符号化格子光源の照明による鏡面曲面の測定†

葉 雄 英*・藤 村 貞 夫**・山 田 範 秀**

Measuring Shape of Glossy Curved Surface by Using Encoded Grating Illumination

Xiongying YE*, Sadao FUJIMURA** and Norihide YAMADA**

In this paper, a method is proposed for measuring 3D-shape of an object with glossy curved surfaces. The method uses a diffuse plane light source of grating pattern encoded by an M-sequence. A surface to be measured is placed closely to a reference plane which is far from the light source so that a point on the surface can be considered as a point on the reference plane. Then the surface normal vectors are obtained by corresponding points on the image plane to those on the source plane. In order to attain the correspondence, we use two images obtained in the case that the source lines for one image are perpendicular to those for another, and utilize a characteristic regularity of M-sequence. The determination of surface normal vectors allows us to reconstruct the surface. Experimental results to confirm the validity of the method are shown. The method is very simple both in obtaining image data and in processing the data: it requires only two images.

Key Words: 3D-shape, computer vision, specular surface, M-sequence

1. ま え が き

近年、3次元物体の形状測定に関する研究が盛んに行われており、さまざまな方法が提案されている。しかし、鏡面物体では、その著しい正反射特性のため、光投影法^{1),2)}など拡散面物体に対して有効とされてきた形状測定手法は、そのままでは適用できない。このような物体に対し、正反射特性を積極的に利用する手法がいくつか提案されている³⁾⁻⁷⁾。

筆者らはM系列で符号化した3値格子拡散面光源を用いて、鏡面多面体の形状を測定する方法⁶⁾をすでに提案した。この方法は鏡平面によって反射され、中心投影により画像化された平行直線群の消点を用いて、鏡平面の傾きを求めている。しかし、曲面ではこのような消点が得られないので、この方法は曲面物体に適用することができない。本論文では、M系列符号化格子光源と、光源から遠く離れた参照面上にある曲面によって反射されてきた光源の像を用い、光源面上の格子点と像面上の格子点を対応づけ、対応した格子点上の曲面の法線を求め、曲面を再構成する方法を提案する。

2. 原 理

2.1 法線ベクトルの決定

鏡面反射において、入射点における法線ベクトルは入射光線と反射光線の2等分線として得られる。もし像面上の点と光源面上の点との対応およびカメラから対象までの距離がわかれば、入射光線と反射光線が得られて法線ベクトルが決定できる。しかし、一般には対象までの距離は未知である。そこで、Fig. 1に示すように、対象が参照面上にあり、対象面から参照面までの距離が光源までの距離に比べて十分小さい測定

Fig. 1 System configuration for measurement of glossy curved surface. Y axis is perpendicular to this plane

† 第28回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1989・7)

* 松下電器産業(株)情報通信東京研究所 川崎市多摩区東三田 3-10-1

** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* Tokyo Information and Communications Research Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., LTD., Kawasaki

** Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received April 25, 1990)

(Revised June 25, 1990)

系を考える。光源として、M系列の 0, 1 に従って平行直線間の縞の明度を変調させた符号化格子拡散面光源⁶⁾を用いる。座標の原点をカメラのレンズ中心にとり、光軸をZ軸とし、参照面を $Z=Z_R$ に設定する。カメラのレンズ中心Oから対象面上の点Pに向かう単位ベクトルを $\mathbf{m}$ とし、直線 OP と参照面の交点を P' とすると、光源点Sから点Pに向かう単位ベクトル $\mathbf{l}$ は、Sから点P'に向かう単位ベクトル $\mathbf{l}'$ で近似できる。よって、点Pにおける対象面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ は $\mathbf{m}$ と $\mathbf{l}'$ の2等分線ベクトル $\mathbf{n}'$ で近似でき、

$$\mathbf{n} \doteq \mathbf{n}' = -\frac{\mathbf{l}' + \mathbf{m}}{|\mathbf{l}' + \mathbf{m}|} \quad (1)$$

となる。点 P' の座標は

$$(X, Y, Z) = \left(x \frac{Z_R}{l_c}, y \frac{Z_R}{l_c}, Z_R \right) \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 x, y は像面上の座標であり、 l_c はレンズの焦点距離である。

像面上の点と光源面上の点を対応づけるために、光源面の格子線をY軸に水平、ならびにY軸に垂直に設定して得た2枚の画像を用い、それぞれの画像に対してM系列の対応づけ⁶⁾を行い、格子点を対応づける。

2.2 面の再構成

対象面上の法線ベクトル $\mathbf{n}$ を (n_1, n_2, n_3) とすると、

$$n_1 dX + n_2 dY + n_3 dZ = 0 \quad (3)$$

が成り立つ。隣合った格子点におけるZ座標の関係は

$$Z_i = -\frac{n_{1i-1} + n_{1i}}{n_{3i-1} + n_{3i}} \Delta X - \frac{n_{2i-1} + n_{2i}}{n_{3i-1} + n_{3i}} \Delta Y + Z_{i-1} \quad (4)$$

と表わされ、これによって対象曲面が再構成できる。ここで、 $\Delta X, \Delta Y$ は $i-1$ 番目の格子点から i 番目の格子点へ移動したときの、対象面上の X, Y 座標の変化であり、画像上の x, y の変化に倍率 (Z_R/l_c) をかけることによって得られる。

曲面を再構成する際、初期点としては任意の点を用いることができるが、(4)式において誤差が加算されるため、初期点是对象面のほぼ中央に取ることとする。1つの格子点に対して水平、垂直の2方向で得られたZを平均してその格子点におけるZとする。

3. 実験

3.1 測定系

測定系は Fig. 1 に示すように、光源面はY軸と平行、Z軸と約 75° をなし、カメラに近い端が約 $(X, Z) = (14 \text{ cm}, 29 \text{ cm})$ にあるように配置した。像面上の座標の x, y 軸を X, Y 軸と平行になるように設定する。光源パターンにはM系列で符号化した平行直線

(以下格子線と呼ぶ) パターン⁶⁾を用いた。用いたM系列は周期長 31, 原始多項式 $X^5 + X^2 + 1$ の2元系列である。面光源は $50 \times 50 \text{ cm}^2$ のアクリルオパール板を後方から照明して得ている⁶⁾。受像系には焦点距離 60 mm, 256×256 画素の CCD カメラを用いた。カメラから参照面までの距離 Z_R は約 35 cm, 参照面から光源までの距離は約 65 cm である。光源直線をY軸と平行にしたときと 90° 回転してY軸に垂直にしたときの2枚の画像を用いる。像面上の格子点の光源面上の対応点はM系列の対応づけによって得られる⁶⁾。

対象物として、プラスチックに銀メッキした球面と銀メッキしたフィルムで作成した円柱、円錐を用いた。

3.2 処理アルゴリズム

処理にはつぎに示すアルゴリズムを用いる⁶⁾。

Step 1: 2枚の画像を入力する。

Step 2: 各画像を2値化して、格子線を取り出し、細線化して、弧立点を除去する。

Step 3: 2画像を重ね、格子線の連続している領域ごとに分割する。

Step 4: 格子線を探索して、線間の縞を2値化し、M系列に対応づける。

Step 5: 2枚の画像の格子線を重ね、像面上と光源面上の格子点を対応づける。

Step 6: 法線ベクトルを求め、面を再構成する。

4. 実験結果と考察

Fig. 2 は球面的一部分を測定した例を示す。(a) は2枚の入力画像、(b) はそれらの画像から抽出した線分を重ねて得た格子である。(c) は得られた球面上の法線ベクトルの分布、(d) は再構成した対象面の3次元表示である。光源直線をY軸に平行に設定した画像では線分の検出できないところがあったが、そこには鏡面に傷が付いていた。(d) の再構成面を得る際、法線の得られなかった場所については補間を行ってZ座標を定めた。

円柱面、円錐面に対しても実験を行い、同じような結果が得られた。

さらに、球面と円柱面に対し、得られた法線ベクトルと3次元座標を用いて平均曲率 H を求め⁸⁾、球と円柱の半径を推定した。Table 1 はその推定誤差を示す。球の半径の推定誤差は4%以下で、円柱の半径の推定誤差は9%以下であった。本方法で得られる法線の誤差は(参照面から対象面の注目点までの距離)/ (光源から参照面までの光路長) に比例する⁹⁾。

対象面の向きや曲率によっては、画像上の格子線の

(a) Input images

(b) Detected grid

(c) Needle map

(d) 3D display

Fig. 2 Experimental results of a spherical surface

間隔が非常に狭くなって、格子線を正しく抽出できなかったり、縞の2値化に誤りが生じたりして、測定ができない場合もあった。

これらの問題は光源面を大きくしたり、光源パターンの縞幅を可変にしたりすることなどによってある程度解決できる。

5. あとがき

光源から十分遠方にある参照面上の鏡面曲面に対して、M系列符号化格子拡散面光源を用い、2枚の画像だけで、光源上と像面上の点を対応づけて、対応点によって法線を求め、対象面を再構成する方法を提案した。実験を通じて、本手法が光源から参照面までの距離に比べて十分小さい鏡面曲面の形状測定には有効であることを示した。

本手法は測定装置が簡単で、かつ、2枚の画像だけで測定できる特長を持っている。

光源面に工夫を施し、さらに多くの方向の面が測定できるようにすること、対象に応じて光源の格子幅が換えられるようにすることなどが今後の課題である。

参考文献

- 1) Y. Shirai: Recognition of Polyhedra with a Range Finder, Pattern Recognition, 4-2, 243/250 (1972)
- 2) 佐藤, 荒木: 能動照明による三次元計測技術, 電子情報通信学会論文誌, 107-C-7, 625/631 (1987)
- 3) K. Koshikawa: A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects, Proc. 6th Int. Joint Conf. Artificial Intell., 493/495 (1979)
- 4) K. Ikeuchi: Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-3-6, 661/669 (1981)
- 5) A. C. Sanderson, L. E. Weiss and S. K. Nayar: Structured Highlight Inspection of Specular Surfaces, IEEE Trans., PAMI-10-1, 44/55 (1988)
- 6) 葉, 藤村, 山田: M系列符号化格子光源の照明による鏡面物体の測定, 計測自動制御学会論文集, 26-2, 123/128 (1990)
- 7) 葉, 藤村, 山田: 直交格子光源の照明による鏡面多面体の形状測定, 計測自動制御学会論文集, 25-11, 1239/1241 (1989)
- 8) 白沢, 佐藤, 井口: 距離画像を用いた連続2次曲面の認識, 電子情報通信学会技術報告, PRU 87-15 (1987)
- 9) 葉 雄英: M系列符号化格子を用いた3次元物体の形状測定に関する研究, 東京大学工学系研究科博士論文 (1989)

Table 1 Estimated error of radius $\Delta R/R$ of spherical surfaces and cylindrical surfaces

	SPH 1	SPH 2	SPH 3	SPH 4	CYL 1	CYL 2	CYL 3	CYL 4	CYL 5
$\Delta R/R$ (%)	-2.2	-2.0	3.5	1.0	2.2	-8.8	-8.5	-8.0	-8.3