Photometric Image-Based Renderingにおける拡散反射と鏡面反射の生成

宮木 一　　向川 康博　　尺長 健

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

あらまし: 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照明画像を生成するPhotometric Image-Based Renderingの枠組で，拡散反射と鏡面反射を生成する手法を提案する．物体表面上で観測される拡散反射と鏡面反射は，それぞれ異なる性質を持つ．本研究では，これらの性質の違いを考慮し，拡散反射のためには画像の線形化を，鏡面反射のためにはモーフィングをそれぞれ適用する．実画像を用いた実験により，影や鏡面反射が存在する場合だけでなく，光源の形状が写り込む場合にも，自然な画像が生成できることを確認した．

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，照明シミュレーション

Synthesis of Diffuse and Specular Reflections in Photometric Image-Based Rendering

Hajime MIYAKI　　Yasuhiro MUKAIGAWA　　Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology，Faculty of Engineering,
Okayama University
Tsushima-naka 3-1-1，Okayama，700-8530，Japan
E-mail: mukaigaw@chino.it.okayama-u.ac.jp

Abstract: We propose a method for synthesizing diffuse and specular reflections under an arbitrary lighting condition in the framework of Photometric Image-Based Rendering. In this method, it is not necessary to explicitly recover 3D shapes and reflection properties of target objects. Since diffuse and specular reflection components have different properties, we separate these components and apply different methods to each component. The image linearization is used for diffuse reflections, and the morphing is used for specular reflections. Experimental results show that realistic images can be successfully synthesized under complex lighting conditions.

Keyword: CG，Photometric Image-Based Rendering，shading analysis，lighting simulation

1　はじめに

異なる照明条件で撮影された複数の画像から，任意照明条件の画像を生成する技術は，照明環境シミュレーションや拡張現実感などに応用可能である．

従来から，任意照明条件の画像を生成する手法として，照明条件，対象物体の3次元形状，反射特性などをモデル化し，これを直接的に用いて画像生成を行うModel-Based Rendering(MBR)が一般的に利用されている[1]．しかし，MBRによって自然な画像を生成するためには，対象となるシーンに関する精密なモデルを必要とするため，モデルの作成に手間がかかるといった問題がある．

一方，複数の実画像を適切に組み合わせることで，別の見え方を直接的に生成するImage-Based Rendering(IBR)が近年注目されている．IBRでは，実画像から得られる情報を直接的に利用するため，容易に自然な画像を生成できるという利点がある．しかし，従来から提案されている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を主目的としており，照明条件の変化に伴う反射や影などの光学的な見え方の変化については，あまり扱われてこなかった．

そこで，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ために，Photometric Image-Based Rendering(PIBR)を提案している[2][3]．PIBRでは，照明条件の異なる複数の画像を入力とし，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，任意照明条件の画像を生成することを目指している．

同様の目的で，Linら[4][5]は，法線や反射率などを明示的に復元することなく，任意光源方向の鏡面反射成分を生成する手法を提案している．しかし，これらの手法は，Torrance-Sparrowモデルを用いたMBRにおけるパラメータ復元を巧みに回避したものであり，光源の形状自体が写り込むような滑らかな表面を持つ物体に適用することは難しい．

また，入力画像に対してKL展開を施すことによって得られた直交基底を基に，画像を生成する手法が提案されている[6][7]．この手法は，入力画像の種類を増やし，画像生成に利用する直交基底の数を増加させることで，どのような複雑な反射現象にも原理的に対応可能であるが，生成したい光源方向に対する直交基底の係数を解析的に決めることができないため，光源方向の制御が容易でないといった問題がある．また，入力画像枚数が少ない場合は，鏡面反射パターンが滑らかに変化する画像を生成することは難しい．

そこで，本研究では，光源の形状が写り込むような滑らかな表面を持った物体にも適用可能で，比較的少数の入力画像のみを用いるPIBR手法を提案する．提案手法では，カメラを固定した状態で光源を移動させながら撮影した，光源方向が未知の複数の画像を用いて，IBRの枠組で任意光源方向の自然な画像生成を行う．2色性反射モデルによれば，物体表面での反射は，拡散反射と鏡面反射の和で表現できる．拡散反射と鏡面反射は，性質が大きく異なるため，それぞれの性質に適した画像生成法を適用することで，より自然な画像の生成を行う．

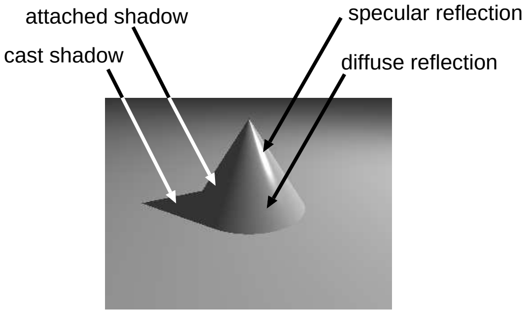


図1: 照明変動による見え方の変化要因

2　光学的変化の定式化

2.1　光源の移動に伴う見え方の変化

光源位置の変化に伴う見え方の変化は，主に反射と影に分類できる(図1)．2色性反射モデルによれば，物体表面での光の反射は，拡散反射(diffuse reflection)と鏡面反射(specular reflection)の二つの成分の和で表される[8]．拡散反射光は，物体表面において表面層へ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．一方，鏡面反射光は，物体表面へ入射した光が大気と表面層との境界において反射した光であり，正反射方向付近で最も強く観測される．影は，物体表面が光源方向を向いていないために生じる影と，物体表面が光を遮られるために生じる影の二つに分けられる．前者はattached shadowと呼ばれ，後者はcast shadowと呼ばれているため[9]，本稿でもそれに従う．これらの成分のうち，拡散反射とattached shadowの生じる領域は光源方向と法線方向の角度のみに依存するのに対し，鏡面反射はこれらに加えて視線方向にも依存する．また，cast shadowは物体の3次元形状に依存する．

2.2　拡散反射モデル

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として，Lambertianモデルが一般的である．面への入射光のエネルギーの量は入射角の余弦に比例するので，反射光の輝度も入射角の余弦に比例す

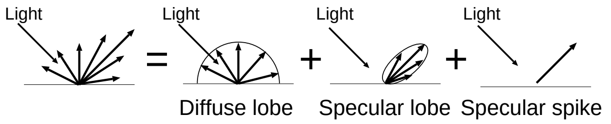


図 2: 反射モデルの概念図

る．このことから，物体表面の輝度 i は次式で表される．

$$\begin{aligned} i &= |\boldsymbol{n}||\boldsymbol{s}|cos\theta_d \qquad (1) \\ &= \boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{s} \qquad (2) \end{aligned}$$

ただし，$\boldsymbol{n}$は物体表面の法線方向単位ベクトルと拡散反射率の積を表す面特性ベクトルとし，$\boldsymbol{s}$は光源方向単位ベクトルと光源照度の積を表す光源特性ベクトルとする．また，θ_dは$\boldsymbol{n}$と$\boldsymbol{s}$のなす角とする．

式(1) において，θ_dが 90 度より大きい時i は負の値となり，物体表面に attached shadow が生じている．attached shadow 領域では輝度が 0 となるため，式 (1) を次式のように書き換えることで，attached shadow を拡散反射と同様に扱うことができる [10]．

$$i = max(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{s}, 0) \qquad (3)$$

この反射モデルでは，光源方向や法線方向が微小量ずれた場合にも，輝度が極端に変化することはない．そのため，この反射モデルは，光源方向や法線方向の誤差に対して比較的安定であるといえる．

2.3 鏡面反射モデル

物体表面での鏡面反射光は，図 2 に示すように specular lobe と specular spike の 2 成分により構成されることが知られている．このうち，specular spike の成分は，入射光に対し反射光が存在する方向は非常に限られているため，この成分は観測されないと仮定し，specular lobe をモデル化した Torrance-Sparrow モデルや Phong モデルなどが広く利用されている．

これらの鏡面反射モデルは，光源方向，法線方向，視線方向がわずかに変化しただけでも，鏡面反射領域の周辺部の輝度が大きく変化する．そのため，これらの反射モデルを利用したパラメータ推定や画像生成は，不安定になることが多い．

3 PIBR の枠組と本研究の位置付け

3.1 PIBR 手法の分類

本研究では，2 章で述べた反射モデルの扱い方という観点から PIBR 手法を二通りに分類する．

3.1.1 反射モデルを間接的に用いる PIBR

この手法は，反射モデルを用いるものの，その反射モデルに含まれるパラメータを明示的に復元することなく，入力画像から得られる情報を利用して画像を生成する．パラメータを一意に推定するための条件が揃っていない場合や，安定にパラメータを推定することが難しい場合に有効な手法である．物体表面の反射が簡潔な反射モデルで表現できない場合は，適用することが難しいが，拡散反射のように対象とする物体表面が簡潔な反射モデルで表現できる場合，パラメータを一意に推定するための条件が揃っていなくても，適用できるという特長がある．

3.1.2 反射モデルを用いない PIBR

この手法は，反射モデルを考慮せず，主に入力画像の補間によって任意照明条件の画像を生成する． 正しい見え方が生成される保証はないが，入力画像の枚数を増やすことによって，より正しい見え方に近付けることが可能である． 無限遠にある点光源を仮定できない場合や光源の形状が物体表面に写り込んでいる場合など，複雑なシーンを対象とする場合に，有効な手法である．

3.2 本研究の位置付け

2.1 節でも述べたように，2 色性反射モデルによれば，物体表面の反射は拡散反射と鏡面反射の二つの成分の和で表される． そこで，本研究では，物体表面の反射に着目し，拡散反射と鏡面反射を扱う．ここで，attached shadow は 2.2 節でも述べたように，光源特性ベクトルと面特性ベクトルにのみ依存する成分であるので，本研究では attached shadow も拡散反射成分の一部とみなす．なお，cast shadow については，対象物体の完全な 3 次元形状を必要とするため本研究では扱わない．

本研究では，カメラを固定し，光源方向が未知である複数の画像を入力とし，任意光源方向の拡散反射と鏡面反射を IBR の枠組で生成することを目的とする． これらの反射は性質が大きく異なるため，各入力画像から拡散反射成分と鏡面反射成分を分離し，それぞれの性質に適した画像生成法を用いる．

拡散反射成分については，基本的に Lambertian モデルを用いる． 本研究では，光源方向を未知としているため，法線方向を一意に復元することができない． したがって，Lambertian モデルを用いるものの，光源方向や法線方向を明示的に復元することなく画像を生成する．この手法は，前節の反射モデルを間接的に用いる PIBR に分類できる．

一方，鏡面反射成分については，反射モデルを用いず，

任意光源方向のパターンを生成する．物体表面が非常に滑らかな場合，光源が物体表面に写り込むといった現象が起こる．この時，物体表面で観測される鏡面反射の形状は光源の形状に依存するため，簡潔な反射モデルで表現することができない．そこで，本研究では，反射モデルを用いずに，入力画像から得られる鏡面反射パターンのモーフィングを行う．この手法は，前節の反射モデルを用いない PIBR に分類できる．

4　拡散反射の生成

4.1　線形結合による画像生成

Shashua[9] は，光源方向が一次独立な 3 枚の画像の線形結合により，任意光源方向の画像が表現できることを示している．すなわち，3 枚の画像の全画素値をラスタースキャンし，列ベクトルとして表現したものを $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ とすれば，任意光源方向の画像 $\boldsymbol{I}_k$ は，式 (4) のように表現できる．

$$\boldsymbol{I}_k = c_k^1 \boldsymbol{I}_1 + c_k^2 \boldsymbol{I}_2 + c_k^3 \boldsymbol{I}_3 \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{c}_k = [c_k^1\ c_k^2\ c_k^3]^T$ を画像 $\boldsymbol{I}_k$ に対する線形結合の係数組とする．

3 枚の画像の線形結合により，光源方向や物体表面の法線方向を用いることなく，任意光源方向の拡散反射成分を安定に生成することが可能となる．しかし，この手法では，光源が無限遠の点光源であることや，物体表面が鏡面反射や影を含まないことを仮定している．そのため，この手法を，様々な形状を持つ一般的な物体を対象とした現実のシーンにそのまま適用することは難しい．

4.2　画像の線形化

現実のシーンに対して 3 枚の線形結合による画像生成法を適用するために，本研究では，鏡面反射や影を含む入力画像を，拡散反射のみを含む拡散反射成分画像に変換する．本研究では，これを画像の線形化と呼ぶ．

光源方向の異なる j 枚の入力画像を，列ベクトルで表現したものを $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \cdots, \boldsymbol{I}_j$ とする．このとき，入力画像が拡散反射のみを含むならば，画像上の任意の 3 点を選び出し，その点における $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ の画素値と各入力画像の画素値の関係から，各入力画像に対する線形結合の係数組を求めることができる．現実のシーンを対象とした場合，入力画像中に鏡面反射や影が含まれているため，式 (4) は成り立たないが，ランダムサンプリングを用いることで，鏡面反射や影を含む入力画像に対しても線形結合の係数組を安定に推定することができる．

この係数組を用いて，入力画像 $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \cdots, \boldsymbol{I}_j$ を拡散反射成分画像 $\boldsymbol{I}_1^L, \boldsymbol{I}_2^L, \cdots, \boldsymbol{I}_j^L$ に線形化する．手順としては，まず $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ を線形化し，次に残りの $\boldsymbol{I}_4, \cdots, \boldsymbol{I}_j$ を線形化する．

まず，$\boldsymbol{I}_4, \cdots, \boldsymbol{I}_j$ から 3 枚の画像を選択し，これを $\boldsymbol{I}_l, \boldsymbol{I}_m, \boldsymbol{I}_n$ とする．それぞれの画像について，係数組 $\boldsymbol{c}_l, \boldsymbol{c}_m, \boldsymbol{c}_n$ は既知なので，これらの組合せで $\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ を再合成し，それぞれ $\boldsymbol{I}_1^{(l,m,n)}, \boldsymbol{I}_2^{(l,m,n)}, \boldsymbol{I}_3^{(l,m,n)}$ とする．この時，ある画素が $\boldsymbol{I}_l, \boldsymbol{I}_m, \boldsymbol{I}_n$ の全ての画像中で拡散反射以外の成分を含んでいないなら，再合成された画像中でも，その画素は拡散反射成分のみを持つ．実際の入力画像には，鏡面反射や cast shadow が含まれるが，一つの画素に注目した場合，これらの成分は狭い範囲の光源方向の場合のみ観測されるため，大部分の光源方向では拡散反射成分のみが観測されると考えられる．そこで，画素ごとに入力画像からランダムに選択した 3 枚の画像 $\boldsymbol{I}_l, \boldsymbol{I}_m, \boldsymbol{I}_n$ の線形結合により，画素値を求めることを繰り返し，画素値の分布を求める．得られた画素値の最頻値を拡散反射成分の画素値とする．この結果，$\boldsymbol{I}_1, \boldsymbol{I}_2, \boldsymbol{I}_3$ に対応する拡散反射成分画像 $\boldsymbol{I}_1^L, \boldsymbol{I}_2^L, \boldsymbol{I}_3^L$ が得られる．さらに，$\boldsymbol{I}_1^L, \boldsymbol{I}_2^L, \boldsymbol{I}_3^L$ と各入力画像の線形結合の係数組 $\boldsymbol{c}_k$ から残りの全ての入力画像の拡散反射成分画像 $\boldsymbol{I}_4^L, \cdots, \boldsymbol{I}_j^L$ が求められる．

本研究の取り扱いにおいても，無限遠の点光源という制約は必要であるが，2.2 節でも述べたように，Lambertian モデルは，光源方向の微小変化に対して，輝度が大きく変わることはないので，物体と光源の距離が十分離れていれば安定に画像を線形化できる．

4.3　拡散反射成分の生成

線形化された $\boldsymbol{I}_1^L, \boldsymbol{I}_2^L, \boldsymbol{I}_3^L$ の線形結合により，任意光源方向の拡散反射の画像生成を行うことができる．入力画像中で attached shadow 領域の画素値は 0 であるが，入力画像に対して線形化を行うと，attached shadow の領域には負の値が入る．そこで，線形化された画像の線形結合により生成した画像の画素値が負の値になっている場合，画素値を 0 と置き換えることにより，attached shadow を含む拡散反射を生成することができる．

従来から，入力画像に KL 展開を施し，多数の直交基底を用いる手法 [6][7] も同様の目的のために用いられているが，これらの手法では，生成したい画像の光源方向に対する直交基底の係数を解析的に求めることができないため，光源方向を制御することは難しい．しかし，本手法では線形化を行うことで画像生成時の光源方向の制御を可能とした．以下で光源方向の制御についての説明を行う．

本研究では入力画像の光源方向は未知と仮定している

が，各入力画像$\boldsymbol{I}_k$ の実際の光源特性ベクトルを $\boldsymbol{s}_k$ とすると，線形結合の係数組 $\boldsymbol{c}_k$ と $\boldsymbol{s}_k$ との間には，式 (5) に示す線形変換の関係が成り立つ．

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{S} \tag{5}$$

ただし，

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_1 & \boldsymbol{c}_2 & \cdots & \boldsymbol{c}_j \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{s}_1 & \boldsymbol{s}_2 & \cdots & \boldsymbol{s}_j \end{bmatrix} \tag{7}$$

とする．つまり，係数組 $\boldsymbol{c}_k$ は，3×3 の変換行列$\boldsymbol{M}$ によって線形変換された空間での光源方向とみなすことができる．行列 $\boldsymbol{S}, \boldsymbol{M}$ ともに未知であるが，その積だけは $\boldsymbol{C}$ として分かっている．従って，線形結合の係数組を利用すれば，入力画像の光源方向との相対的な位置関係で生成画像の光源方向を容易に制御することができる．

5　鏡面反射の生成

5.1　鏡面反射成分のモーフィング

本研究では，鏡面反射成分に関して，以下の条件を満たすような画像生成を目的とする．

(1) 入力画像の光源方向は未知
(2) 光源の写り込みのような現象にも対応可能
(3) 光源方向の連続的な変化に対して鏡面反射も滑らかに変化
(4) 入力画像枚数の増加に伴い生成画像の品質も向上

本手法では，これらの条件を満たすために，モーフィングを用いる．図 3 に示すように，入力画像間で対応づけられた鏡面反射領域を多角形で近似し，隣合う 2 頂点と重心で構成される三角形ごとにモーフィングを行うことで，位置，形状および明るさを内挿する．

この手法では，画像間の鏡面反射領域の対応づけに基づいて画像生成を行うため，光源方向に関する情報は必要でない．また，実際に撮影した画像からパターンを生成するため，光源の写り込みなどの現象も表現できる．さらに，位置，形状および明るさを線形的に内挿することで，光源の連続的な変化に対して，鏡面反射パターンも滑らかに変化する．鏡面反射パターンの線形内挿では，生成されるパターンが正しいという保証はないが，入力画像の枚数を増加させることで，生成したい光源方向に近い入力画像を利用できるため，生成画像の品質を向上させることも可能となる．

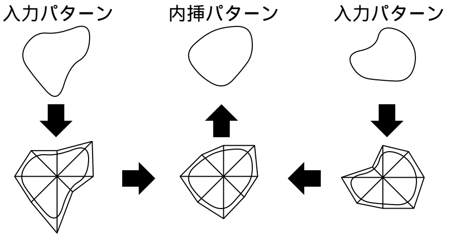


図 3: 多角形近似によるモーフィング

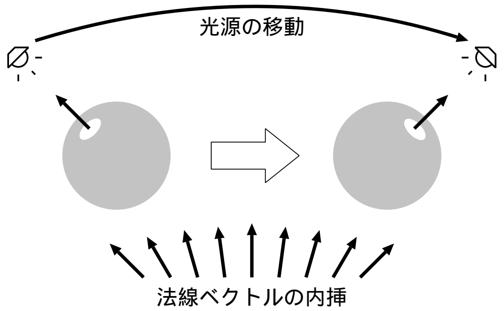


図 4: 鏡面反射領域の法線方向の変化

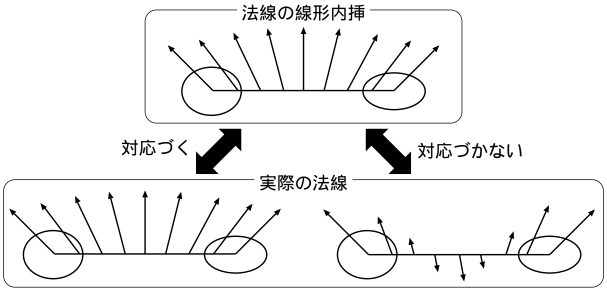


図 5: 鏡面反射領域の対応づけ

5.2　鏡面反射領域の対応づけ

モーフィングを行うためには，各画像間で鏡面反射領域の対応づけが必要となる．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．したがって，異なる領域に起こった鏡面反射には，本来は対応関係は存在しない．そこで，本節では鏡面反射について擬似的な対応関係を定義し，鏡面反射領域を対応づける方法について述べる．

鏡面反射が起こる領域は，光源方向，法線方向，視線方向および各点ごとの反射特性によって決定する． 視線方向が固定されている場合，光源の連続的な移動によって鏡面反射領域が連続的に移動して見えるのは，物体表面の法線方向が連続的に変化しているからである (図 4)．そこで，光源方向の異なる画像中に含まれる鏡面反射領

域間で物体表面の法線方向が連続的に変化している時，この領域は対応していると定義する．

図 5 のように，対応づけの候補となる各鏡面反射領域の重心における法線ベクトルを連続的に線形内挿したベクトルと，対応候補の重心間を結ぶ直線上でサンプリングした実際のベクトルとの角度差の総和を求め，この値が最も小さくなる領域を対応づける．ただし，全ての候補で，この値が閾値を越えた場合は，対応する鏡面反射領域が存在しないものとする．

以上の方法により，法線方向が既知であれば，鏡面反射領域の対応づけが可能となる．しかし，本研究では，光源方向を未知としているため，法線方向を一意に復元することができない．従って，対応づけを行うためには，法線方向の連続性に関する情報が必要となる．

ここで，画像中の全ての画素における実際の面特性ベクトルを$\boldsymbol{n}_1 \cdots \boldsymbol{n}_t$とする．ただし，$t$ は画像中に含まれる画素の総数であり，$\boldsymbol{n}_i$ の実際の値は未知である．この時，以下の式が成り立つ．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I} &= \boldsymbol{NS} && (8)\\ &= (\boldsymbol{NM}^{-1})(\boldsymbol{MS}) && (9)\\ &= (\boldsymbol{NM}^{-1})\boldsymbol{C} && (10) \end{aligned}$$

ただし，

$$\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_1^L & \boldsymbol{I}_2^L & \cdots & \boldsymbol{I}_j^L \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{N} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_1 & \boldsymbol{n}_2 & \cdots & \boldsymbol{n}_t \end{bmatrix}^T \tag{12}$$

とし，$\boldsymbol{M}$ を 3×3 の変換行列とする．ここで，式 (10) において，$\boldsymbol{c}_1 = [1\ 0\ 0]^T$, $\boldsymbol{c}_2 = [0\ 1\ 0]^T$, $\boldsymbol{c}_3 = [0\ 0\ 1]^T$であることに注目すると，次式が成り立つ．

$$\boldsymbol{NM}^{-1} = [\boldsymbol{I}_1^L\ \boldsymbol{I}_2^L\ \boldsymbol{I}_3^L] \tag{13}$$

したがって，線形化された 3 枚の画像によって構成される画像行列 $[\boldsymbol{I}_1^L\ \boldsymbol{I}_2^L\ \boldsymbol{I}_3^L]$ は，面特性ベクトルを行列$\boldsymbol{M}^{-1}$で線形変換したものであることが分かる．ここで，$\boldsymbol{I}_1^L$, $\boldsymbol{I}_2^L$, $\boldsymbol{I}_3^L$ は既知であるので，$\boldsymbol{NM}^{-1}$ も既知となる．線形変換によって，ベクトルの大きさや向きが変わるため，物体表面の反射率，法線ベクトルを一意に復元することはできないが，物体表面の向きの連続性は線形変換後も保たれているため，$\boldsymbol{N}$の向きが連続な領域においては，$\boldsymbol{NM}^{-1}$ の向きも連続になる．したがって，面特性ベクトル$\boldsymbol{N}$ の代わりに画像行列 $[\boldsymbol{I}_1^L\ \boldsymbol{I}_2^L\ \boldsymbol{I}_3^L]$ の連続性を用いて対応づけを行うことが可能となる．

図 6: 入力画像の一部

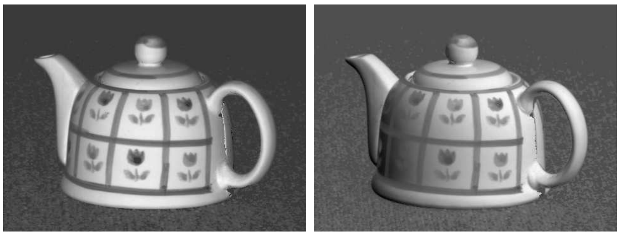


図 7: 拡散反射成分画像の一部

図 8: 鏡面反射成分画像の一部

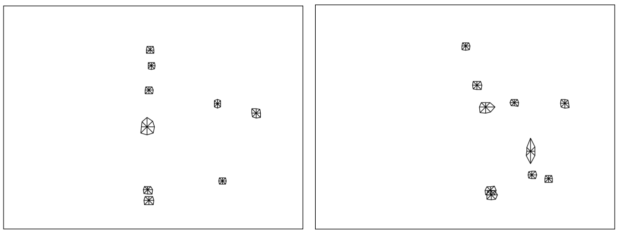


図 9: 多角形で近似した鏡面反射パターン

6 実験結果

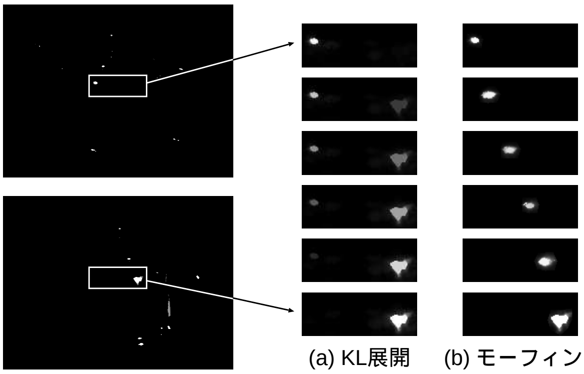
6.1 実験環境

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．

本実験では，図 6 に示すような，表面が非常に滑らかな陶器製のポットを対象とし，ハロゲンライトを垂直方向に 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．

図 10: 拡散反射のみの生成画像

図 11: 鏡面反射を付加した生成画像



(a) KL展開　(b) モーフィング

図 12: 鏡面反射の形状の変化

6.2　入力画像の線形化と鏡面反射成分の分離

まず，入力画像を線形化し，拡散反射成分と鏡面反射成分を分離した．図 7 に拡散反射成分画像の一部を示す．取っ手の下の辺りで線形化に失敗し，画素値が不連続になっている領域が存在するが，画像全体を見れば，大部分で線形化に成功している．また，線形化に失敗した領域は，ほとんどの入力画像で影になっていることを考えると，画像生成にも大きな支障はないと考えられる．

また，入力画像から分離した鏡面反射成分画像の一部を図 8 に示す．鏡面反射成分をほぼ分離できていることが確認できる． この画像中に含まれる各鏡面反射領域を，八角形で近似した画像を図 9 に示す．この結果からも分かるように，鏡面反射パターンの形状に合わせて多角形近似ができていることが確認できる．

6.3　画像生成

提案手法により，拡散反射と鏡面反射を生成した結果を示す．まず，線形化を行った 3 枚の画像の線形結合によって生成した，様々な光源方向の拡散反射成分のみの画像を図 10 に示す．線形化に失敗した取っ手の下の部分は，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．次に，内挿した鏡面反射成分を，図 10 に付加した画像を図 11 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．

また，提案手法の有効性を示すために，提案手法と KL 展開を用いる手法のそれぞれについて，光源方向が連続的に移動した場合の鏡面反射を生成し，比較した．図 12 のように，鏡面反射成分画像中の特定の鏡面反射領域に注目し，光源の移動に伴い，鏡面反射の形状と画素値がどのように変化しているかを調べた． 図 12(a) は KL 展開を用いて生成した結果であり，鏡面反射領域の位置は移動せず，単に入力画像中に含まれる鏡面反射領域の濃淡が変化しているだけの不自然な結果となっている．これに対して，図 12(b) は本手法で生成した結果であり，形状，位置ともに滑らかに変化している．このように，本手法は比較的少数の入力画像を用いて，滑らかに変化する鏡面反射を生成できる．

6.4　線光源下で撮影した画像に対する実験

無限遠の点光源が仮定できず，線光源の形状が写り込むような複雑なシーンに対して，本手法がどの程度有効であるかを確認する実験を行った．図 13 に示すような，陶器製のポットを対象とし，近距離の蛍光灯を垂直方向 4 段階，水平方向 7 段階に動かしながら撮影した合計 28 枚の画像を入力として用いた．

入力画像に対して，線形化を行った結果の一部を図 14 に示す．前節の結果と同様に，取っ手の下の部分で線形化を失敗しているが，それ以外の領域に関してはほぼ正しく線形化できている．また，鏡面反射成分を抽出した結果の一部を図 15 に示す．この結果から，線光源に対する鏡面反射が安定に分離できていることが分かる．

拡散反射，鏡面反射を含む生成画像を図 16 に示す．点光源を仮定した反射モデルを用いた画像生成では，本実験のような光源を用いると，各反射パラメータの推定が不安定になり，自然な画像を生成することは困難であるが，提案手法では，鏡面反射に関してモーフィングを用いているため，光源の形状が写り込んだ時にも自然な画像の生成が可能であることが確認できた．

7　まとめ

本論文では，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

図 13: 入力画像の一部

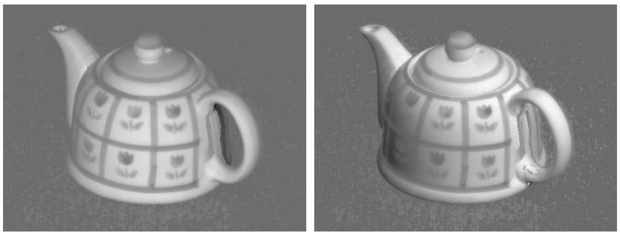


図 14: 拡散反射成分画像の一部

図 15: 鏡面反射成分画像の一部

図 16: 鏡面反射を付加した生成画像

Photometric Image-Based Rendering の枠組で，拡散反射と鏡面反射の生成を行う手法を論じた．物体表面上で観測される拡散反射成分と鏡面反射成分は，異なる性質を持つことを示し，それぞれを安定に分離する方法について述べた．また，これらの性質の違いを考慮し，拡散反射に対しては線形化を，鏡面反射に対してはモーフィングをそれぞれ適用することで，任意光源方向の画像を安定に生成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，本手法が有効であることを確認した．また，無限遠の点光源を仮定できない近距離の線光源においても，比較的安定に画像を生成できることを確認した．

今後の課題として，物体表面上の反射だけでなく，相互反射や cast shadow の生成法の検討が挙げられる．また，従来の IBR 技術と組み合わせることで，光源の移動に伴う光学的な見え方の変化だけでなく，視点位置の変化に伴う幾何学的な見え方の変化も同時に実現することが挙げられる．

参考文献

[1] Y.Sato, M.Wheeler and K.Ikeuchi: “Object Shape and Reflectance Modeling from Observation”, Proc. SIGGRAPH’97, pp.379-387, 1997.

[2] 三橋 貞彦, 宮木 一, 向川 康博, 尺長 健, “任意光源画像生成のための Photometric Image-Based Rendering,” 信学技報 PRMU 98-125, pp.17-24, 1998.

[3] Y.Mukaigawa, S.Mihashi and T.Shakunaga: “Photometric Image-Based Rendering for Virtual Lighting Image Synthesis”, Proc. IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR’99), pp.115-124, 1999.

[4] S.Lin, S.W.Lee: “A Representation of Specular Appearance”, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’99), pp.849-854, 1999.

[5] S.Lin, S.W.Lee: “Estimation of Diffuse and Specular Appearance”, Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’99), pp.855-860, 1999.

[6] 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 PRMU 97-115, pp.29-36, 1997.

[7] 西野恒, 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史: “Eigen-Texture 法：複合現実感のための 3 次元モデルに基づく見えの圧縮と合成”, 信学論 D-II Vol. J82-D-II, No.10, pp.1793-1803, 1999.

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

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

[10] P.N.Belhumeur, 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.