

Photometric Image-Based Rendering による 仮想照明画像の生成

向 川 康 博[†] 宮 木 一[†]
三 橋 貞 彦[†] 尺 長 健[†]

本稿では、対象物体の3次元形状や物体表面の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 (PIBR) を提案し、この枠組みで拡散反射と鏡面反射を生成する手法について述べる。従来の Image-Based Rendering の多くは、視点位置変動にともなう幾何学的な見え方の変化を扱うことを主目的としていたのに対し、PIBR では照明変動にともなう光学的な見え方の変化を扱う。影や鏡面反射が混在するシーンを扱うために、本研究では、物体上で観測される拡散反射成分と鏡面反射成分を分離し、それぞれ別々に取り扱う。拡散反射と鏡面反射は、それぞれ異なる性質を持つため、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。画像の線形化により、物体形状を復元することなく、attached shadow を含む拡散反射を生成できることを示す。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。

Photometric Image-Based Rendering for Realizing Virtual Lighting Conditions in Image Synthesis

YASUHIRO MUKAIGAWA,[†] HAJIME MIYAKI,[†] SADAHIKO MIHASHI[†]
and TAKESHI SHAKUNAGA[†]

We propose a concept of Photometric Image-Based Rendering (PIBR) which realizes virtual lighting conditions in the image synthesis. In this framework, we show how to synthesize diffuse and specular reflections. In the PIBR, it is not necessary to explicitly recover 3D shapes and reflection properties of target objects. The PIBR can cover appearance changes caused by the lighting condition changes, while previous Image-Based Rendering methods mainly aim to cover appearance changes caused by the view point changes. 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. We show that the diffuse reflection with attached shadows can be synthesized by the image linearization without 3D shapes reconstruction of the target objects. Experimental results show that realistic images can be successfully synthesized under complex lighting conditions.

1. はじめに

異なる照明条件で撮影された複数の画像を用いて、仮想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、様々な分野に応用が期待される。

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、対象となるシーンに関するモデルを利用せず、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活用できるため、実画像と見分けのつかない自然な画像を容易に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、視点位置の変化にともなう幾何学的な見え方の変化を扱うことを主目的とする Geometric Image-Based Rendering

[†] 岡山大学工学部情報工学科

Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University

(GIBR) であり, 照明条件の変化にともな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 の枠組みで照明変化にともなう光学的な見え方の変化を扱うために, Photometric Image-Based Rendering (PIBR ^{2),3)} を提案する. PIBR では, カメラと物体を固定して撮影した, 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的とする.

Lin ^{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, 比較的小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 の枠組みで任意光源方向の自然な画像生成を行う. 物体上で観測される主な反射成分として, 拡散反射と鏡面反射があげられるが, 両者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.

2. 光学的変化の定式化

2.1 光源の移動にともなう見え方の変化

光源位置の変化にともなう見え方の変化は, 図 1 に示すように, 主に反射と影に分類できる. 2 色性反射モデルによれば, 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⁸⁾. 内部反射は, 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

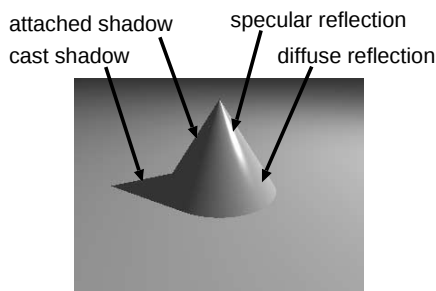


図 1 光学的な見え方の変化要因

Fig. 1 Major photometric factors.

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. 一方, 表面反射は, 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ことから, 鏡面反射 (specular reflection) とも呼ばれる.

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 2 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 モデルが一般的に利用されている. 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.

$$i = |\mathbf{n}| |\mathbf{s}| \cos \theta_d \quad (1)$$

$$= \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} \quad (2)$$

ただし, $\mathbf{n}$ は物体表面の法線方向単位ベクトルと拡散反射率 (albedo) の積を表す面特性ベクトルとし, $\mathbf{s}$ 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 $\mathbf{n}$ と $\mathbf{s}$ のなす角とする.

式 (1) において θ_d が 90° より大きいとき, 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⁾.

$$i = \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{s}, 0) \quad (3)$$

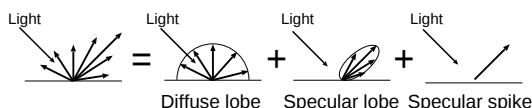


図 2 反射モデル

Fig. 2 Reflection models.

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

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では、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 の枠組みと本研究の位置付け

3.1 PIBR 手法の分類

本研究では、反射モデルの扱い方という観点から PIBR 手法を以下の 2 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い場合でも、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、物体上での反射光は、主に拡散反射と鏡面反射の 2 つの成分の和で表されるため、本研究では反射光として拡散反射と鏡面反射を扱う。また、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 も拡散反射の一部と見なす。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 の枠組み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、法線方向を正しく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。このとき、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

Shashua⁹⁾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、ベクトルとして表現したものを I_1, I_2, I_3 とすれば、任意光源方向の画像 I_k は、式 (4) のように線形結合で表現できる。

$$I_k = c_k^1 I_1 + c_k^2 I_2 + c_k^3 I_3 \quad (4)$$

ここで、 $c_k = [c_k^1 \ c_k^2 \ c_k^3]^T$ を画像 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生成することが可能となる。しかし、この手法は、物体表面が鏡面反射や影をまったく含まないことを仮定しているため、様々な光学現象を含む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

現実のシーンは、鏡面反射や影などを含むため、拡散反射のみを考慮した式 (1) を満たさない。そのため、Georghiades ら¹¹⁾は、閾値処理によって影などの領域をラベル付けしたうえで、特異値分解により得られた光源特性ベクトルと面特性ベクトルを初期値とし、それぞれのベクトルを反復的に修正することで式 (1) を満たすベクトルを推定している。また、表面形状を復元し、レイトレーシングによって cast shadow 領域を見つける方法についても述べている。

一方、本研究では、現実のシーンに対して式 (4) による 3 枚の線形結合を用いた画像生成法を適用するために、鏡面反射や影を含む入力画像を、式 (1) を満たす画像に変換する。変換された画像は、拡散反射成分のみを含み、attached shadow 領域の画素値は式 (1) を満たす負の値となる。この変換によって、各入力画像は式 (4) を完全に満たすようになり、線形的に扱うことができるため、本稿では、この変換作業を画像の線形化と呼ぶ。

入力画像中で式 (1) を満たす成分のみを利用するという意味では、本手法における画像の線形化と線形結合の係数組の推定は、Georghiades らの手法における法線ベクトルと光源ベクトルの推定と基本的に同等である。しかし、本手法では式 (4) のみを基準として拡散反射以外の影響を取り除くため、物体形状を明示的に復元することなく cast shadow の影響を分離することができるという利点がある。

本手法の手順としては、まず、入力画像中から 3 枚の基底画像を選択し、これを線形化する。次に、線形化された基底画像を用いて、すべての入力画像を線形化し、各入力画像から鏡面反射成分を分離する。具体的なアルゴリズムを、以下に順に述べる。

4.2.1 基底画像の選択と線形結合係数組の算出

まず、入力画像中から、光源方向が同一平面上に載らない 3 枚の画像を選択し、これを基底画像とする。基底画像の選択方法によって、線形化の精度は変化する。入力画像中で影の割合が少ない場合には、光源方向が互いに直交する 3 枚を選択すれば、精度が高くな

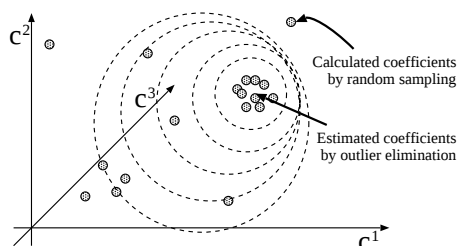


図3 ランダムサンプリングと外れ値除去による係数組の推定
Fig. 3 Estimation of the coefficients by random sampling and outlier elimination.

る。一方、影の割合が多い場合には、光源方向の角度差が大きいと、3 枚の画像で共通して観測できる拡散反射領域が小さくなるため、不安定になる。最適な基底画像の選択方法は、物体の形状に強く依存するため、一般的に述べることは難しいが、予備実験では光源方向の角度差が互いに $40 \sim 50^\circ$ となる 3 枚の基底画像によって安定に線形化ができることを確認している。

ここで、光源方向の異なる j 枚の入力画像を、ベクトルで表現したものを $I_1, I_2, \dots, I_j$ とし、選択した基底画像をそれぞれ I_1, I_2, I_3 とする。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、その点における基底画像の画素値と各入力画像 I_k ($k = 4, \dots, j$) 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 c_k を求めることができる。しかし、現実のシーンを対象とした場合、入力画像には鏡面反射や影が含まれているため、式 (4) は必ずしも成り立たない。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し、係数組の分布を得る。図 3 に示すように、鏡面反射や影が含まれていない 3 点を選択した場合には、正しい係数組が求まり、正解付近の頻度が高くなる。一方、鏡面反射や影が含まれている場合には、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。そこで、図 3 の破線で示すように、重心を求めて外れ値を除去することを繰り返すことで、最終的に最頻値となる係数組を決定する。

以上で述べたランダムサンプリングと外れ値除去により、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比較的安定に推定することができる。

4.2.2 基底画像の線形化

次に、前項で求められた各入力画像に対する係数組を用いて、基底画像を線形化する。まず、基底画像以外の入力画像から 3 枚の画像を選択し、これを I_l, I_m, I_n とする。前項において、それぞれの画像に対する係数組 c_l, c_m, c_n は既知なので、これらの組合せで

基底画像 I_1, I_2, I_3 を再合成し、それぞれ $I_1^{(l,m,n)}$, $I_2^{(l,m,n)}$, $I_3^{(l,m,n)}$ とする。このとき、ある画素が I_l, I_m, I_n のすべての画像中で拡散反射のみを含んでいれば、再合成された画像中でも、その画素は拡散反射のみを持つ。実際の入力画像には、鏡面反射や影が含まれるが、1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のみが観測されると考えられる。そこで、前項と同様に、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 I_l, I_m, I_n の線形結合により、基底画像の画素値を求めることを繰り返す。得られた画素値の分布から、外れ値除去によって、画素値の最頻値を推定する。この結果、 I_1, I_2, I_3 を線形化した画像 I_1^L, I_2^L, I_3^L が得られる。

4.2.3 入力画像の線形化と鏡面反射成分の分離

前項までの手順により、線形化された基底画像 I_1^L, I_2^L, I_3^L と各入力画像の線形結合の係数組 c_k が得られている。線形化された基底画像を各係数組で線形結合することで、すべての入力画像を線形化した画像 $I_4^L, \dots, I_j^L$ が容易に求められる。さらに、各入力画像と線形化画像を比較することによって、鏡面反射成分のみを分離できる。相互反射の影響を考えないとすれば、線形化画像で正の値を持ち、入力画像中で線形化画像よりも大きな画素値を持つ領域が、鏡面反射成分と見なすことができる。この方法では、光源色と物体色が同じであっても、鏡面反射成分を分離できる⁹⁾。同様にして、入力画像中で線形化画像よりも小さく0に近い画素値を持つ領域を、cast shadowとして分離できる。

本研究の取扱いにおいても、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

線形化された基底画像 I_1^L, I_2^L, 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。線形結合によって生成された画像では、attached shadow領域の画素値は負の値を持つため、これを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、生成したい光源方向のベクトルと、それに対応する直交基底の係数の間に幾何学的な関係がない。そのため、すべての入力画像に

対する係数を記録しておき、それらの補間によって係数を算出する。したがって、係数を任意に変化させて光源方向を制御することは難しく、与えた係数によっては、本来ありえない見え方を生成してしまう危険性がある。しかし、本手法では画像の線形化を行うことで、3つの係数組と光源方向の間に幾何学的な関係を導くことができるため、画像生成時の光源方向の制御が容易となる。以下で、本手法の光源方向の制御について述べる。

本研究では、各基底画像に対する光源特性ベクトル s_1, s_2, s_3 は未知と仮定している。ここで、次式に示すように、光源特性ベクトルを係数組 c_1, c_2, c_3 に変換する 3×3 の行列 M を考える。

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

実際の光源特性ベクトルが未知であるため、行列 M も未知である。この行列 M は、正規直交系である実空間の光源特性ベクトルを、基底画像に対する係数組 c_1, c_2, c_3 で張られる空間に線形変換する行列である。つまり、各入力画像 I_k について、実際の光源特性ベクトル s_k と線形結合の係数組 c_k の間には、式(6)に示す線形変換の関係が成り立つ。

$$C = MS \quad (6)$$

ただし、

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \cdots & c_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

とする。つまり、係数組 c_k は、 M によって線形変換された空間での光源方向と見なすことができる。行列 S, M とともに未知であるが、その積だけは C として分かっている。したがって、線形結合の係数組を利用すれば、単に係数を内挿するのではなく、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制御することができる。さらに、どのような係数を与えても、その係数に対応する光源特性ベクトルが存在するため、本来ありえない見え方を生成してしまうこともない。

もちろん、画像の撮影時に3つの光源特性ベクトル s_1, s_2, s_3 を正確に計測することができれば、 M を

求めることができ、与えられた光源特性ベクトル s_k に対する係数組 c_k を算出できるため、実世界での光源方向を与えて画像を生成することも可能である。

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ともな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4に示すように、入力画像間に対応付けられた鏡面反射領域を多角形で近似し、隣り合う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付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。

5.2 鏡面反射領域の対応付け

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付けが必要となる。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、光源の移動にともな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付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まる。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、図5に示すように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。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

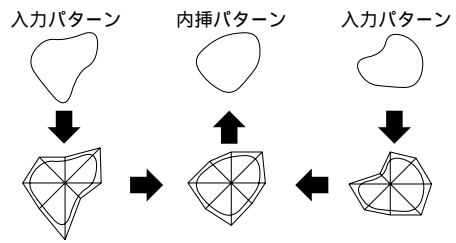


図4 モーフィングによる鏡面反射の内挿
Fig. 4 Interpolation of specular reflection by morphing.

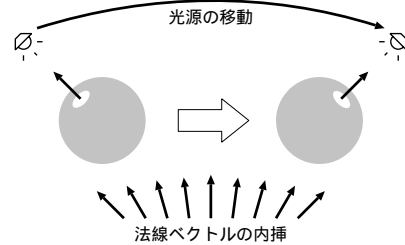


図5 法線方向の変化
Fig. 5 Transition of normal vectors.

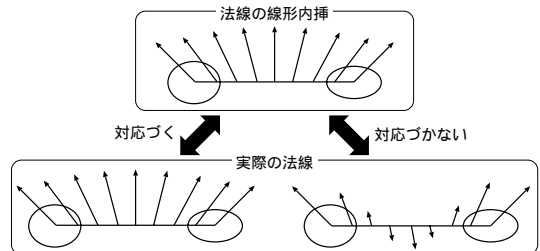


図6 鏡面反射領域の対応付け
Fig. 6 Corresponding regions of specular reflection.

が連続的に変化しているとき、この領域は対応していると定義する。

図6のように、対応付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平均を求め、この値が最も小さくなる領域を対応付ける。ただし、すべての候補で、この値が閾値を超えた場合は、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付けが可能となる。しかし、本研究では、光源方向を未知としているため、正しい法線方向を復元することができない。したがって、対応付けを行うためには、法線方向の連続性に関する情報が必要となる。

ここで、画像中のすべての画素における実際の面特性ベクトルを $n_1 \cdots n_t$ とする。ただし、 t は画像中



(a) [1, 0, 0]



(b) [0, 1, 0]



(c) [0, 0, 1]

図 7 3 枚の基底画像

Fig. 7 Three base images.



図 8 線形化された基底画像

Fig. 8 Linearized base images.

に含まれる画素の総数であり、 n_i の実際の値は未知である。このとき、式 (6) の関係より、画像行列 I は次式のように表現できる。

$$I = NS \quad (9)$$

$$= (NM^{-1})(MS) \quad (10)$$

$$= (NM^{-1})C \quad (11)$$

ただし、

$$I = \begin{bmatrix} I_1^L & I_2^L & \cdots & I_j^L \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$N = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \cdots & n_t \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

とする。つまり、本来は式 (9) のように面特性ベクトルと光源特性ベクトルの積として表現される画像は、式 (11) のように行列 M^{-1} で線形変換された面特性ベクトルと係数組の積としても表現できることを示している。ここで、式 (4) より、明らかに $c_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $c_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ 、 $c_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ であることに注目すると、式 (11) より、次式の関係が成り立つ。

$$NM^{-1} = [I_1^L \ I_2^L \ I_3^L] \quad (14)$$

つまり、行列 M^{-1} で線形変換された面特性ベクトルは、線形化された 3 枚の基底画像によって構成され

る画像行列と等しいことを示している。ここで、 I_1^L 、 I_2^L 、 I_3^L は既知であるため、 N と M^{-1} は未知であっても、その積だけは既知となる。

光源方向が未知の場合には、本来の面特性ベクトルを正しく復元することはできず、線形変換による任意性が残ってしまうが^{(10),(11)}、物体表面の向きの連続性は線形変換後も保たれている。そのため、 N の向きが連続な領域においては、 NM^{-1} の向きも連続になる。したがって、未知である面特性ベクトル N の代わりに、線形化された基底画像の画素値の連続性を用いて対応付けを行うことが可能となる。

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、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。

6.2 基底画像の線形化

まず、入力画像から、図 7 に示す 3 枚を基底画像

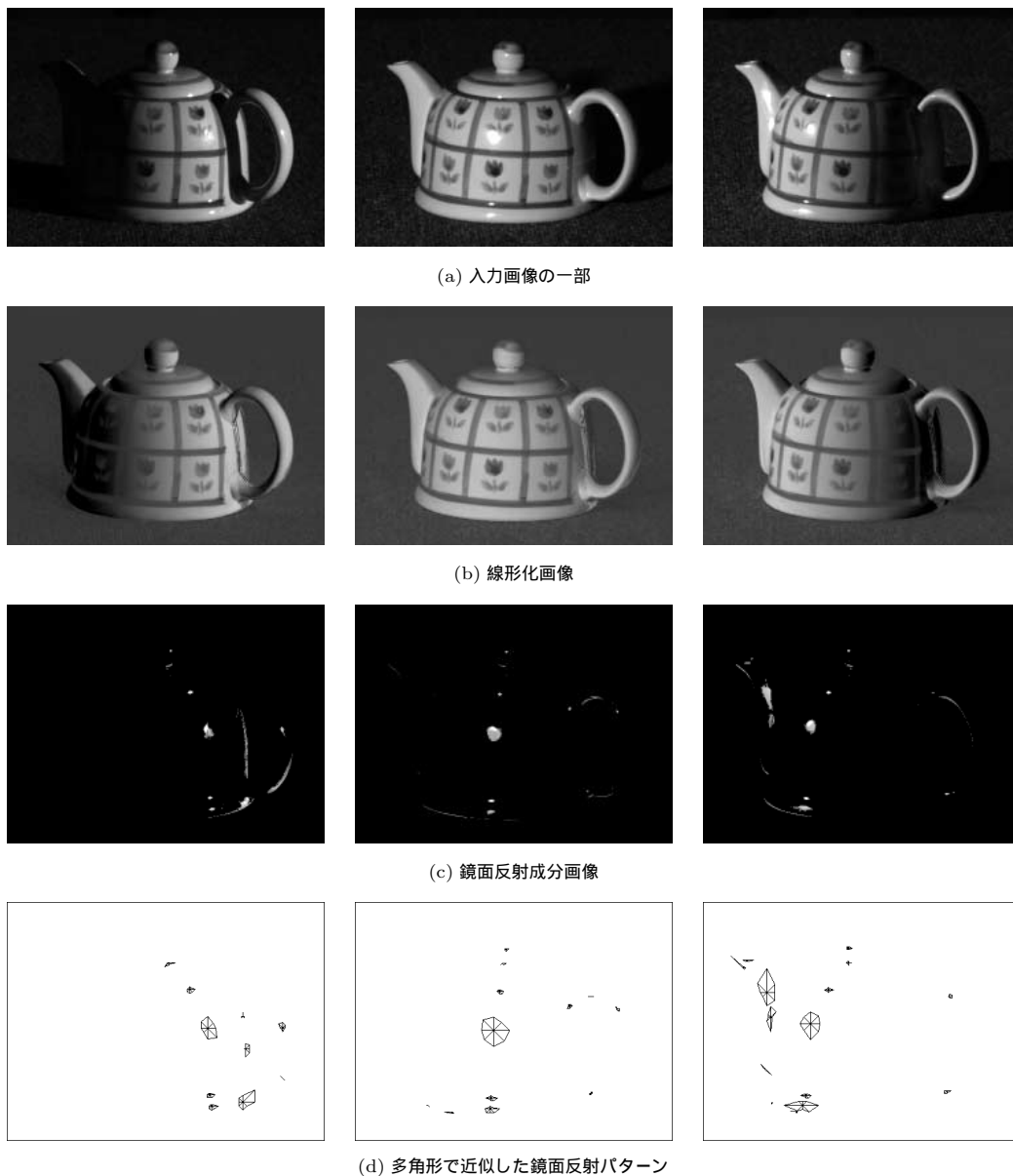


図9 入力画像の線形化と鏡面反射成分の分離

Fig. 9 Linearization of the input images and decomposition of specular reflection components.

として選択し，これらの線形結合の係数組をそれぞれ $[1, 0, 0]$ ， $[0, 1, 0]$ ， $[0, 0, 1]$ とした．これらの基底画像を 4.2 節で述べた手法によって線形化した結果を図 8 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認できる．ただし，把手の下あたりで，

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の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．

6.3 入力画像の線形化と鏡面反射成分の分離

次に，線形化された基底画像を用いて，すべての入力画像を線形化し，鏡面反射成分を分離した．図 9 (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 9 (b) である．基底画像で線形化に失敗した把手の下あたりでは正しく分離できていないが，

表 1 生成画像の係数

Table 1 Coefficients of the synthesized images.

	(a)	(b)	(c)
入力画像に含まれる係数	(0.569, -0.313, 0.991) (-0.095, -0.407, 1.094)	(0.562, 1.063, -0.265) (0.268, 0.875, 0.332)	(-0.510, 0.298, 0.910) (-0.320, 0.509, 0.674)
生成画像の係数	(0.248, -0.376, 1.088)	(0.434, 1.013, 0.035)	(-0.420, 0.409, 0.803)

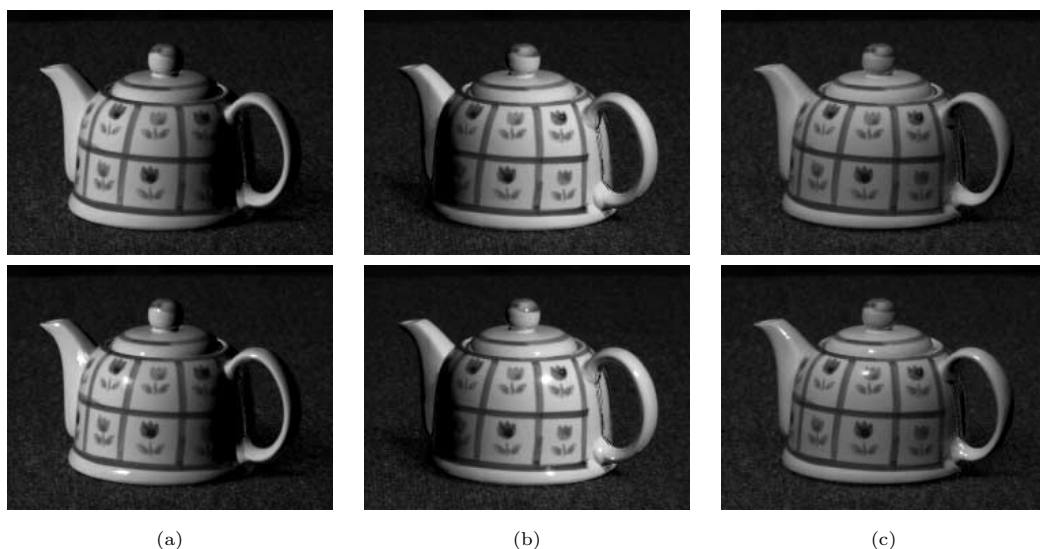


図 10 生成画像 (上段: 拡散反射のみ, 下段: 鏡面反射の付加)
Fig. 10 Synthesized images (top: diffuse reflection, bottom: diffuse and specular reflection).

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いることが確認できる.

また, 入力画像から分離した鏡面反射領域と, 各領域を八角形で近似した結果をそれぞれ図 9 (c), (d) に示す. 分離された鏡面反射成分には多少のノイズが含まれているが, モーフィングで対応付けるべき大きな領域については, 正しく分離され多角形近似ができていることが確認できる.

6.4 画像生成

提案手法により, 入力画像に含まれない光源方向の画像を生成する実験を行った. 表 1 に示すように, 光源方向が隣接する 2 組の入力画像の係数を 1:1 に内分する係数を算出し, さらに係数のノルム (光源照度に相当) も 1:1 に内分した大きさとなるように補正した係数を与えて画像を生成した. それぞれの係数について, 線形化された基底画像の線形結合によって生成した拡散反射成分のみの画像を図 10 上段に示す. 線形化に失敗した把手の下部分は, 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 10 下段に示す. 物体表面の質感などが加わり, 拡散反射

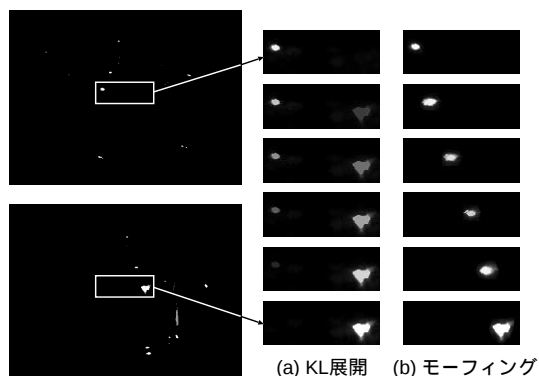
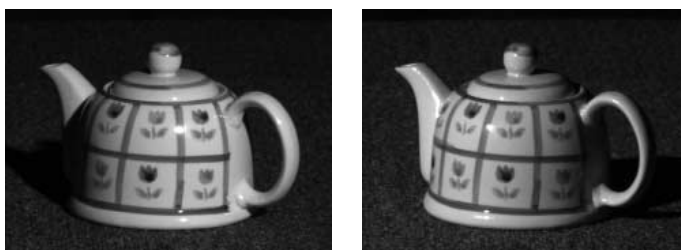


図 11 鏡面反射パターンの変化
Fig. 11 Transition of specular reflection patterns.

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, 鏡面反射パターンのモーフィング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 11 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, 光源の移動にともなって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 11 (a) は KL 展開を用



(a) [1.094, 0.601, 0.0245]

(b) [0.569, -0.313, 0.991]

図 12 2 枚の実画像

Fig. 12 Two real images.



(a) [1.113, 0.430, 0.308]

(b) [1.027, 0.177, 0.627]

(c) [0.817, -0.099, 0.874]

図 13 内挿画像の生成結果

Fig. 13 Results of interpolation between two real images.

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 11 (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。

さらに、生成画像の係数組が、入力画像に含まれる係数組と近い場合と遠い場合で、どのように品質が変化するかを調べる実験を行った。図 12 に示すように、実空間で光源方向がおおよそ 50° 離れている 2 枚の画像を入力画像中から選択し、それらの係数組を 5 等分する方向で、係数のノルムが連続的に変化するように補正した係数によって中間の見え方を生成した結果を図 13 に示す。入力画像との角度差が大きいために、鏡面反射領域の対応付けに失敗し、一部の鏡面反射が欠落しているが、入力画像の光源方向と離れていても、視覚的に十分な画像が得られていることが分かる。

6.5 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 14 (a) 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 (b) に示す。前節の結果と同様に、把手の下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 14 (c) 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。

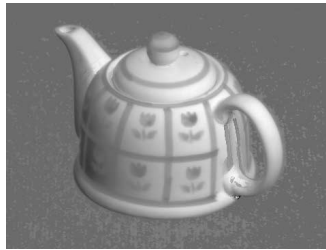
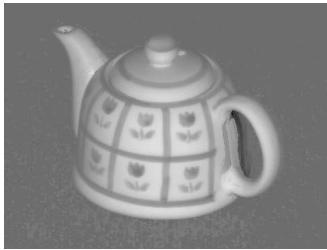
拡散反射と鏡面反射を含む生成画像を図 14 (d) に示す。点光源を仮定した反射モデルを用いた画像生成では、本実験のような光源を用いると、各反射パラメータの推定が不安定になり、自然な画像を生成することは困難であるが、提案手法では、鏡面反射に関してモーフィングを用いているため、光源の形状が写り込んだときにも自然な画像の生成が可能であることが確認できた。

7. ま と め

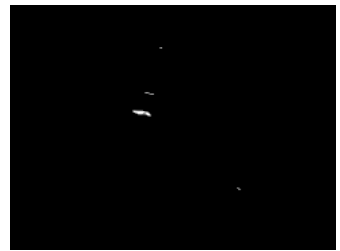
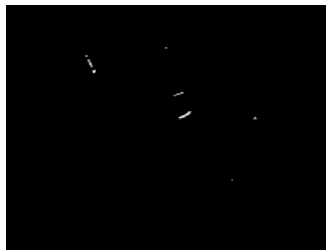
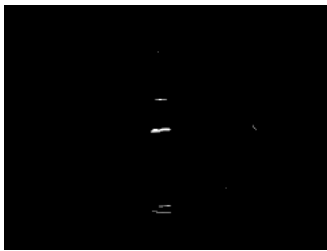
本稿では、物体形状や反射特性などのパラメータを陽に復元することなく任意照明画像を生成する Photometric Image-Based Rendering (PIBR) を提案し、この枠組みで、拡散反射と鏡面反射の生成を行う手法を論じた。現実のシーンには、鏡面反射や影などの光学現象が含まれるため、入力画像を線形化し、拡散反



(a) 入力画像の一部



(b) 線形化画像



(c) 鏡面反射成分画像



(d) 鏡面反射を付加した生成画像

図 14 線光源下での画像生成結果

Fig. 14 Result of image synthesis under the linear light source.

射成分のみを持つ画像に変換する方法について述べた．画像の線形化によって，物体形状を復元することなく鏡面反射や cast shadow を分離できるだけでなく，attached shadow を含む拡散反射成分を生成できることを示した．また，物体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，これらの性質の違いを考慮して，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，鏡面反射パターンの変化をとみな

う任意光源方向の画像を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も，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．

本稿では，相互反射や cast shadow の生成については取り扱わなかったが，今後の課題として，このようなより複雑な光学現象を IBR の枠組みで再現する方

法を明らかにすることがあげられる。ただし、対象物体の形状復元をまったくともなわずに、これらの現象を再現することは、容易ではないと考えられる。我々が提案する PIBR は、形状復元の精度に依存した画像生成を回避し、実画像から得られる情報を最大限に活用して、実物と見分けのつかない自然な画像を生成することが目的である。実際に、本手法においても、鏡面反射パターンは法線情報を直接用いて生成しているわけではないが、モーフィングの対応付けのために法線の連続性に関する情報は利用している。すなわち、自然な画像を生成するためには IBR の枠組みが有利であるが、画像生成の手がかりとして、大まかに復元された物体形状を補助的に利用することが現実的であると考えられる。

また、従来の IBR 技術と組み合わせることで、光源の移動にともなう光学的な見え方の変化だけでなく、視点位置の変化にともなう幾何学的な見え方の変化も同時に実現することも今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) Sato, Y., Wheeler, M. and Ikeuchi, K.: 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) Mukaigawa, Y., Mihashi, S. and Shakunaga, T.: 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) Lin, S. and Lee, S.W.: A Representation of Specular Appearance, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '99)*, pp.849-854 (1999).
- 5) Lin, S. and Lee, S.W.: 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) Shafer, S.A.: Using color to separate reflection components, *Color Research and Application*, Vol.10, pp.210-218 (1985).
- 9) Shashua, A.: Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition, Ph.D. Thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT (1992).
- 10) Belhumeur, P.N. and Kriegman, D.J.: 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).
- 11) Georgiades, A.S., Kriegman, D.J. and Belhumeur, P.N.: Illumination Cones for Recognition Under Variable Lighting: Faces, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '98)*, pp.52-58 (1998).

(平成 12 年 3 月 16 日受付)

(平成 12 年 9 月 14 日採録)

(担当編集委員 佐藤 洋一)



向川 康博 (正会員)

平成 9 年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年より岡山大学助手。コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスの研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



宮木 一

平成 12 年岡山大学大学院工学研究科修了。同年三洋電機 (株) 入社。



三橋 貞彦

平成 11 年岡山大学大学院工学研究科修了。同年三洋電機 (株) 入社。



尺長 健 (正会員)

昭和 53 年京都大学大学院修士課程修了。同年 NTT 入社。平成 5~6 年カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員。平成 8 年より岡山大学教授。画像認識・理解, 人工知能, パターン認識の研究に従事。工学博士。共訳書「ロボットビジョン」(朝倉書店)。電子情報通信学会, IEEE 各会員。