

宮崎大輔, 柴田卓司, 池内克史,  
"Wavelet-Texture法 : Daubechiesウェーブレットとパラメトリック反射モデルと円偏光板によるBTF圧縮,"  
電子情報通信学会論文誌D-II,  
vol. J90-D, no. 8, pp. 2081-2093, 2007.8



## Wavelet-Texture 法：Daubechies ウェーブレットとパラメトリック反射モデルと円偏光板による BTF 圧縮

宮崎 大輔<sup>†</sup>      柴田 卓司<sup>†</sup>      池内 克史<sup>†</sup>

Wavelet-Texture Method: BTF Compression by using Daubechies Wavelet, Parametric Reflection Model, and Circular Polarizer

Daisuke MIYAZAKI<sup>†</sup>, Takushi SHIBATA<sup>†</sup>, and Katsushi IKEUCHI<sup>†</sup>

あらかし 写実的な仮想現実感モデルを生成するためには、視線方向や光源状況によって変化する物体の見えを記録する必要がある。本論文では、写実的な画像をレンダリングするためのデータを圧縮する手法を提案する。まず、物体の三次元形状をレーザレンジセンサで取得する。次に、物体の画像を円偏光板により拡散反射成分と鏡面反射成分に分ける。続いて、それぞれの反射成分に対して反射モデルのパラメータを推定する。最後に、入力画像とレンダリング画像の差分をウェーブレット変換により圧縮する。レンダリング時には、まず反射パラメータから拡散反射画像と鏡面反射画像を計算し、その計算された反射画像にウェーブレット逆変換により展開された差分を加えることにより、物体の写実的な画像を得る。

キーワード Daubechies ウェーブレット, 円偏光, Torrance-Sparrow モデル, BTF, 画像圧縮, 仮想現実感モデル

### 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、現実感の高い三次元物体画像の生成技法に対する需要が増えている。本研究では、写実的な三次元物体画像を生成するための、物体の見えを構成する明るさ情報の圧縮手法を提案する。

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、その式の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生成している。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反射モデルのパラメータを推定し、画像を生成した [16]。Nishino らは、視点の違いにより分離した反射成分から反射モデルのパラメータと光源環境

を推定した [12]。また、Shibata らは、パラメータ推定に先立ち、カメラと光源の前に直線偏光板を配し、偏光を解析してロバストに反射成分の分離を行った [17]。この他にも多数の研究が発表されており、本論文ではこのような手法をモデルベーステクスチャ法と呼ぶ。

また、別のアプローチに、実画像に基づく方法があり、本論文ではそれをイメージベーステクスチャ法と呼ぶ。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く、データベースからテクスチャを取り出すことにより生成する手法である。モデルベーステクスチャ法には、パラメトリック反射モデルが適用できる物体に制約があるという問題点があるが、イメージベーステクスチャ法には、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という利点がある。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ふ。Nishino らによる固有テクスチャ法 [11] は、複数枚の入力画像を三次元幾何モデルのそれぞれの面に対して主成分分析で圧縮してデータ量を削減し、レンダリングを行う手法である。Furukawa らは、幾何モデルのそれぞれの面

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所, 東京  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba 4-6-1,  
Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

表 1 他手法との比較 .

Table 1 Comparison between other methods.

	Representation	Diffuse	Specular	Separation
Nishino (Eigen Texture [11])	Principal component analysis (KL expansion)			
Furukawa [3]	Tensor product expansion			
Vasilescu (Tensor Texture [20])	N-mode singular value decomposition			
Wang [21]	Out-of-core tensor approximation			
Magnor [9]	Wavelet transform			
Ma [7]	Laplace transform	Lambertian	Phong	
Nishino [12]		Lambertian	Torrance-Sparrow	Viewpoint
Sato [16]		Lambertian	Torrance-Sparrow	Color
Shibata [17]		Lambertian	Torrance-Sparrow	Linear polarization
Proposed method (Wavelet Texture)	Wavelet transform	Lambertian	Torrance-Sparrow	Circular polarization

に対応する画像データベースをテンソル積展開により圧縮し、レンダリングを行った [3]. Vasilescu らによるテンソルテクスチャ法 [20] は、画像データベースに対して N モード特異値分解を行い、レンダリングを行う手法である。Wang らは、N モード特異値分解の代わりに out-of-core テンソル近似を用いた [21]。Ma らは、幾何モデルの面ごとの画像をラプラス変換により表現し、画像合成を行った [7]。Magnor らは、ウェーブレット変換によりテクスチャを圧縮し、画像合成を行った [9]。

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いので、十分な圧縮ができない。ラプラス変換とウェーブレット変換は基底がそれぞれ指数関数と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。ウェーブレットを用いた研究は近年盛んに行われており、イメージベースライティング [10] やイメージベースレンダリング [5], [6], [14] にも応用されている。

本論文は、写実的なレンダリングをおこなうためのデータ圧縮を目的とする。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、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 モデルより写実的な Torrance-Sparrow モデルを用いている。ここまではモデルベーステクスチャ

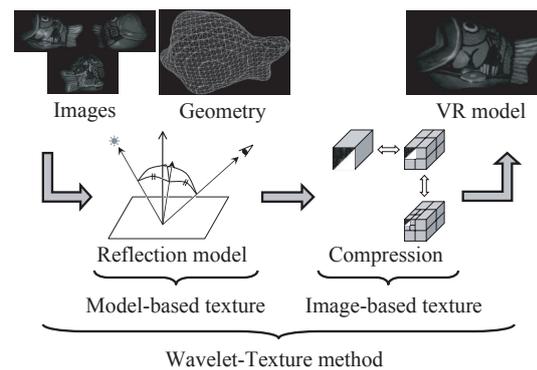


図 1 アルゴリズムの概要 .  
Fig. 1 Algorithm overview.

法のアプローチと同様である。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、つねに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。この部分はイメージベーステクスチャ法の概念を踏襲しており、提案手法は効果的に両手法の特徴を取り入れた手法となっている。このように、モデルベーステクスチャ法とイメージベーステクスチャ法の両者を取り入れた手法としては、提案手法のほかに Ma らの手法がある [7]。Ma らの手法は、ラプラス変換による多重解像度解析を行い、一番解像度の低い直流成分を反射モデルで表現するが、提案手法は、入力データと反射モデルでレンダリングしたデータの差分を圧縮する、という違いがある。今後さらに高精度な圧縮手法が開発され、それが多重解像度解析のできない手法であっても、提案手法に取り入れることができるような柔軟性

を重視して、このようなアプローチを採った。この、反射モデルでレンダリングしたデータと入力データの差分を圧縮する、というアイデアが提案手法の核となる部分である。

提案するアルゴリズムの概要を記す(図1)。まず、レーザレンジセンサにより対象物体を計測する。これにより物体の3次元座標が求まる。物体の表面は3点の3次元座標を結んだ三角形で表す。つづいて、物体を回転させて複数方向から撮影する。例えば、 $10^\circ$  おきに  $360^\circ$ 、36 方向から撮影を行う。画像は偏光板を用いて拡散反射成分と鏡面反射成分に分離する。幾何データの座標系とカメラ座標系は異なるので、幾何データに変換行列をかけて、画像と幾何データを対応付ける。なお、変換行列は、幾何データと画像の対応点を指定して求める。幾何データと画像データから反射モデルのパラメータを推定する。画像の撮影時と同じ視点で、反射モデルによるレンダリングを行う。そのレンダリング画像と入力画像の差分を計算する。ひとつの三角形で拡散反射成分の差分を、例えば 36 枚並べたものをウェーブレット変換で圧縮する。鏡面反射成分も同様に行う。本論文では、提案手法をウェーブレットテクスチャ法と呼ぶ。

本手法では以下の条件を仮定する。

- (1) 対象物体が二色性反射モデルに従う。
- (2) 入力データとして、点光源とカメラの位置が同じであるような条件のもとで計測した画像データを用いる。これは、本論文では円偏光板を使っているからであり、直線偏光板を使う場合はこの問題を回避できる。
- (3) レンダリングしたい視点に近い視点から物体を撮影する。本論文に載せた実験では物体を一方方向に回転させて撮影しているので、その方向にある視点の画像しか生成できない。全ての方向(二方向)に物体を回転させて撮影すれば、この問題は回避できる。
- (4) ある光源下の画像を生成したいとき、その光源下で物体を撮影する。本論文に載せた実験では光源を固定して撮影しているので、その点光源下の画像しか生成できない。全ての方向(二方向)に光源を回転させて撮影すれば、この問題は回避できる。

また、以下の条件は必須ではないが、データ量を小さくして画質を向上させるためにできるだけ考慮したい。

- (1) 拡散反射が Lambertian モデルでうまく近似できる。
- (2) 鏡面反射が Torrance-Sparrow モデルでうまく

近似できる。

- (3) 物体表面上の近傍点は反射パラメータの値が似ている。

- (4) 物体に相互反射が発生しない。

以上の条件が満たされていなくとも、差分情報を用いて表現することが可能である。

以降の章立ては次の通りである。2. 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 3. 章で述べる。4. 章ではウェーブレットによる圧縮に基づいた提案手法の内容を述べる。5. 章で実験結果を示し、6. 章で本論文をまとめる。

## 2. 反射成分分離

### 2.1 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、一般的に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、三原色を表す添え字“ $c$ ”を省略して記す。

### 2.2 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。一般的な方法で撮像した画像はこの両成分を含むが、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2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。

物体を撮像するカメラの前と光源の前にそれぞれ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光である。一方、

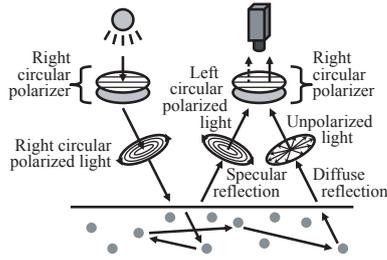


図2 円偏光板による反射成分の分離 .  
Fig.2 Reflection component separation by circular polarizer.

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  $I_{off}$ 、円偏光板を設置してカメラによって観測された輝度を  $I_{on}$ 、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、 $I_{on}$  と  $I_{off}$  は

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

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

つまり、拡散反射成分  $I_d$  と鏡面反射成分  $I_s$  は以下のようなになる。

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

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

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。この補正方法については付録 1. で述べる。

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  $90^\circ$  に近づくにつれ、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、それが誤差を生む。円偏光板では部分的に直線偏光された拡散反射成分も完全に透過し、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

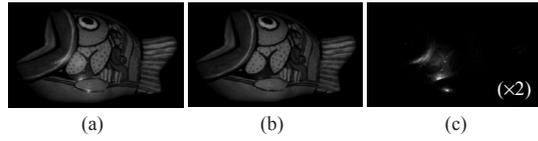


図3 反射成分分離結果：(a) 通常の画像，(b) 拡散反射成分画像，(c) 鏡面反射成分画像 .

Fig.3 Result of reflection component separation: (a) Ordinary image, (b) Diffuse component image, (c) Specular component image.

いう欠点や、光源方向と視線方向がほぼ同じでないと分離できないという問題もある。しかし、上述した利点や、直線偏光板のように回転させる必要がないので回転に伴う誤差が生じないことを勘案して、本論文では円偏光板を用いた。本論文で示す実験では、光源方向と視線方向がほぼ同じであるように配置しているため、反射成分は問題なく分離が可能である。

図3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、図中で“(×n)”とあるのは、明るさを実際の  $n$  倍にして記載していることを表し、以降でも同様である。

### 3. 反射パラメータ推定

#### 3.1 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4)。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、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。この重み付けにより、正面を向いている面ほど重要であるとして反射パラメータが推

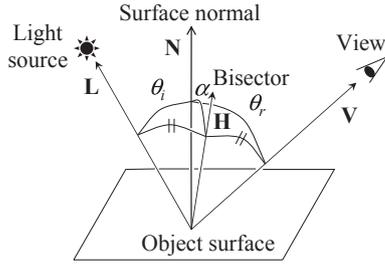


図4 入射光，法線方向，視線方向の関係．  
Fig. 4 Relationship between incident light, surface normal direction, and view direction.

定される．

今回の実装では相互反射を考慮せずに Lambertian モデルを用いた．Lambertian モデルよりも高精度の反射モデルを用いてもよいし，相互反射を計算してもよい．今回の実験では，差分画像のウェーブレット圧縮の効果を調べるため，反射モデルは精査しなかった．

### 3.2 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 [18] 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 4)．なお， $K_s$  には光源の情報のほか，フレネル係数と幾何減衰関数も含まれている．ただし，フレネル係数と幾何減衰関数は定数として近似した．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を二等分す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．

今回の実装では相互反射を考慮せずに Torrance-Sparrow モデルを用いた．Torrance-Sparrow モデルよりも高精度の反射モデルを用いてもよいし，相互反射 [8] を計算してもよい．今回の実験では，差分画像のウェーブレット圧縮の効果を調べるため，反射モデルは精査しなかった．

## 4. ウェーブレットテクスチャ法

### 4.1 提案手法

反射モデルには相互反射を考慮していないことや，物体表面が等方的に粗い微小面で構成されている必要がある等の条件があるため，反射モデルによるレンダリング画像と実画像との間には差がある．また，そのような光学的要因のほかに，幾何データの精度やカメラキャリブレーションの精度などの幾何学的要因も誤差を生む．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プローチである．この情報とは，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のことである．しかしこの多数枚の差分画像は情報量が大きいためデータの圧縮を行う．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．

物体を回転させて観測した視点の数を  $M$  とする．例えば， $10^\circ$  おきに物体を  $360^\circ$  回転させた場合， $M$  は 36 となる．このとき，物体は点光源一つである方向から照らす．光源の輝度は  $M$  回の撮影を通して全て同じに設定する．点光源の位置は既知とする．本論文ではカメラの近くに光源を配置する．2. 節で示した手法により反射成分を分離し，拡散反射成分画像  $M$  枚と鏡面反射成分画像  $M$  枚を得る．入力となる拡散反射成分画像  $M$  枚と幾何データの対応付けを行い，画像を幾何データの三角形の面ごとに抽出する (図 5(a))．鏡面反射成分画像  $M$  枚に対しても同様に処理する．3. 節で示した手法により，幾何データと拡散反射画像  $M$  枚から拡散反射パラメータを推定し，幾何データと鏡面反射成分画像  $M$  枚から鏡面反射パラメータを

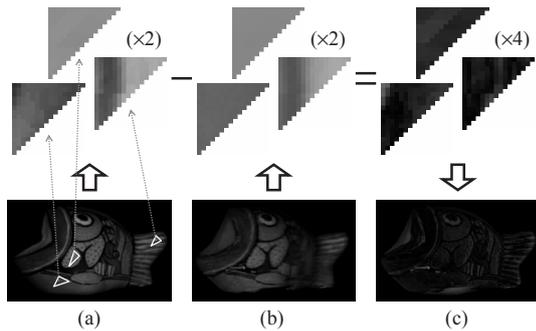


図5 三角形の面ごとの差分の計算: (a) 入力とする拡散反射画像, (b) 反射モデルにより計算された拡散反射画像, (c) 拡散反射成分の差分画像.

Fig. 5 Calculating the difference for each triangle faces: (a) Input diffuse image, (b) calculated diffuse image by reflection model, (c) difference image of diffuse component.

推定する．推定された拡散反射パラメータと幾何データを，撮影時と同じ位置に設定した光源のもとでの画像をレンダリングし，幾何データの三角形の面ごとに抽出する（図 5(b)）．鏡面反射パラメータについても同様に処理する．三角形ごとに，入力の拡散反射の輝度と拡散反射パラメータで生成した画像の輝度との差を計算したものを差分画像とする（図 5(c)）．この操作を入力画像の枚数分を行い，差分画像列を得る．すなわち，差分画像は拡散反射に対して  $M$  枚，鏡面反射に対して  $M$  枚作成される．厳密には，幾何データの三角形の数を  $W$  としたとき，三角形の形をした差分画像が，拡散反射に対して  $W \times M$  枚，鏡面反射に対して  $W \times M$  枚作成される．なお，図 5(c) では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．提案手法では三角形の面ごとに作成された差分画像列に対して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，本論文では Daubechies ウェーブレット ( $N^{\text{注1}}=2$ ) を用いる．まず，幾何データの三角形の面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

(注1):  $N$  は Daubechies ウェーブレット特有の表現であり，ウェーブレットの形を表す値である [2]

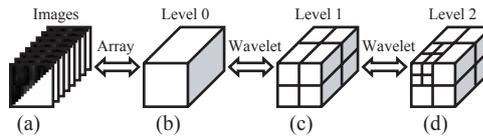


図6 三角形の面ごとの画像圧縮: (a) 三角形の面ごとの差分画像列, (b) 三次元データとして配置された差分画像列, (c) 分解後の 8 つの成分, (d) さらに 8 つに分解した図.

Fig. 6 Image compression for each triangle faces: (a) Sequence of difference images for each triangle faces, (b) difference image sequence aligned as 3D data, (c) eight elements after decomposition, (d) further decomposition result.

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）を絶対値の大きいもの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 6 に示す．

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．すなわち，この差分画像補完を行えば，相互反射や異方性反射も表現することができる．また，幾何データやカメラキャリブレーションで発生する誤差を吸収することができる．

#### 4.2 差分画像

この章では，差分画像の周波数解析を通して，差分画像の圧縮方法としてウェーブレット変換がフーリエ変換よりも妥当であるかどうかを議論する．差分画像の周波数解析の結果を図 7(c) に示す．比較のため，入力画像と，反射モデルによるレンダリング画像，の周波数解析の結果を図 7(a)(b) に示す．

図 7(c) は差分成分を表すので，全体的に図 7(a)(b) よりも振幅が小さくなっている．低周波成分も小さくなっていることが分かるが，依然として低周波成分のほうが高周波成分よりも大きい．また，図 7(a) にあり，図 7(b) にない高周波成分が，図 7(c) に現れている．差分画像に出現したこの高周波成分は入力画像にも大きな値として出現しているので，重要な要素であることが分かる．このため，高周波成分を除去することにより圧縮を行うフーリエ変換による圧縮よりも，

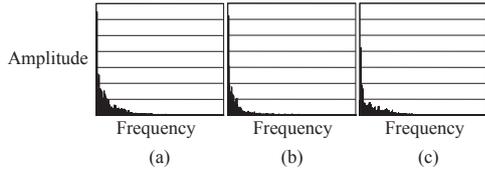


図7 周波数解析：(横軸)周波数(縦軸)振幅；(a)入力拡散反射画像，(b)反射モデルによる拡散反射レンダリング画像，(c)差分拡散反射画像．

Fig. 7 Frequency analysis: (horizontal axis) frequency, (vertical axis) amplitude; (a) input diffuse reflection image, (b) rendered image by diffuse reflection model, (c) difference diffuse reflection image.

低周波成分が高周波成分に関わらず重要な情報(とアルゴリズムが判断した情報，すなわち展開係数の絶対値が大きい値)のみを選び出すことにより圧縮を行うウェーブレット変換による圧縮のほうがレンダリング画像の品質が向上することが分かる．

### 4.3 レンダリング方法

#### 4.3.1 反射モデルによるレンダリング

光源環境を離散化した場合，任意の光源環境は，点光源  $L_j$  (輝度と光源の面積を含む) の集合で表現できる．また，入力画像を撮影したときの点光源  $L$  (輝度と光源の面積を含む) は既知とする．このとき，反射モデルによるレンダリングは，以下の計算式で，任意の光源環境下の見えを再現することができる．

$$I_{\text{reflect}} = I_d + I_s \quad (12)$$

$$I_d = \sum_j \frac{L_j}{L} K_d \cos \theta_{i,j} \quad (13)$$

$$I_s = \sum_j \frac{L_j}{L} \frac{K_s}{\cos \theta_{r,j}} \exp\left(-\frac{\alpha_j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

輝度に関する再現性が要求されない場面では，入力画像を撮影したときの点光源の色だけ既知とすればよい．

#### 4.3.2 差分画像のレンダリング

入力画像を撮影して得られた差分画像を圧縮した画像  $\hat{I}_{\text{compress}}$  からレンダリングに必要な差分画像  $I_{\text{compress}}$  を求めるのは同様にして以下のように計算する．

$$I_{\text{compress}} = \sum_j \frac{L_j}{L} (\hat{I}_{d,\text{compress},j} + \hat{I}_{s,\text{compress},j}) \quad (15)$$

ただし，圧縮した画像  $\hat{I}_{\text{compress}}$  のもとになった差分画像は，レンダリングしたい視点で入力画像を撮影して得られた差分画像である．

#### 4.3.3 任意視点・任意光源下でのレンダリング

レンダリングしたい視点・光源下で入力画像が撮影されていれば，最終的にレンダリングしたい画像  $I$  は以下のように計算される．

$$I = I_{\text{reflect}} + I_{\text{compress}} \quad (16)$$

本論文での実験では，視点を一方向に変えて入力画像を撮影しているため，もう一方向に視点を換えることはできない．視点をもう一方向に変えて入力画像を撮影すれば，この問題は回避でき，任意の視点の画像を生成できる．また，本論文での実験では，光源を固定して入力画像を撮影しているため，光源を変えた画像を生成することはできない．光源を二方向に変えて入力画像を撮影すれば，この問題は回避でき，任意の光源環境下の画像を生成できる．今後は，任意視点画像，任意光源環境下の画像を生成するためのデータを取得する予定である．

リアリティを高めるためにはサンプリングを密に行う必要がある．任意の視点・光源下の画像を生成する際は，一番近いデータを使い，補間することで画像を生成する．補間は差分画像のレンダリングに必要であり，反射モデルによるレンダリングには不要である．差分画像のうち，拡散反射に関しては線形補間でも十分であるが，鏡面反射に関しては線形補間では不十分である．本論文では両者とも線形補間で実装している．差分情報は比較的小さいため，鏡面反射における線形補間の問題が目立つことはないが，より効果的な補間方法を実装することが望ましく，今後検討すべき重要な課題の一つである．

## 5. 実験

### 5.1 データ取得

本論文では，図8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，RGBのカラーカメラ，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．今回の実験では，視点の変化に対するレンダリング結果を確かめるため，カメラと光源を固定して，物体を一方向に回転させた．また，それぞれの回転角ごとにカラーカメラ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．一つはカラーカメラ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．以降の実験では，物体を  $10^\circ$

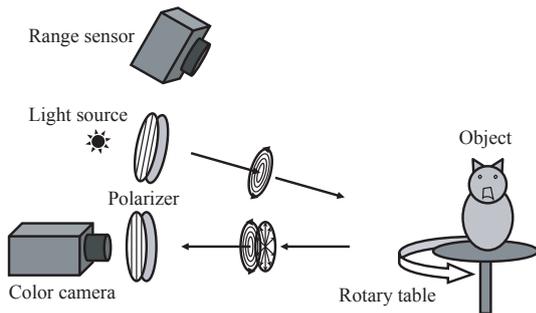


図8 データ取得システム .  
Fig. 8 Data capturing system.

おきに回転させ、 $360^\circ$  までの  $36 \times 2 = 72$  枚の画像を入力画像として取得した。

### 5.2 モデルベーステクスチャ法との比較

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手法(モデルベーステクスチャ法)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(ウェーブレットテクスチャ法)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))。なお、モデルベーステクスチャ法は3.節に概略の説明があり、Shibataら[17]の手法とほぼ同じだが反射成分の分離が直線偏光板ではなく円偏光板を用いているという違いがある。

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。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。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(圧縮率1.5%)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。

### 5.3 圧縮率の違いによる比較

本論文では、画像の品質はPSNR (peak signal-to-noise ratio) で表す。PSNRの単位はdB (デシベル) 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

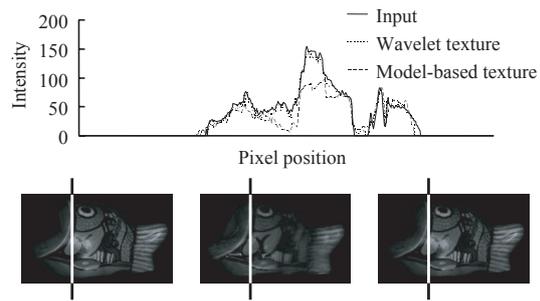


図10 輝度の比較:(横軸)画素の位置(縦軸)輝度;(直線)入力画像(点線)ウェーブレットテクスチャ法によるレンダリング画像(圧縮率1.5%)(破線)モデルベーステクスチャ法によるレンダリング画像。

Fig. 10 Comparison of intensity: (horizontal axis) pixel position, (vertical axis) intensity; (solid line) input image, (dotted line) rendered image by Wavelet Texture method (compression ratio 1.5%), (dashed line) rendered image by Model-Based Texture method.

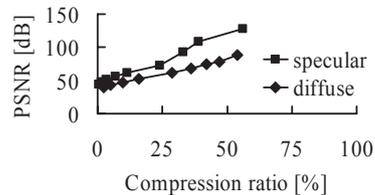


図11 圧縮率とレンダリング画像の品質:(正方形)鏡面反射画像のPSNR(菱形)拡散反射画像のPSNR。  
Fig. 11 Compression ratio and quality of rendered image: (square) PSNR of specular image, (diamond) PSNR of diffuse image.

分のウェーブレット展開係数の使用比率(圧縮率)とレンダリング画像の品質(PSNR)との相関関係を図11に示す。このグラフより、圧縮率が50%以上の場合には画質は80dB以上となることがわかる。また、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。

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、つまり圧縮率100%の非圧縮画像である。図12(b)は圧縮率5%のレンダリング画像だが、見た目には劣化が確認されない。この場合のPSNRは拡散反射成分、鏡面反射成分共に40dB以上である。圧縮率を下げていき、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、品質的に問題がでてくる。反射モデルによるレンダリングは圧縮率が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ルだけによ

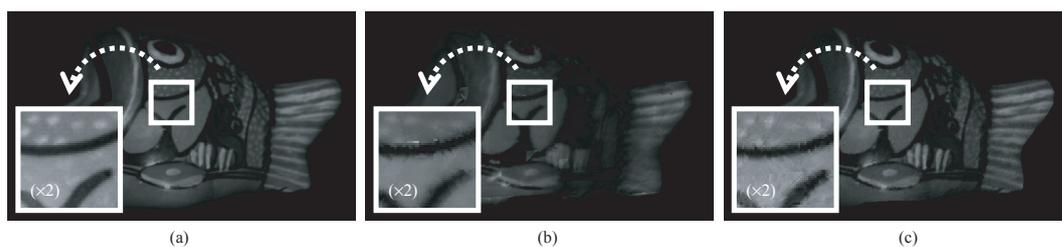


図 9 結果: (a) 通常の画像, (b) モデルベーステクスチャ法によるレンダリング結果, (c) ウェーブレットテクスチャ法によるレンダリング結果 (5%) .

Fig. 9 Result: (a) Ordinary image, (b) rendered result by Model-Based Texture method, (c) rendered result by Wavelet Texture method (5%) .

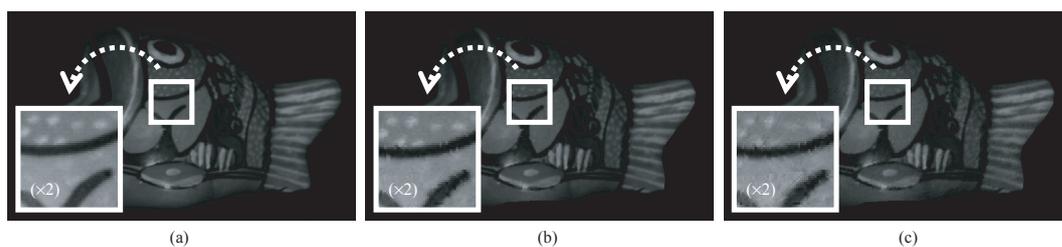


図 12 圧縮率ごとのレンダリング画像: (a) 通常の画像, (b) 圧縮率 5% の画像, (c) 圧縮率 1.5% の画像 .

Fig. 12 Rendered image for each compression ratio: (a) Ordinary image, (b) image of compression ratio, 5% , (c) image of compression ratio, 1.5% .

るレンダリングより画質が高いことが分かる .

#### 5.4 イメージベーステクスチャ法との比較

固有テクスチャ法 [11] 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 (イメージベーステクスチャ法) との比較実験を行った . その結果を図 13 に示す . 図 13(a) は比較のための入力画像である . 図 13(b)(c) がイメージベーステクスチャ法 (圧縮率 2.4%) の結果であり, 図 13(d)(e) が提案手法 (圧縮率 2.4%) の結果である . ここで用いたイメージベーステクスチャ法としては, 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 . 公平な比較を行うため, 固有テクスチャ法 [11] における主成分分析の代わりにウェーブレットを用いた . 図 13(b)(d) がレンダリング結果であり, 図 13(c)(e) がレンダリング画像と入力画像との間の誤差を表す . 提案手法の PSNR は 48dB, イメージベーステクスチャ法の PSNR は 47dB であり, 提案手法のほうが画質が高い . イメージベーステクスチャ法の結果では提案手法と比べて幾何データのそれぞれの面の境界部分でノイズが強く現れている . 提案手法では反射モデルも使用して画像の再構成を行っているため, 同じ圧縮率で

も, イメージベーステクスチャ法よりも高い画質で画像を再現することができる .

#### 5.5 静止画の圧縮方法との比較

JPEG 2000 では Le Gall ウェーブレットと Daubechies ウェーブレットが採用されており, Le Gall ウェーブレットよりも Daubechies ウェーブレットのほうが圧縮効率が良い . この章では, JPEG 2000 のような静止画の圧縮手法との比較実験を行う . 提案手法および 5.4 節のイメージベーステクスチャ法では, 幾何データの三角形の面ごとに画像列を三次元ウェーブレット変換で圧縮を行っている . これは, 複数方向から取得した二次元の画像を順番に並べた物を三次元のデータと見なして処理を行っている . これを, 二次元の画像それぞれを二次元ウェーブレット変換で圧縮したものと比較する . これを便宜上, 静止画圧縮手法と呼び, JPEG 2000 と同様に二次元 Daubechies ウェーブレットで圧縮する . 静止画圧縮手法では反射モデルを使用しないで実装しているため, 公平な比較のため, 提案手法ではなくイメージベーステクスチャ法と比較する . また, 公平な比較のため, 三角形の面ごとに同じ Daubechies ウェーブレットで圧縮を行う .

その結果を図 14 に示す . 図 14(a) は比較のための

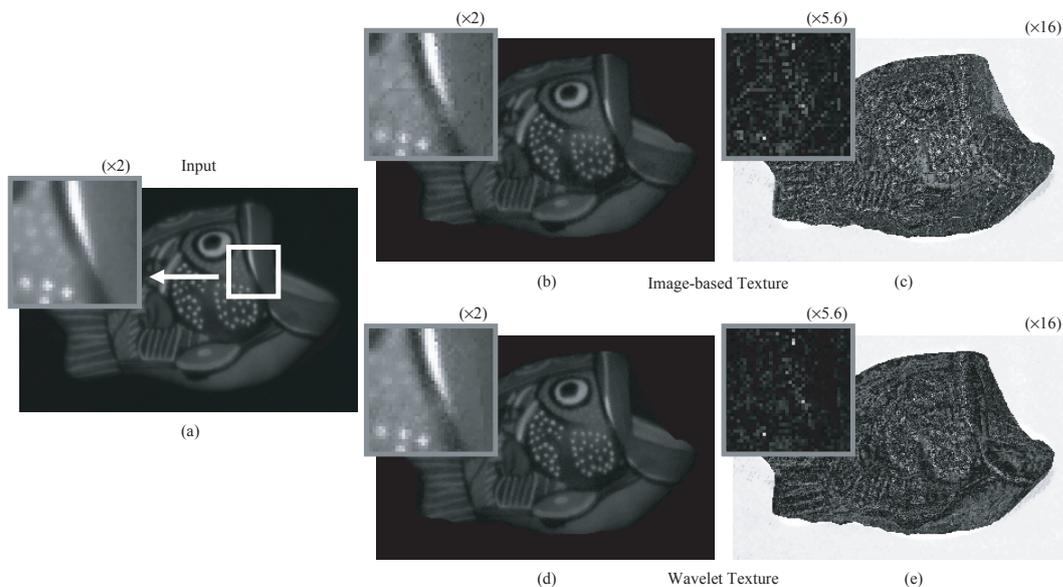


図 13 イメージベーステクスチャ法と提案手法との比較：(a) 入力画像，(b)(c) イメージベーステクスチャ法の結果（圧縮率 2.4%），(d)(e) ウェーブレットテクスチャ法の結果（圧縮率 2.4%），(b)(d) レンダリング結果，(c)(e) レンダリング画像と入力画像との差分。

Fig. 13 Comparison between Image-Based Texture method and proposed method: (a) Input image, (b)(c) result of Image-Based Texture method (compression ratio 2.4%), (d)(e) result of proposed method (compression ratio 2.4%), (b)(d) rendered result, (c)(e) difference between rendered image and input image.

入力画像である．図 14(b) が静止画圧縮手法（圧縮率 2.1%）の結果であり，図 14(c) がイメージベーステクスチャ法（圧縮率 2.1%）の結果である．静止画圧縮手法の PSNR はわずか 27dB，イメージベーステクスチャ法の PSNR は 43dB であり，イメージベーステクスチャ法のほうが画質が圧倒的に高い．5.4 章にてイメージベーステクスチャ法よりも提案手法のほうが画質が高いことが示されているため，静止画圧縮手法よりも提案手法のほうが画質が高いことが分かる．画像列を三次元データとして圧縮する際は隣り合った画像の情報も利用できるため効率的に圧縮できるが，画像を一枚ずつ圧縮する場合はそれぞれの画像を独立に圧縮するため効率が悪くなる．

## 6. む す び

本論文では現実物体の写実的なレンダリングを行うためのデータ圧縮方法を提案した．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，そして，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も表現でき，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，本論文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であるといえる．また，文化遺産のデジタル化においても提案手法は有効である．例えばカンボジアのピヨン寺院のデジタルデータ [4] は 4GB をはるかに超えるデータ量であり，少ないデータ量で取得データと区別がつかないようなデータを保存することが重要な課題となっている．

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，圧縮率 2% で 40dB の高画質を実現できた．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おり，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ており，光源を固定したとき

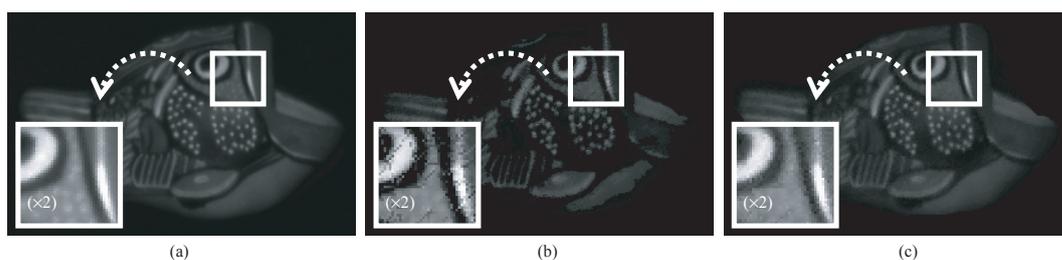


図 14 静止画圧縮手法とイメージベーステクスチャ法との比較：(a) 入力画像，(b) 静止画圧縮手法の結果（圧縮率 2.1%），(c) イメージベーステクスチャ法の結果（圧縮率 2.1%）。

Fig. 14 Comparison between image compression method and Image-Based Texture method: (a) Input image, (b) result of image compression method (compression ratio 2.1%), (c) result of Image-Based Texture method (compression ratio 2.1%).

の任意の視点での画像の生成結果を示した。任意の視点と任意の光源環境下での画像を生成するためには、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必要があり、現在検討中である。なお、円偏光板による反射成分の分離法は視点と光源が近いときにしか効果がないので、円偏光板と直線偏光板を組み合わせた効果的な反射成分分離方法も考案中である。

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。アラインメントには大石岳史らのソフトウェア [13] を使用した。マーキングには佐川立昌らのソフトウェア [15] を使用した。カメラキャリブレーション [19] には倉爪亮，運天弘樹，大久保亮，富士通株式会社，および阪野貴彦のソフトウェアを使用した。法線の計算には，倉爪亮，大久保亮，肥後智昭，および著者の一人宮崎大輔のソフトウェアを使用した。反射パラメータの計算には，高橋徹，佐藤洋一，および著者の一人宮崎大輔のソフトウェア [17] を使用した。これらのソフトウェアの一部に Mark D. Wheeler ほか数名の作成したソースコードを使用した。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。

## 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: acquisi-

tion compression and rendering," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 257–266, 2002.

- [4] K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi, and T. Masuda, "Bayon digital archival project," *Proc. Int'l Conf. Virtual Systems and MultiMedia*, pp. 334–343, 2004.
- [5] P. Lalonde and A. Fournier, "Interactive rendering of wavelet projected light fields," *Proc. Graphics Interface*, pp. 107–114, 1999.
- [6] J. Li, H.Y. Shum, and Y.Q. Zhang, "On the compression of image based rendering scene: a comparison among block, reference and wavelet coders," *Int'l J. Image and Graphics*, vol. 1, no. 1, pp. 45–61, 2001.
- [7] W.C. Ma, S.H. Chao, Y.T. Tseng, Y.Y. Chuang, C.F. Chang, B.Y. 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.
- [8] T. Machida, N. Yokoya, and H. Takemura, "Surface reflectance modeling of real objects with interreflections for augmented virtuality," *Color Research & Application*, vol. 31, no. 1, pp. 38–47, 2005.
- [9] M. Magnor, P. Ramanathan, and B. Girod, "Multi-view coding for image-based rendering using 3-D scene geometry," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 11, pp. 1092–1106, 2003.
- [10] R. Ng, R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, "All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation," *ACM Trans. Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2003)*, vol. 22, no. 3, pp. 376–381, 2003.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] I. Peter and W. Staßer, "The wavelet stream: interactive multi resolution light field rendering," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 127–138, 2001.
- [15] 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.
- [16] Y. Sato, M.D. Wheeler, K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation," *Proc. ACM SIGGRAPH 1997*, pp. 379–387, 1997.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] R.Y. Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 364–374, 1986.
- [20] M.A.O. Vasilescu and D. Terzopoulos, "Tensortextures: multilinear image-based rendering," *ACM Trans. Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2004)*, vol. 23, no. 3, pp. 336–342, 2004.
- [21] 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.

## 付 録

### 1. 輝度値の補正

標準白色拡散板を観測した場合を考えよう．円偏光板を設置せずにカメラによって実際に観測された輝度を  $\hat{I}_{\text{off}}$ ，円偏光板を設置してカメラによって実際に観測された輝度を  $\hat{I}_{\text{on}}$  とする．対象物体は拡散反射しか発生しないため，式 (5) の  $I_s$  は 0 となるべきである．すなわち，以下の式を満たす  $\beta$  を求めればよい．

$$\hat{I}_{\text{on}} = \beta \hat{I}_{\text{off}} \quad (\text{A.1})$$

これは以下の式から求めることができる．

$$\beta = \frac{\hat{I}_{\text{on}}}{\hat{I}_{\text{off}}} \quad (\text{A.2})$$

次に物体を観測したときを考える．ここで，カメラの輝度調整は先ほどと同じ設定にしておく．円偏光板を設置せずにカメラによって実際に観測された輝度を  $\tilde{I}_{\text{off}}$ ，円偏光板を設置してカメラによって実際に観測された輝度を  $\tilde{I}_{\text{on}}$  とする．2.2 節で示した分離方法に使用するための輝度  $I_{\text{off}}$  と  $I_{\text{on}}$  との関係は以下のように定義できる．

$$I_{\text{off}} = \tilde{I}_{\text{off}} \quad (\text{A.3})$$

$$I_{\text{on}} = \frac{1}{\beta} \tilde{I}_{\text{on}} \quad (\text{A.4})$$

なお，本論文の全ての実験では，撮影された画像の輝度は飽和 (saturation) しないように取得した．

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

### 宮崎 大輔



2000 年東京大学理学部情報科学科卒業．2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程修了．情報理工学博士．日本学術振興会特別研究員を経て，2006 年度より東京大学生産技術研究所特任助手．物理ベースビジョン（特に偏光解析と色解析）の研究に従事．VSMM-00 論文賞受賞．ACCV-06 プログラム委員，ACCV-07 技術サポートスタッフ．情報処理学会，ACM，IEEE 各会員．

### 柴田 卓司



2004 年東京工業大学工学部情報工学科卒業．2006 年東京大学情報理工学系研究科電子情報学専攻修士課程修了．情報理工学修士．2006 年度より株式会社 NTT データ正社員．画像圧縮（特にフーリエ変換とウェーブレット変換）の研究に従事．

### 池内 克史 (正員)



1973 年京都大学工学部機械工学科卒業．1978 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了．工学博士．MIT 人工知能研究所，電総研，CMU 計算科学部，東京大学生産技術研究所を経て，2000 年度より東京大学大学院情報学環教授．人間の視覚機能，明るさ解析，物体認識，人間による組立作業の自動認識，仮想現実感モデルの自動生成等の研究に従事．論文賞 (ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, 日本ロボット学会誌-97, IEEE R & A 誌-98, MIRU-00, 日本 VR 学会論文誌-00, VSMM-00, VSMM-04) 等受賞．IROS-95, ITSC-99 実行委員長，CVPR-96, ICCV-03 プログラム委員長等．IJCV 編集委員長，IEEE TPAMI，IEEE R & A 誌，CVGIP，JOSA 編集委員等．電子情報通信学会，情報処理学会，人工知能学会，日本ロボット学会，日本バーチャルリアリティ学会，OSA，IEEE 各会員，IEEE fellow．2000–2001 年 IEEE 信号処理学会 Distinguished Lecturer．2004–2006 年 IEEE コンピュータ学会 Distinguished Lecturer．

**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 to compress the data for rendering photorealistic images. First, we obtain the 3D shape of the object by laser range sensor. Next, 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 components. 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.

**Key words** Daubechies wavelet, circular polarization, Torrance-Sparrow model, BTF, image compression, VR model