

文章编号: 0253-2239(2005)02-203-4

## 调制度测量轮廓术的系统标定\*

邵双运<sup>1,2</sup> 苏显渝<sup>1</sup> 王 华<sup>2</sup> 李泽仁<sup>3</sup>

1 四川大学电子信息学院光电系, 成都 610064  
2 北京交通大学理学院, 北京 100044  
3 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900

**摘要:** 调制度测量轮廓术是一种采用垂直测量方式的三维面形测量方法, 可以测量表面有剧烈变化区域的复杂物体。提出了一种基于调制度测量轮廓术测量系统的标定方法, 其纵向标定是利用几个相互平行的标定平面建立与 CCD 像面各像素点对应的测量高度与实际高度之间的映射关系, 并利用映射关系确定每一像素点对应的映射关系系数, 然后建立映射关系系数查找表, 存入测量系统中, 完成纵向标定。首先分析了测量系统的误差来源, 然后给出了标定方法和标定过程, 最后给出了实测结果。结果表明, 利用提出的系统标定方法可以有效消除调制度测量轮廓术测量系统误差, 显著地提高了系统测量精度。

**关键词:** 光学测量; 光学三维传感; 调制度测量轮廓术; 标定; 高度映射

中图分类号: TH74; O438 文献标识码: A

## Calibration of the Measurement System Based on Modulation Measurement Profilometry

Shao Shuangyun<sup>1,2</sup> Su Xiangyu<sup>1</sup> Wang Hua<sup>1</sup> Li Zheren<sup>3</sup>

1 *Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064*  
2 *School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044*  
3 *Institute of Fluid Physics, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900*

**Abstract:** In modulation measurement profilometry (MMP), the shape of a testing object is directly decoded from the fringe modulation instead of phase value calculated by fringes recorded from the surface of a diffuse object. A calibration procedure of the measurement system is presented based on MMP. Several parallel planes are used to establish the height-mapping between the measured height and the true height of the object. A look-up table of the height-mapping coefficient is established and stored in the measurement system. The measuring results show that the system error is compensated for and one order higher accuracy can be achieved by the presented system calibration method.

**Key words:** optical measurement; optical three-dimensional sensing; modulation measurement profilometry; calibration; height-mapping

### 1 引 言

调制度测量轮廓术是一种采用垂直测量方式的三维面形测量方法, 物体的高度信息被编码在物面上的条纹调制度信息中, 通过寻求调制度最大值的位置解调出物体的高度<sup>[1~4]</sup>。与基于三角测量原理的结构光三维传感方法相比<sup>[5~10]</sup>, 调制度测量轮廓术具有无阴影、遮挡等优点, 也避免了相位展开难题, 可以测量表面有剧烈变化区域的复杂物体(如表

面有不连续区域的台阶状物体或具有深孔的物体), 在三维传感技术中有着重要的地位。本文提出了一种基于调制度测量轮廓术测量系统的标定方法, 测量系统经过标定可以显著地提高测量精度。

### 2 调制度测量轮廓术测量原理

根据调制度获取方式的不同, 调制度测量轮廓术包括两种具体的测量技术, 一是基于相移技术的

\* 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金(10376018)资助课题。

作者简介: 邵双运(1972~), 男, 河南开封人, 讲师, 博士, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: shao\_sy@tom.com。

收稿日期: 2004-06-04; 收到修改稿日期: 2004-07-20

调制度测量轮廓术,另一种是基于傅里叶分析的调制度测量轮廓术。相移技术提供了一种自动精确计算条纹调制度信息的方法,为了获得一帧条纹调制度图,需要对投影光栅进行相移,采集  $L$  帧相移条纹图。基于相移技术的调制度测量轮廓术测量精度高,但测量时间长、数据量大。傅里叶分析方法只需要一帧条纹图就可以得到一帧调制度图,测量速度较快、数据量少,测量精度较高,但是,由于使用傅里叶变换对条纹进行分析,会产生频谱泄漏、频谱混叠和栅栏效应引起的误差,因此基于傅里叶分析的调制度测量轮廓术测量精度较基于相移技术的调制度测量轮廓术低。

调制度测量轮廓术的基本原理如图 1 所示。在测量过程中,沿投影光轴方向依次平移投影系统,使正弦光栅的成像面扫描待测物体的纵深范围。每次平移后采用傅里叶变换方法或者相移方法计算这一扫描面上所有像素点的调制度值。如果总平移次数为  $N$ ,对于同一像素点,就有  $N+1$  个调制度值,用一定的算法求出调制度最大的位置,就可以确定该像素点所对应物点的高度。

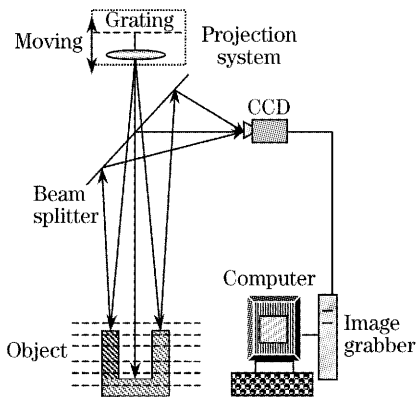


图 1 调制度测量轮廓术的测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram for optical geometry of modulation measurement profilometry

### 3 系统标定

原理上,假定投影和成像光学系统没有像差,且光轴完全重合,则光栅像调制度最大值位于与光轴垂直的同一平面内。在这种理想条件下,被测点调制度分布曲线最大值的位置对应被测表面上该点的高度。实际上,由于光学系统的像差和光轴不完全重合等因素的存在,调制度分布曲线最大值的位置与被测表面上该点的高度之间存在明显的误差。具体表现在两个方面:1) 对于获得的同一像面上不同的像素点,由测量得到的高度值与真实高度之间存在偏差,这种偏

差随着像素点的不同而不同;2) 对于像面上同一个像素点,由测量得到的高度值与真实高度之间存在的偏差随着高度的不同而不同。图 2 给出了两个不同高度位置处像面的误差分布,图 3 为不同像素点的高度误差随高度的分布曲线。如果待测物是一个与光栅平面平行的平面,标定前的测量结果将是一个畸变的曲面,并且畸变程度随着平面高度位置的不同而不同。为了获得物体的真实高度信息,必须对测量系统进行纵向标定,消除系统误差。

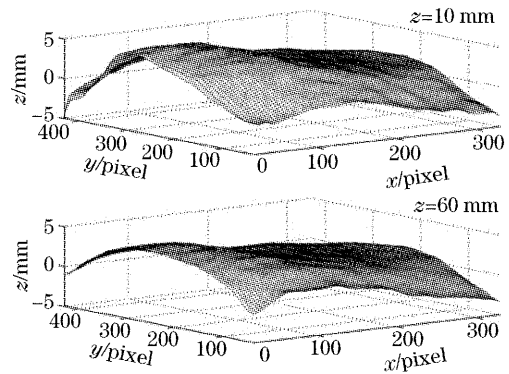


图 2 不同位置处像面各点的高度偏差

Fig. 2 The height error maps of different points

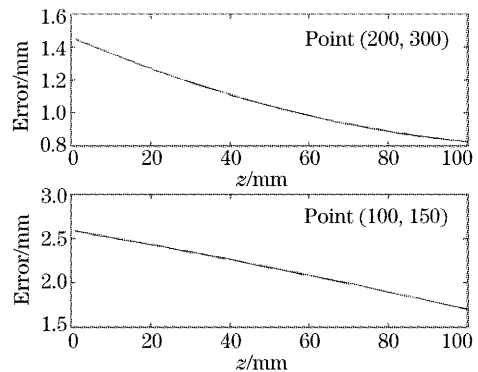


图 3 两个像素点的误差-高度曲线

Fig. 3 The height errors plot of two pixel points

在系统的测量范围内,摄像系统在不同高度位置的横向放大率不同,即 CCD 单位像素对应的空间距离与高度有关系,因此必须进行横向标定,确定不同高度位置处 CCD 单位像素对应的的空间距离。

#### 3.1 纵向标定

调制度测量轮廓术是一种直接获得物面高度信息的测量技术,系统的纵向标定比较简单,只需要将测量高度  $H^M(i, j)$  与实际高度  $H^T(i, j)$  之间建立对应关系即可,这实际上是一种高度的映射,不同的像素点映射关系也不同。在实际测量系统中,测量高度  $H^M(i, j)$  与实际高度  $H^T(i, j)$  之间的映射关系采用二次多项式来表示,即

$$H^T(i, j) = a_0(i, j) + a_1(i, j)H^M(i, j) + a_2(i, j)[H^M(i, j)]^2. \quad (1)$$

纵向标定的目的就是获得每一个像素点二次多项式的三个系数  $a_0, a_1$  和  $a_2$  的值。在实际标定中, 采用高度坐标已知的几个校准平面[第  $(i, j)$  像素点的高度坐标为  $H_n^T(i, j), n = 1, 2, \dots, N; N > 3$ ] 平行放置在系统测量范围的不同位置, 分别对校准平面进行测量, 得到每个像素点高度坐标的测量值  $H_n^M(i, j)$ , 然后对每一个像素点利用(1)式列出至少三个方程, 从中解出三个系数的值, 再将这三个系数作为系统参量存储在计算机中, 建立查找表。计算高度时先从查找表中找出对应像素点的系数, 然后将测量系统获得的标定前的高度值代入(1)式就能得到实际高度分布  $H^T(i, j)$ 。

### 3.2 横向标定

系统的横向标定如图 4 所示<sup>[10,11]</sup>。在标定平板上标出矩形的四个空间坐标已知的顶点  $[A, B, C, D]$ , 矩形长  $AB = l_r$  (mm), 矩形宽  $AC = w_r$  (mm), 调整标定板的位置使矩形的四个边与 CCD 的四个边平行。将标定板移动到系统测量范围的起始位置, 由计算机采样后分别计算出四个顶点的中心位置, 得到  $AB$  和  $AC$  在 CCD 上的距离  $l_{rCCD}$  (pixel) 和  $w_{rCCD}$  (pixel), 再将标定板平移到系统测量范围的终了位置, 测得  $AB$  和  $AC$  在 CCD 上的距离  $l'_{rCCD}$  (pixel) 和  $w'_{rCCD}$  (pixel), 可得系统测量范围的起始和终了位置

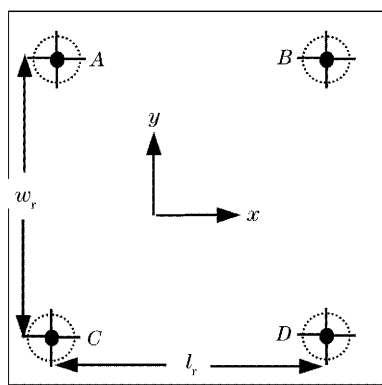


图 4 横向标定

Fig. 4 Lateral calibration

处 CCD 单位像素对应的空间距离, 如(2)式所示。

$$\begin{cases} Rx_{\min} = l_r / (l_{rCCD}), & Ry_{\min} = w_r / (w_{rCCD}), \\ Rx_{\max} = l_r / (l'_{rCCD}), & Ry_{\max} = w_r / (w'_{rCCD}), \end{cases} \quad (2)$$

利用线性插值法由(3)式即可计算出其它高度位置  $h$  处 CCD 单位像素对应的空间距离

$$\begin{cases} Rx(h) = (h/H)(Rx_{\max} - Rx_{\min}), \\ Ry(h) = (h/H)(Ry_{\max} - Ry_{\min}), \end{cases} \quad (3)$$

其中  $H$  为系统的测量范围。

## 4 系统标定与实验

待标定的实验装置为基于傅里叶分析的调制度测量轮廓术测量系统, 如图 1 所示。投影系统由一个白光幻灯机和  $4 \text{ g/mm}$  的正弦光栅组成, 系统调制度焦深约为  $30 \text{ mm}$ , 投影系统搭建在精度为  $0.01 \text{ mm}$  的一维扫描装置上, 测量范围  $100 \text{ mm}$ , 参考平面位置定为  $0 \text{ mm}$ 。图像采集系统为圆刚图像板和 MTV-1881CCD 摄像机。本文只讨论系统的纵向标定, 横向标定不再赘述。

为对系统进行标定, 将一散射平面放置在高精度的一维移动平台上作为标定面, 平台移动方向与 CCD 成像光轴平行, 调整标定面位置使标定面法线与成像光轴平行。在测量范围内移动标定平面 5 次, 间距  $20 \text{ mm}$ , 每移动一次做一次测量, 得到 6 个标定面每一像素点的高度测量数据  $H_n^M(i, j)$  和标准数据  $H_n^T(i, j), (n = 1, 2, \dots, 6)$ , 再利用最小二乘法由(1)式对每一个像素点的 6 个测量高度值用二次曲线进行拟合, 得到每一像素点对应的二次曲线的系数  $a_0, a_1$  和  $a_2$  的值, 最后将各像素点的系数作为已知量建立查找表存入测量系统, 完成纵向标定。完成标定后进行了一系列的实验。

图 5 是在测量范围内四个间距为  $20 \text{ mm}$  的平行平面在标定前和标定后的测量结果。经过标定的结果明显好于未标定的结果, 修正了由于系统误差引起的平面畸变。表 1 给出了具体测量值, 可以看出, 系统经过标定后, 测量精度提高了一个数量级, 精度可以达到  $0.1 \text{ mm}$ 。

表 1 标定前后测量结果比较

Fig. 1 Comparison of the measurement results

	The 1st plane	The 2nd plane	The 3rd plane	The 4th plane
True value /mm	16.00	36.00	56.00	76.00
Mean (before calibration) /mm	17.98	37.59	57.56	77.35
Rms (before calibration) /mm	1.63	1.45	1.34	1.25
Mean (after calibration) /mm	15.97	35.83	56.02	76.00
Rms (after calibration) /mm	0.11	0.10	0.09	0.11

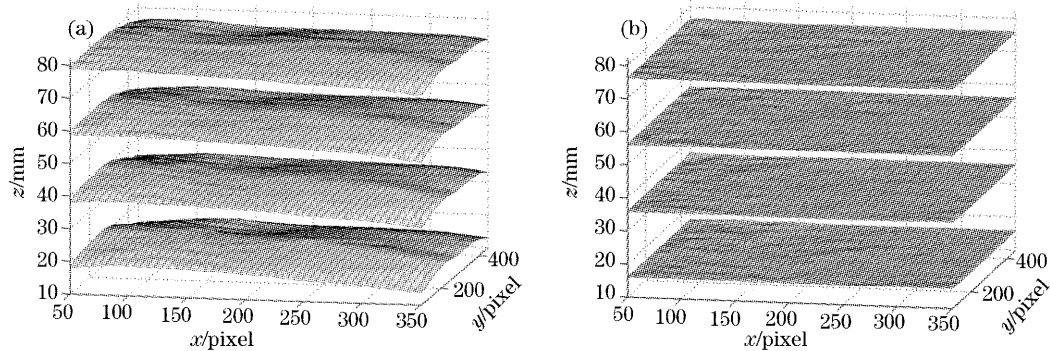


图 5 (a) 标定前测量结果, (b) 标定后测量结果

Fig. 5 Comparison of the height maps (a) before calibration and (b) after calibration

图 6 是一深孔物体的测量结果。圆孔直径 10 mm, 深度为 57 mm, 测量结果的最大绝对误差为 0.21 mm。

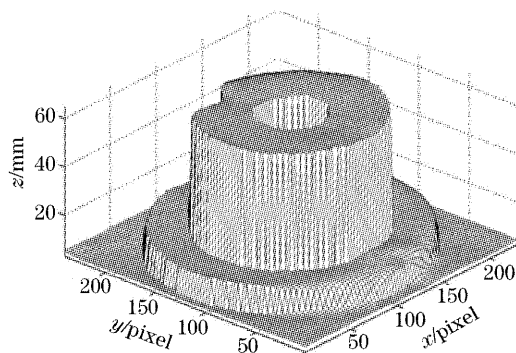


图 6 深孔物体测量结果

Fig. 6 The 3-D plot of an object with a deep hole

## 5 结 论

调制度测量轮廓术是一种采用垂直测量方式的三维面形测量方法, 可以测量表面有剧烈变化区域的复杂物体。本文对基于调制度测量轮廓术测量系统的纵向标定作了深入探讨, 分析了系统误差产生的原因, 提出了系统标定的基本方法。对标准平面和深孔物体的测量表明, 所提出的系统标定方法可以显著提高调制度测量轮廓术的测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 Su Likun, Su Xianyu, Li Wangsong *et al.*. 3-D profilometry based on modulation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1257~1262 (in Chinese)  
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
- 2 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
- 3 Su Xian-Yu, Su Li-Kun, Li Wan-Song. New Fourier transform profilometry based on modulation measurement[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3749**: 438~439
- 4 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Complex object shape measurement using modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1623~1628 (in Chinese)  
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
- 5 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. New method to elinate extension of zero component in FTP[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 740~744 (in Chinese)  
陈文静, 苏显渝, 曹益平等. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 740~744
- 6 Takeda Mitsuo, Mutoh Kazuhiro. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 7 Srinivasan V., Liu H. C., Halioua Maurice. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 185~188
- 8 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fract ion method and its applications to profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518~1522 (in Chinese)  
郝煌栋, 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
- 9 Ren Shouqiang, Fang Qiang. Two-channel phase measuring profilometry used in dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4): 452~455 (in Chinese)  
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
- 10 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796 (in Chinese)  
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
- 11 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. New method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277 (in Chinese)  
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