

相互反射を含むシーンにおける 画像の線形化と光学現象の解析

石井 育規 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

mukaigaw@ieee.org

あらまし：我々は、画像の線形化とそれに基づく光学現象の解析法を提案している。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。

Photometric Linearization and Classification for Scenes Including Interreflections

Yasunori ISHII, Yasuhiro MUKAIGAWA, Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University

3-1-1 Tsushima-naka, Okayama, 700-8530, JAPAN

mukaigaw@ieee.org

Abstract: We have proposed a method for photometric linearization and classification. The previous method, however, was restricted to scenes without interreflections. This paper discusses the 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。そのため、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、実画像に含まれる各光学現象を解析することは重要である。

Shashua[4] 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 と Kriegman[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が，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．

物体が凸形状でない場合には相互反射が観測される．相互反射は，色に基づく方法 [6, 7] や，形状復元に基づく方法 [8] による解析法が提案されている．前者には，鏡面反射と相互反射が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．後者には，相互反射を含むシーンで形状復元が行なえるという利点があるが，影を含むシーンでは，正確な復元が容易でない．このように，実画像には様々な光学現象が含まれるため，これらの解析法を直接適用することは容易でない．

一方，我々は，実画像に基づく画像生成法 [3] のなかで提案した画像の線形化による光学現象の解析法 [9] を提案している．画像の線形化によって，様々な光学現象が含まれる実画像が，3枚の画像の線形結合で表現できるように変換される．変換された画素値が拡散反射成分になることに着目し，実画像と線形化画像の比較からなる光学現象の分類基準で光学現象を解析する．この手法には，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という利点があるが，シーン中に相互反射が存在してはならないという制約があった．

そこで，本研究では，まず画像の線形化と相互反射の関係を明らかにする．これに基づき，相互反射を含む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，物体表面を Lambert 面とし，2次反射による相互反射を扱う．

2 画像の線形化に基づく光学現象の分類

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．物体表面で観測される光学現象のうち，反射は拡散反射 (diffuse reflection) ・鏡面反射 (specular reflection) ・相互反射 (interreflection) に分けられる．一方，影は attached shadow ・ cast shadow に分けられる．

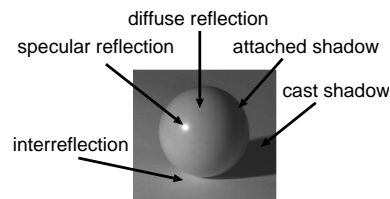


図 1: 物体の見えを変化させる光学現象

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では，実画像で観測される輝度は 0 に近いが，attached shadow 領域では Lambert モデルで負の値になり，cast shadow 領域では Lambert モデルで正の値になるという違いがある．鏡面反射を生じている点の輝度は，拡散反射成分に鏡面反射成分を付加したものととして観測される．相互反射を生じている点の輝度は，拡散反射成分に，別の面からの反射である相互反射成分を加えたものととして観測される．

2.2 光学現象の分類基準

我々は，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 [3] を提案している．また，入力画像とそれを線形化した画像の比較からなる光学現象の分類基準 [9] を提案している．

光学現象の分類基準では，以下の性質に基づいて入力画像の光学現象を分類する．

- 拡散反射領域：線形化の前後で画素値に変化はない．
- 鏡面反射領域：線形化すると鏡面反射成分が除去される．
- attached shadow 領域：線形化することにより画素値が式 (1) を満たす負の値となる．
- cast shadow 領域：入力画像では暗いが，線形化することで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

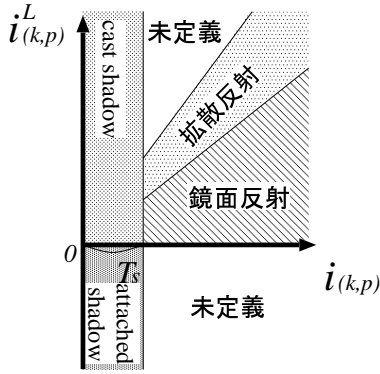


図 2: 光学現象の分類基準

準を式 (2) に示す.

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

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. また, カメラの暗電流特性, 感度特性, 環境光などの影響により, 実画像において, 影領域の画素値は 0 にならないため, 影の閾値 T_s を設定している. 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.

以上で述べた分類基準には, 3 次元形状, 反射特性, 光源方向などのパラメータを復元する必要がないという利点があるが, 相互反射が存在してはならないという制約があった. 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, それに基づき相互反射を含むシーンの光学現象を分類する.

3 相互反射を含むシーンの解析

3.1 問題設定

実シーンで観測される相互反射には, 3 次反射以上も存在するが, その影響は小さいため無視できると考えられる. そこで, 本稿では, ある面 R (以下, 相互反射面) 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

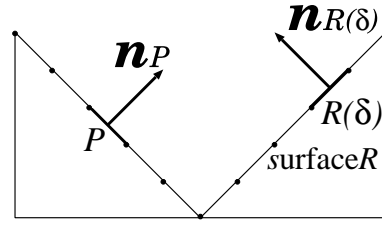


図 3: 微小面 P と $R(\delta)$ の関係

反射を扱う. また, 鏡面反射が存在するシーンでは光学現象が複雑になるため, 鏡面反射の偏光性や 2 色性反射モデルなどを利用した既存手法により, あらかじめ鏡面反射は取り除かれているものとする. したがって, 本稿では, 物体表面を Lambert 面とし, 2 次反射による相互反射を仮定して議論を進める.

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 で観測される輝度 i は, 式 (3) で表される.

$$i = n_P^T s + \int_R n_P^T s_{R(\delta)} d\delta \quad (3)$$

ここで, n_P を微小面 P の面特性ベクトル, s を実光源の光源特性ベクトル, $s_{R(\delta)}$ を相互反射面 R 上の微小面 $R(\delta)$ から P へ入射する光源特性ベクトルとする.

Nayar ら [8] は, 物体表面の 3 次元形状と相互反射の関係から相互反射モデル (Physical Interreflection Model) を提案している. 図 3 に示すように, 微小面 $P, R(\delta)$ の面特性ベクトルを $n_P, n_{R(\delta)}$ とすると, 式 (3) の $s_{R(\delta)}$ は次式のように置き換えられる.

$$s_{R(\delta)} = K(P, R(\delta)) n_{R(\delta)}^T s \quad (4)$$

ここで, $K(P, R(\delta))$ は, 微小面 $R(\delta)$ で生じる反射光が P に到達する際の距離と方向による減衰を表す. 式 (4) によって, 式 (3) は次式に変換できる.

$$i = n_P^T s + \int_R n_P^T K(P, R(\delta)) n_{R(\delta)}^T s d\delta \quad (5)$$

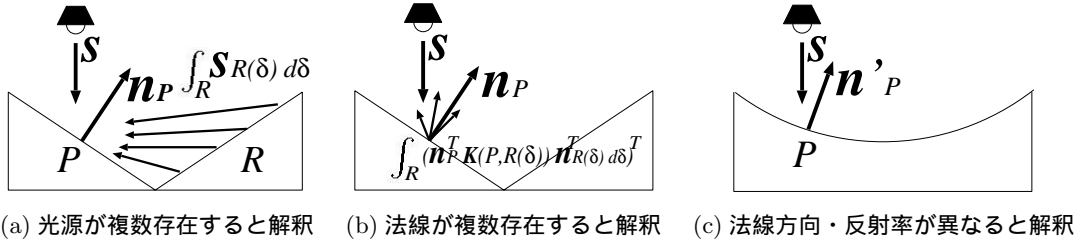
ここで, n'_P を次式のように設定する.

$$n'_P = n_P^T + \int_R n_P^T K(P, R(\delta)) n_{R(\delta)}^T d\delta \quad (6)$$

これにより, 式 (5) は次式となる.

$$i = n'_P s \quad (7)$$

これは, 微小面 P の法線 n_P を n'_P と解釈したことに相当する. 本来, 相互反射は, 図 4(a) のよう



(a) 光源が複数存在すると解釈 (b) 法線が複数存在すると解釈 (c) 法線方向・反射率が異なると解釈

図 4: 相互反射の影響の異なった解釈

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 4(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。したがって、図 4(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と面特性ベクトルのみで表現できる。

ここで、相互反射は式 (7) で表現でき、式 (7) 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 (7) で表現できる値に変換される。式 (7) 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

相互反射の影響を受ける画素は、完全相互反射成分に変換されるため、従来の線形化画素値とは意味が異なる。したがって、まず、その画素が相互反射の影響を受けるか否か判別する必要がある。以下、相互反射の影響を受ける画素を p^I 、影響を受けない画素を p^D とする。

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 のいずれかに分類できる。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 5 に示す入力画像中の画素 a, b の入力画素値と線形化画素値の関係を、それぞれ図 5(a), (b) に示す。 p^D では、(a) のように拡散反射・attached shadow・cast shadow に分類される。一方、 p^I では、(b) のように未定義に分類される場合もある。この性質を利用することで、相互反射の影響を受ける画素か否かの判別を行なう。

本稿では、式 (8) に示すように、各画素 p 毎に、

全入力画像を $Classifiable(k, p)$ で評価し、入力画像枚数 n に対する拡散反射・attached shadow・cast shadow への分類数で判別を行なう。この割合が閾値 T_N より小さい画素を、相互反射の影響を受ける画素と判別する。

$$\begin{cases} \text{if } \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Classifiable(k, p) < T_N & : p^I \\ \text{else} & : p^D \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 k 番目の入力画像の画素 p における $Classifiable(k, p)$ は次式で定義される関数である。

$$Classifiable(k, p) = \begin{cases} 1 & : \text{if } (Region(k, p) = D \cup A \cup C) \\ 0 & : \text{if } (Region(k, p) = S \cup U) \end{cases} \quad (9)$$

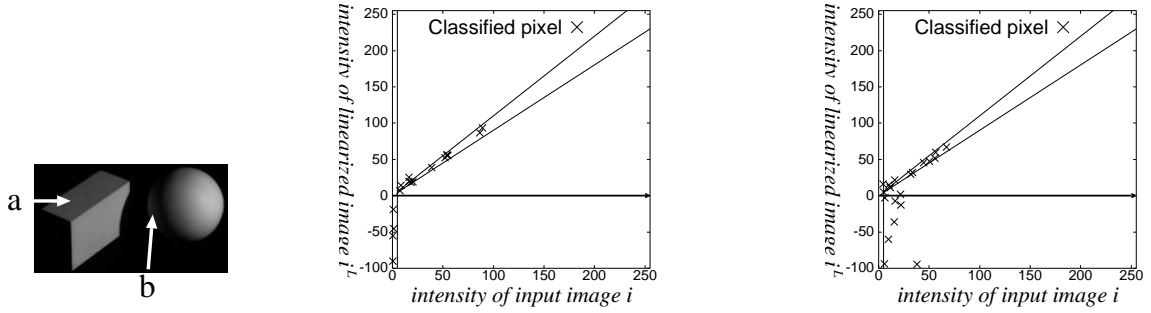
3.4 相互反射の分類基準

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について述べる。

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 毎に異なるため、 R で観測される光学現象は一種類とは限らない。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合せたものである。各面の 1 次反射は、拡散反射・attached shadow・cast shadow のいずれかであるため、画素 p^I の光学現象は 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 中の D, A, C はそれぞれ 1 次反射での拡散反射・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) として表記する。



入力画像の一部 (a) 相互反射の影響を受けない画素 (p^D) (b) 相互反射の影響を受ける画素 (p^I)

図 5: 入力画素値と線形化画素値の関係

表 1: ($R \rightarrow P$) の光学現象

| | P : 拡散反射 | P : attached shadow | P : cast shadow |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| R : 拡散反射 | $i = i^L$ ($D \rightarrow D$) | $i > i^L$ ($D \rightarrow A$) | $i < i^L$ ($D \rightarrow C$) |
| 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 | $i < i^L$ ($C \rightarrow D$) | $i \neq i^L$ ($C \rightarrow A$) | $i < i^L$ ($C \rightarrow C$) |

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， P は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一般に決めることは容易でないが， i と i^L は異なることが多いと考えられる．

3.4.2 相互反射を考慮した光学現象の分類基準

前節で述べた 9 通りの光学現象を分類する基準について述べる．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が， P と R はいずれも影である．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

光学現象を全て分類することはできない．本稿で，($Shadow \rightarrow Shadow$) とした 4 種類の光学現象の分類は，今後の検討課題として挙げられる．

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 が影であることがわかれば，これらの光学現象を分類できる．

従来まで， P が影であるかは，閾値 T_s で判定されていたが，相互反射で照らされるため，正しく判定できない場合がある．ここで， P が影のとき，本来 0 に近い画素値は，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いと考えられる．そこで，本研究では，式 (10) に示す変化率で，影領域である否かを判定する．

$$\begin{cases} \text{if}(|i_{(k,p)}^L| > i_{(k,p)} \cdot t) : (Shadow \rightarrow Shadow) \\ \quad \cup (D \rightarrow A) \cup (D \rightarrow C) \\ \text{else} : (A \rightarrow D) \cup (C \rightarrow D) \cup (D \rightarrow D) \end{cases} \quad (10)$$

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， $i_{(k,p)}^L$ 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 (10)

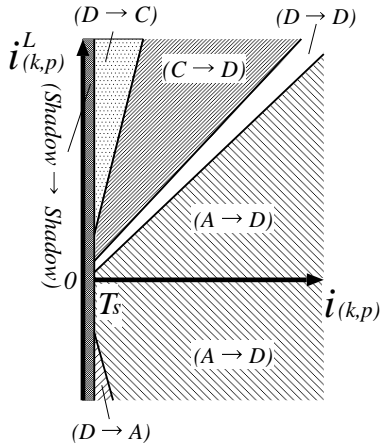


図 6: 相互反射の分類基準

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.

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 (11) に示す分類基準によって分類できる.

$$Region(k, p) = \left\{ \begin{array}{l} (D \rightarrow D) : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \\ \quad \cap (|i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L| \leq T \cdot i_{(k,p)}) \\ (D \rightarrow C) : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \\ \quad \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L < -T \cdot i_{(k,p)}) \\ \quad \cap (|i_{(k,p)}^L| > i_{(k,p)} \cdot t) \\ (C \rightarrow D) : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \\ \quad \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L < -T \cdot i_{(k,p)}) \\ \quad \cap (|i_{(k,p)}^L| \leq i_{(k,p)} \cdot t) \\ (D \rightarrow A) : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \\ \quad \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L > T \cdot i_{(k,p)}) \\ \quad \cap (|i_{(k,p)}^L| > i_{(k,p)} \cdot t) \\ (A \rightarrow D) : \text{if } (i_{(k,p)} > T_s) \\ \quad \cap (i_{(k,p)} - i_{(k,p)}^L > T \cdot i_{(k,p)}) \\ \quad \cap (|i_{(k,p)}^L| \leq i_{(k,p)} \cdot t) \\ (Shadow \\ \rightarrow \\ Shadow) : \text{if } i_{(k,p)} \leq T_s \end{array} \right. \quad (11)$$

ここで, T, T_s は式 (2) で定義したものと同義である. 式 (11) の関係を, $i_{(k,p)}$ と $i_{(k,p)}^L$ で張られる 2 次元平面で示すと図 6 となる.

本稿では, この分類基準を相互反射の分類基準と呼ぶ. この分類基準には, 微小面 P のみに着目することで, 相互反射面 R がどのような光学現象である

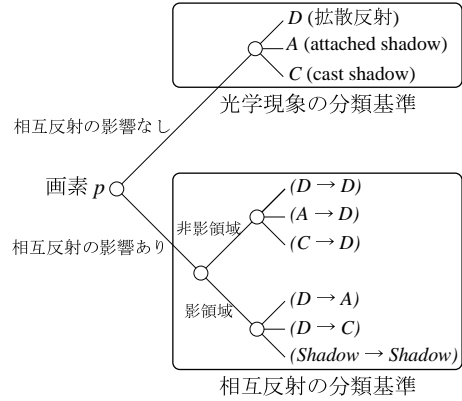


図 7: 光学現象の分類手順

かも分類できるという利点がある.

以上をまとめると, 相互反射を含むシーンの分類手順は図 7 のようになる. まず, 相互反射の影響を受けるか否かの判別を行なう. その結果, 影響を受けない画素であれば, 従来の光学現象の分類基準で分類し, 影響を受ける画素であれば, 相互反射の分類基準で分類を行なう. したがって, 各画素の光学現象は, 図 7 に示す 9 種類のいずれかに分類される.

4 実験

4.1 光学現象の分類と分類結果の比較

図 8 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 枚の画像を入力とする. 対象物体は, 石膏の球と直方体である.

図 9(a) に示す画像の光学現象を解析した. 図 9(b) は, (a) を線形化した結果である. 線形化画像は負の値を含むため, 0 を灰色, 負の方向に黒く, 正の方向に白くなるような表現をしている. 図 9(c) は, 相互反射の影響を受ける画素 p^I を表す画像であり, p^I を白で表現している. 球と直方体の間付近の画素が, p^I として正しく判別されていることが目視で確認できる. また, 図 9(d) が, 影領域の判定結果であり, 影領域を黒色で表現している. この結果より, 相互反射で照らされる画素も影領域として正しく判定されていることが分かる.

図 10 に提案手法による光学現象の分類結果を示す. 各光学現象に分類できた領域を黒色で表現している. D や A のように相互反射の影響を受けない画素の光学現象が従来同様に分類できていることが分かる. また, 球と直方体の間付近に着目すると, 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 $(D \rightarrow D)$, $(D \rightarrow C)$ として正しく分類されていることが目視により確認できる.

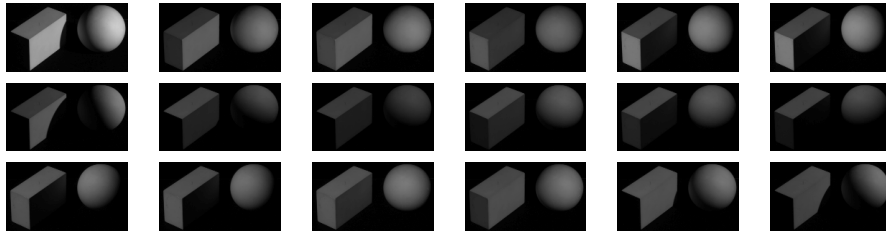


図 8: 入力画像

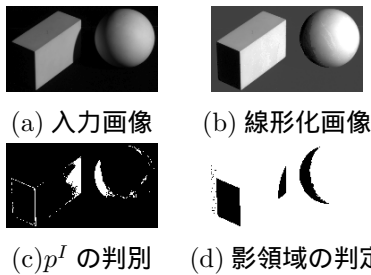


図 9: p^I の判別と影領域の判定結果

表 2: 合成画素値 i_S と入力画素値 i の関係

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

次に、正解と提案手法による光学現象の分類結果を比較した。正解を得るために、球と直方体を別々に撮影し、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。このとき、入力画素値 i と合成画像の画素値（合成画素値） i_S は表 2 のような関係となることから、 D , A , $(D \rightarrow D)$, $(D \rightarrow A)$, $(D \rightarrow C)$ の正解は図 11 のようになる。ここで、 T_s は影領域の閾値を表す。正解と入力画像を比較した結果、光学現象の一致率は 81 % であった。球の左端付近の画素が、正解では attached shadow と分類されているが、提案手法では $(D \rightarrow A)$ と誤って分類されている。このことは、相互反射の影響を受ける画素の判別を誤っているためだと考えられる。以上の結果より、おおむね正解に近い分類ができることが確認できる。

4.2 複雑な形状への適用

複雑な形状の物体に対し、光学現象の解析を行なった。図 12(a) に示す石膏の胸像を対象物体とし、光源方向を変化させて撮影した 21 枚の画像を用いた。図

12(a) を線形化した結果を図 12(b) に示す。先程と同様に、0 を灰色、負の方向に黒く、正の方向に白くなるような表現をしている。図 12 の下 3 段に光学現象の分類結果を示す。各光学現象に分類された領域を黒色で表現している。光学現象の分類は 3 次元形状に依存しないため、形状が複雑なシーンでもほぼ正しく行なえることが目視により確認できる。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、線形化画像と比較することで、attached shadow と cast shadow の区別や、その画素が相互反射の影響を受けるか否かを分類できている。以上の実験結果から、形状が複雑なシーンでも、提案手法により光学現象が解析できることがわかった。

5 まとめ

物体表面を Lambert 面、2 次反射の相互反射と仮定したときの、画像の線形化に基づく光学現象の分類について議論した。画像の線形化によって、相互反射の影響を受ける画素が、相互反射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した。解析を行なうために、各画素が相互反射の影響を受けるか否かの判別を行なった。相互反射の影響を受ける画素を解析するために、実画像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した。この分類基準により、各画素の画素値を比較するだけで、相互反射の影響を及ぼす面の光学現象も解析できることを示した。実画像を用いた実験により、定量的な評価を行ない、形状が複雑な物体を解析することで、本手法の有効性を確認した。今後の課題として、3 次以上の相互反射の解析、鏡面反射を含む相互反射の解析などが考えられる。

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、及び科学研究費補助金（課題番号 14780290）の補助を受けて行なった。

参考文献

- [1] R. J. Woodham: “Photometric Stereo”, MIT AI Memo, (1978).

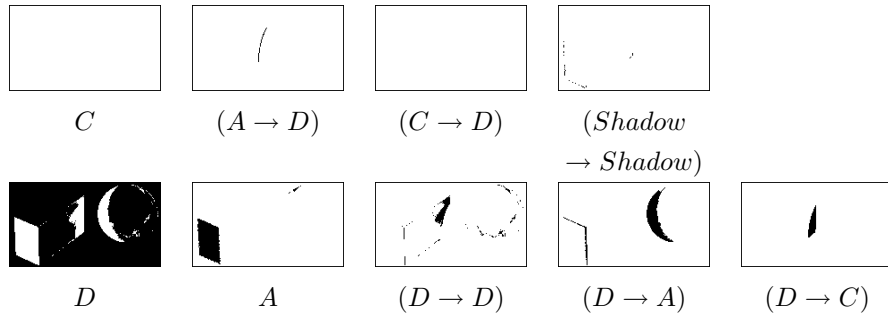


図 10: 光学現象の分類結果 (石膏の球と直方体)

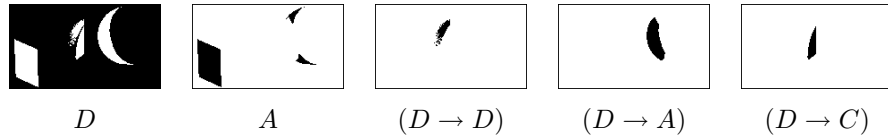


図 11: 正解

- [2] T. Shakunaga and K. Shigenari: “Decomposed 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”, 情処学論 CVIM, Vol.41, No.SIG10(CVIM1), pp.19-30, (2000).
- [4] A. Shashua: “Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition”, Ph.D thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT, (1992).
- [5] P. N. Belhumeur and D. J. Kriegman: “What is the Set of Images of an Object Under All Possible Lighting Conditions?”, Proc. CVPR’96, pp.270-277, (1996).
- [6] 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”, 信学論 D-II Vol.J78-D-II, No.1, pp.86-93, (1995).
- [7] 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”, 信学論 D-II Vol.J80-D-II, No.6, pp.1360-1369, (1997).
- [8] S. Nayar, K. Ikeuchi and T. Kanade: “Shape From Interreflections”, IJCV, Vol.6, No.3, pp.173-195, (1991).
- [9] 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健: “光学現象の分類基準を利用した画像の線形化”, 画像の認識・理解シンポジウム 2002 (MIRU2002), Vol.II, pp.167-176, (2002).



(a) 入力画像 (b) 線形化画像

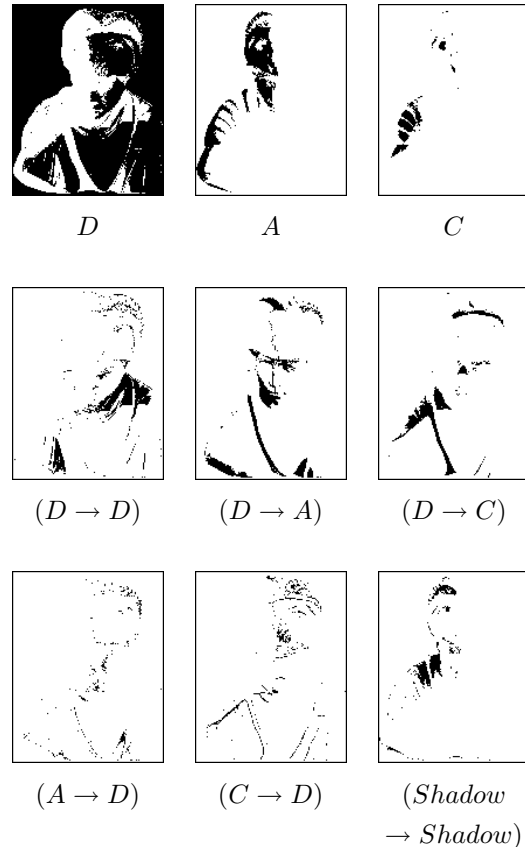


図 12: 複雑な物体への適用 (石膏胸像)