

画像の線形化による光学現象の解析

向川 康博[†] 石井 育規[†] 尺 長 健[†]

画像の線形化とは、様々な光学現象を含む入力画像を、3枚の画像の線形結合で表現できる画像に変換する手法である。従来から、画像の線形化に基づいて光学現象を解析する手法が提案されている。しかし、従来法には、相互反射が存在してはならないという制約があった。本稿では、物体表面を Lambert 面、相互反射を 2 次反射と仮定し、相互反射を含むシーンにおいても、画像の線形化と光学現象の解析が可能であることを示す。まず、相互反射で照らされる画素では、画像の線形化によって、入力画素値が他の面から受ける相互反射の影響を完全に表現できる完全相互反射成分に変換されることを示す。次に、入力画素値と完全相互反射成分の比較からなる相互反射の分類基準を提案する。この分類基準には、各画素の光学現象を解析することで、その画素に相互反射の影響を与える面の光学現象も解析できるという特長がある。実画像を用いた実験により、相互反射を含むシーンの光学現象を解析できることを示す。

Analysis of Reflection and Shadow by Photometric Linearization

YASUHIRO MUKAIGAWA,[†] YASUNORI ISHII[†] and TAKESHI SHAKUNAGA[†]

The photometric linearization is a method which converts real images including various photometric factors into ideal images which can be expressed by the linear combination of three base images. Some methods have been proposed for analyzing reflections and shadows based on the photometric linearization. The previous method, however, was restricted to scenes without interreflections. This paper discusses the photometric linearization and classification method for Lambertian surfaces and at most 2-bounce interreflections. We show that when a pixel is illuminated from other surfaces, the pixel intensity is converted into an ideal interreflection by applying the linearization method. The ideal interreflection can completely represent an effect of interreflections, because shadows are eliminated. We propose a classification criterion of interreflection by comparing a pixel intensity of the input image with that of the linearized image. The proposed method has an advantage that the surface which illuminates the target pixel can be also classified by classifying the target pixel. Experimental results show that the proposed method can correctly classify photometric factors even if scenes include considerable interreflections.

1. はじめに

物体の見えは、光源方向、物体形状、反射率によって様々に変化する。実画像には、反射や影などの様々な光学現象が混在するため、照度差ステレオ法¹⁾、顔画像認識²⁾、実画像に基づく画像生成³⁾など、多くのコンピュータビジョン手法の妨げとなる。したがって、実画像に含まれる光学現象を詳細に解析する技術が必要である。

Shashua⁴⁾は、物体が凸形状であり、観測される光学現象が拡散反射のみであるとき、3枚の画像の線形結合で任意光源方向の画像を表現できることを示している。しかし、実画像には、影や鏡面反射が存在する

ため、3枚の画像の線形結合で実画像を完全に表現することはできない。Belhumeurら⁵⁾は、照明錐モデルにより拡散反射と attached shadow を表現できることを示している。しかし、そのためには、大量の画像が必要となるため、実用上の問題から検討課題が残されている。この問題を解決するために、球面調和関数を用いることで照明錐モデルを近似する研究^{6)~9)}も行われている。これらは、任意光源方向の画像が比較的少ないデータ量で近似表現できるが、拡散反射成分を忠実に表現できないという問題がある。

鏡面反射の解析手法として、実画像上で観測される鏡面反射を分離する方法、パラメータ復元にに基づく方法などがある。鏡面反射を分離する方法には、2色性反射モデルに基づいて拡散反射と鏡面反射の色の違いを利用する方法^{10)~13)}や、鏡面反射の偏光性を利用する方法^{14)~16)}などが提案されている。しかし、こ

[†] 岡山大学工学部情報工学科

Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University

これらの手法には、鏡面反射は分離できるが、影の解析はできないという共通の限界がある。一方、パラメータ復元により解析を行う方法として、形状が既知である物体の反射パラメータを復元して推定された拡散反射成分の輝度と観測輝度を比較する方法¹⁷⁾や、数点サンプリングした画素値を特異値分解することにより物体形状と反射率を求め、光源方向と照度を既知として鏡面反射成分のパラメータ復元を行う方法¹⁸⁾などが提案されている。これらは、復元したパラメータを操作することにより、任意光源・視点方向の画像を表現できるが、形状や反射パラメータを高精度に復元することは容易でない。以上のように、物体形状を比較的単純な凸形状とした場合においても、光学現象の解析を行うことは一般に容易でない。

物体が凸形状でない場合には、cast shadow と相互反射も観測される。cast shadow は、シーンの 3 次元形状に基づいて、レイトレーシング法など既存の CG 技法によって解析できる。相互反射は、色を利用する方法や、形状復元に基づく方法などによる解析が行われている。眞鍋ら¹⁹⁾は、光源変化にともなう色の変化と明るさ変化の差異に着目し、相互反射・鏡面反射を判別する方法を提案している。橋本ら²⁰⁾、富永ら²¹⁾は、相互反射の色空間モデルを構築してカラー画像での解析を行っている。色を利用する手法には、鏡面反射と相互反射を区別できるという利点があるが、光源色と物体色が異なるシーンにしか適用できない。

また、Yu ら²²⁾は 3 次元形状が既知と仮定し、ラジオシティ法によって相互反射の影響を考慮した物体表面の反射特性の推定法を提案している。この手法は、形状が複雑な物体の解析が行えるが、正確な 3 次元形状の獲得が必要となる。Nayar ら²³⁾は、形状復元問題を通して相互反射が生じるシーンの解析を行っている。この手法では、誤って復元される形状を初期値として、相互反射の物理的な生成過程を考慮した繰返し法により、形状復元を行っている。この方法には、多次反射による相互反射が含まれるシーンの形状を復元できるという利点があるが、影や鏡面反射が存在するシーンでは正確に形状を復元することは容易でない。以上のように様々な解析手法が提案されているが、実画像は様々な光学現象を含むため、これらの解析手法を直接適用することは難しい。

一方、向川ら³⁾は、シーンの 3 次元形状や反射特性などを復元することなく、様々な光学現象が含まれる実画像を、3 枚の画像の線形結合で表現できるように変換する画像の線形化と呼ぶ手法を提案している。石井ら²⁴⁾は、画像の線形化と物体表面に生じる光学現

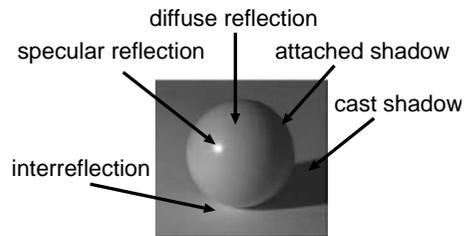


図 1 実画像に含まれる様々な光学現象

Fig. 1 Photometric factors included in an image.

象との関係を明らかにし、画像の線形化に基づいた拡散反射・鏡面反射・attached shadow・cast shadow の解析法を提案している。しかし、物体が凸形状でないときに生じる相互反射の影響は検討されていなかった。

そこで、本稿では、まず画像の線形化と相互反射の関係を明らかにする。この関係に基づいて、相互反射が存在するシーンの光学現象を解析するための新しい分類基準を提案する。本研究では、対象物体の表面を Lambert 面とする。また、ある面で反射した光が対象としている面に再び入射することで生じる 2 次反射による相互反射を扱う。このような前提条件のもとで、相互反射が生じるシーンの光学現象を解析する。本研究で提案する解析手法は画像の線形化に基づくため、3 次元形状や反射特性などのパラメータ復元が必要ないだけでなく、影も解析できるという特長がある。

2. 画像の線形化に基づく光学現象の分類

本章では、相互反射を含まないシーンを対象とし、画像の線形化³⁾に基づいて光学現象を分類する従来法²⁴⁾を概説する。

2.1 物体表面で観測される光学現象

物体表面で観測される光学現象は、光源方向、物体形状によって様々に変化する。図 1 に示すように、物体表面で観測される光学現象は、主に反射と影に分けられる。反射は、表面層内部で乱反射することで生じる拡散反射 (diffuse reflection)、大気と表面層との境界において反射することで生じる鏡面反射 (specular reflection)、ある面の反射光が別の面を照らすことで生じる相互反射 (interreflection) に分けられる。影は、物体表面が光源方向を向いていないために生じる attached shadow、光が遮られるために生じる cast shadow に分けられる。Lambert モデルによれば、拡散反射成分の輝度 i は式 (1) で表される。

$$i = n^T s \quad (1)$$

ただし、 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、 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を表す．シーン中に存在する影のうち，attached shadow 領域では， n と s のなす角が90度以上であるため，式(1)は負の値になる．しかし，実画像において，attached shadow の画素値は0に近い．一方，cast shadow 領域では，実画像で観測される輝度は0に近いが，式(1)は正の値となる．また，鏡面反射が生じている点の輝度は，拡散反射成分に鏡面反射成分を加えたものとして観測される．相互反射が生じている点の輝度は，拡散反射成分に相互反射成分を加えたものとして観測される．

2.2 光学現象の分類基準

向川ら³⁾は，シーン中に相互反射が存在しないと仮定して，影や鏡面反射が含まれる実画像を，式(1)を完全に満たす拡散反射成分のみの画像に変換する，画像の線形化と呼ぶ手法を提案している．さらに，石井ら²⁴⁾は，影や鏡面反射を含む実画像が，画像の線形化によって拡散反射成分のみの画像に変換できることに着目し，光学現象の解析を行っている．この手法では，カメラと物体を固定し，光源方向のみを変化させながら複数枚の画像を撮影する．これらの入力画像を線形化し，入力画像とそれを線形化した画像を比較することで，各画素を拡散反射・鏡面反射・attached shadow・cast shadow の4種類のいずれかに分類する．この分類は以下の性質に基づく．

- 拡散反射領域は，線形化の前後で変化しない．
- 鏡面反射領域は，線形化すると鏡面反射成分が除去される．
- attached shadow 領域は，線形化すると画素値が式(1)を満たす負の値となる．
- cast shadow 領域は，線形化すると画素値が本来の拡散反射成分の画素値となる．

このような性質を利用した，各光学現象への分類基準を式(2)に示す．

$$\begin{aligned}
 \text{Region}(k, p) = & \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 D : \text{if } (|i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L| \leq T \times i_{(k,p)}) \\
 \quad \cap (i_{(k,p)} \geq T_s) \\
 S : \text{if } (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L > T \times i_{(k,p)}) \\
 \quad \cap (i_{(k,p)}^L \geq 0) \cap (i_{(k,p)} \geq T_s) \\
 A : \text{if } (i_{(k,p)}^L < 0) \cap (i_{(k,p)} < T_s) \\
 C : \text{if } (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L < -T \times i_{(k,p)}) \\
 \quad \cap (i_{(k,p)} < T_s) \\
 U : \text{otherwise}
 \end{array} \right. \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで， D, S, A, C, U は，それぞれ拡散反射・鏡面反射・attached shadow・cast shadow・未定義であ

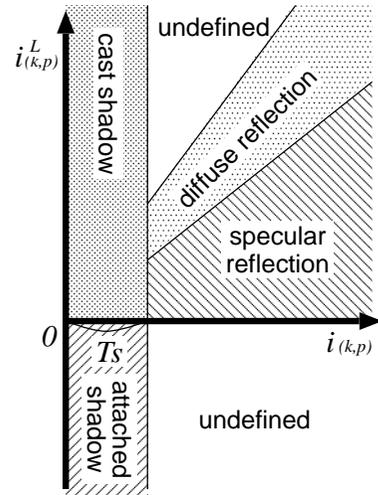


図2 光学現象の分類基準

Fig. 2 Criterion for classification of photometric factors.

ることを示し， k 番目の入力画像における，画素 p の画素値を $i_{(k,p)}$ ，それを線形化した画素値を $i_{(k,p)}^L$ とする． T は，本来の拡散反射成分からどれだけ離れているかを示す閾値である．入力画像の画素値 $i_{(k,p)}$ と線形化画像の画素値 $i_{(k,p)}^L$ の比較には， T を $i_{(k,p)}$ で相対化した値を用いる．これにより，物体表面の明るさが異なる場合にも，安定に拡散反射成分を分類できる．一方，カメラの暗電流特性や感度特性などの影響により，実画像において，影領域の画素値は完全には0にならない．そこで，閾値 T_s より暗い画素を影領域と判断する．撮影環境によって最適な閾値 T_s の値は異なるが，入力画像における影の画素値は大きく変化せず，明らかなピークが存在するという性質があることが実験的に確かめられている²⁴⁾ ことから，本研究でも入力画像中の影領域から画素値を手動で数点サンプリングすることで，影の閾値 T_s を設定する．

式(2)の関係を， $i_{(k,p)}$ と $i_{(k,p)}^L$ で張られる2次元平面として考えると図2のような関係になる．この分類基準では，入力画像だけでは区別つかない attached shadow と cast shadow が，線形化された画像を用いることで容易に区別できる．また，単なる閾値では拡散反射と鏡面反射を区別することは容易でないが，この分類基準を用いることにより，それらを容易に分類できる．

以上で述べたように，光学現象の分類基準による解析は，入力画像とそれを線形化した画像の画素値を比較するだけで行われるため，3次元形状，反射特性，光源方向などを復元する必要がないという大きな利点がある．

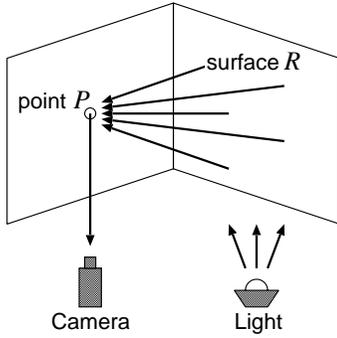


図 3 2次反射によって生じる相互反射
Fig. 3 2-bounce interreflection.

3. 相互反射を含むシーンの解析

3.1 問題設定

2章で述べた光学現象の分類基準では、シーン中に相互反射が存在してはならないという制限があった。そこで、本研究では、相互反射と画像の線形化の関係を明らかにし、それに基づいて相互反射を含むシーンの光学現象を解析する。

本研究では問題の単純化のために、鏡面反射の存在するシーンは取り扱わず、物体表面を Lambert 面と仮定する。鏡面反射によって生じる相互反射も無視できないが、線形化画素値との比較のみで光学現象を分類する本手法では、拡散反射によって生じる相互反射と、鏡面反射によって生じる相互反射を区別することは容易ではない。鏡面反射への対応は今後の検討課題である。

また、実シーンには、3 次以上の多次反射も存在するが、その影響は比較的小さいため無視できると考えられる。そのため、本稿では、図 3 に示すように、ある面 R で反射した光が、解析の対象となる微小面 P に再び入射する 2 次反射によって生じる相互反射を扱う。この 2 次反射の元となる面を相互反射面 R と呼ぶ。つまり、本研究では、相互反射の中でも、相互反射面 R の拡散反射光が微小面 P に入射することで観測される相互反射のみを扱う。

微小面 P で観測される光学現象は、相互反射面 R の光学現象にも依存する。このことから、微小面 P の光学現象の解析は、微小面 P と相互反射面 R の両方の光学現象を考慮することにより行われる。本稿では、微小面 P で観測される画素値の変化に着目することで、相互反射面 R の光学現象も同時に分類できる光学現象の分類基準を提案する。

3.2 相互反射と画像の線形化の関係

相互反射によって照らされる微小面 P での観測輝

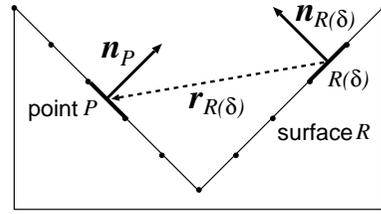


図 4 微小面 P と R(δ) の関係
Fig. 4 Relationship between small facet P and R(δ).

度 i は、式 (3) で表される。

$$i = \mathbf{n}_P^T \mathbf{s} + \int_R \mathbf{n}_P^T \mathbf{s}_{R(\delta)} d\delta \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{n}_P は微小面 P の面特性ベクトル、 \mathbf{s} は実光源の光源特性ベクトル、 $\mathbf{s}_{R(\delta)}$ は相互反射面 R 上の微小面 $R(\delta)$ から P へ入射する光源特性ベクトルである。

Nayar ら²³⁾ は、物体表面の 3 次元形状を考慮した相互反射モデルを提案している。図 4 に示すような、微小面 P、 $R(\delta)$ の面特性ベクトル \mathbf{n}_P 、 $\mathbf{n}_{R(\delta)}$ と、 $R(\delta)$ から P へのベクトル $\mathbf{r}_{R(\delta)}$ の関係で相互反射を考える。ここで、 \mathbf{n}_P と $\mathbf{n}_{R(\delta)}$ のノルムは同一である必要はないため、相互反射を生じている両面の反射率が異なってもかまわない。このとき、式 (3) の $\mathbf{s}_{R(\delta)}$ は式 (4) のように置き換えられる。

$$\mathbf{s}_{R(\delta)} = \mathbf{K}(P, R(\delta)) \mathbf{n}_{R(\delta)}^T \mathbf{s} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{K}(P, R(\delta))$ は、微小面 $R(\delta)$ で生じる反射光が P へ到達する際の方向と距離による減衰を表す項である。この項は、 $R(\delta)$ から P へ向かう単位方向ベクトルを、 $R(\delta)$ と P の距離の二乗で割った値として、式 (5) のように定義される。

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(P, R(\delta)) &= \frac{\mathbf{r}_{R(\delta)}}{|\mathbf{r}_{R(\delta)}|} \times \frac{1}{|\mathbf{r}_{R(\delta)}|^2} \\ &= \frac{\mathbf{r}_{R(\delta)}}{|\mathbf{r}_{R(\delta)}|^3} \end{aligned} \quad (5)$$

以上のことから、式 (4) によって、式 (3) は式 (6) に変換できる。

$$i = \mathbf{n}_P^T \mathbf{s} + \int_R \mathbf{n}_P^T \mathbf{K}(P, R(\delta)) \mathbf{n}_{R(\delta)}^T \mathbf{s} d\delta \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{n}'_P を式 (7) のように設定する。

$$\mathbf{n}'_P{}^T = \mathbf{n}_P^T + \int_R \mathbf{n}_P^T \mathbf{K}(P, R(\delta)) \mathbf{n}_{R(\delta)}^T d\delta \quad (7)$$

これにより、式 (6) は式 (8) のように変換できる。

$$i = \mathbf{n}'_P{}^T \mathbf{s} \quad (8)$$

これは、微小面 P の法線 \mathbf{n}_P を、 \mathbf{n}'_P と解釈したことに相当する。この解釈は、図 5 のように考える

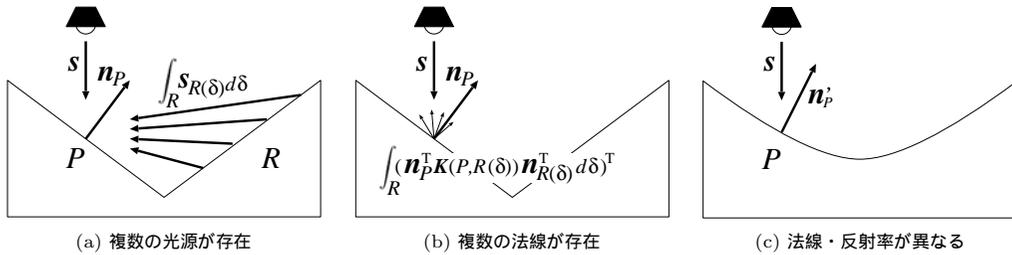


図 5 相互反射の影響の解釈

Fig. 5 Some interpretations of effect of interreflections.

ことができる．本来，相互反射は，図 5 (a) のように，微小面 P の面特性ベクトルと 2 次反射による複数の光源特性ベクトルの関係によって決まる．この関係は，図 5 (b) に示す光源特性ベクトルと複数の面特性ベクトルの関係と本質的に等価である．ここで，複数の面特性ベクトルは，1 つの面特性ベクトル n'_P に置き換えることができる．したがって，図 5 (c) のように，法線方向・反射率が変化したと解釈することで，相互反射は光源特性ベクトル s と面特性ベクトル n'_P のみで表現できる．

このように，Lambert 面で生じる 2 次反射までを考慮した相互反射は式 (8) で表現でき，式 (8) は式 (1) と本質的に等価である．このことから，微小面 P ，相互反射面 R がいずれとも影でなければ，相互反射も 3 枚の画像の線形結合で表現できることが導かれる⁵⁾．したがって，相互反射で照らされる画素の画素値は，画像の線形化によって式 (8) で表現できる値に変換される．式 (8) で表現できる成分は，相互反射を完全に表現できる成分であることから，本稿ではこれを完全相互反射成分と呼ぶ．

3.3 相互反射の影響を受ける画素の判別

凸形状物体の表面上の点のように相互反射の影響を受けない画素の値は，画像の線形化によって拡散反射成分に変換される．一方，前節では，相互反射の影響を受ける画素の値は，画像の線形化によって完全相互反射成分に変換されることを示した．このように，画像の線形化によって変換された線形化画素値の意味は画素ごとに異なる．拡散反射成分に変換された場合は，2.2 節で述べた光学現象の分類基準により分類できる．しかし，完全相互反射成分に変換された場合は，従来の分類基準で解析できないため，新たな分類基準が必要となる．2 種類の分類基準を使い分けるためには，まず，各画素がいずれの成分に変換されたかを判別する必要がある．以下，相互反射の影響を受けない画素を p^D ，影響を受ける画素を p^I と呼ぶ．

ここで， p^D と p^I を線形化した値は，それぞれ式

(1)，(8) で表され，式の上では本質的に等価である．しかし，実際には影が生じた場合の画素値の変化には違いが生じる．たとえば，ある点が影領域であった場合，それが p^D であれば 0 に近い値となるが， p^I であれば相互反射の影響で若干明るくなる．そこで，本研究では，この違いに着目して，相互反射の影響を受ける画素か否かの判別を行う．

線形化によって p^D の画素値は拡散反射成分に変換されるため，式 (2) に示した光学現象の分類基準で，拡散反射・attached shadow・cast shadow のいずれかに分類されるはずであり，未定義とはならない．一方， p^I の画素値は完全相互反射成分に変換されるため，この分類基準では正しく分類できない．例として，図 6 (a) に示す入力画像中で，矢印の先が指している画素 A, B の入力画素値と線形化画素値の関係を，それぞれ図 6 (b), (c) に示す． p^D では，(b) のように拡散反射・attached shadow・cast shadow に正しく分類される．一方， p^I では，(c) のように未定義に分類される場合もある．この性質に基づいて，相互反射の影響を受ける画素か否かの判別を行う．

本稿では，式 (9) に示すように，各画素 p ごとに，全入力画像を $Classifiable(k, p)$ で評価し，拡散反射・attached shadow・cast shadow へ正しく分類される画素数の入力画像枚数 n に対する割合で判別を行う．この割合が閾値 T_N より小さいとき，相互反射の影響を受ける画素 p^I であると判別する．

$$\begin{cases} p^I : & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Classifiable(k, p) < T_N \\ p^D : & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

ここで， $Classifiable(k, p)$ は次式で定義される関数であり， k 番目の入力画像の画素 p が，拡散反射・attached shadow・cast shadow のいずれかに分類できる場合に 1 となり，それ以外の場合に 0 となる．この評価を全画素に対して行うことで，相互反射の影響を受けるかどうかを判別する．

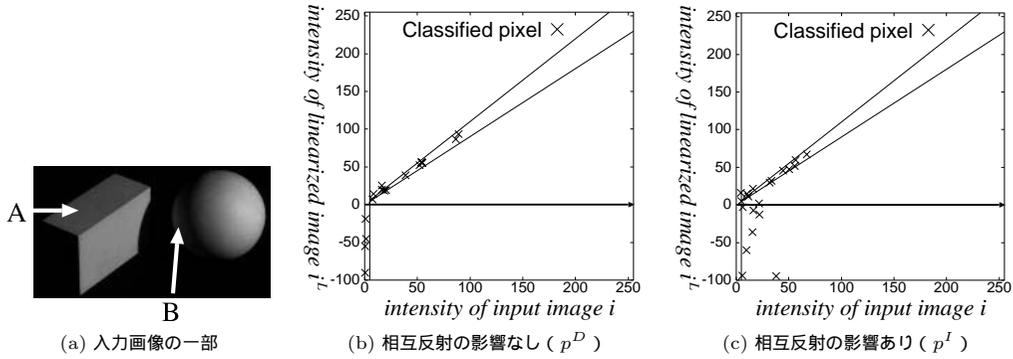


図 6 入力画素値と線形化画素値の関係

Fig. 6 Relationships between intensity of input image and linearized image.

表 1 9 通りの相互反射

Table 1 9 types of interreflections.

	P : diffuse reflection	P : attached shadow	P : cast shadow
R : diffuse reflection	$i = i^L$ ($D \rightarrow D$)	$i > i^L$ ($D \rightarrow A$)	$i < i^L$ ($D \rightarrow C$)
R : attached shadow	$i > i^L$ ($A \rightarrow D$)	$i > i^L$ ($A \rightarrow A$)	$i \neq i^L$ ($A \rightarrow C$)
R : cast shadow	$i < i^L$ ($C \rightarrow D$)	$i \neq i^L$ ($C \rightarrow A$)	$i < i^L$ ($C \rightarrow C$)

$$Classifiable(k, p) = \begin{cases} 1 : \text{if } (Region(k, p) = D \cup A \cup C) \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

なお、実環境においては、物体表面上のあらゆる点は、何らかの相互反射の影響を受けており、その強度が異なるだけと考えるのが自然である。本研究で相互反射の影響を受けるか受けないかを判別しているのは、あくまで閾値よりも強い相互反射が生じているか否かを判定しているにすぎない。そのため、白色物体間で生じる強い相互反射の有無を検出するのは容易である。逆に、反射率の低い物体間で生じる相互反射は、きわめて弱くなる場合があり、これを閾値を下げることによって検出しようとする、不安定になりやすい。これは、モデルに従わない理由が、相互反射の有無だけではなく、カメラのノイズなど、様々な要因の影響を受けるからと考えられる。

3.4 相互反射の分類基準

2章で述べた従来の光学現象の分類基準は、相互反射の影響を受ける画素を解析できない。そこで、本節では、相互反射の影響を受ける画素 p^I を解析するための分類基準を提案する。

3.4.1 相互反射の影響を受ける画素の光学現象

3.2節で示したように、相互反射の影響を受ける画素 p^I の光学現象は、画素 p^I に対応する微小面 P と

相互反射面 R の両方の光学現象によって決定される。しかし、相互反射面 R 上の微小面 $R(\delta)$ の光学現象は、 δ ごとに異なるため、その光学現象は一意に決定できない。そこで、本研究では、 R から P に、最も影響を与える代表的な光学現象を相互反射面 R の光学現象と定義する。

画素 p^I の光学現象は、微小面 P と相互反射面 R における1次反射の光学現象を組み合わせたものである。各面の1次反射は、拡散反射・attached shadow・cast shadowの3通りであるため、画素 p^I の光学現象は、 P と R で生じる各3通りの光学現象を組み合わせた9通りとなる。この組合せにおける入力画素値 i と線形化画素値 i^L の関係を表1に示す。表1の D, A, C は、それぞれ1次反射の拡散反射・attached shadow・cast shadowを意味する。本稿では、相互反射の影響を受ける画素の光学現象を (R の光学現象 $\rightarrow P$ の光学現象) と表記する。たとえば、($D \rightarrow A$) は、対象としている微小面 P は attached shadow となっているが、相互反射面 R で生じている拡散反射によって照されているという状況を表す。

相互反射の影響を受ける画素 p^I の光学現象には以下の性質がある。 $(D \rightarrow D)$ のとき、完全相互反射成分となるため、線形化の前後で画素値に変化はない。 $(D \rightarrow A), (A \rightarrow D), (A \rightarrow A)$ のとき、attached shadowである画素の入力画素値 i は0に近いが、線

形化により負の値に変換されるため、 i は i^L より大きい。 $(D \rightarrow C)$ 、 $(C \rightarrow D)$ 、 $(C \rightarrow C)$ のとき、cast shadow である画素の入力画素値 i は 0 に近いが、線形化により正の値に変換されるため、 i は i^L より小さい。 $(A \rightarrow C)$ 、 $(C \rightarrow A)$ のとき、attached shadow、cast shadow である画素の入力画素値 i は 0 に近いが、線形化により、それらの画素値はそれぞれ負の値、正の値へと変換される。この場合、正と負のどちらの値が大きいかを定めることは容易でないが、一般に i と i^L は異なる値となると考えられる。

3.4.2 相互反射を考慮した光学現象の分類基準

前項で述べた 9 通りの光学現象を分類するための、相互反射を考慮した光学現象の分類基準について考える。表 1 の $(A \rightarrow C)$ と $(C \rightarrow A)$ において、 i と i^L の大小関係はシーンによって異なるため、判別が容易ではない。そこで、本研究では、 $(A \rightarrow C)$ 、 $(C \rightarrow A)$ 、 $(A \rightarrow A)$ 、 $(C \rightarrow C)$ の 4 種類の光学現象では、 P と R はいずれも影であることから、これらをまとめて「 P と R の両方が影である」とし、 $(Shadow \rightarrow Shadow)$ と定義する。このため、本稿で定義する分類基準では、9 通りの光学現象をすべて分類することはできない。本稿で、 $(Shadow \rightarrow Shadow)$ とまとめた 4 種類の光学現象の詳細な分類は、今後の検討課題である。

以上のことから、本研究では、6 通りの光学現象を分類するための分類基準を提案する。表 1 に示すように、 $(D \rightarrow A)$ と $(A \rightarrow D)$ (もしくは、 $(D \rightarrow C)$ と $(C \rightarrow D)$) で i と i^L の大小関係は等しいため、大小関係のみではこれらを分類できない。ここで、これらの相違は、 P が影であるか否かという点にある。したがって、 P が影であることが分かれば、これらの光学現象を分類できる。

従来の分類基準では、 P が影であるか否かは一定の閾値 T_s で判定されていた。しかし、相互反射が生じる場合には、影領域でも明るくなることもあり、同様の判定方法は利用できない。ここで、 P が影のとき、本来は 0 に近い画素値が、線形化によって正、または負の値に変換されるため、線形化の前後で画素値の変化率が大きくなる。そこで、本研究では、式 (11) に示す変化率で、影領域であるか否かを判定する。

ここで、 $i_{(k,p)}$ は、 k 番目の入力画像における画素 p の画素値であり、 $i^L_{(k,p)}$ は、それを線形化した画素値である。変化率 t は、2 次反射強度などにより決められるパラメータである。なお、本稿では、式 (11) で、 $(Shadow \rightarrow Shadow) \cup (D \rightarrow A) \cup (D \rightarrow C)$ に判定される領域を影領域と呼び、 $(A \rightarrow D) \cup (C \rightarrow D) \cup (D \rightarrow D)$ に判定される領域を非影領域と呼ぶ。

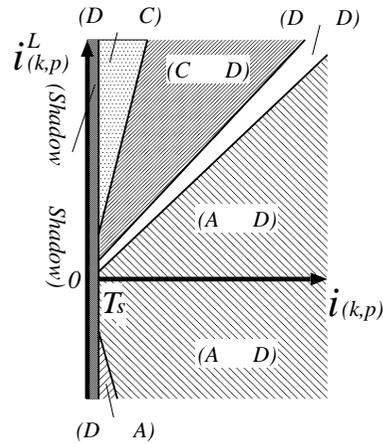


図 7 相互反射の分類基準

Fig. 7 Criterion for classification of interreflections.

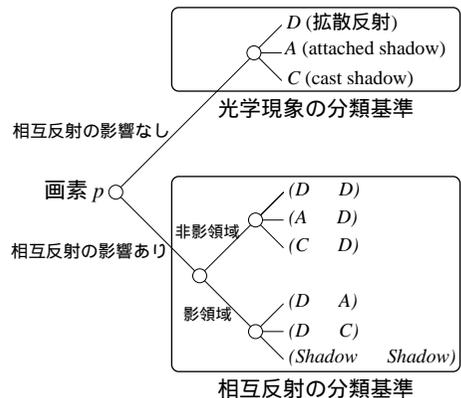


図 8 光学現象の分類手順

Fig. 8 Flow of the classification process.

以上で述べた入力画素値と線形化画素値の関係に基づいて、相互反射の影響を受ける画素の光学現象は、式 (12) に示す分類基準によって分類できる。ここで、 T 、 T_s は式 (2) で定義したものと同義である。式 (12) の関係を、 $i_{(k,p)}$ と $i^L_{(k,p)}$ で張られる 2 次元平面で示すと図 7 となる。

これにより定義される光学現象の分類基準によって、相互反射の影響を受ける画素の光学現象を分類できる。本稿では、この分類基準を相互反射の分類基準と呼ぶ。この分類基準を用いることにより、物体の 3 次元形状や反射特性、光源方向などを復元することなく、光学現象を詳細に解析できる。本研究で提案した光学現象の分類基準には、微小面 P のみに着目することで、相互反射面 R の光学現象も同時に分類できるという利点がある。

以上によって、相互反射の影響を受ける画素を分類するための相互反射の分類基準を定義した。ここで、

$$\left\{ \begin{array}{ll} (Shadow \rightarrow Shadow) \cup (D \rightarrow A) \cup (D \rightarrow C) & : \text{if } (|i_{(k,p)}^L| > i_{(k,p)} \times t) \\ (A \rightarrow D) \cup (C \rightarrow D) \cup (D \rightarrow D) & : \text{otherwise} \end{array} \right. \quad (11)$$

$Region(k, p) =$

$$\left\{ \begin{array}{ll} (D \rightarrow D) & : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \cap (|i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L| \leq T \times i_{(k,p)}) \\ (D \rightarrow C) & : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L < -T \times i_{(k,p)}) \cap (|i_{(k,p)}^L| > i_{(k,p)} \times t) \\ (C \rightarrow D) & : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L < -T \times i_{(k,p)}) \cap (|i_{(k,p)}^L| \leq i_{(k,p)} \times t) \\ (D \rightarrow A) & : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L > T \times i_{(k,p)}) \cap (|i_{(k,p)}^L| > i_{(k,p)} \times t) \\ (A \rightarrow D) & : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L > T \times i_{(k,p)}) \cap (|i_{(k,p)}^L| \leq i_{(k,p)} \times t) \\ (Shadow \rightarrow Shadow) & : \text{if } (i_{(k,p)} \leq T_s) \end{array} \right. \quad (12)$$

本研究で提案した手法により画素 p の光学現象を分類するための手順を図 8 にまとめる。まず、画素 p が相互反射の影響を受けるか否かを式 (9) によって判別する。相互反射の影響を受けない画素であれば、式 (2) によって、拡散反射・cast shadow・attached shadow のいずれかに分類する。一方、相互反射の影響を受ける画素であれば、式 (12) に示す相互反射の分類基準によって、6 種類の光学現象のいずれかに分類する。したがって、本稿でいう光学現象の分類とは、各画素を図 8 に示す 9 種類の光学現象のいずれかに分類することを指す。

4. 実 験

本稿で提案した光学現象の解析法の有効性を確かめるために、実際のシーンを撮影して実験を行った。反射率の低い物体間では、十分な強度の相互反射が観測されないため、本実験では、対象物体を白色石膏とし白色光源を用いた。このシーンは、解析結果の評価が容易であり、また、従来の色情報を用いた相互反射の解析法が適用できない問題設定である。

4.1 光学現象の分類結果の比較

まず、強い相互反射が生じるシーンの光学現象を分類し、その結果を正解と比較する実験を行った。図 9 に示すような、近接する直方体と球の白色石膏からなるシーンを対象とした。入力画像は、図 9 に示すような、光源方向を縦方向 3 段階、横方向 6 段階に変化させて撮影した 18 枚の画像である。

図 10 (a) は入力画像のうちの 1 枚であり、(b) は、(a) を線形化した結果である。線形化した画像は負の値を含むため、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。この結果から、相互反射を含む

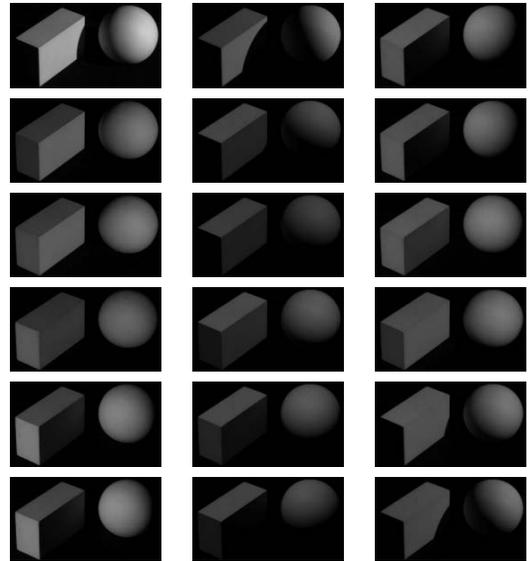


図 9 入力画像 (直方体と球)

Fig. 9 Input images (a brick and a sphere).

シーンも 3 枚の画像の線形結合で表現できることが確認できる。(c) は相互反射の影響を受ける画素の判別を行った結果である。この画像では、相互反射の影響を受ける画素を白色で表現している。球と直方体が近接する領域など、強い相互反射を生じる画素が正しく判別できていることが目視により確認できる。さらに、(a) の影領域を判定した結果を (d) に示す。黒色が、影と判定された領域を示しており、相互反射の影響で明るくなっている球の影領域も、正しく影と判定されていることが分かる。

以上の結果より、各画素の光学現象を分類した結果を図 10 (e) に示す。図中の色と光学現象の関係を表 2 に示す。直方体の左端付近のように、相互反射の影響

表 2 光学現象と図 10, 12, 15, 16 中の色との関係

Table 2 Relationships between photometric factors and colors in Figs. 10, 12, 15 and 16.

	点 P の光学現象	面 R の光学現象
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: white; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: red; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: green; margin-bottom: 5px;"></div> </div>	拡散反射 attached shadow cast shadow	存在しない
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: brown; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: darkred; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: darkgreen; margin-bottom: 5px;"></div> </div>	拡散反射 拡散反射 attached shadow cast shadow	拡散反射 attached shadow cast shadow
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: orange; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: green; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; border: 1px solid black; background-color: black; margin-bottom: 5px;"></div> </div>	attached shadow cast shadow 影	拡散反射 拡散反射 影

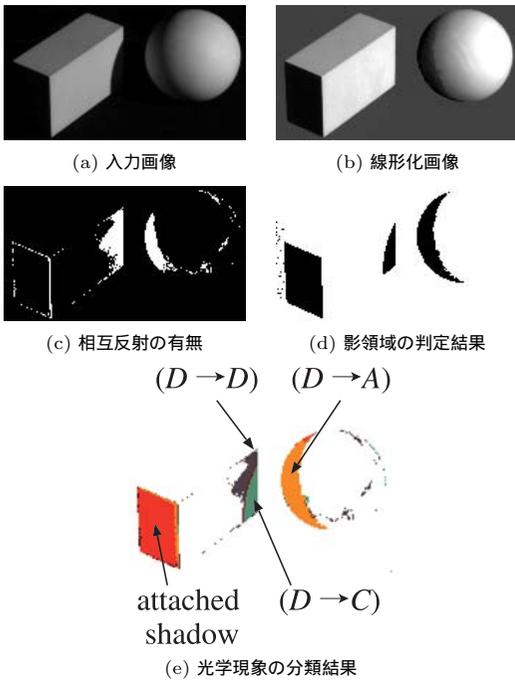


図 10 光学現象の解析結果 (直方体と球)
 Fig. 10 Results of photometric analysis (a brick and a sphere).



図 11 評価のための合成画像
 Fig. 11 Synthesized image for evaluation.

を受けない画素の光学現象が正しく attached shadow として分類されている。このことから、相互反射の影響を受けない画素は、従来同様に分類されることが確認できる。また、球と直方体の間付近に着目すると、

表 3 合成画像の画素値 i_S と実画像の画素値 i の関係

Table 3 Relationships between intensity of synthesized image i_S and intensity of real image i .

D	$i_S = i$
A	$i_S < T_s$
$(D \rightarrow D)$	$(i > i_S) \cap (i \geq T_s)$
$(D \rightarrow A)$	$(i > i_S) \cap (i < T_s)$
$(D \rightarrow C)$	$(i < i_S) \cap (i \geq T_s)$

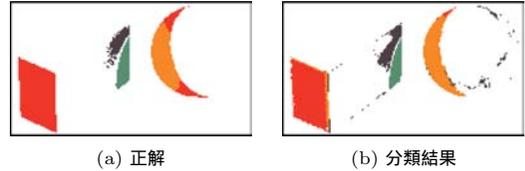


図 12 分類結果の比較 (分類正解率: 81%)
 Fig. 12 Comparison of results (rate of correct classification: 81%).

球表面の光学現象が $(D \rightarrow A)$ として、直方体表面の光学現象が $(D \rightarrow D)$, $(D \rightarrow C)$ として分類されていることが確認できる。相互反射の影響を受ける画素も、おおむね正しく分類できていることが目視により確認できる。

次に、提案手法による光学現象の分類結果と正解を比較する実験を行った。ただし、対象としたシーンは実シーンであるため、真の正解を得ることは困難である。そこで、撮影方法を工夫することで相互反射の影響がない画像を合成し、実画像と比較することで正解を得た。具体的には、図 11 に示すように、直方体と球を別々に撮影し、それらを合成することで相互反射の生じない画像を生成した。この合成画像は、実画像と位置合わせはできているが、相互反射と cast shadow が観測されず、すべて拡散反射として表現されている画像である。この合成画像と同じ光源位置の実画像を、表 3 に示す関係で正解を得た。この表で、 i は入力画像の画素値、 i_S は合成画像の画素値、 T_s は影領域の閾値を表す。図 12 (a) に正解によって得られる分類結果を、(b) に提案手法によって得られる分類結果を示す。これらの結果において、光学現象は表 2 に示す色で表現している。

数値評価のため、提案手法で分類された結果のうち、何%が正解と一致するかを算出したところ、その一致率は 81%であった。正解と一致しなかった画素として、たとえば、球の左端付近で、図 12 (a) に示す正解では相互反射の影響を受けていない attached shadow と分類されているが、図 12 (b) に示す提案手法では $(D \rightarrow A)$ に分類されている。また、直方体の右端付



図 13 入力画像 (石膏の男性像)

Fig. 13 Input images (male statue).



図 14 入力画像 (石膏の女性像)

Fig. 14 Input images (female statue).

近で、正解では ($D \rightarrow D$) に分類されているが、提案手法では拡散反射に分類されている。これらはいずれも、相互反射の影響を受ける画素の判別を誤っているため、光学現象を正しく分類できていないことが原因である。本来、3.3 節で述べた閾値 T_N は各画素ごとに異なるが、本実験では全画素で共通の値を用いたため、正しく光学現象の分類が行われなかったと考えられる。 T_N の適切な設定は、今後の検討課題にあげられる。

また、物体が近接している箇所では 3 次以上の相互反射が観測され、石膏でもわずかな鏡面反射が観測される。このような、本研究の仮定を超えた現象が生じると、画像の線形化が不安定になる。線形化の失

敗による誤分類も、正解との一致率を下げる要因と考えられる。しかし、比較対象とした正解も真の正解とは異なるものの、attached shadow 領域、($D \rightarrow A$)、($D \rightarrow D$) といった光学現象がほぼ等しい位置に分類されていることから、提案手法の有効性を確認できる。

4.2 複雑な形状への適用

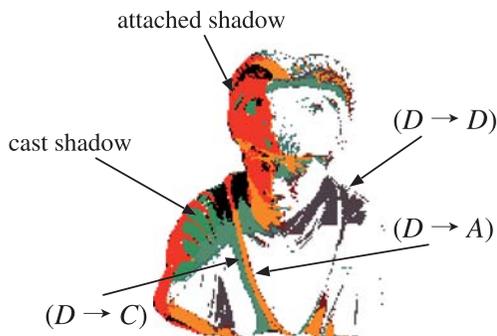
次に、複雑な形状の物体に対して本手法を適用する実験を行った。図 13、図 14 に示す白色石膏の人物像を、光源方向を変化させて撮影した。それぞれ 21 枚、18 枚の画像を入力とした。図 15、図 16 では、それぞれ (a) が入力画像のうちの 1 枚、(b) がその線形化画像である。(c) は相互反射の影響を受ける画素を判別した結果、(d) は影領域を判定した結果である。



(a) 入力画像 (b) 線形化画像



(c) 相互反射の有無 (d) 影領域



(e) 光学現象の分類結果

図 15 光学現象の解析結果 (石膏の男性像)

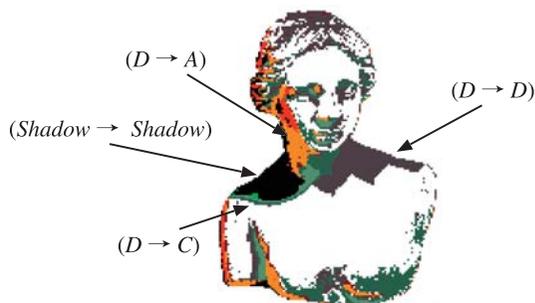
Fig. 15 Results of photometric analysis (male statue).



(a) 入力画像 (b) 線形化画像



(c) 相互反射の有無 (d) 影領域



(e) 光学現象の分類結果

図 16 光学現象の解析結果 (石膏の女性像)

Fig. 16 Results of photometric analysis (female statue).

図 14(c) をみると、各対象物体の肩付近や、目などが相互反射の影響を受ける画素として判別できていることが確認できる。また、胸元など、影が相互反射によって照らされ、明るくなっている画素も存在するが、提案手法により影領域として判定されていることが確認できる。(e) は光学現象を分類した結果である。図中の色と光学現象の関係は表 2 のとおりである。

影領域は、入力画像だけでは単に影としか判断できないが、提案手法では attached shadow と cast shadow の区別が行える。さらに、その画素が相互反射の影響を受けるか否かも判別できるため、各画素ごとに独立した解析にもかかわらず、 $(D \rightarrow A)$ であるか、 $(D \rightarrow C)$ であるかといった分類も行えることが確認できる。以上の実験結果から、形状が比較的複雑な

シーンでも、3次元形状を復元することなく、画像の線形化に基づいて光学現象を解析できることが確かめられた。

5. まとめ

本研究では、画像の線形化に基づいた光学現象の解析手法を提案した。画像の線形化によって得られる線形化画像は、相互反射の影響を受ける画素であるか否かによって、表現できる光学現象が異なることを示した。線形化画像は、相互反射の影響を受けない画素は拡散反射成分を表現できるように変換され、相互反射の影響を受ける画素は完全相互反射成分を表現できるように変換される。従来の光学現象の分類基準で正しく分類されるか否かに着目することで、その画素が相

相互反射の影響を受けるか否かの判別を行った。また、物体表面を Lambert 面と仮定し、2 次反射を考慮した相互反射が生じるシーンを解析するために、完全相互反射成分とその他の光学現象の関係を明らかにした。完全相互反射成分は、解析している画素の光学現象と相互反射面の光学現象の両方に依存することを示し、各画素のみに着目することで、その画素に影響を与える相互反射面の光学現象も同時に解析できる光学現象の分類基準を提案した。

実画像を用いた実験では、比較的単純な形状で光学現象の分類を行い、合成画像から得られる正解値と比較することで、提案手法の有効性を確認した。また、複雑な形状の物体に対して光学現象の解析を行い、3 次元形状を復元することなく、光学現象を分類できることを確認した。実際のシーンには、環境光や 3 次反射も存在するが、各画素ごとに見れば比較的安定に光学現象を分類できることが確かめられた。

本稿では、十分な強度の相互反射を観測するために、白色石膏を用いた実験結果のみを示した。原理的に、提案手法は反射率の空間的分布が一樣でないシーンにも適用が可能である。しかし、対象物体の反射率が低い場合には、相互反射を検出するための閾値の設定が難しくなる。さらに、弱い相互反射を解析する場合には、カメラのノイズなどの影響を受け、解析結果が不安定になりやすい。様々な物体を用いた実験と評価は、今後の検討課題である。

また、本研究では問題の簡単化のために、対象表面は Lambert 面であり、鏡面反射は観測されないと仮定した。提案手法は、基本的に入力画素値と線形化画素値の大小関係に基づいて光学現象を分類するため、拡散反射成分よりも値が大きくなる鏡面反射と相互反射の区別は容易ではない。そのため、鏡面反射を扱うためには、鏡面反射の偏光性を利用する方法^{14)~16)} や、光源色と物体色の違いを利用する方法^{10)~13)} などの、実画像から鏡面反射を分離する手法の併用を検討する必要があると考えられる。さらに、2 次以上の相互反射の取扱いや、サブサーフェイススキヤタリングなど、より複雑な光学現象への対応も必要である。

なお、本研究の一部は科学技術振興事業団 CREST 池内プロジェクト、および科学研究費補助金(課題番号 14780290)の補助を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) Woodham, R.J.: *Photometric Stereo*, MIT AI Memo (1978).
- 2) Shakunaga, T. and Shigenari, K.: Decom-

posed eigenface for face recognition under various lighting conditions, *Proc. CVPR2001*, pp.864–871 (2001).

- 3) 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, 情報処理学会論分誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.41, No.SIG10 (CVIM1), pp.19–30 (2000).
- 4) Shashua, A.: *Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition*, Ph.D. thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT (1992).
- 5) Belhumeur, P.N. and Kriegman, D.J.: What is the Set of Images of an Object Under All Possible Lighting Conditions?, *Proc. CVPR'96*, pp.270–277 (1996).
- 6) Basri, R. and Jacobs, D.: Lambertian reflectance and linear subspaces, *Proc. IEEE ICCV 2001*, pp.383–390 (2001).
- 7) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: Analytic PCA construction for theoretical analysis of lighting variability, including attached shadows, in a single image of a convex Lambertian object, *Proc. CVPR Workshop on Identifying Objects Across Variations in Lighting* (2001).
- 8) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: A signal-processing framework for inverse rendering, *Proc. ACM SIGGRAPH2001*, pp.117–128 (2001).
- 9) 岡部孝弘, 佐藤洋一: 双方向反射分布関数の周波数特性に基づく反射成分の分離, 情報処理学会研究報告 CVIM134-1, pp.1–7 (2002).
- 10) Shafer, S.: Using color to separate reflection components, *Color Research and Applications*, Vol.10, pp.210–218 (1985).
- 11) Klinker, G., Shafer, S. and Kanade, T.: The measurement of highlights in color images, *IJCV*, Vol.2, No.1, pp.7–32 (1988).
- 12) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Temporal-color space analysis of reflection, *JOSA A*, Vol.11, No.7, pp.2990–3002 (1994).
- 13) Sato, Y., Wheeler, M. and Ikeuchi, K.: Object Shape and Reflectance Modeling from Observation, *Proc. SIGGRAPH'97*, pp.379–387 (1997).
- 14) Nayar, S.K., Fang, X. and Boulton, T.E.: Removal of specularities using color and polarization, *Proc. CVPR'93*, pp.583–590 (1993).
- 15) 高橋 徹, 佐藤洋一, 池内克史: 偏光による反射成分の分離および反射パラメータの決定, 情報処理学会研究報告 CVIM 124-3, pp.17–24 (2000).
- 16) 梅山伸二: 確率的独立性を手がかりとした物体の見えからの拡散/鏡面反射成分の分離, 電子情報通信学会技術報告 PRMU 2000-40, pp.41–48 (2000).
- 17) Ikeuchi, K. and Sato, K.: Determining Reflectance Properties of an Object Using Range

and Brightness Images, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.13, No.11, pp.1139-1153 (1991).

- 18) 小俣和子, 斉藤英雄, 小沢慎治: 光源の相対的回転による物体形状と表面反射特性の推定, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.3, pp.927-937 (2000).
- 19) 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士: 光源移動による相互反射の検出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J78-D-II, No.1, pp.86-93 (1995).
- 20) 橋本 理, 加藤博一, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士: カラー画像を用いた材質感の判別と相互反射の検出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J74-D-II, No.6, pp.727-735 (1991).
- 21) 富永昌治, 岡山敏之: ハイライトや相互反射の影響を含むカラー画像の解析法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1360-1369 (1997).
- 22) Yu, Y., Debevec, P., Malik, J. and Hawkins, T.: Inverse global illumination: recovering reflectance models of real scenes from photographs, *Proc. SIGGRAPH'99*, pp.215-224 (1999).
- 23) Nayar, S., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Shape From Interreflections, *IJCV*, Vol.6, No.3, pp.173-195 (1991).
- 24) 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長 健: 光学現象の分類に基づく画像の線形化, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, No.SIG5 (CVIM6), pp.11-21 (2003).

(平成 16 年 1 月 15 日受付)

(平成 16 年 3 月 4 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～平成 14 年岡山大学助手。平成 15 年より筑波大学講師, コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。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, IEEE 各会員。



石井 育規 (正会員)

平成 15 年岡山大学大学院自然科学研究科修了。同年松下電器産業株式会社入社。在学中, コンピュータビジョン, 陰影解析の研究に従事。



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 年～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。