

偏光を利用した照度差ステレオ法による面の傾き抽出法

An Extracting Method of Surface Orientation by Photometric Stereo Using Polarimetry

伊東敏夫

松本俊哲

Toshio ITO

Shuntetsu MATSUMOTO

豊田工業大学

Toyota Technological Institute

あらまし 本論文では、偏光を利用して照度差ステレオ法の適用範囲の拡張を試みる。従来の照度差ステレオ法の対象は、均一な反射特性をもつ物体面に限定されていた。しかし平行光線のもとでは、対象物体面が完全拡散面であれば反射係数が不均一でも適用できる可能性がある。そして対象物体面によっては、直線偏光と検光子を利用して鏡面反射光を抑制し、近似的に完全拡散面として取り扱えるものがある。ここでは、実験結果にもとづいて、それを満足する対象物体面の物理的特性を明らかにした。また、そのような特性をもち反射係数が不均一（模様がある）な対象物体面の傾きを、偏光を利用した照度差ステレオ法によって抽出した。

Abstract This paper concerned with an extended photometric stereo method using polarimetry. The photometric stereo has been used only for a surface which is uniform in its reflectance properties. But it can be utilized for a surface which doesn't have uniform reflectance properties if the surface is Lambertian. When the specular component of reflection is suppressed by polarimetry, there is the surface which can be approximated to Lambertian. In this paper, we report the experimental results of reflectance properties and the extracted surface orientation by this extended photometric stereo.

1. はじめに

1978年、Horn⁽¹⁾、Woodham⁽²⁾等によって提唱された照度差ステレオ法は、対象の同定処理を省いて、直接対象形状の再構成を実現できる可能性を示した。しかしそのためには、対象面の反射特性の均一性が不可欠な条件である。

これに対して筆者ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、反射光の中の拡散反射光成分だけを利用することによって、反射特性が不均一な対象面に対しても照度差ステレオ法が適用可能であることを立証した。

ここで拡散反射光成分とは、Lambertの法則で定義された反射光であって、どの方向から見て

も常に一定な、すなわち入射角の余弦に比例した反射光強度を有する成分である。

蓮沼⁽⁵⁾は反射面を第1種、第2種反射面に分類し、前者での反射光は物体内部に侵入後、屈折率の不均衡部で屈折、散乱を繰り返したのち、再び外部へ放出されると定義している。そして物体表面からの反射光だけのものは、後者の第2種反射面と名付けている。

また田中⁽⁶⁾は、偏光子からの直線偏光によって対象面を照明し、その反射光をそれと直角な向きの検光子で受光した反射光成分を、蓮沼の第1種反射面での反射光と類似な拡散反射光成分と定義している。この田中の拡散反射光成分

は厳密な意味では上記の第1種反射面での反射光と一致せず、表面粗さに起因した若干の鏡面反射光成分(第2種反射面での反射光)が含まれるが、工学的には近似的な拡散反射光成分として使用して差し支えないと思われる。そこでここでは、この拡散反射光成分をLambertの法則を近似的に満足した反射光成分と定義して論を進める。

対象物体面の多くは、上記手法による拡散反射面としての取り扱いが可能であるが、金属や非晶性の物体面などに対しては、所望の拡散反射光を得ることができない。それゆえここでは、各種の物体面に対して上記の手法を適用しLambertの法則の見地からその反射特性に検討を加え、その適用限界を明らかにする。また、不均一な反射光特性を有する対象物体面に対してこの手法による照度差ステレオ法を適用し、その面の傾きの抽出と、それにもとづく形状の再構成結果について報告する。

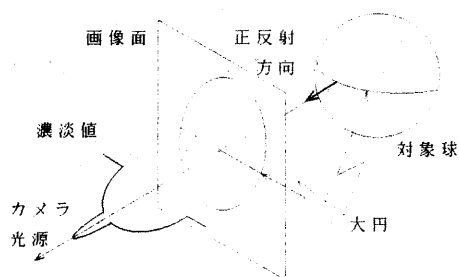
2. 偏光の反射特性

2.1 反射特性の測定系

本論文での対象は、我々の周囲に存在する一般的な物体面であって、対象の大きさとか照明光の波長は人間の視覚範囲に限定する。また本論文の目的が、拡散反射光特性にもとづく対象面の傾きの抽出と形状の再構成にあることから、拡散反射光特性の観点から対象面を分類し、実測にもとづいて本手法の適用範囲を明らかにする。

すなわち、対象面の光学的特性を、その表面粗さと構成材質の両面から検討を加え、各種の観測例にもとづいて拡散反射光の生成機構と偏光の利用手法の明確化を図る。

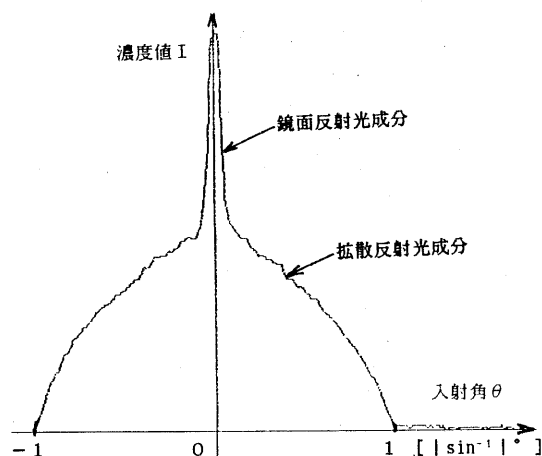
図1はここで使用した対象面の反射特性を効率的に測定するための測定系である。計測対象は所定の材質で、所定の均一な表面粗さをもつ球、または円筒とする。対象球、円筒面から撮像管および光源との間の距離は十分とり、正射影に近似可能とする。また正反射方向と観測方向がほぼ一致するように光源と撮像管を近接配置する。ついで輝度が最大となる対象の大円部分が画像上で直線になるようにし、その大円上の画像濃度値の変化を調べる。ここで撮像管の γ 特性は1.0とし、大円方向の画素数は480個、



(図1) 反射特性の測定系

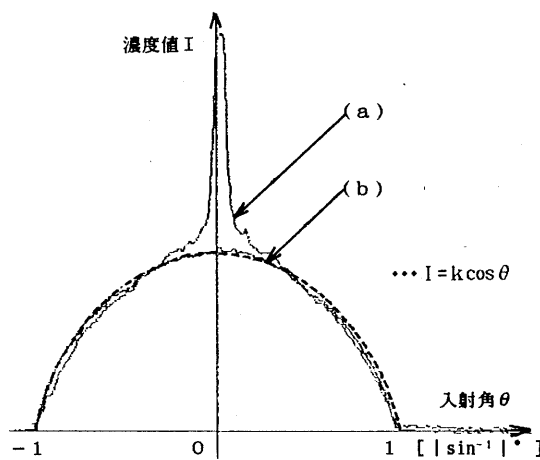
画素の濃淡は256階調である。

上記の測定系を使用した自然光照射の実測例を図2に示す。測定対象は、表面が滑らかな円筒状のポリエステルである。図の縦軸は画像濃度値を表し、横軸は入射角を表す。ただし横軸は大円上にあるため、単位を $\sin^{-1}$ 度とした。図2から明らかなように、この反射光は、鏡面反射光成分と拡散反射光成分からなり、鏡面反射光成分は正反射方向付近に集中していることが観測される。

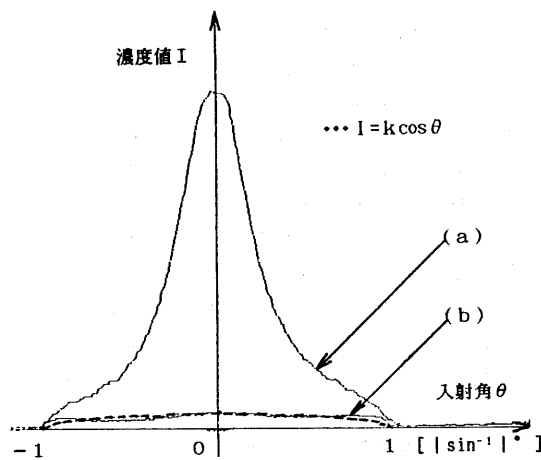


(図2) ポリエステルの反射特性

図3は入射光を偏光子を通してP偏光とし、検光子を通して図2のポリエステルを観測した結果を示す。ここで(a)は検光子を偏光子と平行にした場合、(b)は検光子を偏光子と直角にした場合である。偏光子と検光子は同一のもので、カメラ用高分子膜偏光フィルター(櫛ケンコー製PLフィルター)を使用した。(a)の場合は図2と相似な結果が得られ、(b)の場合は大部分の鏡面反射光成分が除去され、前章で述



(図3) ポリエステルの偏光反射特性



(図5) スリガラスの偏光反射特性

べた、近似的に Lambert 法則を満足する拡散反射光成分が観測される。S 偏光入射の場合も、同様な結果が得られる。

いま対象点の画像濃度値を I 、入射角を θ 、反射係数を k とおくと、図 3 (b) は破線で示した

$$I \approx k \cos \theta \quad \dots (1)$$

で近似できることが判明した。

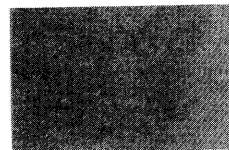
2.2 表面粗さの影響

表面粗さの拡散反射光特性への影響を検討するため、以下の表面粗さをもつ対象面の反射特性を測定した。

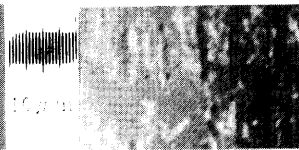
図 4 はスリガラス面の顕微鏡写真で、図 5 はその反射特性である。ここで (a)、(b) は図 3 の場合と同じ偏光特性のもとでの測定結果を示す。

図 6 はスリガラスと相似な粗さ表面をもつポリエステルの反射特性と、スリガラス面の図 5 (a) の撮像感度をポリエステルに合わせた反射特性を示す。図 6 (b) の場合は、図 3 (b) と相似な反射特性が得られる。

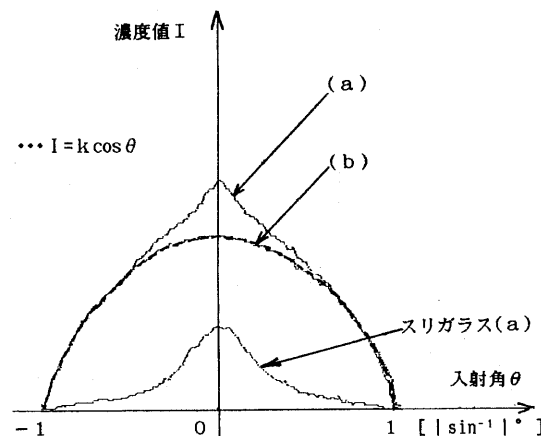
図 7 に示すような偏った表面粗さ特性をもつポリエステル面の反射特性を図 8 に示す。



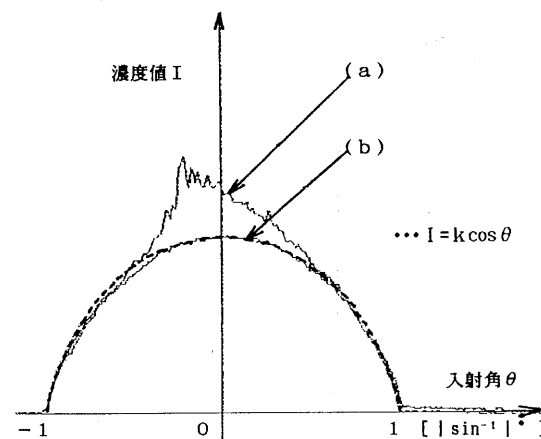
(図4) スリガラス面の顕微鏡写真



(図7) 偏った表面粗さ特性の面



(図6) 粗いポリエステルの偏光反射特性



(図8) 偏った表面粗さ特性をもつポリエステルの偏光反射特性

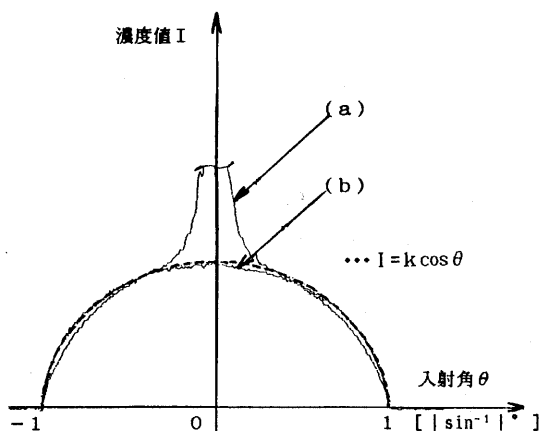
2.3 構成材質の影響

構成材質の拡散反射光特性への影響を検討するため、各種の材質表面を対象として測定を行ったが、ここではその典型的な例を示す。

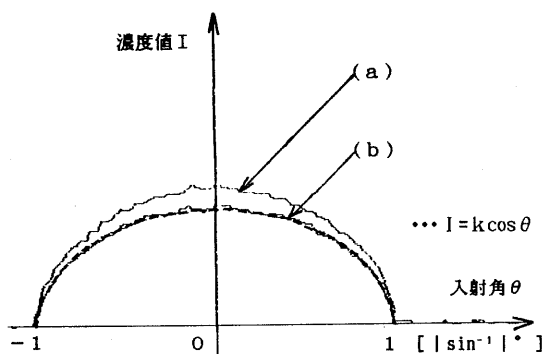
典型的な拡散面の例としてチョークの反射特性を図9に、典型的な金属面の例としてよく磨かれたアルミニウムの反射特性を図10に示す。

結晶化率が高い高分子の例として、結晶化率90%の低压ポリエチレンの反射特性を図11に示す。結晶化率が低い高分子の例として、結晶化率65%の高压ポリエチレンの反射特性を図12に示す。

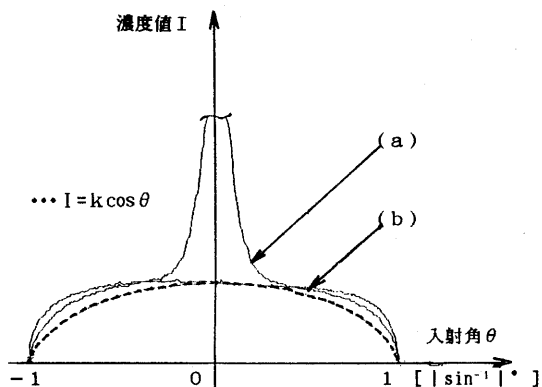
また塗装面の典型的な例として、塗装厚さ約 $100\mu\text{m}$ の塗装面（メラミン焼付け静電塗装、塗装品番マンセル5Y7.5/1）の反射特性を図13に示す。



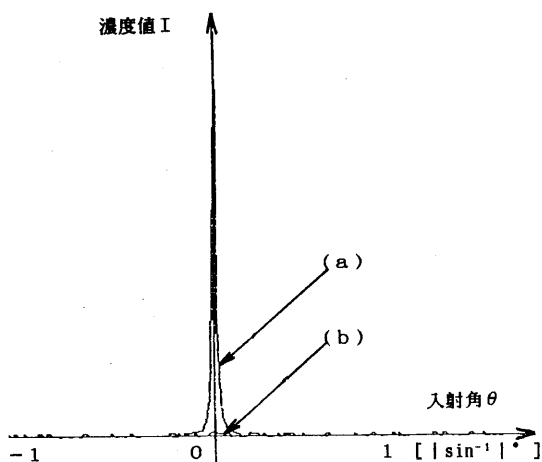
（図11）低压ポリエチレンの偏光反射特性



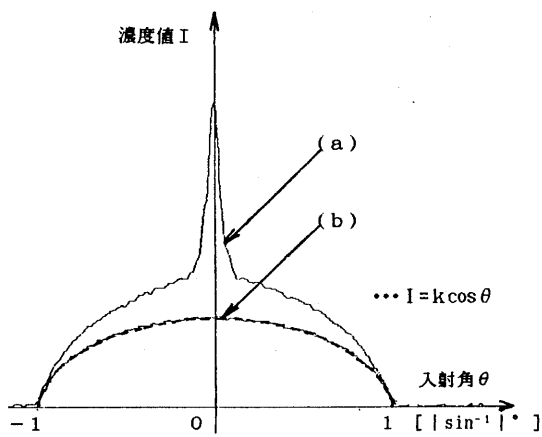
（図9）チョークの偏光反射特性



（図12）高压ポリエチレンの偏光反射特性



（図10）アルミニウムの偏光反射特性



（図13）塗装面の偏光反射特性

2.4 偏光手法を利用した拡散面の適用範囲

ここでは上記の測定結果を、1. で述べた近似的な拡散反射光成分の立場から検討を加える。

はじめに、2.2の測定結果から、対象表面の粗さ特性が拡散反射光特性にあたる影響はきわめて微少であることが判明した。

一方、構成材質の特性は、2.3の測定結果から、その拡散反射光成分に大きな影響を与えることが実証された。すなわち炭酸カルシウムの微粉を圧縮成形したチョークとか、結晶化率が高い低圧ポリエチレン、非晶性のバインダに顔料の微粒子を混合した塗装面などからは明確な拡散反射光成分が観測される。

これに対して、結晶化率の低い高圧ポリエチレンの場合は図12(b)のように、その拡散反射光成分が不明確となる。特に金属面とか非晶性のスリガラスの場合は、図10(b)、図5(b)に示す例から、拡散反射光成分はほとんど観測されない。

これらの結果から、偏光を利用して完全拡散面に近似可能な対象面は、光学的特性(屈折率、反射率)の異なった微小物質がある密度で混在した物質面であることが判明した。すなわち上記のチョークの場合は、炭酸カルシウムの微結晶間での空気存在、塗装面の場合は非晶性のバインダと顔料微粒子間の屈折率の差にその原因がある。

この観点から考えると、全体が金属結晶で構成された金属表面とか、非晶性で等質なガラス面などは、完全拡散面としての近似が困難であることは明かである。また、結晶化率が低い高圧ポリエチレンとかパラフィン等の場合も、完全拡散面としての近似は困難である。しかし我々の周囲に存在する家具、衣類の大部分、それから各種工場内での製品のかかなりの部分に対して、偏光手法による完全拡散面としての近似が適用可能であるように思われる。

3. 照度差ステレオ法への適用

3.1 照度差ステレオ法の問題点

照度差ステレオ法は、カメラと観測対象物体とを固定し、光源を複数方向から照射することにより、複数枚の画像の濃淡情報を得、これから対象物体面の面素の傾きを抽出する方法である。

図14の観測系において、 s は光源方向の単位ベクトル、 v は観測方向の単位ベクトル、 n は対象物体面の法線単位ベクトル、 s' は正反射方向の単位ベクトルを示す。照度差ステレオ法的前提条件は、光源を平行光とし s が全面素にわたり一定であることと、正射影を仮定し v が全面素にわたり一定であることである。この条件下で s と v とを既知情報とし、事前調査した対象物体表面の反射特性を反射率マップとして使用することにより、対象面素の法線ベクトル n を求めることができる。

ところがこの手法では、対象表面の反射特性の均一性が前提条件であることから、各種の表面特性をもつ複雑な対象表面の形状導出が困難である。そこで本論文では、2. の偏光計測手法によって得られる近似的な拡散面の仮定を使用して、この問題点への一解決法について報告する。

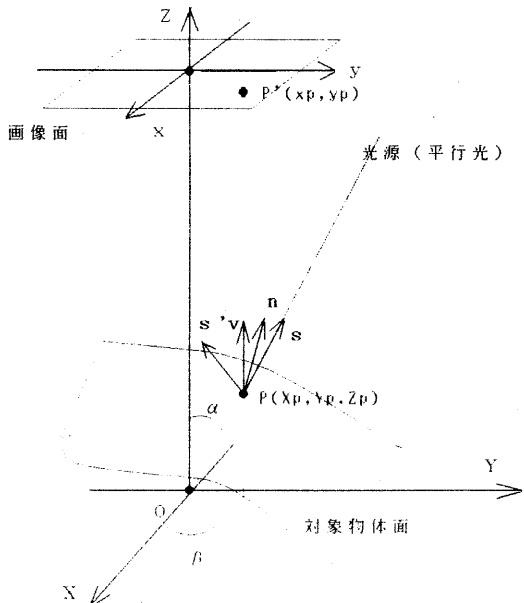
3.2 完全拡散面での照度差ステレオ法

ここでは対象表面の光学的特性を不均一な反射率をもつ完全拡散面と仮定して論を進める。すなわち対象面素の傾きを、

$$p = \partial Z / \partial X \quad \dots(2)$$

$$q = \partial Z / \partial Y \quad \dots(3)$$

とすれば、面素の法線単位ベクトル n を p 、 q を用いて表現すると、



(図14) 照度差ステレオ法の観測系

$$n = \frac{(-p, -q, 1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad \dots(4)$$

となる。s は既知ベクトルであり、

$$s = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha) \quad \dots(5)$$

となる。ここで α 、 β は図14の光源方向の天頂角、方位角である。対象表面は完全拡散面であるから、所定の面素の濃度値 I は(1)式から、

$$I = \phi k(n, s) = k(n \cdot s) \quad \dots(6)$$

と表せる。(6)式より j 方向の照明による画像面上での濃度値 I_j は

$$I_j = k(n \cdot s_j) \quad \dots(7)$$

となる。(7)式に(4)、(5)式を代入すれば、

$$I_j = k \frac{-p \sin \alpha_j \cos \beta_j - q \sin \alpha_j \sin \beta_j + \cos \alpha_j}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad \dots(8)$$

となる。光源位置を変えても k は一定であることから、(8)式を連立させれば ($j=1, 2, 3$)、

$$\begin{aligned} I_1 &= \phi k(k, p, q, s_1) \\ I_2 &= \phi k(k, p, q, s_2) \\ I_3 &= \phi k(k, p, q, s_3) \end{aligned} \quad \dots(9)$$

となる。(8)式は線形ではないが、2乗項は分母だけであるから連立させることにより線形化できるので3個の方程式で p、q について解くことができる。これより、

$$p = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} = \frac{c_2 b_3 - b_2 c_3}{a_2 b_3 - b_2 a_3} \quad \dots(10)$$

$$q = \frac{c_1 a_2 - a_1 c_2}{b_1 a_2 - a_1 b_2} = \frac{c_2 a_3 - a_2 c_3}{b_2 a_3 - a_2 b_3} \quad \dots(11)$$

となる。ただし、

$$a_1 b_2 - b_1 a_2 \neq 0, \quad a_2 b_3 - b_2 a_3 \neq 0$$

$$b_1 a_2 - a_1 b_2 \neq 0, \quad b_2 a_3 - a_2 b_3 \neq 0$$

$$a_1 = I_1 \sin \alpha_2 \cos \beta_2 - I_2 \sin \alpha_1 \cos \beta_1$$

$$a_2 = I_2 \sin \alpha_3 \cos \beta_3 - I_3 \sin \alpha_2 \cos \beta_2$$

$$a_3 = I_3 \sin \alpha_1 \cos \beta_1 - I_1 \sin \alpha_3 \cos \beta_3$$

$$b_1 = I_1 \sin \alpha_2 \sin \beta_2 - I_2 \sin \alpha_1 \sin \beta_1$$

$$b_2 = I_2 \sin \alpha_3 \sin \beta_3 - I_3 \sin \alpha_2 \sin \beta_2$$

$$b_3 = I_3 \sin \alpha_1 \sin \beta_1 - I_1 \sin \alpha_3 \sin \beta_3$$

$$c_1 = I_1 \cos \alpha_2 - I_2 \cos \alpha_1$$

$$c_2 = I_2 \cos \alpha_3 - I_3 \cos \alpha_2$$

$$c_3 = I_3 \cos \alpha_1 - I_1 \cos \alpha_3$$

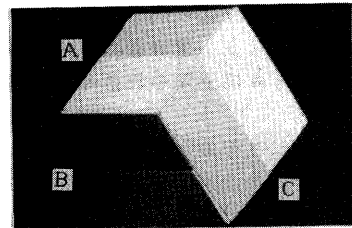
である。(10)(11)式の分母が0になるのは s_j が3個とも同一平面内にあるときで、光源位置の設定により不定解は容易に避けることができる。

(8)式を連立させることにより面素の傾きがわかるので、この条件下においては反射率マッ

プが不要となる。また、照度差ステレオ法では、対象物体表面の反射特性は均一でなければならないが、本手法においては対象物体表面の反射特性は面素毎の反射係数 k だけで表されるので、各面素の反射率は異なってもよい。すなわち、対象物体表面の反射特性は不均一であってもよく、表面の模様とかテクスチャの有無に影響されない。

4. 実験結果

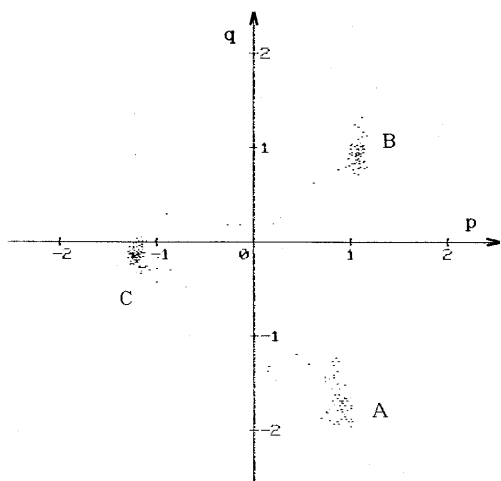
対象物体を図15に示す。この対象物体は A、B、C 3面の多面体で、各平面は2種類の材料(憐信越ポリマー製HPタイルHP-005, HP-305)で構成されている。これは図13の塗装面の場合に近い材質で、非晶性の塩化ビニールに微小粒径の顔料が混合されたものである。これは2.4の条件を満足していることから、偏光手法によって完全拡散面として近似することができる。また2種類の材料はその顔料成分が異なるため、反射係数にかなりの違いがある。またこれらの材料は鏡面反射光成分を持ち、その反射特性は未知である。



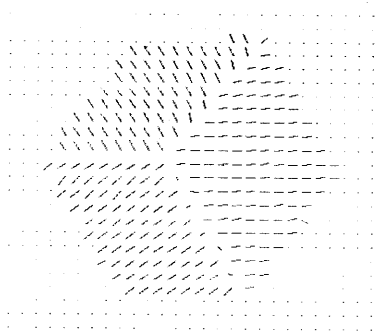
(図15) 対象物体面画像

いま光源方向を $\alpha_{1,2,3}=30^\circ$ 、 $\beta_{1,2,3}=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ とし、 $\beta_1=0^\circ$ で S 偏光としたので、 $\beta_2=90^\circ$ では P 偏光、 $\beta_3=180^\circ$ では S 偏光とした。検光子の設定角度は、 $\beta_1=0^\circ$ で S 偏光方向と直角にした。

(10)、(11)式より得られた p、q 値を図16に示す。値のばらつききの主原因は、入射光の不均一性(光線の広がり)にある。この p、q 値から作成したニードル・ダイアグラムを図17に示す。このニードル・ダイアグラムから再構成した結果を図18に示す。本手法は反射特性の不均一性に影響されることなく、面の傾きが抽出できることがわかる。



(図16) 対象物体面の p 、 q 値

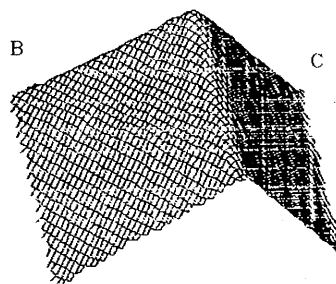


(図17) 対象物体面のニードル・ダイアグラム

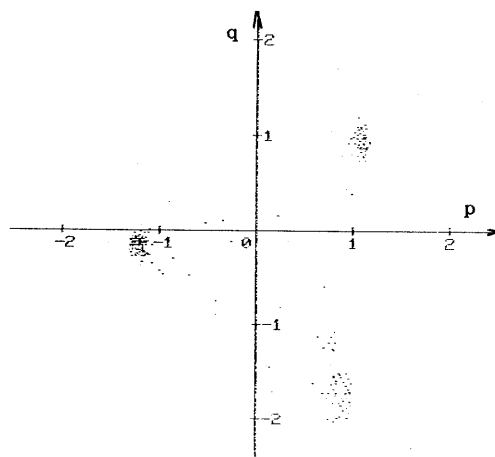
反射特性が均一で、自然光下で完全拡散面に近似できる材料で構成された図15と同じ形状について、 p 、 q 値を求めた結果を図19に示す。図16は図19と比べて差はなく、本手法は対象面の反射特性が未知で不均一であっても、従来の照度差ステレオ法と同様の範囲で扱えるものと思われる。



(図20) 複雑な形状の対象物体面

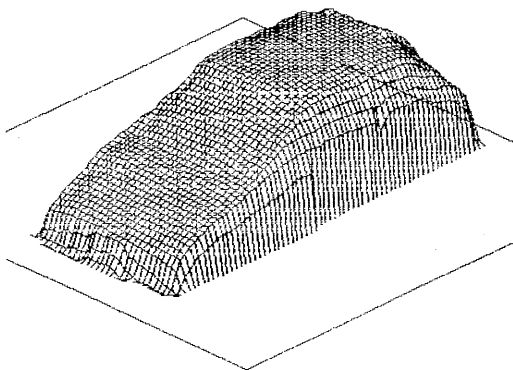


(図18) 対象物体面の再構成結果



(図19) 対象物体面と同形状で反射光特性が均一な面の p 、 q 値

複雑な形状への応用例として、図20に示す対象物体に本手法を適用した。図21は、その形状を再構成した結果である。



(図21) 図20の再構成結果

5. むすび

本論文では、入射光に直線偏光を利用して拡散面に近似することができる対象面の物理的特性を、実験結果に基づいて明らかにした。また、偏光を利用した照度差ステレオ法により、対象面を拡散面として取り扱うことによって、未知で不均一な反射特性をもつ対象物体面の傾きが抽出可能となることを示し、実験によりこれを確認した。

本論文の拡散反射光特性は、入射光をS偏光かP偏光にし、検光子の角度を偏光子の角度に直角にしたとき得られたものである。非金属材料の透明材質の屈折率は一般に1.2~1.8にあり、この範囲で入射角が 15° 以下($\alpha=30^\circ$ 以下)であればS偏光成分とP偏光成分の反射率はほぼ等しい。よって、任意の偏光方向でも鏡面反射光成分を除去するための検光子の角度は、入射偏光方向にほぼ直角となることから、本手法は入射偏光方向にほとんど影響されない。

今後は偏光を利用して拡散面が得られない対象面の実験的検討と、傾き抽出結果の誤差の問題点等について検討を加える予定である。

文 献

- (1)Horn,B.K.P.,R.J.Woodham,&W.Silver,:
"Determining Shape and Reflectance
Using Multiple Images",MIT AI Labo.
Memo 490, August.
- (2)Woodham,R.J.: "Photometric Stereo :
A Reflectance Map Technique for determining surface orientation from a single View",Image Understanding Systems and Industrial Applications,Proc.SPIE 22nd Annual Technical Symp.,San Diego, California,vol.155,pp.136-143,28-31 August 1978
- (3)伊東,松本:"照度差ステレオによる不均一な反射特性をもつ面の傾き抽出法"昭和63年度電気関係学会東海支部連合大会,635
- (4)伊東,松本:"不均一な反射特性をもつ物体の照度差ステレオを利用した 3次元形状の同定手法",第31回自動制御連合講演会,3008,pp.389-390 (昭63)

- (5)蓮沼宏:"拡散反射と表面の光沢"応用物理23 (1954)501.
- (6)田中俊一:"偏光の光学測定への応用"応用物理51(1981)530