

# 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型

安 冬<sup>1,2</sup> 盖绍彦<sup>1,2</sup> 达飞鹏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>东南大学自动化学院, 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)  
<sup>2</sup>华中科技大学“数字制造装备与技术”国家重点实验室, 湖北, 武汉 430074)

**摘要** 提出一种新的光栅条纹投影轮廓测量术系统模型, 新模型不要求测量系统满足光心连线平行于参考面、成像系统光轴垂直于参考面以及两光轴相交于参考面上等约束条件, 只需投射至参考平面的正弦光栅条纹之间相互平行, 简化了系统校准过程, 有利于现场测量。得到的高度相位映射关系式中, 待标定的系数与像点的坐标无关, 不需要对每一个像点进行采样, 能够减少系统标定所需的时间。实验表明: 所提方法使投影装置和成像系统的位置校准过程简单, 提高了系统标定的速度, 且具有较高的测量精度, 能够测量复杂面形的物体, 增强了光栅投影三维测量系统的实用性。

**关键词** 测量; 三维轮廓测量; 条纹投影轮廓术; 高度相位映射; 标定

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0512004

## A New Model of Three-Dimensional Shape Measurement System Based on Fringe Projection

An Dong<sup>1,2</sup> Gai Shaoyan<sup>1,2</sup> Da Feipeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** A novel model of three-dimensional (3D) shape measurement in fringe projection profilometry (FPP) system is proposed, which doesn't need to meet the constraints of the link of the two optical centers being parallel to the reference plane, the axis of imaging system being perpendicular to the reference plane and the two axes intersecting on the reference plane. This new model just requires the sinusoidal fringes projected on the reference plane are parallel to each other, so it is easy to implement the adjustment of the FPP system. The undetermined coefficients of the achieved phase-to-height relationship are irrelevant to the coordinates of imaging points. The coefficients can be obtained by means of least square method by sampling a number of points, not every one, so the calibration time is reduced a lot. The experiments demonstrate that the adjustment of the FPP system is simple, so the speed of the system calibration is improved greatly. Moreover, the accuracy of this new 3D measurement system is high, and it can measure the objects with complex surface shapes. Therefore, the novel method enhances the practicability of FPP system.

**Key words** measurement; three-dimensional shape measurement; fringe projection profilometry; phase-to-height relationship; calibration

**OCIS codes** 120.5050; 120.6650; 100.2650; 100.5088

## 1 引 言

光栅投影三维测量方法, 又称光栅投影轮廓测量术(FPP), 其原理为把光栅投影到被测物体表面,

通过对由于受物体高度调制而变形的光栅条纹进行处理, 得到代表物体高度信息的相位大小, 再经过系统标定就可以获得物体的三维轮廓信息<sup>[1-3]</sup>。它具有

收稿日期: 2013-12-13; 收到修改稿日期: 2014-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(61107001, 51175081)、教育部博士点基金(20130092110027)、江苏省文物科研课题、华中科技大学制造装备与技术国家重点实验室资助项目(DMETKF2012002)

作者简介: 安 冬(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维测量及图像处理等方面的研究。E-mail: andong133@163.com

导师简介: 盖绍彦(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事三维测量及三维人脸识别等方面的研究。

E-mail: qxxymm@163.com(通信联系人)

有非接触式、测量精度高、易实现自动测量等优点,已被广泛应用于光学三维测量的多个领域<sup>[4-7]</sup>。

传统的三维测量系统在建模时,对系统的位置关系要求严格,如要求投影系统和成像系统的光心连线平行于参考面,成像系统(或投影系统)的光轴垂直于参考面,并且保证两条光轴相交于参考面上等<sup>[8]</sup>。由于光心和光轴是假想的空间点和直线,上述约束条件非常难以实现,限制了光栅投影测量技术在实际中的应用。

近年来,大量学者对传统系统模型进行了研究,放宽了对测量系统的位置关系要求。如 Zhang 等<sup>[9-10]</sup>提出的方法要求投影系统光轴垂直于参考面并且成像系统与投影系统的光轴相交于参考面上,并需精确测量投影系统的光心到参考面的距离,成像系统的光心到原点的距离等,这些参数均难以精确测量;许庆红等<sup>[11]</sup>的方法不需满足平行和垂直的要求,但仍要求投影系统光轴与成像系统光轴相交于参考面,以及精确测量两个光心之间的距离等系统参数;Wen 等<sup>[12]</sup>提出的相位-高度模型对系统的位置关系没有严格要求,也不需要精确测量系统参数,但所得到的高度相位映射关系式中,待标定系数与点的空间坐标有关,因此要求对每一个采样点进行计算来求公式中的系数,计算量很大;肖焱山等<sup>[13]</sup>提出的相位高度模型不需要测量系统参数,只需少量采样点就能拟合出高度相位映射关系式中的系数,但对测量系统的位置关系有严格的要求:投影仪投射面和相机成像面的纵轴相互平行,并且平行于参考平面,此外还要求两条光轴的交点位于参考平面上,因此很难对系统进行精确的校准。

本文提出了一种新的光栅投影三维测量系统模型,该方法只要求投射至参考平面的正弦光栅条纹之间相互平行,使得系统校准过程更加简便,有利于现场测量,提高了三维测量系统的实用性。由新模型得到的高度相位映射关系式中,待标定的系数与像点的坐标无关,因此可以利用少量采样点进行计算,节约了系统标定的时间。实验结果表明了该方法的有效性。

## 2 三维测量系统的标定

### 2.1 测量系统模型

测量系统主要由数字光投影装置(DLP)和成像系统(CCD 相机)组成。建立测量系统模型的原理图,如图 1 所示。

图 1 中投影装置光轴  $PO$  交参考面于点  $O$ ,以  $O$

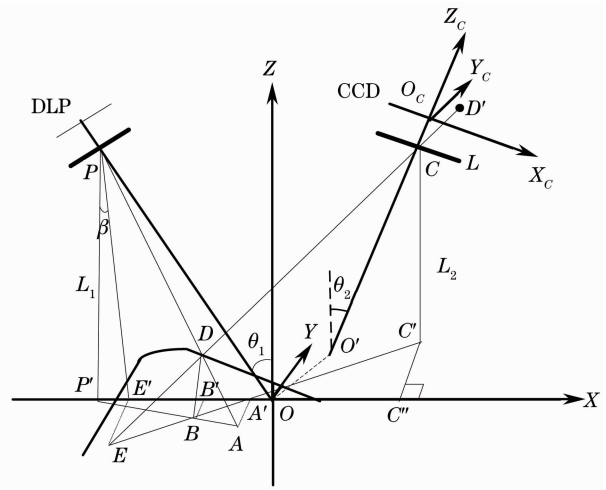


图 1 测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of measuring method

点为原点建立世界坐标系  $O-XYZ$ ,其中  $Y$  轴平行于投影面上光栅条纹方向, $Z$  轴垂直于参考面。 $P$  为投影装置镜头光心,在参考面上的投影点为  $P'$ , $\overline{PP'} = L_1$ 。CCD 光轴  $CO'$  交参考面于点  $O'$ ,交 CCD 成像面于  $O_c$  点,即透镜焦点,以  $O_c$  为原点建立 CCD 坐标系  $O_c-X_cY_cZ_c$ ,其中  $X_cO_cY_c$  为 CCD 的成像平面。 $C$  为 CCD 透镜中心,在参考面上的投影点为  $C'$ , $\overline{CC'} = L_2$ , $C''$  为  $C'$  在  $X$  轴上的投影点。光轴  $PO$  和  $CO'$  与  $Z$  轴的夹角分别为  $\theta_1, \theta_2$ 。

对物体表面任意一点  $D$ ,其在参考平面上的投影点为  $B$ ,设  $D$  点的高度为  $h$ ,即  $\overline{DB} = h$ 。点  $E$  为直线  $CD$  与参考平面的交点,则点  $E$  和点  $D$  成像于 CCD 成像面上同一点,记为  $D'$ 。 $A$  点为直线  $PD$  与参考平面的交点。点  $A', B', E'$  分别为点  $A, B, E$  在  $X$  轴上的投影。设  $E$  点在世界坐标系下的坐标为  $(x, y, 0)$ 。

由相似三角形  $\triangle ABD \sim \triangle AP'P$  和  $\triangle P'BB' \sim \triangle P'AA'$ , 有

$$\begin{cases} \frac{\overline{AB}}{\overline{AP'}} = \frac{h}{L_1} \\ \frac{\overline{AB}}{\overline{AP'}} = \frac{x_A - x_B}{x_A - x_P} \end{cases}, \quad (1)$$

同理,可得

$$\begin{cases} \frac{\overline{EB}}{\overline{EC'}} = \frac{h}{L_2} \\ \frac{\overline{EB}}{\overline{EC'}} = \frac{-x + x_B}{-x + x_C} \end{cases}. \quad (2)$$

联立(1)、(2)式,可得物点高度  $h$ :

$$h = \frac{x_A - x}{\frac{x_A - x_P}{L_1} + \frac{x_C - x}{L_2}}. \quad (3)$$

由文献[14]可知参考平面上某点的展开相位与其世界坐标  $x$  之间的关系为

$$\phi(x) = \phi_0 + \frac{2\pi x}{p_0(\cos\theta_1 + \sin\theta_1 \tan\beta)}, \quad (4)$$

式中  $\phi_0$  为  $O$  点的展开相位值,  $p_0$  为过  $O$  点且与光轴垂直的平面上的光栅条纹间距,  $\beta$  为直线  $PE'$  与  $Z$  轴的夹角,  $\tan\beta = \frac{L_1 \tan\theta_1 + x}{L_1}$ 。因此, 可得  $E$  点和  $D$  点的展开相位表达式分别为

$$\phi_E = \phi_0 + \frac{2\pi x}{p_0 \left[ \cos\theta_1 + \sin\theta_1 \left( \tan\theta_1 + \frac{x}{L_1} \right) \right]}, \quad (5)$$

$$\phi_D = \phi_A = \phi_0 + \frac{2\pi x_A}{p_0 \left[ \cos\theta_1 + \sin\theta_1 \left( \tan\theta_1 + \frac{x_A}{L_1} \right) \right]}. \quad (6)$$

令  $\Delta\phi = \phi_E - \phi_D$ , 表示对应于 CCD 成像面上同一成像点的两个展开相位值之差。由(3)、(5)、(6)式可得

$$h = \frac{a_1 \Delta\phi + a_2 x \Delta\phi + a_3 x^2 \Delta\phi}{a_4 + a_5 x + a_6 \Delta\phi + a_7 x \Delta\phi + a_8 x^2 \Delta\phi}, \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} a_1 = -L_1^3 L_2 p_0 \\ a_2 = -2L_1^2 L_2 p_0 \sin\theta_1 \cos\theta_1 \\ a_3 = -L_1 L_2 p_0 \sin^2\theta_1 \cos^2\theta_1 \\ a_4 = 2\pi L_1^2 (L_1 x_C - L_2 x_P) \cos\theta_1 \\ a_5 = 2\pi L_1^2 (L_2 - L_1) \cos\theta_1 \\ a_6 = L_1 p_0 (L_1 x_C - L_2 x_P) \sin\theta_1 \cos\theta_1 - L_1^2 L_2 p_0 \\ a_7 = p_0 (L_1 x_C - L_2 x_P) \sin^2\theta_1 \cos^2\theta_1 - L_1 (L_1 + L_2) p_0 \sin\theta_1 \cos\theta_1 \\ a_8 = -L_1 p_0 \sin^2\theta_1 \cos^2\theta_1 \end{cases}. \quad (8)$$

由(7)式可知, 物点  $D$  的高度  $h$  只与参考平面上  $E$  点在世界坐标系下的  $X$  轴坐标及两点的相位差值有关。在实际测量中, 所能直接获取的数据为图像的二维像素坐标, 因此需要建立世界坐标系到像素坐标系的转换关系。

## 2.2 高度相位映射关系

如图 1 所示, 设点  $E$  在世界坐标系下的坐标为  $(x, y, 0)$ , 在 CCD 坐标系下的坐标为  $(X_E, Y_E, Z_E)$ , 透镜焦点  $O_C$  在世界坐标系下的坐标为  $(x_{O_C}, y_{O_C}, z_{O_C})$ , 则有如下关系式成立:

$$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x - x_{O_C} \\ y - y_{O_C} \\ 0 - z_{O_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_{O_C} \\ y - y_{O_C} \\ 0 - z_{O_C} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{R}$  为由世界坐标系到 CCD 坐标系的旋转矩阵。

参考面上点  $E$  和物点  $D$  的成像点为  $D'$ , 设  $D'$  点在 CCD 坐标系下的坐标为  $(X_{D'}, Y_{D'}, Z_{D'})$ , 透镜焦距为  $f$ , 则透镜中心点  $C$  在 CCD 坐标系下的坐标为  $(0, 0, -f)$ 。由点  $E, C, D'$  共线, 可得在 CCD 坐标系下, 有

$$\frac{X_{D'} - 0}{X_E - 0} = \frac{Y_{D'} - 0}{Y_E - 0} = \frac{Z_{D'} + f}{Z_E + f}, \quad (10)$$

式中点  $D'$  位于  $X_C O_C Y_C$  平面上, 则有  $Z_{D'} = 0$ 。因此,  $X_{D'}$  和  $Y_{D'}$  可表示为

$$\begin{cases} X_{D'} = \frac{X_E f}{Z_E + f} \\ Y_{D'} = \frac{Y_E f}{Z_E + f} \end{cases}. \quad (11)$$

联立(9)、(11)式, 消去  $X_E, Y_E$  和  $Z_E$ , 可得

$$x = \frac{d_1 + e_1 X_{D'} + f_1 Y_{D'}}{d_2 + e_2 X_{D'} + f_2 Y_{D'}}, \quad (12)$$

式中

$$\begin{cases} d_1 = (r_{12} r_{21} - r_{11} r_{22}) x_{O_C} f + (r_{12} r_{23} - r_{13} r_{22}) z_{O_C} f \\ e_1 = (r_{22} r_{31} - r_{21} r_{32}) x_{O_C} + (r_{22} r_{33} - r_{23} r_{32}) z_{O_C} - r_{22} f \\ f_1 = (r_{11} r_{32} - r_{12} r_{31}) x_{O_C} + (r_{13} r_{32} - r_{12} r_{33}) z_{O_C} + r_{11} f \\ d_2 = (r_{12} r_{21} - r_{11} r_{22}) f \\ e_2 = r_{22} r_{31} - r_{21} r_{32} \\ f_2 = r_{11} r_{32} - r_{12} r_{31} \end{cases}. \quad (13)$$

将(12)式代入(7)式, 得到 CCD 坐标系下高度相位的映射关系为

$$h(X_{D'}, Y_{D'}) = (b_1 + b_2 X_{D'} + b_3 Y_{D'} + b_4 X_{D'} Y_{D'} + b_5 X_{D'}^2 + b_6 Y_{D'}^2) \Delta\phi(X_{D'}, Y_{D'}) / [b_7 + b_8 X_{D'} + b_9 Y_{D'} + b_{10} X_{D'} Y_{D'} + b_{11} X_{D'}^2 + b_{12} Y_{D'}^2 + (b_{13} + b_{14} X_{D'} + b_{15} Y_{D'} + b_{16} X_{D'} Y_{D'} + b_{17} X_{D'}^2 + b_{18} Y_{D'}^2) \Delta\phi(X_{D'}, Y_{D'})], \quad (14)$$

式中  $b_1 \sim b_{18}$  为  $a_1 \sim a_8$  和  $d_1, e_1, f_1, d_2, e_2, f_2$  的组合关系式。由(8)式和(13)式可知,  $a_1 \sim a_8$  和  $d_1, e_1, f_1, d_2, e_2, f_2$  只与  $L_1, L_2, p_0, \theta_1, x_C, x_P, R, x_{O_C}, z_{O_C}, f$  等系统结构参数有关, 当测量系统固定时, 系统参数均为常数。因此,  $a_1 \sim a_8, d_1, e_1, f_1, d_2, e_2, f_2$  为常数, 即  $b_1 \sim b_{18}$  为常系数。

考虑 CCD 成像的针孔模型<sup>[15-16]</sup>, 由于  $X_C O_C Y_C$  平面即为 CCD 成像平面, 因此从 CCD 坐标系  $O_C-X_C Y_C Z_C$  到图像像素坐标系的转换关系满足:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 & u_0 \\ 0 & k & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中  $k$  为像点的物理坐标到像素坐标的比例系数,  $u_0, v_0$  为 CCD 光轴与像平面交点(即  $O_C$  点)的像素坐标。

由(14)、(15)式可得在图像像素坐标系下, 高度相位的映射关系:

$$h(u, v) = (C_1 + C_2 u + C_3 v + C_4 uv + C_5 u^2 + C_6 v^2) \Delta\phi(u, v) / [C_7 + C_8 u + C_9 v + C_{10} uv + C_{11} u^2 + C_{12} v^2 + (C_{13} + C_{14} u + C_{15} v + C_{16} uv + C_{17} u^2 + C_{18} v^2) \Delta\phi(u, v)], \quad (16)$$

式中  $(u, v)$  为成像点的像素坐标,  $\Delta\phi(u, v)$  为 CCD 成像面上参考平面的展开相位值与物体的展开相位值之差。  $C_1 \sim C_{18}$  只与测量系统的结构参数和 CCD 相机的内部参数有关, 为定常系数。

### 2.3 系统标定方法

(16)式中的系数  $C_1 \sim C_{18}$  与测量系统的结构参数有关, 要实现这些参数的精确测量是很困难的。为了保证系统测量的精度及测量操作的简单可行

性, 本文采用隐式标定法<sup>[17]</sup>计算  $C_1 \sim C_{18}$ 。

由于最小二乘法可以采用大量数据来精确拟合公式中的系数, 因此可以通过最小二乘算法, 利用高度值已知但不相同的至少两个标准块来拟合常系数  $C_1 \sim C_{18}$ 。在 CCD 拍摄得到的图像上进行采样, 设采样点的总个数为  $m (m \geq 18)$ , 则采样点的最小二乘偏差为

$$S = \sum_{i=1}^m \{ (C_1 + C_2 u_i + C_3 v_i + C_4 u_i v_i + C_5 u_i^2 + C_6 v_i^2) \Delta\phi_i - [ (C_7 + C_8 u_i + C_9 v_i + C_{10} u_i v_i + C_{11} u_i^2 + C_{12} v_i^2) + (C_{13} + C_{14} u_i + C_{15} v_i + C_{16} u_i v_i + C_{17} u_i^2 + C_{18} v_i^2) \Delta\phi_i ] h_i \}^2, \quad (17)$$

式中  $(u_i, v_i)$  表示第  $i$  个采样点的像素坐标,  $\Delta\phi_i = \phi_{iE} - \phi_{iD}$ ,  $\phi_{iE}$  表示第  $i$  个采样点所对应的参考平面上点的展开相位值,  $\phi_{iD}$  表示第  $i$  个采样点所对应的物体上点的展开相位值,  $h_i$  表示物体上第  $i$  个采样点相对于参考平面的高度值。

再分别求偏差  $S$  对  $C_j, j = 1, 2, \dots, 18$  的偏导数, 令偏导数为零, 即可求得待标定系数  $C_1 \sim C_{18}$ :

$$\frac{\partial S}{\partial C_j} = 0, j = 1, 2, \dots, 18. \quad (18)$$

## 3 实 验

根据上述系统模型原理, 构建一个三维测量系统。测量系统由 CCD 相机 (UNIQ UP1800)、投影仪 (Optoma EP737)、相应的图像采集卡和计算机组

成。实验中展开相位的求解采用八步相移算法<sup>[18]</sup>解主值相位以及灰阶码法<sup>[19]</sup>解包裹。

实验测量过程如图 2 所示。图 2(a) 为实验的有效标定区域, 周围 6 个小长方形为实验所用的标准块, 左边从上到下标准块的高度分别为 90.36、50.00、10.24 mm, 右边从上到下标准块的高度为 75.00、25.00、21.50 mm, 中间的梯形工件是为了检验所提方法的测量精度, 其高度从上到下依次为 84.33、59.82、29.81、9.74 mm。实验中只用周围的 6 个标准块, 来拟合(16)式中的系数  $C_1 \sim C_{18}$ 。

图 2(b) 为 CCD 采集到的其中一幅变形光栅图像, 图 2(c) 为利用八步相移算法解出的主值相位图, 图 2(d) 为利用格雷编码进行展开后的物体展开相位图。其中纯黑色部分为图像的阴影区域及标准

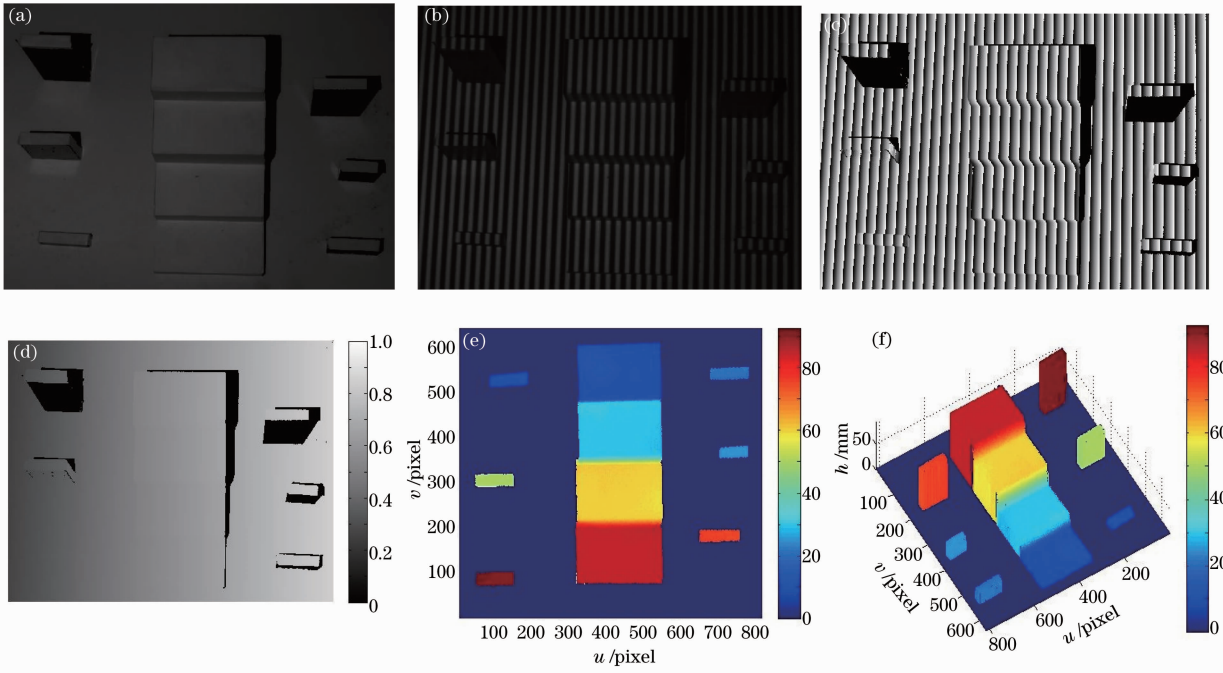


图 2 梯形工件的三维轮廓测量。(a)标准块及被测物体;(b)一幅变形光栅图;(c)物体主值相位图;  
(d)物体展开相位分布图;(e)和(f)物体的三维重建效果图

Fig. 2 3D shape measurement of a stairstepping workpiece. (a) Gauge blocks and stairstepping work piece; (b) one deformed fringe pattern; (c) wrapped phase; (d) unwrapped phase distribution; (e) and (f) 3D shape measurement result blocks. 由于此区域上解得的展开相位值误差较大,且不属于本文研究内容,因此将其去除。再计算参考平面的展开相位分布,然后对每个

$$C_1 \sim C_{18} = [2.0355, -0.0045, -0.0059, 8.43 \times 10^{-6}, 1.24 \times 10^{-6}, 3.18 \times 10^{-6}, 0.1891, -0.0004, -0.0005, 7.85 \times 10^{-7}, 7.54 \times 10^{-8}, 2.88 \times 10^{-7}, 0.0064, -2.06 \times 10^{-5}, -1.54 \times 10^{-5}, 2.36 \times 10^{-8}, 1.67 \times 10^{-8}, 8.19 \times 10^{-9}], \quad (19)$$

将  $C_1 \sim C_{18}$  的值代入(16)式,计算物体的三维高度信息。去除图像的阴影区域及标准块上不反光区域,并令其高度为零,得到物体的三维重建效果,如

图 2(e)和 2(f)所示。  
计算梯形工件中每个阶梯的平均高度、相对误差及均方根(RMS)误差,测量结果如表 1 所示。可

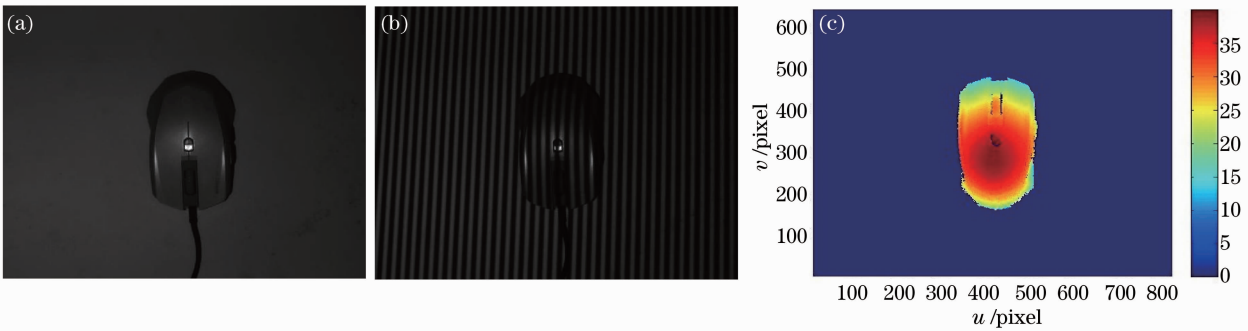


图 3 鼠标的三维轮廓测量。(a)待测鼠标;(b)一幅变形光栅图;(c)鼠标的三维轮廓重建  
Fig. 3 3D shape measurement of a mouse. (a) Measured mouse; (b) one deformed fringe pattern;  
(c) 3D reconstruction result of the mouse

以看出,梯形工件的相对误差及均方根误差都较小,因此,本文所提方法具有较高的测量精度。

表 1 梯形工件测量结果

Table 1 Experimental results of the stairstepping workpiece

Actual height /mm	Average height /mm	Relative error /%	RMS error /mm
84.33	84.2213	0.13	0.2493
59.82	59.5367	0.47	0.1623
29.81	29.9756	0.56	0.1245
9.74	9.6007	1.43	0.0647

保持投影仪和 CCD 相机的位置固定,利用得到的系数  $C_1 \sim C_{18}$  对如图 3(a) 所示的鼠标进行三维轮廓测量。图 3(b) 所示为一幅变形光栅图像。去除鼠标的阴影及不反光区域,并令其高度为零,得到的三维轮廓如图 3(c) 所示。

以上实验说明,本文所提出的三维轮廓测量方法不仅具有较高的测量精度,而且能够对复杂面形的物体进行测量,因此,本文所提方法是有效的。

## 4 结 论

现有的光栅投影三维轮廓测量方法对投影装置和成像系统的相对位置关系要求严格,因此很难对系统进行精确的校准,限制了光栅投影三维测量系统在实际中的应用。本文提出了一种新的三维测量系统模型,并建立了相应的高度相位映射关系。本模型放宽了对投影装置和成像系统的位置约束条件,不再要求光心连线平行于参考面、成像系统光轴垂直于参考面以及两光轴相交于参考面上等,使得系统的校准相对简单,增强了光栅投影三维测量技术的实用性。此外,高度相位映射关系式中的系数与点的坐标无关,只需少量(至少 18 个)采样点即可完成系统的标定,计算量小,能够节约系统标定的时间。实验结果表明,本方法具有较高的测量精度,并且能够对面形复杂的物体进行测量。

## 参 考 文 献

- 1 S Gorthi, P Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 133–140.
- 2 Feipeng Da, Shaoyan Gai. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(3): 377–385.
- 3 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.
- 4 Wang Tao, Sun Changku, Shi Yongqing, *et al.*. Novel grating projection system based on assistant line and its calibration

- method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0115002.  
王涛, 孙长库, 石永强, 等. 基于辅助参考线的光栅投影轮廓测量系统及标定方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0115002.
- 5 Zonghua Zhang, Shujun Huang, Shasha Meng, *et al.*. A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system [J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12218–12227.
- 6 Wu Shuangqing, Zhang Yin, Zhang Sanyuan, *et al.*. Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration in Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2780–2785.  
吴双卿, 张引, 张三元, 等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2780–2785.
- 7 Dong Fuqiang, Da Feipeng, Huang Hao. Windowed Fourier transform profilometry based on advanced S-transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512008.  
董富强, 达飞鹏, 黄昊. 基于 S 变换的改进窗口傅里叶三维测量法[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512008.
- 8 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(24): 3977–3982.
- 9 Zonghua Zhang, Haiyan Ma, Sixiang Zhang, *et al.*. Simple calibration of a phase-based 3D imaging system based on uneven fringe projection [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(5): 627–629.
- 10 Qingying Hu, Peisen S Huang, Qionglin Fu, *et al.*. Calibration of a three-dimensional shape measurement system [J]. *Opt Eng*, 2003, 42(2): 487–493.
- 11 Xu Qinghong, Zhong Yuexian, You Zhifu. System calibration technique of profilometry by projected grating [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(2): 126–129.  
许庆红, 钟约先, 由志福. 光栅投影轮廓测量的系统标定技术[J]. *光学技术*, 2000, 26(2): 126–129.
- 12 Yongfu Wen, Sikun Li, Haobo Cheng, *et al.*. Universal calculation formula and calibration method in Fourier transform profilometry [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(34): 6563–6569.
- 13 Xiao Yanshan, Cao Yiping, Wu Yingchun. A new phase-to-height mapping algorithm in fringe projection profilometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1208004.  
肖焱山, 曹益平, 武迎春. 条纹投影轮廓术中新的相位高度映射算法[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1208004.
- 14 Zhaoyang Wang, Hua Du. Out-of-plane shape determination in generalized fringe projection profilometry [J]. *Opt Express*, 2006, 14(25): 12122–12133.
- 15 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- 16 Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108002.  
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108002.
- 17 Zhang Xiaodong, Sun Changku. Unknown orientation views calibration for digital fringe projection profilometry [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, 47(5): 659–662.  
张效栋, 孙长库. 数字光栅投影轮廓测量系统不确定视角标定方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(5): 659–662.
- 18 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Double-step phase-shifting algorithm for fringe projection measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512004.  
郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512004.
- 19 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.