

一种基于双参考平面的等相位坐标标定方法

戴美玲 杨福俊 代祥俊 何小元

(东南大学工程力学系, 江苏南京 210096)

摘要 栅线投影三维测量中通过标定技术把二维的相位信息转化为高度信息, 提出了一种基于双参考平面的等相位坐标标定方法。该方法利用被测物体上相位和两个参考平面上相位相同的位置坐标, 通过线性插值得到物体表面的高度, 而不是传统方法中将物体上的相位直接减去参考平面上同一坐标下的相位得到绝对相位, 再建立高度和绝对相位之间的函数关系(将此类方法称为等坐标相位法)。所提方法能够同时解决相位-高度转换以及由于栅线投影系统的非线性响应导致的非正弦性误差的问题。理论和实验证实了该方法的有效性。结果显示, 等相位坐标法得到的主要由条纹的非正弦性引起的均方根(RMS)误差不到等坐标相位法的一半。

关键词 图像处理; 三维形貌测量; 标定; 等相位坐标; 非正弦误差

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0512006

An Equi-Phase Coordinate Calibration Method Based on Two Reference Planes

Dai Meiling Yang Fujun Dai Xiangjun He Xiaoyuan

(Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract Calibration is to transform the two-dimensional (2D) phase information to the height in fringe projection three-dimensional (3D) measurement. An equi-phase coordinate method based on two reference planes for calibrating fringe projection system is proposed. The surface height is calculated by a linear interpolation using the coordinates where have the identical phase value of the object and the two reference planes, instead of using the absolute phase obtained by subtracting the phase of object from the reference plane in the same coordinate conventionally and building the function of the absolute phase and height, which is called equi-coordinate phase method. The proposed method can handle phase-to-height conversion and non-sinusoidal error caused by nonlinear response of the fringe projection system in one go. Theoretical and experimental analysis is given to prove the validity of the proposed calibration method. Results indicate that the root mean square (RMS) error produced by equi-phase coordinate method is less half of the equi-coordinate phase approach when the primary error source is from the non-sinusoidal fringe patterns.

Key words image processing; three-dimensional shape measurement; calibration; equi-phase coordinates; non-sinusoidal error

OCIS codes 110.6880; 120.5050; 120.6660

1 引 言

栅线投影三维(3D)形貌测量技术由于其非接触性、高精度、高分辨率等优点在工业制造、在线检测、医学影像、机器视觉等领域有着越来越重要的地位。栅线投影三维形貌测量过程中, 标定是把二维(2D)的

图像信息转换到真实空间里的三维信息, 是栅线投影技术中一个很重要的步骤, 一般包括深度标定和横向标定。物体的相位信息与高度存在一定的映射关系, 确立这种映射关系的过程称为深度标定。另外, 不同深度的图像坐标与实际坐标的缩放比例通常不是一

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(11272090, 10972055)

作者简介: 戴美玲(1985—), 女, 博士生, 主要从事光测力学与图像处理方面的研究。E-mail: 230119162@seu.edu.cn

导师简介: 杨福俊(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事应用光学方法研究新型材料与结构及细胞的力学性能方面的研究。

E-mail: yang-fj@seu.edu.cn

个常数^[1], 横向坐标与表面高度以及图像坐标有着一定的关系, 确定这种关系的过程称为横向标定。通过相位-深度-横向标定可以得到物体的三维信息。由于深度标定的精度直接影响着表面形貌的重构, 往往更为重要, 很多学者对此进行了研究。

早期的标定方法^[2]是利用参考平面和物体表面的等相位位置来进行相位-深度标定, 该方法需要保证投影仪镜头光瞳和 CCD 镜头光瞳在同一平面上, 实际中很难做到, 测量某些几何参数也会引入一些系统误差。为了使标定技术更加实用化, 文献[3-4]分别提出了绝对相位的倒数和高度之间的线性和非线性关系, 并通过对平面在 3 个及 3 个以上已知位置的测量求出相关的参数。文献[5-6]利用相机视线下的三角关系, 通过两个或多个平面得到物体的相位-高度关系。文献[7-8]用若干个已知高度的标准块, 结合最小二乘法来确定相位与高度之间的关系。文献[9]分析了投影与成像不等高的标定模型, 利用平移标定平面结合最小二乘法得到了物体高度与相位之间的非线性关系。对于栅线投影三维测量系统来说, 误差的主要来源是由于条纹的非正弦性引起的相位高频误差, 对于大部分的标定方法来说, 需要有一个专门的误差校正或补偿过程^[10-17], 主要分为前处理和后处理方法。前处理方法主要是通过投影前对条纹进行灰度的调整, 使得获得的条纹保持较好的正弦特性, 从源头上消除投影仪的 Gamma 非线性, 从而防止误差向后传递^[11-14]。后处理方法主要是对采集后的图像(主要是对相位图)进行数值处理来减小系统的非线性带来的高频相位误差^[15-17]。以上处理过程均增加了测量的复杂度。

当正弦条纹通过投影仪投射到三维空间中, 相位相同的一系列点构成了一系列等相位平面^[18]。基于此, 从等相位投影平面的角度出发, 提出了一种基于双参考平面的等相位坐标标定方法。该方法能够同时解决相位-高度转换和条纹非正弦性误差的问题。利用等相位坐标的方法^[2]早就已经提出, 然而该方法约束性太强, 不利于操作, 后续的改进方法^[3-9, 18]均放弃使用等相位坐标, 而是将物体表面的相位直接减去参考平面同一坐标的相位, 然后建立绝对相位和高度之间的函数关系, 文中将此类方法归为等坐标相位法。

2 相位调制原理

图 1 是传统的栅线投影原理图, 被测物体放置

在一个基准平台即参考平面上。P 为数字光处理(DLP)投影仪的出瞳中心, I 为 CCD 摄像机的入瞳中心, 两者之间距离为 d 。P 和 I 两点到参考平面的距离相等为 L , CCD 摄像机的光轴垂直于参考平面以确保在参考面上的放大倍数为一个常数。O 点为投影仪和摄像机光轴的交点, 以此为原点建立坐标系, 如图 1 所示, 设 x 方向与条纹方向垂直。

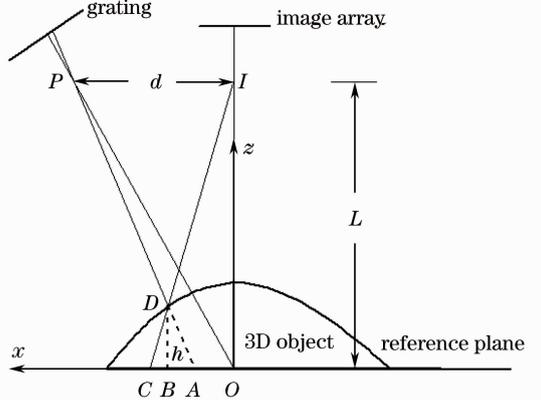


图 1 栅线投影原理图

Fig. 1 Principle of the fringe projection

当一组平行栅线投影到被测物体的表面, 由于相机和投影仪成一定的角度, 所以受物体表面高度的调制, 条纹发生位移, 物体表面 D 点的相位与参考面 A 上的相位相同:

$$\phi_D = \phi_A = 2\pi f \cdot \overline{OA}, \quad (1)$$

式中 f 为条纹频率, 所以图像上一点由物体表面高度对栅线的调制引起的相位变化为

$$\Delta\phi = \phi_D - \phi_C = \phi_A - \phi_C = 2\pi f \cdot \overline{CA}, \quad (2)$$

由三角形 IPD 与 CAD 相似可以得到:

$$h = \frac{\overline{CA} \cdot (L/d)}{1 + \overline{CA}/d}, \quad (3)$$

由(2)式得到:

$$h = \frac{\Delta\phi \cdot L}{2\pi f d + \Delta\phi}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\phi(x, y) = \phi_{\text{Object}}(x, y) - \phi_{\text{Reference}}(x, y)$, 隐含着物体的高度信息。

若已知系统参数 L, d , 可以通过两种方式得到物体表面的高度: 1) 最常用的方法, 直接将物体上的条纹相位和参考面上的条纹相位相减得到绝对相位差 $\Delta\phi(x, y)$, 再代入(4)式得到物体的高度, 由于该方法是对图像中的同一坐标的相位进行相减, 所以本文将这类方法称为等坐标相位法; 2) 根据物体上一点 D 和参考面上 A 点相位相等, 通过 D 点的相位找到参考面上等相位的点的位置 A, 而图像上 D 点和 C 点是同一个坐标, 这样就找到了 \overline{CA} , 代入(3)式

即可获得该点的高度^[2],由于该方法是利用了物面和参考平面图像中的等相位坐标,所以本文将这类方法称为等相位坐标法。

3 基于双参考平面的等相位坐标法

3.1 原理

传统的系统标定需要保证投影和成像系统满足一定的几何关系,即要保证 CCD 相面与参考平面保

持平行,CCD 与投影仪的光瞳中心到参考平面的距离相等(实际操作中这是很难保证的),还要测量相关的几何参数 L, d ,这也必然会引入系统误差。如果投影仪镜头和相机镜头的光心不在同一高度或者投影仪和相机任意摆放,这样的标定就更为复杂。受到传统结构光标定技术^[19]的启发,利用两个已知位置的参考平面进行标定,如图 2 所示,其中图 2(a)是本文栅线投影系统标定的三维图,图 2(b)是其俯视图。

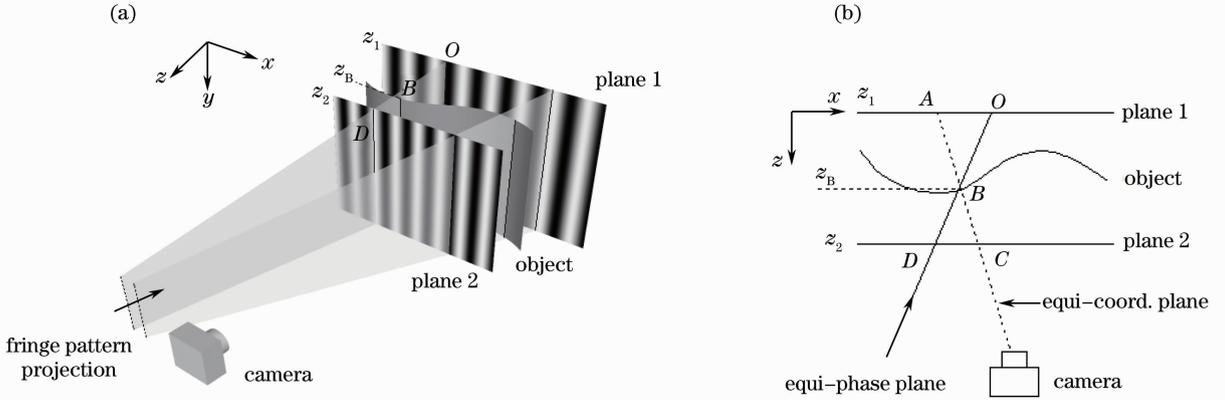


图 2 栅线投影两平面标定技术示意图。(a)三维标定系统图;(b)俯视图

Fig. 2 Diagram of the two-planes fringe pattern projection method. (a) Three dimensional (3D) calibration system; (b) top view of (a)

当正弦光栅的灰度沿 x 轴分布,其相位也是沿 x 轴单调递增,对于固定的 x 坐标,相位沿 y 轴是不变的,将由投影仪投射的具有相同相位的平面称为等相位平面,该相位平面与 xz 平面垂直。如图 2(b)所示,等相位平面与参考平面及物体上的交点分别为 O, D, B 。对应的在相机中具有相同坐标的平面称为等坐标平面,其与参考平面及物体上的交点分别为 A, B, C 。参考平面 plane 1 处 $z_1 = 0$,参考平面 plane 2 处 $z_2 = h$,物体在两参考平面之间, B 是物体上一点,根据三角形 OAB 与 DCB 相似可以得到:

$$\frac{\overline{OA}}{\overline{CD}} = \frac{z_B - z_1}{z_2 - z_B} = \frac{z_B}{h - z_B}. \quad (5)$$

由于 $2\pi f \overline{OA} = \phi_A - \phi_O, 2\pi f \overline{CD} = \phi_D - \phi_C$, $\phi_O = \phi_D = \phi_B$,其中 f 是条纹频率,代入(5)式可以得到:

$$z_B = \frac{\phi_B - \phi_A}{\phi_C - \phi_A} \cdot h, \quad (6)$$

对于(6)式来说 A, B, C 在图像上是同一个坐标,因此操作比较简单,该方法也是一种常用的标定方法^[5-6],属于等坐标相位法。

由于 $\overline{OA} = x_A - x_O, \overline{CD} = x_D - x_C$,在图像中 $x_A = x_C = x_B$,代入(5)式可以得到:

$$z_B = \frac{x_B - x_O}{x_D - x_O} \cdot h, \quad (7)$$

对于(7)式来说, x_O, x_B, x_D 并不能直接找到,图 2(b)中 $(x_O, z_1), (x_B, z_B)$ 和 (x_D, z_2) 处具有相同的相位值,对于物体上一点 B ,根据相位分布的单调递增性可以找到 plane 1 和 plane 2 上两个对应的等相位点 O 和 D 。所提取的三处 x 坐标可以代入到(7)式来计算表面高度。从投影平面等相位坐标的角度出发,提出的基于两平面的标定方法(7)式属于等相位坐标法。

对于物体上一点 B ,其相位角为 ϕ ,在参考 plane 1 和 plane 2 上可以找到接近 ϕ 的坐标 x_O 和 x_D ,通常对应的位置并不是整像素,而是在两个像素点之间,因此可以通过线性插值来获得对应的亚像素坐标。所以在(7)式中, x_O 和 x_D 是亚像素精度, x_B 是整像素。

3.2 消除条纹非正弦引起的高频误差

基于两平面的等相位坐标法与传统的等坐标相位法的区别是,前者的重点在于等相位点的坐标差,而后者的重点在于同一图像坐标之间的相位差。对于理想的正弦条纹,通过(6)式和(7)式都可以得到准确的物体表面高度信息。但是由于条纹的非正弦特性,使得每一个相位角都有一个附加的误差分量,

该误差通常是原始相位角的整数倍的高频误差^[15]。所以如果两个相位角相同,其对应的高频误差项在理论上也是相同的。由于等相位平面上所有点的相位相同,误差也相同,所以空间中的相位平面不会移动或变形,(7)式中的 x_O, x_B, x_D 能够保持其原始值,得到的高度相对地就不会受高频误差的影响。而(6)式中的 ϕ_A, ϕ_B 和 ϕ_C 不相等引入了不同的误差项,所以误差不能被抵消,最终将影响高度的计算。

利用等相位坐标进行高度计算的方法最初见于文献[2]中,原来的方法只用了一个参考平面,而需要几个确切的系统几何参数才能得到物体的高度,这是很难做到的,后续改进的方法中,均放弃了等相位坐标的处理过程而采用等坐标相位的方法。等坐标相位方法在算法上确实比较方便,但是正如上述分析的,其精度对于条纹的非正弦性来说比较敏感。考虑到标定平板平移可能导致条纹缺级以及复杂形貌对于相位测量的影响,将采用多频条纹投影结合四步相移算法来进行相位计算^[14]。

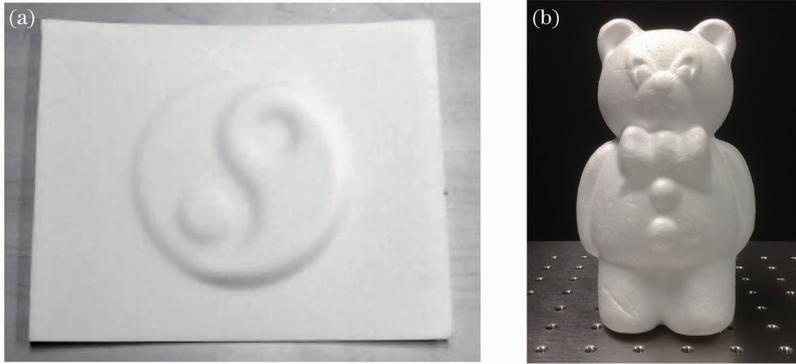


图 3 (a)具有弧形表面的被测物体;(b)小熊模型

Fig. 3 (a) Tested object with a curved surface; (b) a bear model

图 4 是平板表面及弧形物体表面高频四步相移条纹其中一幅条纹图,图 5 是四步相移法得到的平板及弧形物体表面的包裹相位图,图 6 则是对应于图 5 的由多频条纹解包裹法得到的解包裹相位图。

图 7 是第一个实验中由两种方法获得的第二个位置的平板表面高度,平板的有效测量范围约为 $310 \text{ mm} \times 215 \text{ mm}$,对应像素为 $620 \text{ pixel} \times 430 \text{ pixel}$ 。在图 7(a)中,可以看到传统等坐标相位法中,由于条纹的非正弦性使得原本光滑的平板表面产生了波纹状的高频误差;如图 7(b)所示,由本文提出的等相位坐标法所得到的结果可以看出,条纹的非正弦性引起的高频误差明显减少。两种方法测量平面的均方根(RMS)误差对于等坐标相位法(6)式来说为 0.

4 实验与结果

实验对一平板、一个弧形物体[图 3(a)]以及一只小熊模型[图 3(b)]进行了测量。采用 Point Gray (FL3-U3-32S2C-CS)相机采集图像,相机分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,采用 Optoma pico 投影仪(PK301)向被测物体投影多频四步相移条纹图,采用线性平移台(TSA400-BF)来平移标定平板,精度为 $5 \mu\text{m}$ 。测量之前调节相机和投影仪使得采集到的条纹图不会出现过饱和状态,灰度在 $20 \sim 250$ 之间。在第一个实验中,平板被依次放置在沿 z 方向之间位移间隔为 25 mm 的三个位置上,第一个位置($z=0 \text{ mm}$)和第三个位置($z=50 \text{ mm}$)的平板作为两个参考平面,第二个位置($z=25 \text{ mm}$)的平板高度分别根据等坐标相位法(6)式和等相位坐标法(7)式进行计算。在第二个实验中,把被测物体放置在相同的参考平面之间,其表面高度同样用两种方法进行计算。不考虑镜头畸变、离焦等因素,参考平面及物体的测量深度均在相机的景深范围之内。

134 mm,而对等相位坐标法(7)式来说只有 0.053 mm 。

图 8 是图 7 中标记的 A-A 横截面图。可以看出,基于等相位坐标方法的误差振幅只有等坐标相位法的 $1/3$ 左右,而且该误差具有更高的频率。这可能是系统的随机误差或者由投影仪和相机的数字化误差引起的;不改变任何系统元件(照明、投影或成像设备)的情况下,连续拍摄的两幅图像不完全相同。

图 9 是第二个实验弧形物体的测量结果,其有效测量范围约为 $200 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$,对应像素为 $500 \text{ pixel} \times 427 \text{ pixel}$ 。图 10 是图 9 中所示 B-B 截面图。在第二个实验中,两种方法都表现出与第一个实验相同的特性。

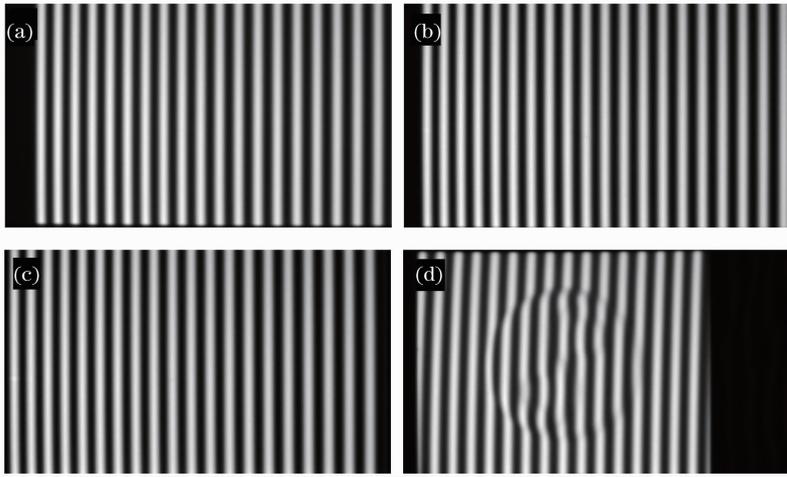


图 4 (a)~(c)分别是第一、二、三个不同位置的平板表面条纹图；(d)弧形物体表面的条纹图

Fig. 4 Fringe patterns of the plane at (a) 1st (b) 2nd and (c) 3rd position respectively; (d) fringe pattern of the curved object

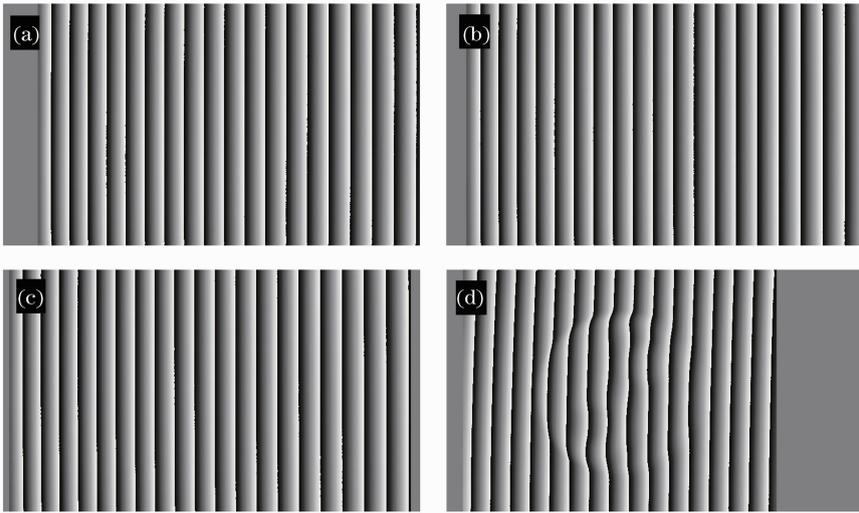


图 5 (a)~(c)分别是第一、二、三个位置平板的包裹相位图；(d)弧形物体的包裹相位图

Fig. 5 Wrapped phase maps of the plane at (a) 1st (b) 2nd and (c) 3rd position respectively; (d) wrapped phase of the curved object

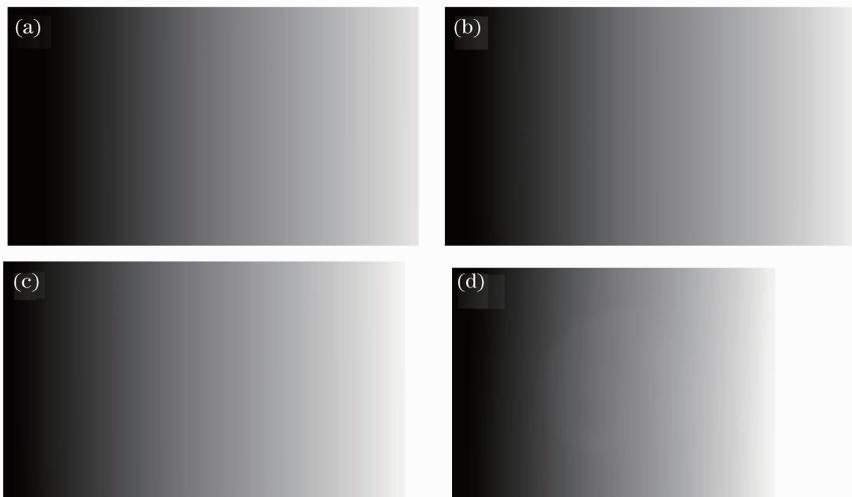


图 6 与图 5 相对应的解包裹相位图

Fig. 6 Unwrapped phase maps corresponding to Fig. 5

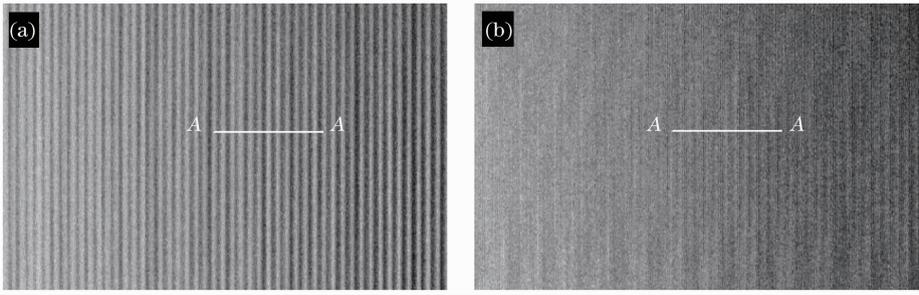


图 7 (a)由等坐标相位法得到的平板表面高度分布；(b)由等相位坐标法得到的平板表面高度分布

Fig. 7 Plane surface height distribution obtained by (a) equi-coordinate phase; (b) equi-phase coordinate approaches

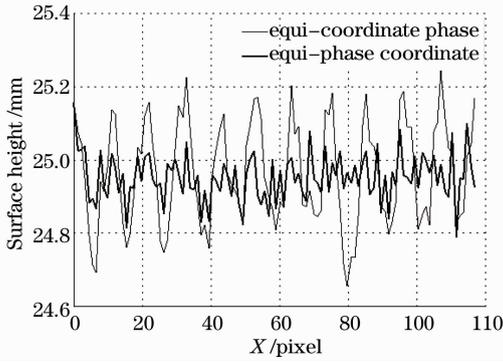


图 8 由两种方法得到的平板表面的 A-A 截面
Fig. 8 Cross-section A-A on the plane surface obtained by the two approaches

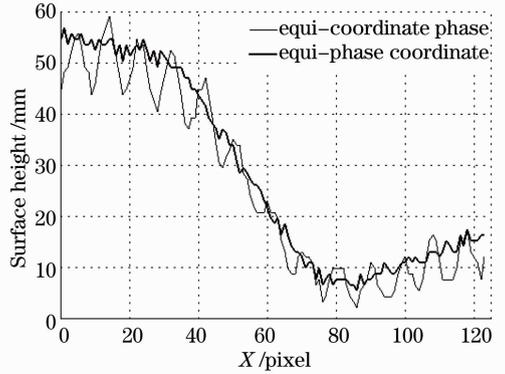


图 10 由两种方法得到的物体表面的 B-B 截面
Fig. 10 Cross-section B-B on the curved object surface obtained by the two approaches

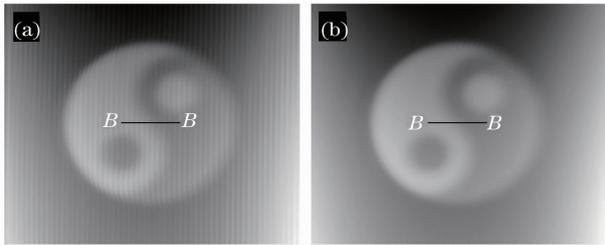


图 9 (a)由等坐标相位法得到的表面高度分布；(b)由等相位坐标法得到的表面高度分布

Fig. 9 Curved object surface height distribution obtained by (a) equi-coordinate phase; (b) equi-phase coordinate approaches

图 11 是测量得到的小熊模型的三维形貌图；图 11(a)是等坐标相位法得到的结果，表面有明显的高频误差；图 11(b)是本文提出的等相位坐标法的结果，高频误差基本消失了。

5 结 论

提出的基于双参考平面的等相位坐标方法简单、易行，能够同时解决栅线投影标定和由于投影系统的非线性响应引起的非正弦性误差的问题。尽管使用等相位坐标最早可以追溯到 1985 年，但是最初

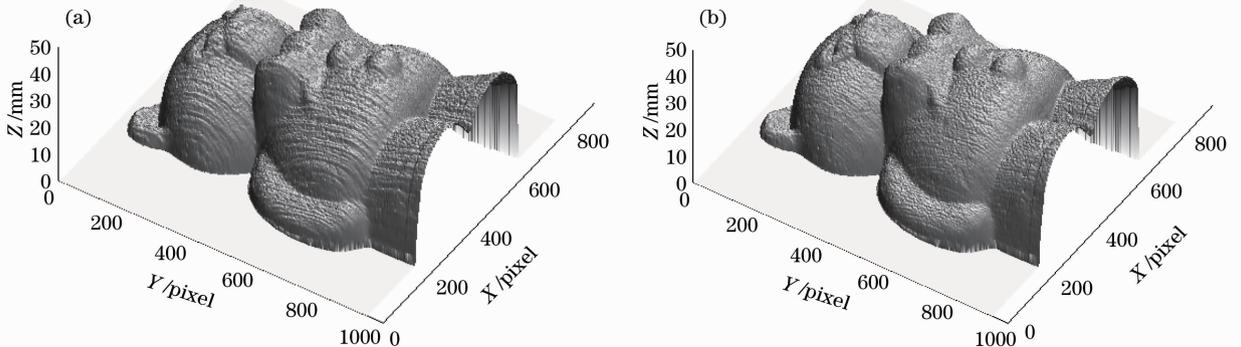


图 11 (a)由等坐标相位法得到的三维物体表面形貌；(b)由等相位坐标法得到的三维物体表面形貌
Fig. 11 3D surface shapes obtained by (a) equi-coordinate phase; (b) equi-phase coordinate approaches

提出的测量系统存在约束性太强的问题,使得此方法并没有得到广泛应用。而后续的改进方法中都放弃使用等相位坐标,而采用等坐标相位的方法(即将物体表面的相位直接减去参考平面同一坐标的相位,然后建立绝对相位和高度之间的函数关系),对于条纹的非正弦性引起的高频误差往往需要专门的方法来补偿或消除,增加了测量的复杂度。从基于两平面的等相位坐标法和等坐标相位法的对比中发现,等相位坐标法不需要额外的处理就能够大大减少条纹的非正弦性对表面形貌测量的影响。理论和实验均验证了所提方法的有效性。对于所提出的标定方法,其精度还可以从硬件和软件两方面来进一步提高,如:采用高分辨率的相机,更高精度的平移台;采用多参考平面的方法来减小镜头畸变、离焦等因素带来的误差;通过多幅平均法来降低系统的随机噪声或者投影仪和相机的数字化噪声的影响等。

参 考 文 献

- 1 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yipong, *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.
- 2 V Srinivasan, H C Liu, M Halioua. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach [J]. *Appl Opt*, 1985, 24(2): 185-188.
- 3 W S Zhou, X Y Su. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(1): 89-94.
- 4 Li Wansong, Su Xianyu, Liu Zhongbao. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(20): 3326-3333.
- 5 Zhang Xongwei, Lin Yuchi, Zhao Meirong, *et al.*. Calibration of a fringe projection profilometry system using virtual phase calibrating model planes [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(4): 192-197.
- 6 C D Argenio, G D Leo, C Liguori, *et al.*. A simplified procedure for the calibration of a fringe pattern profilometer [C]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC'09*, Singapore, 2009: 652-657.
- 7 Guo Hongwei, He Haitao, Yu Yingjie, *et al.*. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry [J]. *Opt Eng*, 2005, 44(3): 033603.
- 8 Du Hua, Wang Zhaoyang. Three-dimensional shape measurement with an arbitrarily arranged fringe projection profilometry system [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2438-2440.
- 9 Zhu Feipeng, Shi Hongjian, Bai Pengxiang, *et al.*. Three-dimensional shape measurement and calibration for fringe projection by considering unequal height of the projector and the camera [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(11): 1575-1583.
- 10 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.
- 11 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0512003.
郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的 Gamma 校正技术 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0512003.
- 12 Huang Peisen, Zhang Chengping, Chiang Fupen. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1): 163-168.
- 13 Dai Meiling, Yang Fujun, Du Xiaolei, *et al.*. Three-dimensional shape measurement based on single-shoi color fringe projection of sinusoidal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0712002.
戴美玲, 杨福俊, 杜晓磊, 等. 基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量 [J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0712002.
- 14 Z Y Wang, D A Nguyen, J C Barnes. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 218-225.
- 15 Guo Hongwei, He Haitao, Chen Mingyi. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(14): 2906-2914.
- 16 S Zhang, S T Yau. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(1): 36-43.
- 17 B Pan, Q Kemao, L Huang, *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(4): 416-418.
- 18 H Liu, W H Su, K Reichard, *et al.*. Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3d surface profile measurement [J]. *Opt Commun*, 2003, 216(1): 65-80.
- 19 S G Narasimhan, S K Nayar, B Sun, *et al.*. Structured light in scattering media [C]. *The Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, 2005, 1: 420-427.

栏目编辑: 张浩佳