

Wavelet-Texture 法 :

Daubechies ウェーブレットと反射モデルと円偏光板による BRDF 圧縮

0091

あらまし 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。本稿では、少ないデータから写実的な画像をレンダリングする手法を提案する。まず、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, BRDF, 画像圧縮, 仮想現実感モデル

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

0091

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.

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

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 [7]。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 [8]。

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ふ。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より圧縮し、レンダリングを行った [3]。Vasilescu らによる Tensor-Texture 法 [10] 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

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			
Furukawa [3]	テンソル積展開			
Vasilescu (Tensor-Texture [10])	N モード 特異値分解			
Wang [11]	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 [7]		Lambertian	Torrance-Sparrow	色
Shibata [8]		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

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 [11]。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。

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ついて説明し、それに基づいた提案手法の内容を 6. 章で述べる。7. 章で実験結果を示し、8. 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 1 のようなデータ取得システムを用いる。モデ

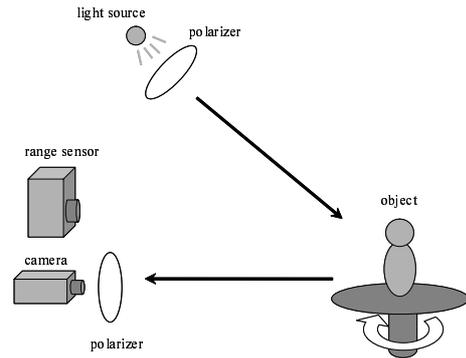


図 1 データ取得システム

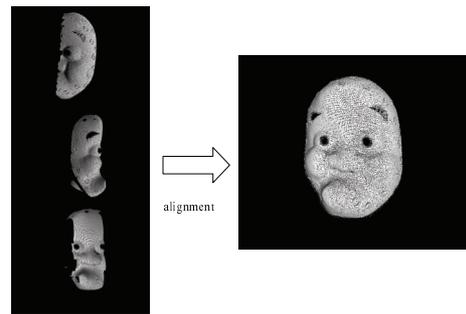


図 2 アラインメント

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。アラインメントの様子を図 2 に示す。

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ない。この操作をマージングといい、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。

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。

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。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 3 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円偏光となり透過する。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_{on} 、円偏光板を設置してカメラ

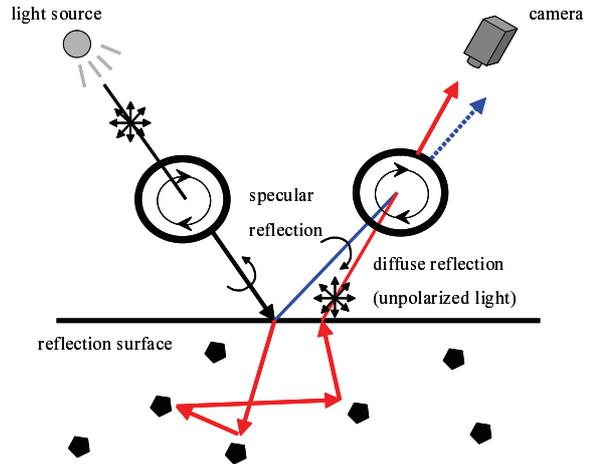


図 3 円偏光板による反射成分の分離

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。しかし視点が 90° に近い時、拡散反射成分は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。

上に挙げた通り、直線偏光板ではなく円偏光板を用いた場合、偏光板の透過軸に影響されないこと、視点が 90° 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 4 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、ここでは鏡面反射成分画像の明るさを 4 倍にしてある。

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。

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



original image



diffuse image



specular image

図4 拡散反射成分と鏡面反射成分

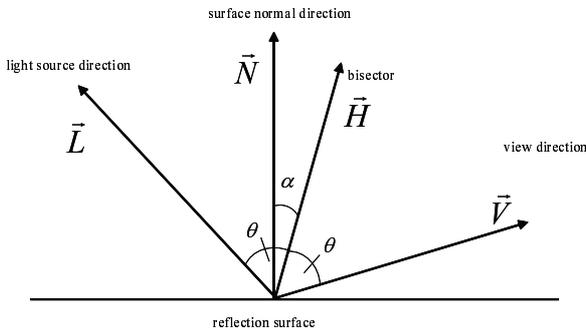


図5 入射光，法線方向，視線方向の関係

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

ここで、 I_d は拡散反射の放射輝度、 K_d は拡散反射パラメータ、 \vec{N} は物体表面の法線の単位ベクトル、 \vec{L} は光源方向の単位ベクトル、 θ_i は物体表面の法線と光源方向との間の角度を表す（図5）。

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 [9] 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。

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

ここで、 I_d は鏡面反射の放射輝度、 K_s は鏡面反射パラメータ、 σ は物体表面の粗さを表すパラメータ、 α は視線方向ベクトル

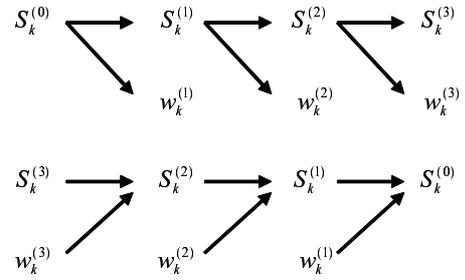


図6 信号の分解・再構成

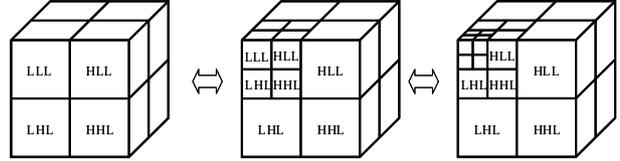


図7 三次元の多重解像度分解

と光源方向ベクトルの間の角度、 θ は入射角を表す。

推定すべき鏡面反射パラメータは $K_{s,R}$ 、 $K_{s,G}$ 、 $K_{s,B}$ 、 σ 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。

5. ウェーブレットによる圧縮

ウェーブレット変換とは、信号を空間的な周波数成分に変換する直交変換の一種であり、信号を有限の幅を持つウェーブレットの重ね合わせで表現するものである [2]。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、様々なものがあり、連続値をとる波形である。これを離散化した離散ウェーブレットによる変換を離散ウェーブレット変換という。離散ウェーブレット変換による信号の低周波成分と高周波成分への分割を繰り返し行う操作を多重解像度解析という（図6）。

多重解像度解析により信号を分解して、全ての展開係数を求めたとする。この展開係数を絶対値の大きい順に並べ、絶対値が大きい順に上位 $\alpha\%$ の展開係数のみを残したとする。この展開係数を使って再構成された信号は圧縮率 $\alpha\%$ で圧縮されたデータとなる。この圧縮は非可逆圧縮である。

ウェーブレット変換による情報圧縮を三次元信号、つまり画像列について行うことで三次元圧縮が可能となる（図7）。本稿の圧縮・再構成はこの三次元圧縮を用いて、大幅な情報量の削減を行っている。ここで用いるウェーブレットは先述したように Haar ウェーブレットや Gabor ウェーブレットより画像再構成において優れた Daubechies ウェーブレットである。

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。

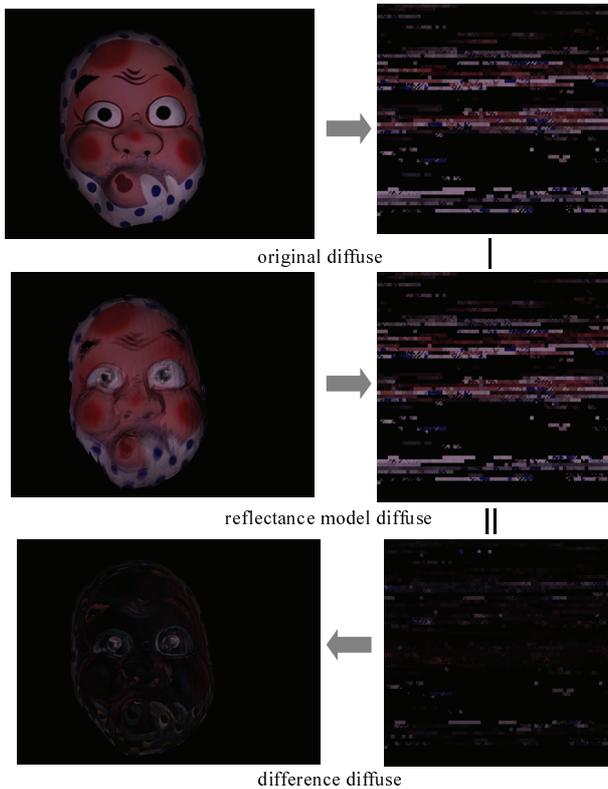


図8 パッチ形式差分画像

6. 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ウェーブレットにより三次元圧縮を施し、レンダリングにおいてはウェーブレット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8(上))。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8(中))。これらの差をとったものを差分画像とする。図8(下)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。

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。パッチ画像列を分解した後、絶対値が大きい順に上位 $\alpha\%$ の展開係数のみを残すことによりデータを圧縮する。パッチごとの画像圧縮の様子を図9に示す。

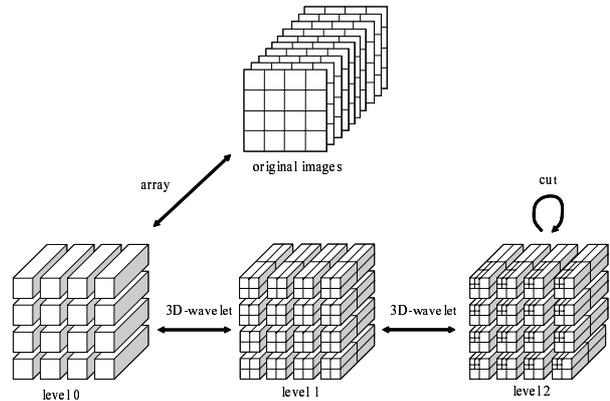


図9 パッチごとの画像圧縮

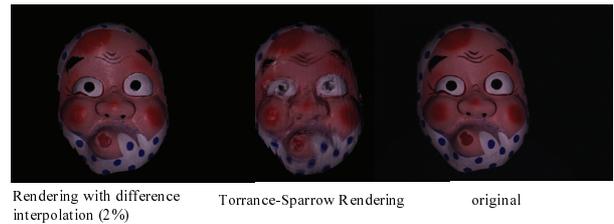


図10 (左) Wavelet-Texture 法の結果 (中央) 反射モデルによるレンダリング結果 (右) 入力画像

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により7.1と同様にして反射モデルレンダリングを行う。次に、5.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。

7. 実験

7.1 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10(中央)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10(左))。

7.2 圧縮率

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画素ごとの誤差(RMSE:Root Mean Square Error)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%以上の場合には誤差がほぼ0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、誤差がなだらかに大きくなってゆき、25%のあたりを境に急峻になる。

次に再構成信号の誤差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

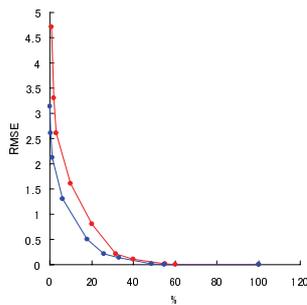


図 11 展開係数の使用比率と再構成誤差

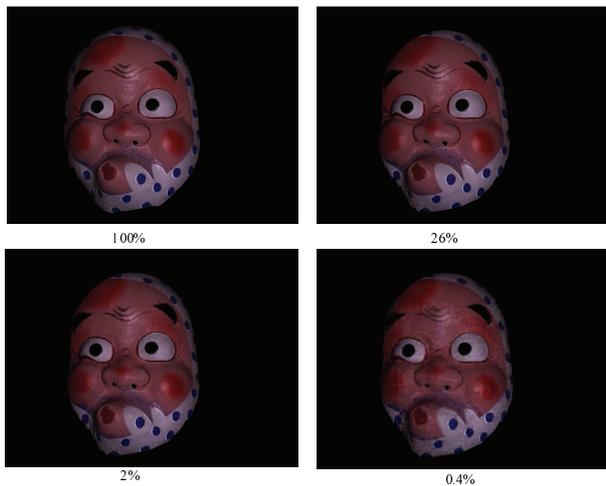


図 12 展開係数の使用比率ごとの再構成画像

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．

100% というのは無圧縮，つまり入力画像である．誤差と係数の使用比率の相関図より 50% 程度までが誤差が非常に 0 に近い場合であったが，26% の場合についても見た目には劣化が確認されない．前述したように 26% とは誤差の曲線の傾きが大きく変化するあたりである．この場合の誤差は図 11 より拡散反射成分，鏡面反射成分共に 1 以下である．

使用比率を下げていき，2% の場合の画像になると誤差が視覚的に確認できるようにはなるが，2% という使用比率を考えると十分な品質であるといえる．さらに使用比率を下げた 0.4% の場合の画像は拡散・鏡面反射成分の誤差が 2 ~ 3 程で，三次元幾何モデルの三角パッチがわかるようになり，品質的に問題がある．

8. 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．今回の実験では，提案手法のレンダリング結果は良好だったが，従来法である反射モデルによるレンダリングは十分な精度が得られなかった．これは，カメラキャリブレーションの精度が良くなかったためであり，再実験を行う必要があると思われる．このように，提案システムには多くの課題が残されているが，それらはどれもただ実装するだけの問題であり，提案手法の本質とははずれているため，本稿の取り扱う範囲外とする．

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] Y. Sato, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation," *Proc. ACM SIGGRAPH 1997*, pp. 379-387, 1997.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.