

基于相移与调制度比的结构光三维面形垂直测量方法

卢明腾¹, 苏显渝^{2*}

¹西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;

²四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 为了兼顾调制度测量轮廓术的测量速度与测量精度,提出了一种新的基于相移与调制度比的调制度测量轮廓术方法。使用一个由柱面镜和普通投影镜头组成的特殊投影系统,将竖直与水平两组相移正弦光栅依次投射在测量区域,柱面镜使两种光栅条纹的“像面”分离,两“像面”之间构成测量区域。利用相移算法得到两组正弦条纹在测量区域的调制度分布,并建立两种条纹的调制度比与实际物理位置的映射关系。测量时,将待测物体放置于测量区域,并根据物体表面两种条纹的调制度比与物理位置的映射关系,即可重建物体的三维面形。通过对实物的测量实验验证了所提方法的可行性。

关键词 测量; 三维面形测量; 调制度测量轮廓术; 垂直测量; 高度映射; 相移算法

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704003

Vertical Measurement Method for Structured Light Three-Dimensional Profilometry Based on Phase-Shifting and Modulation Ratio

Lu Mingteng¹, Su Xianyu^{2*}

¹Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China;

²School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract In this paper, a new modulation measuring profilometry method based on phase-shifting and modulation ratio is proposed in order to balance the measurement speed and accuracy of the traditional methods. In the proposed method, a special projection system comprising a common projection lens and a cylindrical lens is used. Two groups of vertical and horizontal phase shifting sinusoidal grating fringes are projected onto the measurement area. The “image planes” of the two types of fringes are separated by the cylindrical lens, and the measurement area is between the two “image planes.” The modulation distributions of the two types of sinusoidal grating fringes are obtained using a phase shifting algorithm, and the mapping relationship between the modulation ratio of the fringes and the actual position is established. The three-dimensional shape of the object can be reconstructed according to the mapping relationship between modulation ratio of the fringes and the actual position. In addition, the experiments are conducted to evaluate the feasibility of the proposed method.

Key words measurement; three-dimensional shape measurement; modulation measuring profilometry; vertical measurement; height mapping; phase shifting algorithm

OCIS codes 120.6650; 110.2960

1 引言

结构光三维传感技术具有非接触、精度高、测量速度快、信息容量大以及测量简单等优点,已被广泛应用于逆向工程、生物医学、工业检测、文化遗产数字化保存、3D动画模型建构以及网络虚拟等领

域^[1-3]。按照测量系统的结构,结构光三维测量技术分为基于三角原理的光学三维传感技术和基于垂直测量原理的三维传感技术两大类^[4-6]。在基于三角原理的光学三维传感技术的测量系统中,通过投影光轴与观察光轴之间的夹角,将待测物体的高度信息调制到投影的正弦光栅的相位信息中,再通过计

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-02-24; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61177010)、国家重大科学仪器开发专项(2013YQ49087901)

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

算条纹的变形量即可重建出被测物体的三维面形。采用该系统结构的方法主要包括相位测量轮廓术(PMP)^[5-8]、傅里叶变换轮廓术(FTP)^[9-10]、由 FTP 衍生的小波变换轮廓术,以及 S 变换轮廓术等^[11-12]。该类方法以条纹相位作为高度信息载体,测量精度高且易于实现,但由于夹角的存在,在测量复杂或陡变面形物体时,会出现阴影、遮挡以及相位不连续等问题,需要对多个视角(至少 2 个)的测量数据进行拼接,才可完整地重建出物体的三维形貌^[13]。与三角测量相对应,将投影光轴和观察光轴重合的测量方法称为“垂直测量”或“同轴测量”^[14-15]。调制度测量轮廓术(MMP)由于采用了垂直测量原理,从而摆脱了基于三角测量原理的光学三维传感方法中阴影、遮挡等的限制,可以实现表面高度变化剧烈或不连续的物体的测量^[16-17]。

在已有的调制度测量轮廓术方法中,Takeda 等^[15]提出了在投影镜头物方间隔一定距离放置两个互相正交的正弦光栅进行投影的方法,该方法能够通过拍摄单帧条纹图来恢复物体,但是前后放置投影光栅的方式使得两光栅的像在投影像空间相乘,易在条纹图频谱中产生卷积项,造成频谱混叠。Dou 等^[16]在此基础上提出了一种改进的方法,即从实验原理上,实现了两光栅投影成像的相加,避免了条纹图频谱出现卷积项。但该改进方法在投影物方使用了半反半透镜,使得整个光路系统更加复杂,为光路校准增加了难度^[18]。Lu 等^[19]提出了一种使用正交光栅投影的快速垂直测量方法,该方法使用一个外加柱面镜的特殊投影系统,投影一个误差扩散编码的二值条纹,实现横竖两种条纹相加的正交光栅,柱面镜使得正交光栅的横竖条纹分量分离成“像面”,两“像面”间构成测量范围,在测量范围内,根据两种条纹的调制度分布可以实现对被测物体三维面形的重建。该方法采集单帧条纹图的同时可以获得两种条纹的调制度信息,实现高度重建,但傅里叶变换获取调制度的方式也使得该方法的空间分辨率有所损失,且物理光栅模板难以精确控制其透过率,投影的条纹图频谱中含有较多噪声分量,从而影响测量结果。

Zhong 等^[20]提出了一种连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术,其特点是通过相移和垂直扫描的自动同步过程,对测量范围内一系列等间距平面进行扫描,同时相机拍摄一系列光栅条纹图组,通过建立扫描过程,得到调制度最大值位置序号与实际物理空间位置的一一映射关系;再对待测物体进

行扫描,利用物体上每一点调制度最大的扫描位置序号,恢复出物体的三维面形。该方法实现了垂直扫描以及对调制度点对点的计算,具有较高的精度,但需要采集大量的时间序列条纹图,测量速度较慢。

为了兼顾调制度测量轮廓术的测量速度与测量精度,本文提出了一种使用电子模板光栅结合柱面镜投影的调制度测量轮廓术方法。该方法以电子模板替换物理光栅模板,电子模板光栅投影可以实现精确相移,因此可以实现对调制度点对点的计算;同时,该方法可以避免采集大量的时间序列条纹图,从而提高了测量速度。实验结果表明,该方法只需采集两组相移条纹图,就可实现对陡变面形物体的三维重建,减少了测量所需的数据量,同时避免了傅里叶变换方法中因滤波造成的高频信息丢失。

2 基于相移与调制度比的调制度测量轮廓术原理

2.1 基本原理

基于相移及条纹调制度比的快速垂直测量轮廓术方法的基本原理如图 1 所示。使用计算机生成一组正弦光栅条纹,显示在投影系统的 LCD 或 DMD 芯片上,光栅条纹经过一个由普通透镜和柱面镜组成的特殊透镜后,投影到测量区域(以柱面镜母线与竖直光栅条纹平行的情况为例);通过一面半反半透镜,CCD 相机从与投影光轴相同的方向上观测待测物体。先以竖直光栅为例进行说明,当计算机控制投影竖直光栅条纹时,其光路图如图 1(a)所示,预设投影的 N 步相移光栅条纹灰度分布为

$$g_v(x, y) = 127.5 + 127.5 \cos\left(2\pi \frac{x}{p_v} + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right),$$

$$i = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (1)$$

式中: p_v 为竖直光栅条纹的周期; x 为横向像素的位置序号; N 为相移步数; y 为纵向像素的位置序号。

在几何光学近似和理想成像的情况下,(1)式表示的竖直光栅经投影透镜成像后,在像平面上得到的仍然是一个正弦光栅,CCD 相机通过半反半透镜在投影像方观测到的光栅条纹图的光强分布可以表示为

$$I_{vi}(x, y) = \frac{r(x, y)}{M^2} \cdot \left\{ I_b + I_0 \left[1 + c_v(x, y, d) \cdot \cos\left(2\pi f_v x + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right) \right] \right\},$$

$$i = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (2)$$

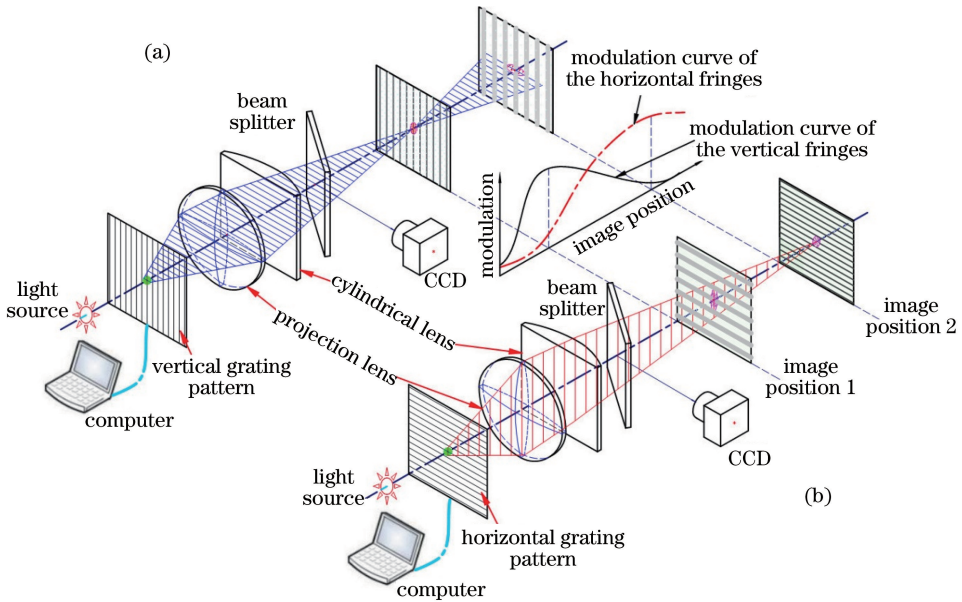


图 1 测量方法原理图。(a) 竖直条纹投影光路图；(b) 水平条纹投影光路图

Fig. 1 Principle diagram of proposed method. (a) Optical path for vertical fringe projection; (b) optical path for horizontal fringe projection

式中： M 为投影系统垂轴的放大率； $r(x, y)$ 为物体表面不均匀的反射率； I_b 为环境背景光强； I_0 为均匀的投影背景光强； $c_v(x, y, d)$ 为离焦量为 d 处的光栅“像面”上的条纹对比度； f_v 为竖直光栅条纹在“像面”上的光栅重复频率。

同理，当计算机控制投影一个灰度分布为(3)式所示的水平正弦光栅条纹时，其光路图如图 1(b) 所示，可在像方得到如(4)式所示的光强分布。

$$g_{hi}(x, y) = 127.5 + 127.5 \cos\left(2\pi \frac{y}{p_h} + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right), i = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (3)$$

$$I_{hi}(x, y) = \frac{r(x, y)}{M^2} \cdot$$

$$\left\{ I_b + I_0 \left[1 + c_h(x, y, d) \cdot \cos\left(2\pi f_h x + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right) \right] \right\} \quad (4)$$

式中： p_h 为水平光栅条纹的周期大小； $c_h(x, y, d)$ 为离焦量 d 处的水平光栅条纹“像面”上的条纹对比度； f_h 为水平光栅条纹在“像面”上的光栅频率。

由于投影系统中加入的柱面镜改变了投影镜头系统水平方向与垂直方向的曲率，进而改变了投影系统对子午光线和弧矢光线的焦距^[21]。根据几何成像原理可知，子午光线与弧矢光线的聚焦位置将分离，且像距与对应的焦距满足高斯公式。

以柱面镜母线与竖直光栅条纹平行的情况为例，对于投影光栅条纹，垂直于光栅方向的光线弥散是使其成像模糊的主要原因。因此，对于竖直光栅条纹而言，其成像模糊的主要原因为弧矢光线；对于水平光栅条纹而言，其成像模糊的主要原因为子午光线。竖直条纹与水平条纹分别在子午光线的像面与弧矢光线的像面成清晰像，而在成像面前后离焦模糊。如图 1 所示，本测量系统中柱面镜的母线与竖直条纹平行，故弧矢光线先于子午光线会聚，使得竖直条纹的“像面”靠前（即图 1 中的 image position 1），水平条纹的“像面”靠后（即图 1 中的 image position 2）。

柱面镜使竖直条纹与水平条纹的“像面”分离，两“像面”之间为竖直条纹后景深与水平条纹前景深的交叉区域，该区域内，竖直条纹与水平条纹的条纹清晰度单调变化，且趋势恰好相反，具体体现为竖直条纹逐渐模糊，水平条纹逐渐清晰。利用这个区域可以构建出所提方法的测量范围。

在结构光三维面形的测量方法中， N 步相移的条纹图常以调制度反映条纹相位质量的好坏^[8]。对于 N 步相移条纹图

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \cdot$$

$$\{1 + C_0(x, y) \cos[\Phi(x, y) + 2\pi \cdot i/N]\}, \quad (5)$$

其调制度可以表示

$$M(x, y) = \sqrt{\left[\sum_{i=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi \cdot i/N) \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi \cdot i/N) \right]^2}, \quad (6)$$

式中: $I_0(x, y)$ 为背景光强; $C_0(x, y)$ 为条纹的对比度; $\Phi(x, y)$ 为投影光栅条纹每个像素点位置的初相位分布; $I_n(x, y)$ 为 CCD 采集的第 n 帧相移条纹图的光强分布。将(5)式代入(6)式化简可得

$$M(x, y) = \frac{1}{2} N I_0(x, y) C_0(x, y). \quad (7)$$

由此可见: 条纹的调制度 $M(x, y)$ 与 $I_0(x, y) C_0(x, y)$ 呈正比关系, 二者之间只相差一个比例因子 $\frac{1}{2} N$ 。

同理, 将(2)式与(4)式进行整理后可得

$$g_{vr}(x, y) = \frac{r(x, y)}{M^2} \left\{ I_b + I_0 \left[1 + c_v(x, y, d) \cdot \cos\left(2\pi f_v x + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right) \right] \right\} = \frac{r(x, y)}{M^2} (I_b + I_0) + \frac{r(x, y)}{M^2} I_0 c_v(x, y, d) \cdot \cos\left(2\pi f_v x + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right), \quad (8)$$

$$g_{hr}(x, y) = \frac{r(x, y)}{M^2} \left\{ I_b + I_0 \left[1 + c_h(x, y, d) \cdot \cos\left(2\pi f_h y + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right) \right] \right\} = \frac{r(x, y)}{M^2} (I_b + I_0) + \frac{r(x, y)}{M^2} c_h(x, y, d) \cdot \cos\left(2\pi f_h y + \frac{i \cdot 2\pi}{N}\right). \quad (9)$$

将(8)式与(9)式代入(6)式, 可得竖直条纹的调制度 $M_v(x, y)$ 与水平条纹的调制度 $M_h(x, y)$, 即

$$M_v(x, y) = \frac{1}{2} N \frac{r(x, y)}{M^2} (I_b + I_0) \frac{r(x, y)}{M^2} c_v(x, y, d), \quad (10)$$

$$M_h(x, y) = \frac{1}{2} N \frac{r(x, y)}{M^2} (I_b + I_0) \frac{r(x, y)}{M^2} c_h(x, y, d). \quad (11)$$

光栅条纹的像在成像面上最清晰, 对比度最大; 在测量区域内, 条纹对比度因离焦逐渐降低, 与对比

度呈比例关系的调制度也有相同的变化趋势。选取竖直条纹的调制度 M_v 与水平条纹调制度 M_h 交叉且单调的区域, 如图 2(a) 所示, 利用两种条纹的调制度, 构造一个能与物理深度位置实现一一映射的参数, 即调制度比 M_R 用来描述和表征测量范围内位置的变化, 以实现物体高度的测量。 M_R 的定义式为

$$M_R = \frac{M_v - M_h}{M_v + M_h} = \frac{c_v(x, y, d) - c_h(x, y, d)}{c_v(x, y, d) + c_h(x, y, d)}. \quad (12)$$

参数 M_R 的分布曲线如图 2(b) 所示。

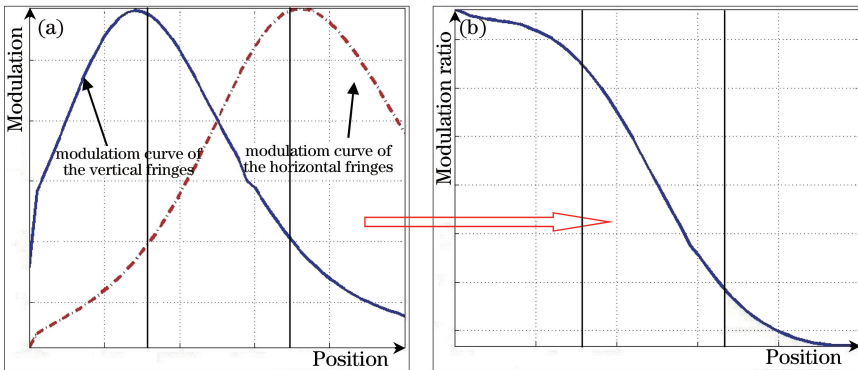


图 2 高度映射建立原理。(a) 两种条纹调制度分布曲线; (b) 参数 M_R 的分布曲线

Fig. 2 Principle of height mapping. (a) Modulation curves of two grating fringes; (b) distribution of parameter M_R

利用相移方法求取竖直条纹与水平条纹的调制度进行测量的方法, 相比于已有的连续相移与垂直扫描方法, 在实现点对点测量的同时减小了测量所需的数据量, 提高了测量速度。同时, 利用

两种条纹的调制度进行测量的方法, 可以在一定程度上减小物体表面反射率及背景光不均匀的影响, 相比于已有的傅里叶变换方法, 不仅增加了信息量, 而且点对点的相移算法避免了傅里叶变换

滤波造成的高频信息丢失,增加了测量的横向分辨率。

2.2 系统标定

系统在进行测量前,需建立 M_R 与实际物理位置的映射关系,即测量高度的标定。系统标定的原理如图 3 所示。投影系统采用的是 DLPC2303 投影机;柱面镜的口径为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,柱面的曲

率半径为 600 mm ;投影 DMD 的分辨率为 $1280\text{ pixel} \times 800\text{ pixel}$; CCD 相机采用的是 PointGreyGS3-U3-15S5M-C,其分辨率为 $1384\text{ pixel} \times 1306\text{ pixel}$;投影光栅图由计算机(PC)生成,周期为 10 pixel ,标定需要扫描的总平面数为 N 。考虑到环境光的噪声和 CCD 非线性效应的影响^[22],采用五步相移来获取条纹调制度。

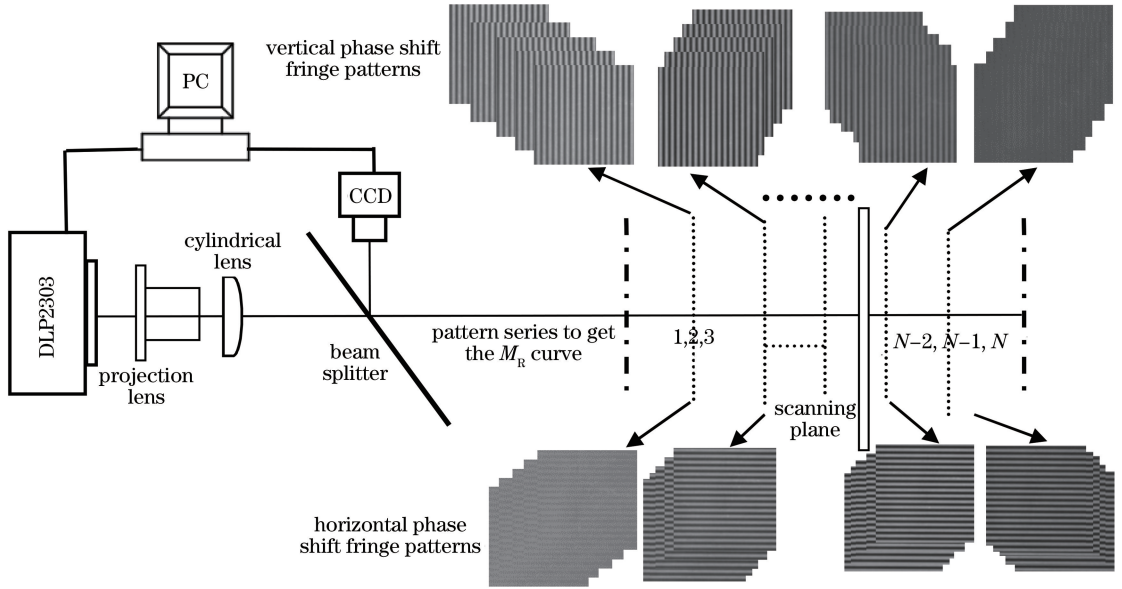


图 3 系统标定原理图

Fig. 3 Principle diagram of system calibration

标定过程中,在投影像方使用一个标准平面沿投影光轴进行扫描,同时 CCD 相机通过半反半透镜观测像方的扫描平面,每移动 5 mm 距离(使用卓立汉光 TSA-300 位移平台,其重复定位精度为 $5\text{ }\mu\text{m}$),分别拍摄竖直条纹与水平条纹的五步相移条纹图,共 10 帧;扫描区域需较完整地包含竖直条纹与水平条纹像的正离焦-“聚焦”-负离焦的变化范围。然后,使用所提方法计算条纹调制度在测量区

域内的分布,进一步计算出 M_R 与实际物理位置的映射关系。

由于投影系统存在像差,在测量空间范围内,每一像素点的调制度在投影像方空间的分布均不同,因此对系统进行标定是有必要的。图 4(a)为 CCD 拍摄的条纹图中几个不同位置的像素点沿扫描轴的调制度分布,横坐标为扫描位置,其起始点距投影镜头约为 55 cm 。不同的像素位置用不同的颜色

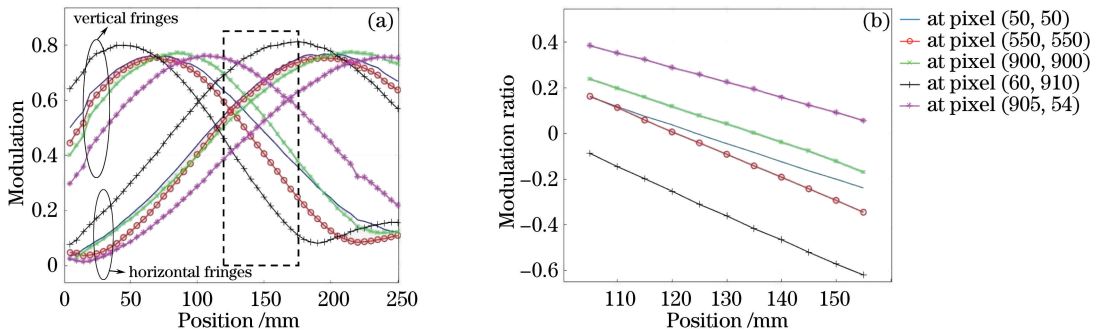


图 4 视场区域几个像素点的调制度图。(a)几个像素点的调制度曲线图;(b)对应像素点测量范围内 M_R 分布

Fig. 4 Measured plots at several pixels: (a) Modulation cross curves; (b) M_R curves inside the purple square area of Fig. 4(a)

进行区分。在图 4(a)中可以看到,投影系统的像面弯曲比较明显,不同位置像素点的条纹调制度最大值的空间位置有明显差异。由于位置测量参数 M_R 需要选择竖直条纹与水平条纹调制度单调且交叉的区域,故像面弯曲的存在将影响测量范围的选取。在对大量像素点(处于 CCD 视场主要区域且能完整地包含待测物体的范围)进行检测后,选取了一个合适的区域为测量范围,如图 4(a)中的虚线方框所示。

对图 4(a)中方框区域测量范围内的调制度进行计算,可以得到其对应的 M_R 分布,如图 4(b)所示。可以看出:系统标定后选取的测量范围为像方空间距离投影镜头 65.5~70.5 cm 的区域,测量范围为 50 mm(以最远离投影系统的平面为参考平面,高度为 0 mm);每个像素点均可得到与之对应的 M_R 曲线,实现了将条纹调制度比与对应高度的

映射;在选取的区域内,各映射曲线具有较好的单调性,且趋近线性关系,有利于实现高度映射。

3 实验结果与分析

3.1 检验平面与标准球面测量实验

为评估所提方法的测量精度,测量了一个检验平面及一个标准球面的面形。

检验平面放置于距参考平面 32.5 mm 的位置。图 5(a)、(b)分别为 CCD 相机拍摄到的检验平面的竖直条纹相移图与水平条纹相移图,检验平面恢复的三维形貌如图 5(c)所示。测量得到平面的高度均值为 32.28 mm,测量误差为 0.22 mm,测量平面的标准差为 0.21 mm。从测量结果可以看出:所提方法对检验平面的测量精度已达到目前已有方法的水平。测量的系统误差主要在建立高度映射关系及获取调制度时产生。

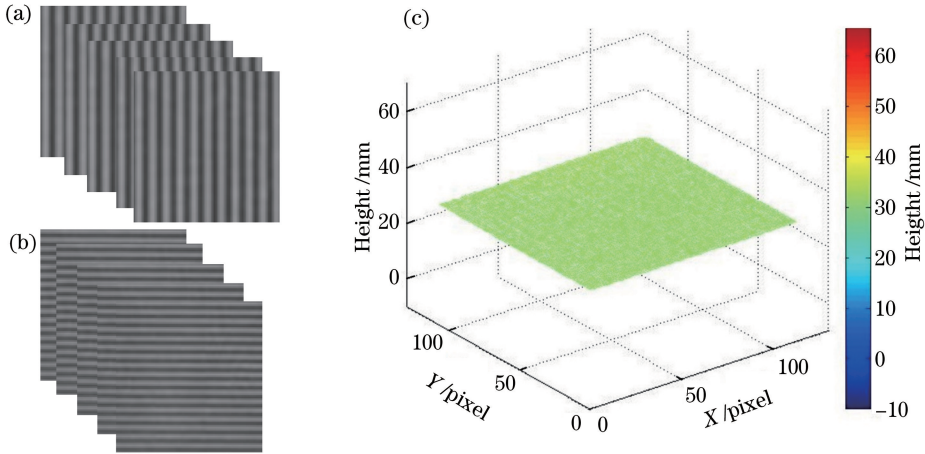


图 5 检验平面的测量结果。(a)检验平面的竖直条纹相移图;(b)检验平面的水平条纹相移图;(c)恢复平面的三维形貌图

Fig. 5 Measurement results of testing plane. (a) Vertical phase-shifting fringe patterns of testing plane;

(b) horizontal phase-shifting fringe patterns of testing plane; (c) 3D shape of reconstructed plane

测量用的标准球面的直径为 50.77 mm(由中国测试计量技术研究院出具检测报告),球面面形的测量结果如图 6 所示。图 6(a)、(b)分别为 CCD 相机拍摄到的标准球面的竖直条纹与水平条纹相移图,恢复的部分标准球面的三维形貌如图 6(c)所示。由于标准球的固定夹具位置超过了球体的一半,故面形恢复区域只选取其未被遮挡的部分有效的球冠区域。对测量得到的球面进行拟合,拟合球面与测量球面之间高度差的标准差为 0.27 mm。

3.2 静态物体测量实验

为了验证所提方法能够以垂直测量的模式实现对复杂陡变物体形面点对点的测量,对一个静态的方台物体进行了测量,待测物体如图 7(c)所示。

图 7(a)、(b)分别为物体的竖直条纹相移图与水平条纹相移图,可以看出,测量系统在物体形貌陡变的位置(物体底部边缘位置)实现了无阴影和无遮挡的测量,条纹图未发生相位形变,在不同的位置只有条纹调制度发生了改变。

采用所提方法计算物体条纹图中竖直条纹与水平条纹的调制度,代入高度映射查找表恢复物体的三维形貌,结果如图 7(d)所示。从图 7(d)中可以看到物体形貌陡变部分得到了较好的重建。测量过程中使用相移算法,实现了调制度的点对点计算。对于测量精度,物体上有两个台阶,如图 7(c)所示,高度分别为 45 mm(stage A)和 25 mm(stage B),其测量结果如表 1 所示。

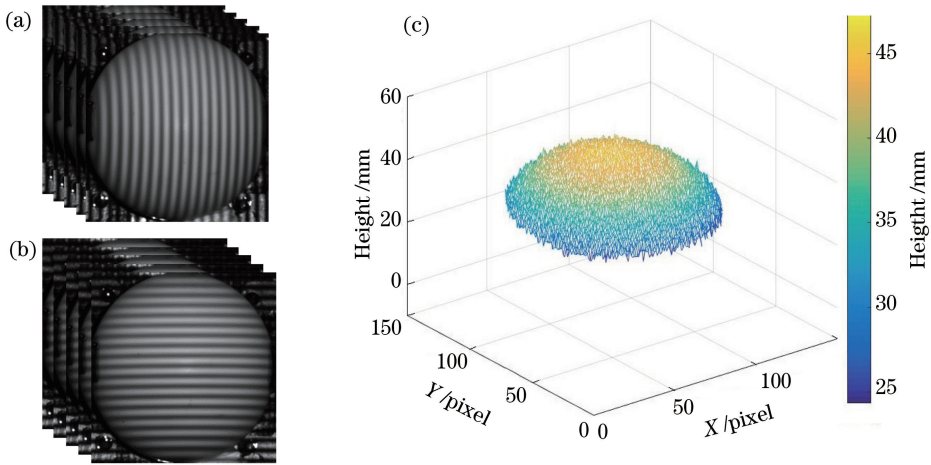


图 6 标准球面的测量结果。(a)标准球面的竖直条纹相移图;(b)标准球面的水平条纹相移图;(c)恢复球面的三维面形图
Fig. 6 Measurement results of standard sphere. (a) Vertical phase-shifting fringe patterns of the standard sphere;
(b) horizontal phase-shifting fringe patterns of standard sphere; (c) 3D shape of reconstructed sphere

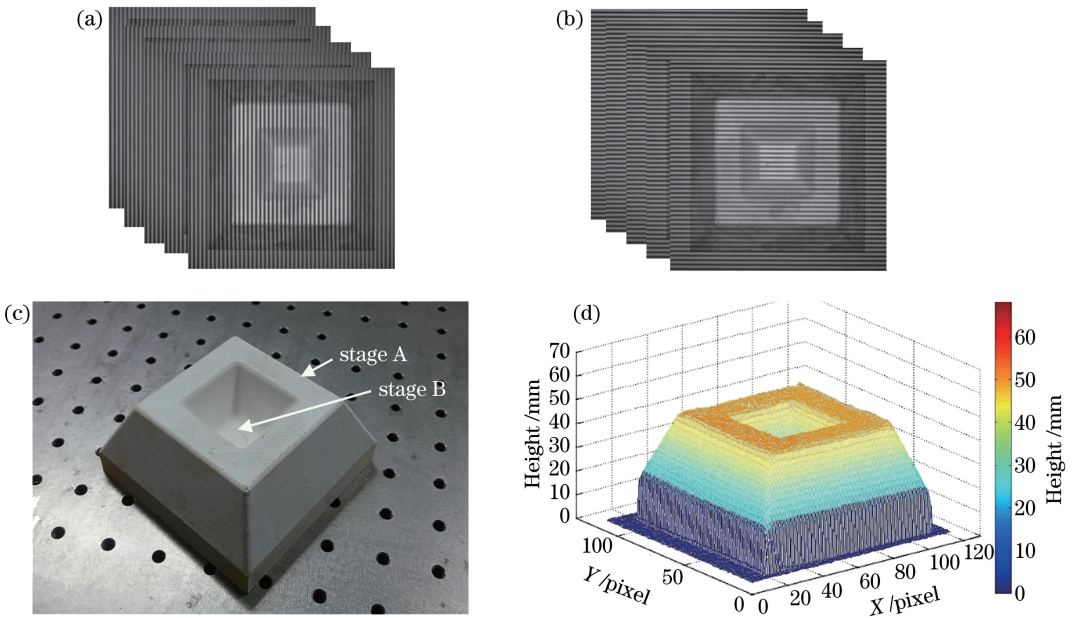


图 7 台阶物体的测量结果。(a)竖直条纹相移图;(b)水平条纹相移图;(c)待测物体实物图;(d)恢复物体的三维面形图
Fig. 7 Measurement results of stepped object. (a) Vertical phase-shifting fringe patterns;
(b) horizontal phase-shifting fringe patterns; (c) picture of object to be tested; (d) 3D shape of reconstructed object

表 1 两个台阶的测量高度及标准差

Table 1 Measured height and standard deviation of each stage

Stage	Actual height /mm	Measurement result	
		Measured height /mm	Standard deviation
A	45.00	45.2720	0.2316
B	25.00	24.6216	0.2092

由表 1 的测量结果可以看出:所提方法对台阶高度与台阶平面面形标准差的测量值已达到了与目前已有方法相当的精度。从图 7(d)所示的物体的重建结果来看,在物体与参考平面接触的交界处,物

体的竖直面与参考平面构成的垂直角面形锐利清晰,相比于连续相移结合垂直扫描方法,在获取较少数据量的情况下,实现了对物体面形的点对点测量;相比于基于傅里叶变换方法,物体面形的陡变高频信息得到了更好的重建。

4 讨 论

通过理论分析及实验验证,可以看出所提出的柱面镜结合相移条纹投影的三维面形垂直测量方法具有以下优势:1)通过电子光栅模板结合柱面镜投影的方式实现了垂直三维面形测量,测量系统无需

复杂的扫描机构及同步触发控制系统,结构更加简单。2)所提方法使用五步相移算法得到竖直条纹与水平条纹的调制度,系统标定完成后只需10帧物体条纹图即可恢复物体的三维面形,相比于连续相移与垂直扫描的调制度测量轮廓术,减少了测量数据量;相比于正交光栅结合柱面镜投影方法,所提方法实现了调制度及三维面形的点对点计算,虽然牺牲了测量速度但提高了测量精度,避免了傅里叶变换滤波导致的高频信息丢失的不足。3)使用电子光栅模板便于更改光栅条纹的周期,并且可以实现精确相移,相比于使用物理光栅模板,增加了测量系统的灵活性;所提方法的测量范围可以根据需要更改,通过调整光栅的周期(实现更改条纹的景深范围)及调整柱面镜的曲率(实现更改两种条纹“像面”的分离距离)即可实现。

但所提方法也存在一些不足。投影系统中的柱面镜会在一定程度上引入额外像差,使得两种条纹的“像面”在空间发生弯曲,从而影响了两种条纹调制度交叉且单调的区域,进而减小了测量范围。可以通过改善柱面镜的设计来减小额外的像面弯曲,从而在一定程度上增大测量范围。此外,随着投影和拍摄硬件技术的提高,所提方法的测量速度还有提高的空间,例如更高精度的灰度投影可实现只需3步相移即可得到比较准确的调制度信息,只需拍摄两种相移条纹图(共6帧)即可完成调制度的计算及测量,届时数据量的减少将使测量时间变为现在的3/5。

5 结 论

为兼顾调制度测量轮廓术的测量速度与测量精度,提出了一种新的基于相移与调制度比的调制度轮廓术测量方法。该方法使用电子光栅模板,通过一个由柱面镜与普通投影镜头组成的特殊投影系统,将竖直与水平两组相移正弦条纹依次投射在被测物体上,并采用相移算法得到正弦条纹经物体调制的调制度分布,最后利用该调制度和高度的映射关系恢复出物体的三维面形。相比于连续相移与垂直扫描的调制度测量轮廓术,所提方法减少了数据量,提高了测量速度;相比于正交光栅结合柱面镜投影的方法,避免了傅里叶变换滤波导致的高频信息丢失的不足。实验结果证明了所提方法的可行性和有效性。随着投影设备与采集设备性能的进一步提高,所提方法的测量速度还可以进一步提高,在快速垂直测量领域具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [2] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- [3] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [4] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [5] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] Liu Y K, Evelyn O, Yang Z, *et al.* A one-dimensional phase-shift technique based on dual-frequency crossed fringe for phase measuring deflectometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0308005.
刘元坤, Evelyn Olesch, 杨征, 等. 基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308005.
- [7] Liu C, Gai S Y, Da F P. Sub-regional phase error compensation for structural light measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604002.
刘超, 盖绍彦, 达飞鹏. 结构光测量中分区域相位误差补偿方法研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0604002.
- [8] Su X Y, von Bally G, Vukicevic D. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. *Optics Communications*, 1993, 98(1/2/3): 141-150.
- [9] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [10] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [11] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- [12] Özder S, Kocahan Ö, Coşkun E, *et al.* Optical phase distribution evaluation by using an S-transform

- [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 591-593.
- [13] Bai J X, Qu X H, Feng W, *et al.* Separation method of overlapping phase-shift gratings in three-dimensional measurement of double projection structured light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112001
白景湘, 曲兴华, 冯维, 等. 双投影结构光三维测量中重叠相移光栅的分离方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1112001.
- [14] Yoshizawa T, Shinoda T, Otani Y. Uniaxial rangefinder using contrast detection of a projected pattern [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4190: 115-122.
- [15] Takeda M, Aoki T, Miyamoto Y, *et al.* Absolute three-dimensional shape measurements using coaxial and coimage plane optical systems and Fourier fringe analysis for focus detection [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 61-68.
- [16] Dou Y F, Su X Y, Chen Y F, *et al.* A flexible fast 3D profilometry based on modulation measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3): 376-383.
- [17] Shao S Y, Xu N. Optical three-dimensional profilometry based on modulation ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 435-438.
邵双运, 徐楠. 基于调制度比的光学三维测量轮廓术 [J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 435-438.
- [18] Dou Y F, Su X Y, Chen Y F, *et al.* A fast modulation measurement profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1858-1862.
窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非, 等. 一种快速的调制度测量轮廓术 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1858-1862.
- [19] Lu M T, Su X Y, Cao Y P, *et al.* Modulation measuring profilometry with cross grating projection and single shot for dynamic 3D shape measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 103-110.
- [20] Zhong M, Su X Y, Chen W J, *et al.* Modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31620-31634.
- [21] Smith W J. *Modern optical engineering: the design of optical systems* [M]. 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc. 2012: 105-124.
- [22] Hoang T, Pan B, Nguyen D, *et al.* Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 1992-1994.