

发散圆形条纹投影的共轴三维测量方法

陈琦立, 陈文静*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 在基于条纹投影的三维测量方法中, 圆形正弦条纹比线性条纹具有更高的相位灵敏度。提出一种基于发散投影光线几何关系的圆形条纹投影共轴三维测量方法。沿光轴方向移动投影仪使得物面上的条纹发生变化, 利用电荷耦合器件 (CCD) 采集对应的条纹图, 并从中解算出不同的相位场。利用投影仪位移带来的投影光线变化建立起相位信息和物体高度间的约束, 不需要获取复杂的系统参数就能重建物面的高度信息, 减少测量中存在的阴影和遮挡问题。仿真和实验结果均表明了所提方法的有效性和实用性。

关键词 测量; 三维面形测量; 圆形条纹投影; 发散投影; 共轴系统

中图分类号 O438 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1912004

Coaxial Three-Dimensional Measurement Method of Divergent Circular Fringe Projection

Chen Qili, Chen Wenjing*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract In the three-dimensional measurement methods based on fringe projection, circular sinusoidal fringes have higher phase sensitivity than linear fringes. Therefore, a coaxial three-dimensional measurement method of circular fringe projection is proposed, which is based on the geometric relationship of divergent projection rays. Specifically, the fringes on the object surface are changed by the movement of the projector along the optical axis, the charge-coupled device (CCD) is employed to collect the corresponding fringe patterns, and different phase fields are calculated from these fringe patterns. The constraints between phase information and height of the object are established by the use of the change in projection rays caused by the movement of the projector. In this way, the height information of the object surface can be reconstructed without obtaining complex system parameters, and the problems of shadow and occlusion can be reduced in the measurement. Simulations and experimental results verify the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words measurement; three-dimensional surface measurement; circular fringe projection; divergent projection; coaxial system

1 引言

结构光投影三维测量方法具有非接触、硬件配置简单、测量精度高和速度快等优势, 进而得到了深入研究和快速发展, 并被广泛应用于工业检测、逆向工程、虚拟现实和文物保护等领域中^[1-6]。相关测量系统可以分为共轴系统和非共轴系统。

非共轴系统的投影光轴与成像光轴之间存在一定的夹角, 投影仪投射参考条纹到被测物面上, 相机电荷耦合器件 (CCD) 采集的条纹会出现形变。通过计算参考条纹和变形条纹之间的相位差来得到被测物体的

面形, 具有较高的测量精度。傅里叶变换轮廓术^[7] (FTP)、相位测量轮廓术^[8-9] (PMP) 和小波变换轮廓术^[10] (WT) 等方法采用非共轴的方式来测量物体的三维形貌。然而, 在测量高度起伏比较大的物体时, 投影仪和相机的夹角会带来阴影和遮挡问题。在采集的条纹图中, 缺乏编码信息的区域难以获得正确的相位来恢复高度信息。

在共轴测量系统中, 投影光轴和成像光轴重合, 从原理上有效避免了阴影和遮挡问题。例如, 调制度测量轮廓术^[11-13] (MMP) 是典型的共轴测量方法, 其通过测量系统与被测物体之间的相对移动来建立测量空间

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-03-28; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (62075143, U20A20215)

通信作者: *chenwj0409@scu.edu.cn

内每一点的调制度分布曲线,寻找物体表面不同高度对应的最大调制度位置来计算高度信息。测量精度依赖于测量或者标定过程中的轴向扫描分辨率,通常情况下,该方法的测量速度和精度低于基于相位测量的方法。

共轴测量方法固有的可见即可测量的优势吸引着许多学者探究利用共轴测量系统结合相位求解的方式,在避免阴影和遮挡的情况下提高物体重建的精度。他们利用共轴系统中投影装置本身的发散光线或相机的成像光线之间的三角关系来完成深度信息的测量,例如:Liu等^[14]利用同轴投影的弱三角关系,根据投影的散斑或条纹图案相对于参考位置的二维像素位移量来评估深度的变化,从而获得物体的高度信息;Sicardi-Segade等^[15]利用相机所拍摄的条纹图的频率随物体到相机之间的距离而改变的特点,通过计算物体和参考平面之间的相位差来恢复物体的高度;Ma等^[16]提出了同轴条纹投影的多距离几何约束,建立了绝对相位和物体世界坐标之间的几何关系模型,利用最小二乘获得了物体的三维坐标信息;Zhao等^[17]提出了圆条纹投影轮廓术,该方法通过远心镜头计算被测点到投影仪光轴的距离,利用相位来计算投影的发散角,并根据三角关系来恢复物体高度;Zhang等^[18]根据被测点相位值和高度的乘积与该点到投影仪光轴之间的距离成正比的关系,利用远心镜头对该乘积矩阵进行标定来恢复物体的高度,避免了复杂耗时的系统标定过程。

以上基于共轴或者平行轴的测量方法大都需要进行复杂的系统参数标定或在成像端使用远心镜头进行图像采集。远心镜头具有低失真、一定范围内放大率固定等优点,但也存在视场小、价格昂贵等不足,进而无法用于较大视场的三维检测^[19]。为扩大测量范围和提高系统标定的简易性,本文提出了一种基于发散投影光线几何关系的共轴三维测量方法。通过移动投影仪使得投影在物体表面的条纹图相位发生变化,利用投影仪的位移量建立起相位信息和物体高度信息间的约束关系。基于所提方法的测量系统用普通的非远心镜头即可完成物体的高度重建,扩大了测量范围。利用基于投影和成像的针孔模型建立了虚拟结构光发散投影的共轴测量系统,完成了计算机模拟和误差分析,并通过实验对所提方法的有效性进行了验证。

2 基本原理

2.1 圆形条纹的生成

传统条纹投影轮廓术中常用的结构图是竖直条纹或水平条纹,这些条纹具有线性载频且相位计算方法简单。然而,研究表明^[20],圆条纹相比线性载频条纹具有更高的相位灵敏度,其条纹图的强度表达式为

$$I(u_p, v_p) = a + b \cos\left[\frac{2\pi r(u_p, v_p)}{T}\right], \quad (1)$$

式中: (u_p, v_p) 表示投影仪中数字微镜器件(DMD)平面

的像素坐标; a 和 b 分别表示预设的背景光强和调制度; T 表示条纹的像素周期; $r(u_p, v_p)$ 表示条纹图中像素点到条纹圆心的距离,相应的表达式为

$$r(u_p, v_p) = \sqrt{(u_p - u_{p0})^2 + (v_p - v_{p0})^2}, \quad (2)$$

式中: (u_{p0}, v_{p0}) 可看作是DMD平面的几何中心。该中心点的相位值为零,圆条纹的相位分布由各像素点到几何中心的距离决定。

2.2 圆形条纹的相位计算

利用相移算法和相位展开方法可以获得圆条纹携带的相位信息。将具有固定圆心但相互之间存在规定相移量的多帧编码条纹图投影到被测物体表面上,相机采集到的条纹光强分布可以表示为

$$I_n(u_c, v_c) = A(u_c, v_c) + B(u_c, v_c) \cos\left[\varphi(u_c, v_c) - \frac{2\pi n}{N}\right], \quad (3)$$

式中: (u_c, v_c) 表示CCD的像素坐标; $A(u_c, v_c)$ 和 $B(u_c, v_c)$ 分别表示条纹的背景强度和调制强度; $n = 0, \dots, N-1$ 表示移相次数; $\varphi(u_c, v_c)$ 表示包裹相位,可利用最小二乘法求得,其表达式为

$$\varphi(u_c, v_c) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(u_c, v_c) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(u_c, v_c) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}, \quad (4)$$

计算得到的相位截断在 $(-\pi, \pi)$ 之间,对其进行相位展开^[21-24]可得到连续相位。需要说明的是,当使用空间相位展开算法时,由于圆条纹的圆心处相位值恒定,故可直接作为参考点来计算绝对相位,而不需要设置额外的标记点作为绝对相位计算的参考点。

2.3 发散投影的共轴测量

图1为本文搭建的共轴测量系统的示意图,该系统由投影仪、相机、分束镜、参考平面和一维平移台组成。图中两条虚线分别为投影仪和相机的光轴,与分束镜的夹角为 45° ,以实现共轴测量。投影仪放在一维平移台上方,并使得投影仪光轴方向与平移台的移动方向一致,均垂直于参考面。在距离参考平面的不同位置处,投影仪将编码的圆条纹投影到放置在参考面上的被测物体表面上,相机拍摄携带物体信息的条纹图案。为扩大测量视场,相机使用焦距合适的非远心镜头,不局限于远心镜头。

在测量过程中,保持分束镜、物体和相机的相对位置关系固定,则任意物点在CCD上的像点的像素坐标将保持不变。根据发散投影的性质,在移动投影仪的过程中,物体表面接收到的条纹周期宽度会发生变化,即物面上的编码相位会发生变化,CCD像素点所采集的相位也会随之变化。为不失一般性,以投影仪端任意像素出射的光线为例,测量过程中投影仪在两个位置处的投影光线的几何模型如图2所示。

投影仪和相机均用针孔模型来描述。在图2中, O_1 和 O_2 分别表示投影仪在两个位置处的光心,投影

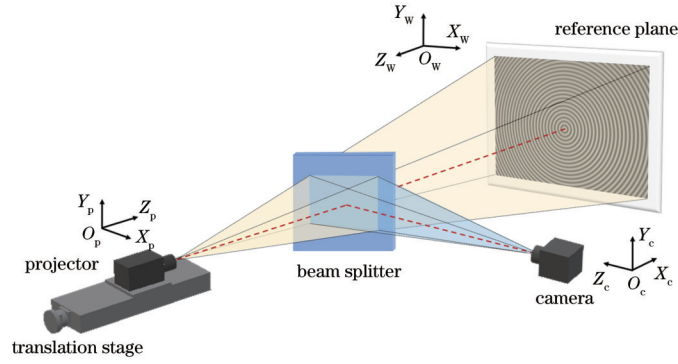


图 1 共轴测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coaxial measurement system

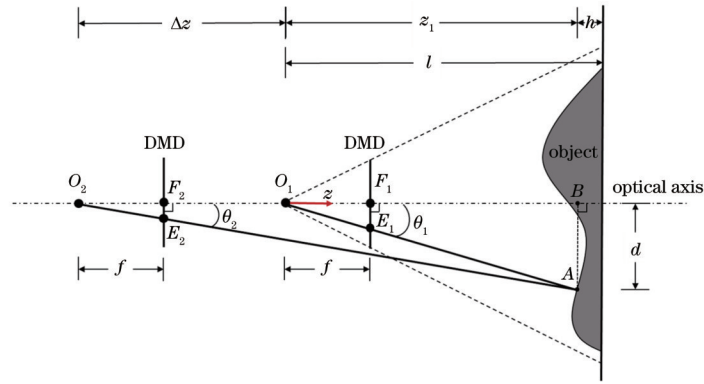


图 2 投影仪在两个投影位置时的光线几何模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ray geometric model of projector at two projection positions

仪坐标系的 Z 轴沿光轴方向设置。投影仪的光轴和 DMD 平面分别垂直相交于 F_1 和 F_2 点。 f 为投影仪的焦距, 移动前后该值保持不变。初始位置处的投影仪光心与参考平面间的距离为 l 。投影仪光心处发出大量的发散光线, 并照射到物体表面上。设物面上高度为 h 的一点 A 相对于 O_1 的高度为 z_1 , 到光轴的垂直距离为 d , 作垂线与光轴的交点记作 B 。假设 A 点被 O_1 发出的一条光线照射, 该条光线与光轴的夹角为 θ_1 , 与 DMD 平面交于 E_1 点。投影仪沿光轴平移 Δz 后, A 点被 O_2 发出的一条光线照射, 该条光线与光轴的夹角为 θ_2 , 与 DMD 平面交于 E_2 点。由发散投影可知, E_1 和 E_2 对应于 DMD 平面上两个不同的像素点。

由三角形的相似性原理可知, $\Delta O_1 E_1 F_1$ 和 $\Delta O_1 A B$ 存在的几何关系为

$$\tan \theta_1 = \frac{L_{E_1 F_1}}{f} = \frac{d}{z_1}, \quad (5)$$

式中: $L_{E_1 F_1}$ 为 DMD 平面的像素点 E_1 到几何中心的物理距离。

同理, 当投影仪移动到 O_2 时, $\Delta O_2 E_2 F_2$ 和 $\Delta O_2 A B$ 满足几何关系

$$\tan \theta_2 = \frac{L_{E_2 F_2}}{f} = \frac{d}{z_1 + \Delta z}, \quad (6)$$

式中: $L_{E_2 F_2}$ 为 DMD 平面的像素点 E_2 到几何中心的物理距离。根据式(1), 利用像素点对应的相位信息反求

得 $L_{E_1 F_1}$ 和 $L_{E_2 F_2}$, 即

$$\begin{cases} L_{E_1 F_1} = r_1(u_p, v_p) \mu_p = \frac{\varphi_{E_1}(u_p, v_p) T}{2\pi} \mu_p \\ L_{E_2 F_2} = r_2(u_p, v_p) \mu_p = \frac{\varphi_{E_2}(u_p, v_p) T}{2\pi} \mu_p \end{cases}, \quad (7)$$

式中: (u_p, v_p) 为投影仪的像素坐标; r_1 和 r_2 为像素点到几何中心的像素距离; μ_p 为单个像素的尺寸; $\varphi_{E_1}(u_p, v_p)$ 和 $\varphi_{E_2}(u_p, v_p)$ 为 DMD 上的像素点 E_1 和 E_2 所对应的投影条纹的相位值。将式(7)代入到式(5)和式(6)中, 化简后可以得到

$$\begin{cases} z_1 = \frac{2\pi d f}{\mu_p \varphi_{E_1}(u_p, v_p) T} \\ z_1 + \Delta z = \frac{2\pi d f}{\mu_p \varphi_{E_2}(u_p, v_p) T} \end{cases}, \quad (8)$$

E_1 和 E_2 点的相位值等价于 A 点的相位值, 对应于 CCD 上的同一像素点获得的投影仪移动前后的相位 $\varphi_{A_1}(u_c, v_c)$ 和 $\varphi_{A_2}(u_c, v_c)$, z_1 可由式(8)解出, 即

$$z_1 = \frac{\Delta z \frac{\varphi_{E_2}(u_p, v_p)}{\varphi_{E_1}(u_p, v_p)}}{1 - \frac{\varphi_{E_2}(u_p, v_p)}{\varphi_{E_1}(u_p, v_p)}} = \frac{\Delta z \varphi_{A_2}(u_c, v_c)}{\varphi_{A_1}(u_c, v_c) - \varphi_{A_2}(u_c, v_c)}, \quad (9)$$

从式(9)中可以看出,与 A 点高度信息相关的 z_1 可通过投影仪的一次位移和相位信息恢复。

在实际过程中,如果仅使用两个位置来计算,随机因素会引起较大的测量误差。为提高测量精度,可以增加投影的移动次数,利用多个位置的信息来减小误差。以 n 次平移为例,可得

$$\begin{cases} z_1 = \frac{2\pi df}{\mu_p \varphi_1 T} \\ z_1 + \Delta z = \frac{2\pi df}{\mu_p \varphi_2 T} \\ \vdots \\ z_1 + (n-1)\Delta z = \frac{2\pi df}{\mu_p \varphi_n T} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 表示投影仪在不同位置处 A 点对应的相位值。将式(10)用矩阵形式可表示为

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varphi_1 \\ 1 & -\varphi_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\varphi_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2\pi df}{\mu_p T} \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta z \varphi_2 \\ \vdots \\ (n-1)\Delta z \varphi_n \end{bmatrix}, \quad (11)$$

通过最小二乘法即可解出 z_1 及其所对应的参数信息。最后,对于所有物点转换到世界坐标系中重建物体的高度 h ,可以得到

$$h(u_c, v_c) = l - z(u_c, v_c). \quad (12)$$

根据以上推导得到的发散投影几何关系,可以对任意一个除圆心位置外的物点进行三维重建。因为投影仪在沿光轴移动的过程中,圆心处的相位变化量始终为 0,所以无法对该点进行高度重建,可以通过在圆心位置附近插值补偿或者将物体放置在除圆心外的其他方式的方式来解决问题。

2.4 结构光系统建模

为了更真实地模拟非远心光路的结构光测量系统,本文基于针孔模型对条纹投影和成像系统进行了计算机建模。建立世界坐标系、相机坐标系和投影仪坐标系之间的转化关系。以投影仪端为例,世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 与像素坐标 (u_p, v_p) 之间的转化关系为

$$s \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^p & \gamma_p & u_0^p \\ 0 & f_v^p & v_0^p \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R_p, T_p] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = A_p [R_p, T_p] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: s 为尺度因子; A_p 为投影仪的内参矩阵,其中 (f_u^p, f_v^p) 为 u 轴、 v 轴两个方向上的归一化焦距, (u_0^p, v_0^p) 为主点坐标, γ_p 为倾斜因子; R_p 和 T_p 为投影仪的外参矩阵,分别表示世界坐标系和投影仪坐标系之间的旋转矩阵和平移矩阵。为简化表示,用 P_p 和 P_w 表示投影仪的像素坐标和其出射光线上点的世界坐标,则式

(13)可写成

$$sP_p = A_p [R_p, T_p] P_w, \quad (14)$$

同理,相机模型表示为

$$sP_c = A_c [R_c, T_c] P_w, \quad (15)$$

式中: P_c 为相机的像素坐标; A_c 为相机的内参矩阵; R_c 和 T_c 为相机的外参矩阵。两个外参矩阵将相机和投影仪在世界坐标系中的位置连接起来,再结合各自的内参矩阵,即可建立 CCD 和 DMD 之间的像素点映射关系。

3 计算机模拟

利用 2.4 节中的投影成像关系对非远心结构光投影成像系统进行建模。投影仪和相机位置可以根据测量要求来设置,将投影和成像光轴的夹角设置为 0,搭建共轴投影-成像系统如图 3 所示,其中 O_c 为虚拟相机的光心, O_p 为虚拟投影仪的光心。参考坐标系建立在初始位置处的投影仪坐标系上,基于该模型仿真了严格共轴和存在一定误差情况下的条纹投影-成像过程和物面重建结果。

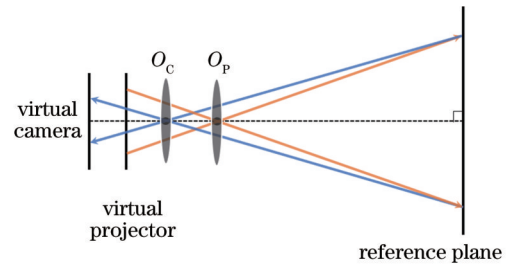


图 3 共轴投影-成像模型

Fig. 3 Coaxial projection-imaging model

投影仪的内参数设置为:分辨率为 $700 \text{ pixel} \times 700 \text{ pixel}$, 单个像素的物理尺寸为 $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$, 焦距为 16 mm 。相机的内参数设置为:分辨率为 $900 \text{ pixel} \times 900 \text{ pixel}$, 单个像素的物理尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 焦距为 16 mm 。在共轴情况下,测量一个高度为 10 mm 的平面,对应图 2 中的参数设置为参考平面到投影仪光心的距离为 $l=700 \text{ mm}$, 待测平面高度为 $h=10 \text{ mm}$, 待测平面到投影仪的距离为 $z_1=690 \text{ mm}$, 每次投影仪的平移量为 $\Delta z=20 \text{ mm}$ 。

按照式(1)和式(2)并使用四步相移法对应的相移量来编码投影条纹,投影圆条纹的周期为 $T=20 \text{ pixel}$, 根据式(14)和式(15)所述关系来得到相机采集的条纹。对投影仪进行 4 次平移,相机记录的投影仪在 5 个位置 (L_p) 投射的圆形条纹如图 4 所示。

由于相机 CCD 的视场大于投影仪的视场,图 4 中的黑色区域表示 CCD 中强度未赋值的像素点。可以发现,随着投影仪到平面间距离的变化,相机拍回的条纹图案大小和周期均发生了变化,符合发散投影特点。考虑到实验中拍摄的条纹会受到噪声的影响,在生成的圆条纹图案中添加均值为 0, 方差为 0.05 的高斯白噪声。对于每个投影位置,相机采集 4

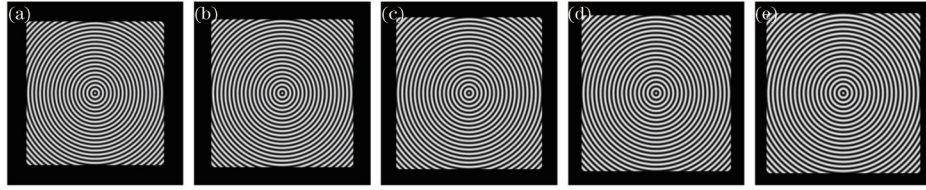


图 4 不同 L_p 下虚拟相机采集的条纹图。(a) $L_p=690$ mm; (b) $L_p=710$ mm; (c) $L_p=730$ mm; (d) $L_p=750$ mm; (e) $L_p=770$ mm
 Fig. 4 Fringe patterns captured by virtual camera under different L_p . (a) $L_p=690$ mm; (b) $L_p=710$ mm; (c) $L_p=730$ mm; (d) $L_p=750$ mm; (e) $L_p=770$ mm

帧相移图来计算截断相位,并以圆心为起始点用洪水相位展开算法获得绝对相位,如图 5 所示。利用式

(9)~(12)计算待测平面的高度,其平面重建结果如图 6 所示。

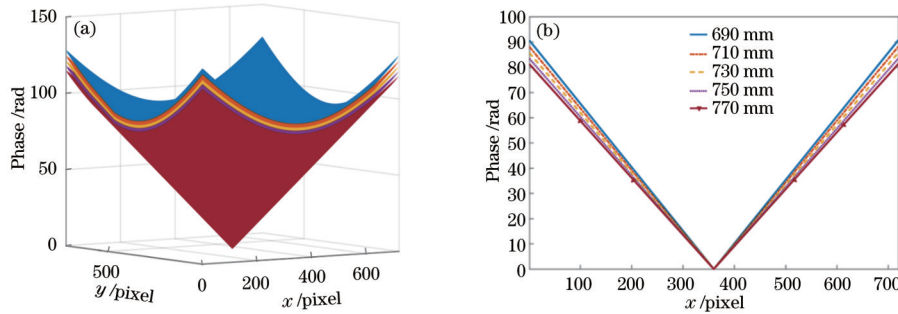


图 5 5 个投影位置对应的绝对相位。(a) 三维图; (b) 过圆心的绝对相位截面图
 Fig. 5 Absolute phases corresponding to five projection positions. (a) Three-dimensional graph; (b) section of absolute phases passing through center of circle

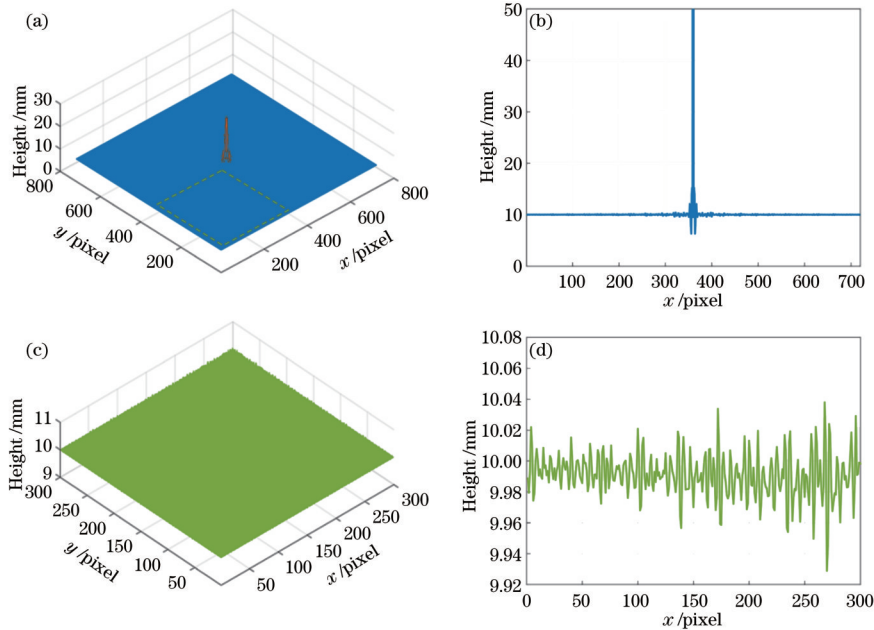


图 6 平面重建结果。(a) 全场高度信息; (b) 过圆心的一行高度剖面图; (c) 远离圆心区域的高度信息; (d) 远离圆心区域的一行高度剖面图
 Fig. 6 Planar reconstruction results. (a) Whole height information; (b) height section of row passing through center of circle; (c) height information of area away from center of circle; (d) height section of row away from center of circle

图 6(a) 为整个平面的重建结果,从图 6(b) 所示的过圆心的一行高度剖面图可见,圆心及其附近区域由于相位变化量较小,故该区域测量精度受噪声的影响较大。图 6(c) 和图 6(d) 为截取的离开圆心区域的高

度分布和剖面图。为比较投影仪移动次数对重建结果精度的影响,分别模拟投影仪移动 1~4 次的情况,并计算出待测平面高度误差的标准差,其结果如表 1 所示。

从表 1 中可以发现,利用多次位移的相位信息可以降低重建高度的误差,提高重建的精度。在实际中需要考虑投影仪的景深问题,确保在 CCD 采集图像清楚的范围内移动投影仪。为进一步说明所提方法的实用性,对图 7 中的仿真阶梯圆台进行重建。仿真物体中三个台阶高度从低到高依次为 9, 18, 27 mm。

阶梯圆台的重建结果如图 8(a) 所示,其中对圆心区域利用插值补偿的方法恢复其高度信息。图 8(b) 为重建物体的一行剖面图,从下到上每个台阶面的重建高度均值分别为 0.003 (\bar{h}_0), 8.998 (\bar{h}_1), 18.017 (\bar{h}_2), 27.116 (\bar{h}_3) mm。重建结果的误差分布如图 8

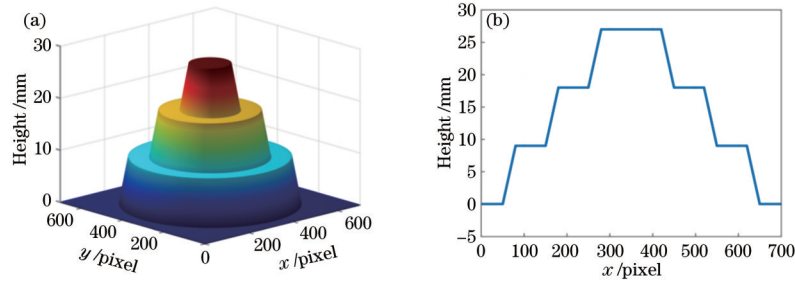


图 7 阶梯圆台。(a) 三维图;(b) 截面图

Fig. 7 Ladder round platform. (a) Three-dimensional view; (b) sectional view

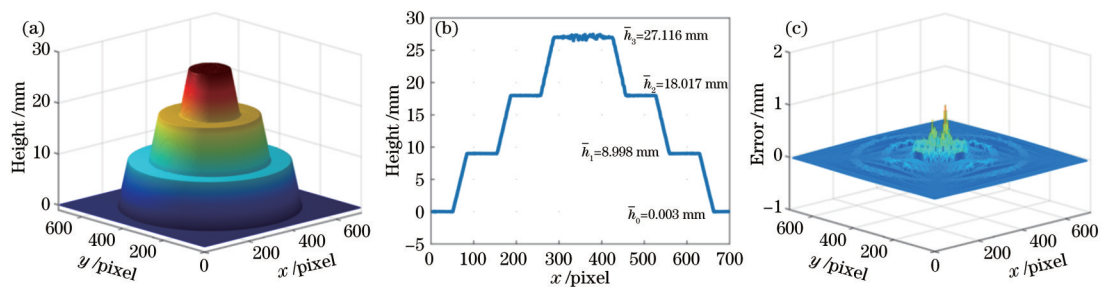


图 8 阶梯圆台的仿真结果。(a) 重建结果;(b) 第 360 行的高度截面图;(c) 误差分布

Fig. 8 Simulation results of ladder round platform. (a) Reconstruction result; (b) height section at 360th line; (c) error distribution

为了研究未严格共轴引起的误差,在投影光轴和成像光轴之间设置一定的小角度,模拟中分别取 2° 、 4° 和 6° 。对图 9 中的椭球体进行仿真,其最大高度为 20 mm,重建结果如图 10 所示。

测量误差的标准差分别为 0.0443, 0.0432, 0.0446 mm。从重建结果可知,当投影仪和相机未严

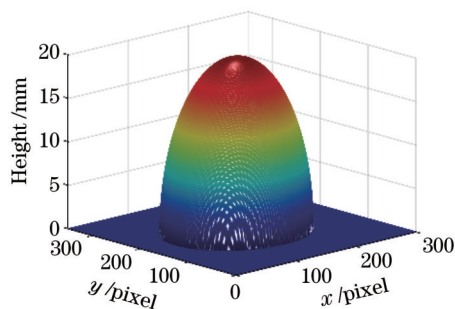


图 9 待测物体

Fig. 9 Object to be measured

表 1 不同位移次数的重建精度

Table 1 Reconstruction accuracy of different movement times

Movement time	Standard deviation / mm
1	0.1348
2	0.0723
3	0.0486
4	0.0361

(c) 所示。可以看出,靠近圆心区域的测量误差较大,计算得到的整体测量误差的标准差为 0.1652 mm,除去圆心区域的标准差为 0.0426 mm。

格共轴时,利用所提方法仍能完成面形的重建,且测量误差在允许范围内。因此,在实验操作中,允许相机的光轴轻微偏离投影仪光轴,这就保证了共轴测量系统的搭建具有一定的灵活性。

4 实验

为了验证所提方法的可行性,进行初步实验验证,实验装置如图 11 所示。搭建的测量系统由一台数字投影仪(分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$)、一台 IDS UI-124xSE-M 相机(分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 镜头焦距为 16 mm)、一块分束镜、PI 精密线性位移平台(型号为 M-406.62S, 平移范围为 150 mm, 平移精度为 $0.1 \mu\text{m}$)和计算机组成。

在原理和仿真中,默认投影仪的中心像素点为光轴与投影仪像素阵列的交点,并将编码圆条纹的圆心置于投影仪像素平面的物理中心处。然而,在实际情况下,投影仪光轴与 DMD 平面的交点,即投影仪的主点位置并非与物理中心完全一致。为了提高测量精

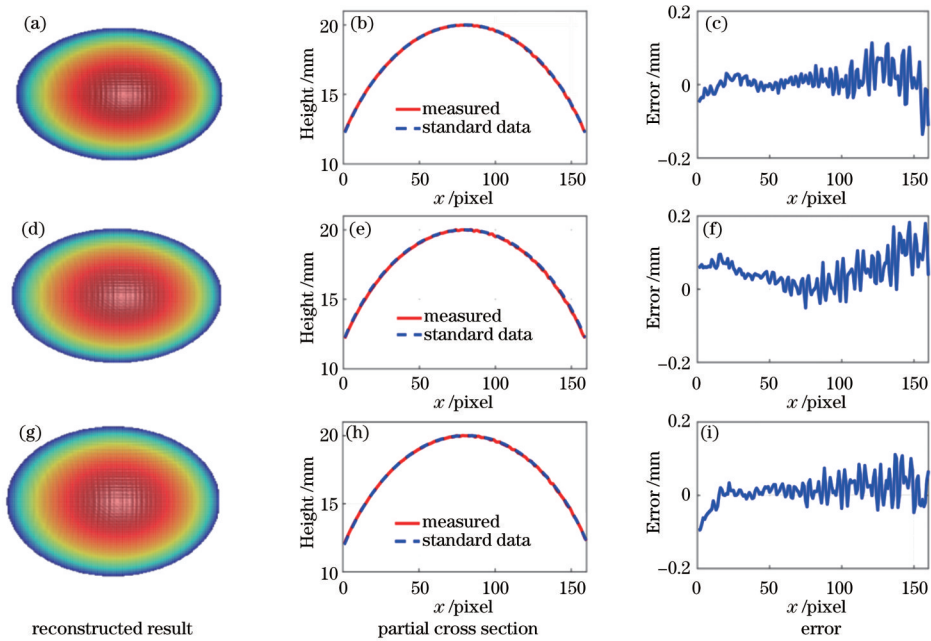


图 10 不同小角度下椭球体的仿真结果。(a)~(c) 2°; (d)~(f) 4°; (g)~(i) 6°

Fig. 10 Simulation results of ellipsoid under different small angles. (a)~(c) 2°; (d)~(f) 4°; (g)~(i) 6°

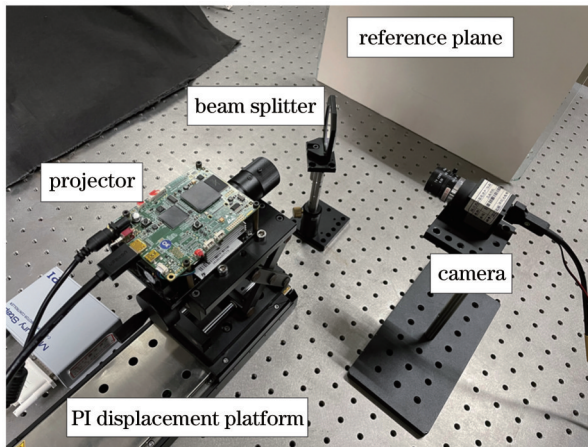


图 11 实验装置图

Fig. 11 Experimental setup

度,需先对投影仪进行标定,获得其主点位置坐标,并将其作为待投影圆条纹的圆心坐标。采用参考文献[25]中的方法,将投影仪当作逆向相机,对实验中的投影仪进行标定,获得主点坐标。表 2 分别给出投影仪在三个位置处标定所得的主点坐标。因此,将像素坐标(647,368)设为圆条纹的圆心坐标,并将按此生成的圆条纹作为待投影条纹图。

表 2 各个位置的主点标定结果

Table 2 Main point calibration results of each position

Position	(u_{p0}, v_{p0})
1	(646.64, 367.55)
2	(647.32, 368.45)
3	(647.18, 367.74)

为保证投影仪沿光轴方向移动,需预先调整好投影仪在平移台上的姿态。具体操作过程为投影仪投射一帧圆条纹到白板上,记录其圆心所在的位置,计算机控制 PI 平移台驱动投影仪前后移动,通过不断调整投影方向和平移台的滑道位置,使得移动过程中投影的圆心位置和记录的圆心位置重合,以此确保投影仪的光轴方向平行于平移台的移动方向。同理,对相机的位置进行调整,使两者光轴基本保持同轴。在实验前,调整投影仪焦距使条纹图案清晰后保持焦距固定,测得其景深范围为 5~6 cm。在实验过程中,将投影仪平移两次,每次平移的间隔为 25 mm。在每个位置处使用四步相移法,将周期为 20 pixel 的相移圆条纹依次投射到物体上,并利用相机采集对应的反射条纹图。考虑到镜头存在畸变,先对采集的图像进行去畸变处理,以减小镜头畸变对测量结果的影响。对条纹图进行解调获得投影在待测物上的相位,利用式(11)和式(12)重建物体的高度信息。

实验中使用的被测物体为一个人脸模型,如图 12(a)所示。由于条纹圆心附近的测量精度低,故实验中避开了这个区域。图 12(b)为相机采集的一组条纹图,可以看出,由于相机和投影仪基本呈共轴关系,故条纹没有因物体高度调制而发生形变。图 12(c)为重建结果,图 12(d)为重建结果的一个剖面图。

为评价所提方法的实验精度,测量了一个标准台阶物体,如图 13(a)所示。两个台阶之间的高度差为 30 mm,图 13(b)为一帧采集的条纹图,对虚线部分进行重建,结果如图 13(c)所示。对重建台阶的两个平面区域分别进行拟合,拟合结果为:区域一的平面拟合高度为 11.4208 mm(均方根误差为 0.0897 mm);区域二的平面拟合高度为 40.6804 mm(均方根误差为 0.0960 mm)。将两个区域的高度相减,得到阶面的高

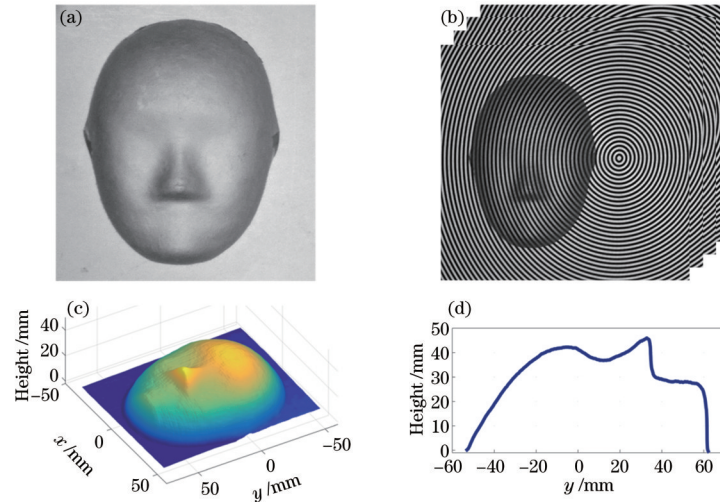


图 12 人脸模型重建实验。(a)被测物体;(b)四步相移条纹图;(c)重建结果;(d)第 248 行重建面形的剖面图

Fig. 12 Reconstruction experiment of face model. (a) Measured object; (b) four phase shift fringe patterns; (c) reconstruction result; (d) section of reconstruction surface at 248th line

度差为 29.2596 mm, 相对误差为 2.47%。考虑到所用投影仪的景深范围较小, 这会使得实验中的平移次

数较少, 使用大景深的投影仪并增加移动次数能进一步提升测量精度。

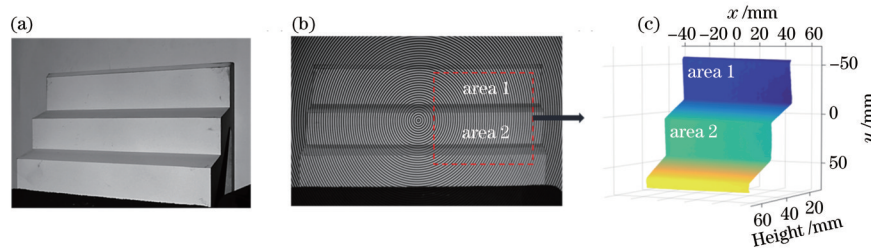


图 13 台阶重建实验。(a)被测物体;(b)一帧条纹图;(c)虚线区域重建结果

Fig. 13 Reconstruction experiment of steps. (a) Measured object; (b) one frame of fringe pattern; (c) reconstruction result of dashed line area

5 结 论

提出了一种新的基于发散圆形条纹投影的共轴三维测量方法, 可实现可见即可测。沿光轴方向移动投影仪使得物体表面的相位发生变化, 利用移动引入的投影光线的几何关系建立起绝对相位和物体高度信息间的约束关系, 最后通过位移量和相位来恢复物体的高度, 不需要复杂的系统参数标定过程。增加投影位置的次数可以减小测量的随机误差, 进而提升测量精度。所提方法使用普通的非远心镜头代替传统圆形条纹投影轮廓术中使用的远心镜头, 扩大了测量视场, 降低了测量成本。仿真和实验结果均表明, 所提方法避免了测量过程中的阴影和遮挡问题, 可以较好地恢复目标物体的高度分布。由于圆心附近的相位变化量较小, 因此所提方法不能有效地恢复该区域的高度信息, 应用时可通过将物体摆放在除圆心外的其他区域中来解决此问题。

参 考 文 献

[1] 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.

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.

[2] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39: 10-22.

[3] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 119-131.

[4] Liu Y, Blunt L, Zhang Z H, et al. *In-situ* areal inspection of powder bed for electron beam fusion system based on fringe projection profilometry[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100940.

[5] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.

[6] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.

Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift

- fringe analysis: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
- [7] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [8] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [9] 安海华, 曹益平, 李红梅, 等. 一种基于混合滤波窗口的复合光栅相位测量轮廓术[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0604007.
An H H, Cao Y P, Li H M, et al. A composite grating phase-measuring profilometry based on mixed filtering window[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0604007.
- [10] 张诚, 陈文静. 提高小波变换轮廓术测量精度的方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0712002.
Zhang C, Chen W J. Method for improving measurement accuracy of wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0712002.
- [11] 卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制度比的结构光三维面形垂直测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704003.
Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase-shifting and modulation ratio[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704003.
- [12] 苏礼坤, 苏显渝, 李万松, 等. 基于调制度测量的三维轮廓术[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1257-1262.
Su L K, Su X Y, Li W S, et al. 3-D profilometry based on modulation measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1257-1262.
- [13] Zhong M, Cui J, Hyun J S, et al. Uniaxial three-dimensional phase-shifting profilometry using a dual-telecentric structured light system in micro-scale devices[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(8): 085003.
- [14] Liu C, Chen L J, He X Y, et al. Coaxial projection profilometry based on speckle and fringe projection[J]. *Optics Communications*, 2015, 341: 228-236.
- [15] Sicardi-Segade A, Estrada J C, Martínez-García A, et al. On axis fringe projection: a new method for shape measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 69: 29-34.
- [16] Ma M C, Wang Y Y, Ling X, et al. A multidistance constraint method for three-dimensional reconstruction with coaxial fringe projection measurement system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 132: 106103.
- [17] Zhao H, Zhang C W, Zhou C Q, et al. Circular fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4951-4954.
- [18] Zhang J, Luo B, Su X, et al. A convenient 3D reconstruction model based on parallel-axis structured light system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138: 106366.
- [19] Liu H B, Lin H J, Yao L S. Calibration method for projector-camera-based telecentric fringe projection profilometry system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31492-31508.
- [20] Zhang R H, Guo H W, Asundi A K. Geometric analysis of influence of fringe directions on phase sensitivities in fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7675-7687.
- [21] 赵文静, 陈文静, 苏显渝. 几种时间相位展开方法的比较[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2016, 53(1): 110-117.
Zhao W J, Chen W J, Su X Y. The comparison of several time phase unwrapping methods[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2016, 53(1): 110-117.
- [22] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [23] 苏显渝, 陈文静, 曹益平, 等. 参数图导向的相位展开方法[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(4): 463-467.
Su X Y, Chen W J, Cao Y P, et al. Phase unwrapping algorithm based on the oriented parameter map[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2004, 15(4): 463-467.
- [24] 李文健, 盖绍彦, 俞健, 等. 基于卷积神经网络的单帧复合图像绝对相位恢复[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2312001.
Li W J, Gai S Y, Yu J, et al. Absolute phase recovery of single frame composite image based on convolutional neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2312001.
- [25] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.