

二色性反射モデルに基づく BTF 画像圧縮の効率向上

山 本 昇 志[†] (正会員) 小 原 真 宝[†] 津 村 徳 道[†] (正会員)
中 口 俊 哉[†] (正会員) 三 宅 洋 一^{††} (正会員)

[†] 千葉大学大学院 自然科学研究科

^{††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センタ

あらまし 本論文では様々な方向から観察する物体の Bi-directional Texture Function (BTF)画像を、二色性反射モデルに基づき、効率よく圧縮して高速で再生できる手法を開発した。光源や観察方向の変化に対する物体の質感変化を表現できる BTF 画像群は、コンピュータグラフィックに適用することで実物体の見えを正確に再現できる。また、この BTF を模擬物体上に投影することにより、デジタルモックアップとしての活用が期待できる。しかしながら、BTF を高速で描画するためには、莫大な画像データに対する効率よい圧縮と、高速な再生手法が必要不可欠である。そこで本研究では観察方向の変化に対して大きく変化する光沢や陰影成分と、ほとんど変化しない拡散反射成分に分離して処理することで、高い圧縮率と高速な再生が可能な手法を提案する。BTF 画像成分の分離は二色性反射モデルに基づき実施され、分離された光沢や陰影成分のみを高圧縮することにより、処理に必要な計算負荷を軽減させる。本論文では上記提案手法の再現精度を計算機シミュレーションで確認すると共に、実際の投影表示システムに実装することで再現速度の検証を行った。その結果、提案手法は従来の手法より約 3 倍高い画像圧縮や、約 2 倍の速さで再生できる能力を持つことを示した。

キーワード：二色性反射 BTF 圧縮 再生 高速化 投影

Summary We developed an efficient BTF compression and reproducing technique based on a dichromatic reflection model. For the reproduction of the gloss appearance of rough surface, Bi-directional Texture Function (BTF) rendering is thought to be used in this system. However, efficient compression and reproduction methods are required for real-time rendering. In this paper, we propose an efficient approach of BTF rendering by separating the reflected light to the specular, the cast shadow and the invariant diffuse elements. The efficient compression for the BTF rendering is performed by applying the Local Principal Component Analysis (LPCA) to the specular and the cast shadow images, since their appearance depends on the direction of the viewing or illumination. This method performs accurate reproduction by fewer principal components in comparison with the conventional method. The final projection image in an arbitrary direction of the viewing and illumination is synthesized from the specular reflection image, the cast shadow image and the invariant diffuse reflection image. Finally, the proposed method is implemented on the appearance-based display, and demonstrated high-speed BTF rendering which is two times faster than the conventional method.

Key words: BTF dichromatic compression reproducing projection

“Efficient BTF compression method based on a dichromatic reflection model” by Shoji Yamamoto, (Member) Naotaka Obara, Norimichi Tsumura, (Member) Toshiya Nakaguchi, (Member) (Graduate School of Science and Technology, Chiba University), Yoichi Miyake, (Member) (Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University).

1.はじめに

自然物体の見えをテクスチャ画像として様々な方向から撮影し、任意な方向からの見えを正確に再現できるイメージベースのレンダリング手法は映像メディアの製作に必要不可欠な技術である。例えばこのような物体の見えを視点回転方向のパノラマ画像として記録して、必要な方向の画像を切り出し提示する QuickTime

VR(panoramic movie)は代表的な応用例のひとつである¹⁾。このようなテクスチャ画像群は Bi-directional Texture Function (BTF) と呼ばれ、三次元のコンピュータグラフィックス情報と重ね合わせることで、リアルな景観シミュレータや仮想物体の再現に活用が期待されている²⁻⁷⁾。

我々も、ものづくり支援シミュレータとして、様々な観察方向からの物体の見えるを投影画像として再現し、模擬物体上に本物の質感を再現する表示再生技術に取り組んできた⁸⁻¹⁰⁾。これまでの研究では、光沢を含む物体反射画像を、光学的反射モデルを用いて計算・再現していたため、光沢の自然な分布や物体表面の凹凸で生じる粒状感などの“本物らしさ”までは再現できていない。そこで、様々な視点における自然物体の反射画像を撮影して、観察方向に応じた BTF 画像をレンダリングする手法の適用が望まれている。

BTF 画像のレンダリングにおいて、正確な再現を実現するためには多くの BTF 画像の計測と高い計算処理能力が必要である。そのため、画像処理の分野では BTF 画像の特徴量を統計的な手法で抽出し、圧縮・再生する手法が研究されてきた。1991 年に M.Turk らが発表した“Recognition using eigenface”は主成分分析による次元圧縮と平均値に基づく最近接認識規則を顔画像の認識に適用した例であるが、統計的な圧縮・再生が正確な再現方法として実用可能であることを示した画期的な取り組みであった¹¹⁾。更に、自然物体で発生する光沢反射を含めた BTF 画像の優れた圧縮方法として、Local Principal Component Analysis (LPCA) 手法が提案された¹²⁻¹⁶⁾。この手法は光沢のような表面反射で生じる非線形的な画素値の変化に対して、同様の变化を持つ部分空間ごとに整理して主成分分析を行う方法で、少数基底の集合体として BTF 画像を効率よく圧縮することが可能である。この LPCA 手法は BTF 画像群に記録された物体の反射率変化を画素値の変化として解析する、画像処理的なアプローチである。しかしながら、画素値変化は光沢などの表面反射特性の変化だけではなく、物体の下地模様の変化によっても発生する。よって、壁や肌などの単一模様を持つ物体の BTF 画像圧縮には大変有効な手法であるが、衣類や絵柄などの複雑なテクスチャ情報を持つ物体の BTF 画像に対しては高い圧縮率が得られない。また、圧縮率が低いと再現時に処理すべきデータ量が増えるため、高速な再生が困難となる。

そこで本論文では、複雑なテクスチャ模様や、観察方向の変化で生じる非線形的な反射率変化に影響されにくい BTF 画像の圧縮・再生方法を提案する。本提案手法は基本的に LPCA 手法の考え方を基本としているが、物体表面における二色性反射の特性を活用して、物体表面の光沢変化と、物体の下地であるテクスチャ変化を分離して圧縮・再生することで圧縮の効率向上や再生の高速化を実現する¹⁷⁾。各 BTF 画像からテクスチャ成分を

分離すると、観察方向で変化するのは光沢成分のみとなるため、下地の模様などに影響されない効率の良い圧縮が可能となる。また再現時には、再生した光沢成分画像と分離されたテクスチャ成分画像を合成することで元の画像が再現できるため、複雑な演算処理を必要としない、高速な表示再生が期待できる。

本論文ではまず、基本となる LPCA 手法を説明するとともに、BTF 画像の圧縮が物体の模様に依存する現状性能を 2 章に示す。3 章では二色性反射モデルに基づいた我々の手法を提案し、計算機シミュレーションにおいて、その正確さと有効性を明らかにする。4 章では提案手法を実現するための BTF 画像の計測方法及び再生手法について述べ、5 章に示したリアルタイム再生実験によって、その再生速度を検証している。6 章では総合的な評価結果をまとめるとともに、今後必要な研究内容について述べる。

2. Local Principal Component Analysis (LPCA)を用いた BTF 画像圧縮手法

BTF は図 1 に示すように、観察方向 2 次元、照明方向 2 次元、テクスチャ座標 2 次元の変数からなる 6 次元の関数であり、実際に撮影した画像を用いて再現を行うため、実物体で起こる自己遮蔽や相互反射などの複雑な光学現象も表現することができる。しかし、観察方向、照明方向を変化させて撮影した画像データは数千枚を越す膨大なデータとなるため、撮影で得られた BTF データをそのまま保存・再生して再現に用いることは非常に高い処理能力が必要となる。そこで、BTF 画像の効率の良い圧縮方法と処理負担が少ない再生手法の研究が進められている¹²⁻¹⁵⁾。

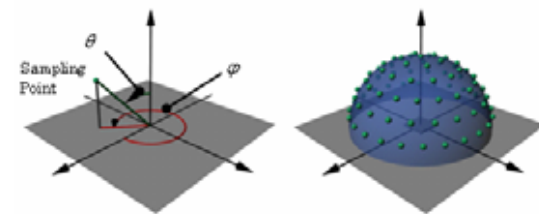


図 1 BTF 画像取得の幾何学的位置関係
Fig. 1 Geometric Illustration of BTF sampling

物体の反射特性を示す BTF 画像を観察・照明方向を一定の間隔で撮影した場合、各画像で類似の情報(画素値)を省略することが効率の良い画像圧縮につながる。この観点から物体の反射特性に対する BTF 画像を解析すると、光沢などの表面反射によって急激に画素値が変化する。この変化は観察方向の移動に対して非線形的な変化を生じるため、BTF 画像群を効率良く、正確に圧縮・再生することを困難にしている。そこで、G. Muller

らは光沢を含むすべての撮影画像から同じ位置にある画素を抽出し、照明の移動による変化を横に、観察の移動による変化を縦に並べた画像変換を提案した¹⁶⁾。並び替えの様子を図 2 に示す。彼らはこの画像群を BRDF 形式の BTF データと定義した。

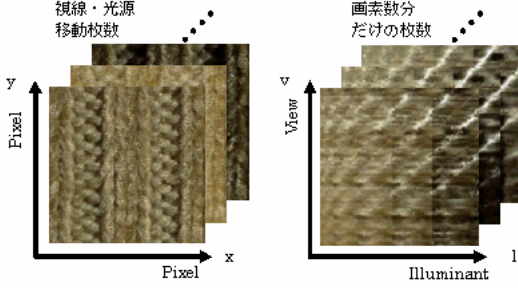


図 2 BRDF 形式に変換した BTF 画像データ
Fig. 2 BTF data set arranged to BRDF form

BRDF 形式の BTF データセットは照明移動と観察移動の方向に画素値が並んでいるため、テクスチャ画素値における不連続な変化が少なく、局所的に同じような画素値を持つ領域ごとに分割しやすい。LPCA 手法はこの BRDF 形式に変換した BTF データを K-means 法により複数クラスに分割し、各クラスにおいて PCA (主成分分析) の計算を実施する¹⁸⁾。LPCA の計算手順を以下に示す。

- 参照とする画素位置データの数と用いる主成分数 c , クラスの数 k を決定する。
- BTF データセットの中から参照とする画素位置データ $\mathbf{r}_j$ ($j=1,2,\dots,k$) を選ぶ。
- 初期は単純に画素位置間のユークリッド距離で K-mean 法を実行して、参照とされた画素位置データを中心としたクラス (データセット群) を作成する。
- 各クラスにおいて、データの平均値計算と PCA 計算を行い、平均値を新しい参照画素位置データとする。
- 各データセットのクラスを解除し、K-mean 法を用いて新たな参照画素位置データとの距離が最も近くなるクラスに振り分ける。このとき任意の画素位置データとの距離は

$$\|x - \tilde{x}_j\|^2 = \left\| x - r_j - \sum_{i=1}^c \langle x - r_j, e_{i,j} \rangle e_{i,j} \right\|^2, \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、 x は入力データ、 $\tilde{x}_j$ は復元データ、($i=1,2,\dots,c$) は主成分の数、 $e_{i,j}$ は主成分ベクトルである。

- 撮影した照明・観察方向の数を M , 画像の画

素数を I としたときの平均復元誤差

$$\varepsilon = \sum_{(v,l) \in M} \frac{\|x_{(v,l)} - \tilde{x}_{(v,l)}^c\|}{|I||M|}, \quad (2)$$

が与えられた閾値以下になるまで(d)から(f)を繰り返す。

すべてのデータの振り分けが終了したら、画像復元のために必要なデータを保存しておくことで圧縮が実施される。保存されるデータは、各ピクセルがどのクラスに含まれるかを示すクラスタインデックス、各クラスにおける参照となる画素位置ベクトル、各クラスにおける主成分ベクトルと主成分ベクトルの重みである。

任意の照明・観察方向からの BTF 画像を再現するためには、再現すべき照明や観察方向に近く、再現可能な周囲画像を補間用画像として作成する。周囲画像は照明や観察方向を代入することにより、(3)式から計算することができる。

$$\tilde{x}_{(v,l)}^c = r_j + \sum_{i=1}^c \langle x - r_j, e_{i,j} \rangle e_{i,j} \quad (3)$$

復元した周囲画像と再現すべき画像の観察・照明位置の関係から周囲画像に対する重み付けを行い、重みに従って周囲画像を合成することで最終的な BTF 画像を得ることができる。(3)式から明らかのように、LPCA 手法での画像圧縮率や再現計算速度はクラス分割数と各クラスでの主成分数によって決定され、そのクラス数と主成分数は画素値変化の複雑さに依存している。そこで画素値変化の複雑さによる影響を定量化するために、物体の地下絵柄が異なる 2 つの BTF 画像に対して、LPCA 手法による圧縮・再生の精度を確認した。ここで、圧縮・再生精度に影響を及ぼす変数はクラス数と主成分数であるが、検証に用いる BTF 画像は照明が水平方向のみに変化したものと仮定すると、図 3 に示すように、クラス数は 4 に固定できる。よって、2 つの BTF 画像に対して主成分数のみを変化させ、その再現精度を評価した。結果を図 4 に示す。

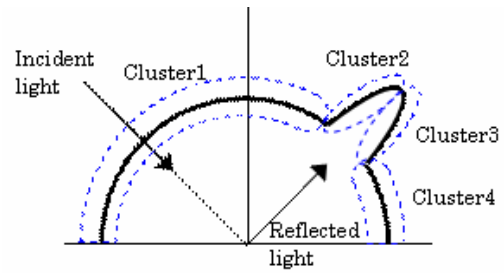


図 3 Phong モデルに基づくクラスタリング分離方法
Fig. 3 Illustration for deviation of clusters based on Phong model

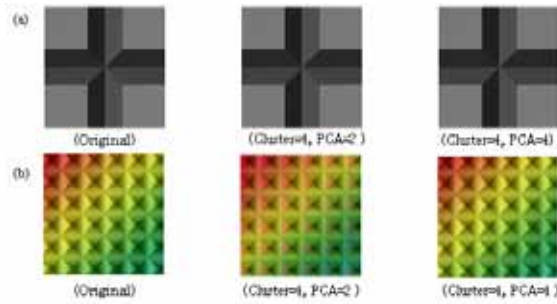


図4 従来方式を用いた BTF 圧縮・再生結果

Fig. 4 Result of BTF compression and decompression using the conventional LPCA

(a) evaluation by simple image

(b) evaluation by complex image

図 4(a)に示すような単純な画像の場合、主成分次数を少なくしても正確な再現が可能である。しかし、図 4(b)のような複雑な画像に LPCA 手法を適用した場合、主成分次数が減少することにより再現画像の劣化が生じる。つまり、正確な再現を行うためには、多くの主成分が必要であることが明らかである。しかしながら、主成分が多くなると再現時に処理すべきデータ量が増えるため、高速な再生は困難となる。

3. 二色性反射モデルに基づく BTF 画像圧縮手法

3.1 提案手法による計算処理の簡易化

ここで、図 4(a)と(b)を更に詳しく分析する。両者とも照明の変化で生じる表面反射や陰影部分の画素値変化は同じであるにも関わらず、図 4(b)では主成分数が減少すると、その変化を正確に再現できていない。これは図

4(b)の BTF データが下地として複雑な絵柄を持つためであり、絵柄の変化と照明の変化で生じる複雑な画素値の変化が、少ない主成分数では表現しきれないことを示している。このことを逆に捉えと、絵柄による変化と照明による変化を分離できれば、照明の変化だけで生じる画素値の変化は少ない主成分数で効率よく圧縮できることを示している。そこで本論文では、BTF 画像を撮影する際に、二色性反射モデルに基づいた分離計測を行い、表面反射成分や陰影成分の変化のみに LPCA を適用する圧縮手法を提案する。再生は光沢・陰影成分の画像と下地絵柄を示すテクスチャ成分画像を合成するだけで済むため、複雑な演算処理を必要としない、高速な表示再生が期待できる。また、光沢や陰影はほとんどの場合、単色である光源色が変化した画像であるため、下地絵柄の色とは分離して単色として扱うことにより、従来カラー画像として処理されていた LPCA 法での圧縮・再生の計算負荷が軽減される。

図 5 に従来の方法を用いた BTF 画像の圧縮・再生の流れ、及び提案手法での流れを比較して示す。従来手法はまず、撮影した BTF データを BTDF 形式に変換して圧縮していく。一方、提案手法では物体の BTF を表面反射である光沢成分と拡散反射成分に分けて取得し、更に拡散反射成分から陰影成分と物体の絵柄を表すテクスチャを分離する。LPCA 手法による圧縮を適用するのは光沢成分と陰影成分だけであり、これらはモノクロの情報として処理される。テクスチャ成分は、圧縮・再生の対象とせず、最終的な画像生成の時に使用する。ここで、本提案手法はテクスチャ成分が視点や照明角度で変化しないという仮説に基づいているので、対象は等方性反射を持つ物体に限定される。しかしながら、世の中の多くの物体が等方性反射特性を持つため、十分実用的である。

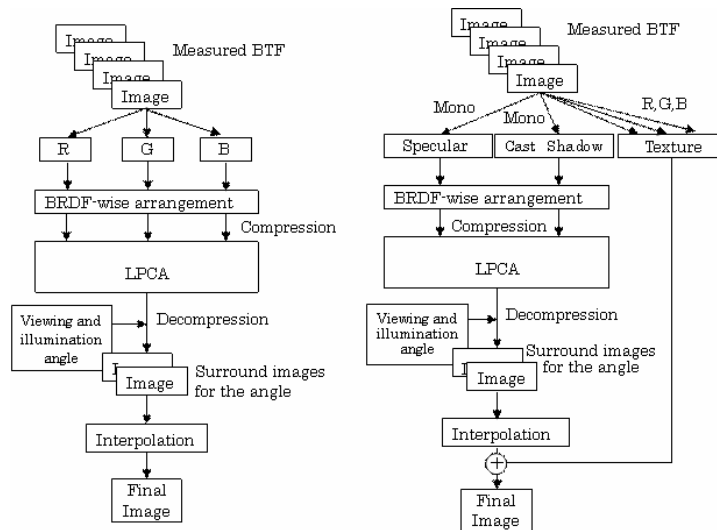


図5 BTF レンダリングに対する従来手法と提案手法の処理フロー

Fig. 5 Flow of conventional method and proposed method for BTF Rendering

本提案手法では複雑な模様を持つテクスチャを分離して、圧縮・再生の対象としないため、光沢や陰影成分だけの变化を低い主成分数で圧縮・再生ができる。また、従来法は RGB それぞれ 3 枚の画像に対して圧縮・再生を行っていたが、提案手法は光沢成分と陰影成分の 2 枚だけの処理で済むため、再生時の処理についても高速化が期待できる。

3.2 計算機シミュレーションによる再現精度の検証

3.1 章で示した処理フローの妥当性を考察するために、計算機シミュレーションにより、従来手法と提案手法での再現精度を比較した。評価サンプルとして図 4(b)の複雑な図形を使い、Phong の反射モデルで物体の反射強度を計算することにより、異なった 81 の方向から照明された画像群を生成した。ここで、Phong のモデルは表面反射と拡散反射を別々に計算することができるため、表面反射を示す光沢画像と拡散反射を示すテクスチャ画像を明確に分離生成することができる。また陰影画像はサンプル面に対して垂直な方向から照明した場合に取得できるテクスチャ画像と、様々な照明角度での拡散反射画像との差分から計算される。これらの画像群を図 5(b)に示した提案手法のフローチャートに従い圧縮し、任意の角度での画像を再現した。比較のために、従来方法で同じ BTF 画像の圧縮・再生を行った結果を図 6 に示す。また再現精度の定量的な評価を行うために、オリジナルの画像と各手法で圧縮再生した出力画像との Root Mean Square Error (RMSE)を計算した。結果を図 7 に示す。

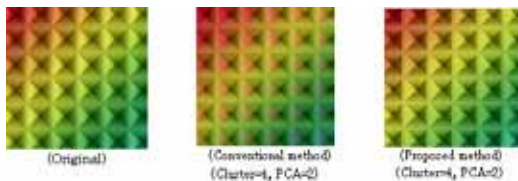


Fig. 6 Result of computational simulation by both method

図 6 両手法による計算機シミュレーション結果
Fig. 6 Result of computational simulation by both method

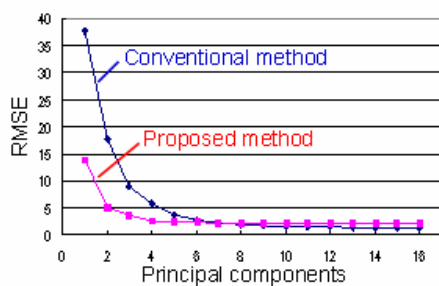


図 7 最小 2 乗誤差による画質評価

Fig. 7 Evaluation result of RMS

図 7 の結果は両手法ともクラスター=4、主成分数=2 で計算を行っているが、明らかに提案手法のほうが精度の良い再現が実行されている。また、主成分数を増加させた場合、主成分数が 7 までは提案手法のほうが RMS 誤差は少なく、主成分数が 8 を超えると両者の違いはなくなる。高速な再生表示を行うためには主成分数が少ないほうが計算負荷は減るため、少ない主成分数で精度良い再現が可能な本提案手法は BTF 画像の効率のよい圧縮、高速な再生に適している。

4. 提案手法による圧縮・再生システムの構築

本節では提案する BTF 画像の圧縮再生を実現するための手段を説明する。まず図 8 に本提案手法による BTF 画像の撮影方法を示す。本手法では照明と撮影カメラの前面に偏光フィルタを設置して、物体の表面反射と拡散反射を分離した画像を取得する。照明光は偏光板を介することで直線偏光成分のみが物体に照射される。物体から反射してくる光のうち、表面で反射される成分は直線偏光の状態を維持した光となる。一方、内部に浸透して乱反射した拡散反射光は非偏光となるため、カメラ前面に設置した偏光フィルタの偏光面を、照明前面に

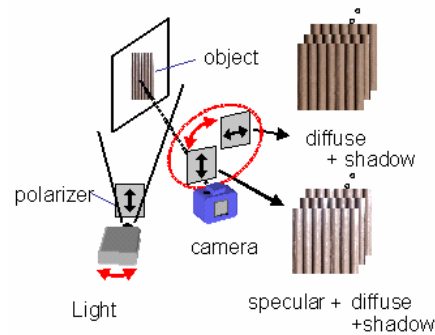


図 8 測定システム

Fig. 8 Measurements system

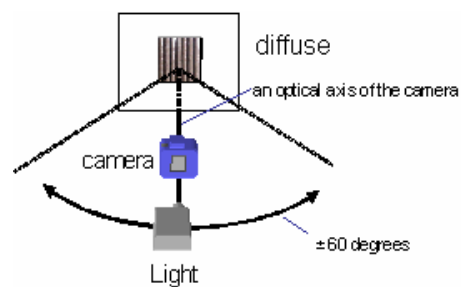


図 9 拡散テクスチャ画像の測定幾何条件

Fig. 9 Measurements geometry of diffuse texture

設置した偏光フィルタの偏光面と直行するように設置すると、拡散反射成分のみの画像が取得できる。一方、カメラ前面の偏光フィルタの偏光面を平行にすることで、表面反射成分と拡散成分が含まれた画像を撮影することができる。BTF データセットは様々な照明・視線位置からの画像で生成されるため、同様の撮影を照明やカメラの位置を変えて実行する。

カメラ前面の偏光面を変えた 2 種類の画像の差分を計算することにより、表面反射成分のみの画像を生成することができる。一方で、照明前面とカメラ前面の偏光面を直行させて取得した画像には、陰影成分と物体のテクスチャ成分が含まれている。ここで、本研究では等方性な反射特性を有する物体を対象としているため、照明の位置変化で変化する画像成分は陰影のみであり、テクスチャ成分は照明の位置変化に対して不変な画像となる。そこで、図 9 に示すように、照明とカメラの光軸がほぼ一致する条件で撮影した画像はテクスチャ成分のみの画像となる。よって、照明とカメラ全面の偏光面を直交させた条件で、様々な照明方向から撮影した拡散画像とテクスチャ成分の画像との差分を計算することにより、陰影のみを分離した画像が抽出できる。撮影と分離計算から得られた画像を図 10 に示す。

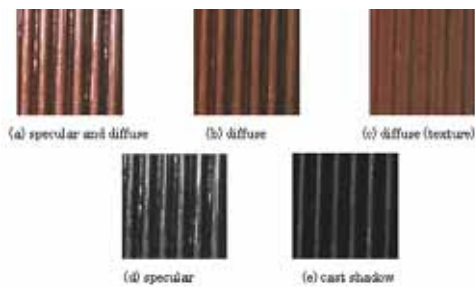


図 10 画像分離を行った BTF 画像

Fig. 10 Result of BTF measurement and calculation for image separation

分離した画像群を用いて圧縮を行い、任意角度に対する再生計算を行った。結果を図 11 に示す。サンプルとなる BTF 画像群は物体法線に対して水平方向に $\pm 60^\circ$ の範囲を 5° 間隔で撮影したものをを用いた。また再現すべき画像の正解値として、右 20° 方向から撮影した画像をオリジナルとした。再生は従来方法と提案方法を用いて、同じクラスタ数、主成分数で再現した。結果から、提案手法がほとんどオリジナルと同じ見えを再現できているのに対して、従来法では表面反射や陰影部で誤差が生じていることがわかる。これは照明位置の変化で生じる急峻な画素値変化に対して主成分数が不足していることを示している。従来手法でオリジナルとほぼ同じ見えを再現するためには主成分数は 24、必要であった。



図 11 両手法による BTF 画像再現の結果

Fig. 11 Result of BTF reproduction by two methods

5. 投影画像再現による表示再生速度の検証

4 節の画質評価で本提案手法の再現精度を明らかにしたが、本節では再現の計算速度について検証を行った。図 12 に示す実験システムと 4 節で計測された画像を用いて、指定した照明位置での BTF 画像の再生・表示速度を評価することができる。

再生画像の表示はプロジェクタを用いて行い、照射面に無光沢の白色表面を持つ厚紙を設置する。厚紙の背部にはその角度変化が検知できる磁気位置センサ (Fastrack, Polhemus 社) が取り付けられており、約 2ms の高速応答で厚紙の角度位置情報を取得することができる。取得された角度情報は画像を生成するコン

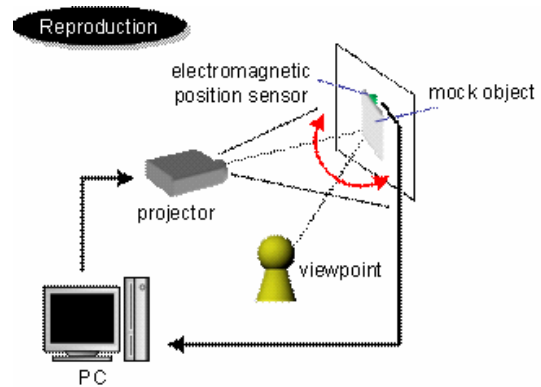


図 12 レンダリング速度を評価するための実験システム

Fig. 12 Experimental system for evaluation of rendering speed

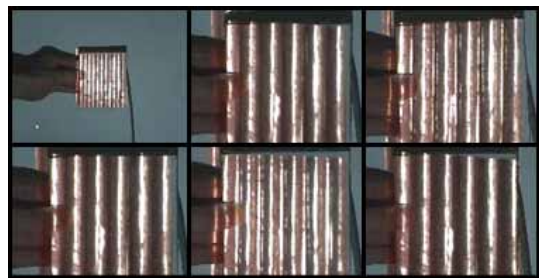


図 13 提案手法によるリアルタイムレンダリング結果

Fig. 13 Result of real-time rendering by using a proposed method

コンピュータに送られ、その位置に応じて BTF の再生画像が計算される。再生された画像はプロジェクタを介して、厚紙上に投影される。再生された投影画像の様子を図 13、再生時の Flame Per Second(FPS)計測結果を図 14 に示す。

FPS の計測結果からも明らかなように、提案手法は従来の手法に比べて 2 倍の速さで厚紙の角度変化に合わせた BTF 再生が可能である。今回、主成分数は 12 で再現を行っているため、再生速度は約 28FPS であり、ほぼリアルタイムな再現が可能となった。

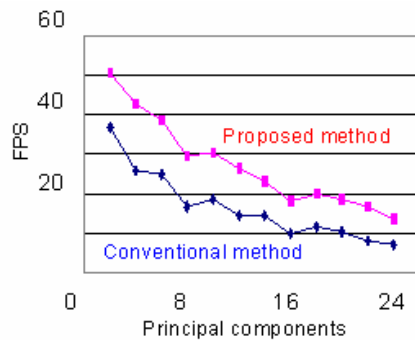


図 14 両手法による表示速度 (FPS) 測定結果
Fig. 14 Measurement result of FPS by two methods

また、この再現実験に用いた画像データセットで圧縮率の評価を行った。撮影時のデータ容量を表 1 に示す。使用した画像のサイズは 128×128 画素であり、物体法線に対して水平垂直方向に $-60 \sim 60^\circ$ の範囲で 5° 間隔の撮影を行った場合、従来手法では撮影画像が約 30MB、提案手法では撮影画像が約 60MB となる。

表 1 測定データの画像容量
Table 1 Volume of measurement data

Measurements	Pixel & color	image	Data size	All(Byte)
Conventional	$128 \times 128 \times 3$	625	1 (8bit)	30,720,000
Proposed	$128 \times 128 \times 3$	1,250	1 (8bit)	61,440,000

表 2 両手法による圧縮率比較

Table 2 Compression result of each method

Conventional	Number of data	Color	Cluster	PCA	Data size	Sum(Byte)	All(Byte)	Comp. rate
eigen vector	600	3	4	-	4(float)	28,800	4,796,844	0.1561
pca weight	16,384	3	-	24	4(float)	4,718,592		
reference vector	25	3	4	-	1 (8bit)	300		
c_index	128×128	3	-	-	1 (8bit)	49,152		
Proposed	Number of data	Color	Cluster	PCA	Data size	Sum(Byte)	All(Byte)	Comp. rate
eigen vector	600	2	4	-	4(float)	19,200	1,674,184	0.0545
pca weight	16,384	2	-	12	4(float)	1,572,864		
reference vector	25	2	4	-	1 (8bit)	200		
c_index	128×128	2	-	-	1 (8bit)	32,768		
Base_diffuse	128×128	3	-	-	1 (8bit)	49,152		

撮影時に対して、各手法で圧縮を行った結果を表 2 に示す。従来の LPCA 手法 (クラスタ数は 4、主成分数は 24) で圧縮すると圧縮後のデータ容量は約 15% である。それに対して、提案手法は主成分数が 12 と少なくなるため、圧縮後のデータ容量は約 5% で済み、圧縮率に対しても優れた手法であることがわかる。

6. 結論

モデルベースで再現しきれない細かな光沢分布や粒状感を高速再生が可能な Bi-directional Texture Function (BTF) 再現手法を用いて、リアルタイムに表示再生が行えるシステムを構築した。高速再生には複数の視線・照明方向からの莫大な BTF データベースの特徴量を効率よく圧縮して、正確に再現する方法が必要であり、従来は局所主成分解析 (LPCA) による画像データの圧縮・再生方法が優れた方法であった。しかしながら、リアルタイムな再現を行うためには LPCA 手法を用いても未だ計算コストが高く、再生した BTF 画像の正確さや質感の見えるが犠牲になる場合がある。そこで本研究では BTF 画像を取得するときに、観察や照明方向で大きく変化する光沢や陰影成分と、観察や照明方向の変化でほとんど見えが変化しないテクスチャ成分に分離して、光沢や陰影成分のみを圧縮・再生する方法を開発した。これは二色性反射モデルに基づく分離方法であり、観察や照明方向の変化に依存する光沢陰影成分のみ圧縮・再生して、最終的にテクスチャ成分と合成することで BTF 画像が再生できる。本手法は圧縮・再生する画像情報量が少なく済み、しかも色やテクスチャが持つ絵柄情報は圧縮・再生しないため、従来手法より高画質の BTF 画像を高速で再生することができる。この提案手法の再現精度を計算機シミュレーションで確認しながら、角度が変化する無光沢白色の厚紙の上に、光沢を持つ波板状物体の質感を再現する実験を実施した。その結果、従来手法より少ない主成分数で正確な再現が実現できるとともに、再生速度の面でも約 2 倍の速さで再現が可能であることを明らかにした。

なお、今回の提案手法はテクスチャ情報が観察や照

明角度で変化しない等方性反射を持つ物体に限定して行っただが、異方性反射物体に対しても複数のテクスチャ情報を持つことで対応が可能である。この場合、異方性テクスチャ情報に対する適切な分離・圧縮ルールや、最終的な合成画像生成の簡易計算手法を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) S.E.Chen, "Apple Computer Quick Time VR - an Image Based Approach to Virtual Environment Navigation", Proc. SIGGRAPH'90, pp.29-38, (1990)
- 2) K. Dana, B. van Ginneken, S.K. Nayar, and J.J. Koenderink, "Reflectance and texture of real-world surfaces", In ACM Transactions on Graphics, volume18(1), pp. 1-34, (1997).
- 3) E. P. Lafortune, S. C. Foo, K. E. Torrance, and D. P. Greenberg, "Non-linear approximation of reflectance functions", Computer Graphics, 31(Annual Conference Series), pp.117-126, (1997).
- 4) X. Liu, Y. Yu, and H. Y. Shum, "Synthesizing bidirectional texture functions for real-world surfaces", In ACM SIGGRAPH2001, ACM Press, pp. 97-106, (2001).
- 5) K. Daubert, H.P.A. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, "Efficient cloth modeling and rendering", In Eurographics Workshop on Rendering, pp.63-70, (2001).
- 6) Jan Meseth, Gero Müller, Mirko Sattler, Reinhard Klein, "BTF Rendering for Virtual Environments", Virtual Concepts 2003, pp.356-363, (2003).
- 7) J. Filip and M. Haindl, "Efficient image-based bidirectional texture function model", In Texture 2005: Proceedings of the 4th International Workshop on Texture Analysis and Synthesis, pp.7-12, (2005).
- 8) 向川康博, 西山正志, 尺長健, "スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1448-1455, (2001).
- 9) 山本昇志, 鶴瀬麻依子, 植田久美子, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一, "DLP プロジェクタ照明下における物体の質感制御", 日本写真学会誌, 68巻6号, pp.510-517, (2005)
- 10) Shoji Yamamoto, Maiko Tsuruse, Koichi Takase, Norimichi Tsumura, Toshiya Nakaguchi and Yoichi Miyake, "Real-Time Control of Appearance on the Object by using High Luminance PC Projector and Graphics Hardware," The 13th Color Imaging Conference, (CIC13), pp.31-35, Scottsdale, USA, (2005).
- 11) M.A.Turk and A.P.Pentland, "Face recognition using eigenfaces", Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.586-591, (1991).
- 12) N.Kambhatla, T.K.Leen, "Dimension Reduction by Local PCA", Neural Computation, Vol.9, pp.1493-1516, (1997)."
- 13) Roweis, S. & Saul, L, "Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding", Science 290: pp.2323-2326, (2000).
- 14) V. de Silva and J. B. Tenenbaum, "Global versus local methods in nonlinear dimensionality reduction", Advances in Neural Information Processing Systems 15, pp.721-728, Cambridge, MA, MIT Press, (2003).
- 15) Sattler, M., Sarlette, R., and Klein, R., "Efficient and Realistic Visualization of Cloth", In Eurographics Symposium on Rendering, pp.167-177, (2003).
- 16) G. Müller, J. Meseth, R. Klein, "Compression and real-time Rendering of measured BTFs using local PCA" Proceedings of Vision, Modeling and Visualization, pp. 271-280, (2003).
- 17) S. Tominaga, "Surface Identification Using the Dichromatic Reflection Model", IEEE trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, pp. 658-670, (1991).
- 18) H. C. Anderberg, "Cluster Analysis for Applications", Academic Press, New York, (1973).

(2000年1月1日受付)

山本昇志		
		1993 年，静岡大学大学院光電機械工学専攻修了．2007年 千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了．博士（工学）．画質評価，画像解析に関する研究に従事．画像電子学会，日本写真学会 各会員．
小原真宝		
		2006 年，千葉大学工学部情報画像工学科卒業．現在，同大学大学院自然科学研究科修士課程．画質評価、画像圧縮に関する研究に従事．
津村徳道		
		1995 年，大阪大学大学院博士後期課程修了．博士（工学）．現在，千葉大学工学部情報画像工学科助教授．医用画像工学，計測画像工学，色再現工学，質感再現工学の研究に従事．IS&T，日本光学会，日本写真学会，日本医用画像光学会，電子情報通信学会，各会員．
中口俊哉		
		2003 年，上智大学大学院博士後期課程修了．博士（工学）．現在，千葉大学工学部情報画像工学科助手．2001-2003 年，日本学術振興会特別研究員．画像解析，画質評価，医用画像処理，組合せ最適化に関する研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，IS&T，日本写真学会，各会員．
三宅洋一		
		1968 年，千葉大学大学院修士課程修了．京都工芸繊維大学助手，助教授，千葉大学工学部助教授を経て，1989 年，同教授．1978-1979 年スイス連邦工科大学研究員．1997 年，ロチェスター大学客員教授．2003 年よりフロンティアメディカル工学研究開発センター長．医用画像工学，画像評価，色再現工学の研究に従事．IS&T フェロー・名誉会員，日本光学会，電子情報通信学会，各会員．工学博士．