

文章编号: 0253-2239(2007)01-0058-5

# 水中物体的光学三维形貌测量的研究

丁万山 刘艳\*

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 提出了一种对水中物体进行光学投影式表面三维形貌测量的新方法。通常的测量方法都是假设摄像机和被测物体都处于空气中, 测量水中物体时, 由于光在空气、水分界面上发生折射, 投射到被测表面的光条纹图像发生扭曲, 从而给三角测量法带来误差。新方法可以精确测量出水中被测物表面的三维坐标并计算出物体的几何尺寸, 实验验证了该方法的有效性。考虑折射后, 该测量类似于在空气环境中的测量。采用的极线约束及亚像素技术, 提高了测量精度和速度。

**关键词:** 光学测量; 三维形貌; 水中物体; 折射; 极线约束; 亚像素

中图分类号: TM930.12<sup>+</sup>6 文献标识码: A

## Optical Measurement of Object's Surface Three-Dimensional Shape in Water

Ding Wanshan Liu Yan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract:** A three-dimensional measurement method of objects' shape in water by using light stripe projection is proposed. Usually, three-dimensional measurement is executed under the assumptions that cameras and objects are in aerial environments. However, stripe image distortion occurs when vision sensors measure objects in liquid, for the refraction of the light on the air and water interface, and brings errors in a triangulation. The proposed method can measure accurately three-dimensional coordinates of objects' surface in water, and calculate the geometrical size of the object. The validity of the proposed method is proved experimentally. By considering the refraction of light, the three-dimensional measurement of objects in water becomes same as in air and the measurement has a higher accuracy and speed because of the epipolar constraint and sub-pixel technology.

**Key words:** optical measurement; three-dimensional shape; object in water; refraction; epipolar constraint; sub-pixel

## 1 引言

物体表面三维形貌测量应用广泛, 尤其是物体表面三维坐标的光学测量, 作为一种非接触、无损坏的测量方法<sup>[1~3]</sup>, 广泛应用到工业、生物、医学等多个领域。

在某些领域, 需要在不同的介质中完成对物体形貌的三维测量, 如测量海底形貌, 观察水下生物特征等。摄像机和被测物体分别置于不同的介质中时, 两个介质的折射率不同, 会使物体表面形貌测量产生扭曲而造成测量误差。测量水中物体时, 即使把摄像机和被测物体都置于水中, 由于在水中要采用玻璃罩保护摄像机镜头, 所以也会产生测量误差。

本文针对测量水中物体的情况, 提出一种新的光学三维形貌轮廓测量方法。该方法利用激光器作为光源<sup>[4]</sup>, 当激光器发出的光束穿过玻璃水槽照射到水中被测物体表面时, 物体表面产生相应的投影光点, 激光束扫描整个被测表面, 用 CCD 记录激光光点图案以完成测量。

## 2 三维测量原理

### 2.1 模型概况

物体表面的三维坐标由 CCD 和激光束确定, 为满足不同情况下的测量要求, CCD 和入射激光束的方向可以根据需要改变。被测物体置于充满水的平

作者简介: 丁万山(1949—), 男, 江苏人, 副教授, 主要从事光电检测技术、计算机测控等方面的研究。

E-mail: dws20022000@yahoo.com.cn

\* 通信联系人。E-mail: creece.ly@sina.com

收稿日期: 2006-01-04; 收到修改稿日期: 2006-05-29

底玻璃水槽中。测量原理如图 1 所示。设 CCD 的中心即镜头  $O$  是原点。 $Z$  轴与 CCD 的光学轴方向一致。定义光延伸角  $\psi$  为  $X-Z$  平面与组成激光束的每个激光光点之间的夹角<sup>[5,6]</sup>。

在坐标域中,设  $K(x_g, y_g, z_g)^T$  是来自 CCD 的视线和折射界面之间的交点,  $O'(x_0, y_0, z_0)^T$  是激光原点,  $M(x'_g, y'_g, z'_g)^T$  是来自 CCD 的视线和折射界面之间的交点。定义  $Q(U, V)$  是图像平面的光点位置,  $G$  是  $Z$  轴和折射界面之间的交点。设  $h'$  是图像距离,  $h$  是  $O$  (CCD 的原点) 和光折射界面之间的距离,  $\phi$  是  $X$  轴和光折射界面之间的夹角,  $\theta$  是光线和在  $X-Z$  平面与光折射界面法线方向之间的夹角,  $\eta$  是激光和在  $X-Z$  平面与  $X$  轴之间的夹角,  $i$  和  $r$  分别是来自 CCD 的视线的入射角和折射角,  $i'$  和  $r'$  分别是光束的入射角和折射角。定义  $(\lambda, \mu, \nu)^T$  是折射界面的单位法向量,  $(\alpha, \beta, \gamma)^T$  和  $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$  分别是来自 CCD 的折射之前、后的单位向量,  $(\alpha', \beta', \gamma')^T$  和  $(\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$  分别是来自激光的折射之前、后的单位向量。

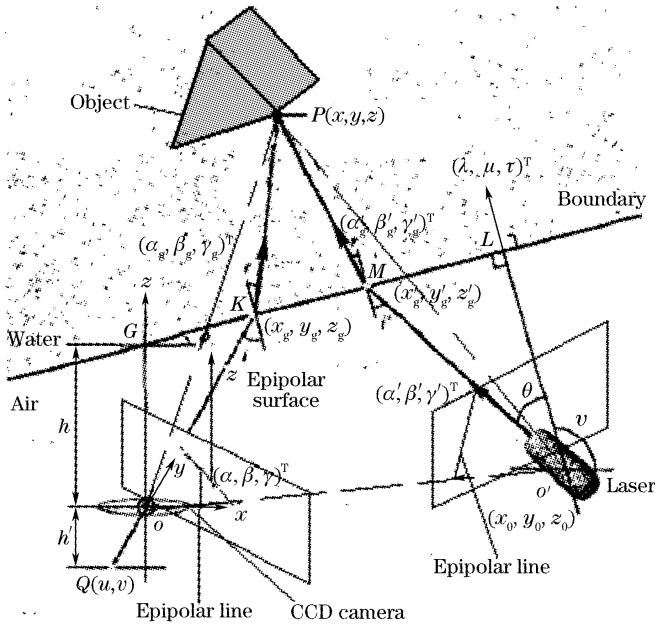


图 1 三维测量原理图

Fig. 1 Principle map of three-dimensional measurement

## 2.2 测量模型

测量原理可利用三维光学射线追踪技术<sup>[7,8]</sup>来实现,分别追踪来自 CCD 的视线和来自激光器光线,同时两种线的交点作用在被测物体的表面上。

如图 2 所示,设入射光线与中心轴线的夹角为  $\psi$ ,光线折射时,物体表面的照射区域不再是一个点而是一条线。在光线没有折射时,照射在物体表面的光斑点形状规则,CCD 记录的光斑点图像可以由基本矩阵、单位矩阵等表达。但是,如果当光线发生

折射时,就不能用上述矩阵进行表达。此时用光点束<sup>[9,10]</sup>来处理,同时追踪每个光点的射线分别进行处理。测量整个光束来追踪所有各自的光点。射线追踪的方法在计算机图形学中经常用于测量复杂表面形状的三维形貌。

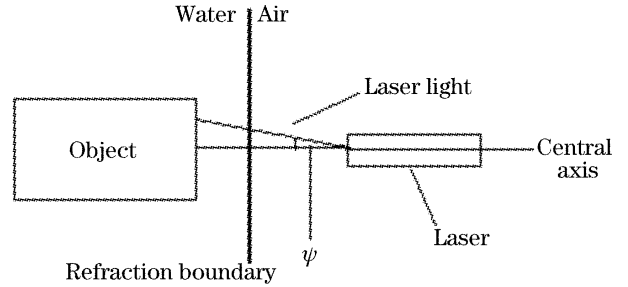


图 2 入射激光束示意图

Fig. 2 Sketch map of incident light

## 3 三维测量的射线追踪

### 3.1 来自 CCD 的视线追踪

在研究中采用针孔相机模型,平面坐标  $(u, v)^T$  转换为立体坐标  $(x, y, z)^T$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $f$  是平面距离,  $a_{ij}$  是 CCD 的其他参量。来自 CCD 视线的方向向量为

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

另一方面,因为折射光线与  $X-Z$  平面垂直,折射界面的单位法向量  $(\lambda, \mu, \nu)^T$  为

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ 0 \\ \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

来自 CCD 的视线和折射界面之间的交点  $K(x_g, y_g, z_g)^T$  为

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \frac{h}{\gamma - \alpha \tan \phi} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}. \quad (4)$$

追踪折射后来自 CCD 的视线。根据折射定律,单位射线向量  $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$  可以表示为单位法向量  $(\lambda, \mu, \nu)^T$  和  $(\alpha, \beta, \gamma)^T$  的线性之和

$$\begin{bmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + q \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $p$  和  $q$  为常量。

由于 $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 和 $(\lambda, \mu, \nu)^T$ 是单位向量,有

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1, \quad (6)$$

$$\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 1. \quad (7)$$

向量的内积和外积为

$$\cos i = \alpha\lambda + \beta\mu + \gamma\nu, \quad (8)$$

$$\sin^2 i = (\beta\nu - \gamma\mu)^2 + (\gamma\lambda - \alpha\nu)^2 + (\alpha\mu - \beta\lambda)^2. \quad (9)$$

对于光折射后的单位向量 $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ 和折射界面的单位法向量 $(\lambda, \mu, \nu)^T$ ,其内积和外积可用同样的方式计算:

$$\cos \gamma = \alpha_g\lambda + \beta_g\mu + \gamma_g\nu, \quad (10)$$

$$\sin^2 \gamma = (\beta_g\nu - \gamma_g\mu)^2 + (\gamma_g\lambda - \alpha_g\nu)^2 + (\alpha_g\mu - \beta_g\lambda)^2, \quad (11)$$

应用折射定律得

$$\sin \gamma / \sin i = n_1 / n_2, \quad (12)$$

式中 $n_1$ 是空气的折射率, $n_2$ 是水的折射率。由(5)式以及(8)式~(12)式,可计算出 $p$ 和 $q$ ,折射后射线的单位向量 $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ 为

$$\begin{bmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{bmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \left( \cos \gamma - \frac{n_1}{n_2} \cos i \right) \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (13)$$

来自 CCD 的视线最终到达物体表面上的点 $P(x_p, y_p, z_p)^T$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 $s$ 是常量。由(14)式可获得物体表面点 $P(x_p, y_p, z_p)^T$ 的三维坐标值。

### 3.2 来自激光器的射线追踪

来自激光器点的射线追踪与相机的方式相同。来自激光器的光线和折射界面之间交点 $M(x'_g, y'_g, z'_g)^T$ 为

$$\begin{bmatrix} x'_g \\ y'_g \\ z'_g \end{bmatrix} = \frac{h + x_0 - z_0}{\gamma' - \alpha' \tan \phi} \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中

$$\begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \eta \\ \sin \psi \\ \cos \psi \sin \eta \end{bmatrix}, \quad (16)$$

因为 $\eta$ 是所有光点的角,所以 $\eta$ 的值可以通过激光设备的校准标定来估计。但是, $\psi$ 不能由校准估计值,因为每个光点不能相互区分。因此,认为 $\psi$ 是不可知参量,可以最后由数值计算来确定。

考虑光的折射,追踪折射的光线,可得到折射后

光线的单位向量 $(\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$ :

$$\begin{bmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{bmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} + \left( \cos \gamma' - \frac{n_1}{n_2} \cos i' \right) \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix}, \quad (17)$$

到达物体的表面点 $P(x_p, y_p, z_p)^T$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = t \begin{bmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_g \\ y'_g \\ z'_g \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中 $t$ 是常量。

### 3.3 三维坐标值的确定

物体表面的点与来自 CCD 视线和来自激光器的光线追踪的结果一致。

在(14)式和(18)式中的未知参量是 $s, t$ 和 $\psi$ ,由(14)式和(18)式得到

$$s\alpha_g + x_g = t\alpha'_g + x'_g, \quad (19)$$

$$s\beta_g + x_g = t\beta'_g + x'_g, \quad (20)$$

$$s\gamma_g + x_g = t\gamma'_g + x'_g, \quad (21)$$

由(19)式~(21)式,可得到一个关于 $\psi$ 的三角函数多项式, $\psi$ 可通过数学计算求解。

## 4 测量步骤

### 4.1 标定

首先标定 CCD 的参量,起点和激光束的方向向量 $O'(x_0, y_0, z_0)^T$ 和 $\eta$ , CCD 的原点 $O$ 和折射界面之间的距离 $h$ ,以及 $X-Y$ 平面与折射界面之间的夹角 $\phi$ 等。

其次,用已经检测过表面的图案来标定 CCD 参量。接着标定 $h$ 和 $\phi$ 。

最后,通过改变激光的方向来改变起点 $O'$ 和激光束 $\eta$ 的方向。因为照射点的唯一性,当对 $O'$ 和 $\eta$ 估值时要用到激光束。

### 4.2 物体表面激光光点图像的提取

关于对激光光点图像提取,要用到极线约束和亚像素的计算。

#### 4.2.1 极线几何约束<sup>[11]</sup>

激光光束在扫描水中被测物体时在 $\pi_r$ 上形成的轮廓图像,激光光点扫描被测物体时激光光斑成像到 CCD 摄像机上的视点图像 $\pi_l$ ,在这两幅为同一景物不同视点的图像之间存在基本的几何约束——极线约束。如图 3 所示,空间点 $P$ ,处在被测物体的表面上,是激光与 CCD 视线的交点。 $O$ 是 CCD 摄像机的视点, $O'$ 是激光出射光点。 $OO'$ 连线与 $\pi_l$ 交点为 $e_l$ ,与 $\pi_r$ 交点为 $e_r$ , $e_l$ 和 $e_r$ 分别称为左右两图

的极点。点  $O, O', p_l, p_r$  和  $P$  共面,称为外极平面。外极平面与左右像面相交形成两条外极线  $I$  和  $I'$ 。在立体视觉中极线约束可表述为:如  $p_l$  和  $p_r$  对应了空间同一点  $P$ ,则  $p_r$  一定位于与  $p_l$  相关联的极线  $I'$  上, $p_l$  一定位于与  $p_r$  关联的极线  $I$  上。由于一条极线上任意一点的对应点都在同一关联极线上,两视图中的极线上描述的图像内容具有对应关系, $\pi_l$  中的  $e_l p_l$  线段,对应  $\pi_r$  中的  $e_r p_r$  线段,称为对应极线。

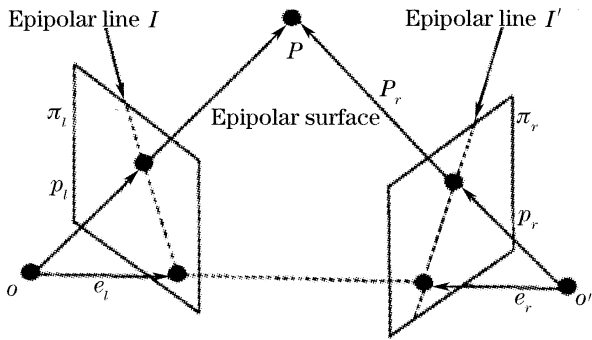


图 3 极线约束

Fig. 3 Epipolar constraint

利用极线约束这一性质重建了物体的完整点云(如图 4),避免了同一扫描点云的拼合。有效控制了点匹配的质量,提高了三维测量的精度及点云处理的速度。

#### 4.2.2 运用亚像素技术提高测量精度<sup>[12]</sup>

运用亚像素技术提高测量精度,首先必须对图像进行边缘检测,得到图像的像素级边缘。其方法是中值滤波去噪、二值化处理,得到的边界精度在 1~3 个像素之间。为了得到更高的测量精度,则必须解决图像中目标的高精度边缘定位问题,即将图像上的边缘特征定位在亚像素级别上。目前亚像素级的边缘提取方法有:插值法、多项式拟合法、几何矩法、空间矩法等。本文采用泽尼克矩的亚像素边缘定位算法。

其基本步骤是:

- 1) 建立理想的阶跃边缘模型;
- 2) 在利用泽尼克矩进行边缘定位时只使用了三个不同阶的泽尼克矩,即  $A_{00}, A_{11}, A_{20}$ 。建立原始图像泽尼克矩与旋转后图像的泽尼克矩的关系,据此推出图像边缘的亚像素位置;
- 3) 本文的图像分辨率为  $640 \times 480$ ,则像素为  $4:3$  的矩形。在  $5 \times 5$  像素区域内,用单位圆进行采样,分别计算出三个不同阶的泽尼克矩的模板;
- 4) 误差修正,当模板大小不同时,边缘亚像素的计算会产生偏差,通过对边缘位置的平移量进行

补偿来修正误差;补偿后的算法对直线的定位精度可达 0.05 像素。

#### 4.3 三维表面形貌测量

在进行了系统标定和被测表面激光光点图像的提取后,进行物体表面三维形状测量。可通过一幅图像得到一个物体的交叉部分表面,当激光的方向改变时,就能得到另一个交叉部分的形状。当激光完成了在各个方向上的变化时,也就测量出了整个物体表面的三维形貌。

### 5 实 验

利用半导体激光器产生入射激光束,波长为 633 nm。空气和水的折射系数设为  $n_1 = 1.0001$ ,  $n_2 = 1.3330$ 。图像采集系统是由面阵 CCD 摄像机、图像采集卡及计算机。其软件环境是 Windows XP 下的 VC。CCD 的分辨率为  $640 \times 480$ 。CCD 的焦距  $f$  标定值为 1082.0 pixel。

将一个三角棒物体(等边三角形的边长为 10.0 mm;棒长为 30.6 mm)浸入装满水的水槽中。对其进行三维表面形貌的测量。

为了在数量上评价本文提出的方法,在水槽装满水的情况下和没有装水的情况下,对比形貌重构的准确性<sup>[13]</sup>。

从被测物体表面的三维坐标来重构物体表面三维形貌,步骤如下:首先,提取在图像上光线的照射点,为每条扫描线计算中心[如图 4(a)];然后,用最小二乘法计算出测量点的位置,同时计算这些扫描线的端点的三维坐标[如图 4(b)]。用泽尼克矩对端点激光光斑像进行亚像素边缘定位,以确定长度计量的起点与终点。同样的方法,当  $\eta$  变化时,再计算出端点的三维坐标。根据这些坐标值,在每条边都相互平行(对方形物体或本文中的三角棒的情况)的约束下,物体的三维形状就通过最小二乘法重构出来<sup>[14]</sup>。最后,计算两条边之间的距离,并与实际值进行比较。

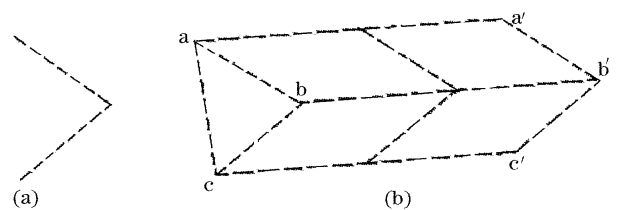


图 4 三维重构

Fig. 4 Three-dimensional reconstruction

表 1 表示了平均误差,最大误差和坐落位置不超过激光探测器范围 400 mm 的物体实际形状与重

构形状之间标准偏差。表 2 表明有水时的精确度与无水时的精确度几乎相等。以上结果证明该方法无论是否有水(考虑光的折射与否)时都可实现对被测物体表面三维形貌的测量。

表 1 三维测量的误差

Table 1 Error of three-dimensional measurement

Testing environment	Without water	With water
Average error /mm	-0.0079	-0.0078
Maximal error /mm	-0.0124	-0.0105
Standard deviation /mm	0.0054	0.0049

表 2 三角棒的长度测量(单位:mm)

Table 1 Measurement of triangle stick (unit: mm)

Testing environment	Without water	With water
1	30.6043	30.5895
2	30.5901	30.6001
3	30.5894	30.5908
4	30.5876	30.6008
5	30.5886	30.5986
6	30.5957	30.5984
7	30.5897	30.6003
8	30.5912	30.5907

## 6 结 论

本文提出了通过使用光学投影对水中物体进行三维形貌测量的方法。在三角测量法中考虑光的折射,并设计一种适合流线型物体的技术。实验证明了本文提出的三维测量方法的有效性。本文实验中采用的方法对水中物体三维测量的精确度与无水时几乎相同。该方法可用于测量各种形状物体的表面三维形貌,适用范围广,测量速度快。这种方法可以从测量规则水槽中物体的三维形貌,拓展到测量实际水中物体的三维形貌,如观测海底形貌,研究水下生物特性等领域。

## 参 考 文 献

1 Byong-Chang Kim, Seung-Woo Kim. Absolute interferometer for three-dimensional profile measurement of rough surfaces [J].

*Opt. Lett.*, 2003, **28**(7): 528~530

2 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan *et al.*. Multi-beam confocal system using pinhole array[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(3): 263~266 (in Chinese)

孔 兵,王 昭,谭玉山等. 基于针孔阵列的多光束共焦三维测量系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(3): 263~266

3 Kang Xin, He Xiaoyuan, Quan C. 3-D sensing using sinusoidal fringe projection and phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1444~1447 (in Chinese)

康 新,何小元,Quan C. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1444~1447

4 Mitsuru Baba, Daisuke Narita, Kozo Ohtani. A new method of measuring the 3-D shape and surface reflectance of an object using a laser rangefinder [C]. *IMTC 2004. Proc. the 21st IEEE*, 2004, **2**: 1349~1353

5 Canan Karaalioglu, Yani Skarlatos. Fourier transform method for measurement of thin film thickness by speckle interferometry [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1694~1698

6 Liang-Chia Chen, Chu-Chin Liao. Calibration of 3D surface profilometry using digital fringe projection [J]. *Measurement Science & Technology*, 2005, **16**(8): 1554~1566

7 Qihong Lou. Development of excimer laser and its applications at SIOFM [R]. *Pacific Rim Conference, IEEE*, 1999, **3**: 801~804

8 Andreas Etmeyer. Laser shearography for inspection of pipelines[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1996, **160**(1~2): 237~240

9 Y. Y. Hung, J. Q. Wang. Dual-beam phase shift shearography for measurement of in-plane strains[J]. *Optics and Lasers in Engng.*, 1996, **24**(5~6): 403~413

10 Jung-Ryul Lee, J. Molimard, A. Vautrin. Digital phase-shifting grating shearography for experimental analysis of fabric composites under tension[J]. *Applied Science and Manufacturing*, 2004, **35**(7~8): 849~859

11 Ye Haijia, Chen Gang, Xing Yuan. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Optics and Precision Engng.*, 2004, **12**(1): 71~75 (in Chinese)

叶海加,陈 罡,邢 渊. 双目 CCD 结构光三维测量系中的立体匹配[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(1): 71~75

12 Cui Jiwen, Tan Jiubin. Algorithm for edge subpixel location based on Zernike moment[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 779~785 (in Chinese)

崔继文,谭久彬. 基于 Zernike 矩的亚像素边缘定位算法[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 779~785

13 K. Hoshino, K. Tamura. Development of three-dimensional shape measurement method of the object in water [C]. *IEEE Techno-Ocean '04*, 2004, **3**: 240~247

14 Zhang Zhaoli, Zhao Chunhui, Mei Xiaodan. Advanced image processing technology and the implement of MATLAB [M]. Beijing: People's Post and Telecommunication Press, 2001. 171~284 (in Chinese)

张兆礼,赵春晖,梅晓丹. 现代图像处理技术及 Matlab 实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001. 171~284