

文章编号: 0253-2239(2009)07-1858-05

# 一种快速的调制度测量轮廓术

窦蕴甫 苏显渝 陈延非

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 调制度测量轮廓术是一种垂直测量的三维面形测量方法, 可以测量表面有剧烈变化的复杂物体。提出了一种基于正交方向空间载频的快速调制度测量轮廓术。该方法将两个具有一定间距且正交的正弦光栅同时成像在被测物体上, 并使被测物体位于两个光栅成像面之间。采用空间频域滤波将正交光栅图像分离, 得到被测物体经正交光栅调制的两个调制度图像, 利用其比值和高度的对应关系恢复出物体高度。该方法只需采集一幅图像, 即可恢复出物体高度, 具有三维信息实时采集的特点。实验结果表明, 利用该方法可以快速且较为准确地恢复出物体的高度信息。

**关键词** 光学测量; 动态测量; 调制度测量轮廓术; 傅里叶变换; 正交光栅

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092907.1858

## A Fast Modulation Measurement Profilometry

Dou Yunfu Su Xianyu Chen Yanfei

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** Modulation measurement profilometry is a vertical 3D measurement technique, which can measure the complex objects with acute changes in their surfaces. A fast modulation measurement profilometry based on orthogonal spatial carrier is proposed. In this method, two cross-sinusoidal gratings at a certain interval are imaged on the surface of the testing object which is laid between two imaging planes of them. We can separate the images of orthogonal gratings through spatial frequency domain filtering, obtain the modulation distribution images of two cross-sinusoidal gratings, and then restore the height of the object through the map of the ratio of modulations and the height. It is convenient to obtain the height using only one captured image, so the main characteristic of this method is real-time 3D information collection. The experimental result proves that it can restore the height of the object fast and more accurately.

**Key words** optical measurement; dynamic measurement; modulation measurement profilometry; Fourier transform; orthogonal grating

## 1 引 言

基于三角测量原理的结构光三维传感方法, 包括傅里叶变换轮廓术<sup>[1~3]</sup>、相位测量轮廓术<sup>[4~8]</sup>、激光线结构光投影<sup>[9,10]</sup>、动态测量<sup>[11]</sup>等。这些方法具有较高精度, 但容易受到阴影和遮挡的影响。与这些方法相比, 调制度测量轮廓术(MMP)具有无阴影、无遮挡等优点, 避免了相位展开, 可以测量表面剧烈变化的复杂物体。在调制度测量轮廓术<sup>[12~17]</sup>中, 物体的高度信息被编码在条纹调制度信息中, 通过寻求调制度最大值的位置解调出物体的高度, 因

此需要平移投影系统采集多幅图像才能完成。虽然具有垂直测量和精度高的优点, 但需要采集多帧条纹图像, 测量速度受到限制, 不能满足快速测量的要求。本文提出一种新的快速调制度测量轮廓术, 该方法将两个具有一定间距且正交的正弦光栅同时成像在被测物体上, 并使被测物体位于两个光栅成像面之间, CCD相机通过一个半透半反镜从同一个方向获取受到正交光栅调制的物体表面图像。采用傅里叶变换、空间频域滤波和逆傅里叶变换, 将正交光栅图像分离, 从而得到两个光栅像

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(60838002, 10876021)资助项目。

作者简介: 窦蕴甫(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事信息光学及三维数字图像处理等方面的研究。

E-mail: douyunfu@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学和光学三维传感技术等方面的研究。

E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

调制度分布,利用其比值和高度的对应关系恢复出物体高度。该方法只需采集一幅图象,即可恢复出物体高度,具有三维信息实时采集的特点。实验结果表明,利用该方法可以快速且较为准确地恢复出物体的高度信息,可用于实时动态测量。

## 2 测量原理

两个具有一定间距且正交的正弦光栅经过透镜成像到被测物体表面,物体处于两个光栅成像面之间,如图 1 所示。在每个正弦光栅的成像面上,条纹对比度最大,而在成像面前后,条纹对比度逐渐降低。如果用 CCD 相机通过一个半透半反镜从同一个方向获取受到正交光栅调制的物体表面图像,采用傅里叶变换、双通道空间频域滤波和逆傅里叶变换,将正交光栅图像分离,可以得到两个光栅像在物体表面的调制度分布。

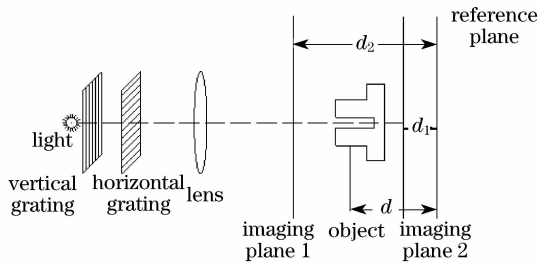


图 1 快速调制度测量轮廓术原理图

Fig.1 Optical geometry of fast modulation measurement profilometry (MMP)

在几何光学近似下,将一个正弦光栅放在成像透镜物平面的位置。考虑理想成像情况,经透镜成像后在像平面上得到的仍然是一个正弦光栅。本文中是采用两个光栅,由于光源是非相干光源,并且两光栅相隔一定距离,因此可近似认为两个光栅分别成像,互不干扰。以竖光栅为例,假设系统横向放大率为  $M$ ,物体表面反射率为  $R(x, y)$ ,则光栅像平面上的光强分布可以表示为

$$I_f(x, y) = \frac{R(x, y)}{M^2} \{ I_0 + C_0(x, y) \cdot \cos[2\pi f_i x_i + \Phi_0(x, y)] \}, \quad (1)$$

其中  $I_0$  为背景光强,  $C_0(x, y)$  为光栅成像面上的条纹对比度,  $f_i$  是像平面的光栅频率。

根据成像理论,光栅成像面前后的模糊像  $I_d(x, y, \delta)$  可以由其聚焦像  $I_f(x, y)$  和相应的系统模糊方程即系统的点扩散函数  $h(x, y)$  的卷积得到,即

$$I_d(x, y, \delta) = h(x, y) * I_f(x, y), \quad (2)$$

符号  $*$  表示卷积,  $I_d(x, y; \delta)$  为距成像面  $\delta$  位置处的光强分布。

在实际光学系统中,由于光学系统的衍射、色散和透镜的畸变等因素,通常采用二维高斯函数表示系统的模糊方程  $h(x, y)$ ,即

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_h^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_h^2}\right), \quad (3)$$

式中  $\sigma_h$  是扩散常数,相应于点扩展函数的标准偏差,与模糊斑半径  $r$  成正比,即  $\sigma_h = Cr$ 。  $C$  的值依赖于光学系统参数,在大多数实际情况下,可以近似取  $\sqrt{2}$ 。

由(2)式和(3)式可以得到成像面前后的光强分布为

$$I_d(x, y, \delta) = \frac{R(x, y)}{M^2} \{ I_0 + C_0(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_i^2 \sigma_h^2\right) \cdot \cos[2\pi f_i x_i + \Phi_0(x, y)] \}. \quad (4)$$

那么光栅成像面前后的条纹调制度分布

$$M(x, y, \delta) = R(x, y) M_0(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_i^2 \sigma_h^2\right), \quad (5)$$

$M_0(x, y)$  是成像面上的调制度分布,由于点扩散常数  $\sigma_h$  与模糊斑半径  $r$  成正比,而  $r$  与离焦量  $\delta$  成正比,因此(5)式可以改写为

$$M(x, y, \delta) =$$

$$R(x, y) M_0(x, y) \exp\left[-\frac{c}{2} f_i^2 (d - d_i)^2\right], \quad (6)$$

式中  $d$  是待测点到参考平面的距离,  $d_i$  是光栅成像面到参考平面的距离,  $c$  是由系统决定的常数。

(6)式表明,条纹的调制度由待测点到参考平面的距离和物体表面的反射率决定,由于不同物体表面的反射率不同,并且同一物体的不同位置反射率也常常有差异。因此要想通过调制度计算待测点的位置,必须排除物体表面反射率的干扰。本文提出了利用两个方向的光栅条纹的调制度相比的方法来去掉物体表面反射率的影响。

根据(6)式,横竖光栅的像在物体表面的调制度分布可以分别表示为

$$M_1(x, y, \delta) =$$

$$R(x, y) M_0(x, y) \exp\left[-\frac{c}{2} f_1^2 (d - d_1)^2\right], \quad (7)$$

$$M_2(x, y, \delta) =$$

$$R(x, y) M_0(x, y) \exp\left[-\frac{c}{2} f_2^2 (d - d_2)^2\right], \quad (8)$$

(7)式和(8)式相比取对数化简可得

$$\ln \frac{M_1(x, y)}{M_2(x, y)} = a_0 d^2 + a_1 d + a_2, \quad (9)$$

其中  $a_0 = c/2(f_2^2 - f_1^2)$ ,  $a_1 = c(f_1^2 d_1 - f_2^2 d_2)$  和  $a_2 = c/2(f_2^2 d_2^2 - f_1^2 d_1^2)$  均为常数。由于被测物体处于两个光栅成像面之间,因此每条调制曲线只取了一半,并且取单调的部分,形成 X 交叉,因此其比值也是单调的。图 2 是实测的调制度和调制度比值经曲

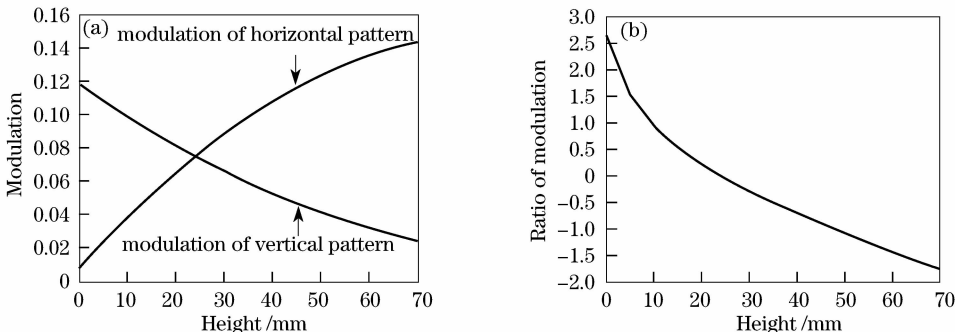


图 2 (a)实测的调制度曲线,(b)实测的调制度比值曲线

Fig. 2 (a) The plot of the modulations, (b) the plot of the ratio of modulations

为得到两组条纹的调制度分布,考虑将两个正弦光栅同时投影到被测物体表面,物体表面的条纹强度分布可表示为

$$I(x, y) = I_0 + C_1(x, y)\cos[2\pi f_1 x + \Phi_{01}(x, y)] + C_2(x, y)\cos[2\pi f_2 y + \Phi_{02}(x, y)], \quad (10)$$

对(10)式两端进行傅里叶变换可得

$$G(f_x, f_y) = G_0(f_x, f_y) + G_{1,1}(f_x, f_y) + G_{1,-1}(f_x, f_y) + G_{2,1}(f_x, f_y) + G_{2,-1}(f_x, f_y), \quad (11)$$

如图 3 所示,由于采用正交光栅,其基频在空间上是分开的,可以很容易地利用空间载频滤波来分别得到两组条纹的基频  $G_{1,1}(f_x, f_y)$  和  $G_{2,1}(f_x, f_y)$ 。对它们进行逆傅里叶变换可得

$$B_1(x, y) = \frac{1}{2}C_1(x, y)\exp[i(2\pi f_1 x + \Phi_{01})], \quad (12)$$

$$B_2(x, y) = \frac{1}{2}C_2(x, y)\exp[i(2\pi f_2 y + \Phi_{02})]. \quad (13)$$

由  $B_1(x, y)$  和  $B_2(x, y)$  可计算出条纹对比度  $C_1(x, y)$  和  $C_2(x, y)$ , 从而得到条纹的调制度,再做比值就得到了条纹调制度的比值。

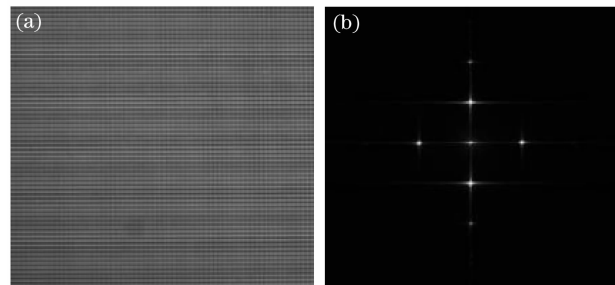


图 3 (a)实测的条纹灰度图,(b)实测条纹的频谱分布  
Fig. 3 (a) Fringe pattern by gray display, (b) frequency spectra by gray display

线拟合得到的结果。不难看出,调制度比值与物体高度之间存在一一对应关系。所以,只要预先标定出调制度比值与两光栅成像面之间距离的对应关系,就可以恢复出放置在标定区域的物体的高度信息。

该方法的测量装置如图 4 所示。在测量之前,要先对系统进行标定,即在两个光栅成像面之间测量一系列的平面,得到其调制度比值,建立调制度比值与距离的映射关系。测量物体时,只需将物体置于两个光栅成像面之间做标定的范围内,得到物体表面的调制度比值分布,然后通过对标定建立的调制度比值和距离的映射关系进行线性插值即可恢复出物体的高度信息。

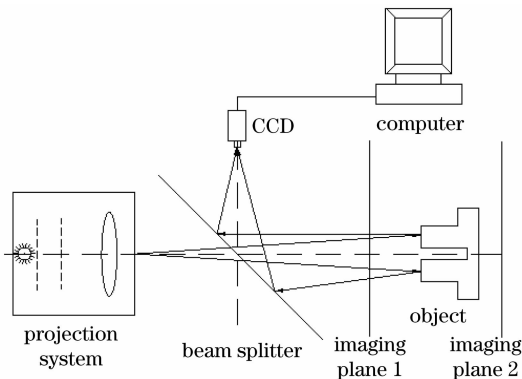


图 4 快速 MMP 实验装置  
Fig. 4 Setup of fast MMP

### 3 实验与结果讨论

首先对实验系统进行标定,标定的测量范围是 70 mm,标定间隔为 5 mm。得到的两条调制度曲线以及调制度的比值已在图 2 表明。为估计方法的测量精度,标定后实测一个平面,其高度为 37 mm,图 5 和图 6 是恢复得到的平面和其第 200 列的高度分布,测量结果的最大绝对误差为 0.74 mm,均方根误差为 0.16 mm。

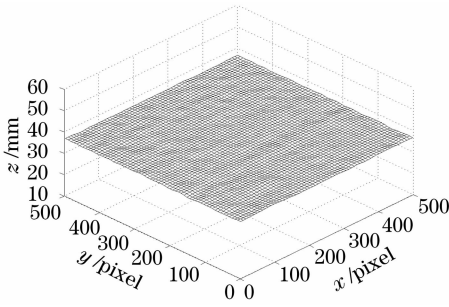


图 5 平面的测量结果

Fig.5 Measurement result of the plane

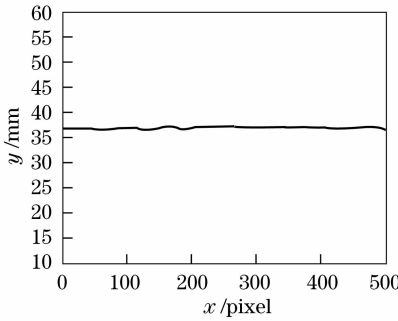


图 6 测得平面第 200 列的高度分布

Fig.6 Restored height of the 200th line of the plane

被测三维物体是一个中心带孔的圆台模型，圆台最高台阶的高度为 57.75 mm，第二个台阶的高度为 25.25 mm。图 7~9 是测量过程中圆台表面的条纹图、调制度比值图和最终恢复出的圆台的高度

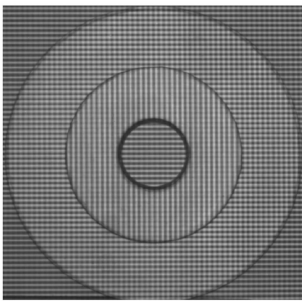


图 7 圆台表面的条纹图

Fig.7 Fringe pattern on the object surface

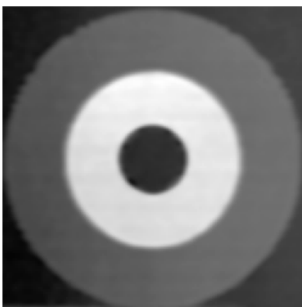


图 8 测得圆台表面的调制度比值图

Fig.8 Ratio of the modulations by gray display

分布。为表明中心孔内的测量结果，图 10 给出了圆台测量结果的剖面图。测得圆台表面的最大高度为 57.99 mm，高度方向的精度为 0.24 mm。

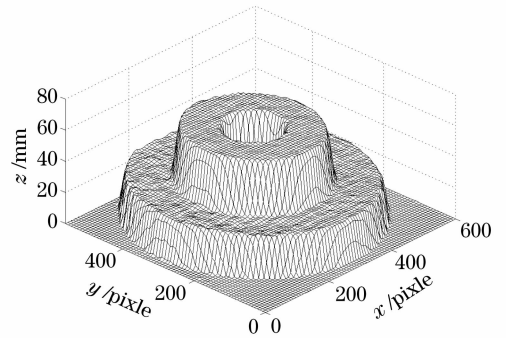


图 9 圆台的测量结果

Fig.9 3D restored height of the object

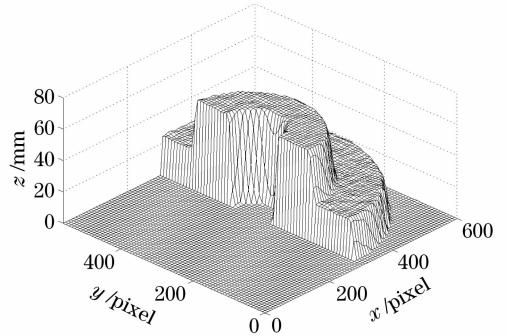


图 10 圆台的测量结果的剖面图

Fig.10 Section map of 3D restored height

实验表明，该方法可以快速且较为准确地恢复出物体高度。与以前采用的调制度测量轮廓术相比，该方法的主要优点是只需采集一帧图像，就可重建三维面形，实现了实时的三维数据采集，同时也保留了较高的精度。测量误差主要来自以下几个方面：

1) 系统误差。该方法要求投影系统具有有限的焦深，而 CCD 成像系统具有较大的焦深。最佳的设计方案应使被测物体位于两个正交光栅像平面之间，标定过程中得到的两个正交光栅的调制度曲线形成 X 交叉[如图 2(a)所示]，其比值为单调的光滑曲线[如图 2(b)所示]。由于该方法是通过高度和调制度比值的映射关系来重建物体高度，要求标定要准确，而光源的不稳定和步进电机的移动误差则使得调制度比值和距离的确定产生误差，因此使用稳定性好的光源和移动误差小的步进电机能够减小标定误差，从而减少测量误差。

2) 计算误差。该方法利用傅里叶变换、空间滤波和逆傅里叶变换来获取条纹的调制度，其实质是在空间频域将正交光栅图像分离，从而得到两个光

栅像在物体表面的调制度分布,因此选用合适的滤波窗,减少频谱混叠可以改善测量精度。

## 4 结 论

提出了一种实时三维数据获取的快速调制度测量轮廓术。该方法将两个具有一定间距且正交的正弦光栅同时成像在被测物体上,CCD相机通过一个半透半反镜从同一个方向获取受到正交光栅调制的物体表面图像。由于两个正交光栅像可以通过傅里叶变换、空间频域滤波和逆傅里叶变换,在频域空间分离,得到两个光栅像在物体表面的调制度分布,特殊的系统设计和两光栅像面分离的特点,使得调制度分布曲线具有的X交叉的性质,然后利用其比值和高度的对应关系恢复出物体高度。该方法只需采集一幅图象,即可恢复出物体高度,具有三维信息实时采集的特点。实验结果表明,利用该方法可快速且较为准确地恢复出物体的高度信息。本文虽然只实现了实时三维信息采集,三维重建是事后进行的,但是如果采用图像处理硬件实现傅里叶变换、空间滤波和逆傅里叶变换,提出的方法也可实现实时的三维重建,在实时动态三维测量以及实时三维视频技术方面具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977~3982
- Mao Xianfu, Su Xianyu, Chen Wenjing *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1291~1295  
毛先富,苏显渝,陈文静等.改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7):1291~1295
- Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the measurement range of wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):647~653  
孙娟,陈文静,苏显渝等.小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):647~653
- V. Srinivasan, H. C. Liu, Maurice Halioua. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2):185~188
- Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11):1518~1522  
郝煜栋,赵洋,李达成.非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11):1518~1522

- Ren Shouqiang, Fang Qiang. Two-channel phase measuring profilometry used in dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4):452~455  
任守强,方强.用于动态测量的双通道光学相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 1997, **17**(4):452~455
- 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
- Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):272~277  
宋万忠,苏显渝,曹益平等.相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):272~277
- Wu Di, Lv Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):482~486  
吴迪,吕乃光,欧阳京.基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):482~486
- Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1435~1439  
唐燕,陈文静.应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1435~1439
- Zhang Qican, Su Xianyu. Dynamic liquid surface shape measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12):1506~1508  
张启灿,苏显渝.动态液面面形测量[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12):1506~1508
- Su Likun, Su Xianyu, Li Wangsong *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
- Su L. K., Su X. Y., Li W. S. *et al.*. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7):1153~1158
- Su Xianyu, Su Likun, Li Wangsong. New Fourier transform profilometry based on modulation measurement [C]. *SPIE*, 1999, **3749**:438~439
- Shao Shuangyun, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Application of modulation measurement profilometry in complex object shape measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12):1623~1628  
邵双运,苏显渝,张启灿等.调制度测量轮廓术在复杂面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12):1623~1628
- Shao Shuangyun, Su Xiangyu, 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
- Shao Shuangyun, Su Xiangyu. New depth recovery algorithm in modulation measurement profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9):43~46  
邵双运,苏显渝.调制度测量轮廓术高度信息获取新算法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(9):43~46