハイライトを生成するだけでなく,  $C$  に負の値を代入することによってハイライトを消すことも可能である.

## 5. 結 果

図 4 は提案法で生成した BRDF モデルを用いて車のモデルを描画した例である. 図 4 (a) はユーザが指定したストロークであり, 図 4 (b) は指定された領域を明るくするようにモデル化された BRDF を用いてレンダリングした画像である. 図 4 (c) および (d) は照明および視点を変えた場合の画像である. 図 5 は bunny モデルの画像である. 図 5 (a) および (c) は初期状態とストロークを示し, 図 5 (b) および (d) はそれぞれモデリングした BRDF を用いて生成された画像である. 生成された BRDF は図 5 (b) と (d) の左下に示す. 黄色の矢印が入射方向を示す. 図 1, 図 4, 図 5 に示されるように, 提案法はユーザが指定した位置にハイライトを生成することができる. 図 6 は, ハイライトの色として黄色と緑色を指定し, それに合うようにモデリングされた BRDF を用いて生成した画像である.

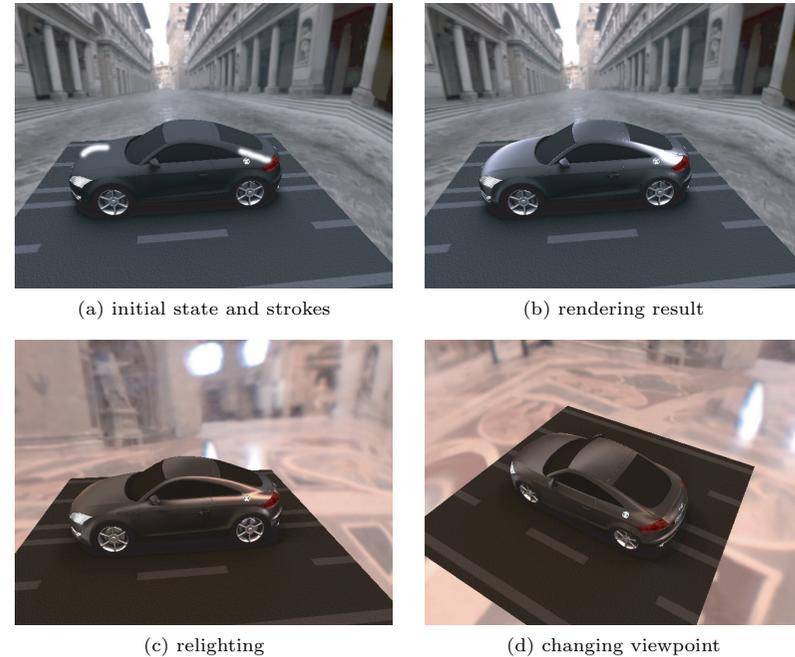


図 4 提案法によって生成された BRDF を用いて車をレンダリングした画像  
Fig. 4 Example of car rendering with BRDFs calculated by using our method.

提案法は, SRBF の中心  $\xi_j$  をヘミキューブの各ピクセルに対応する方向に設定する. 本稿では, 鏡面反射成分を表現する基底関数の数  $J$  は 147 ( $3 \times 7 \times 7$ ) にしている. SRBF のバンド幅  $\lambda$  は分散  $\sigma$  と  $\lambda$  との関係  $\sigma^2 = 1 - (\cosh(2\lambda) - (2\lambda)^{-1})$  から計算する<sup>15)</sup>. 本稿では  $\sigma = \pi/40$  として  $\lambda$  を計算し, 良好な結果を得ている. 式 (16) における離散化方向  $N_i$  は 192 としている.

表 1 に前計算時間・レンダリング速度を示す. 計算環境は CPU が Core2Quad 2.66 GHz, GPU が GeForce 8800 GTX の標準的な PC である. 表 1 に示されるように, 提案法は BRDF を高速に計算することができる. さらに, 提案法は照明および視点をインタラクティブに変更することができる. これらのインタラクティブなフィードバックは直感的な BRDF のモデリングにとって役立つ.

提案法の制限は以下のとおりである. 提案法は, ユーザが指定した外観にできるだけ合う

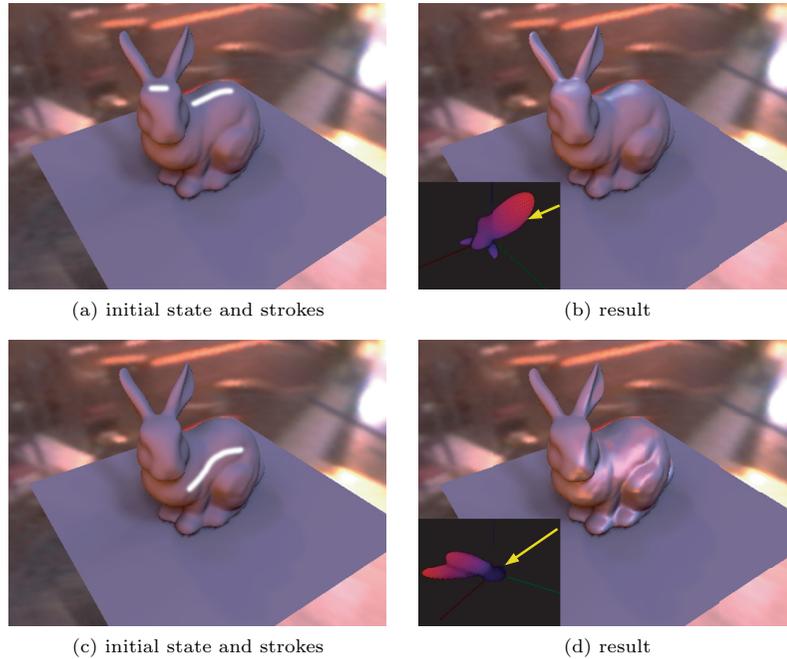


図 5 提案法によって生成された BRDF を用いて bunny モデルをレンダリングした画像  
 Fig. 5 Example of bunny rendering with BRDFs calculated by using our method.

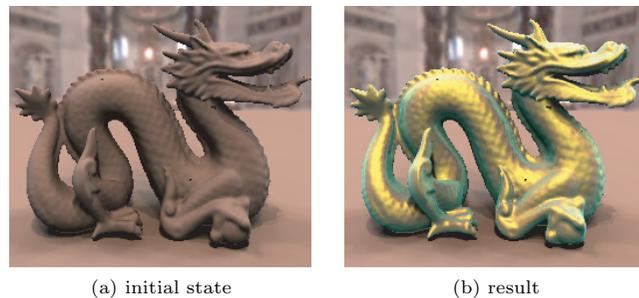


図 6 ハイライト色を指定して BRDF を生成した結果画像  
 Fig. 6 Example of dragon rendered with BRDFs calculated by using our method.

表 1  $T_s$  は最小二乗法の計算時間,  $N$  は物体表面に対応するピクセル数,  $T_{trans}$  は伝達関数の計算時間である  
 Table 1 Statistics of our method.  $T_s$  represents the computational time to solve least square problem.  $N$  is the number of pixels.  $T_{trans}$  indicates the time to calculate transfer functions.

Fig. No.	Vertices	fps	$T_s$	N	$T_{trans}$
Fig. 1	77K	2.2	0.26 sec	2,656	28 sec
Fig. 4	77K	2.2	0.17 sec	1,797	24 sec
Fig. 5	22K	2.3	0.14 sec	1,299	22 sec
Fig. 6	30K	2.2	0.17 sec	1,700	24 sec

ように BRDF を計算するが, ユーザが指定していない領域の輝度も変化する. 指定された領域の伝達関数と類似した伝達関数の領域は影響を受ける. これは, 式 (17) の伝達関数の値に重みをかけることによって緩和される.

### 6. まとめと今後の課題

本稿は, 逆問題アプローチを用いた BRDF のモデリング手法を提案した. BRDF を基底関数の線形和で表現することによって, 基底関数で計算される伝達関数の線形和によって放射輝度を表現する. 提案法は, ユーザが指定した輝度と伝達関数によって計算される輝度の差の二乗和を最小にする最適化問題を解くことによって BRDF を計算した. BRDF の満たすべき特性である相反性, エネルギー保存則および非負性を線形制約として表現した. 最終的に BRDF のモデリングを線形問題に帰着させることにより, 高速に BRDF の計算をすることができた. これにより, ユーザが希望する BRDF をインタラクティブにモデリングすることができた.

今後の課題として, ユーザが望む画像を得るために, BRDF だけでなく最適な照明状況を計算することがあげられる.

### 参考文献

- 1) Akerlund, O., Unger, M. and Wang, R.: Precomputed Visibility Cuts for Interactive Relighting with Dynamic BRDFs, *Proc. Pacific Graphics 2007*, pp.161–170 (2007).
- 2) Ashikhmin, M.: Distribution-based BRDFs (2006). <http://jesper.kalliope.org/blog/library/dbrdfs.pdf>
- 3) Ashikhmin, M., Premoze, S. and Shirley, P.: A Microfacet-based BRDF Generator, *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp.65–74 (2000).
- 4) Ben-Artzi, A., Overbeck, R. and Ramamoorthi, R.: Real-time BRDF Editing in

- Complex Lighting, *ACM Trans. Graphics*, Vol.25, No.3, pp.945–954 (2006).
- 5) Ben-Artzi, A., Egan, K., Ramamoorthi, R. and Durand, F.: A Precomputed Polynomial Representation for Interactive BRDF Editing with Global Illumination, *ACM Trans. Graphics*, Vol.27, No.2, Article No.13 (2008).
  - 6) Colbert, M., Pattanaik, S. and Krivanek, J.: BRDF-shop: Creating Physically Correct Bidirectional Reflectance Distribution Functions, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.26, No.1, pp.30–36 (2006).
  - 7) Dobashi, Y., Kaneda, K., Yamashita, H. and Nishita, T.: A Quick Rendering Method using Basis Functions for Interactive Lighting Design, *Computer Graphics Forum*, Vol.14, No.3, pp.229–240 (1995).
  - 8) Dobashi, Y., Kaneda, K., Yamashita, H. and Nishita, T.: Method for Calculation of Sky Light Luminance Aiming at an Interactive Architectural Design, *Computer Graphics Forum*, Vol.15, No.3, pp.112–118 (1996).
  - 9) Hasan, M., Pellacini, F. and Bala, K.: Direct-to-indirect Transfer for Cinematic Relighting, *ACM Trans. Graphics*, Vol.25, No.3, pp.1089–1097 (2006).
  - 10) Jaroszkiewicz, R. and McCool, M.D.: Fast Extraction of BRDFs and Material Maps from Images, *Proc. Graphics Interface 2003*, pp.1–10 (2003).
  - 11) Kautz, J., Sloan, P. and Snyder, J.: Fast, Arbitrary BRDF Shading for Low-frequency Lighting using Spherical Harmonics, *Proc. Eurographics Workshop on Rendering 2002*, pp.301–308 (2002).
  - 12) Khan, E.A., Reinhard, E., Fleming, R.W. and Bulthoff, H.H.: Image-based material editing, *ACM Trans. Graphics*, Vol.25, No.3, pp.654–663 (2006).
  - 13) Lawrence, J., Ben-Artzi, A., DeCoro, C., Matusik, W., Pfister, H., Ramamoorthi, R. and Rusinkiewicz, S.: Inverse Shade Trees for Non-parametric Material Representation and Editing, *ACM Trans. Graphics*, Vol.25, No.3, pp.735–745 (2006).
  - 14) Numerical algorithm group C library.
  - 15) Narcowich, F.J. and Ward, J.D.: Nonstationary Wavelets on Themisphere for Scattered Data, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol.3, No.4, pp.324–336 (1996).
  - 16) Ng, R., Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: All-frequency Shadows using Non-linear Wavelet Lighting Approximation, *ACM Trans. Graphics*, Vol.22, No.3, pp.376–381 (2003).
  - 17) Ngan, A., Durand, F. and Matusik, W.: Image-driven Navigation of Analytical BRDF Models, *Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2006*, pp.399–408 (2006).
  - 18) Okabe, M., Matsushita, Y., Shen, L. and Igarashi, T.: Illumination Brush: Interactive Design of All-frequency Lighting, *Proc. Pacific Graphics 2007*, pp.171–180 (2007).
  - 19) Pacanowski, R., Grainer, X., Schick, C. and Poulin, P.: Sketch and Paint-based Interface for Highlight Modeling, *Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling* (2008).
  - 20) Pellacini, F., Battaglia, F., Morley, R. and Finkelstein, A.: Lighting with Paint, *ACM Trans. Graphics*, Vol.26, No.2, Article No.9 (2007).
  - 21) Pellacini, F. and Lawrence, J.: Appwand: Editing Measured Materials using Appearance-driven Optimization, *ACM Trans. Graphics*, Vol.26, No.3, Article No.54 (2007).
  - 22) Poulin, P. and Fournier, A.: Lights from Highlights and Shadows, *Proc. Symposium on Interactive 3D Graphics 1992*, pp.31–38 (1992).
  - 23) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: Frequency Space Environment Map Rendering, *ACM Trans. Graphics*, Vol.21, No.3, pp.517–526 (2002).
  - 24) Schoeneman, C., Dorsey, J., Smits, B., Arvo, J. and Greenberg, D.: Painting with Light, *Proc. SIGGRAPH'93*, pp.143–146 (1993).
  - 25) Sloan, P., Kautz, J. and Snyder, J.: Precomputed Radiance Transfer for Real-time Rendering in Dynamic Scenes, *ACM Trans. Graphics*, Vol.21, No.3, pp.527–536 (2002).
  - 26) Sloan, P., Hall, J., Hart, J. and Snyder, J.: Clustered Principal Components for Precomputed Radiance Transfer, *ACM Trans. Graphics*, Vol.22, No.3, pp.382–391 (2003).
  - 27) Sloan, P., Liu, X., Shum, H. and Snyder, J.: Bi-scale Radiance Transfer, *ACM Trans. Graphics*, Vol.22, No.3, pp.370–375 (2003).
  - 28) Sloan, P., Luna, B. and Snyder, J.: Local, Deformable Precomputed Radiance Transfer, *ACM Trans. Graphics*, Vol.24, No.3, pp.1216–1224 (2005).
  - 29) Sun, X., Zhou, K., Chen, Y., Lin, S., Shi, J. and Guo, B.: Interactive Relighting with Dynamic BRDFs, *ACM Trans. Graphics*, Vol.26, No.3, Article No.27 (2007).
  - 30) Tsai, Y.-T. and Shih, Z.-C.: All-frequency Precomputed Radiance Transfer using Spherical Radial Basis Functions and Clustered Tensor Approximation, *ACM Trans. Graphics*, Vol.25, No.3, pp.967–976 (2006).
  - 31) Wang, R., Tran, J. and Luebke, D.: All-frequency Relighting of Non-diffuse Objects using Separable BRDF Approximation, *Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2004*, pp.345–354 (2004).
  - 32) Ward, G.J.: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, *ACM SIGGRAPH Compute Graphics*, Vol.26, No.2, pp.265–272 (1992).

(平成 20 年 11 月 15 日受付)

(平成 21 年 5 月 13 日採録)



岩崎 慶 (正会員)

1999年東京大学理学部卒業。2001年同大学大学院新領域創成科学研究科博士前期課程修了。2004年同大学院新領域創成科学研究科博士後期課程修了。同年和歌山大学システム工学部助手。2007年同講師。主としてコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。科学博士。



土橋 宜典 (正会員)

1992年広島大学工学部第二类(電気系)卒業。1994年同大学大学院工学研究科システム工学専攻博士課程前期修了。1997年同専攻博士課程後期修了。同年広島市立大学情報科学部助手。2000年北海道大学工学研究科助教授。主としてコンピュータグラフィックスに関して、照明シミュレーション、景観予測等の研究に従事。工学博士。



西田 友是 (正会員)

1971年広島大学工学部卒業。1973年同大学大学院工学研究科修了。同年、マツダ(株)に入社。1979年福山大学工学部講師。1984年同助教授。1990年同教授。1998年東京大学理学部教授。1999年同大学大学院新領域創成科学研究科教授となり、現在に至る。コンピュータグラフィックスの研究に従事。工学博士。