任意光源画像生成のための Photometric Image-Based Rendering

三橋 貞彦, 宮木 一, 向川 康博, 尺長 健

岡山大学情報工学科
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1
E-mail: mihashi@chino.it.okayama-u.ac.jp

あらまし: 任意光源方向の画像を Image-Based Rendering の枠組で生成する手法として Photometric Image-Based Rendering を提案する．完全拡散反射面と平行光源を仮定すると, 任意光源方向の画像は, 光源方向の異なる3枚の画像の線形結合により生成可能であることが知られているが, 現実の環境では, 鏡面反射光や影などの非線形な要因のために正しく画像が生成できない．本手法では, このような非線形な要因を光源方向の異なるいくつかの画像を用いて適切に線形化し, 任意光源方向の画像を生成する．

キーワード: コンピュータグラフィックス, Photometric Image-Based Rendering, 陰影解析, 線形結合, 任意光源

Photometric Image-Based Rendering for Synthesizing under a Virtual-Lighting Condition

Sadahiko MIHASHI, Hajime MIYAKI, Yasuhiro MUKAIGAWA, Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology, Okayama University
Tsushimanaka 3-1-1, Okayama,700-8530, Japan
E-mail: mihashi@chino.it.okayama-u.ac.jp

Abstract: We propose a method for synthesizing an image in a virtual-lighting condition by the Image-Based Rendering. It is known that the images with any light directions can be synthesized by a linear combination of three images which are taken with different light source directions, if a Lambertian reflection model is assumed as well as a single point light source at the infinity. However, the previous method can not cover nonlinear elements, such as specular reflection, shadows, etc. In our method, these nonlinear elements are transformed to be linear, and realistic images can be synthesized under a virtual lighting condition by a linear combination of three images.

Keyword: CG, Photometric Image-Based Rendering, shading analysis, linear combination, virtual lighting condition

1　はじめに

従来から, 画像を生成する手法として, 対象となるシーンや物体の 3 次元形状・反射特性・光源条件などをモデル化し, それに基づいて画像を生成する Model-Based Rendering(MBR) が一般的である. しかし, この手法によって写実的な画像を生成するためには, 精密なモデルを必要とし, 膨大な手間がかかるという問題がある. 一方, 実際に対象物体を撮影した実画像を直接的に利用することで, 写実的な画像を生成する Image-Based Rendering(IBR) と呼ばれる手法が近年盛んに研究されている.

現在, 提案されている IBR の多くは, 視点位置の変化に伴う幾何学的な見え方の変化を扱うことに重点が置かれており, 光源変化に伴う見え方の変化を扱った研究の報告例は少ない. 光源変化に伴う見え方の変化は, 幾何学的な見え方の変化とは本質的に異なるため, 従来から研究されている IBR の手法をそのまま適用することはできない. しかし, 複合現実感 (Mixed Reality) などのように, 生成画像を他の画像へ違和感なく重ね合わせる場合には, 光源条件を任意に変更した画像を生成する技術が重要となる [1]. 近年, IBR の枠組で, 光源変化に伴う見え方の変化を実現しようとする試みが行なわれ始めているが [2][3], 対象となるシーンに対する制約が大きかったり, 多数の画像を必要とするなどの問題があった.

そこで, 本研究では, 光源方向の異なる複数の実画像を入力とし, これらを適切に組み合わせることで, 任意光源方向の画像を生成するための Photometric Image-Based Rendering を提案する. 本手法により, 物体表面の法線方向や反射特性を陽に復元することなく, 任意光源方向の画像生成が可能となる.

2　Photometric IBR

2.1　Image-Based Rendering の枠組

IBR は実画像を入力とし, これらに何らかの処理を施すことで, 別の見え方を生成するという, 画像から画像への変換に基づくレンダリング技術である [4]. 画像からシーンを復元するという不安定な処理を回避できることや, 写実的な画像が得られることから, 近年盛んに研究が行われている.

従来から, 視点位置の変化に伴う幾何学的な見え方の変化を, IBR の枠組で実現する手法が数多く提案されており, 本稿ではこれを Geometric Image-Based Rendering (GIBR) と呼ぶ. GIBR の代表的な手法として, 異なる視点位置から撮影された 2 枚の実画像を用いて, それらの中間視点の見え方を生成する View Morphing[5] などが挙げられる. この手法では, 2 枚の画像間で対応付けられた点の座標値と輝度の内挿により, 対象物体の 3 次元情報を用いることなく画像を生成している.

このように, GIBR では, 対象物体に関する 3 次元形状や反射特性などのモデルを利用することなく, 実際に得られた画像に直接何らかの処理を施すことで, 幾何学的な見え方の変化を再現している.

2.2　光源変化への IBR の適用

IBR の手法を, 光源変化に伴う見え方の変化に適用したものが, 本稿で提案する Photometric Image-Based Rendering (PIBR) である. GIBR では, 光源条件を一定とし, 視点位置の異なる複数の実画像から別の視点位置の画像を生成するのに対し, PIBR では, 視点位置を一定とし, 光源方向の異なる複数の実画像から別の光源位置の画像を生成する.

すなわち, PIBR とは, 物体表面の法線方向や反射特性を陽に復元することなく, 実際に得られた画像に直接何らかの処理を施すことで, 光源変化に伴う見え方の変化を再現できる手法である.

3　光源変動に伴う見え方の変化

3.1　変化要因

光源位置の変化に伴って物体表面の見え方が変化する主な要因として反射と影がある. 物体表面での光の反射は, 図 1 に示すように, 拡散反射と鏡面反射の二つに大別できる. 拡散反射は, 光源からの光をあらゆる方向に同じ強さに反射するものであり, 視線方向に依存せず一定の強度で観測される. 一方, 鏡面反射は, 正反射方向付近で最も強く観測される反射である. 影は, 物体自身が物体表面へ届く光を遮るために生じる self-shadow と他の物体に光を遮られて生じる cast-shadow の二つに分けられる. self-shadow は物体表面の法線方向と光源方向の関係のみに依存しているのに対し, cast-shadow は物体の 3 次元形状に依存する.

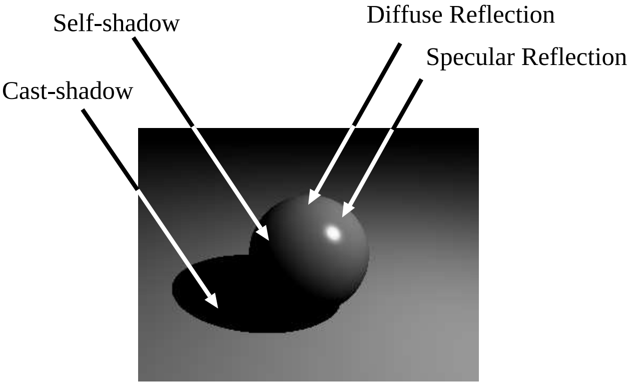

図 1: 反射と影

3.2 完全拡散反射における見え方の変化

物体表面において拡散反射のみが起こると仮定した反射モデルを完全拡散反射モデルと呼ぶ．完全拡散反射モデルを仮定すると物体表面の輝度 i は次式のように書ける．

$$i = (l\mathbf{s}) \cdot (r\mathbf{n}) \tag{1}$$

但し, l は光源照度, $\mathbf{s}$ は光源方向を表す単位ベクトル, r は物体表面の拡散反射率, $\mathbf{n}$ は物体表面の法線方向を表す単位ベクトルである．ここで, $l\mathbf{s}$ を光源特性ベクトル $\mathbf{S}$ とし, $r\mathbf{n}$ を面特性ベクトル $\mathbf{N}$ とすると, 式 (1) は次式のように簡単化できる．

$$i = \mathbf{S} \cdot \mathbf{N} \tag{2}$$

対象物体と視点位置を固定した場合, 画像上の各点に対応する物体表面の面特性ベクトル $\mathbf{N}$ は変化しないので, 見え方の変化は光源方向のみに依存する．ここで, 光源として無限遠の点光源を仮定すると, 任意光源方向の画像 $\hat{I}$ は次式のように, 光源方向の異なる 3 枚の画像 I_1, I_2, I_3 の線形結合により表現できることが Shashua[6] によって示されている．

$$\hat{I} = a_1 I_1 + a_2 I_2 + a_3 I_3 \tag{3}$$

線形結合の係数 a_1, a_2, a_3 と各画像 $I_1, I_2, I_3, \hat{I}$ に対応する光源特性ベクトル $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3, \hat{\mathbf{S}}$ の間には次式の関係が成り立つ．

$$\hat{\mathbf{S}} = a_1 \mathbf{S}_1 + a_2 \mathbf{S}_2 + a_3 \mathbf{S}_3 \tag{4}$$

この関係から, 各画像の光源特性ベクトルが既知であれば,特定の光源方向の画像を生成する際の線形結合の係数 a_1, a_2, a_3 を一意に決定することができる．

3.3 実環境における見え方の変化

前節では, 完全拡散反射モデルを仮定したが, 一般の物体を対象にする場合には, 鏡面反射も考慮する必要がある．また, 物体表面へ入射する光には, 光源からの直接光の他に, シーン全体を一定の明るさで照らしている環境光も含まれる．さらに, 実環境においては, 光源位置の変化に伴い, 直接光が物体表面へ到達しない影領域が生じる．これらの要因を考慮すると物体表面の輝度は次式のように書ける．

$$\begin{aligned} i &= \alpha i_D + \alpha i_S + i_E \qquad (5) \\ \alpha &= \begin{cases} 0 & \text{直接光が遮られている場合} \\ 1 & \text{直接光が遮られてない場合} \end{cases} \end{aligned}$$

但し, i_D は拡散反射光, i_S は鏡面反射光, i_E は環境光の反射光を表す．このように実環境における輝度変化は, 拡散反射光, 鏡面反射光, 環境光の[1] 三つの成分の和によりモデル化することができる．

4 任意光源画像の生成

4.1 実画像を入力とした線形結合による画像生成

実環境において撮影された画像を入力として画像生成を行う場合, 物体表面上の輝度は, 式 (5) のように, 非線形なものとなるため, 3 枚の画像の線形結合によって表現することができない．

この問題に対し, 松井らは光源方向のみが異なる多数の画像に対して主成分分析を施し, それらを表現するのに最適な主成分画像を求め, 主成分画像の線形結合により画像を生成する手法を提案している [2]．しかし, 鏡面反射光や影などによる輝度変化は, 画像平面上でのパターンの移動として観測されるため, 本来, 画像の線形結合によって表現できる性質のものではない．したがって, これらを線形的に扱うためには, 多数の主成分画像が必要となる．

そこで, 本手法では, 図 2 に示すように, 入力画像から, 鏡面反射光と cast-shadow を分離し, さらに self-shadow の線形化を行なうことで, 線形要因のみの画像に変換する．このように線形化した画像を線形結合することにより, 任意光源方向における線形要因を生成することができる．生成した線形要因の画像に対して, 適切に加工した非線形要因を付

---

[1] 輝度変化の要因として, 相互反射光も考えられるが, 相互反射光は他の要因に比べて画像に及ぼす影響が小さいため省略した．

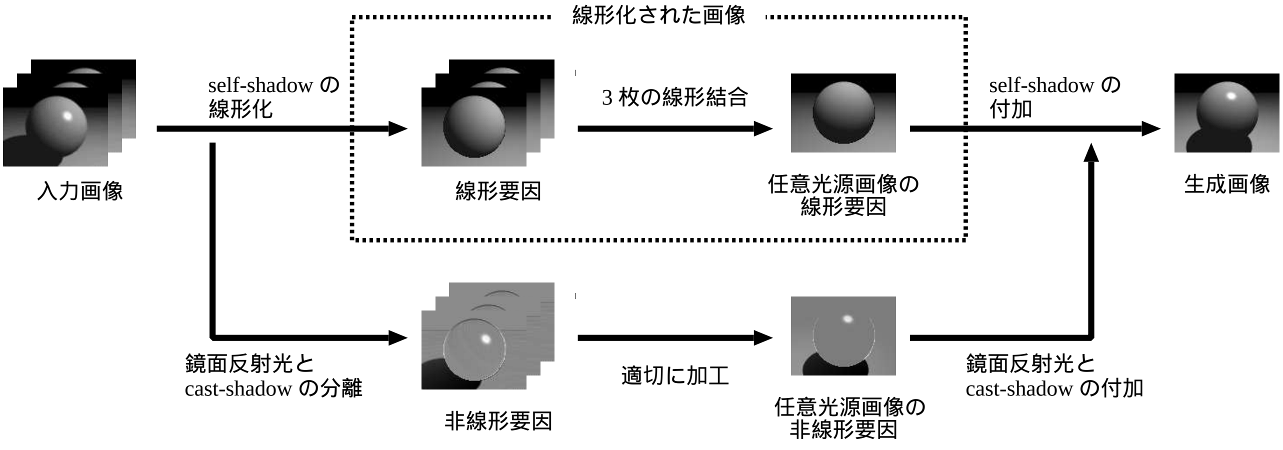

図 2: 画像生成の流れ

加することで任意光源方向の画像を生成することができる.

4.2 画像の線形化

本節では, はじめに, 入力画像の光源方向を推定する方法を述べ, その後に, 推定した光源方向に基づき, 入力画像から鏡面反射光と cast-shadow を分離する方法と self-shadow を線形化する方法について述べる.

4.2.1 非直交座標系での光源方向の推定

各入力画像の光源方向を知る方法として, 撮影時に光源位置を測定することが考えられるが, 実際の撮影環境において, 光源位置を正確に測定するのは困難である. そこで, 入力画像の輝度情報を利用して, 3 枚の画像から求まる非直交座標系における光源方向を求める.

はじめに, 入力画像から光源方向が 1 次独立となる 3 枚の画像 I_1, I_2, I_3 を選び出し, それらの画像の光源特性ベクトルをそれぞれ $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ とする. 但し, $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ の値は未知である. ここで, $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ が基底ベクトルとなる 3 次元座標系を定義する. $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ により定義した座標系はユークリッド空間を線形変換したものであり, この座標系においても式 (3), (4) が成り立つ. よって, 完全拡散反射を仮定すると, 光源方向が未知である画像 $\hat{I}$ と座標系を定義するのに用いた 3 枚の画像 I_1, I_2, I_3 の間に式 (3) の関係が成り立ち, 線形結合の係数 a_1, a_2, a_3 が一意に決まる. この係数 a_1, a_2, a_3 が $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ を基底ベクトルとした座標系における $\hat{I}$ の光源特性ベクトル $\hat{\mathbf{S}}$ となる. この光源特性ベクトルは, 実際のユークリッド空間のものとは異なるため, 法線の復元などを目的とする場合には利用できないが, 画像の線形化及び画像生成を目的とする場合には利用することが可能である.

実際には, 影や鏡面反射光などの影響により, 画像上の全ての領域において式 (3) が成り立つとは限らない. そこで, 画像からランダムに 3 点を選び出し, それらの点から光源特性ベクトルを推定することを繰り返し, 得られる複数の推定値から妥当な値を求める.

4.2.2 鏡面反射光, 環境光, cast-shadow の分離

鏡面反射光を分離する手法としては, 物体色と光源色が異なることを仮定して, 分離を行なう手法 [8] が多く用いられているが, この手法を用いる場合, 対象物体の色に対する制約が生じる. 本研究で提案する画像生成法では, 光源方向の異なる複数の画像を入力に用いることができるため, 対象物体の色に対する制約なしに, 鏡面反射光を分離することができる [6] .

環境光は光源位置に依存しない反射光であり, その影響は全入力画像において一定であると考えられる. そこで, 予め, 入力画像の撮影時と同じ条件のもとで, 光源が存在しない場合の画像を撮影し, その画像を環境光の影響のみを観測した画像として用いる. 各入力画像から, この画像を引くことにより, 環

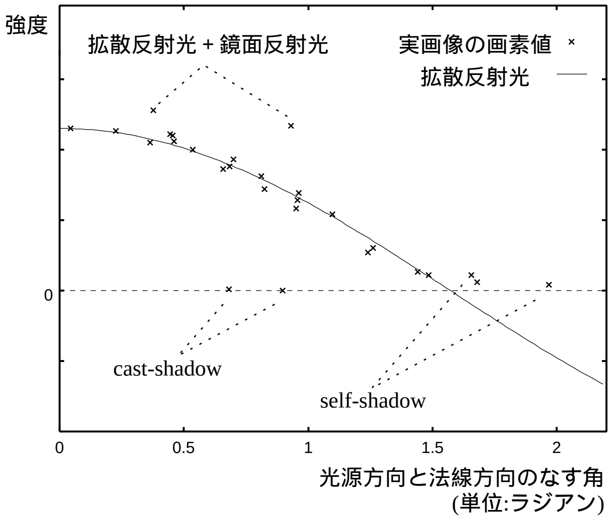

図 3: 拡散反射光の輝度と実画像の画素値

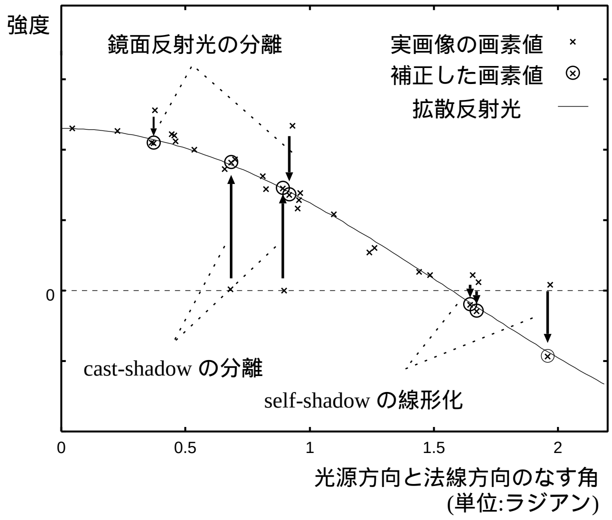

図 4: 画像の線形化

境光の影響を除去する.

環境光の影響を取り除いた入力画像には見え方の変化要因として, 拡散反射光, 鏡面反射光, 及び影が含まれている. このうち, 拡散反射光は影領域以外において常に観測され, その強度は式 (2) で表される. 一方, 鏡面反射光と影は特定の光源方向においてのみ観測される. これより, 画像上の各点において, 式 (2) の値と実際の画素値を比較することによって影領域と鏡面反射光が観測される領域を検出することができる. その方法を図 3 に概念的に示す. 但し, 図 3 では説明の簡単化のために光源照度を一定にしている. 光源照度が一定である場合, 式 (2) は光源方向と視点方向のなす角をパラメータとした余弦曲線として表される. 図 3 のグラフ中の曲線は式 (2) から導かれる拡散反射光の強度であり, グラフ中の各点は実際の画素値である. 曲線から大きくずれている点のうち, 実際の画素値が式 (2) の値より高いものは, 鏡面反射光を観測している画素であり, 実際の画素値が式 (2) の値より低く, かつ 0 に近いものは, cast-shadow である. また, 式 (2) の値が負であれば, その画素は self-shadow である.

cast-shadow 領域と鏡面反射光が観測される領域に対しては, 画素値を式 (2) に従うように補正し, cast-shadow と鏡面反射光を分離する (図 4).

このような補正を行なうためには, 面特性ベクトルが必要となるが, これは照度差ステレオ [7] の原理を用いて入力画像から物体表面の反射率と法線方向を復元することで求めることができる. 但し, 前節で述べたように, 各入力画像の光源方向は, 非直交座標系におけるものであり, 復元される面特性ベクトルも, 実際のユークリッド空間上での形状を表しているものではない. しかし, 式 (2) は満たしているため, この非直交座標系に基づいて, 画像の線形化を行なうことができる. また, 面特性ベクトルを推定する際には, 影や鏡面反射光などの影響に対してロバストな推定を行なうため, 4 枚以上の画像を入力として, ランダムサンプリングの手法を用いて推定を行なう.

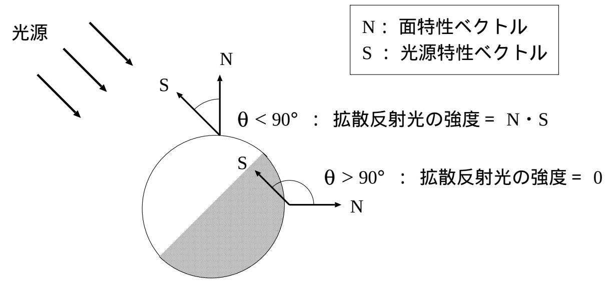

図 5: 拡散反射光と self-shadow

4.2.3 self-shadow の線形化

環境光, 鏡面反射光, cast-shadow を分離した画像には, 見え方の変化要因として拡散反射光と self-shadow が含まれる. 拡散反射光の強度は, 図 5 に示すように, 光源方向と法線方向のなす角が 90 度以下の場合には, 式 (2) のように記述できるが, 光源方向と法線方向のなす角が 90 度以上の場合, つまり self-shadow となる場合には, 式 (2) の値が負となる

のに対し，実際に観測される拡散反射光の強度は 0 である．従って，環境光，鏡面反射光，cast-shadow を除去した後の輝度変化は次式のようになる．

$$\begin{aligned} i &= \alpha(\mathbf{S}\cdot\mathbf{N}) \qquad (6) \\ \alpha &= \begin{cases} 0 & \text{self-shadow の場合} \\ 1 & \text{self-shadow でない場合} \end{cases} \end{aligned}$$

ここで，式 (6) の α が常に 1 であれば，この式は式 (2) と一致し，輝度変化を画像の線形結合により表現することが可能となる．そこで，α の値が常に 1 となるように，入力画像の self-shadow 領域の画素値を，式 (2) の値に置き換える (図 4)．このような補正を行なうことにより，self-shadow を拡散反射と同様に扱うことができ，self-shadow についても画像の線形結合によって表現することが可能となる．

以上の方法により，入力画像から環境光，鏡面反射光，cast-shadow を分離し，self-shadow を線形化することで，入力画像を線形要因のみの画像に変換できる．

4.3 線形結合による画像生成

入力画像は線形化されているため，任意に選んだ 3 枚の画像を用いて画像生成を行なうことが可能であるが，より安定な生成を行なうために，線形化した全画像に対して主成分分析を行ない，画像生成に最適な 3 枚を求める．主成分分析によって得られる第 1～3 主成分が任意光源画像を生成するのに最適な画像となる．これらを用いて，特定の光源方向の画像を生成する場合には，各主成分画像の光源特性ベクトルが必要となる．主成分画像の光源特性ベクトルは，全入力画像の各光源特性ベクトルの線形和として求まり，その線形結合の係数は，全入力画像の線形和によって主成分画像を表した場合の係数と等しい．

生成画像の self-shadow 領域の画素は，式 (2) に従い，負の画素値となる．このような画素に対しては，画素値を 0 に置き変え，実際の self-shadow に戻す．

5 実験結果

図 6: 入力画像の一部

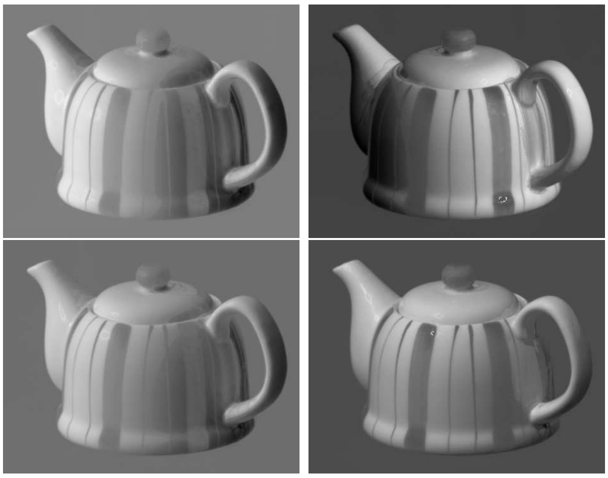

図 7: 線形化した画像の一部

(a) 第 1 主成分　(b) 第 2 主成分　(c) 第 3 主成分

図 8: 線形化した入力画像の主成分画像

本研究で提案する手法の有効性を示すために，陶器製のポットを対象物体として，任意光源画像を生成する実験を行なった．光源にはハロゲンライトを用い，平行光源に近付けるため，物体との距離を十分に離した状態で撮影を行なった．光源位置を変えながら撮影した 27 枚の画像を入力画像とする．入力画像の一部を図 6 に示す．各入力画像を 4 節で述べた手法により線形化した画像の一部を図 7 に示す．これらの画像には補正により生じた継目が見られる．これは，光源特性ベクトルと面特性ベクトルの推定値に含まれる誤差が原因で生じている．次に，線形化した画像に対して主成分分析を行ない，画像生成に最適な基底画像を求めた．第 1～3 主成分画像を図 8 に示す．主成分分析によって求めた基底画像に

表1: 線形化しない画像の主成分の寄与率

	固有値 ($\times 10^8$)	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
1	1.2336	45.075	45.075
2	0.9956	36.380	81.456
3	0.2500	9.136	90.592
4	0.0722	2.636	93.229
5	0.0494	1.805	95.034
6	0.0274	0.999	96.034
7	0.0216	0.787	96.821
8	0.0131	0.478	97.299
9	0.0094	0.377	97.677
10	0.0084	0.343	98.019

表2: 線形化した画像の主成分の寄与率

	固有値 ($\times 10^8$)	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
1	5.4611	67.587	67.587
2	2.1176	26.207	93.795
3	0.4700	5.816	99.612
4	0.0127	0.156	99.769
5	0.0031	0.038	99.807
6	0.0019	0.024	99.831
7	0.0015	0.019	99.851
8	0.0013	0.016	99.867
9	0.0012	0.015	99.883
10	0.0009	0.011	99.895

図9: 線形要因のみの生成画像

図10: 非線形要因を付加した生成画像

は線形化した時に生じた継目が, ほとんど含まれていないことが確認できる. 比較のために, 線形化しない場合の画像と線形化した場合の画像の上位主成分の寄与率をそれぞれ表1, 2に示す. 表1から, 入力画像を直接に用いた場合, 第10固有値においても累積寄与率が約98%であり, 誤差を小さくするためには, 多くの主成分画像が必要となることがわかる. これに対して, 本研究で提案した方法によって線形化した画像の場合, 第3固有値までの累積寄与率が99%以上であり, この三つの主成分画像を用いて, 任意光源方向における線形要因を表現できることがわかる.

線形化した画像の第1~3主成分画像を用いて, 入力画像に含まれない, さまざまな光源方向の画像を生成した結果を図9に示す. この結果から, 本手法により任意光源方向における線形要因を生成できることが確認できる. また, 図9の各生成画像に対して, 光源方向が最も近い入力画像から分離しておいた非線形要因を付加した結果を図10に示す. 現在のシステムでは, 非線形要因を一切加工していないため, 滑らかには変化しないが, これを付加することで物体表面の質感などが加わり, より自然な画像となることが確認できる.

次に, 複数の物体が存在する複雑なシーンに対して本手法を適用した結果を示す. 撮影条件は上述の実験と同じであり, 入力画像の枚数は31枚である. 入力画像の一部を図11に示す. 本手法により, 線形要因を生成した結果を図12に示す. また, これらの画像に, 上述の実験と同じ方法で非線形要因を付加した結果を図13に示す. このように複雑なシーンを対象とした場合には, 入力画像から鏡面反射光とcast-shadowを正しく分離できない部分もあり, その結果, 生成画像において, 本来, cast-shadowがで

きない場所に, cast-shadow ができているなど若干の問題もあるが, 全体的に見れば, 自然な画像が生成できている. なお, 動画を含んだより詳しい実験結果は以下を参照されたい.

http://www.chino.it.okayama-u.ac.jp/research/

6　まとめ

本稿では, 任意照明条件の画像を IBR の枠組で生成する手法として Photometric Image-Based Rendering を提案した. また, 鏡面反射や影を含んだ画像を取り扱うために, 画像を適切に線形化する方法について述べ, 実験によって, 自然な画像が生成できることを確かめた. 静止画としては, 実物とほとんど見分けのつかない画像が得られており, 様々な用途に応用が期待できる . ただし, 鏡面反射などの非線形要因は, 現在のシステムでは一切加工していないため, 滑らかな動画を生成することは難しい.

今後の課題として, 非線形要因を適切に加工し, 光源を移動した場合の動画を生成することがあげられる. また, GIBR と PIBR を組み合わせることにより, 光源の移動だけでなく, 視点位置も変化させた画像の生成も重要であると考えられる.

参考文献

[1] 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史: “全方位ステレオによる実光源環境の計測とそれに基づく仮想物体の実画像への重ね込み”, 信学論 (D-II), vol. J81-D-II, no.5, pp.861-871. 1998.

[2] 松井明, 佐藤宏介, 千原國宏: “多光源画像の KL 展開と環境観測に基づく実照明と仮想照明の複合”, 信学技報 PRMU97-115, pp.29-36, 1997.

[3] 苗村健, 金子正秀, 原島博: “光線記述に基づく仮想光源画像の合成”, 3 次元画像コンファレンス’97, pp.156-161, 1997.

[4] : 中村裕一, 向川康博: “画像 ·映像の知的生成と編集 -CV 技術を用いた新しい画像 ·映像処理-”, コンピュータビジョン, 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳編, 新技術コミュニケーションズ, 17 章 pp.244-261, 1998.

[5] Seizt, S. and Dyer, C.: “View Morphing”, SIGGRAPH’96, pp.21-30, 1996.

[6] Shashua, A: “Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition”, Ph. D thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT, 1992.

[7] 池内克史: “ 反射地図に基づき二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する 2 手法”, 信学論, vol. J65-D, No. 7, pp. 842-849, 1982.

図 11: 入力画像の一部

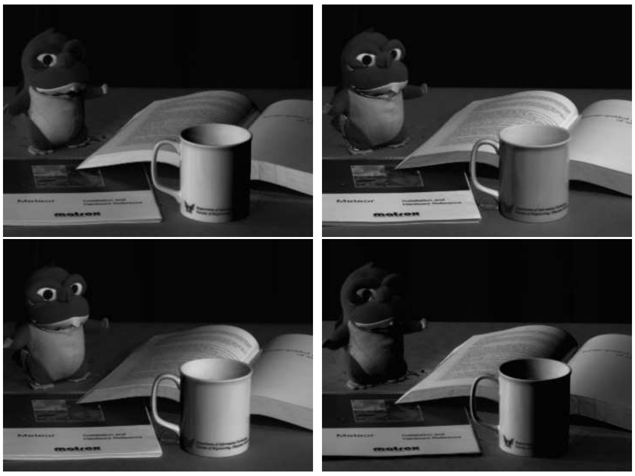

図 12: 線形要因のみの生成画像

図 13: 非線形要因を付加した生成画像

[8] Klinker, J, Shafer, A, Kanade, T: “A Physical Approach to Color Image Understanding”, Int. J. Computer Vision, 4, 1, pp. 7-38. 1990.