

文章编号: 0253-2239(2010)09-2573-05

# 基于调制度层析的在线三维测量方法

郑旭 曹益平 李坤

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 调制度反映相位展开可靠性的程度,与物体本身灰度和形状有着紧密的关系,因此可作为测量的特征标记。提出了一种采用调制度层析实现在线三维测量的方法。通过投影一固定的正弦条纹到待测运动物体上,借助物体运动可产生等效的相移变形条纹。利用基于傅里叶变换轮廓术调制度模型计算各帧等效的相移变形条纹的调制度,并采用层析方法从各帧调制度分离出反映待测物体的调制度层析特征,以该层析信息作为特征模板,实现像素匹配,从而获取各帧具有一致像素坐标的等效相移变形条纹,实现在线移动物体的三维面形测量。实验证明了该方法的可行性和实用性。

**关键词** 信息光学;在线三维测量;调制度;像素匹配;相位展开;Stoilov 相移算法

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2573

## An On-Line 3D Measurement Method Based on Modulation Delamination

Zheng Xu Cao Yiping Li Kun

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** Modulation is used to scalage the phase unwrapping reliability and it is related to the measured object's gray and shape informations. A novel on-line three-dimentional (3D) shape measurement method based on modulation delamination is presented. While one sinusoidal fringe is projected on the measured object, the deformed patterns with equivalent phase shift are captured as the measured object moves. The corresponding modulation distributions to the deformed patterns can be obtained by Fourier transform profilometry. A modulation delamination method is used to extract a token from modulation distributions as the mask, and the pixels matching can be realized so as to achieve the equivalent phase-shift deformed patterns at the same pixel coordinate. So the on-line 3D shape measurement is realized. Experimental results show the feasibility and validity of the measurement method.

**Key words** information optics; on-line 3D measurement; modulation; pixel matching; phase unwrapping; Stoilov phase shifting algorithm

## 1 引言

随着现代工业的快速发展,生产流水线的大量应用,对在线三维测量的要求越来越高。传统的三维测量方法,如相位测量轮廓术(PMP)<sup>[1,2]</sup>、傅里叶变换轮廓术(FTP)和调制度测量轮廓术(MMP)<sup>[3,4]</sup>等,通过分析受物体表面调制的空间结构光场获得物体的三维轮廓信息。其中 PMP 是目前采用面结构光三维测量方法中精度最高的一种方法,通常要

求被测物体固定不动,按相移量严格等于  $2\pi$  的  $N$  分之一主动控制相移  $N$  次;但在在线三维的测量中,物体是运动的,采用上述 PMP 方法,将难以准确控制相移,并且使所采集的相移图之间对应的像素坐标和物点坐标不匹配。如果投射一个固定正弦条纹,用 CCD 采集物体运动过程中对应的变形条纹图,通过像素匹配使各帧图像物点像素坐标一一对应,即可正确解相,恢复出物体三维轮廓。

**收稿日期**: 2009-10-13; **收到修改稿日期**: 2009-12-07

**基金项目**: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)的资助课题。

**作者简介**: 郑旭(1986—),女,硕士研究生,主要从事三维光学信息处理方面的研究。E-mail: nins.zx@126.com

**导师简介**: 曹益平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等方向的研究。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net(通信联系人)

喻睿智等<sup>[5]</sup>和钟立俊等<sup>[6]</sup>提出了采用在载物台上设置若干具有明显特征标记的 PMP 在线测量方法;李坤等<sup>[7]</sup>通过改进,提出了利用物体本身的调制度信息作为特征标记的一种无标记在线三维测量方法。由于受到光照影响,调制度分布受到阴影的限制,并且参考平面的调制度无明显特征,在一定程度上影响了像素匹配精度,为此本文提出一种基于调制度层析区域信息的工件在线三维测量方法。

## 2 在线三维测量原理

在线三维测量原理如图 1 所示,计算机编译产生一正弦光栅,由数字光处理器(DLP)投影到流水线中的被测物体上,在物体随流水线  $n$  步等距离移动位置可控制 CCD 同步采集  $n$  帧变形条纹图:

$$I_n(x_n, y_n) = R(x_n, y_n) \{ A(x_n, y_n) + B(x_n, y_n) \cos[\phi(x, y) + (n-1)\phi_0] \}, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

式中  $R(x_n, y_n)$  为物体表面反射率;  $A(x_n, y_n)$  为背景光强;  $B(x_n, y_n)$  为条纹对比度;  $\phi(x, y)$  为相位调制因子,包含物体的高度信息;  $\phi_0$  为物体等步距移动产生的等效相移。

对(1)式两边做傅里叶变换:

$$G_n(f_x, f_y) = G_{n0}(f_x, f_y) + G_{n1}(f_x, f_y) + G_{-n1}(f_x, f_y), \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

式中  $G_{n0}(f_x, f_y), G_{n1}(f_x, f_y), G_{-n1}(f_x, f_y)$  分别为第  $n$  帧变形条纹的零级和正负一级谱。采用空间滤波方法对滤出一级谱  $G_{n1}(f_x, f_y)$  做逆傅里叶变换,得

$$P_n(x_n, y_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{n1}(f_x, f_y) \times \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y = \frac{1}{2} R(x_n, y_n) \times B(x_n, y_n) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y) + \phi + \Delta_n], \quad (3)$$

调制度分布定义为  $P_n(x_n, y_n)$  的模,即

$$M_n(x_n, y_n) = |[P_n(x_n, y_n)]| = \frac{1}{2} R(x_n, y_n) B(x_n, y_n), \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

式中变形条纹图的调制度信息包含了物体反射率分布  $R(x_n, y_n)$  和投影光栅对比度分布  $B(x_n, y_n)$ ,若保证投影光栅具有很好的均匀性,则  $B(x_n, y_n)$  可视作常数,因此调制度较好地反映物体的灰度信息,通常可以用此信息实现在线三维测量。然而,当物体表面比较复杂时,受光照的影响,使所获取的物体调制度分布  $M_n(x_n, y_n)$  包含由于光照引起的阴影区域调制度信息,当物体移动时,阴影区域调制度随之发生改变,图 2(a)是模拟半球体的第 1 帧  $I_1(x_1, y_1)$  和第 2 帧  $I_2(x_2, y_2)$  在线变形条纹图,图 2(b)是对应状态下的调制度分布灰度图。分析可知,物体边缘阴影区域调制度总是较低,并且会随物体运动发生改变,导致各帧变形条纹图对应的调制度相似度明显降低,会影响在线三维测量精度;另外,参考面是一个平面,相位展开可靠性很高,其调制度一般较大,但是没有明显特征,若将其参与在线三维测量计算,会影响计算速度;而物体的调制度信息介于中间,当物体在线运动,对应物体位置的调制度也整体

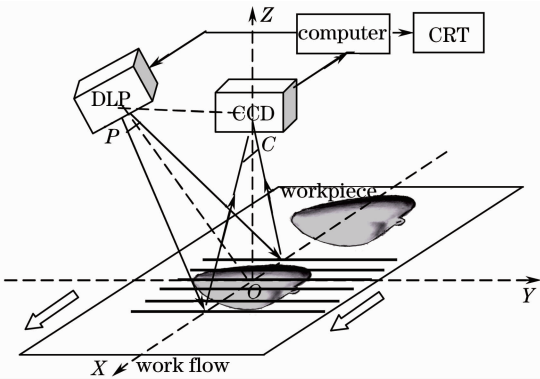


图 1 在线 PMP 系统示意图

Fig. 1 Sketch of on-line PMP system

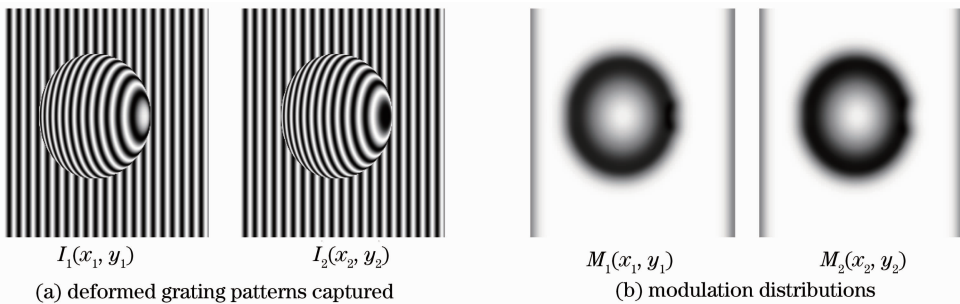


图 2 实验模拟

Fig. 2 Experimental simulation

相应移动,因此对物体调制度分布  $M_n(x_n, y_n)$  进行层析分析,排除阴影调制度信息影响,同时滤除参考面调制度信息,在物体上提取调制度可靠性较高,且真实反映物体面形灰度特征的特征区域作为标记,以此调制度层析区域作为像素匹配模板,可有效实现在线三维测量。

通过大量实验分析,层析方法如下:

设置两个调制度阈值  $T_1, T_2$ , 满足以下条件:

- 1)  $T_1, T_2$  属于  $M_n(x_n, y_n)$  ( $T_2 < T_1$ );
- 2)  $T_1$  小于参考平面的调制度;
- 3)  $T_2$  大于物体边缘阴影不连续部分的调制度。

在  $T_1, T_2$  之间的调制度有可能就是运动物体的调制度信息,  $T_1, T_2$  选择的合理性直接影响相关匹配速度和匹配精度,为此通过大量实验分析,提出

了一种  $T_1, T_2$  选择方法:

设  $\bar{M}$  为  $M_n(x_n, y_n)$  的平均调制度:

$$\bar{M} = \frac{(M_{\max} - M_{\min})}{2} + M_{\min}, \quad (5)$$

式中  $M_{\max}$  为调制度  $M_n(x_n, y_n)$  中的最大值,  $M_{\min}$  为调制度  $M_n(x_n, y_n)$  中的最小值。  $T_1, T_2$  取值为

$$\begin{cases} T_1 = \bar{M} + \varepsilon_1, \\ T_2 = \bar{M} - \varepsilon_2, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 < \bar{M}$  ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  取值任意),  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  为层析厚度。由于  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  的取值,直接影响到匹配的精度,因此通过大量实验分析,要求提取的每帧调制度图像的层析厚度  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  相等,且  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  在保证层析特征的前提下应尽可能的小,通常小于  $0.1\bar{M}$ 。因此,提取调制度层析信息  $S_n(x_n, y_n)$ :

$$S_n(x_n, y_n) = \begin{cases} M_n(x_n, y_n), & T_2 \leq M_n(x_n, y_n) \leq T_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

截取(7)式中第 1 帧变形条纹的调制度层析图  $S_1(x_1, y_1)$  的有效区域作为标记模板  $C$ ,以模板  $C$  分别与经同样处理的第  $n$  ( $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 帧物体变形条纹图的调制度层析图  $S_n(x_n, y_n)$  做相关运算<sup>[8]</sup>, 相关度最大位置的坐标反映了物体的移动,实现了物体位移的测量。然后,采用钟立俊提出的像素匹配方法<sup>[6]</sup>, 获取上述 5 frame 等效相移条纹图:

$$I'_i(x_i, y_i) = \prod \{I'_i(x_i, y_i)I'_1(x_1, y_1)\}, \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad (8)$$

式中  $\prod \{ \}$  称为像素匹配算子,  $I'_1(x_1, y_1)$  为第 1 帧等效变形条纹。

像素匹配,通过获取物体等步距移动的像素量,采用图像剪裁的方法,使物体坐标和像素坐标一一对应,而物体相移量的计算,采用等步长相移算法。等步长相移算法无须知道每次相移的大小,只要保证每次相移步长相移就可以算出物体表面的相位。等步长相移算法主要有 Carré, Stoilov, Hariharan 等三种。实验分析表明,Stoilov 算法<sup>[9]</sup>测量精度高,在等步长相移算法中,受线性相移误差和探测器非线性误差影响较小。因此,根据 Stoilov 算法,由(8)式的等效相移条纹图可解得相位分布

$$\Phi = \arctan \left\{ \frac{2[I'_2(x_1, y_1) - I'_4(x_1, y_1)]}{2[I'_3(x_1, y_1) - I'_1(x_1, y_1) - I'_5(x_1, y_1)] \sin \Phi_0} \right\}, \quad (9)$$

式中

$$\sin \Phi_0 = \sqrt{1 - \left\{ \frac{I'_1(x_1, y_1) - I'_5(x_1, y_1)}{2[I'_2(x_1, y_1) - I'_4(x_1, y_1)]} \right\}^2}. \quad (10)$$

由于 CCD 的随机噪声和量化误差的影响,如果直接根据(10)式计算相移量,可能存在分母为零和复数的几种奇异点:

- 1)  $I'_1(x_1, y_1) = I'_5(x_1, y_1)$ ;
- 2)  $I'_2(x_1, y_1) = I'_4(x_1, y_1)$ ;
- 3)  $\frac{I'_1(x_1, y_1) - I'_5(x_1, y_1)}{2[I'_2(x_1, y_1) - I'_4(x_1, y_1)]} > 1$

导致截断相位出错,相位展开失败。为提高解相精

度,选用许幸芬提出的改进 Stoilov 相移算法<sup>[10]</sup>。因为(9)式是反正切计算,使相位被截断在  $-\pi \rightarrow \pi$  之间,所以相位是截断的,故需对截断相位进行展开,这里采用了菱形展开算法,设展开后的相位为  $\Psi(x, y)$ ,由相位与高度之间的映射算法<sup>[11,12]</sup>恢复出物体高度分布  $h(x, y)$ :

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Psi(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\Psi^2(x, y)}, \quad (11)$$

式中  $a(x, y), b(x, y)$  和  $c(x, y)$  三个参数是通过平面标定获得。

### 3 实验结果及分析

为了验证所提在线三维测量方法的可行性,进行了大量的模拟实验,以图 3(a)所示,最大高度为 8 的圆锥为例。为了验证该方法的抗噪能力,在变形条纹中加入信噪比为 1% 的随机噪声,图 3(b)为采

集的一帧含噪声的变形条纹图,图 3(c)从图 3(b)中获取的调制度分布,图 3(d)是层析调制度特征分布,图 3(e)是采用上述方法重构的物体,图 3(f)是三维重构绝对误差分布,其均方根误差为 0.009,表明该方法的确是可行的,并具有较高的精度。

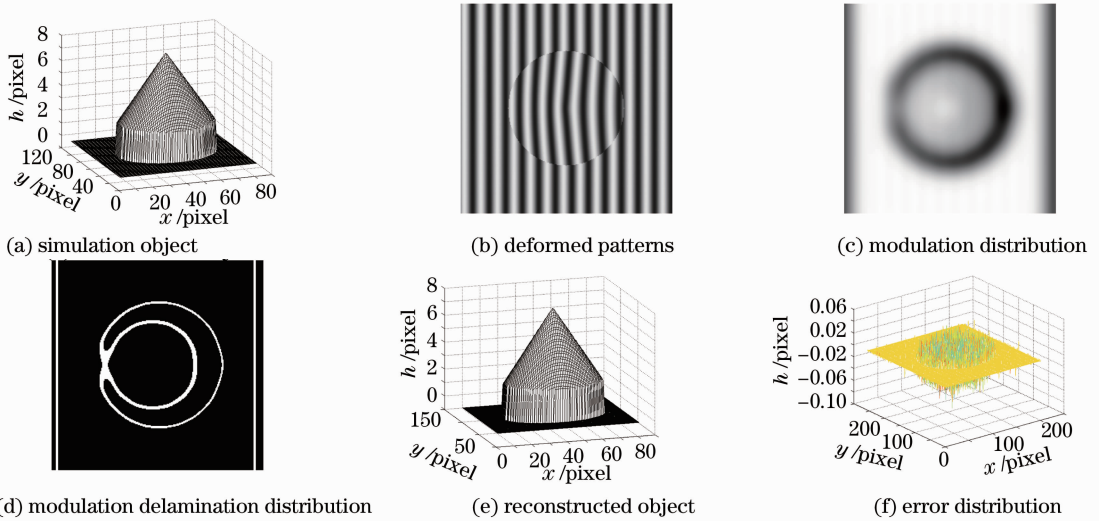


图 3 模拟结果

Fig. 3 Simulation results

为了进一步验证本文方法的实用性,进行了实物实验。实验系统如图 1 所示,由计算机产生一正弦光栅,控制 CP-HX6500 型 DLP 将其投影到载有待测物体的运动载物台上,由型号为 7SC301 单轴运动控制器系统控制物体等步距移动,控制 MTV1881EXCCD

获取变形条纹,经图像采集卡采集,存于计算机内处理。实验中对图 4(a)所示的待测试件进行了在线测量,图 4(b)是由 CCD 采集的第 1 帧  $I_1(x_1, y_1)$  和第 2 帧  $I_2(x_2, y_2)$  在线变形条纹图,由于物体运动,二者对应像素坐标并不指向同一物点位置,其对应状态下的

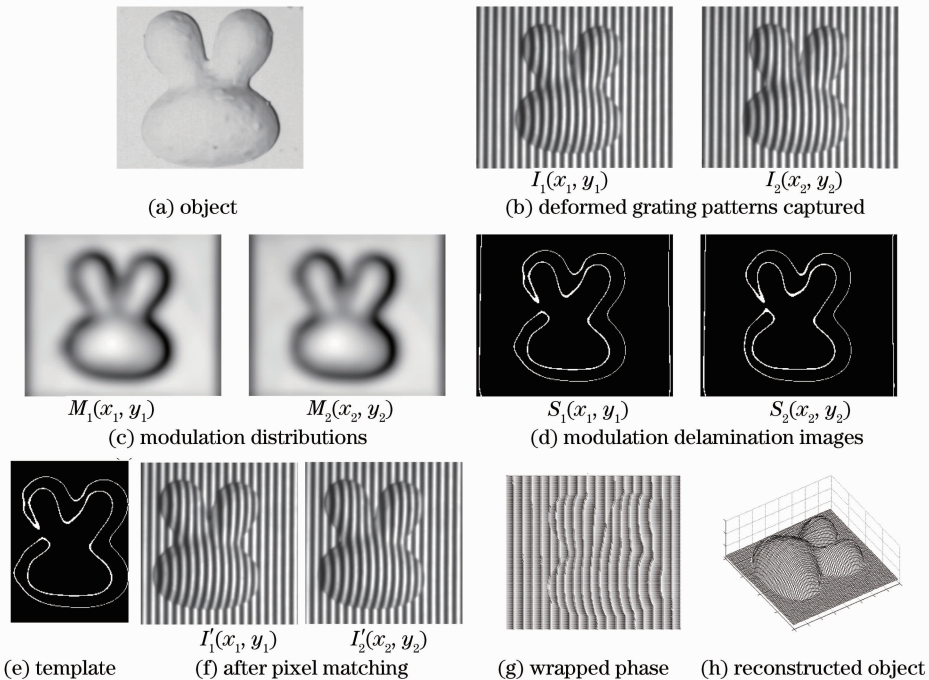


图 4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

调制度分布图如图 4(c), 可见物体边缘的调制度信息发生了改变。按照上述在线三维测量方法对调制度分布图进行层析处理, 得到如图 4(d) 所示的调制度层析图, 以如图 4(e) 所示的第 1 帧  $S_1(x_1, y_1)$  有效区域特征标记为模板。以第 1 帧像素坐标为参考, 对第 2 帧进行像素匹配, 得到图 4(f) 的等效变形条纹图  $I'_1(x_1, y_1)$  和  $I'_2(x_1, y_1)$ 。同理对第 3, 4, 5 帧变形条纹进行像素匹配, 可获取 5 frame 像素和物点一一对应的相移变形条纹图。用改进型 Stoilov 相移算法处理解出的截断相位如图 4(g), 经相位展开和高度映射后重构出试件如图 4(h) 的三维面形。

## 4 结 论

提出了一种基于调制度层析的在线三维测量方法。该方法简单快速, 无需专门的相移标记, 利用物体本身的调制度, 通过合理选取物体调制度层析区域, 以该区域调制度信息作为特征标记, 实现物体位移的测量, 从而实现像素匹配, 获取等效相移变形条纹。结合改进 Stoilov 相移算法的相移轮廓术的高精度优势, 计算相移量, 实现了平动物体的在线三维面形检测。实验结果验证了方法的有效性和可行性, 可满足生产流水线上工件在线三维测量的需求。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264  
吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- 2 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267  
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- 3 Su Likun, Su Xianyu, Li Wansong *et al.*. 3-D profilometry based on modulation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1257~1262

- 苏礼坤, 苏显渝, 李万松等. 基于调制度测量的三维轮廓术[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1257~1262
- 4 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Wang Hua *et al.*. Calibration of the measurement system based on modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 203~206  
邵双运, 苏显渝, 王华等. 调制度测量轮廓术的系统标定[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 203~206
- 5 Yu Ruizhi, Cao Yiping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139~1143  
喻睿智, 曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1139~1143
- 6 Zhong Lijun, Cao Yiping. On-line phase measuring profilometry with phase-shifting perpendicular to moving direction of measured object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 417~420  
钟立俊, 曹益平. 相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 417~420
- 7 Li Kun, Cao Yiping, Chen Yongquan *et al.*. A new method for online three dimensional inspection without marked[J]. *Opt. & Optoelectron. Technol.*, 2009, **7**(2): 57~61  
李坤, 曹益平, 陈永权等. 一种无需标记的在线三维测量[J]. *光学与光电技术*, 2009, **7**(2): 57~61
- 8 Zhang Wuming, Zhong Yuexian, Li Renju. Sub-pixel matching algorithm for projected grating 3D surface measurements[J]. *J. Tsinghua University*, 2008, **48**(3): 412~414  
张吴明, 钟约先, 李仁举. 投影栅三维面形测量中亚像素匹配算法[J]. *清华大学学报*, 2008, **48**(3): 412~414
- 9 Hou Lizhou, Qiang Xifu, Sun Xiaoming. Analysis and comparison of errors in several phase-stepping algorithm with an arbitrary step[J]. *Optical Technique*, 1999, **5**(9): 7~10  
侯立周, 强锡富, 孙晓明. 几种任意步距步进相移算法的误差分析与对比[J]. *光学技术*, 1999, **5**(9): 7~10
- 10 Xu Xingfen, Cao Yiping. Improved Stoilov algorithm based on statistical approach [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 733~737  
许幸芬, 曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 733~737
- 11 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796  
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 792~796
- 12 Zhou Canlin, Li Fang. A novel calibration technology in profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 761~764  
周灿林, 李方. 一种新的形貌检测系统标定技术[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 761~764