

文章编号: 0253-2239(2003)03-0272-06

## 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法\*

宋万忠 苏显渝\*\* 曹益平 向立群  
(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

**摘要:** 提出了一种新的用于相位测量轮廓术中的三维坐标校准方法。该方法用一个含有三个虚拟校准平面的标准块代替传统相位测量轮廓术校准方法中使用的标准平面, 每个虚拟校准平面由多个高度相同但空间离散分布的子区域组成, 相应的连续相位恢复是通过一个迭代过程实现的, 同时各个子区域还被用于横向坐标的校准。由于各个虚拟校准平面间高度是垂直变化的, 传统的相位展开不能得到正确的相对位置关系, 基于等效波长概念, 提出了一种准确的虚拟校准平面连续相位间相对位置恢复的办法。此校准方法的特点是: 在校准过程中不需要标准平面的多次精确平移; 仅需要一次测量就可以完成高度和横向坐标的同时校准。文中给出的实验结果说明了该校准方法的有效性和可行性。

**关键词:** 图像处理; 相位-高度映射; 横向坐标校准; 相位测量轮廓术

中图分类号: TH744.9 文献标识码: A

### 1 引 言

光学三维轮廓术在许多领域中已得到广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>, 其中采用相移技术的相位测量轮廓术(PMP)以其采集数据量大、精度高等特点著称<sup>[2~5]</sup>。其基本原理是将一透过率为正弦分布的光栅投影到待测物体表面, 在另一个方向用 CCD 摄像机采集受物体表面面形变化调制后的变形条纹图, 结合相移技术可以准确地计算出每一个测量点的空间相位值。要得到被测物体面形的三维坐标, 需要建立合适的相位-高度映射关系和对横向坐标进行校准。由于实际使用的测量系统大多数都采用了白光发散照明的方式, 参考平面上的连续相位与横坐标之间是非线性函数关系, 从而使连续相位和高度之间的映射关系变得更加复杂, 对此映射关系的逼近是各种高度校准方法研究的重点。此外, 成像光学系统的像差和测量系统结构参量测定的不精确性也会在最终的高度计算中引入系统误差。

现有的相位测量轮廓术校准方法可以分为两类: 显式校准和隐式校准。其中, 显式校准需要事先求出测量系统的一些结构参量, 如: 投影系统中心和成像系统中心的距离  $d$ 、成像系统中心和参考平面的距离  $L$  以及投影系统光轴和成像系统光轴之间

的夹角  $\theta$ <sup>[6]</sup>, 要精确测定这些参量值是十分困难的。在分析高度计算误差对结构参量误差的不同依赖特性的基础上, 文献[7]中提出了一种迭代求解的处理办法。和显示校准方法相反, 隐式校准不需要已知测量系统的结构参量<sup>[8~10]</sup>, 它通过使用一个校准物体来避免测定结构参量和描述成像系统的透镜扭曲效应。这类方法的一个基本假设是: 局部的相位-高度映射可以用一线性变换来描述, 对于光场中不同位置的局部区域, 相应的线性变换的系数是不同的。由于这种校准方法用于描述相位-高度映射的系数数目通常可以多达 524,288 ( $512 \times 512 \times 2$ ) 个甚至更多, 其高度计算精度明显要比显式校准方法高。

隐式校准方法常常需要一个精密的平移工作台<sup>[8~10]</sup>, 此工作台带动标准平面在成像系统的景深范围内纵向移动。为了校准横向坐标, 还需要在标准平面的已知位置上贴上一些基准标记点。本文提出了一种不需要附加的平移工作台和基准标记点的隐式校准方法, 高度和横向坐标的校准在一次测量过程中就可完成。为此, 我们精心设计了一个包含有三个虚拟校准平面的校准块, 这些虚拟校准平面实际上等同于普通隐式校准方法中<sup>[8,10]</sup> 平移后的标准平面。每个虚拟校准平面都是由许多空间离散分布的圆形子区域组成, 为了恢复虚拟平面的连续相位分布, 我们提出了一种迭代相位调整处理办法。由于相邻的虚拟校准平面间的高度是垂直分布的, 迭代相位调整处理后的连续相位场的起始点可能不同于参考面连续相位场的起始点, 这种不同表现为

\* 国家自然科学基金(69827001)资助课题。

\*\* E-mail: xysu@cml.scu.edu.cn

收稿日期: 2002-02-04; 收到修改稿日期: 2002-05-27

校准平面的位置平移,针对这个问题,我们提出了一种基于等效波长概念的相对位置恢复办法。

## 2 相位测量轮廓术方法简介

相位测量轮廓术方法的光路原理如图 1 所示。将正弦光栅像投影到漫反射物体上,用 CCD 摄像机采集变形条纹。在采集过程中伴随着光栅的  $N$  ( $N > 2$ )次相移,每次相移一次后 CCD 采集一帧变形条纹图,一次测量过程需要采集  $N$  帧变形条纹图。在采集到的  $N$  帧变形条纹图的基础上,根据(1)式可以计算出由物体面形变化所引起的空间相位分布

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)}, \quad (1)$$

其中  $I_n$  表示第  $n$  帧变形条纹图。可以看出由(1)式计算得到的相位值是被限制在区间  $(-\pi/2, \pi/2)$  内,采用相位展开算法处理后<sup>[2,3,11]</sup>,可以得到连续的相位分布。

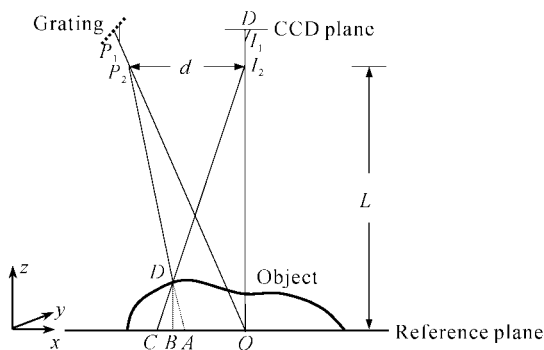


Fig. 1 Optical geometry of PMP method

基于光线追踪原理的隐式校准方法从测量系统空间三角形之间的相似性导出了下面的相位-高度映射公式<sup>[8,10]</sup>:

$$\frac{1}{h(i, j)} = a(i, j) + b(i, j) \frac{1}{p(i, j)}, \quad (2)$$

其中  $h(i, j)$  和  $p(i, j)$  表示 CCD 像面上像素  $(i, j)$  处的连续相位和高度,系数  $a(i, j)$  和  $b(i, j)$  是由校准过程确定的,对于不同的 CCD 像素  $(i, j)$ ,相应的系数  $a(i, j)$  和  $b(i, j)$  是不同的。

对于一个面形变化平滑的待测物体,其连续相位分布可以在截断相位的基础上任意选择一个起始点展开得到。由于截断相位是逐点计算产生的,不同的展开起始点实质上表示不同的条纹级次,相应的相位展开后的连续相位分布之间的区别仅仅是相位值相差  $2\pi$  的整数倍。

## 3 新的三维坐标校准方法

传统的基于光线追踪原理的校准方法中采用了精确平移标准平面的办法来对整个测量范围内的相位分布进行采样<sup>[8,10]</sup>。每个平移位置代表一个不同的校准平面,位于两个校准平面间的相位值通过线性插值得到,校准平面数越多,相位测量精度越高,实际使用中,常用的平面数为 4。为实现高度和横向坐标的一次性校准,我们设计了如图 2 所示的标准块。

在此标准块的底板平面上有十三个规则分布的子物体,其中每个子物体由三个高度和半径均匀变化的圆柱形台阶组成,所有同一高度的台阶面又构成了一个虚拟的平面[如图 2 (b)中的 plane 1, plane 2 和 plane 3]。这三个虚拟平面加上底板平面就组成了建立相位-高度映射所需的四个校准平面。为统一起见,我们把底板平面(plane 0)称为参考平面,其他三个虚拟平面(plane 1, plane 2 和 plane 3)称为校准平面。此外,圆柱形台阶的中心还可以作为基准标记点来校准横向坐标,这样就可以实现高度和横向坐标的一次性校准。从图 2(b)中还可以看出,由于子物体表面高度变化剧烈,当正弦条纹被投影到标准块的表面时,变形条纹可能会发生级次错位,相应的相位展开后得到的连续相位分布会有严重的失真。如何从空间离散分布的子区域恢复整个校准平面的连续相位,以及校准平面和参考平面的连续相位间准确的相对位置恢复是实现一次性校准所必须要解决的两个问题。

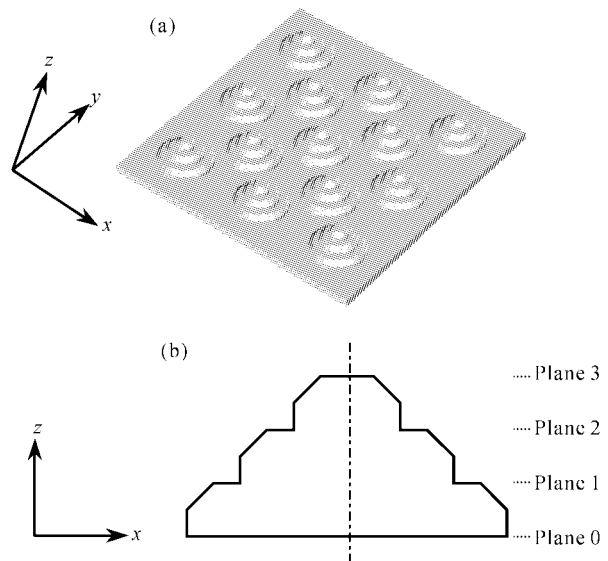


Fig. 2 Calibration gauge. (a) Shaded plot; (b) Section plot of a target

### 3.1 截断相位子区域分割

为了恢复每个校准平面的连续相位,我们需要将构成同一个校准平面的所有子区域从整个截断相位图中分割出来。用于分割子区域的圆形台阶边界是从 CCD 采集到的校准块的强度图像中提取出来的。如图 2 (b)所示,在相邻的台阶之间有  $45^\circ$  的斜面,这样设计有两个好处:其一,可以减少投影系统的阴影;其二,增强子物体表面反射率分布的变化。经过成像光学系统后,圆形边界变成了椭圆形边界,我们采用一种亚像素精度的边界检测算法<sup>[12,13]</sup>进行椭圆边界提取,对检测得到的边界像素采用最小二乘椭圆拟合可以得到相应的椭圆参量<sup>[14]</sup>。根据检测到的椭圆参量,可以将截断相位分割为多个独立的子区域,分割后的结果如图 3(a)所示,图中的白色区域表示分割后被去掉的部分。

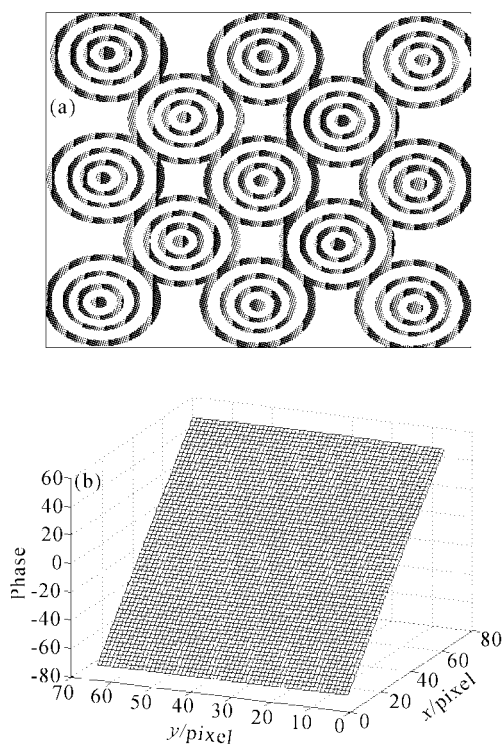


Fig. 3 Phase recovery of virtual calibration plane. (a) Segmentation of wrapped phase; (b) Fitted phase surface of plane 3 (after  $16 \times 16$  sub-sampling)

### 3.2 校准平面的连续相位恢复

用上面的方法分割得到的各个截断相位子区域可以用普通的相位展开算法进行处理,不同的子区域选择的展开起始点是不同的。对于所有位于同一高度平面的子区域(每个平面有 13 个)来说,要从它们各自的局部连续相位恢复出整个校准平面的连续相位分布就必须要将每个子区域的相位展开起始点

统一起来。而每个子区域的连续相位分布是准确的,这种统一过程实际上只需要对某些子区域的局部连续相位加上或减去一个  $2\pi$  的整数倍的相位增量就可完成,每个子区域对应的相位增量可因其所属的子物体的位置不同而不一样。接下来,如何准确地确定出每个子区域的相位增量就成为一个重要的问题。为此,我们提出了下面的分步处理过程:

1) 确定初始的相位增量。借助于傅里叶分析,我们可以计算出投影到校准块表面的条纹数目。而标准块的几何尺寸和相邻子物体中心距离是已知的,这样我们可以计算出每个子物体中心位置的相对条纹级次,此级次乘上  $2\pi$  就作为各个子区域的初始相位增量。

2) 相位分布的曲面拟合。对于每个校准平面来说,从标准块的测量结果中只能得到部分子区域的局部连续相位。对于其它未测量区域的连续相位,我们采用曲面拟合的方法得到。在我们的实验中,采用了下面的多项式曲面来表示校准平面的连续相位分布

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x^i y^j, \quad (3)$$

系数  $a_{ij}$  可以用最小二乘法计算得到,对于不同的校准平面,多项式曲面的系数是不同的。

3) 最优相位增量求解。给定初始的相位增量和相位分布的拟合曲面表达式,求出各个子区域准确的相位增量是一个最优化问题。可采用穷尽搜索的办法求出最优相位增量,但耗费时间长(共有  $3^{13}$  种可能)。仔细分析后,可以发现:(i)每个子区域只有一个唯一的相位增量,而且所有优化变量只能在三种状态( $+2\pi$ , 不变,  $-2\pi$ )之间变化;(ii)我们已经计算出了很接近全局最优解(相差  $\pm 2\pi$ )的初始值。所以这个优化问题求解的难度已经大大降低。

在我们的实验中发现,只需要 3~10 次迭代就可以找到最优的相位增量。图 3(b)给出了用上面提出的方法对第三个校准平面(plane 3)的连续相位处理后生成的拟合曲面,相应的相位标准差为  $\sigma_{\min} = 0.09$ 。

对三个虚拟校准平面都采用同样的方法处理后,我们得到了连续的相位分布。但它们的相位展开起始点还没有和参考面的相位展开起始点统一起来,这时还需要对连续相位曲面的相对位置进行调整。对于参考面和校准平面上具有相同横向坐标的两点 A 和 B 来说,它们之间的连续相位值可表示为  $p_A = n_A(2\pi) + r_A$  和  $p_B = n_B(2\pi) + r_B$ ,其中的小数

部分  $r_A, r_B$  是由(1)式计算产生的, 整数  $n_A, n_B$  是通过相位展开算法确定的。我们要恢复校准平面连续相位分布的正确位置, 只需要求出正确的  $n_B$  即可完成。对于本文使用的标准块来说, 因为圆形台阶和底板平面以及圆形台阶之间的高度是垂直变化的, 故沿系统指定的起始展开点生成的连续相位图只有底板平面部分是可靠的。在相位测量轮廓术中, 用等效波长来限制相邻两点高度有效变化量<sup>[2]</sup>。当相邻两点的高度变化量超过等效波长时, 正确的展开路径中不能包含这两点的连线, 当高度变化量为一个等效波长时, 由此高度变化调制的变形条纹相位值恰好相差  $2\pi$ 。受此启发, 我们通过下面的公式来计算出一个整数变量

$$n_i = \left[ \frac{p_i(x_0, y_0) - p_0(x_0, y_0) - \frac{h_i}{\lambda_0}}{2\pi} \right], \quad (4)$$

其中  $[\dots]$  表示取最近的整数,  $i = 1, 2, 3$ ,  $(x_0, y_0)$  是参考面  $p_0$  的相位展开起始点,  $p_i$  代表第  $i$  个相位曲面,  $h_i$  为第  $i$  个校准平面的高度,  $\lambda_0$  为等效波长。计算出  $n_i$  后, 用  $p_i - 2n_i\pi$  处理后, 就可以将第  $i$  个相位曲面调整到正确的位置。由于只需要计算出一个整数  $n_i$  即可, 等效波长  $\lambda_0$  的粗略估计不会影响最终的相位曲面间的相对位置。

经最优相位增量求解和相对位置调整后, 三个校准平面的连续相位分布和相对位置都得到了准确恢复。对参考面也用(3)式作最小二乘拟合后, 就可得到传统隐式校准方法所需的四个相位曲面数据<sup>[6]</sup>。

### 3.3 高度和横向坐标校准

我们建立相位-高度映射关系所使用的方法和文献[6, 8]中的方法相同。但在实际的相位测量轮廓术系统中, 投影和成像系统都是尽量聚焦到参考面附近, 被测物体表面高度越高, 测量点和参考面之间的距离越大, 离焦现象越明显。此外, 一般测量系统中使用的投影系统和成像系统不可避免地存在像差和畸变, 所以, 将  $1/h$  和  $1/p$  之间的函数关系作为非线性处理更为合理, 我们采用下面的公式来表示相位和高度之间的非线性函数关系:

$$\frac{1}{h(i, j)} = a(i, j) + b(i, j) \frac{1}{p(i, j)} + c(i, j) \left[ \frac{1}{p(i, j)} \right]^2, \quad (5)$$

大量的测量结果表明二次拟合能明显提高系统的测量精度。

在现有的关于相位测量轮廓术的文献中, 很少论及横向坐标校准的方法。从图4中可以看出, CCD像面上像素  $D$  同时对应着参考面 plane 0 上的

A点和校准平面 plane 3 上的 B点。如果采用一个固定的缩放比例来校准横向坐标, 就会出现 A点和 B点测量后的横坐标相同的现象, 我们把这种现象称为横向坐标扭曲。这种扭曲是由于  $x$  和  $y$  方向上的坐标发生偏移后造成的, 而且偏移量的大小随该点高度的不同而不同。直接计算偏移量的方法<sup>[6]</sup> 需要求出该点的成像光线和参考面之间的角度, 而且还需要 CCD 像面和参考面保持平行。

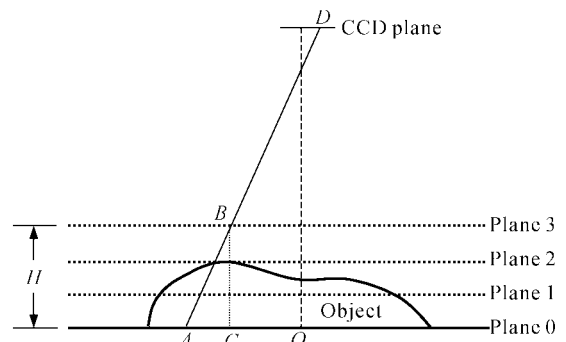


Fig. 4 Distortion of lateral coordinates caused by height variation

我们提出的横向坐标校准方法有一个基本假设: 同一高度平面上不同位置的点, 它们相对于成像中心点在  $x$  方向上的缩放比例是相同的, 在  $y$  方向也是如此。如果记参考面上 (plane 0) 的缩放比例为  $R_{x0}$  和  $R_{y0}$ , 最后一个校准平面 (plane 3) 上的缩放比例为  $R_{x3}$  和  $R_{y3}$ , 用线性插值, 我们可以求出高度测量范围内任意高度平面的缩放比例

$$R_x = R_{x0} - \frac{(R_{x0} - R_{x3})h}{H}, \quad (6)$$

$$R_y = R_{y0} - \frac{(R_{y0} - R_{y3})h}{H}, \quad (7)$$

其中  $H$  为有效的高度测量范围,  $h$  为此范围内的任意高度值。把在子区域分割中检测到的椭圆圆心作为基准标记点, 计算出这些基准标记点在 CCD 像面上的距离  $d$ , 而基准点在标准块底板平面上的距离  $D$  是已知的, 这样  $R_{x0}$ 、 $R_{y0}$ 、 $R_{x3}$  和  $R_{y3}$  可以通过  $R = D/d$  计算得到。对 CCD 像面上任意一点  $(x, y)$ , 如果已计算出其高度为  $h(x, y)$ , 则其横向坐标可由下列两式计算得到

$$X(x, y) = (x - x_c)R_x, \quad (8)$$

$$Y(x, y) = (y - y_c)R_y, \quad (9)$$

其中  $x_c, y_c$  是 CCD 像面中心点像素坐标。

## 4 实验结果与分析

为了验证本文提出的校准方法的有效性, 我们

分别对一个平面和真实物体进行了测量。测量系统所使用的设备是实验室开发的三维数字化仪(3DS-200),包括 CCD 相机、图像采集板和计算机。

实验一,为检验校准方法的测量精度,用一个倾斜平面作为测试物体。将相位展开后得到的连续相位减去参考面 plane 0 的相位并经过曲面拟合后,代入(5)式计算出斜面的高度分布,然后用最小二乘拟合出一个平面。我们把实际测量值和拟合值之间误

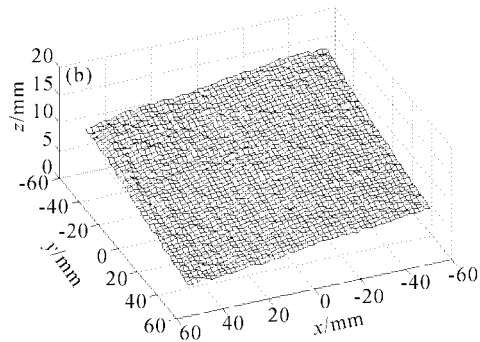
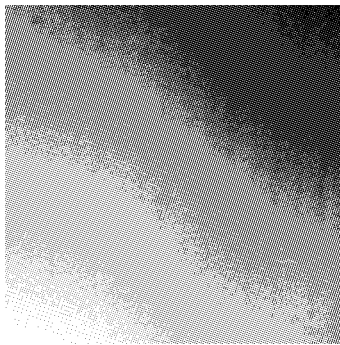


Fig. 5 Measured result of a inclined plane. (a) Gray image of height data; (b) 3D profile

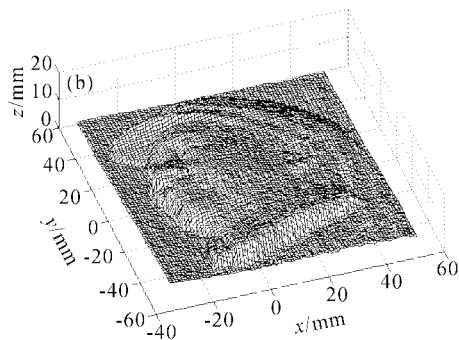


Fig. 6 Measured result of a badge of Mao Zedong. (a) Gray image of height data; (b) 3D profile

差的标准差作为衡量高度测量精度的指标,这样计算出标准差约为 0.26mm,约为等效波长的 1.13%。相应的测量结果如图 5 所示。

从这两个实验结果中可以看出校准方法的有效性。由于这种方法用一个多项式曲面来描述一平面的连续相位分布,不可避免地会降低测量精度。从实验一的结果可以看出,这种校准方法仍然达到了较高的测量精度,考虑到横向坐标校准的方便性,我们认为这种校准方法在实际使用中是可行的。

从原理上看,增加校准平面数对提高测量精度有利,但对常用的采用了机械相移的相位测量轮廓术测量系统来说,已有的研究和应用表明<sup>[15]</sup>:当对高度倒数和相位倒数间的函数关系用(5)式的二次曲线拟合时,校准平面数的增加对测量精度的影响和相移精度以及投影条纹的正弦性对测量精度的影响相比,后两者的作用更大。所以,在我们的实验中只采用了四个校准平面。我们用一个多项式曲面来描述校准平面的连续相位分布是基于当测量视场和

高度范围不是太大(400 mm×400 mm×100 mm)时,校准平面的相位曲面可以用低次多项式曲面来近似描述,这时每个平面用十三个子区域来近似描述已经足够。但对有更大测量视场的应用来说,随着相位曲面复杂性的增加,需要增加子物体的数目才能更好地描述高次相位曲面,但对这类应用来说,采用多次小视场测量后再进行数据拼接是更为有效的一种办法。

实验二,图 6 中给出一个毛泽东像章测量后的结果,其中图 6(a)是高度分布数据灰度化的结果。将连续相位代入(5)式计算出高度数据后,再由(6)式~(9)式计算出横向坐标,图 6(b)中显示的是抽样后的三维坐标网格显示。

高度范围不是太大(400 mm×400 mm×100 mm)时,校准平面的相位曲面可以用低次多项式曲面来近似描述,这时每个平面用十三个子区域来近似描述已经足够。但对有更大测量视场的应用来说,随着相位曲面复杂性的增加,需要增加子物体的数目才能更好地描述高次相位曲面,但对这类应用来说,采用多次小视场测量后再进行数据拼接是更为有效的一种办法。

**结论** 我们提出了一种用于相位测量轮廓术三维坐标校准的新方法,具有重要的实用价值。相位-高度映射是通过恢复三个虚拟校准平面的连续相位分布来实现的,与传统的校准方法的不同之处在于此方法不需要对标准物体进行平移。横向坐标的校准是利用了校准物体上圆形台阶的中心作为基准标记点

来实现的,这些圆形台阶同时又是虚拟校准平面的一部分。针对校准物体各虚拟校准平面的连续相位恢复,本文提出了两种有效的相位调整办法。文中的实验结果说明了这种方法的有效性和可行性。

### 参 考 文 献

- 1 Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1):10~22
- 2 Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18):3105~3108
- 3 Su X Y, Bally G V, Vukicicvic D. Phase-stepping grating profilometry: Utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1):141~150
- 4 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1999, **19**(11):1518~1522 (in Chinese)
- 5 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yusha. A novel phase measuring profilometry. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1995, **15**(7):898~901 (in Chinese)
- 6 Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry: A phase mapping approach. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2):185~188
- 7 Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: Analysis and compensation of the systematic errors. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31):6565~6573
- 8 Zhou W S, Su X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(1):89~94
- 9 Schonfeld H, Hausler G, Karbacher S. Reverse engineering using optical 3D sensors. *Proc. SPIE*, 1998, **3313**:115~125
- 10 Asundi A, Zhou W S. Unified calibration technique and its applications in optical triangulation profilometry. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16):3556~3561
- 11 Xue L, Su X Y. Phase-unwrapping algorithm based on frequency analysis for measurement of a complex object by the phase-measuring profilometry method. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(8):1207~1215
- 12 Canny J F. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6):679~698
- 13 Devernay F. A non-maxima suppression method for edge detection with sub-pixel accuracy. *Technical Report 2724*, INRIA (Nov. 1995). <http://www.inria.fr/index.cn.html>
- 14 Fitzgibbon A W, Pilu M, Fisher R B. Direct least-squares fitting of ellipses. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(5):476~480
- 15 Li Wansong. *Applied Study on Phase Measuring Profilometry [相位测量轮廓术(PMP)应用研究]*. [Ph D Thesis]. Chengdu: School of Electronic Information, Sichuan University, 1999 (in Chinese)

## A New Method of Three-Dimensional Coordinates Calibration in Phase Measuring Profilometry

Song Wanzhong Su Xianyu Cao Yiping Xiang Liquan

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

(Received 4 February 2002; revised 27 May 2002)

**Abstract:** In this method, traditional standard plane in phase-measuring profilometry (PMP) was replaced by a calibration gauge containing three virtual calibration planes and a reference plane. The application of calibration gauge avoided precise translation of standard plane during calibration procedure. In addition, circular steps were designed to calibrate lateral coordinates automatically. With this calibration gauge, 3D coordinates could be calibrated through only one measurement. To recover the continuous phase distribution of all steps with the same height, an iterative procedure was proposed. Based on the known geometric parameters of calibration gauge and approximate estimation of equivalent wavelength, the fitted phase surfaces of three virtual calibration planes were adjusted to their ideal positions relative to the reference plane. Experiment results showed that this method was suitable for portable measurement systems using PMP.

**Key words:** image processing; phase-height mapping; lateral coordinates calibration; phase-measuring profilometry