

文章编号: 0253-2239(2005)10-1319-5

## 位错点阵投影的三维数字成像\*

田劲东 彭翔

(深圳大学光电子学研究所 教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

**摘要:** 提出一种基于位错点阵投影的三维数字成像方法,该方法以二维点阵结构光顺序照明参考平面和被测物体表面,通过分析分别投影在参考平面和物体上的点阵的成像过程,建立投射在参考平面和被测物体表面上的点阵中同一点在成像面上横向位置错动与被测物体深度之间的数学模型。依据此模型,通过计算相对点在成像平面上的横向位移,可计算出物体的深度图像。二维点阵可以在垂直于光轴的平面内做横向和纵向的两维移动,以填补由于离散而丢失的其他空间点的深度信息,获得高空间分辨率。实验验证了该方法的可行性,此方法对于拓扑复杂的表面和大梯度表面有较强的适应性。

**关键词:** 成像系统; 三维数字成像; 位错点阵; 深度图像; 轮廓测量

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A

### Approach for Three-Dimensional Digital Imaging Via Position-Shift Point Array Projection

Tian Jindong Peng Xiang

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Education Ministry, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

**Abstract:** A novel three-dimensional (3-D) imaging method based on position-shift point array projection is presented. A point-array structure light is projected sequentially onto the reference plane and the object surface, and then, a pair of point-array images form. By analyzing imaging process of the both point-arrays, a mathematical model that is able to express the relationship between height of the object and the lateral displacement of point is established. Based on this model, the 3-D digital image can be calculated by computing the lateral displacement of the same point on the two point-array images. In order to fill up the lost spatial information caused by discrete processing, the point-array can be moved along both lateral and axial direction step by step to achieve high spatial resolution. Experimental results are presented to show the theoretical predictions. This method is qualified for implementing 3-D profilometry of objects with complex topology or large height discontinuities.

**Key words:** imaging systems; 3-D digital imaging; position-shift point array; range image; profilometry

## 1 引 言

计算机技术、光学和光电子技术的迅速发展,使得具有快速、非接触、高精度、自动化等优点的光学三维数字成像技术得到越来越广泛的应用,例如机器视觉、工业检测、快速原型制造和生物医学等领域<sup>[1~4]</sup>。获取三维面形信息的基本方式分为被动三维成像和主动三维成像,其中主动三维成像采用结构光照明方式,由于三维面形对结构光的空间和时间调制,可以

从携带三维面形信息的观察光场中解调得到三维面形数据。由于这种方法具有较高的测量精度,因此获得更为广泛的应用。一种常用的主动照明的三维成像方法是三角法,它以传统的三角测量为基础,由于三维物体表面形状对结构照明光束产生的空间调制,改变了成像光束的角度,即改变了成像光点在探测器阵列上的位置,通过对成像光点位置的确定和系统光路的几何参量,计算出距离。现有的技术包括:采用

\* 国家自然科学基金(60275012)、广东省自然科学基金(031804)和深圳市科技三项费用(200341)资助课题。

作者简介: 田劲东(1973~),男,河北人,副研究员,博士,主要从事现代光学测试、三维数字成像及造型、光电信息处理与图像的研究。E-mail: jindt@szu.edu.cn

收稿日期: 2004-12-06; 收到修改稿日期: 2005-02-05

单光束点结构照明的方法和采用片状光束的线结构照明的方法,以及相位测量轮廓术<sup>[5]</sup>,包括相移轮廓术<sup>[6]</sup>、傅里叶变换轮廓术<sup>[7~9]</sup>和空间相位探测轮廓术<sup>[10]</sup>。相位测量轮廓术也最终归结为三角测量法,只不过在不同的测量技术中采用不同的方式来从观测光场中提取三角计算中所需要的几何参量。采用单光束点结构照明的方法,由于每次只有一个点被测量,为了形成完整的三维物体数字像,必须附加二维扫描,这种方法采样效率低,测量时间长,不适用于实时测量;采用片状光束的线结构照明的方法,结构照明系统投射一个片状光束到被测物体表面,形成线结构照明,仍然需要一维扫描,才可以形成完整的三维物体数字像;相位测量轮廓术投射的是一个二维图形到被测物体,形成面结构照明,一次测量可以得到一个完整的三维物体数字像,相位测量轮廓术具有较高的测量速度和精度,但由于相位测量轮廓术采用条纹图编码,物体的深度信息编码在载波条纹中,通过计算折叠相位和相位展开,以及光学系统的结构参量间接获得物体的深度像,当被测物体拓扑复杂或表面起伏较大或存在信息盲区时,相位测量轮廓术的相位展开变成非常困难的问题,例如会产生相位模糊和误差传播。

本文提出了一种基于空间位错点阵投影实现三维数字成像的方法,它采用点阵编码的方法,投射二维空间点阵到被测物体上,形成面结构光的照明,一次成像即可获得一个完整的三维数字像,从而克服了现有三角法主动三维传感技术中的单光束点结构照明和片状光束的线结构照明必须逐点或逐行扫描才能获得完整的三维数字像的缺点,提高了采样效率;与相位测量轮廓术比较,点阵编码方法是直接通过对成像点阵的位置确定来计算物体的深度,不存在相位模糊和误差传播的问题,并可在一定程度上缓解由于信息盲区造成的数据残缺不全的问题。因此,这种方法既具有较高的采样效率,又对拓扑复杂的曲面具有较强的普适性。

## 2 基本原理

### 2.1 投影在参考平面上的点阵成像过程

图1是投影在参考平面上点阵成像的结构示意图。点 $P$ 是数字投影仪投影光学系统的出瞳, $Po$ 为投影光轴,投影光线 $PP_1$ 、 $PP_2$ 和 $PP_3$ 与参考平面 $R$ 的交点确定了投射的二维空间点阵在参考平面上的位置。点 $I$ 是图像接收器成像光学系统的入

瞳, $Io$ 为成像光轴,它与投影光轴的夹角为 $\alpha$ ,点 $P$ 、 $I$ 和照明场的中心 $o$ 位于同一平面内,并构成一个三角形,以 $PI$ 之间的连线为基线,它和投射在物体的所有点阵的中心构成了若干三角形,形成了三角测量系统。 $I_p$ 是图像传感接收器平面相对于点 $I$ 的对称平面,根据透视投影的原理,点阵在图像接收器上成像位置可通过计算成像光线与平面 $I_p$ 的交点的位置得到。

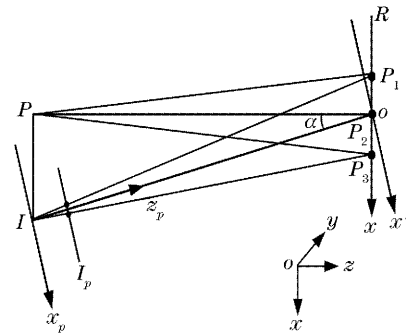


图1 投影在参考平面上的点阵成像示意图

Fig. 1 Imaging schematic diagram of the point-array projected on the reference plane

在此成像系统中,投射在参考平面上的点阵的成像过程可以分为三个步骤:

首先,把物坐标系 $xyz$ 绕 $y$ 轴正向旋转 $\alpha$ 角,变换为坐标系 $x'y'z'$ ,使新坐标系的 $z'o'$ 轴与成像光轴 $Io$ 重合,相应的齐次变换矩阵为

$$\mathbf{T}_{\text{rotate}_y} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

然后,把坐标系 $x'y'z'$ 沿 $z'$ 轴负向平移 $L$ ,使新的坐标原点与入瞳 $I$ 重合,变换后的坐标系为 $x_p y_p z_p$ ,相应的齐次变换矩阵为

$$\mathbf{T}_{\text{shift}_z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & L & 1 \end{bmatrix},$$

最后,在坐标系 $x_p y_p z_p$ 下做透视投影,透视投影平面 $I_p$ 与 $z_p$ 轴垂直,在距原点 $F$ (焦距)的位置上,它与图像传感接收器平面相对于 $x_p o_p y_p$ 对称,相应的齐次变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_{\text{perspective}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/F \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

因此,对于参考平面  $R$  上的点经过三次变换,成像到投影平面  $I_p$  上,它的变换矩阵  $T$  可以表示为

$$T = T_{\text{rotate}_y} \cdot T_{\text{shift}_z} \cdot T_{\text{perspective}}, \quad (1)$$

变换后的空间坐标可以表示为

$$[X_{p0} \ Y_{p0} \ Z_{p0} \ H] = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]T, \quad (2)$$

其中  $x_0, y_0, z_0$  为投影在参考平面上的点在物坐标系  $xyz$  下的坐标值。参考平面  $z = 0$ , 投影点阵在参考平面上等间距规则排列, 因此,  $x_0, y_0, z_0$  均为已知。那么点阵成像在平面  $I_p$  上, 其在  $x$  方向的坐标可由下式计算:

$$x_{p0} = \frac{X_{p0}}{H} = \frac{x_0 \cos \alpha}{L - x_0 \sin \alpha} F, \quad (3)$$

(3) 式中  $\alpha$  为投影光轴  $PO$  和成像光轴  $IO$  之间的夹角;  $L$  为图像传感接收器的入瞳  $I$  与照明场的中心  $o$  之间的距离;  $F$  为成像系统的焦距。

### 2.2 投影到物体上的点阵成像

对于一个三维被测物体, 如图 2 所示, 是投影在任意曲面的三维物体上点阵成像的结构示意图。与图 1 中相同的投射光线  $PP_1, PP_2$  和  $PP_3$  与被测物体表面相交于  $B_1, B_2$  和  $B_3$  点, 这些交点确定了投射的二维空间点阵在物体表面  $S$  上的空间位置。投射在物体表面  $S$  的点阵同样经过上述三个步骤, 成像在图像传感接收器上。

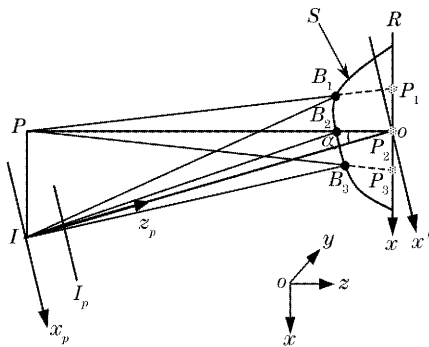


图 2 投影在物体表面上的点阵成像示意图

Fig. 2 Imaging schematic diagram of the point-array projected on object surface

同样利用式(1)中的变换矩阵做变换, 可得到  $S$  上的点阵在成像平面  $I_p$  上的对应的空间位置:

$$[X_p \ Y_p \ Z_p \ H] = [x_b \ y_b \ z_b \ 1]T, \quad (4)$$

其中  $x_b, y_b, z_b$  为投影在物体表面上的点在物坐标系  $xyz$  下的坐标。另外, 投影在物体表面上的点同时一定在投影光线上, 则一定满足下式:

$$\begin{cases} \frac{z_b}{L'} = \frac{x_0 - x_b}{x_0} \Rightarrow x_b = \frac{L' - z_b}{L'} x_0, \\ \frac{z_b}{L'} = \frac{y_0 - y_b}{y_0} \Rightarrow y_b = \frac{L' - z_b}{L'} y_0, \end{cases} \quad (5)$$

其中  $L'$  为数字投影照明发射器的出瞳  $P$  与视场中心  $o$  之间的距离。

根据式(4)、(5)可推导出点阵在成像平面  $I_p$  上  $x$  方向的坐标, 如(6)式所示:

$$x_p = \frac{(L' - z_b)x_0 \cos \alpha + L' z_b \sin \alpha}{LL' - (L' - z_b)x_0 \sin \alpha + L' z_b \cos \alpha} F. \quad (6)$$

值得注意的是在这个点阵像  $x$  方向的坐标表达式中, 已包含了物体的深度信息  $z_b$ 。

### 2.3 利用“点对”的位置差重建物体表面轮廓

同一点阵投影在参考平面和物体表面, 在图像接收器成像后得到两个点阵像, 点阵中同一点所成的两个点像构成了一个“点对”, 根据(3)式、(6)式可推导出“点对”在成像面上  $x$  方向位置的变化

$$\delta x_p = x_p - x_{p0}, \quad (7)$$

取

$$C = \frac{x_p}{F} = \frac{\delta x_p + x_{p0}}{F} = \frac{\delta x_p}{F} + \frac{x_0 \cos \alpha}{L - x_0 \sin \alpha}, \quad (8)$$

把(3)式、(6)式和(8)式代入(7)式得

$$z_b = \frac{L'(x_0 \cos \alpha - LC + Cx_0 \sin \alpha)}{C(x_0 \sin \alpha + L' \cos \alpha) + x_0 \cos \alpha - L' \sin \alpha}, \quad (9)$$

$z_b$  为投影在物体表面上的点在物坐标系  $z$  方向的坐标, 即物体的深度值, 因此(9)式就是物体深度与“点对”在成像面上  $x$  方向位置之间的关系式。式中  $x_0$  为已知, 其他系统结构参量均为已知, 只要确定了“点对”在成像面上  $x$  方向位置的变化  $\delta x_p$ , 就可计算出被测物体上的所有离散点的深度值  $z_b$ 。因此, 首先计算投射在参考平面的点阵和投射在被测物体表面上的点阵分别在 CCD 相机上所成的点阵像中各离散点的空间位置, 再计算各“点对”在成像平面  $x$  方向的位置差, 最后根据(9)式计算物体的深度值, 从而获得物体的深度像。

离散化损失了空间分辨率, 投射密度更高的点阵可以改善分辨率, 可以投射的点阵密度的大小受到成像系统的光学分辨率的限制, 也就是取决于物镜的分辨率  $N_l$  和接收器的分辨率  $N_r$ , 整个系统的分辨率  $N$ (单位为 lp/mm) 可以表示为<sup>[11]</sup>

$$1/N = 1/N_l + 1/N_r, \quad (10)$$

根据瑞利准则, 物镜的理论分辨率为

$$N_l = D/(1.22\lambda f'), \quad (11)$$

其中  $D$  为出瞳直径,  $\lambda$  为波长,  $f'$  为物镜的焦距。对于接收器 CCD 相机, 其分辨率由 CCD 探测器的尺寸以及成像后可以分辨的黑白线对的数目决定, 为 CCD 相机的标称值。则, (11)式代入(10)式得

$$N = DN_r(\lambda'N_r + D), \quad (12)$$

(12) 式给出了成像系统的光学分辨率,这就给出了对点阵成像时,相邻点的极限分辨能力,投影点阵的密度不能过大,点阵密度(每毫米点数)一定要大于此值,才能被成像系统分辨。

为了获得高空间分辨率,可以把投射的二维点阵在垂直于光轴的平面内沿  $x$ 、 $y$  两个方向数字移动,获得位置错动的点阵,形成位错点阵序列,最小移动步长为 1 个像素,以填补由于离散而丢失的其它空间点的深度信息,对位错点阵序列中的每一对点阵像分别进行处理,均可获得一副三维数字像,根据离散点的空间位置关系合并所有的三维数字像,可获得高空间分辨率的三维数字像。

### 3 实验结果及性能分析

位错点阵投影三维数字成像系统的结构示意图如图 3 所示。它由数字投影仪、CCD 相机和计算机组成。数字投影仪采用的是数字微镜器件(Digital micro-mirror device, DMD)数字投影设备(Benq 2115),它所需的二维空间点阵图由计算机产生,所投射二维点阵的数字移动也由计算机控制完成; CCD 相机采用的是 JVC TK-C1481BEC,它采集到的点阵像通过图像采集卡送到计算机。实验中投影仪投射的是带有标记点的二维点阵,例如某个点被标记成红色,经过滤波处理,可以分别得到标记点在参考平面和被测物体表面点像上的位置,以标记点为参考点,即可建立两个点像之间点的对应关系。计算机首先确定参考平面和被测物体表面上点阵像

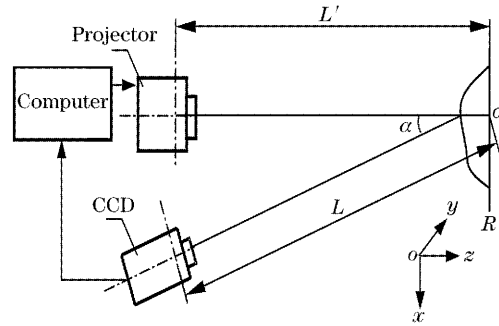


图 3 位错点阵投影三维成像系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of this three-dimensional digital imaging system via position-shift point array projection

在  $x$  方向上的位置,并计算相应“点对”在  $x$  方向上的位置差,再根据(9)式计算被测物体在所有离散点的深度值。如果采集的是一个位错点阵图像的序列,则对序列中的每一对点阵图像分别进行上述处理,获得相应的深度信息,最后把获得的所有空间离散点的深度信息合并在一起,得到被测物体高空间分辨率的三维深度像。

图 4 是对一个人头部模型实际测量的结果。图 4(a)是人头部模型被点阵结构光照明时的图像,采用的是  $64 \times 64$  点阵,点阵图大小为  $512 \times 512$  像素,图中的方框为计算深度时选择的范围。图 4(b)是对图 4(a)中人头部模型所选范围内实测的三维数字像。实际测量时点阵沿  $x$ 、 $y$  方向分别移动了 3 次,步长为 2 个像素,已填补了由于离散而丢失的其它空间点的深度信息,获得高空间分辨率。

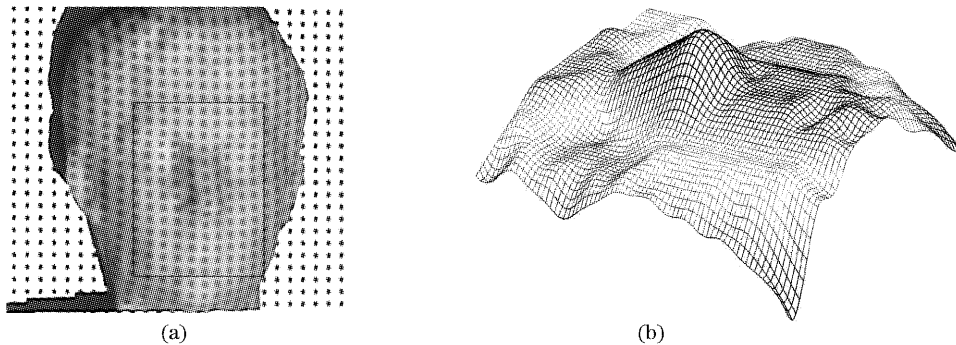


图 4 人头部模型轮廓测量结果。(a)人头部模型被点阵结构光照明时的图像,(b) (a)中所选范围内的三维数字像

Fig. 4 Three-dimensional profilometry result of a head surface. (a) Point-array image, (b) range image of selected region in (a)

图 5 是对一个台阶状物体实际测量的结果。图 5(a)是一个台阶状物体被点阵结构光照明的图像。图 5(b)是对图 5(a)中台阶状物体实际测量的结果。由图 5(a)可以发现,当被测物体表面存在梯度很大的变化时,由于投影盲区或成像盲区的存在,

会产生阴影,造成部分编码结构光被挡而在局部产生信息盲区,对于条纹结构光编码的方式,信息盲区的相位分布会形成一个间断区域,当用行列逐点相位展开时就会导致这种局部误差的传播,而使得获取正确的展开相位分布成为一个非常困难的问题。

而本文采用的点阵结构光编码,“点对”之间是相互独立的,虽然投影在信息盲区中的点由于不能形成“点对”而得不到信息盲区中离散点处的深度值,但

它不会影响周围区域,不会造成误差传播,仍然可以得到其三维数字像,因此,在一定程度上缓解了由于信息盲区造成的数据残缺不全的问题。

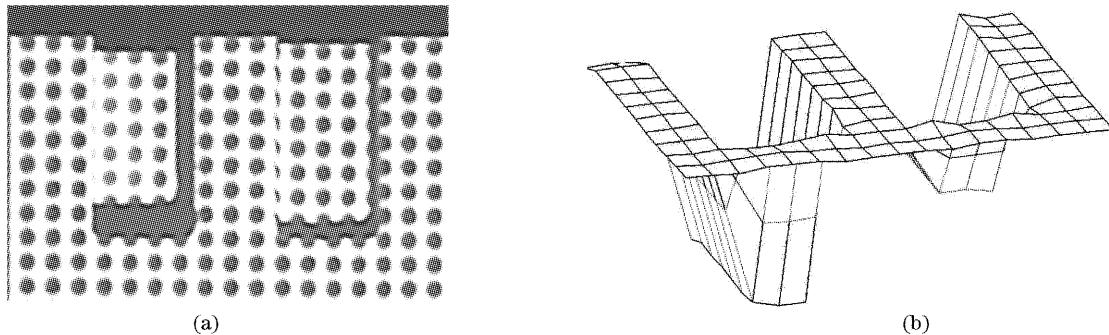


图5 台阶状物体轮廓测量结果。(a)台阶状物体被点阵结构光照射的图像,(b)台阶状物体三维数字像  
Fig. 5 Three-dimensional profilometry result of a step-like object. (a) Point-array image, (b) range image of (a)

## 4 结 论

本文是利用投射在参考平面和被测物体表面上的点阵分别在图像接收传感器上所成的点阵像,通过计算相对应“点对”在成像平面  $x$  方向的位置差,来确定物体的深度值。与已有的方法和技术相比,点阵编码方式一次成像即可获得一个完整的被测物体的三维数字像,即克服了原有三角法的主动三维传感技术中必须逐点或逐行扫描的缺点,提高了采样效率;而且不存在相位模糊和误差传播的问题,并可在一定程度上缓解由于信息盲区造成的数据残缺不全的问题,对拓扑复杂的自由曲面具有较强的普适性。采用数字投影,二维点阵的疏密程度可调,可实现多种空间分辨率的三维数字成像;并且二维点阵能够在垂直于光轴的平面内做横向和纵向两维数字移动,以填补由于离散而丢失的其他空间点的深度信息,获得高空间分辨率。

## 参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Peng Xiang, Zhang Zhonghua, Zhu Shaoming *et al.*. 3D digital imaging system based on white-light digital Moire [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1401~1405 (in Chinese)  
彭翔,张宗华,朱绍明等. 基于白光数字莫尔的三维光学数字成像系统[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1401~1405
- 3 Zhang Zhonghua, Peng Xiang, Hu Xiaotang. A new color 3-D optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 994~998 (in Chinese)  
张宗华,彭翔,胡小唐. 一种新型的彩色三维光学成像系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 994~998
- 4 Xiang Peng, Zonghua Zhang, Hans J. Tizianib. 3-D imaging and modeling-Part I: acquisition and registration[J]. *Optik*, 2002, **113**(12): 448~452
- 5 Fiona Berryman, Paul Pynsent, James Cubillo. A theoretical comparison of three fringe analysis methods for determining the three-dimensional shape of an object in the presence of noise[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **39**: 35~50
- 6 J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- 7 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 8 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233 (in Chinese)  
苏显渝,谭松新,向立群等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 9 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of dilating Gabor transform to three-dimensional shape analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 725~729 (in Chinese)  
翁嘉文,钟金钢. 伸缩窗口傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 725~729
- 10 S. Toyooka, Y. Iwaasa. Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1630~1633
- 11 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 1999. 130~131 (in Chinese)  
郁道银,谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 130~131