

## ハイライトの偏光解析にもとづく透明物体の 表面形状測定

斉藤 めぐみ† 佐藤 洋一§ 池内 克史§ 栢木 寛†

†慶応義塾大学 理工学部  
§東京大学 生産技術研究所

**Abstract:** 透明物体の表面形状を非接触で計測する手法としては、簡便なものが存在しない。そこで本論文では、ハイライトの偏光解析を行うことにより、透明物体の表面形状を非接触で計測する手法を提案する。ハイライトとは、物体からの反射光のうち光源からの光をそのまま反射する鏡面反射成分として観察される光のことである。しかし、ハイライトは正反射方向付近でのみ観察されるため、一般には物体表面上のごく限られた部分でしか見られない。そこで提案する手法では、球面状の面光源を用いることにより、透明物体表面全域において法線方向を非接触で求めることを可能とした。

## Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects Using Polarization in Highlight

Megumi Saito†, Yoichi Sato§, Katsushi Ikeuchi§, and Hiroshi Kashiwagi†

†Faculty of Science and Technology, Keio University  
§Institute of Industrial Science, University of Tokyo

**Abstract:** This paper proposes a method for obtaining surface orientations of transparent objects using polarization in highlight. Since the highlight, the specular component of reflection light from objects, is observed only near the specular direction, it appears merely limited parts on an object surface. In order to obtain orientations of a whole object surface, we employ a spherical extended light source. This paper reports its experimental apparatus, a shape recovery algorithm, and its performance evaluation.

## 1 はじめに

物体の表面形状測定を非接触で行う方法としては、光学的なものが多数実用化されている。光計測と呼べるこの測定法には大きく分けると2種類あり、点測定法と面測定法がある [1]-[7]。

点測定法は、物体の各点ごとの寸法や深さを測定して立体形状を測定する方法で、光スポットやビームを物体全面で走査することによって立体形状を計測するものである。

一方、面測定法は物体面の等高線を直接縞画像の形で得るものであり、この等高線図形をもとに縞解析を行って形状を求める。面測定法としては、干渉法やモアレトポグラフィ、ステレオ法が広く実用化されている。

以上のように、非接触で物体表面形状を計測する手段がいくつか実用化されているが、これらの手法はすべて非透明面を仮定している。透明物体表面形状を計測する、自然光等のインコヒーレント光を用いた簡便で正確な測定法は存在しない。

筆者らは、透明物体の表面形状測定を非接触、高精度で行うための手法としてハイライトの偏光を用いることを提案し、その測定と検討を行う。この際に、入力装置としては CCD カメラを用い、物体表面を CCD の各画素に対応する微小面積の測定部位に分割し、それぞれの部位で表面法線方向を直接求める。本論文は、透明物体の表面形状測定が高精度で行えることを示し、本手法の有用性を示す。

## 2 反射光の仕組みと偏光の原理

### 2.1 反射とハイライトの定義

物体からの反射光は一樣ではなく、物体の材質、形状によって様々な成分がある。不均質で透明な誘電体を考えた場合、反射光としては次の4つの成分が考えられる。

1. 入射光の波長よりも十分大きい平らな面から正反射方向に1回で反射する光
2. 入射光の波長よりも十分大きい微細面から成る粗い面の間で少なくとも2回以上反射して

きた光

3. 物体表面を透過して、中で色素等の pigment のために反射を繰り返した後に再び空气中に透過してきた光
4. 入射光の波長と同程度か、より小さい微細面で回折された光

この4つの反射成分の様子を図1に示した。1の反射光を鏡面反射光と呼び、2-4の反射光を拡散反射光と呼ぶ [2][8][9]。ここで、4の成分は非常に小さいので、物体が波長オーダーの周期構造を持つ場合以外はほとんど無視できる。完全に平らな面を持つ物体では反射成分は1と3のみになるが、大抵の物体の反射光は上にあげた反射成分の和になっている。

以上の反射成分を考えると、3の反射成分は物体中で反射、屈折、吸収を繰り返し、物体の色を認識させる光となるのに対し、1の反射成分は1回で反射するためにエネルギーが最も大きく、光源の色とほぼ同じ色で見える。2の反射成分は、1に比べるとエネルギーは小さくなるが1と同様に吸収はほぼないので光源の色と同じになる。1の反射成分に2の反射成分を合わせて、物体には正反射方向とそれに近い方向にほぼ光源の色と同じである強い光が見えることになる。この部分の光をハイライトと呼ぶ。ハイライトは、粗い面であれば2の成分が大きくなるので、広く見えるが光自体は弱くなり、完全に滑らかな面であれば1の成分のみになるので、非常に狭い領域で強い光となる。

特に、透明物体表面ではこれらのハイライトのみを観測することになる。

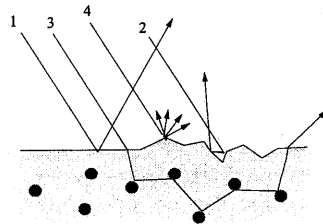


図1: 反射の仕組み

## 2.2 フレネルの反射の公式

反射光の測定のために、正反射における反射と透過の原理について以下に示す。

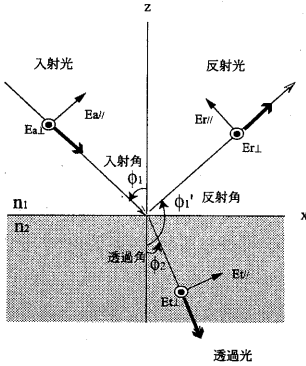


図 2: フレネル反射

図 2 に示したように屈折率が  $n_1$ 、 $n_2$  なる媒質 1、2 の境界面が  $x-y$  面内にあり、媒質 1 から平面の光が  $x-z$  面内で媒質 2 に入射する場合を考える。このとき、光は境界面で屈折して媒質 2 に透過していき、同時に一部分は境界面で反射する。ここでは透明な誘電体を考えるので、可視域において吸収は無視できる。入射光、反射光、透過光の  $x-z$  面に平行な成分、垂直な成分をそれぞれ添字  $\parallel$ 、 $\perp$  で表す。

入射角  $\phi_1$ 、反射角  $\phi_1'$ 、透過角  $\phi_2$  はそれぞれ図 2 に示したように定義する。ただし、入射光と反射光は同じ媒質中を通るので  $\phi_1 = \pi - \phi_1'$  である。このとき、入射、反射、透過光の電界ベクトルのうち  $x-z$  面内に平行な成分、 $E_{a\parallel}$ 、 $E_{r\parallel}$ 、 $E_{t\parallel}$  は次のように表せる。

$$\begin{aligned} E_{a\parallel} &= A_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 + z \cos \phi_1)\}] \\ E_{r\parallel} &= R_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 - z \cos \phi_1)\}] \\ E_{t\parallel} &= T_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_2(x \sin \phi_2 + z \cos \phi_2)\}] \end{aligned}$$

$A_{\parallel}$ 、 $R_{\parallel}$ 、 $T_{\parallel}$  は振幅、 $\omega$  は角周波数、 $k_1$ 、 $k_2$  は媒質 1、2 中の波数である。ただし、波数は  $2\pi/\lambda$  である。垂直成分  $\perp$  も同様に表せる。添字 a、r、t はそれぞれ入射光、反射光、透過光を表す。

ここで、光の反射率について考える。スネルの法則は、透過の際に光の進む方向が屈折することを表し、入射角  $\phi_1$  と透過角  $\phi_2$  は次式で与えられる。

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2)$$

Maxwell の方程式の解は、境界面において電界と磁界の面内成分が連続でなければならないことから、媒質 1 側の入射光と反射光の振幅の和が媒質 2 側の透過光の振幅と  $x$ 、 $y$  方向で等しくなければならない。このことから次式を得る。

$$E_{a_j} + E_{r_j} = E_{t_j}, \quad H_{a_j} + H_{r_j} = H_{t_j} \quad (j = x, y) \quad (3)$$

$E$ 、 $H$  はそれぞれ電界、磁界を表す。以上の式 (1)(2)(3) を用いて平行成分、垂直成分についての振幅反射率  $r_{\parallel}$ 、 $r_{\perp}$  が次のように求められる。

$$\begin{aligned} r_{\parallel} &= \frac{E_{r\parallel}}{E_{a\parallel}} = \frac{\tan(\phi_1 - \phi_2)}{\tan(\phi_1 + \phi_2)} \\ r_{\perp} &= \frac{E_{r\perp}}{E_{a\perp}} = -\frac{\sin(\phi_1 - \phi_2)}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \quad (4)$$

これを、フレネルの公式と呼ぶ。また、光強度の大きさは次式で与えられる。

$$I = \frac{nE^2}{2\sqrt{\mu_0}} \quad (5)$$

$n$  は各媒質の屈折率、 $\mu_0$  は真空透磁率である。これより、式 (4) を用いて強度反射率は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} F_{\parallel} &= \frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_2)}{\tan^2(\phi_1 + \phi_2)} \\ F_{\perp} &= \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)}{\sin^2(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

強度反射率  $F_{\parallel}$ 、 $F_{\perp}$  をフレネル反射係数と呼ぶ。

式 (6) より、 $F_{\parallel} = 0$  とする入射角が存在することがわかる。このような入射角をブリュースタ (Brewster) 角  $\phi_b$  と呼ぶ。ブリュースタ角は、 $\phi_1 + \phi_2 = \pi/2$  とスネルの法則より次式で与えられる。

$$\phi_b = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (7)$$

### 3 透明物体の表面形状測定

#### 3.1 測定原理

図3のような測定系を考える。

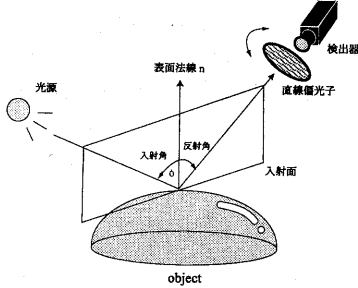


図3: 物体の表面法線

拡散反射がほとんど無視でき吸収がないとみなせる透明物体においては、反射光は鏡面反射であるハイライトのみと考えられ、正反射であるために反射角は入射角と等しい。そのため、物体表面上各点における入射面方向と反射角がわかれば表面法線方向を求めることができる。よって透明物体表面における法線方向の決定のためには、入射面方向と入射角を測定すればよいということになる。

入射面方向を  $\theta$ 、入射角を  $\phi$  とし、これらを偏光を用いて決定する。

電磁波は伝搬方向に垂直な面内で振動する横波であるので、その面内で方向性のある振動をする。これが光波の振動の偏り、すなわち偏光である。

一般に自然光は非偏光であり、すべての方向に対してランダムに振動している。しかしこのような自然光でも、複屈折性のある結晶を透過したり、物体から反射されたりすると、偏光特性が現れてくる。このように自然光の一部が偏光されている光を部分偏光と呼ぶ。

ここで、物体からの反射光について考える。反射光は拡散反射と鏡面反射の和から成っているが、拡散反射は一般に非偏光であり、さらに透明物体においては無視できるので、正反射である鏡面反射のみについて考える。

式(6)で示したように振動方向によって強度反

射率が違うため、偏光子を回したとき明るさに変化が現れ、観察される変化のしかたは正弦波形を示す。ここで、 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ をそれぞれ光強度の最大値、最小値とする。偏光している光の  $I_{\max}$  と  $I_{\min}$  の和が全体の光強度になるので、鏡面反射強度を  $I_s$  とおくと次式が得られる。

$$I_{\max} = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel} + F_{\perp}} I_s, \quad I_{\min} = \frac{F_{\parallel}}{F_{\parallel} + F_{\perp}} I_s \quad (8)$$

この式より、入射面に対して平行な成分が  $I_{\min}$  であることがわかる。従って、 $I_{\min}$  を得るときの直線偏光子の方向として入射面方向  $\theta$  を求めることができる。

次に、反射光がどれだけ偏光されているかの目安として、偏光度  $\rho$  を次のように定義する。

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (9)$$

この偏光度  $\rho$  は、0 のとき非偏光であり、1 のとき直線偏光であることを表す。反射光が直線偏光になるときは、入射光のうち平行成分が0となって反射光が垂直成分のみになるときである。すなわちブリュースタ角で入射するときである。

式(6)と式(8)を式(9)に代入し、スネルの法則を考慮すると、偏光度  $\rho$  は次のようになる。

$$\rho = \frac{2 \sin \phi \tan \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{n^2 - \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi} \quad (10)$$

このように、偏光度  $\rho$  は屈折率  $n$  と入射角  $\phi$  の関数となっていることがわかる。逆に偏光度を式(9)より求めると、屈折率が与えられれば式(10)より入射角  $\phi$  が求まる。

このようにして、入射面方向と入射角を決定することができれば、透明物体表面形状として法線方向を一意に決定することができる。

#### 3.2 シミュレーションによる精度評価

入射面方向と入射角の光強度誤差に対するシステム精度を調べる目的でシミュレーションを行った。

まず、測定対象物体の屈折率  $n$  を指定し、計算する入射面方向と入射角を任意に指定する。前節

で示した式(6)より、物体表面上での強度反射率は入射角 $\phi$ に依存するので、入射角に対する光強度の変化のデータ、 $I_{max}$ と $I_{min}$ をモデルにもとづき作成する。

この作成した $I_{max}$ と $I_{min}$ に意図的に誤差を加えることで、どの程度 $\phi$ に誤差を生じるかを調べる。これにより提案する手法の安定性を評価する。

$I_{max}$ と $I_{min}$ の理論値にガウシアン分布にもとづく乱数を加え合わせることで、誤差を含むデータを作成した。このデータと、代入する入射面方向から、入射角 $\phi$ を計算した。これを1000回繰り返し、算出された入射面方向と入射角の標準偏差を求めることにより、光強度の誤差と算出された角度の標準偏差の関係を求めた。測定対象物体の屈折率は1.5とした。

入射面方向と入射角の標準偏差の光強度誤差依存性をそれぞれ図4(a)(b)に示す。光強度誤差を10%と一定にして入射角を変化させた場合の入射角の標準偏差の変化を図4(c)に示す。

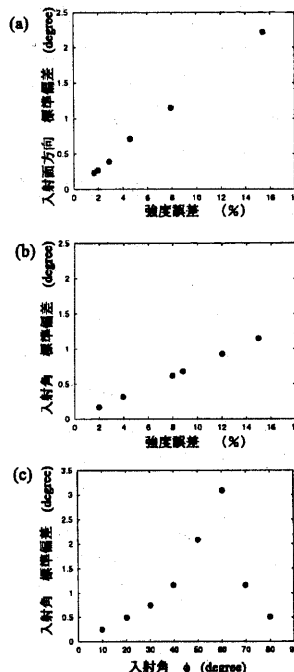
この計算によって、入射面方向は15%の光強度誤差において約 $2.2^\circ$ の標準偏差、入射角は誤差15%で約 $1.1^\circ$ の標準偏差という値を得た。標準偏差は線形に増加する傾向にあるので、光強度誤差をある範囲内におさえることにより計算精度を確保できることがわかる。具体的には、光強度を8 bitの分解能でサンプリングしているためその量子化誤差が影響する。物体を十分明るく照明し光強度差を大きくすることによって誤差は小さくなり、誤差がここまで大きくなることは回避できる。

また、誤差を一定にしたときの入射角特性から、 $60^\circ$ において標準偏差が最大となり、約 $3.1^\circ$ という値を得た。プリユースタ角が $56.3^\circ$ なので、この付近において誤差に弱い傾向がわかった。

### 3.3 実験装置・実験方法

実際に透明物体の表面形状測定を行った。測定対象物体の表面形状計測のための実験装置を図5のように構成した。

光源としては、白色光として150Wの白熱灯を用いた。測定対象物体としては、屈折率1.523のソーダ石灰ガラスからなる $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times$



(a) 入射面方向 標準偏差の光強度誤差依存特性  
 (b) 入射角 標準偏差の光強度誤差依存特性  
 (c) 入射角 標準偏差の入射角特性

図 4: シミュレーション結果

3mmの平坦なガラスプレートを用いた。物体の載置台としては、物体の法線方向を可変とするために回転ステージを用いた。これによって、物体の法線方向を任意に指定することができる。従って法線方向の測定結果の評価ができるようにした。反射光検出器としては、モノクロ CCD カメラを用いた。このカメラからの画像は $480 \times 512$  pixelの2次元画像で、8 bit 256階調のものである。

次に、この測定装置を用いた実験方法について述べる。測定は、偏光子を順次回していきながら画像を CCD カメラで撮像することによって行った。偏光子の偏光角の回転は $5^\circ$ おきに $0^\circ$ から $180^\circ$ まで行った。これによって得る36枚の画像から、各画素ごとの光強度変化を観測し、光強度の最大値と最小値、 $I_{max}$ と $I_{min}$ を各画素で得た。

ここで、偏光角 $5^\circ$ おきにデータを測定してい

でサンプリング間隔が大きいため、得られる最大値、最小値に実際とのずれがある可能性がある。そこで、36個のデータを正弦波形の関数に非線形最小二乗法によって当てはめてから、その振幅における最大値、最小値を求めた。この  $I_{\max}$  と  $I_{\min}$  から、3.1節で示したように表面法線方向を計算することができる。

以上の測定を、測定対象物体を載置した回転ステージを  $10^\circ$  おきに回転させ、反射角を  $10^\circ$  から  $80^\circ$  まで設定して行った。入射面方向は図5に示すように回転ステージの載置方法により  $90^\circ$  に固定した。これにより、実験する測定法の入射角依存性を求めることができると同時に、入射面方向、入射角の測定結果の評価が行える。

測定したデータに、提案する計算アルゴリズムを適用し、各画素で表面法線方向を算出した。ここで、本実験ではレンズの焦点距離が十分長く、平行投影であると仮定できる。従って、平面ガラスの表面形状を測定しているため、測定結果の表面法線方向はすべての画素で等しくなるはずである。そこで、各画素で算出された入射面方向と入射角をすべての画素で平均をとり、その平均値と標準偏差を計算した。この平均値を測定結果とした。

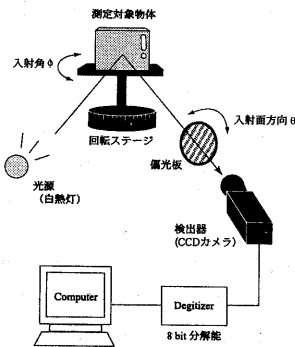


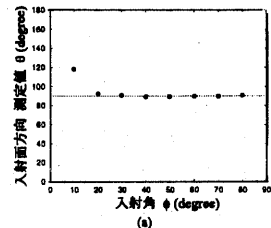
図 5: 実験装置図

### 3.4 実験結果及び検討

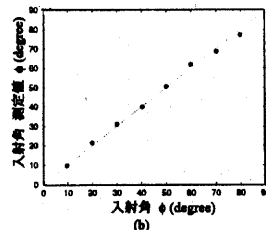
入射角を変化させたときの、入射面方向角と入射角の測定結果をそれぞれ図6(a)と図6(b)に示す。

まず(a)の入射面方向の測定結果について見てみると、設定値  $90^\circ$  と非常に良い一致を示した。 $10^\circ$  においては入射面方向  $118^\circ$  という値が得られており、大きな誤差が現れている。一方、(b)の入射角測定結果を見ると、設定値と測定値は非常に良い一致を示している。

入射角の小さいところで誤差が大きくなるのは、偏光度が小さくデータの関数への当てはめが難しいためと考えられる。しかし、これは画像の明るさの分解能を高くすることによってある程度改善が可能であると思われる。



(a)



(b)

(a) 入射面方向測定値の入射角特性  
(b) 入射角測定値の入射角特性

図 6: 実験結果

## 4 球面状面光源を用いた形状測定

### 4.1 測定原理

前節において、物体から反射したハイライトを利用することによって透明物体の表面形状を測定する方法について述べた。しかしハイライトは2.1節で述べたように、表面が滑らかで拡散反射が無視できる程小さいような物体においては非常に狭い面の領域にしか現れない。そのために、測定対象物の表面形状を全面において1度に測定するこ

とが難しい。

そこで筆者らは、表面形状測定に球面状の面光源を用いることを提案する。面光源とは、電球のように1点から周囲に向かって球面波を発生させる点光源と違い、ある程度広い面積を持った部分全体から光を発生させる光源のことである。ハイライトは本来光源方向と観察方向に強く依存するが、面光源を用いると広い範囲に光源が存在するのと同じであるので、光源方向に対する依存を減らすことができる。さらに、この面光源を球面状に形成し、球内部中央に測定対象物を配置することによって全方向に光源を得るのと同じことになる。これによって表面全面にハイライトを生成させることが可能となる。

従って、測定対象物である透明物体の表面形状を全面において1度に測定することができ、カメラ走査を必要とせず極めて簡便な装置により表面形状測定を行うことができる。

この原理にもとづいた実験装置を図7のように構成した。白熱灯は同じものを3個用いて、測定対象物体を中心とした円上に120°おきに配置した。光拡散体として白色半透明のプラスチック球、直径40cmのものをを用い、この球の内部中央に測定対象物体をセッティングした。この光拡散体の周囲から複数の白熱灯によって光を照射することにより、拡散体内部で光が拡散されほぼすべての方向の光線を得られ、球面状面光源が得られる。

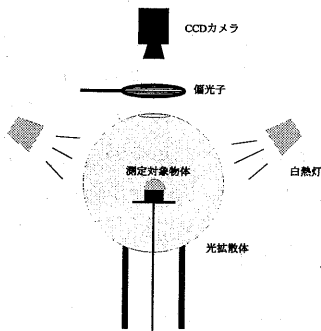


図7: 実験装置図

## 4.2 実験結果及び検討

前節で述べた実験装置により測定を行った。測定対象としては、屈折率1.5の亚克力から成る半球状物体、直径3cmのものをを用いた。測定は、3節と同様に、偏光子を順次回していきながら画像をCCDカメラで撮影することによって行った。

この測定結果を、図8(a)(b)に示す。CCDカメラによって撮像した36枚の画像のうちの任意の1枚の上に、各画素ごとに算出された法線を2次元画面上に投影したものを図8(a)に示す。各画素の法線はすべて表示せず、30画素ごとに表示した。

図8(a)について見てみると、表面の法線方向はほぼ図中央と各画素とを結ぶ線上にあり、図中央部分を中心として360°回転した分布となっている。図中央には、測定対象の半球状透明物体の中心がある。従って、入射面方向において得られた表面法線方向の画面上の分布が半球面の法線方向と一致していることがわかる。また、図示した法線の長さは、実際の法線を投影しているために入射角の大きさに依存しており、入射角が大きい程図示された線の長さが大きくなる。これも、半球面の法線分布と一致する形に分布していることがわかる。

また、算出した表面法線をもとに表面方向を計算して3次元的に可視化したものを図8(b)に示す。

結果を見ると、図8(a)の法線方向は半球面状に良い一致を示していることがわかる。

次に、本手法のきず検出能力に関する実験を行った。これは、提案する面光源を用いた透明物体表面形状測定法の評価のためである。3節で使用したガラスプレートに意図的にきずをつけ、同様に測定を行った。この実験結果を図9に示す。3節で使用したガラスに約100 $\mu$ mのきずを画面中央縦方向につけて、同様に測定を行い法線方向を算出した。図9では、縦方向は画素を間引いて表示しているが、横方向は各画素すべて法線を表示した。この法線は図の上方向を向いているものである。これを見ると、図中央で短い法線が連なって縦の線上に乗っていることがわかる。従って、きず部分でその他の部分の法線と異なる結果を得ており、きず検出が可能であることが示された。

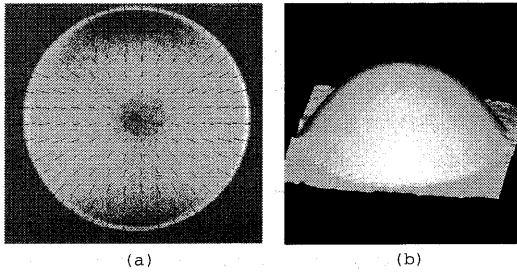


図 8: 表面形状測定結果

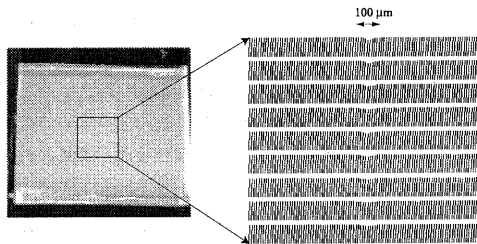


図 9: きず検出実験結果

## 5 結論

本研究において、透明物体の表面形状測定を非接触、高精度で行うための手法としてハイライトの偏光を用いることを提案し、その測定と検討を行った。測定法としては、CCDカメラで測定を行うので物体表面を微小面積の測定部位に分割し、それぞれの部位、CCDでの各画素で表面法線方向を直接求めることによって物体の表面形状を測定するものを提案した。

さらに、ハイライトにもとづく測定では、測定対象物の表面形状を全面において1度に測定することが難しい。そこで、表面形状測定において球面状の面光源を用いることを提案した。

そして実験結果から、本手法の透明物体の表面形状測定手段としての有効性を示すことができた。透明物体におけるきずの検査能力もあることが示され、形状検査手法としてきずや歪みの検出に有効である。

従って、ハイライトの偏光を解析することによ

て、透明物体の表面形状測定を行うことの有効性を示すことができた。

## 参考文献

- [1] 谷田貝豊彦, “応用光学 光計測入門”, 丸善, 1988.
- [2] L.B.Wolff, T.E.Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., Vol.13, No.7, pp.167-189, July 1991.
- [3] 大津元一, “現代光科学”, 朝倉書店, 1994.
- [4] S.K.Nayer, K.Ikeuchi, and T.Kanade “Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surface by Photometric Sampling,” IEEE Trans. Rob. Auto., Vol.6, No.4, pp.418-431, 1990.
- [5] L.B.Wolff “Spectral and Polarization Stereo Methods Using a Single Light Source,” Proceedings, ICCV, pp.708-715, 1987.
- [6] K.Ikeuchi “Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method,” IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., Vol.3, No.6, pp.661-669, 1981.
- [7] K.Koshikawa “A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects,” Proceedings of IJCAI, pp.493-495, 1979.
- [8] K.E.Torrance, and E.M.Sparrow “Theory for off-Specular Reflection from Roughened surfaces,” J. Opt. Soc. Am., Vol.57, No.9, pp.1105-1114, 1967.
- [9] S.K.Nayer, K.Ikeuchi, T.Kanade “Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives,” IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., Vol.13, No.7, pp.611-634, 1991.