鏡平面への映り込みを考慮した Photometric Image-Based Rendering
Photometric Image-Based Rendering for the Scene Including a Mirror Plane

石井 育規　　向川 康博　　尺長 健
Yasunori ISHII　Yasuhiro MUKAIGAWA　Takeshi SHAKUNAGA

岡山大学工学部情報工学科
Department of Information Technology，Faculty of Engineering, Okayama University

1　はじめに

コンピュータグラフィクス (CG) において，自然な陰影の生成は重要な技術課題である．近年，仮想物体を対象とするだけでなく，実世界の物体も対象として，この技術の重大性が増大しつつある．中でも，実世界を対象とした CG は，商品広告，映画など様々な分野への応用が期待されており，実画像と見わけのつかない写実的な画像生成が要求される．

実世界を対象とした画像生成の手法として，Image-Based Rendering(IBR) が提案されている．IBR は物体形状や反射特性などのパラメータを陽に復元することなく，複数の実画像から得られる情報を直接利用するため，写実的な画像が生成できる．我々は，IBR の枠組で，照明変化に伴う光学的な見え方の変化を扱う Photometric Image-Based Rendering(PIBR)[1] の研究を行ってきた．PIBR では，物体の法線方向や反射特性を復元することなく，自然な陰影のある画像が生成できるという利点がある．

シーンを完全拡散反射面，無限遠点光源と仮定した時，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表現できることが知られている [2]．しかし，実世界のシーンでは，影，鏡面反射など拡散反射以外の要因が存在するため，この手法をそのまま適用することは難しい．そこで，我々は，拡散反射以外の要因を含む画像に対し，線形結合の枠組で任意光源方向の画像を生成するために，画像の線形化を提案している [1]．画像の線形化では，光源方向が未知の入力画像から得られる情報のみを利用し，様々な要因が含まれる入力画像を 3 枚の線形結合で表現できるような画像に変換する．

しかし，従来の線形化 [1] では，扱うことのできない現象が存在する．そのような現象の一つに，相互反射の一種である映り込みがある．映り込みは，ある物体に近接する別の物体が映る現象である．実世界では，複数物体が近接していることが多いため，映り込みが存在するシーンの画像生成は重要である．

そこで，本研究では，鏡面反射のみが生じる平面に，別の物体の拡散反射が映り込むシーンを対象とし，PIBR の枠組で任意光源方向の画像を生成する手法を提案する．入力画像は，カメラと物体を固定し，光源を移動させながら撮影したものとする．この入力画像から，物体形状，反射特性を復元することなく，画像の線形化に基づいた任意光源方向の画像生成を行う．

2　PIBRによる画像生成の基本原理

2.1　光学的変化の定式化

物体表面の見えは，図 1 に示すように，主に反射と影に分類される．2 色性反射モデル [3] によれば，反射光は内部反射と表面反射の 2 つの成分の和で表される．内部反射は，物体の表面層に入射した光が表面層内部で乱反射した後，再び大気中に現れた光であり，視線方向に依存せず一定の強度で観測されることから拡散反射 (diffuse reflection) とも呼ばれる．表面反射は，物体表面に入射した光が大気と表面層との境界において反射したものであり，その反射光は正反射方向で最も強く観測されることから鏡面反射 (specular reflection) とも呼ばれる．

影は，物体表面の法線方向ベクトルと光源方向ベクトルとのなす角が 90 度以上の領域に生じる attached shadow と，この角度が 90 度以下にも関わらず，光が遮られるために生じる cast shadow の 2 つに分けられる．

入射光をあらゆる方向に同じ強さで反射する拡散反射をモデル化したものに Lambertian モデルがある．物体表面へ入射する光のエネルギー量は入射角の余弦に比例するため，反射光の輝度も入射角の余弦に比例する．このことから，物体表面の輝度 i は次式で表される．

$$\begin{aligned} i &= |\boldsymbol{n}||\boldsymbol{s}|\cos\theta \\ &= \boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{s} \end{aligned} \tag{1}$$

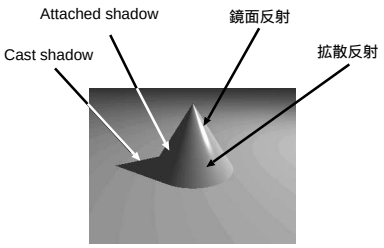


図 1: 光学的な見えの変化要因

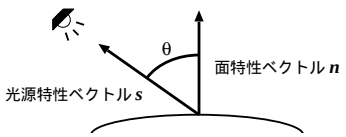


図 2: 拡散反射モデル

ただし，図 2 に示すように，$\boldsymbol{n}$ は物体表面の単位法線ベクトルと拡散反射率との積を表す面特性ベクトルとし，$\boldsymbol{s}$ は単位光源方向ベクトルと光源照度との積を表す光源特性ベクトルとする．また，θ は $\boldsymbol{n}$ と $\boldsymbol{s}$ のなす角とする．シーン中に存在する影のうち，attached shadow 領域では，式 (1) における θ が 90 度以上であるため，i は負の値になる．しかし，実際の画素値は 0 として観測されるため，式 (2) のように書き換えることにより，attached shadow と拡散反射を同じ枠組で扱うことができる [4]．

$$i \quad = \quad max(\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{s},\ 0) \tag{2}$$

2.2 PIBR による画像生成

ここでは，PIBR[1] における，任意光源方向の画像生成法について概要を述べる．

2.2.1 画像生成の流れ

PIBR は，カメラと物体は固定とし，光源方向を変えて撮影した複数の入力画像から，任意光源方向の画像を生成することを目的とする．図 3 に，PIBR の枠組における画像生成の流れを示す．大きく分けて拡散反射成分を生成する過程と，鏡面反射成分を生成する過程に分れている．まず，影や鏡面反射を含む入力画像集合から，任意光源方向の拡散反射成分を生成するための基本的な考え方について述べる．

j 枚の入力画像から，基底画像として 3 枚の画像を選択し，全画素値をベクトルで表現したものを $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ とする．入力画像の画素値が式 (1) を満たす時，任意光源方向の画像 $\boldsymbol{I}_k$ は次式のように線形結合で表現できる．

$$\boldsymbol{I}_k = c_k^1 \boldsymbol{I}_1 + c_k^2 \boldsymbol{I}_2 + c_k^3 \boldsymbol{I}_3 \tag{3}$$

ただし，$\boldsymbol{c}_k = (c_k^1, c_k^2, c_k^3)^T$ は $\boldsymbol{I}_k$ に対する係数組とする．しかし，実世界のシーンでは，影や鏡面反射など拡散反射以外の要因が存在するため，入力画像は式 (1) を満たさず，線形結合による画像生成を直接適用することは難しい．そこで，拡散反射以外の要因が含まれる基底画像を，式 (1) を満たす拡散反射成分のみからなる基底画像に変換する．この変換を画像の線形化と呼ぶ．画像の線形化により得られる，線形化された基底画像の線形結合で任意の入力画像は拡散反射成分のみの画像に置き換えられる．従って，入力画像から拡散反射成分とそれ以外の成分を分離することができる．さらに，図 3 に示すように，拡散反射成分と，鏡面反射成分を別々に扱うことにより，任意光源方向の画像を生成することができる．

2.2.2 画像の線形化による拡散反射成分の生成

画像の線形化によって拡散反射成分のみの基底画像 $\boldsymbol{I}_1^L, \boldsymbol{I}_2^L, \boldsymbol{I}_3^L$ が得られている時，任意光源方向の拡散反射成分のみをもつ画像を生成できる．すなわち，式 (3) において生成したい光源方向に対応した係数組を与えることで，式 (1) を満たす拡散反射成分のみの画像が得られる．ここで，得られた画像の attached shadow 領域では，式 (1) で与えられる画素値が負の値となるため，式 (2) によって 0 に置き換える．これにより，線形結合の枠組で，任意光源方向の attached shadow を含む拡散反射を生成することができる．

2.2.3 モーフィングによる鏡面反射成分の生成

任意光源方向の鏡面反射成分を生成する方法としてはモーフィングを用いる．各入力画像の鏡面反射成分を多角形近似し，入力画像間で対応づけ，モーフィングを行うことで位置・形状および明るさを線形内挿することにより任意光源方向の鏡面反射成分を生成する．しかし，物体表面の鏡面反射成分は，各点ごとの反射特性に依存し，光源の移動に伴う鏡面反射成分の変化は各点ごとに独立しているため，本来，対応関係は存在しない．そこで，各入力画像間の鏡面反射を対応付ける方法として法線の連続性を用いる．実際の法線方向は未知であるが，線形化された 3 枚の基底画像の画素値と法線には線形変換の関係があることを利用して，基底画像を用いて法線の連続性を計ることができる．

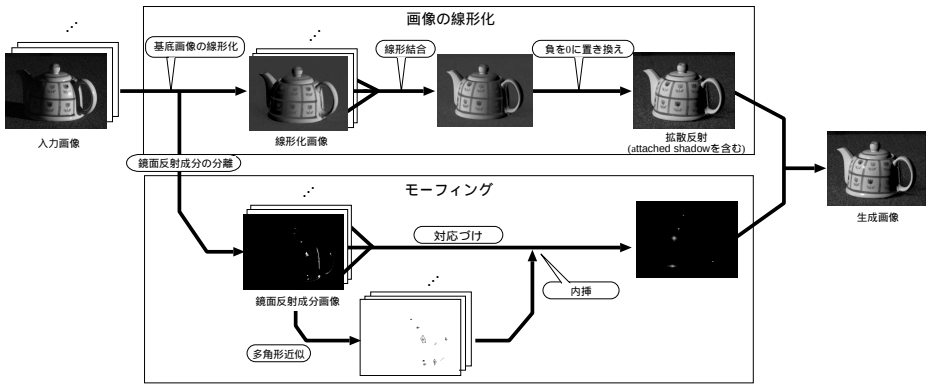


図 3: 画像生成の流れ

従って，鏡面反射を生成する際にも線形化された 3 枚の基底画像は重要な役割を果たす．

3 単一光源下における線形化

2 章で述べたように，PIBR の枠組で画像生成を行うには，入力画像集合の線形化が重要となる．画像を線形化するための手順は 2 段階に分かれている．まず，入力画像から 3 枚の基底画像を選択し，各入力画像を式 (3) を用いて表現するための係数組を推定する．次に，得られた係数組と入力画像から，基底画像を線形化する．具体的なアルゴリズムを以下に述べる．

3.1 線形結合係数組の推定

j 枚の入力画像から基底画像として 3 枚の画像を選択する．各入力画像に対する係数組は，式 (3) を用いることにより，原理的には入力画像と 3 枚の基底画像から求められる．しかし，実際の画像には拡散反射以外の要因が含まれるため，画像の全画素を用いて最小二乗法により係数組を求めた場合，影や鏡面反射などの影響により正しい係数組を求めることはできない．そこで，拡散反射以外の要因を含む入力画像，基底画像から，各入力画像に対応する係数組を求めるための具体的な方法を以下に述べる．

j 枚の入力画像をベクトルで表現したものを $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \cdots, \boldsymbol{I}_j$ とし，選択した 3 枚の基底画像をそれぞれ $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ とする．各入力画像と基底画像が式 (3) によって表される時，k 枚目の入力画像 $\boldsymbol{I}_k$ に対応する係数組 $\boldsymbol{c}_k = (c_k^1, c_k^2, c_k^3)^T$ は，基底画像 $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ と入力画像 $\boldsymbol{I}_k$ から，各画像おいて同一の座標である任意の 3 点を選ぶことにより求められる．そこで，画像からランダムに 3 点を選び，係数組を算出することを繰り返すことにより係数組の分布を得る．選んだ 3 点の中に鏡面反射や影が含まれない場合，正解付近に分布が集中する．しかし，鏡面反射や影が含まれる場合には，画素値が拡散反射成分と比較して大きく異なるため，正解から外れた孤立点となる．従って，図 4 に示すように，係数組の分布から，重心を求め，外れ値除去を繰り返すことにより係数組を推定することができる．

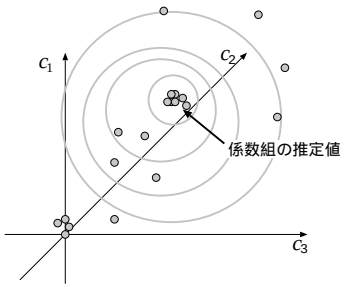


図 4: 係数組の分布図

3.2 基底画像の線形化

次に，入力画像から選んだ 3 枚と，前節で求めた係数組から，式 (3) を用いて基底画像を線形化する方法について述べる．

入力画像それぞれについて式 (3) を満たす係数組は既知である．従って，入力画像が式 (1) を満たす場合，全画像集合から最小二乗法により，拡散反射成分のみの基底画像を算出することができる．しかし，実際の入力画像には拡散反射以外の要因が含まれる．そのため，係数組の場合と同様，影や鏡面反射などの影響により正しく線形化できない．そこで，以下のようにして，拡散反射以外の要因を含む入力画像から安定に基底画像を線形化する．

入力画像から基底画像以外の 3 枚 $\boldsymbol{I}_l$, $\boldsymbol{I}_m$, $\boldsymbol{I}_n$ を選択し，その画像の画素値を i_l, i_m, i_n とする．各画像に対応する係数組を $\boldsymbol{c}_l$, $\boldsymbol{c}_m$, $\boldsymbol{c}_n$ とすると，次式により線形化された基底画像 $\boldsymbol{I}_1^L$, $\boldsymbol{I}_2^L$, $\boldsymbol{I}_3^L$ の画素値 i_1^L, i_2^L, i_3^L を求めることができる．本稿では，i_1^L, i_2^L, i_3^L を線形化された基底画素値と呼ぶ．

$$\begin{bmatrix} i_1^L \\ i_2^L \\ i_3^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_l^T \\ \boldsymbol{c}_m^T \\ \boldsymbol{c}_n^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_l \\ i_m \\ i_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

入力画像には拡散反射以外の要因も含まれる．しかし，選択した i_l, i_m, i_n が拡散反射のみを含む場合，式 (4) により線形化された基底画素値が求められる．従って，入力画像から 3 枚の組合せをランダムに選び，基底画素値の算出を繰り返し行うことにより，正解付近に大きな分布が現れる．一方，3 枚の入力画像 $\boldsymbol{I}_l, \boldsymbol{I}_m, \boldsymbol{I}_n$ 中に影や鏡面反射が含まれる場合，これに対する画素から算出される基底画素値は正解値から大きく外れた孤立点となる．そこで，係数組の推定と同様の方法で最頻値によって線形化された基底画素値を推定することにより，基底画像の線形化を行うことができる．

4 映り込みを考慮した画像生成

4.1 映り込みのあるシーンでの PIBR

3 章では，単一光源のみ存在するシーンを対象とした画像の線形化について述べた．しかし，実世界のシーンには，2.1 節で述べた以外にも，光学的な見えを変化させる要因が存在する．その一つに，図 5 に示すように物体の反射光が別の物体上での鏡面反射として観測される現象があり，これを映り込みと呼ぶ．本稿では，物体の拡散反射光が平面を照らし，その平面上で鏡面反射を起こすことで生じる平面への映り込みを対象とし，線形化の枠組で任意光源方向の画像を生成する手法を提案する．なお，映り込みが観測される完全鏡面反射である平面を鏡平面と呼ぶ．対象とするシーンは，単一光源の場合と同様にカメラと物体を固定とし，光源は無限遠点光源とする．ただし，鏡平面の法線方向と光源方向を既知とする．

物体が鏡平面上に存在する時，平面に対し面対称な物体が映り込みとして観測される．例えば，図 6 に示すように，鏡平面上に半球が存在する場合，半球を上下逆さにしたものが鏡平面に映り込む．このシーンをカメラで撮影すると対象物体は球に見える．さらに，対象物体が鏡平面に映り込むだけでなく，そのシーンを照らす光源も，鏡平面に対し面対称な位置に映り込む．この面対称な位置に映り込んだ光源を対称光源と呼ぶことにする．この時，対象物体は実光源と対称光源の両方より照らされる．

図 5: 鏡平面への映り込み現象

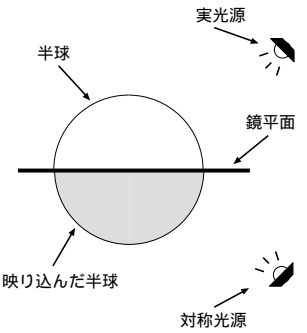


図 6: 半球の映り込み

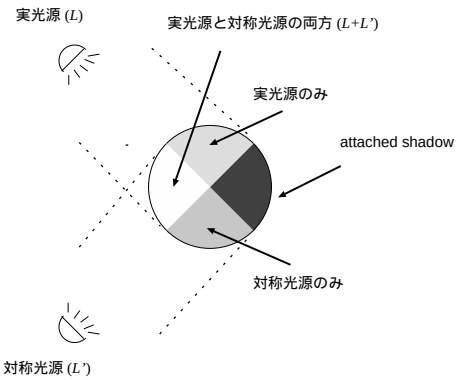


図 7: 対象物体の照らされ方

以上の条件が成り立つ時，鏡平面への映り込み現象を考慮した画像生成は，面対称な 2 光源より照らされるシーンを対象とした画像生成に問題を帰着することができる．

4.2 面対称な 2 光源下での線形化

本節では，面対称な 2 光源が存在するシーンに対して，画像の線形化を実現する方法を述べる．シーン中

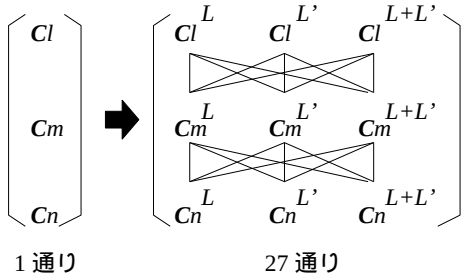


図 8: 係数組の組合せ

に面対称な 2 光源が存在する場合，単一光源の際に用いた線形化をそのまま適用できない．これは，シーンの光源からの照らされ方には，図 7 に示すような 4 つの状態があることによる．即ち，シーン中の対象物体の表面は，実光源のみから照らされている状態，対称光源のみから照らされている状態，実光源と対称光源の両方から照らされている状態，どちらの光源からも照らされていない状態に分けられる．ここで，実光源を L，対称光源を L'，実光源と対称光源の両方を合わせた光源を $L+L'$ とする．本稿では，対象物体上にある点を照らす光源のことを，その点に関する有効光源と呼ぶ．物体が拡散反射面で近似できるとすると，物体上の各点は有効光源に対応する係数組 $\boldsymbol{c}^L$, $\boldsymbol{c}^{L'}$, $\boldsymbol{c}^{L+L'}$ のどれかで表される．

本研究では，係数組 $\boldsymbol{c}^L$ は実測により既知とする．対称光源 L' の方向は，鏡平面の法線方向が既知であるため，鏡平面に対し実光源 L と面対称の方向であることから求められる．鏡平面が完全鏡面反射であるため，対称光源 L' の光源照度は，実光源 L と等しい．よって，係数組 $\boldsymbol{c}^{L'}$ は容易に算出できる．また，係数組 $\boldsymbol{c}^{L+L'}$ は $\boldsymbol{c}^L$ と $\boldsymbol{c}^{L'}$ の和により算出できる．

単一光源のシーンでは，物体上の拡散反射成分は一つの係数組で表現できる．従って，式 (4) における係数組 $\boldsymbol{c}_l$, $\boldsymbol{c}_m$, $\boldsymbol{c}_n$ は各入力画像に対し一意に定まる．しかし，2 光源 L, L' により照らされたシーンの画像では，物体のどの部分が有効光源 L, L', $L+L'$ のいずれで照らされているかを区別することができない．従って，各画素と有効光源との間の対応が明らかでないため，基底画素値を求めることができない．そこで，3 枚の入力画像において各画素に対する有効光源の全組合せを考え，式 (4) を用いて基底画素値を推定する．具体的な方法を以下に述べる．

光源方向の異なる j 枚の入力画像から 3 枚の画像 $\boldsymbol{I}_l$, $\boldsymbol{I}_m$, $\boldsymbol{I}_n$ を選択し，それらの画素値を i_l, i_m, i_n とする．この時，式 (4) における係数組 $\boldsymbol{c}_l$, $\boldsymbol{c}_m$, $\boldsymbol{c}_n$ それぞれに対し，図 8 に示すように各有効光源に対応した

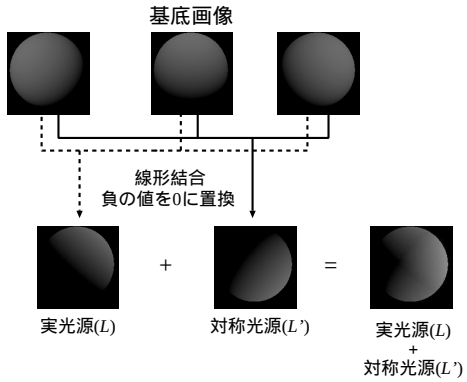


図 9: 画像生成

係数組 $\boldsymbol{c}^L$, $\boldsymbol{c}^{L'}$, $\boldsymbol{c}^{L+L'}$ を割り当てる．これにより得られる全組合せから基底画素値の分布を得る．実際の画像には，光源より直接照らされない attached shadow 領域が存在する．しかし，この領域を選んだ場合には正しい基底画素値は得られないため，図 7 に示す 4 つの状態のうち，有効光源より照らされる 3 つの状態を考える．

入力画像から選択した 3 枚の画像の組合せに対し，各画像の係数組には $\boldsymbol{c}^L$, $\boldsymbol{c}^{L'}$, $\boldsymbol{c}^{L+L'}$ の 3 通りの可能性がある．よって，図 8 に示すように，係数組の組合せは 3^3 通りとなる．入力画像の組合せは全部で ${}_jC_3$ 通りなので，${}_jC_3 \times 3^3$ 通りの基底画素値から最適解を求める問題に帰着できる．3.2 節と同様に，${}_jC_3 \times 3^3$ 通りの基底画素値の分布から，外れ値除去と最頻値推定を繰り返すことにより基底画素値を推定する．これにより，影や鏡面反射など拡散反射以外の要因を含むシーンでも安定に基底画像が求められる．

4.3 映り込みのある画像生成

映り込みのある画像を生成する処理の流れを図 9 に示す．まず，前節で求めた基底画像を用いて実光源 L，対称光源 L' の各光源により照らされた画像を別々に生成する．ここで，生成された画像上では attached shadow 領域の画素値が負の値となるので，0 に置き換える．これにより得られた 2 枚の画像の画素値を足すことで，実光源 L と対称光源 L' の両方より照らされた画像を生成することができる．

4.4 基底画素値推定の曖昧性

図 10 に示すように，基底画素値の分布にはピークが 2 つある．2 つのピークは，各画素がいずれの有効光

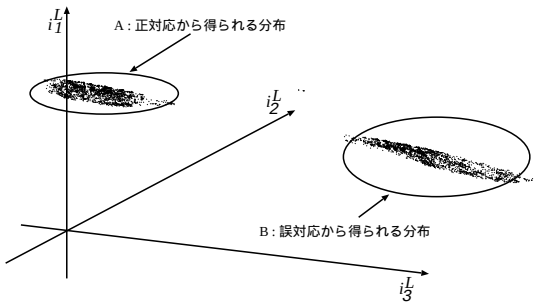


図 10: 基底画素値推定の曖昧性

源より照らされているかを決めることができないために生じる．本稿では，物体を照らす有効光源と基底画素値の算出に用いる係数組との対応が正しいことを正対応と呼ぶ．逆に，有効光源と係数組との対応が誤っていることを誤対応と呼ぶ．以下に具体的な例を用いて説明する．

j 枚の入力画像より選んだ 3 枚の画像の画素値を i_l, i_m, i_n とし，それらは有効光源 L より照らされているとする．図 8 に示す係数組の組合せから $\boldsymbol{c}_l^L, \boldsymbol{c}_m^L, \boldsymbol{c}_n^L$ を選択し，式 (4) より基底画素値を求める．即ち，正対応より基底画素値を求める．この時，図 10 の A に示すような分布が得られる．一方，誤対応より基底画素値を算出した場合，係数組 $\boldsymbol{c}_l^{L'}, \boldsymbol{c}_m^{L'}, \boldsymbol{c}_n^{L'}$ より基底画素値を算出した場合に限り，図 10 の B に示すような分布が得られる．これは，i_l, i_m, i_n が有効光源 L' より照らされていると解釈して得られる分布である．ここで，分布 A と分布 B のどちらが優勢であるかにより，基底画素値の推定結果は異なってくる．

このように，誤対応により生じる分布から基底画素値を推定した時，係数組 $\boldsymbol{c}^L$ を用いて生成した画素値は，有効光源 L' で照らされた画素値となる．逆に，係数組 $\boldsymbol{c}^{L'}$ を用いて生成した画素値は，有効光源 L で照らされた画素値となる．そのため，有効光源 L, L' のそれぞれにより照らされる画像を生成した結果は正しくない．しかし，本手法では，4.3 節に示した方法で，画像生成を行うので，基底画像値として，正対応，誤対応のいずれのピークを求めたとしても最終的に正しい画像を生成できる．従って，このような基底画素値を推定する際に生じる曖昧性は問題とならない．

5 実験結果

カメラと物体を固定し，光源を移動させて撮影した複数枚の画像を入力として，任意光源方向の画像を生成する実験を行った．外部からの環境光および壁や天井で生じる相互反射の影響を取り除くために，画像の撮影には暗室を用いた．

図 11: 入力画像から選択した 3 枚の基底画像

図 12: 線形化された 3 枚の基底画像

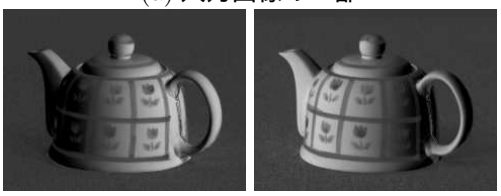
5.1 単一光源下における画像生成結果

単一光源より照らされるシーンにおいて画像生成を行った．対象物体を表面が滑らかなポットとし，光源を鉛直方向に 3 段階，水平方向に 8 段階に動かしながら撮影した合計 24 枚の画像を入力として用いた．

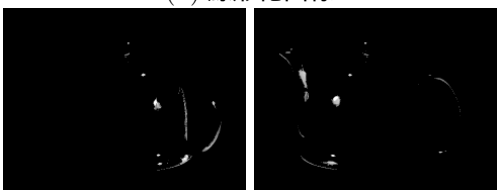
5.1.1 画像の線形化

まず，入力画像から，図 11 に示す 3 枚を基底画像として選択した．これらの基底画像を 3.2 節で述べた手法によって線形化した結果を図 12 に示す．線形化された画像は負の値を持つため，この画像では 0 を灰色で表し，負の方向に大きい方が黒く，正の方向に大きい方が白くなるように表現している．線形化された画像では，鏡面反射や cast shadow が取り除かれ，attached shadow 領域は負の値になっていることが確

(a) 入力画像の一部



(b) 線形化画像



(c) 鏡面反射成分画像

図 13: 入力画像の線形化と鏡面反射成分の分離

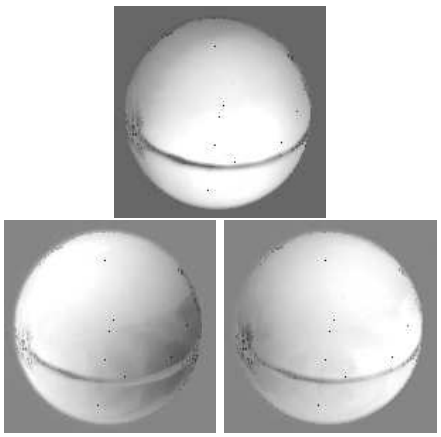
認できる．ただし，把手の下の辺りで，画素値が不連続になっている領域が存在するが，これはほとんどの入力画像中で影になっていたために，線形化に失敗したものと考えられる．

5.1.2 画像生成

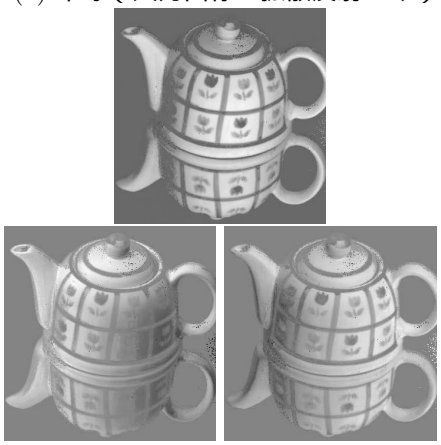
次に，線形化された基底画像を用いて，全ての入力画像を線形化し，鏡面反射成分を分離した．図 13(a) は入力画像の一部であり，それぞれについて線形化した結果が図 13(b) である．入力画像から鏡面反射成分を分離した結果が図 13(c) である．基底画像で線形化に失敗した把手の下の辺りでは正しく分離できていないが，その他の大部分においては，attached shadow 領域においても正しく線形化できており，鏡面反射成分が分離できていることが確認できる．

入力画像に含まれない光源方向の画像を生成した結果を図 14 に示す．線形結合により拡散反射のみを生成した結果を図 14 上段に示す．線形化に失敗した把手の下の部分は，若干の不自然さが残っているが，それ以外の部分は自然な画像が生成できていることが分かる．さらに，モーフィングによって生成した鏡面反射パターンを付加した結果を図 14 下段に示す．物体表面の質感などが加わり，拡散反射のみの画像より自然な画像が生成できていることが確認できる．

図 14: 生成画像 (上段：拡散反射のみ，下段：鏡面反射の付加)



(a) 半球 (入力画像：拡散反射のみ)

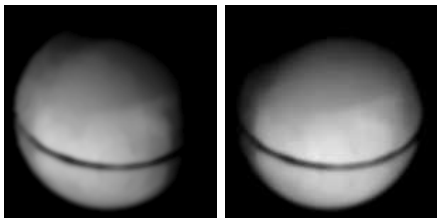


(b) 陶器製のポット (入力画像：鏡面反射を含む)

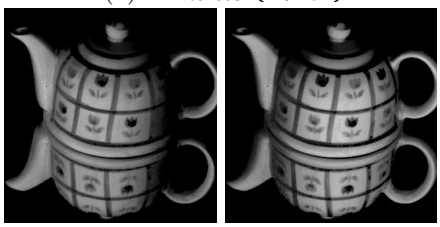
図 15: 基底画像

5.2 映り込みを含む画像生成結果

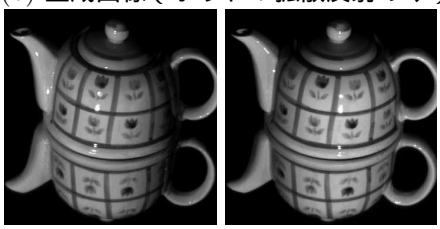
映り込みを含むシーンにおいて画像生成を行った．対象物体を拡散反射のみが生じるゴム製の半球と，鏡面反射を含む陶器製のポットとする．光源を鉛直方向に 6 段階，水平方向に 10 段階動かして撮影した合計



(a) 生成画像 (半球)



(b) 生成画像 (ポット：拡散反射のみ)



(c) 生成画像 (ポット：鏡面反射を付加)

図 16: 画像生成結果

60 枚の画像を入力として用いた．

5.2.1 画像の線形化

まず，映り込みを含むシーンにおいて基底画像の線形化を行った．図 15(a) に半球を線形化した結果を，(b) にポットを線形化した結果を示す．単一光源の場合と同様に，線形化した画像は負の値をもつため，これらの画像も 0 が灰色を示し，負の方向に大きくなると黒く，正の方向に大きい方が白くなるように表現している．4.4 節で述べた曖昧性により，画素値の不連続な所が幾らか存在していることが確認できる．

5.2.2 画像生成

実光源，対称光源のそれぞれに対応する係数組を与え，入力画像には含まれない光源方向の画像を生成した結果を図 16(a)(b) に示す．この結果から，2 光源より照らされた画像を生成した時，基底画像を線形化した際に生じる画素値の曖昧性は問題とならないことがわかる．

また，ポットに対しては，光源方向の最も近い入力画像から取り出した鏡面反射成分を付加した結果を図 16(c) に示す．ポットの注ぎ口付近で画像生成に失敗している部分が見られるが，これは，入力画像中で影となるような画像が多かったためであり，大部分においては自然な画像が生成できていることが確認できる．

6 まとめ

本稿では，物体形状や反射特性などのパラメータを陽に復元することなく，任意光源方向の画像を生成する PIBR の枠組で，映り込みのあるシーンでの画像を生成する手法について論じた．画像の線形化手法により拡散反射成分を生成する方法について述べ，その手法を映り込みのあるシーンにおいて適用する手法を提案した．

実画像を用いた実験により，影や鏡面反射が混在する場合に対して，単一光源の場合と映り込みが存在する場合の両方において本手法が有効であることを確認した．

今後の課題として，対象とするシーンの反射特性が，相互反射などの影響により複雑である場合における画像生成法の検討が挙げられる．また，現在は平行光源を仮定しているが，距離による減衰を考慮した近接光源下での画像生成法の検討も考えられる．

本研究は，科学技術振興事業団 CREST 池内プロジェクトの援助を受けて行った．

参考文献

[1] 向川康博, 宮木一, 三橋貞彦, 尺長健: “Photometric Image-Based Rendering による仮想照明画像の生成”, 情報処理学会 CVIM 論文誌, vol. 41 , no.SIG10(CVIM1) , pp.19-30, 2000.

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

[3] S. A. Shafer: “Using color to separate reflection components”, Color Research and Application, vol. 10 , pp.210-218, 1985.

[4] P.N.Belhumeur and D.J.Kriegman: “What is the Set of Images of an Object Under All Possible Lighting Conditions?”, Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’96), pp.270-277, 1996.