

·光电器件与材料·

## 基于数字光栅相移法的三维重构

肖丹, 陈良洲, 干江红

(华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**利用光栅投影法进行三维测量有良好的发展前景,但仍未能很好地解决高精度测量问题。提出结合相位高度映射关系和棋盘标定法的三维测量方法,该方法基于数字光栅相移技术,减少了对数字光栅和CCD几何约束要求,操作简单,实现对被测物三维信息的测量与重构。对已知高度为20 mm的参考物体进行测量,高度相对误差为0.727 5%。实验结果表明,该方法快捷高效,精度高。

**关键词:**光栅;数字相移;标定;三维重构

**中图分类号:**TN247

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-1255(2011)05-0017-04

## 3D Reconstruction Based on Digital Grating Phase-shifting

XIAO Dan, CHEN Liang-zhou, GAN Jiang-hong

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Although three-dimension (3D) shape measurement based on digital grating projection has a good development prospect, the problem of high accuracy measurement cannot be solved. Combing with height-phase mapping and lattice calibration, a 3D measurement method is proposed. The Geometric constraints of digital-grating and CCD are decreased. The measurement system is more feasible, which can be used to realize the accurate measurement and reconstruction according to the 3D information of measured object. By applying the proposed method to measure a 20.00 mm height reference object, the relative error is 0.727 5%. The experimental result shows that the method is efficient and precision.

**Key words:** grating; digital phase-shifting; calibration; 3D reconstruction

三维测量技术主要分为接触式测量和非接触式测量。非接触测量已经成为三维测量技术发展的大趋势,其中以光栅投影方法的前景最被看好<sup>[1]</sup>。光栅投影方法是将光栅图样投影到被测物体表面,由CCD获取经被测物表面调制的变形光栅投影图像,并由其形变量与高度的关系来确定被测物高度相对于参考平面的方法。光栅投影方法主要分为单光条三角测量法、FTP法、相移法、时间外差法和卷积解调法,以FTP法和相移法最为热门。FTP法是对采集到的被测物表面光栅图像在空域内对其做滤波处理,留下有用的基频分量,对基频分量分别进行FTP逆

变换,在空域内进行相位的展开,由相位和高度之间的关系得到被测物的高度。FTP法只需获取一帧光栅条纹图像,测量速度快,实时性高,但是FTP法对物体表面的反射特性很敏感,在取含有被测物高度信息的基频时,需要设计大小合适的窗口,对离散条纹进行傅里叶变换时会存在“栅栏效应”<sup>[2]</sup>,并且在测量形貌复杂和曲率变化较大的物体时容易造成频谱泄漏和混叠<sup>[3-4]</sup>,相移法是对采集的几幅不同光栅相位图像的计算,得到包含被测物高度信息的相位,经相位展开后,再由相位和高度之间的关系得到被测

收稿日期:2011-08-22

基金项目:国家自然科学基金(50975112);湖北省自然科学基金资助项目(2009CDB197)

作者简介:肖丹(1987-),女,湖南省常德市人,硕士研究生,主要研究方向是光电检测技术。

物的高度。数字光栅条纹技术的应用使得相移法测量速度加快,相移精度更高,并且不需要在时域和空域之间进行变换,更容易获得高测量精度。

文中基于数字光栅相移的三维测量技术,结合最新的相位高度映射关系和棋盘标定方法,通过空间变换减少对数字光栅和CCD几何约束要求,可操作性强,标定的过程简单。实现了对被测物高度等三维信息的准确重构。该方法快捷高效,适用性强。

## 1 数字相移测量

将仿真的正弦光栅条纹投射到被测物体表面,光栅条纹经被测物体表面调制后会发生变形,被测物体的高度信息就包含在这些发生变形的条纹相位信息中,只要找到相位和高度的映射关系就可以重构出被测物体的高度<sup>[5-7]</sup>。

数字相移法一般有三步相移或四步相移,相移 $N$ 次需要采集 $N+1$ 帧图像,文中采用三步相移法,三步相移法<sup>[6]</sup>计算被测物的包裹相位原理如下。

一幅理想的数字条纹图像的灰度;表达式如下

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (1)$$

其中,  $I'(x, y)$  是平均灰度,或者是背景灰度,  $I''(x, y)$  是灰度调制值;  $\varphi(x, y)$  是要求解的相位场。

理想的三幅相移条纹图像的灰度表达式

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y) - 2\pi/3] \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (3)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi/3] \quad (4)$$

联立式(2)、式(3)和式(4)可得到式(5)。把由式(5)得到的相位解包裹即可得到经被测物调制后的相位<sup>[8-9]</sup>和高度的映射关系

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3} \right] \quad (5)$$

系统测量示意图如图1,使用的测量系统减少了CCD和投影仪之间约束关系,CCD和投影仪可以在同一个平面,CCD和投影仪的光心可以不相交在参考面上,通过计算可得到相位和高度的关系式<sup>[10]</sup>

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \times \frac{1}{\Delta\varphi(x, y)} \quad (6)$$

$h(x, y)$  为  $(x, y)$  点的高度;  $\Delta\varphi(x, y)$  为被测物相对参考平面的相位差;  $a(x, y)$  和  $b(x, y)$  为关系因子,可通过系统标定求得。

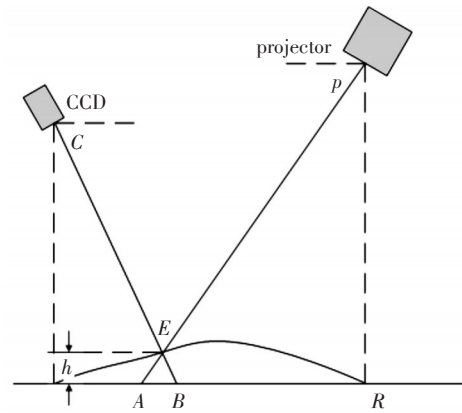


图1 系统测量示意图

## 2 三维重构的棋盘法标定

当测量系统确定后,式(6)的  $a(x, y)$  和  $b(x, y)$  按理论是可以确定的<sup>[11-12]</sup>,只需利用一个各角点空间坐标已知的棋盘格标定板,拍摄两幅光栅条纹图。

$$\begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_1 \times \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} \end{bmatrix}^T + \mathbf{T}_1 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_2 \times \begin{bmatrix} X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} \end{bmatrix}^T + \mathbf{T}_2 \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可得到

$$\begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}_1 \times \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}_2 \times \begin{bmatrix} X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 \end{bmatrix}^T =$$

$$(\mathbf{T}_2)^{-1} \times \mathbf{T}_1 \times \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

已知棋盘格大小,假设位置1时角点空间坐标 $Z$ 坐标为0,根据CCD标定得到的2个位置的旋转和平移矩阵 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{T}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ 、 $\mathbf{T}_2$ ,由式(11)可以得到位置2时角点在 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中的高度;利用三步相移法得到的相位图就可以计算出相应于2个不同位置角点高度差对应的相位差,得到高度和相位之间映射系数  $a(x, y)$  和  $b(x, y)$ 。

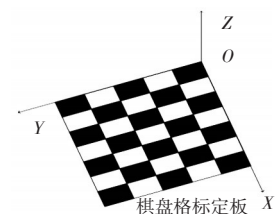
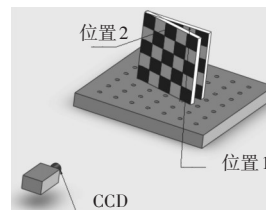


图2 系统标定示意图 图3 标定板上世界空间坐标系

具体步骤如下:

(1) CCD和投影仪位置固定后,使棋盘格标定板平行于CCD成像平面放置在位置1如图2所示;

(2) 以标定板左上方的一个角点为原点建立如图3所示的世界坐标系 $O_{w1}X_{w1}Y_{w1}Z_{w1}$ ;

(3) 用CCD标定工具栏进行标定,可以得到摄像机内部参数,以及位置1世界空间坐标系和摄像机坐标系 $X_cY_cZ_c$ 之间的旋转矩阵 $R$ 和平移矩阵 $T$ ;

(4) 旋转标定板一个角度到位置2,重复步骤(2)和(3),建立此位置的世界坐标系 $O_{w2}X_{w2}Y_{w2}Z_{w2}$ ,计算位置2世界空间坐标系和摄像机坐标系之间的旋转和平移矩阵 $R_1$ 、 $T_1$ 以及光栅相位分布图。

理论上根据上面得到的光栅相位图和标定板各角点的高度信息就可以计算当前系统的被测物高度和光栅相位分布的映射关系。

### 3 实验结果

实验以截面为梯形高度为20 mm实物如图4所示,作为测量对象,用文中方法进行测量。首先利用边长为15 mm的黑白棋盘格,如图5,对CCD进行标定<sup>[13]</sup>,并且消除图像畸变;为了获得被测实物的高度信息将数字光栅投影到被测实物,由CCD采集经被测实物高度调制的3幅数字光栅相移正弦条纹图如图6、图7和图8;对采集到的3幅数字光栅相移条纹图进行均值滤波和高斯滤波,再由三步相移公式计算得到包含被测实物高度信息灰度条纹图如图9;此时得到的相位图像不是被测实物的真正相位,它的相位被截断在 $-\pi$ 和 $\pi$ 之间,用解包裹算法展开后可以得到被测实物真正相位<sup>[14-15]</sup>三维分布图如图10所示;重构被测实物如图11所示,最大高度和最小高度差为19.854 8 mm。精度为99.27%,实验结果显示,文中所述方法正确恢复了被测实物的高度信息。

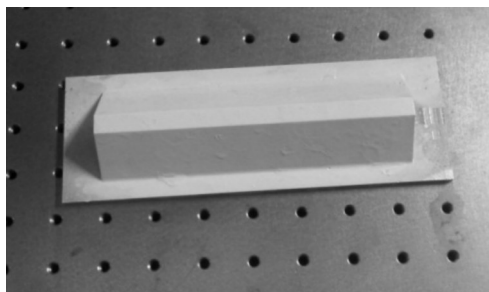


图4 截面为梯形的被测实物

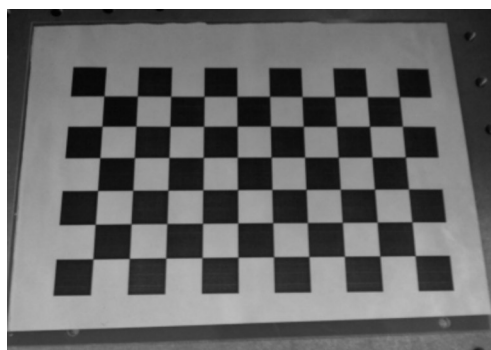


图5 系统标定需要的黑白棋盘格



图6 经被测实物高度调制的 $-120^\circ$ 相位正弦条纹图像



图7 经被测实物调制的 $0^\circ$ 相位正弦条纹图像



图8 经被测实物调制的 $120^\circ$ 相位正弦条纹图像

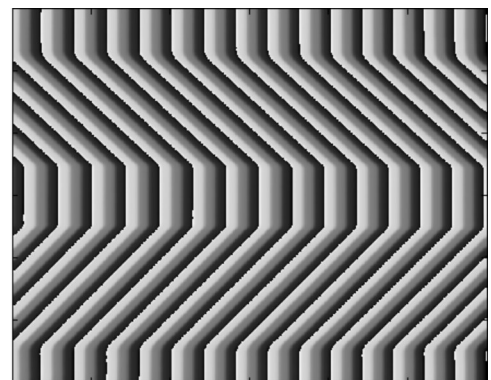


图9 包含被测实物高度信息没有解包裹的灰度

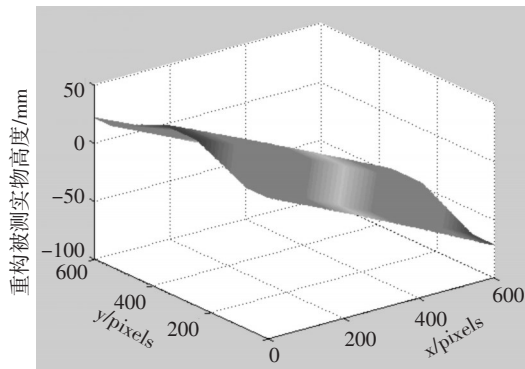


图10 重构被测实物相位三维分布图

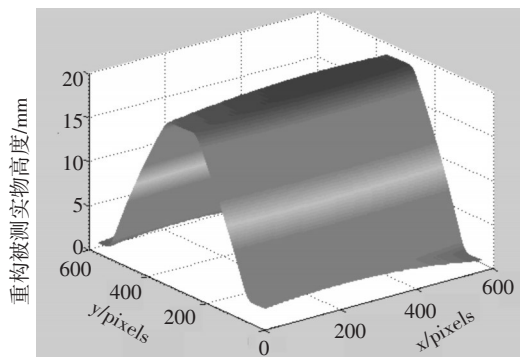


图11 重构被测实物高度

## 4 结论

三维测量应用广泛,但一直都没有统一的投影模型。文中侧重于重构物体的高度,对现有的系统测量模型和系统标定方法进行改进,采用操作性更强、精度更高的数字光栅相移法进行三维测量研究。在应用实验中,通过对三维信息重构,获得了截面为梯形的参考实物高度信息,有较高精度。文中研究的是对光栅投影法实现高精度定量的三维测量而进行的有益探索。如何准确重构实物的三维形貌依然是测量的难点,相信随着科学技术的发展和人们对三维测量研究的不断深入,三维测量的模型、方法会越来越合理,精度会越来越高。

## 参考文献

[1] 丁明君,牛萍娟,李寅涛.光栅投影三维形貌测量方法及发

展趋势研究[J].光机电研究论坛,2008.9.

- [2] 陈文静,苏显渝.提高Fourier变换轮廓术测量精度的新方法[J].光电工程,2002,29(1):19-22.
- [3] 牛小兵,林玉池,赵美蓉,等.光栅投影三维轮廓测量的原理及关键技术分析[J].光子·激光,2002,13(9):983-986.
- [4] 葛东东,王淮生,宋家友.光栅投影三维轮廓测量技术分析及进展[J].上海电力学院学报,2005,21(4):378-386.
- [5] Song Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(Num 4):149-158.
- [6] Peisen S Huang, Qingying Hu, Feng Jin, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring[J]. Optical Engineering, 1999, 38(Num 6):1065-1071.
- [7] Jiahui Pan, Peisen S Huang, Fu-Pen Chiang. Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2005, 42(Num 2):023606-1-023606-9.
- [8] D C Ghiglia, L A Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(1):107-117.
- [9] M J Huang, Cian-Jhih Lai. Innovative phase unwrapping algorithm: hybrid approach[J]. Opt. Eng, 2002, 41(6).
- [10] 文永福,苏显渝,张启灿.傅里叶变换轮廓术中一种普适的计算公式和系统标定方法[J].中国激光,2009,36(8):2094-2098.
- [11] Tavares Paulo J. Linear calibration procedure for the phase-to-height relationship in phase measurement profilometry[J]. Journal of the Optics Communications, 2007, 274(2):307-314.
- [12] Penna Michael A. Camera calibration: A quick and easy way to determine the scale factor[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(12):1240-1245.
- [13] [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).
- [14] 朱勇建,李安虎,潘卫清,等.结构光测量中快速相位解包裹算法的讨论[J].光子学报,2009,38(1):184-188.
- [15] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. J. Opt. Soc. Am., 1987, 72: 156-160.