

激光与光电子学进展

基于条纹投影和双屏透射显示的复合表面
三维测量方法肖月新^{1†}, 张宗华^{1,2*†}, 刘硕¹, 李梓瑜¹, 高楠¹, 孟召宗¹, 高峰²¹河北工业大学机械工程学院, 天津 300130;²哈德斯菲尔德大学精密技术中心, 英国 哈德斯菲尔德 HD1 3DH

摘要 光学三维形貌测量技术具有无损、快速、高精度等优势,被广泛应用于不同领域。工业生产及现实生活中的镜面/漫反射复合表面三维形貌的快速、高精度测量一直是未解决的难题。提出一种基于条纹投影和双屏透射显示的镜面/漫反射复合表面测量方法,并对系统的非线性响应进行了补偿。首先,普通屏和透明屏分别显示绿色条纹,被镜面部分反射,投影仪投射蓝色正弦条纹图到漫反射部分;其次,相机采集不同颜色的变形条纹图;然后,三维标定获取系统参数,通过相位与深度的关系恢复物体的三维形貌;最后,校正系统的非线性响应误差并进行补偿,提高三维测量精度。实验结果表明:该方法能够实现非连续复合表面物体三维形貌的高精度测量。

关键词 复合表面; 系统标定; 相位解算; 非线性响应

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222871

Method for Three-Dimensional Shape Measurements of Composite Surface
Based on Fringe Projection and Dual-Transparent Display ScreensXiao Yuexin^{1†}, Zhang Zonghua^{1,2*†}, Liu Shuo¹, Li Ziyu¹, Gao Nan¹,
Meng Zhaozong¹, Gao Feng²¹School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;²Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield, HD1 3DH, UK

Abstract Optical three-dimensional (3D) topography measurement technology has been widely used in different fields because of its non-destructive, rapid, high precision, and other advantages. Rapid and accurate measurements of the 3D morphology of specular/diffuse composite surfaces in industrial production have been an unsolved problem. In this study, a method for specular/diffuse composite surface measurements based on fringe projection and dual-screen transmission display is proposed, and the nonlinear response of the system is compensated. First, the normal and transparent screens display green stripes, which are partially reflected by the mirror. In addition, the projector projects a blue sinusoidal stripe pattern to the diffuse part. Second, the camera captures the deformed fringe patterns of different colors. Subsequently, the system parameters are obtained via 3D calibration, and the 3D morphology of the object is recovered based on the relationship between phase and depth. Finally, the nonlinear response error of the system is corrected and compensated to improve the accuracy of 3D measurements. The experimental results show that the proposed method can achieve high-precision measurements of the 3D topography for discontinuous composite surface objects.

Key words composite surface; system calibration; phase calculation; nonlinear response

1 引言

光学三维形貌测量技术凭借着非接触、高精度、快

速测量等优点被广泛应用于生产生活中来获取物体表面三维形貌^[1-2]。物体表面根据反射特性的不同,主要分为漫反射表面和镜面。针对漫反射表面物体,广泛

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2022-11-14; 录用日期: 2022-11-22; 网络首发日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(52075147)、河北省科学技术厅外专引才引智项目、河北省博士后资助科研项目(B2021003024)

通信作者: *zhzhang@hebut.edu.cn

†共同第一作者

应用条纹投影轮廓术^[3];针对镜面物体,主要采用相位测量偏折术^[4-5]。然而在航空航天、先进制造业及现实生活中存在许多漫反射和镜面同时存在的复合反射表面。因此,需研究一种针对复合表面物体测量的新方法,快速、高精度地获取其三维形貌。在已有的复合表面测量研究中,最初研究者们向被测物体的表面喷涂试剂,使物体表面呈现漫反射特性,然后利用条纹投影法对复合表面物体进行测量。由于要改变物体表面特性,该方法仅适于对测量精度要求不高的复合表面物体。Sandner^[6]研究了基于条纹反射法和双目条纹投影的复合表面测量技术。易京亚^[7]将条纹投影和条纹反射术相结合,提出了一种复合迭代算法。岳慧敏等^[8]设计了面结构光测量系统,利用复合迭代的方法,实现了被测物体的三维形貌测量。然而,以上测量方法仅适用于测量连续和梯度较小的复合表面物体。为此,刘小红等^[9]提出了一种基于结构光的镜面/漫反射复合表面三维形貌测量方法。该方法建立了相位与深度的直接关系,投影仪和显示屏同时工作,提高了测量效率且能够实现非连续复合表面物体的测量,但实验系统中使用了半透半反镜来折射光路,使得系统结构复杂、成本较高且测量视场受限。

系统中使用相机和投影仪,伽马效应的存在会使条纹呈现非正弦性,得到的相位含有非线性误差^[10-11]。为了消除由系统非线性造成的相位误差,相关学者提出了许多方法。这些方法主要分为两大类:1) 基于硬件的方法,主要包括相干光照明法和离焦投射技术;2) 基于软件的方法,主要分为主动补偿法^[12-14]、被动补偿法^[15-16]和增加相移量法。主动补偿法是在生成条纹图阶段进行预先校正,例如对投影仪进行光度标定等。被动补偿法是在条纹分析阶段实现误差补偿,主要有查表法、统计学法和迭代法。增加相移量法主要应用 N 步相移算法。张松团队^[17]对主动补偿法和被动补偿法进行对比,结果表明主动补偿法无论离焦量多少,都能较好提供更高质量的条纹图案,而被动补偿法对测量条件很敏感。

针对以上问题,本文提出了一种复合表面物体测量新方法,将条纹投影和双屏透射显示相结合,重构物面三维形貌,简化测量系统、节约成本且使得测量视场不受限制。同时,通过分析系统误差,使用主动补偿法校正了系统非线性响应,提高了物体测量精度。

2 原理

基于条纹投影和双屏透射显示复合表面测量系统的原理示意如图 1 所示。该系统由一个投影仪、一个液晶显示屏(Liquid crystal display, LCD)、一个透明显示屏(Transparent display, TD)和一个电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)彩色相机组成。使用一个复合平面标定板标定系统,为了在同一坐标系统中建立漫反射相位和镜面反射相位与深度间的关系,系

统的参考位置选定复合平面标定板的初始位置,即参考平面。

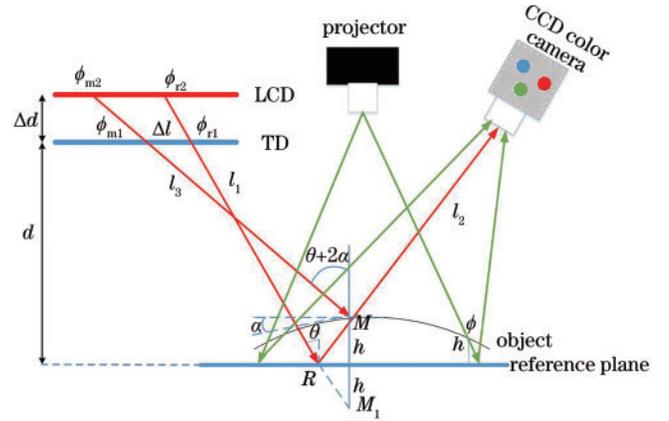


图 1 复合表面测量原理图

Fig. 1 Measurement schematic diagram of composite surface

如图 1 所示, LCD、TD、参考平面、被测物体和 CCD 彩色相机构成镜面部分的测量子系统,其中两显示屏与参考平面平行, LCD 与 TD 之间的距离为 Δd , TD 与复合参考平面之间的距离为 d 。相机光轴与参考平面法向量间的夹角为 θ 。两显示屏上的参考相位点构成的入射光线 l_1 与复合参考平面交于点 R 。根据光的反射定律,其反射光线为 l_2 。而当放置被测物体时,如图中点 M , 相对于参考平面的高度和梯度分别为 h 和 α 。在出射光线不发生偏折的情况下,入射光线变成由两显示屏上的测量相位点构成的光线 l_3 , l_3 相对于 l_1 发生的偏折角度为 $\theta + 2\alpha$ 。因此,根据几何关系可得:

$$(\phi_{r1} - \phi_{r2}) \cdot q / 2\pi = \Delta d \cdot \tan\theta, \quad (1)$$

$$(\phi_{m1} - \phi_{m2}) \cdot q / 2\pi = \Delta d \cdot \tan(\theta + 2\alpha), \quad (2)$$

$$(d + h) \cdot \tan\theta + \Delta l = (d - h) \cdot \tan(\theta + 2\alpha), \quad (3)$$

$$(\phi_{r1} - \phi_{m1}) \cdot q / 2\pi = \Delta l, \quad (4)$$

联立式(1)~式(4),可以推导出镜面物体高度与相位之间的关系:

$$h = \frac{\Delta d \cdot (\phi_{m1} - \phi_{r1}) - d [(\phi_{r1} - \phi_{r2}) - (\phi_{m1} - \phi_{m2})]}{(\phi_{m1} - \phi_{m2}) + (\phi_{r1} - \phi_{r2})}. \quad (5)$$

投影仪、CCD 彩色相机、被测物体构成漫反射表面的测量子系统,被测物体的漫反射表面高度 h 与相位之间的关系可表示为

$$h(u, v) = \sum_{i=0}^n a_i(u, v) [\psi(u, v) - \phi(u, v)]^i, \quad (6)$$

式中: (u, v) 为成像面的像素坐标; $\phi(u, v)$ 为参考相位; $\psi(u, v)$ 为调制相位; $a_i(u, v)$ ($i=0, 1, \dots, n$) 为系统参数, n 为多项式的最高次数。

3 平行调节与系统标定

上述复合表面测量系统由条纹投影和双屏透射显

示组成。双屏透射显示中,需保证两显示屏在空间上平行且对正,因此,在实际操作中要调节两个显示屏和参考平面的空间位置相互平行。同时,为了获取复合表面物体的高度信息,需对系统参数 Δd 、 d 、 $a_i(u, v)$ 进行标定。系统标定流程如图 2 所示。

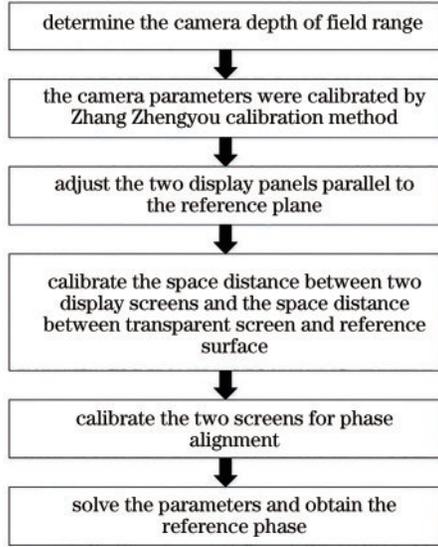


图 2 系统标定流程图

Fig. 2 System calibration flow chart

3.1 平行调节与 Δd 、 d 的标定

调节 TD 与 LCD 平行步骤如下:1) 将相机垂直正对两显示屏放置,使两显示屏处于相机景深范围内。准备棋盘格标定板,在景深范围内使用相机拍摄不同位姿的棋盘格图像,使用张正友标定法^[18]标定相机参数;2) 在 TD 与 LCD 上显示相邻间距已知的圆环图案,相机采集图像计算 TD 与 LCD 的外参 $[R, T]$;3) 根据二者的旋转矩阵计算空间角度差异并进行调节,直至两显示屏的外参矩阵 R 相同,判定此状态为两显示屏平行;4) 调节两显示屏与参考面平行,使相机、参考面和显示屏构成图 1 的三角测量结构,通过比较外参矩阵 R 实现系统平行调节。

TD 与 LCD 间距 Δd 的标定通过移动复合参考平面来实现,通过将参考平面镜移动已知距离,建立数学关系求解 Δd 。TD 与参考平面间距 d 的标定,同样建立几何关系求解。具体原理和方法参见文献^[19]。

3.2 系统参数 $a_i(u, v)$ 的标定

系统参数 $a_i(u, v)$ 的标定步骤如下:1) 准备棋盘格标定板,相机采集不同位姿的棋盘格图像,利用张正友标定法标定相机参数;2) 软件生成符合要求的竖直正弦条纹,将复合平面标定板垂直固定在水平移动台上,生成的条纹图由投影仪依次投射到标定板漫反射部分,并被相机采集;3) 等间距移动精密水平移动台 N 次,重复步骤 2),采集 N 个位置的条纹图,计算条纹的绝对相位;4) 选取 N 次采集的中间位置作为参考面:当 N 为奇数时, $(N+1)/2$ 被选作中间位置,当 N 为

偶数时, $N/2$ 为中间位置,设参考位置的深度为 0,对应绝对相位为 φ ,最终得到每个位置相对于参考面的深度和绝对相位,再利用式(6)进行迭代求解获取系统参数 $a_i(u, v)$ 。

4 非线性误差分析与补偿

系统非线性响应主要包括 CCD 相机、投影仪和显示屏的非线性失真。构建误差模型对非线性响应进行补偿,具体过程如图 3 所示。

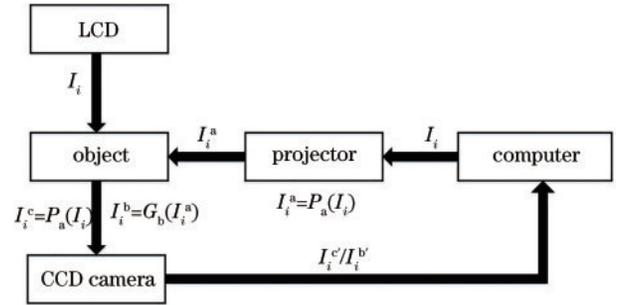


图 3 误差模型示意图

Fig. 3 Error model schematic diagram

计算机产生的正弦条纹图光强分布为

$$I_i(x, y) = I_m(x, y) + I_n(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_i], \quad (7)$$

式中: $I_m(x, y)$ 为背景光强; $I_n(x, y)$ 为调制度,即条纹的对比度; $\varphi = 2\pi fx$,其中 (x, y) 表示所投影图像的像素坐标, f 为频率; δ_i 为第 i 幅图像的相移量, $i=0, 1, \dots, N-1$ 。理想情况下,折叠相位为

$$\varphi(x, y) = -\arctan \left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \sin \delta_i}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \cos \delta_i} \right], \quad (8)$$

由于投影仪非线性响应的影响,投射出的图像光强分布可表示为

$$I_i^a(x, y) = P_a[I_i(x, y)], \quad (9)$$

式中: P_a 为投影仪非线性响应函数。由于环境光及噪声的影响,相机采集到的图像光强分布可表示为

$$I_i^b(x, y) = G_b[I_i^a(x, y)], \quad (10)$$

式中: G_b 为相机的非线性响应函数。非线性响应引入高次谐波,折叠相位表示为

$$\varphi(x, y) = -\arctan \left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i^b(x, y) \sin \delta_i}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i^b(x, y) \cos \delta_i} \right], \quad (11)$$

式中:由于系统非线性响应引入相位误差,对其进行主动校正。首先用投影仪投射灰度值为 $0 \sim 255$ 的灰度图,相机采集灰度值连续变化的图像,通过计算可得到非线性响应函数。利用拟合及求取非线性响应函数反函数的方法,得到补偿后的光强变化曲线。

5 实验及结果

研制条纹投影和双屏透射显示的镜面/漫反射复合表面测量系统,如图 4 所示,主要由 CCD 彩色相机、投影仪、LCD、TD 和计算机组成。所用投影仪型号为 DLP®LightCrafter™ 4500,物理分辨率为 912 pixel×1140 pixel。相机型号为 SVCam-ECO445 彩色相机,分辨率为 1296 pixel×964 pixel。所研制的复合平面标定板一半为漫反射面,一半为镜面,标定板的中间部分有圆环标识点,圆心距为 15 mm。所使用精密水平移动台为大恒光电生产的 GCD203100M,精度为 1 μm。TD 的分辨率为 1366 pixel×768 pixel,尺寸为 33.78 cm。LCD 的分辨率为 1366 pixel×768 pixel,尺寸为 33.78 cm。

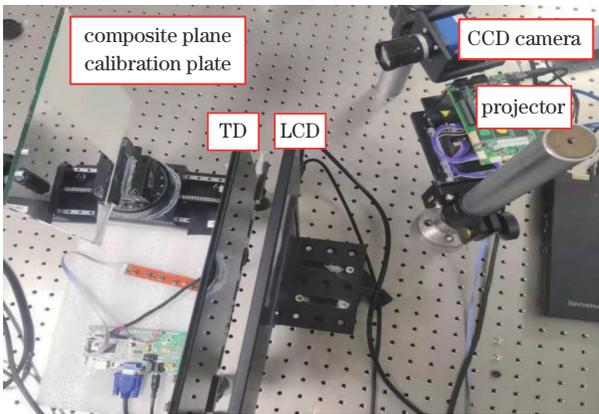


图 4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

5.1 标定结果

根据测量原理,首先将相机聚焦在复合参考平面,并使用张正友标定法对相机参数进行标定。然后利用相机参数进行图像畸变校正、平行调节和系统参数标定。平行调节的数据如表 1、表 2 所示。

表 1 为经过平行调节后的 LCD 与 TD 的空间角度差异,表 2 为 TD 与参考平面的平行数据。由表中角度差值可以判定两显示屏及参考面相互平行,满足实验

表 1 透明屏与普通屏之间的欧拉角及角度差

Table 1 Euler angle and angle difference of transparent screen and ordinary screen

Projector	Angle of pitch / (°)	Angle of rotation / (°)	Yaw angle / (°)
TD Euler angle	0.0028	0.1860	0.1380
LCD Euler angle	0.0023	0.1879	0.1374
Angle difference	0.0005	0.0019	0.0006

表 2 透明屏与参考面之间的欧拉角及角度差

Table 2 Euler angle and angle difference of transparent screen and reference plane

Projector	Angle of pitch / (°)	Angle of rotation / (°)	Yaw angle / (°)
TD Euler angle	2.9020	12.0704	6.4988
Reference plane Euler angle	2.8940	12.0710	6.5063
Angle difference	0.0080	0.0006	0.0075

要求。同时,根据 2 个显示屏之间的距离 Δd 和 TD 与参考面间距 d 的标定原理,标定得到 $\Delta d=38.5320$ mm, $d=156.4508$ mm。系统参数 $a_i(u, v)$ 标定实验中选取等间距移动精密水平移动台次数 $N=11$,且每次移动的距离为 5 mm。根据原理,选取的参考位置为 $N=6$ 。

随后,对标定精度进行验证:控制精密水平移动台移动已知距离 5 mm 作为真值,投影仪和两显示屏同时投射和显示条纹,CCD 相机同时采集标定板上的变形条纹图,获取相位后利用式(5)、式(6)分别计算。求得测量结果为 4.980 mm,绝对误差为 0.020 mm。数据表明标定精度较高,可用于后续实验。

5.2 实验结果

为验证所研制系统的有效性及其精度,选取一个复合表面物体和特制的非连续复合表面环形台阶进行实验,恢复其三维形貌。首先,使用主动补偿法进行系统非线性校正:投影仪投射灰度图,根据相机采集光强得到的非线性响应曲线如图 5(a)所示。校正后的响应曲线如图 5(b)所示。使用非线性校正后生成的条纹图进行实验。

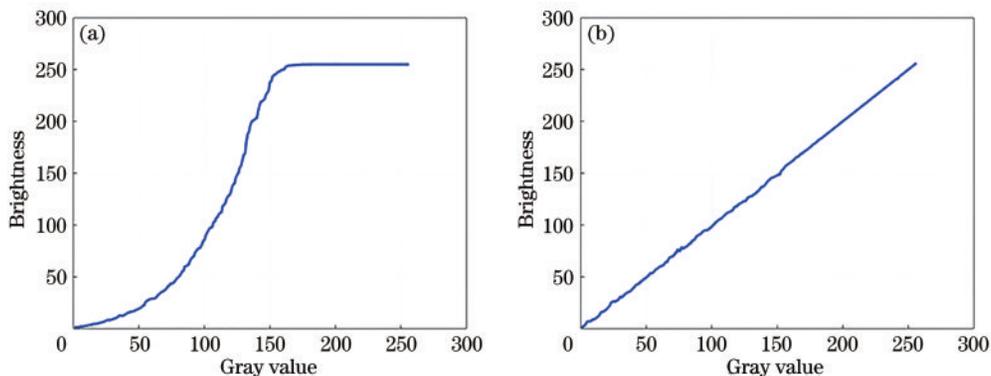


图 5 非线性响应曲线。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 5 Nonlinear response curves. (a) Before compensation; (b) after compensation

由于环境光和透明屏特性,实验设置投影仪投射的和显示屏显示的条纹为不同颜色,以达到更好的实

验结果。图 6 和图 7 分别为所测复合表面物体和复合环形台阶。

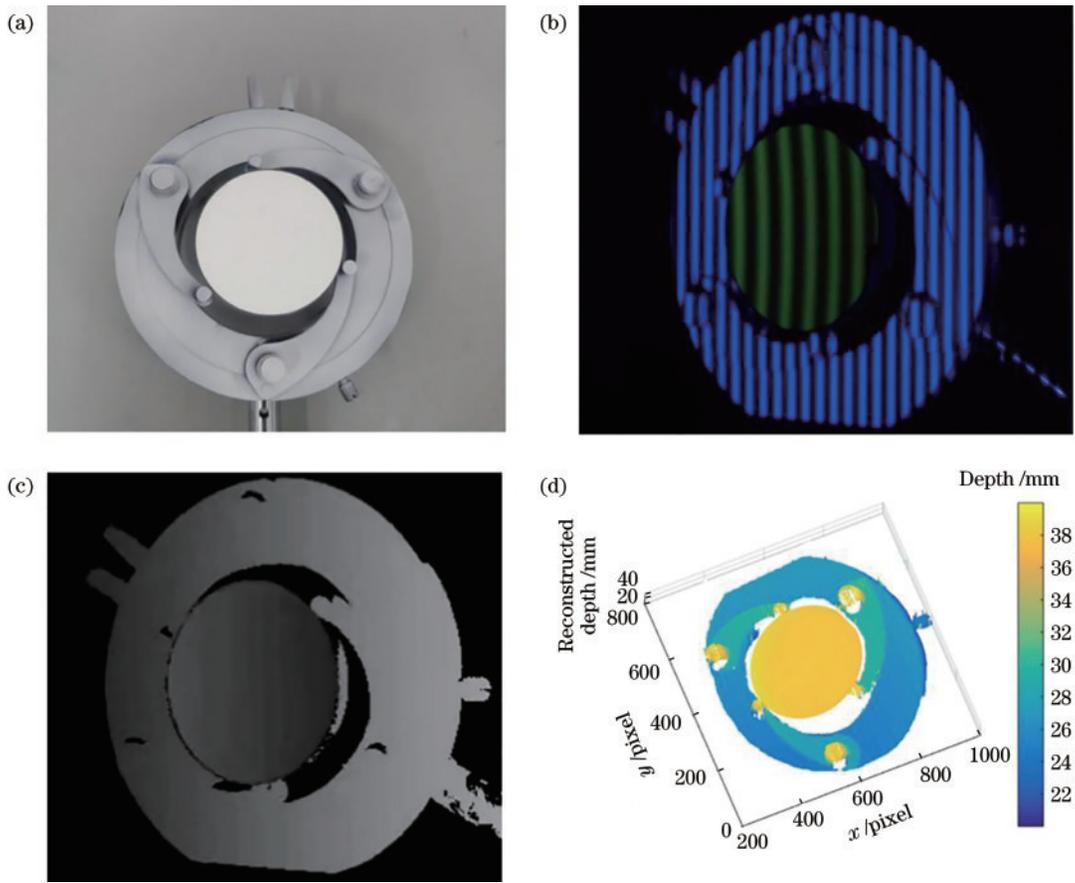


图 6 复合表面物体。(a)实物图;(b)变形条纹图;(c)绝对相位图;(d)重建深度

Fig. 6 Composite surface object. (a) Picture of real product; (b) deformed fringe pattern; (c) absolute phase map; (d) reconstructed depth

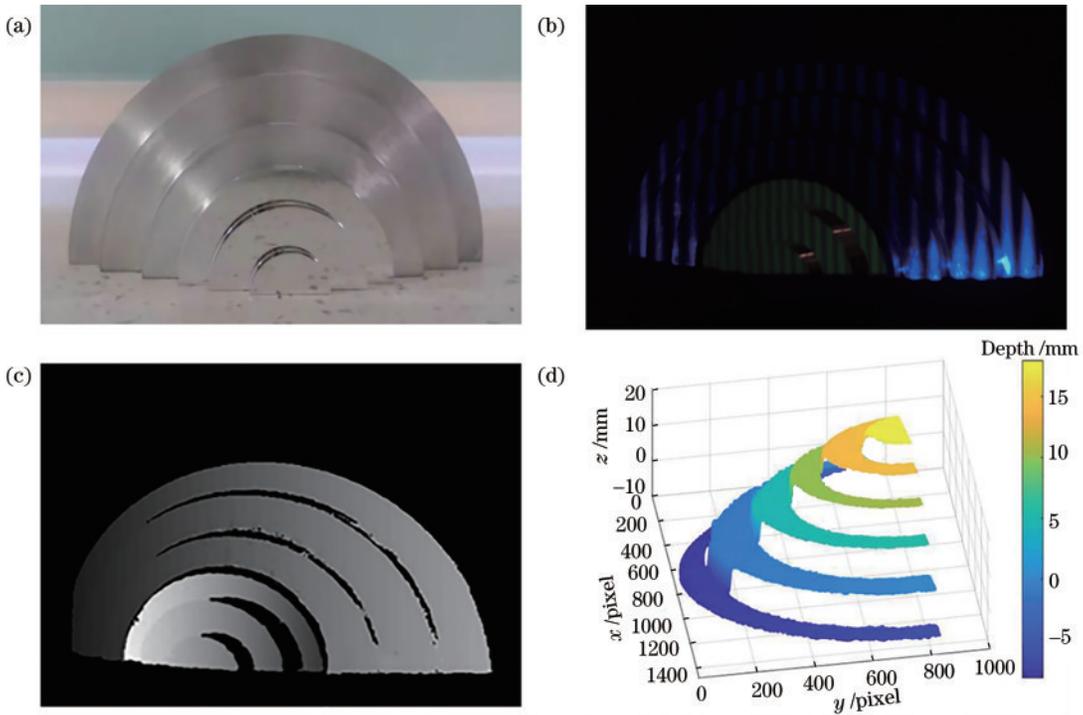


图 7 复合环形台阶。(a)实物图;(b)变形条纹图;(c)绝对相位图;(d)重建深度

Fig. 7 Compound ring step. (a) Picture of real product; (b) deformed fringe pattern; (c) absolute phase map; (d) reconstructed depth

对复合环形台阶的直接测量结果和 nonlinear 响应校正后的结果作对比,如表 3 所示。由实验结果可知,非

线性响应校正后精度可提高 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 。

表 3 复合环形台阶测量结果
Table 3 Composite ring step measurement results

Step surface	ZEISS Calypso measure the true value /mm	Direct measurement result /mm	Angle difference /mm	Measured result after nonlinear compensation /mm	Angle difference /mm
1-2	3.00016	2.975	0.025	2.977	0.023
2-3	4.00015	4.024	0.024	4.021	0.021
3-4	5.00026	5.040	0.040	5.039	0.039
4-5	5.50040	5.518	0.018	5.516	0.016
5-6	6.50038	6.482	0.018	6.483	0.017

6 结 论

提出了一种基于条纹投影和双屏透射显示的镜面/漫反射复合表面测量新方法,并基于此方法实现了复合表面物体三维形貌的高精度测量;建立了绝对相位和深度间的直接关系,可用于非连续复合表面物体的测量;分析和补偿了系统的非线性响应;研制了复合表面物体三维测量系统,并对镜面/漫反射表面物体进行了测量。实验结果表明,所提的条纹投影和双屏透射显示测量方法可对非连续镜面/漫反射复合表面进行高精度三维测量。与之前测量复合表面物体三维形貌的方法相比,本方法既简化了硬件测量系统,又扩大了测量视场的范围。

参 考 文 献

- [1] Bai X F, Gao N, Zhang Z H, et al. Person recognition using 3-D palmprint data based on full-field sinusoidal fringe projection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(9): 3287-3298.
- [2] Schnack A, Wright M J, Holdershaw J L. Immersive virtual reality technology in a three-dimensional virtual simulated store: investigating telepresence and usability [J]. *Food Research International*, 2019, 117: 40-49.
- [3] 刘东, 严天亮, 王道档, 等. 条纹投影与相位偏折测量技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0917001.
Liu D, Yan T L, Wang D D, et al. Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917001.
- [4] 刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1636-1640.
Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1636-1640.
- [5] 袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212004.
Yuan T, Zhang F, Tao X P, et al. Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004.
- [6] Sandner M. Optical measurement of partially specular surfaces by combining pattern projection and deflectometry techniques[D]. Germany: FernUniversität in Hagen, 2015.
- [7] 易京亚. 基于条纹投影和条纹反射的手机壳内外表面质量检测方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
Yi J Y. Study on mobile phone shell inside and outside surface quality inspection based on fringe projection and fringe reflection technologies[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [8] 岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 767-771.
Yue H M, Su X Y, Li Z R. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 767-771.
- [9] 张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303015.
Zhang Z H, Liu X H, Guo Z N, et al. Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303015.
- [10] Cai Z W, Liu X L, Peng X, et al. Phase error compensation methods for high-accuracy profile measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(4): 045201.
- [11] Cai Z W, Liu X L, Jiang H, et al. Flexible phase error compensation based on Hilbert transform in phase shifting profilometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25171-25181.
- [12] Guo H W, He H T, Chen M Y. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2906-2914.
- [13] Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [14] Bing P, Qian K M, Lei H, et al. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4): 416-418.
- [15] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Compensation of

- fringe distortion for phase-shifting three-dimensional shape measurement by inverse map estimation[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6017-6024.
- [16] Xiong L D, Jia S H. Phase-error analysis and elimination for nonsinusoidal waveforms in Hilbert transform digital-fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(15): 2363-2365.
- [17] Zhang S. Comparative study on passive and active projector nonlinear gamma calibration[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 3834-3841.
- [18] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] 李月. 基于双屏透射显示的偏折测量技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
- Li Y. Research on deflectometry based on dual-screens of transmission and display[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.