

# ウェーブレットテクスチャ：ドベシウウェーブレットと反射モデルと円偏光板による BRDF 圧縮

宮崎 大輔

柴田 卓司

池内 克史

東京大学生産技術研究所

<http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/>

**Abstract** In order to create a photorealistic VR model, we have to record the appearance of the object from different directions under different illuminations. In this paper, we propose a method which renders photorealistic images from small size of data. First, we separate the images of the object into diffuse reflection component and specular reflection component by using circular polarizers. Then, we estimate the parameters of reflection model for each component. Finally, we compress the difference between the input images and the rendered images by using wavelet transform. At the rendering stage, we first calculate the diffuse and specular reflection images from the reflection parameters, then add the difference decompressed by wavelet inverse transform into the calculated reflection images, and finally obtain the photorealistic image of the object.

## 1. はじめに

近年、コンピュータ性能の飛躍的な進歩により三次元物体を扱うことが容易になり、医療、教育、娯楽、芸術、デジタルアーカイブ等様々な分野において複合現実感の技術が利用されている。このような背景のもとに、現実感の高い写実的な三次元物体画像の需要が増えている。そこで本研究では、複合現実感において、物体の見えを構成する明るさ情報に着目し、任意の状況下での写実的なレンダリング手法を提案する。

この問題に対するアプローチの一つに、光の反射モデルに基づく方法がある。これは、物体表面の反射を数学的に定式化し、物体表面におけるパラメータを推定することにより任意の状況下での仮想物体画像を合成している。しかし、表面反射モデルは適用できる物体に制約がある。これまでに多数の研究が発表されているが、ここでは三つだけ紹介する。Satoらは、色により分離した拡散反射成分と鏡面反射成分から二色性反射モデルのパラメータを推定し、画像を合成した [9]。Nishinoらは、視点の違いにより分離した反射成分から二色性反射モデルのパ

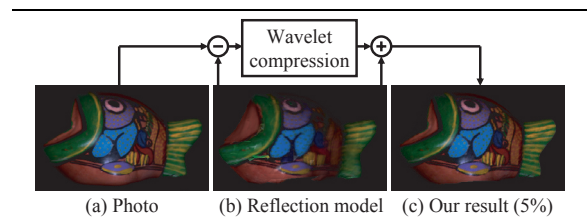


図 1: アルゴリズムの流れ：(a) 入力画像，(b) 反射モデルによるレンダリング結果の画像，(c) 出力画像。

ラメータと光源環境を推定した [6]。また、Shibataらは、反射成分の分離において、カラーセンサーと光源の前に直線偏光板を置き、偏光の性質を利用してよりロバストに分離を行った [10]。

また、別のアプローチに、実画像に基づく方法がある。これは、物体を様々な光源状況や視線方向の下で撮像した実画像をデータベースとして保持しておき、データベースからテクスチャを取り出すことにより合成するため、物体個々の反射特性に制限を受けずにどのような物体にも適用できる。一方、大量の実画像をデータベースとして保持する必要があり、データ量が大きくなってしまう。Nishinoらによる Eigen-Texture 法 [5] は、複数枚の入力画像を、三次元幾何モデルの三角パッチごとに主成分分析で圧縮してデータ量を削減し、任意の状況下のレンダリングを行う手法である。Furukawaらは、三角パッチごとの画像データベースをテンソル積展開に

<sup>1</sup>Wavelet Texture: BRDF Compression by using Daubechies Wavelet, Reflection Model, and Circular Polarizer

Daisuke Miyazaki, Takushi Shibata, and Katsushi Ikeuchi  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
**Keywords:** Daubechies wavelet, circular polarization, Torrance-Sparrow model, BRDF, image compression, VR model

表 1: 他手法との比較.

|                                 | 圧縮法                | 拡散反射成分     | 鏡面反射成分           | 分離   |
|---------------------------------|--------------------|------------|------------------|------|
| MPEG                            | 離散コサイン変換           |            |                  |      |
| Nishino (Eigen-Texture [5])     | 主成分分析 (KL 展開)      |            |                  |      |
| Furukawa [3]                    | テンソル積展開            |            |                  |      |
| Vasilescu (Tensor-Texture [12]) | N モード 特異値分解        |            |                  |      |
| Wang [13]                       | out-of-core テンソル近似 |            |                  |      |
| Ma [4]                          | ラプラス変換             | Lambertian | Phong            |      |
| Nishino [6]                     |                    | Lambertian | Torrance-Sparrow | 視点   |
| Sato [9]                        |                    | Lambertian | Torrance-Sparrow | 色    |
| Shibata [10]                    |                    | Lambertian | Torrance-Sparrow | 直線偏光 |
| 提案手法 (Wavelet-Texture)          | ウェーブレット変換          | Lambertian | Torrance-Sparrow | 円偏光  |

より圧縮し，レンダリングを行った [3]. Vasilescu らによる Tensor-Texture 法 [12] は N モード 特異値分解により画像データベースを圧縮し，レンダリングを行う手法である．同様に，Wang らは out-of-core テンソル近似により，圧縮・レンダリングを行った [13]. Ma らは，三角パッチごとの画像をラプラス変換により圧縮し，画像合成を行った [4].

各手法の特徴をまとめたのが表 1 である．主成分分析，テンソル積展開，N モード 特異値分解，out-of-core テンソル近似は係数に加えて基底も保存しないといけなないので，十分な圧縮ができない．離散コサイン変換，ラプラス変換，ウェーブレット変換は基底がそれぞれ余弦関数，指数関数，ウェーブレットであり，係数のみの保存となるが，この中でもウェーブレットの精度が最もよいことが知られている．

本稿は，任意の状況下での写実的なレンダリングをおこなうことを目的とする．表面反射の正確な再現において，鏡面反射成分と拡散反射成分の二つの反射成分の性質は大きく異なるため，それぞれを個別に扱う必要がある．そこでまず，反射成分の分離に円偏光を利用した分離法を導入した．色による分離では光源色と表面色が同じ場合には困難であるため，提案手法では偏光によりロバストな分離を行う．次に，光の反射を二色性反射モデルを用いて数学的に定式化し，それぞれの反射成分に対する反射モデルのパラメータを推定する．提案手法では，拡散反射については一般的な Lambertian モデル，鏡面反射については Phong モデルより複雑な Torrance-Sparrow モデルを用いている．しかし，反射モデルは現実の反射を簡略化した表現なので，いつも正確な反射を表現できるとは限らない．そこで，提案手法では反射モデルで表現しきれない成分もデータベースとして保持することにより，レンダ

リング精度を高めている．さらにデータ量の観点から，このデータベースを三次元離散ウェーブレット変換により圧縮する．提案するアルゴリズムの流れを図 1 に示す．圧縮のステップでは，図 1(a) の入力画像と図 1(b) の反射モデルによるレンダリング結果の画像の差をそれぞれ鏡面反射・拡散反射について計算し，その差分をウェーブレットにより圧縮する．復元のステップでは，図 1(b) のレンダリング画像に，圧縮された差分画像を展開し，足し合わせた画像を出力とする（図 1(c)）．

以降の章立ては次の通りである．2 章では幾何モデルの作成方法について述べる．3 章では反射成分分離について述べ，分離された反射成分ごとに反射モデルのパラメータを推定する方法を 4 章で述べる．5 章ではウェーブレットを用いた圧縮に基づいた提案手法の内容を述べる．6 章で実験結果を示し，7 章で本論文をまとめる．

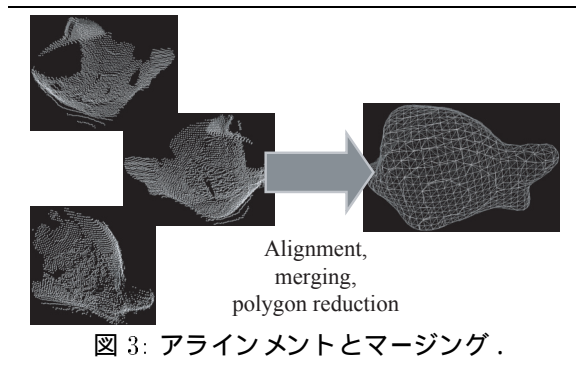
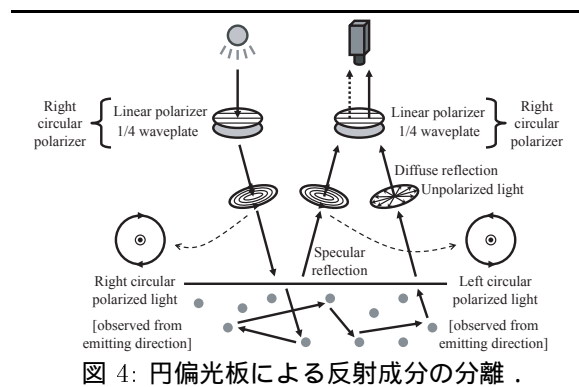
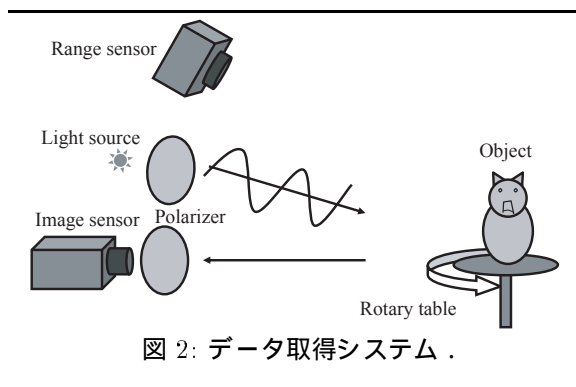
## 2. 幾何モデル

### 2.1. データ取得

本稿では，図 2 のようなデータ取得システムを用いる．モデル化される対象物体を回転テーブルの上に置き，光源，カラーセンサ，レンジセンサ，偏光板を配する．距離画像は回転テーブルを一定角度ずつ回転させながら取得する．また，それぞれの回転角ごとにカラーセンサーにより明るさ画像も同時に取得する．この時，二種類の明るさ画像を得る．一つはカラーセンサと光源の前に偏光板を設置して撮像した画像，もう一つは二枚の偏光板なしで撮像した画像である．

### 2.2. アラインメント

距離画像はそれぞれの観測点のレンジセンサーの座標系上のデータとして得られるので，それらの



### 3. 反射成分分離

#### 3.1. 二色性反射モデル

多くの物体表面の反射は拡散反射成分と鏡面反射成分という二つの異なる性質の反射成分を持つ二色性反射モデルに従う．本論文でも二色性反射モデルに従う物体を対象とする．入射光が物体表面に投射された際、直接反射するものを鏡面反射成分といい、光源色と同じ色を持つ．一方、物体表面から物体内部に入り、顔料に跳ね返りながら浸透した後、再度放射されるものを拡散反射成分といい、物体内部と同じ色を持つ．二色性反射モデルは式 (1) で表される．

$$I_c = I_{d,c} + I_{s,c} \quad (c = \{R, G, B\}) \quad (1)$$

ここで、 $I$  は反射光全体の放射輝度、 $I_d$  は拡散反射の放射輝度、 $I_s$  は鏡面反射の放射輝度を表す．以降では、添え字 “c” を省略して記す．

#### 3.2. 円偏光による反射成分の分離

物体表面の反射モデルは鏡面反射成分と拡散反射成分の線形和として表現されるので、それぞれの反射率は独立して求められる．この二種類の反射率を解析する際、鏡面反射成分の画像と拡散反射成分の画像が必要となる．ここで、一般的に撮像した画像はこの両成分を含むので、通常の画像からそれぞれの反射成分を分離しなければならない．

偏光 [1] を用いると、拡散反射成分と鏡面反射成分を容易に分離することができる．図 4 は二枚の円偏光板を用いた反射成分分離のメカニズムを表している．

光源と物体を撮像するカメラの前にそれぞれ逆回転の円偏光板を設置する．まず光源から放射された光は円偏光板を透過して円偏光となり物体表面に入射する．物体表面で直接反射する円偏光はその性質を保ったまま反射するので、鏡面反射成分は円偏

距離画像を一つの座標系上に合わせる必要がある．この操作をアラインメントという．距離画像間の位置を合わせるためには、それぞれの距離画像の対応点間の距離の総和を誤差関数とし、繰り返し計算により最小化する．

#### 2.3. マージング

距離画像をアラインメントしただけでは、ただ単に複数の距離画像が重なって置かれているだけであるため、複数の距離画像をつなぎ合わせ、無駄な重なりを省き、一つのデータに統合しなければならぬ．この操作をマーキングといい、全ての距離画像を一つの座標系にアラインメントしたあとに実行する．アラインメントとマーキングの様子を図 3 に示す．

#### 2.4. カメラキャリブレーション

カラーセンサーの置かれているカメラ座標と、レンジセンサーの置かれている世界座標との対応を取り、三次元モデルの元の位置から対応する二次元画像への移動行列を求めるのがこの操作である．このキャリブレーションを全ての入力画像について行う．

光である．一方，内部に透過した円偏光は内部拡散を経て円偏光性は失われるので，拡散反射成分は非偏光な光である．ここでカメラの前の円偏光板に両反射成分が入射すると，円偏光の鏡面反射成分は遮断され，非偏光な拡散反射成分は透過する．そしてカメラには拡散反射成分のみが到達する．つまり鏡面反射成分は打ち消されたことになる．このメカニズムにより拡散反射画像を得ることができる．

明るさの比を式で表してみると，円偏光板を設置せずにカメラによって観測された輝度を  $I_{\text{off}}$ ，円偏光板を設置してカメラによって観測された輝度を  $I_{\text{on}}$ ，拡散反射成分の輝度を  $I_d$ ，鏡面反射成分の輝度を  $I_s$  として， $I_{\text{on}}$  と  $I_{\text{off}}$  は

$$I_{\text{on}} = I_d \quad (2)$$

$$I_{\text{off}} = I_d + I_s \quad (3)$$

つまり，拡散反射成分  $I_d$  と鏡面反射成分  $I_s$  は以下ようになる．

$$I_d = I_{\text{on}} \quad (4)$$

$$I_s = I_{\text{off}} - I_{\text{on}} \quad (5)$$

なお，偏光板を通して物体を撮像すると輝度値が変化するため，上の二つの式を満たさない．ここでは，基準白色を偏光板有り・無しで撮像することにより輝度値を調整し，上の二つの式を満たすようにしているものとする．

円偏光板の代わりに直線偏光板を用いても，反射成分の分離は可能である．しかし，視点方向と法線方向のなす角が  $90^\circ$  に近づくと，拡散反射成分も部分的に直線偏光となることが知られており，その分が鏡面反射成分として計算されることになるので誤差を含むことになる．円偏光板は逆方向の円偏光のみを遮断するので，部分的に直線偏光された拡散反射成分は完全に透過し，この問題を回避することができる．

円偏光板は直線偏光板よりも波長に依存するという欠点もある．しかし，上に挙げた通り，円偏光板による分離方法には，偏光板の透過軸に影響されないこと，視点方向と法線方向のなす角が  $90^\circ$  に近い時に起こる拡散反射成分の部分的な直線偏光化の影響を受けないことの二つの利点がある．図5はこの操作により分離された拡散反射成分，鏡面反射成分を表す．なお，図で“(×n)”とあるのは，画像が読者に見やすいように明るさを実際の  $n$  倍にしていることを表す．以降でも同様であり，特に断りがなければそのままの明るさで示している．

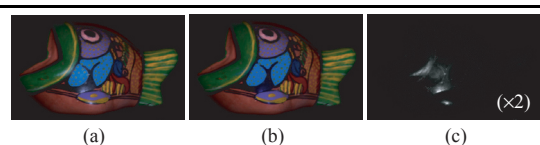


図 5: 反射成分分離結果: (a) 通常の画像, (b) 拡散反射成分画像, (c) 鏡面反射成分画像.

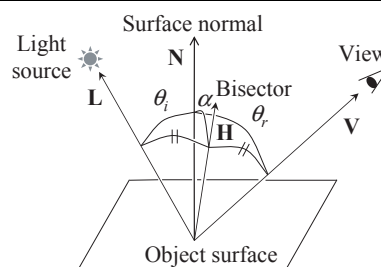


図 6: 入射光，法線方向，視線方向の関係．

## 4. 反射パラメータ推定

### 4.1. 拡散反射パラメータ推定

反射成分を分離した後，それぞれの成分画像を用いて反射パラメータを推定する．拡散反射モデルとしては以下の Lambertian モデルを用いる．

$$I_d = K_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) \quad (6)$$

$$= K_d \cos \theta_i \quad (7)$$

ここで， $I_d$  は拡散反射の放射輝度， $K_d$  は拡散反射の反射率（アルベド）， $\mathbf{N}$  は物体表面の法線の単位ベクトル， $\mathbf{L}$  は光源方向の単位ベクトル， $\theta_i$  は物体表面の法線と光源方向との間の角度を表す（図6）．なお， $K_d$  には光源の情報も含まれている．

推定すべき拡散反射パラメータは  $K_{d,R}$ ,  $K_{d,G}$ ,  $K_{d,B}$  の三つである．これらを分離された拡散反射成分画像と，幾何モデルから計算される法線方向，既知の光源方向，視線方向を用いて求める．

反射パラメータは全ての点について求める．ある点に着目すると，複数枚の拡散反射成分画像よりこの点の様々な輝度値が求まるので，法線方向と視線方向の間の角度の余弦関数により重み付けをして，式7を線形最小二乗法で解く．

### 4.2. 鏡面反射パラメータ推定

鏡面反射の数式モデルの代表的な物として Torrance-Sparrow モデル [11] がある．このモデルには反射パラメータや幾何学的要因による光の減衰といったパラメータも入っている．Torrance-

Sparrow モデルは式 (8) のように表現できる .

$$I_s = \frac{K_s}{\cos \theta_r} \exp \left( -\frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \right) \quad (8)$$

ここで,  $I_s$  は鏡面反射の放射輝度,  $K_s$  は鏡面反射の反射率,  $\sigma$  は物体表面の粗さ係数,  $\theta_r$  は物体表面の法線と視線方向との間の角度,  $\alpha$  は視線方向ベクトルと光源方向ベクトルを二等分するベクトルと法線ベクトルとの間の角度を表す ( 図 6 ). なお,  $K_s$  には光源の情報も含まれている . また,  $\theta_r$  と  $\alpha$  は以下の式から計算される .

$$\cos \theta_r = \mathbf{N} \cdot \mathbf{V} \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \mathbf{N} \cdot \mathbf{H} \quad (10)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{L} + \mathbf{V}}{\|\mathbf{L} + \mathbf{V}\|} \quad (11)$$

ただし,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{H}$  は, 法線の単位ベクトル, 光源方向の単位ベクトル, 視線方向の単位ベクトル, 視線方向と光源方向の間の方向にある単位ベクトルである .

推定すべき鏡面反射パラメータは  $K_{s,R}$ ,  $K_{s,G}$ ,  $K_{s,B}$ ,  $\sigma$  の四つである . 鏡面反射は限られた視点から, 狭い範囲でのみ観測される . そのデータから Levenberg-Marquardt 法を用いて, 式 (8) の非線形最小二乗問題を解く . 鏡面反射が観測されない点については, 周囲の点から補間してパラメータを求める . ここでは, 近傍点のパラメータは似ていると仮定している .

## 5. Wavelet-Texture 法

反射モデルには相互反射を考慮していないことや, 物体表面が粗い面で構成されている必要がある等の制約条件があるため, 反射モデルによるレンダリング画像は実画像との誤差がある . そこで, 反射モデルによるレンダリングでは再現しきれない情報をも保存してレンダリングを行うというのが提案手法のアイデアである . この情報というのは, 原画像と反射モデルによるレンダリング画像との差分画像である . しかしこの複数の差分画像は情報量が大いのでデータ圧縮を施し, レンダリングにおいては圧縮データの展開による再構成を行った差分画像を, 反射モデルによるレンダリングに補完する .

差分画像は拡散反射成分・鏡面反射成分それぞれ成分別に作成する . まず, 元データとしての入力画像を三角パッチの集合画像に展開する ( 図 7(a) ). 次に, 推定された各反射パラメータを用いて, 入力画像に対応した視点と光源条件のもとで三角パッチの集合画像にレンダリングを行う ( 図 7(b) ). これ

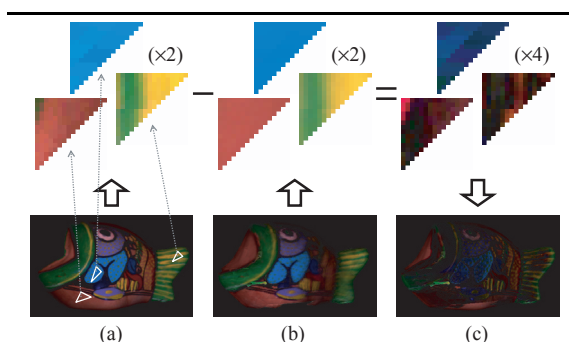


図 7: 三角パッチごとの差分の計算: (a) 入力とする拡散反射画像, (b) 反射モデルにより計算された拡散反射画像, (c) 拡散反射成分の差分画像 .

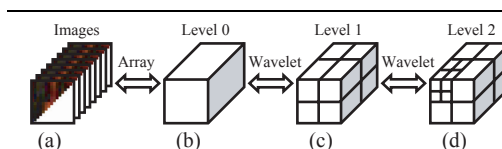


図 8: パッチごとの画像圧縮: (a) パッチごとの差分画像列, (b) (a) のデータ, (c) 分解後の 8 つの成分, (d) (c) をさらに 8 つに分解した図 .

らの差をとったものを差分画像とする . 図 7(c) は差分画像である . この操作を入力画像の枚数分を行い, 差分画像列を得る . なお, 図 7(c) では読者の読みやすさを考慮して負の値はその絶対値で表現している .

この各成分の差分画像列について三次元離散ウェーブレット変換 [2] による情報圧縮を行う . 提案手法では差分画像列の三角パッチごとに三次元離散ウェーブレット変換を行う . ウェーブレットには Gabor ウェーブレット, Haar ウェーブレット, Daubechies ウェーブレットなど, 様々なものがあるが, Daubechies ウェーブレットのほうが Haar ウェーブレットよりも画像再構成に優れていることや, Gabor ウェーブレットよりも画像再構成に適していることなどから, 本稿では Daubechies ウェーブレットを用いる . まず, パッチごとの複数の差分画像列を三次元データと見なし, 三次元離散ウェーブレット変換により多重解像度分解を行う . これにより得られた全ての値 ( 展開係数 ) を絶対値の大きい上位  $a\%$  だけを残すことによりデータの圧縮を行う . この様子を図 8 に示す .

現在主流の圧縮形式として MPEG があげられる . MPEG は画像列の各フレームごとに独立に二次元離散コサイン変換をおこなっているのに対し, 三次元離散ウェーブレット変換は各フレームごとではな

く、画像列全体で三次元変換を行うので MPEG と比べても効果的な圧縮ができるといえる。

最終的にレンダリングに用いるデータは、幾何モデル、鏡面反射パラメータ、拡散反射パラメータ、差分圧縮画像列である。まず、幾何モデル、鏡面反射パラメータ、拡散反射パラメータを用いて、式 (7) と式 (8) により反射モデルレンダリングを行う。次に、ウェーブレット変換により圧縮された差分画像列を再構成して、各反射モデルレンダリング画像に補完してレンダリングを行う。この差分画像補完を行うことにより反射モデルでは再現し切れなかった情報をもレンダリングすることが可能となる。

## 6. 実験

### 6.1. レンダリング結果

推定した拡散反射パラメータ、鏡面反射パラメータ、幾何モデルより、反射モデルのレンダリングを行った結果を図 9(b) に示す。この図からわかるように、反射モデルによるレンダリングでは、物体の見えの再現性が低いことが分かる。一方、提案手法による結果からは、反射モデルでは再現し切れなかった情報をもレンダリングできていることがわかる(図 9(c))。

図 10 は、図中の縦線が引かれた場所の輝度をグラフで表現したものである。グラフの横軸は画素の位置を表し、縦軸は輝度を表す。輝度はカメラで取得した RGB の値をグレースケールの値に変換したものを表す。グラフの直線は入力画像を表し、点線は提案手法によるレンダリング画像を表し、破線は反射モデルによるレンダリング画像を表す。鏡面反射成分は見えの変化が大きいため、鏡面反射パラメータを推定するにあたっては、物体表面の材質・カメラキャリブレーションの精度・取得した幾何モデルの精度、などに影響を受けやすい。そのため、反射モデルによるレンダリング結果では、鏡面反射の部分の再現性が弱い。しかし、提案手法は入力画像に近いレンダリング結果を出力することに成功している。

### 6.2. 圧縮率

ここでは、再構成画像の品質は PSNR (peak signal-to-noise ratio) で表す。PSNR の単位は dB であり、画質が良いほど大きい値となり、40dB で原画との見分けが難しく、20dB だと見るに堪えないと言われている。拡散反射の差分成分と鏡面反射の差分成分の係数の使用比率と再構成画像の品質

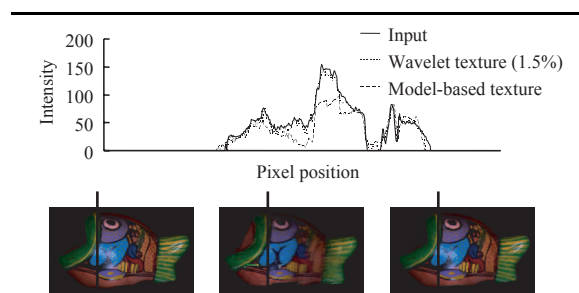


図 10: 輝度の比較:(横軸)画素の位置(縦軸)輝度;(直線)入力画像(点線)Wavelet-Texture 法によるレンダリング画像(1.5%)(破線)反射モデルによるレンダリング画像。

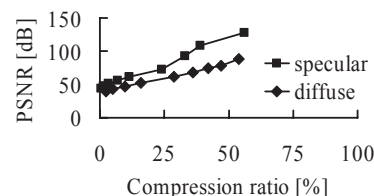


図 11: 展開係数の使用比率と再構成画像の品質:(正方形)鏡面反射画像の PSNR (菱形)拡散反射画像の PSNR。

(PSNR) との相関関係を図 11 に示す。このグラフより、係数の使用比率が 50% 以上の場合には画質は 80dB 以上となることがわかる。係数の使用比率が 50% 以下の場合には圧縮率が 0 に近づいていくに従って、画質が悪化していき、2% 以下のあたりから 40dB 以下になる。

次に再構成信号の品質が提案手法においてどのように左右してくるかを、本システムによるレンダリング画像として視覚的に捉えることによって検証する。図 12 は圧縮率ごとのレンダリング画像である。

図 12(a) は通常の画像、つまり使用比率 100% の非圧縮画像である。画質と係数の使用比率の相関図より 50% 程度までが画質が非常に良い場合であったが、5% の場合についても見た目には劣化が確認されない。この場合の PSNR は図 11 より拡散反射成分、鏡面反射成分共に 40dB 以上である。使用比率を下げたとき、1.5% の場合の画像になると画質の悪化が視覚的に確認できるようになり、PSNR は 40dB 以下と、品質的に問題が出てくる。反射モデルによるレンダリングはこの使用比率が 0% のときを指すが、このときの PSNR は 30dB 以下であり、提案手法によるレンダリングのほうが反射モデ

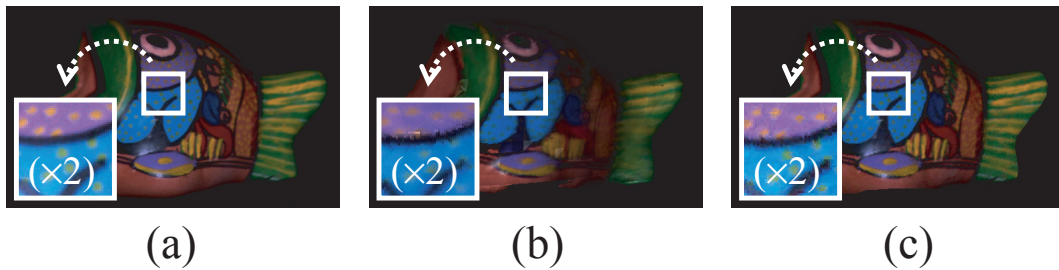


図 9: 結果: (a) 通常の画像, (b) 反射モデルによるレンダリング結果, (c) Wavelet-Texture 法によるレンダリング結果 (5%) .

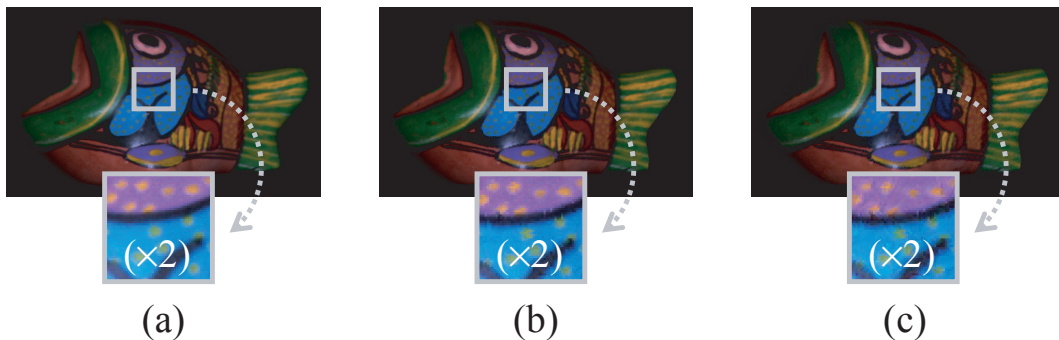


図 12: 展開係数の使用比率ごとの再構成画像: (a) 通常の画像, (b) 使用比率 5% の画像, (c) 使用比率 1.5% の画像 .

ルだけによるレンダリングより画質が高いことが分かる .

### 6.3. 画像ベースの手法との比較

Eigen-Texture 法 [5] など (表 1) では, 反射モデルを使用せず, 画像データのみから圧縮を行っている . これらの画像ベースの手法との比較実験を行った . その結果を図 13 に示す . 図 13(i) は比較のための入力画像である . 図 13(a)(b)(e)(f) が画像ベースの手法の結果であり, 図 13(c)(d)(g)(h) が提案手法の結果である . ここで用いた画像ベースの手法としては, 反射成分の分離を行わず, 反射モデルを使用しないで, ウェーブレットによる圧縮のみを用いている . 図 13(a)(c)(e)(g) が圧縮率 2% での結果であり, 図 13(b)(d)(f)(h) が圧縮率 26% での結果である . 図 13(a)(b)(c)(d) がレンダリング結果であるが, 読者の読みやすさを考慮し, レンダリング画像と入力画像の差分を図 13(e)(f)(g)(h) に示した . 圧縮率 26% のときの提案手法の PSNR は 51, 画像ベースの手法の PSNR は 46 であるので, 提案手法のほうが画質が高い . しかし, 図 13(b)(d)(f)(h) を見る限り, その違いを見分けることは難しい . 圧縮率 2% のときの提案手法の PSNR は 38, 画像ベースの手法の PSNR は 33 であり, この場合でも提案

手法のほうが画質が高い . 図 13(a)(c)(e)(g) で見れば, その違いを確認できる . 画像ベースの手法の結果では, 提案手法と比べて, 三角パッチの境界部分でのノイズが強く現れている . 提案手法でも同様のノイズが現れているが, 一部の場所だけであり, 画像ベースの手法ではほぼまんべんなく発生している . これは, 提案手法では, 差分の大きい部分のみの再現性が悪くなるだけなのに対し, 画像ベースの手法では, 画像内の広い範囲で再現性が悪くなることを表しているものと思われる .

## 7. むすび

本稿では様々な状況下での写実的なレンダリング方法を提案した . この手法において核となるのは二色性反射モデルの利用, 円偏光による反射成分分離, 差分画像の補完, ウェーブレットによるデータ圧縮である . 提案手法により写実性において重要な表面反射が正確に再現でき, また大規模物体を対象とした場合に膨大となるデータ量の効率的な圧縮が可能となった . 近年の携帯電話を始めモバイル機器の高性能化に伴い, モバイル機器上でも二次元コンテンツに取って代わって三次元コンテンツの需要が拡大すると予想されるが, 本稿の提案手法は高い圧縮を実現できることにより, これらの分野でも有効

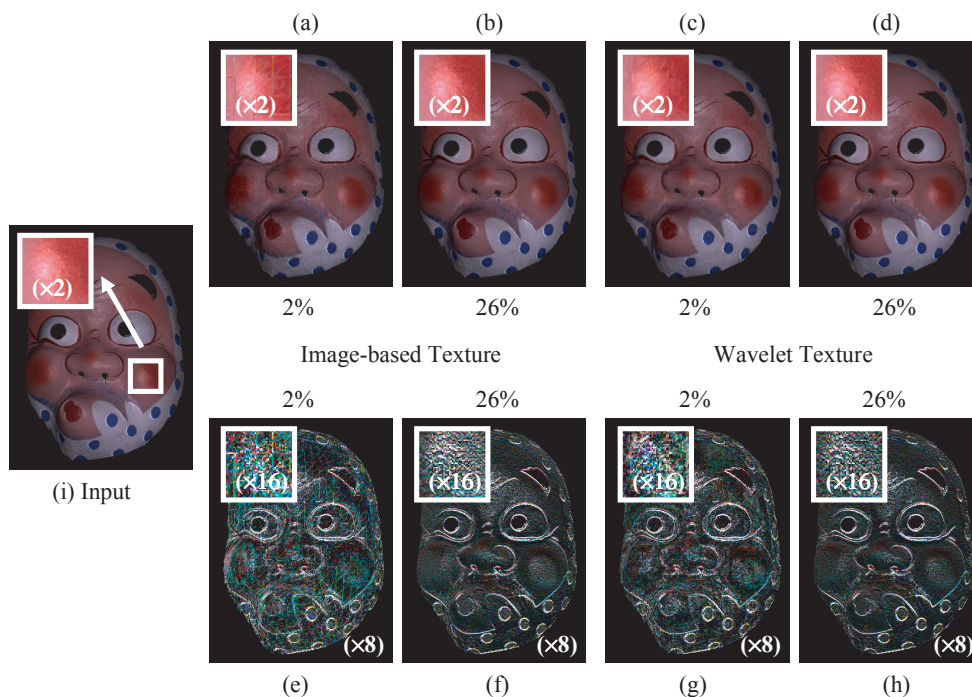


図 13: 画像ベースの手法と提案手法との比較:(i) 入力画像, (a)(b)(e)(f) 画像ベースの手法の結果, (c)(d)(g)(h) 提案手法の結果, (a)(c)(e)(g) 圧縮率 2% の結果, (b)(d)(f)(h) 圧縮率 26% の結果, (a)(b)(c)(d) レンダリング結果, (e)(f)(g)(h) レンダリング画像と入力画像との差分.

であるといえる.

今回の実験では, Lambertian モデル, Torrance-Sparrow モデル, Daubechies ウェーブレット, を用いて十分満足のいく結果が得られた. しかし, 現在, より精度の高い反射モデルやウェーブレットが提案されているので, それらを採用することも今後, 検討していきたい. また, 今回, 物体を一方向のみに回転させてサンプリングを行ったが, 今後, 視点を二方向に回転し, 光源を二方向に回転してサンプリングを行うことを考えている. また, 円偏光板と直線偏光板にはそれぞれ長所と短所があるので, それらを組み合わせて, 効果的な反射成分分離方法を見いだすことも重要であろう.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省「知的資産の電子的な保存・活用を支援するソフトウェア基盤技術の構築」事業の助成により行われた. アライメントには大石岳史らのソフトウェア [7] を使用した. マージングには佐川立昌らのソフトウェア [8] を使用した. カメラキャリブレーションには運天弘樹, 大久保亮, および富士通株式会社のソフトウェアを使用した. なお, カメラキャリブレーションには阪野貴彦および川上玲の協力を頂いた. また, 研究に関して猪狩壮文および川上玲から多数の助言を頂い

た. 記して謝意を表す.

## 参考文献

- [1] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press, London, 1959.
- [2] I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1992.
- [3] R. Furukawa, H. Kawasaki, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi, "Appearance based object modeling using texture database: acquisition compression and rendering," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 257–266, 2002.
- [4] W. Ma, S. Chao, Y. Chuang, C. Chang, B. Chen, and M. Ouhyoung, "Level-of-detail representation of bidirectional texture functions for real-time rendering," *Proc. Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pp. 187–194, 2005.
- [5] K. Nishino, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Eigen-texture method: appearance compression and synthesis based on a 3D model," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 23, pp. 1257–1265, 2001.
- [6] K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, "Determining reflectance parameters and illumination distribution from a sparse set of images for view-dependent image synthesis," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, vol. 1, pp. 599–606, 2001.
- [7] T. Oishi, A. Nakazawa, R. Kurazume, and K. Ikeuchi, "Fast simultaneous alignment of multiple range images using index images," *Proc.*



- Int'l Conf. 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 476–483, 2005.
- [8] R. Sagawa, K. Nishino, and K. Ikeuchi, “Adaptively merging large-scale range data with reflectance properties,” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, no. 3, pp. 392–405, 2005.
  - [9] Y. Sato, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation,” *Proc. ACM SIGGRAPH 1997*, pp. 379–387, 1997.
  - [10] T. Shibata, T. Takahashi, D. Miyazaki, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Creating photorealistic virtual model with polarization based vision system,” *Proc. SPIE*, vol. 5888, pp. 25–35, 2005.
  - [11] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces,” *J. Optical Society of America*, vol. 57, no. 9, pp. 1105–1114, 1967.
  - [12] M.A.O. Vasilescu and D. Terzopoulos, “Tensor-textures: multilinear image-based rendering,” *ACM Trans. Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2004)*, vol. 23, no. 3, pp. 336–342, 2004.
  - [13] H. Wang, Q. Wu, L. Shi, Y. Yu, N. Ahuja, “Out-of-core tensor approximation of multi-dimensional matrices of visual data,” *ACM Trans. Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2005)*, vol. 24, no. 3, pp. 527–535, 2005.