

## 偏光情報を利用した陰影領域の分割

佐藤 智 金森 克洋

パナソニック株式会社 先端技術研究所  
〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3-4  
E-mail: { sato.satoshi, kanamori.katsuhiro }@jp.panasonic.com

あらまし 被写体の法線情報や被写体間の相対関係、光源情報を取得するために、attached shadow と cast shadow からなる陰影情報が有効である。attached shadow 情報からは被写体の法線情報、cast shadow 情報からは被写体間の位置関係や光源情報を取得することができる。しかし、陰影領域から attached shadow と cast shadow を分割する手法はあまり研究されていない。本研究では、偏光情報を利用することで、光源移動を伴わない撮像手法により、陰影領域を attached shadow と cast shadow に分割する手法を提案する。

### Image Classification of Shadow Using Polarization Information.

Satoshi SATO and Katsuhiro KANAMORI

Advanced Technology Research Laboratories, Panasonic Corporation.  
3-4, Hikari-dai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0237, Japan

E-mail: { sato.satoshi, kanamori.katsuhiro }@jp.panasonic.com

**Abstract** For object information acquisition, for example, normal information, spatial arrangement of the object relative to another object and illumination distribution, shadow information is effective. Shadow consists attached shadow and cast shadow. Using attached shadow, we can estimate object's normal information. Cast shadow is informative about spatial arrangement and illumination distribution. However, little study is known about classification of shadow into attached shadow and cast shadow. In this paper, we propose the passive method that classifies shadow into attached shadow and cast shadow using polarization information.

#### 1. はじめに

物体の見えは、光源情報、被写体の形状・法線情報、被写体の反射率情報により決定されることが知られている。そのため、物体の見えからこれらの3つの情報を取得する、インバースレンダリングの手法が広く研究されている[1]。

これらの情報を高精度・高密度に取得するために、影情報を利用する研究が報告されている。図1に示すように、陰影領域には、物体表面が光源方向を向いていないために生じる影である attached shadow、物体表面が光を遮られるために生じる影である cast shadow の二つの領域が存在する。

cast shadow は、被写体や光源の相対的な情報を含む情報である。そのため、古くから立体感や距離感を表現するために利用されてきた[2]。また、Sato ら[3]は、cast shadow を利用して複雑な光源環境においても、光源情報を安定に推定する手法を提案した。また、Okabe ら[4]は、cast shadow を利用した手法がなぜ安定的に光源情報を推定できるのかを理論的に解析している。

一方、attached shadow は、被写体の法線情報の推定に利用されている[2]。Sato ら[5]は、attached shadow の情報である遮蔽エッジ情報を利用することで、Photometric Stereo において、被写体の法線情報と光源情報の相対性により解が一意に求まらないという、Bas-relief ambiguity の問題[6]を回避している。

しかし、これら陰影領域を利用したインバースレンダリングの手法では、前処理として、陰影領域を attached shadow と cast shadow へ分割する必要がある。

Mukaigawa ら[7]は、画像の線形化手法を用いて、拡散反射・鏡面反射のみならず attached shadow・cast shadow を分割する手法を提案した。しかしながら、この手法は、光源方向が変化した複数の画像を利用して、影や鏡面反射が含まれる実画像から、拡散反射成分のみの画像（線形化画像）を生成するものであり、光源位置をアクティブに変化させる必要があった。

そこで、本研究では、非偏光の光源を利用し、反射光の偏光を利用することで、光源の位置変化が不要な撮像シス

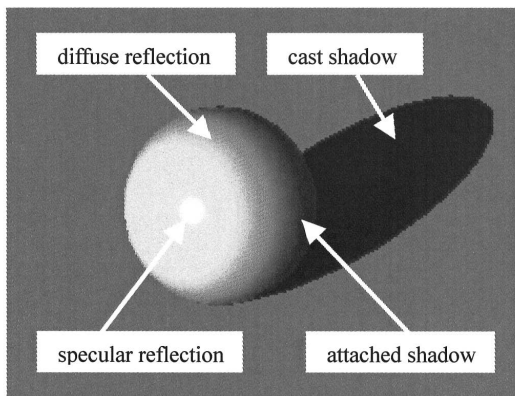


図1 様々な光学現象  
Fig.1 Photometric factors.

テムにより陰影領域の分割を実現することを試みたので報告する。

## 2. 偏光情報を利用した陰影領域の分割

### 2.1 偏光情報取得システム

本節では、本研究で求める3つの偏光情報（偏光位相 $\varphi$ 、偏光度 $\rho$ 、偏光推定誤差 $E_p$ ）と、それらの偏光情報の取得システムについて説明する。

図2に、本研究における偏光情報取得システムを示す。本研究では、カメラ前に設置した直線偏光フィルタの主軸方向を変化させながら、複数枚の画像を撮影することで、被写体からの反射光の偏光情報を取得する。本研究では、光源として、非偏光を利用する。非偏光とは、電場がすべての方向にランダムに振動した光である。被写体が非偏光の光源によってある角度にて照射されている場合、被写体からの反射光は、部分偏光する。そのため、図2のようにカメラの前に設置した直線偏光フィルタを回転させた場合、観測される輝度値 $I_i$ は直線偏光フィルタの回転角度（主軸方向） $\theta_i$ に対して、以下のように、 $\sin$ 関数状に変化する[8]。

$$I_i = I_v \cdot \cos 2(\theta_i - \varphi) + I_c \quad (1)$$

ここで、直線偏光フィルタの主軸方向 $\theta_i$ を180度回転させたとき、輝度値 $I_i$ が最大値をとる角度 $\varphi$ を偏光位相と呼ぶ。また、このときに得られる輝度値変化のコントラストを偏光度 $\rho$ と呼び、次式で計算される。

$$\rho = \frac{I_v}{I_c} \quad (2)$$

次に、式(1)の3つのパラメータ $\varphi$ 、 $I_v$ 、 $I_c$ の推定方法について説明する。直線偏光フィルタの回転角度 $\theta_i$ において観測された輝度値を $I_{oi}$ とする。直線偏光フィルタの回転角を $\theta_0$ から $\theta_{N-1}$ まで変化させてN枚の画像 $I_{o0} \cdots I_{oN-1}$ を撮影した場合、式(1)の3つのパラメータ $\varphi$ 、 $I_v$ 、 $I_c$ は、以下の評価関数Eを最小とするパラメータとして推定される。

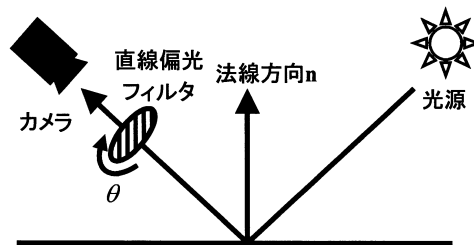


図2 偏光情報取得システム  
Fig.2 Polarization information acquisition system.

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=0}^{N-1} (I_i - I_{oi})^2 \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} (I_v \cdot \cos 2(\theta_i - \varphi) + I_c - I_{oi})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $N \geq 4$ である。また、このときの、評価関数Eの最小値を偏光推定誤差 $E_p$ と呼ぶ。

本研究では、偏光情報として、偏光位相 $\varphi$ 、偏光度 $\rho$ 、偏光推定誤差 $E_p$ の3つの情報を利用する。

### 2.2 反射光の偏光特性

被写体表面の反射特性は、法線方向に対して光源方向とカメラ方向が正反射に近い場合に生じる、てかりである鏡面反射成分と、マットな反射成分である拡散反射成分の和として表現され、鏡面反射成分と拡散反射成分の偏光特性は大きく異なることが知られている。本節では、鏡面反射成分と拡散反射成分の偏光特性の違いについて説明する。

図3、4は被写体の屈折率 $n = 1.1, 1.3, 1.5, 2.0$ の場合における鏡面反射成分と拡散反射成分の偏光度を示したグラフである[8]。ここで、図3の横軸は入射角、縦軸は鏡面反射成分偏光度、また、図4の横軸は出射角、縦軸は拡散反射成分偏光度を示している。図3より、ある入射角（ブリュースター角）に光源が存在する場合、鏡面反射の偏光度は最大の1となることがわかる。一方、拡散反射成分に関しては、図4より、出射角が90度となる場合に偏光度は最大となるが、その場合においても偏光度は鏡面反射成分の最大値に比べて十分に小さい。以上の事実から、すべての方向から光が入射された場合には、拡散反射成分に比べ鏡面反射成分の偏光度が高くなり、偏光特性として鏡面反射成分が支配的になると推測される。

次に、偏光位相について説明する。鏡面反射成分では、偏光位相は入射光線と法線によって決まる入射面に直交することが知られている[9]。一方、拡散反射成分では、偏光位相は出射光線と法線によって決まる出射面に平行となる[10]。

そこで、鏡面反射成分と拡散反射成分の偏光特性の違いに関して、以下のことが推測される。

#### 【鏡面反射成分】

- ・相対的に偏光度が高い。
- ・直線偏光フィルタの主軸方向が入射面と直交する場合に、輝度値は最大となる。

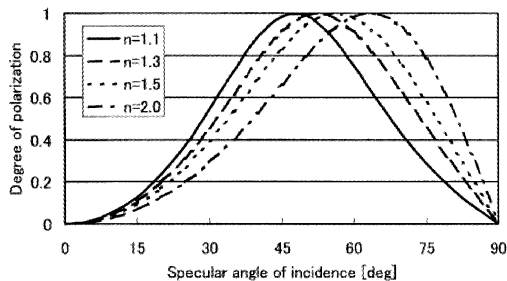


図3 鏡面反射成分の偏光度

Fig.3 Degree of polarization for specular reflection.

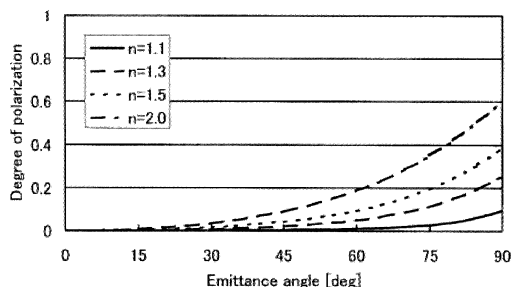


図4 鏡面反射成分の偏光度

Fig.4 Degree of polarization for diffuse reflection.

#### 【拡散反射成分】

- ・相対的に偏光度が低い。
- ・直線偏光フィルタの主軸方向が出射面と平行となる場合に、輝度値は最大となる。

## 2.3 陰影領域の偏光

本節では、典型的な撮影環境を考慮した attached shadow と cast shadow の偏光特性の違いについて説明する。まず、以下の条件の撮影シーンを想定する。

条件：「被写体が存在する撮影シーンには、近傍に広い面を有する物体が存在する。さらに、被写体に関してその広い面の反対方向には光源が存在する」

これは、例えば以下のような典型的な撮影シーンを意味する。

1. 被写体であるボールが机の上に置かれ、このボールは天井に設置された蛍光灯で照らされている。
2. 被写体である人物が、床面に置かれた椅子に座っており、この人物は、窓から差し込んでくる太陽光で照らされている。
3. 被写体である自動車が、道路上を走行しており、この自動車は、太陽光で照らされている。

陰影を発生するシーンでは、被写体とそれに近接する広い面が必須なため、屋内外に限らず地上において撮影されるほとんどの撮影シーンではこの条件が成り立つものと筆者らは考えた。

そこで、この条件が成り立つとして、attached shadow の特性を考える。図1で示したように、attached shadow は被

写体の法線が光源と反対方向を向いているために生じる影である。ここで、条件より、光源と反対方向には広い面が存在していることと、陰影領域には実際には多数の回り込み光（多重反射光）が存在していることを考慮すると、attached shadow には、図5のように、さまざまな方向から多重反射光が入射していると考えられる。つまり、attached shadow が生じている画素の法線方向に対して、カメラ方向と正反射方向に多重反射光が存在する確率が高いと考えられる。図5においては、attached shadow 領域において、光源からの2次反射光が正反射方向に存在している。そのため、attached shadow 領域では、鏡面反射成分の偏光特性が観測される可能性が高い。もちろん、attached shadow 領域での反射光には拡散反射成分も含まれる。しかし、前述のように、鏡面反射成分の偏光度は拡散反射成分のもの比べて十分に高いため、観測される偏光特性としては鏡面反射の影響を強く受けると考えられる。

次に、cast shadow について考える。図1で示したように、cast shadow は何らかの遮蔽物によって光が遮蔽されることによって生じる影である。ここで、前述の条件を考慮すると、cast shadow は、広い面上に生じる可能性が高い。そのため、図6に示したように、多重反射光は attached shadow に比較して限られた方向からしか入射しない。このことから、正反射方向に光源が存在する可能性は低いと考えられる。図6において、cast shadow 領域の正反射方向には、光源からの2次反射光が存在せず、3次反射光以上の弱い多重反射光しか存在しない。

さらに、図3で示したように、拡散反射成分の偏光度は相対的に低いため、cast shadow の偏光成分は比較的小さくなることわかる。また影領域では、輝度値そのものが小さくなるため、偏光情報はノイズ成分が支配的となり、cast shadow の偏光推定誤差は非常に大きくなる。

以上まとめると、陰影領域の偏光特性は、表1のように分類される。

## 2.4 偏光情報を利用した陰影領域の分割

本研究の陰影領域分割方法は、以下の3つのステップからなる。

### (1) 偏光情報と輝度値の取得

図2の偏光情報取得システムを利用して、画素ごとの偏光情報と輝度値を取得する。

### (2) 陰影領域の分割

各画素の輝度値を利用して、撮影画像から陰影領域を分割する。本研究では、単純な閾値処理のみを利用して、輝度値が閾値より低い画素を陰影領域として分割する。

### (3) 陰影領域を attached shadow と cast shadow へ分割

陰影領域と分割された画素に対し、表1を利用して、attached shadow 領域と cast shadow 領域に分割する。本研究では、3つの評価方法を利用する。

#### 【偏光推定誤差 $E_p$ を利用する場合】

偏光推定誤差が閾値以下の場合、画素は attached shadow。偏光推定誤差が閾値より大きい場合、画素は cast shadow。

#### 【偏光位相 $\phi$ を利用する場合】

被写体の形状情報は既知とする。形状情報が既知のため、

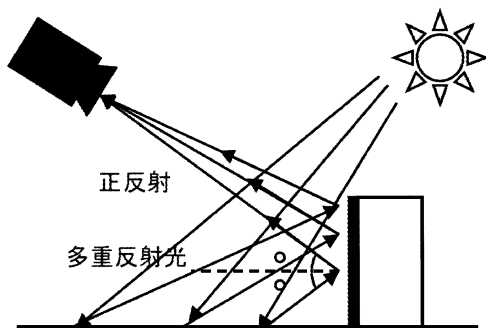


図5 Attached shadow  
Fig.5 Attached shadow.

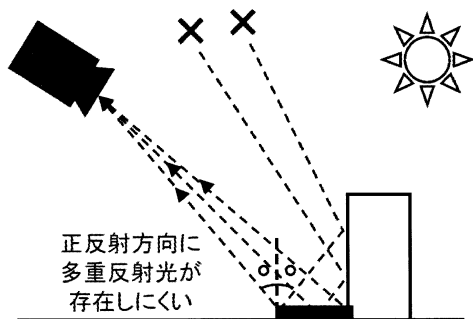


図6 Attached shadow  
Fig.6 Attached shadow.

表1. 陰影領域の偏光特性

Table 1 Polarization property of shadow region.

	attached shadow	cast shadow
偏光推定誤差	小	大
偏光位相	入射面に直交	出射面に平行
偏光度	高	低

各画素での入射面と出射面も既知である。

偏光情報取得システムによって取得された偏光位相が、形状情報から計算された入射面に直交する場合、画素は attached shadow。

偏光情報取得システムによって取得された偏光位相が、形状情報から計算された出射面に平行な場合、画素は attached shadow。

【偏光度  $\rho$  を利用する場合】

偏光度が閾値以上の場合、画素は attached shadow。

偏光度が閾値より小さい場合、画素は cast shadow。

### 3. 実験結果

本提案法の有効性を示すために、実験を行なった。

被写体としては、発泡スチロール製の球を用意し、これを暗幕を敷いた机上に配置し、球の右上方の天井に設置さ

れた蛍光灯において被写体を照射した。カメラとして Apogee 社製 Alta U6 16bit モノクロカメラを利用し、直線偏光フィルタの偏光軸は0度から180度まで10度おきに変化させた19枚の画像を撮像し、偏光情報を取得した。

図7は、偏光情報取得システムで取得した輝度画像と、その画素ごとに偏光度  $\rho$ 、偏光推定誤差  $E_p$ 、偏光位相  $\phi$  を算出した結果を示す。図7(b), (c)において、輝度値が黒い画素は0を、白い画素ほど値が大きいことを示している。また、図7(d)において、白い画素は0度(画面上向き)、黒い画素は180度(画面下向き)を示している。つまり、偏光位相は画面上向きが白、時計回りに輝度値が暗くなり、下向きで黒くなる。また、偏光位相は180度の周期性を持つため、黒(輝度値0)と白(輝度値255)は等しいことに注意されたい。

図7(a)より、球の左下に attached shadow が生じ、また、机上では、球の左側に cast shadow が生じていることがわかる。

図8は、図7(a)の輝度画像と図7(c)の偏光推定誤差  $E_p$  を利用して陰影領域の分割を行なった結果を示している。図8(a)は、図7(a)の輝度画像を2値化処理することにより、陰影領域を分割した結果を示している。黒色の画素が陰影領域と選択された画素を示している。また、図8(b), (c)は、図8(a)で陰影領域と選択された画素に対して、図7(c)の偏光推定誤差  $E_p$  に対して2値化処理を行ない、attached shadow 領域と cast shadow 領域に分割した結果を示している。良好な分割結果が得られており、本手法が有効であることがわかる。

### 4. 考察

本章では、偏光位相  $\phi$  と偏光度  $\rho$  を利用した場合の領域分割結果や、別の被写体の領域分割結果について考察する。

まず、偏光位相  $\phi$  を考える。図9は、図7(d)の偏光位相  $\phi$  において、被写体である球の左半分と cast shadow 領域を拡大した図である。ここで、球の左半分は拡散反射成分であると仮定すると、偏光位相  $\phi$  は出射面に平行な角度となるため、球の下部が白くなり、時計回りに徐々に暗くなり、上部で黒になると推測される。図9の attached shadow の右側の領域を見ると、このような偏光位相が取得されており、球の左側は拡散反射成分であることがわかる。一方、attached shadow 領域では、偏光位相  $\phi$  は、球の下部が黒であり、時計回りに徐々に明るくなっていることがわかる。つまり、attached shadow 領域では、拡散反射領域の偏光位相とおよそ90度反転しており、入射面に直交している。一方、cast shadow 領域では、法線は上向きであるため、出射面に平行な角度、すなわち白色となっていることがわかる。つまり、偏光位相  $\phi$  を利用した場合においても、本手法が有効であることがわかる。本来であれば、被写体の形状情報を取得し、領域分割結果を評価すべきであるが、本実験では形状データを取得できなかったため、定性的な評価のみしか行わなかった。

一方、図10は、偏光度を利用して陰影領域を分割した結果を示している。この場合には、十分な分割精度が達成されなかった。これは、偏光度が被写体自身の反射特性や光源環境に大きく依存するものであるためであると考えられる。

また、図 1 1 に別の被写体における陰影領域の分割結果を示した。ここでは、形状・反射特性がより複雑な被写体として彩色した木製のお面を利用した。また、光源として、セリック社製 人工太陽灯 SOLAX XC-100 を利用した。偏光推定誤差を利用した場合、彩色した木製のお面に対しても良好な領域分割が行なわれていることが確認できる。

## 5. まとめ

本研究では、偏光情報を利用して、光源移動を伴わない撮像系において、陰影領域を **attached shadow** 領域と **cast shadow** 領域に分割する手法を提案した。陰影が発生する典型的な撮影シーンを想定すると、**attached shadow** 領域では鏡面反射と等しい偏光特性を有することを仮定した。

さらに、実画像において本手法を適用し、その有効性を確認した。本技術は、光源環境や被写体周囲における物体の有無、さらには被写体自身の反射特性など、撮像シーンの多くの要因に依存する。今後は、さまざまな撮像シーンにおいて本手法を適用し、その有効性の検討を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 佐藤洋一, 向川康博, "インバースレンダリング," 情報処理学会研究報告 2004-CVIM-145, Vol.2004, No.91, pp.65-76, 2004.
- [2] P.Mamassian, D.C.Knill and D.Kersten, "The perception of cast shadows ", Trends in Cognitive Sciences, Vol.2, No.8, pp.288-295, 1998.
- [3] I.Sato, Y.Sato and K.Ikeuchi, "Illumination from shadows", IEEE Trans. PAMI, Vol.25, No.3, pp.290-300, 2003.
- [4] T.Okabe, I.Sato, and Y.Sato, "Spherical harmonics vs. Haar wavelets: basis for recovering illumination from cast shadows", Proc. CVPR2004, pp.50-57, 2004.
- [5] I.Sato, T.Okabe, Yu Qiong, Y.Sato, "Shape Reconstruction Based on Similarity in Radiance Changes under Varying Illumination", Proc. ICCV2007, pp.1-8, 2007.
- [6] P.N.Belhumeur, D.J.Kriegman, and A.L.Yuille, "The Bas-Relief Ambiguity", International Journal of Computer Vision, pp.33-44, 1999.
- [7] Y.Mukaigawa, Y.Ishii and T.Shakunaga, "Analysis of photometric factors based on photometric linearization", Journal of the Optical Society of America A, Vol.24, No.10, pp.3326-3334, 2007.
- [8] L.B.Wolff and E.Boult, "Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model", IEEE Trans. PAMI, Vol.13, No.7, pp.635-657, 1991.
- [9] L.B.Wolff, "Surface orientation from two-camera stereo with polarizers", Proc. SPIE Vol.1194, Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision IV, pp.287-297, 1989.
- [10] Ondřej Drbohlav and Sara Radim, "Using polarization to determine intrinsic surface properties", Proc. SPIE Vol.3826, pp.253-263, 1999.

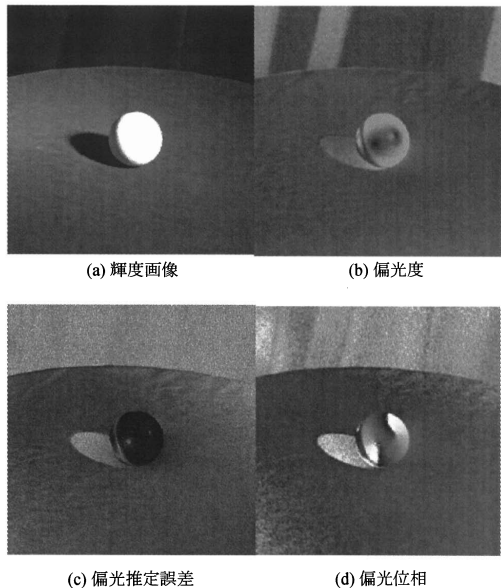


図 7 取得した偏光情報

Fig.7 Polarization information.

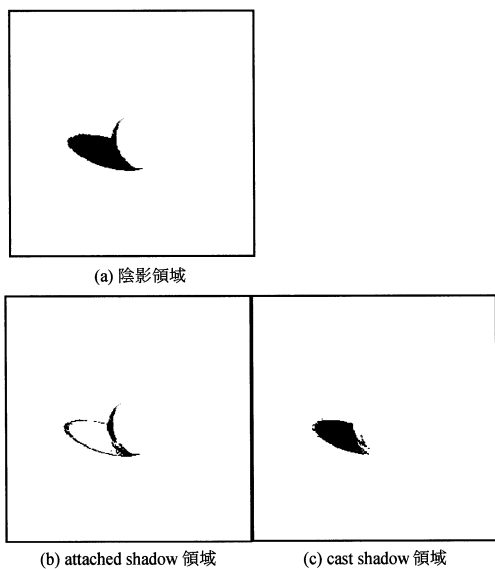


図 8 偏光推定誤差を利用した陰影領域の分類結果

Fig.8 Classification results.



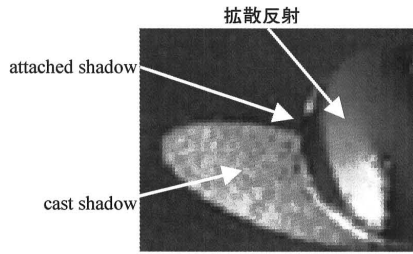
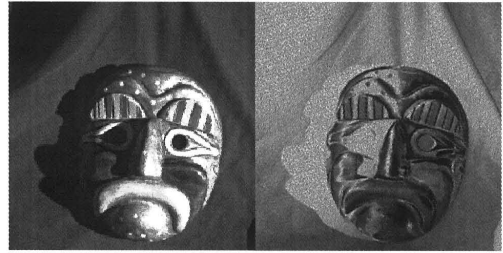
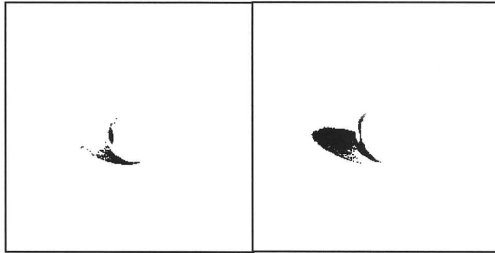


図9 偏光位相(拡大画像)  
Fig.9 Polarization direction

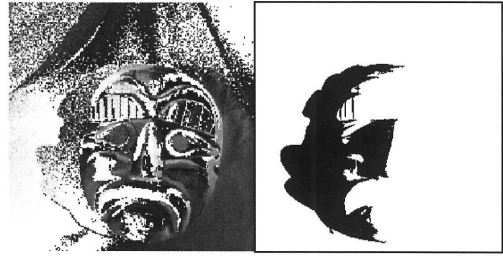


(a) 輝度画像 (b) 偏光推定誤差

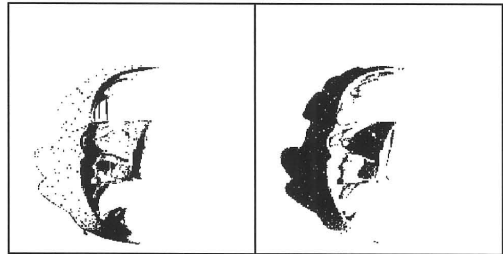


(a) attached shadow 領域 (b) cast shadow 領域

図10 偏光度を利用した陰影領域の分類結果  
Fig.10 Classification results.



(c) 偏光位相 (d) 陰影領域



(e) attached shadow 領域 (f) cast shadow 領域

図11 陰影領域の分類結果  
Fig.11 Classification results.