

## 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量

张宗华, 刘小红, 郭志南, 高楠, 孟召宗

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

**摘要:** 光学三维测量技术以其非接触、无损及快速测量的优势被广泛应用于不同领域。已有的条纹投影和条纹反射测量术分别适用于漫反射表面和镜面表面。然而, 航空航天和先进制造中存在许多漫反射和镜面反射表面同时存在的复合反射表面。提出一种基于结构光投影和反射的方法来实现复合表面形貌的快速测量。首先, 投影仪投射蓝色正弦条纹图于被测物体表面, 同时显示屏显示的红色条纹被镜面部分反射。其次, 彩色相机采集经被测表面调制的变形条纹图。然后, 从相机不同颜色通道中提取对应不同类型反射表面的变形条纹, 并计算变形条纹图的绝对相位。最后, 通过系统标定建立相位信息与深度之间的直接关系, 得到被测复合表面的三维形貌。实验结果表明: 该方法不仅能够有效地实现非连续复合表面物体的测量, 还能够同时测量独立的漫反射和镜面反射表面的三维形貌。

**关键词:** 复合表面; 结构光三维成像; 系统标定; 相位计算

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3378/IRLA202049.0303015

## Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light

Zhang Zonghua, Liu Xiaohong, Guo Zhinan, Gao Nan, Meng Zhaozong

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Optical three-dimensional (3D) measurement technology is widely used in different fields due to its advantages of non-contact, non-destructive and rapid measurement. The existing technologies of Fringe Projection Measurement and Fringe Reflection Measurement are designed for the measurement of diffusely reflective and specularly reflective surfaces respectively. However, there are many complex surfaces which have both diffused and specular reflective surfaces together in aerospace and advanced manufacturing. In this paper, a method based on structured light projection and reflection was proposed to realize rapid measurement of complex surfaces. First, a Digital Light Projector (DLP) projected blue sinusoidal fringe onto the tested surface, and red fringes displayed by a screen were reflected by its specular part simultaneously. Second, deformed fringe patterns modulated by the measured surface were captured by a color Charge Coupled Device (CCD) camera. Then, deformed fringes of different reflection surface were extracted from different color channels of the camera and then absolute phase information could be calculated. Finally, after system calibration to build up the relationship between phase and depth, 3D shape data of the measured complex object was obtained. Experimental results show that the proposed method can not only measure complex surfaces effectively, but obtain 3D shape of isolated diffused and specular surfaces simultaneously.

收稿日期: 2019-11-03; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF0106404); 国家自然科学基金 (51675160)

作者简介: 张宗华 (1974-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析和三维生物测定等方面的研究。Email: zhzhang@hebut.edu.cn(通讯作者)

刘小红 (1991-), 女, 博士生, 主要从事光学检测和三维成像等方面的研究。Email: 1355104210@qq.com

**Key words:** complex surface; structured light 3D imaging; system calibration; phase calculation

## 0 引言

光学三维测量技术以其非接触、测量速度快、无损性等优点在工业检测、生物医学、和虚拟现实等领域被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。根据被测物体表面的反射性质不同,光学三维测量技术的研究对象主要分为漫反射和镜面反射表面。基于结构光投影的条纹投影轮廓术<sup>[4]</sup>和基于结构光反射的相位测量偏折术<sup>[5-6]</sup>因其全场获取、数据处理自动化和测量精度高等优点而被广泛研究和应用。其中,前者主要测量漫反射表面,后者主要实现镜面物体的测量。随着先进制造技术的发展,零件的复杂性和多样性越来越明显,航空航天和先进制造中存在许多漫反射和镜面反射表面同时存在的复合反射表面。在不改变被测物体表面反射性质的条件下,以上前两种测量方法需分别测量漫反射和镜面部分,而无法满足快速测量复合表面的要求,同时需要两套单独形貌测量系统,集成性和灵活性较差。因此,急需研究一种针对复合表面测量的新方法,快速获取其三维形貌数据。

在对复合表面测量的研究中, Sandner<sup>[7]</sup>利用两个相机、一个投影仪和一个显示屏搭建了一套组合测量系统。首先,利用投影仪和两个相机构成的条纹投影测量系统获得物体的高度信息,并由一个相机和显示屏构成的相位偏折测量系统提供计算梯度和高度信息。Huang 等人<sup>[8]</sup>研究分析了条纹投影技术与条纹反射技术在测量既非完全漫反射表面也非完全镜面反射表面时的灵敏度和精度,同时,将条纹投影法测得的高度用于计算条纹反射法积分的斜率来恢复被测物体的形貌。易京亚<sup>[9]</sup>将条纹投影和条纹反射术相结合,充分发挥条纹投影对高度变化的敏感性优势和条纹反射对梯度变化的敏感性优势,提出了一种复合迭代算法实现了低反射率手机壳面形的重建和缺陷检测。以上三种测量方法通过梯度积分计算镜面部分的三维形貌,仅适于测量一些连续和表面梯度较小的复合反射表面。另外,投影仪投射条纹和显示屏显示条纹图的颜色相同,需要投影仪和显示屏分时工作,测量效率低。

文中提出了一种基于结构光的复合表面形貌测量新方法。该方法建立了相位与深度之间的直接关

系,且利用投影仪投射一种颜色的条纹到物体表面,被漫反射部分反射变形;同时,通过另外一种颜色通道显示于显示屏的条纹被物体镜面部分反射变形。两种变形条纹被彩色相机的两个颜色通道同时获取,不仅提高了测量效率,而且能够实现非连续复合表面的形貌重建。

## 1 原理分析

基于结构光投影和反射的复合表面测量原理如图 1 所示,包括一个投影仪、两个 LCD (Liquid Crystal Display) 显示屏 LCD1、LCD2 和彩色相机,它们均位于被测物体的同一侧。为了在同一坐标系统中建立投影条纹相位和镜面反射相位分别与深度间的关系,将通过一个复合平板标定系统。该平面标定板一半为漫反射平面,另外一半为镜面,其上均匀分布着圆环标识,相邻圆环标识间的距离已知,如图 2 所示。复合标定板所在的初始位置定义为系统的参考位置,也即参考平面。

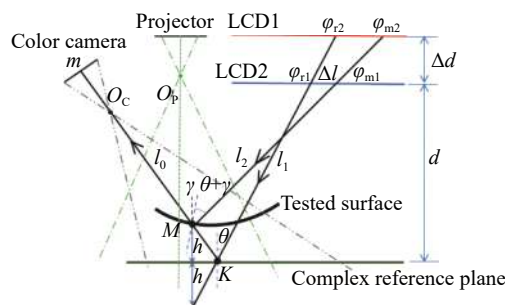


图 1 基于结构光投影和反射的复合表面测量原理图  
Fig.1 Measurement schematic diagram of complex surface based on projection and reflection of structured light

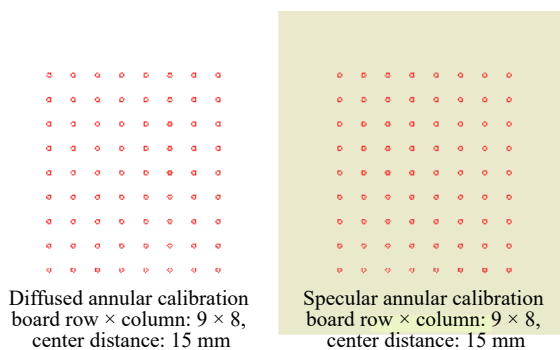


图 2 复合标定板  
Fig.2 Complex calibration board

为实现不同反射特性被测物的同时测量,投影仪和两个 LCD 显示屏同时投射和显示符合多频外差序列的绿色、红色和蓝色正弦条纹图。显示屏显示的条纹图通过复合参考平面的镜面部分反射成像,投影仪投射的条纹图通过复合参考平面的漫反射部分反射。彩色相机的三颜色通道同时采集不同颜色的变形条纹图,实现复合表面变形条纹的同时采集,提高了三维测量的速度。

如图 1 所示,参考平面与两个 LCD 显示屏平行, LCD1 和 LCD2 显示屏之间的空间距离为  $\Delta d$ , LCD1 与复合参考平面之间的空间距离为  $d$ 。相机光轴与参考平面之间的角度为  $\theta$ 。显示屏上参考相位点  $\varphi_{r1}$  和  $\varphi_{r2}$  构成的入射光线  $l_1$  与参考平面交于点  $K$ , 并遵循光的反射定律反射出去, 出射光线为  $l_0$ , 在成像靶面的  $m$  点成像。当被测物体相对于参考平面有一定高度和梯度时, 图中  $M$  点相对于参考平面的高度和梯度为  $h$  和  $\gamma$ 。如果出射光线不发生偏折, 那么入射光线将变为由显示屏上测量相位点  $\varphi_{m1}$  和  $\varphi_{m2}$  构成的光线  $l_2$ ,  $l_2$  相对于  $l_1$  发生的偏折角度为  $(\theta+2\gamma)$ 。因此, 可以建立以下关系式:

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

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

$$(\varphi_{m1} - \varphi_{r1}) \cdot q/2\pi = \Delta l \quad (3)$$

$$(d+h) \cdot \tan(\theta) + \Delta l = (d-h) \cdot \tan(\theta+2\gamma) \quad (4)$$

联立公式 (1)~(4), 被测镜面物体高度与相位之间的之关系如公式 (5) 所示:

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

被测漫反射表面相对于参考面之间的高度  $h$  与相位之间的关系, 可以由以下多项式表示<sup>[10]</sup>:

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

式中:  $(u, v)$  为成像靶面的像素坐标;  $\varphi(u, v)$  为参考相位;  $\psi(u, v)$  为被测表面的调制相位;  $a_i(u, v)$  ( $i = 0, 1, 2, 3 \dots n$ ) 为系统参数,  $n$  为多项式的最高次数, 每个像素位置的系统参数不同。

## 2 系统标定

根据公式 (5) 和 (6) 可知, 为获得复合表面的高度

信息, 需要预先标定系统参数  $\Delta d$ 、 $d$  和  $a_i(u, v)$ 。

### 2.1 $\Delta d$ 的标定

由图 1 可知, LCD1 与 LCD2 为前后位置关系。如果将两个 LCD 按照图 1 所示放置, 那么 LCD1 将会遮挡 LCD2 上的信息, 导致无法实现形貌测量。Liu<sup>[11]</sup> 通过引入一块半透半反镜来实现 LCD1 和 LCD2 的等效结构, 半透半反镜的引入虽然增强了系统的稳定性, 但同时也导致系统测量范围减小和系统调节复杂。为不改变系统有效测量范围和简化系统结构, 文中采用将一块 LCD 固定于水平移动台, 通过水平移动台移动已知距离  $\Delta d$  来实现图 1 所示双屏结构。

为满足 LCD 在位置 1 和位置 2 显示的相位信息平行正对要求, LCD 需垂直放置于水平移动台上(即 LCD 所在平面与导轨垂直), 且水平移动台移动向量的水平分量为 0。水平移动台固定于光学平台上, 因此, 以光学平台为基准, 借助水平仪和角位移台粗略地调节显示屏与导轨的位置关系。由于 LCD 单位像素尺寸已知, 因此, 可以通过软件在显示屏上显示已知空间距离的圆环或棋盘格来获取 LCD 在位置 1 和位置 2 经平面镜所成像的相机外参, 以精确地调节 LCD 与导轨垂直, 当 LCD 显示的不同标识在位置 1 和位置 2 的距离与水平移动台移动实际距离大小相等时, 说明垂直关系成立。

### 2.2 平行调节与 $d$ 的标定

完成显示屏与导轨位置关系的调节后, 需要调节固定于另一水平移动台上的复合标定板, 使其在参考位置与 LCD 平行。由于 LCD 已固定, 因此, 需要获得真实 LCD 的外参作为基准来调节参考平面与 LCD 平行。如图 3 示,  $\{C\}$  表示相机坐标系,  $\{L\}$  表示 LCD 坐标系,  $\{VL\}$  表示 LCD 经参考平面镜所成的像坐标系。  $[R_L \ T_L]$ 、 $[R_{VL} \ T_{VL}]$  分别为真实 LCD 和显示屏所成像 LCD' 的相机外参 ( $R$  为旋转矩阵,  $T$  为移动向量), 两者满足以下关系:

$$R_L = (I_3 - 2n_c n_c^T)^{-1} R_{VL} (I_3 - 2e_3 e_3^T) \quad (7)$$

$$T_L = T_{VL} - 2n_c^T T_{VL} n_c - 2ln_c \quad (8)$$

式中:  $I_3$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵;  $e_3$  为  $3 \times 1$  的单位向量;  $l$  为相机光心到参考平面的距离;  $n_c$  为参考平面的法向量, 可以通过参考平面上的圆环标识求得。为保证  $[R_L \ T_L]$  精度, 在调节时, 多次旋转参考平面镜以提供多组  $[R_{VL} \ T_{VL}]$  和  $l$ , 建立超定方程, 求取  $R_L$  的最优解。

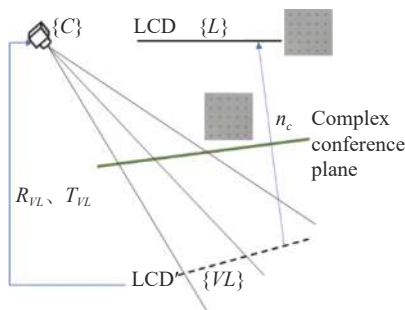


图 3 参考平面与 LCD 平行调节几何分析

Fig.3 Geometrical analysis of parallel adjustment between LCD and reference plane

完成平行调节后,由于参考平面、真实 LCD 及其经参考平面所成像相互平行,因此, LCD 在位置 1 处与参考平面之间的距离  $d$  可用公式 (9) 求得。完成平行调节后,相机采集显示屏在位置 1 和位置 2 经参考面反射的镜面参考条纹图。

$$d = R_R^{-1}(T_R - T_{VL})^T \quad (9)$$

### 2.3 $a_i(u, v)$ 的标定

根据公式 (6) 可知,求解系统参数  $a_i(u, v) (i = 0, 1, 2, 3 \dots n)$  至少需要获得  $(n+1)$  组标定位置相对于参考平面位置的已知深度和相应深度的绝对相位信息。

由于复合标定板由镜面反射面和漫反射面组成,当完成复合标定板在参考位置与 LCD 的平行调节后,标定板与 LCD 之间的位置关系已固定。因此,在标定参数  $a_i(u, v)$  时,通过水平移动台移动标定板来提供多个标定位置。

标定流程如图 4 所示。首先,通过水平移动台移动标定板来提供至少  $(n+1)$  个标定位置。在每个位置(包括参考位置),投影仪投射符合多步相移和多频外差序列的蓝色竖直正弦条纹图至标定板。其次,彩色相机采集每个位置的条纹图和标定板的纹理图并保存至计算机。然后,利用多步相移法计算折叠相位,使用多频外差法计算绝对相位。借助标定板上的圆环信息计算每个标定位置的相机坐标,并拟合参考位置在相机坐标系下的平面方程,计算其他标定位置各点相对于参考位置的距离  $\Delta h$ 。最后,联立公式 (10) 解得每个像素点多项式系数。

$$\Delta h_1(u, v) = \sum_{i=0}^n a_i(u, v)(\psi_1(u, v) - \varphi(u, v))^i$$

$$\Delta h_2(u, v) = \sum_{i=0}^n a_i(u, v)(\psi_2(u, v) - \varphi(u, v))^i$$

$$\Delta h_n(u, v) = \sum_{i=0}^n a_i(u, v)(\psi_n(u, v) - \varphi(u, v))^i$$

$$\Delta h_{\geq n+1}(u, v) = \sum_{i=0}^n a_i(u, v)(\psi_{\geq n+1}(u, v) - \varphi(u, v))^i \quad (10)$$

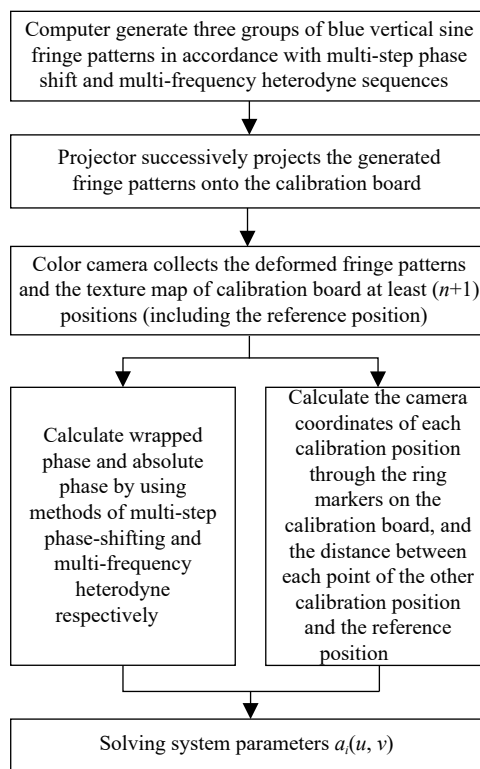


图 4 系统参数  $a_i(u, v)$  标定流程图

Fig.4 Flow chart of system parameter calibration  $a_i(u, v)$

在标定过程中,首先利用投影仪投射条纹于参考位置处的标定板,相机采集条纹图和标定板的纹理图。然后,利用水平精密移动台在参考面位置前后移动 13 个位置,在每个位置相机采集投影仪投射到标定板上的条纹图和纹理图。最后,采用共 14 个标定位置的相位和深度信息,完成测量系统在深度方向系统参数的标定。当  $n=5$  时,所有标定位置同一像素的深度和相位信息有很好的拟合效果。文中标定位置个数为 14,大于要求的个数 6。虽然标定位置增多,但能够得到更精确的系统参数。

### 3 实验及结果

基于结构光投影和反射的复合表面测量系统主要由投影仪、彩色相机、LCD 显示屏、计算机和水平移动台组成,如图 5 所示。投影仪采用的是 TI 公司



生产的 DLP® LightCrafter™ 4 500, 分辨率为 1 140×912。相机型号为 SVCam-ECO445 彩色相机, 分辨率为 964×1 296, 点距 3.75 μm×3.75 μm。LCD 为夏普生产的 LQ101R1JX02, 分辨率为 1 600×2 560, 单位像素尺寸为 0.084 75 mm。水平移动台采用的是大恒光电的 GCD203100M, 精度为 1 μm。复合标定板上的圆心距为 15 mm。

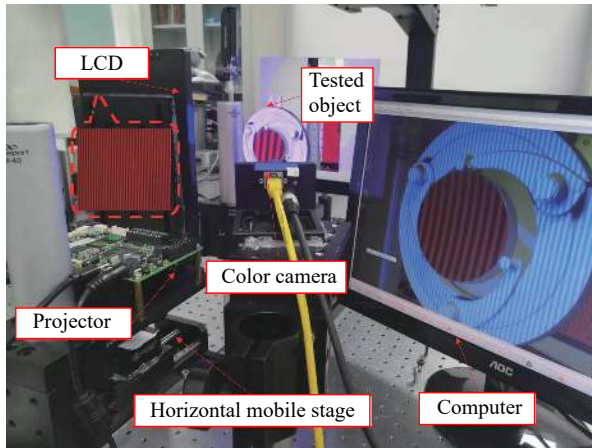


图 5 实验系统

Fig.5 Experimental system

首先利用张正友<sup>[12]</sup>的相机标定法标定相机内参, 然后利用相机内参进行系统标定和对图像进行畸变等处理。在标定系统参数 $a_i(u, v)$ 和测量被测物体时, 为减小系统非线性对测量结果的影响, 投影仪和显示屏分别投射和显示符合八步相移和最佳三条纹<sup>[13]</sup>选择法的序列条纹。由于对于复合反射物体的镜面表面, 相机采集的是 LCD 显示条纹图经被测物体反射成的像, 而对于漫反射表面, 相机则直接采集被测物体漫反射表面的变形条纹。因此, 显示屏显示的条纹序列为 [36 35 30], 投影仪投射的序列为 [100 99 90] 的序列条纹图。

表 1 真实 LCD、LCD'和参考平面的旋转向量及其相应的欧拉角

Tab.1 Rotation matrix and corresponding Euler angle of real LCD, LCD' and reference plane

Projects	LCD'	Reference plane	Real LCD
Rotation matrix	$\begin{bmatrix} 0.000 & 5.0863 & 6.0504 & 1.0000 \\ -0.001 & 1.0000 & 8.0001 & 2.0000 \\ -0.504 & 1.0000 & -0.863 & 6.0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.000 & 4.0863 & 6.0504 & 1.0000 \\ -0.001 & 0.0000 & 8.0001 & 2.0000 \\ -0.504 & 1.0000 & -0.863 & 6.0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.000 & 5.0863 & 6.0504 & 1.0000 \\ -0.001 & 1.0000 & 9.0001 & 3.0000 \\ -0.504 & 1.0000 & -0.863 & 6.0000 \end{bmatrix}$
Translation vector/mm	[-31.270 2 31.069 4 405.790 2]	[-15.084 2 -23.470 9 236.086 7]	---
Pitching angle / (°)	-0.070 6	-0.070 1	-0.073 8
Rotation angle / (°)	30.273 9	30.273 8	30.273 7
Yaw angle / (°)	-89.970 7	-89.975 3	-89.972 6

### 3.1 标定结果

文中通过在显示屏上显示圆环标识的方法来精确调节 LCD 与导轨垂直。固定有 LCD 的水平移动台实际移动 20 mm, 求得 LCD 在位置 1 和位置 2 的空间距离如图 6 所示, 平均值为 20.006 7 mm。水平移动台的移动向量为 [-0.025 9 -0.050 2 20.007 1], 证明 LCD 与水平移动台基本垂直。因此  $\Delta d=20$  mm。然而, 硬件调节的方法不能确保 LCD 显示屏的法向量与导轨的移动方向百分之百垂直, 为提高测量标定精度, 显示屏在两个位置的平行正对关系可以通过软件进行校正<sup>[14]</sup>。

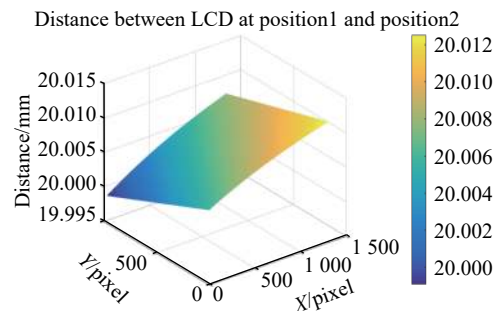


图 6 LCD 在位置 1 和位置 2 的空间距离

Fig.6 Distance between LCD at position 1 and position 2

根据 2.2 节所述方法调节标定板在参考根据 2.2 节所述方法调节标定板在参考位置与 LCD 平行。文中通过在显示屏上显示半径和圆心距已知的圆环标识来提供世界坐标。通过椭圆中心拟合提取圆心中心对应的像素坐标, 然后利用张正友相机标定法计算 LCD 像的相机外参。同理, 可以求得参考平面的相机外参, 进而利用公式 (7) 求得真实 LCD 的外参。最终得到 LCD、LCD'与参考平面镜的旋转矩阵和欧拉角如表 1 所示, 三者之间的俯仰角之差最大为 0.003 7°, 旋转角之差最大为 0.002°, 偏航角之差最大为 0.004 6°。

满足测量要求。最终求得  $d=138.394$  mm。

为验证标定精度,将镜面、漫反射复合标定平板置于精度为  $1\ \mu\text{m}$  的水平移动台,控制平板在标定场精确移动  $3\ \text{mm}$  作为真实值。DLP 投影仪和 LCD 显示屏同时投射和显示条纹序列分别为  $[100\ 99\ 90]$  和  $[36\ 35\ 30]$  的 24 幅条纹图,彩色 CCD 相机同时采集标定板反射和偏折的变形条纹图。计算变形条纹的绝对相位,代入公式 (5) 和 (6)。由于平板上各点有相同的移动距离,因此,将计算得到的所有点的均值作为测量值,其结果为  $2.971\ \text{mm}$ ,绝对误差为  $0.029\ \text{mm}$ 。

### 3.2 实验结果

利用所研制复合反射表面测量系统,对非连续表面的物体三维形貌进行了实际的测量实验。由于所用 CCD 彩色相机的红色和蓝色光谱响应范围重叠区域很小,因此,在测量被测物体时,投影仪和显示屏同时投射和显示蓝色和红色正弦条纹图以减小颜色通道间串扰对测量结果的影响。

图 7 为相机采集的镜面部分参考条纹及利用八步相移和最佳三条纹选择法解调得到的折叠相位图和绝对相位图。由于参考平面的镜面反射表面刻有黑色圆环图案,致使圆环位置及其周边像素位置的相位信息不准确。因此,得到参考条纹的绝对相位后,采用多项式拟合的方法对其进行预处理,处理后的相位图如图 7(d) 所示。

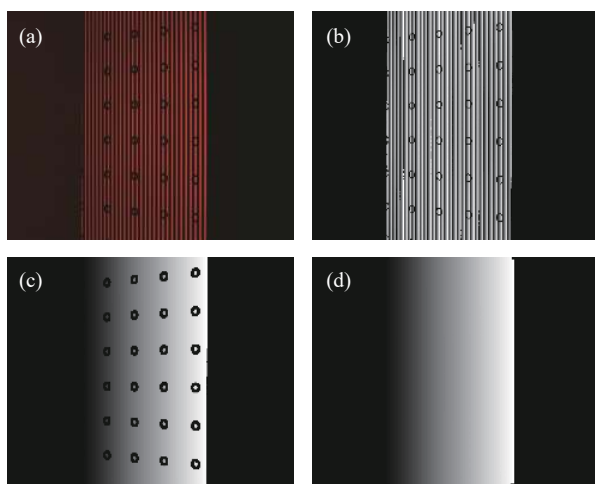


图 7 参考条纹及其相位图。(a) 镜面参考条纹图;(b) 折叠相位图;(c) 绝对相位图;(d) 处理后的绝对相位图

Fig.7 Reference fringe and phase map. (a) specular reference fringe map; (b) wrapped phase map; (c) absolute phase map; (d) processed absolute phase map

投影仪和显示屏投射和显示不同颜色的条纹图不仅能够测量不同反射物体如漫反射、镜面反射及复合反射物体时明确地区分和判断被测物中的镜面反射与漫反射部分为后续不同反射性质表面的形貌恢复提供明确的绝对相位值,而且在表面反射特性未知的情况下也能清楚地分辨物体表面的反射性质以做不同的处理。图 8 为利用研制的实验系统测量特制的复合反射台阶。图 9 为利用研制的实验系统测量孤立的漫反射和镜面反射表面。

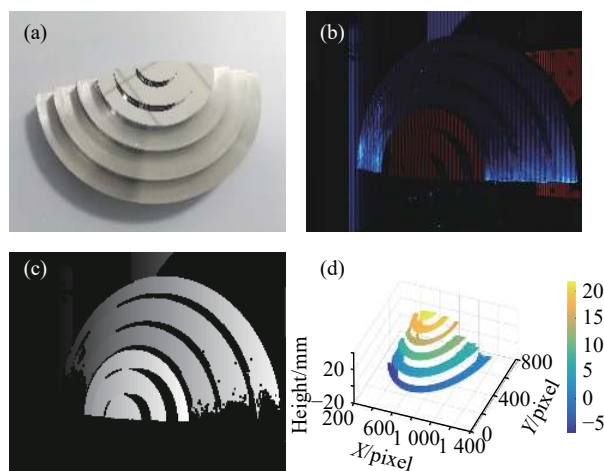


图 8 被测复合台阶。(a) 纹理图;(a) 变形复合条纹图;(c) 绝对相位图;(d) 重建深度

Fig.8 Tested complex step. (a) texture map; (b) deformed complex fringe pattern; (c) absolute phase map; (d) reconstructed depth

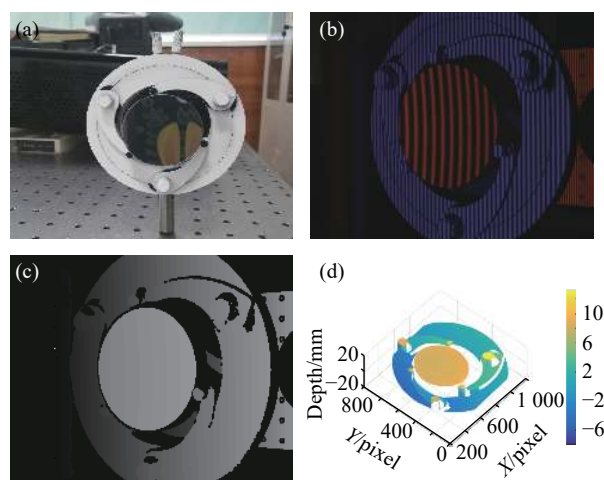


图 9 被测孤立复合物体。(a) 纹理图;(b) 变形复合条纹图;(c) 绝对相位图;(d) 重建深度

Fig.9 Tested isolated complex object. (a) texture map; (b) deformed complex fringe pattern; (c) absolute phase map; (d) reconstructed depth

## 4 结 论

文中提出了一种基于结构光投影和反射的新方法,实现复合表面三维形貌的测量。给出了复合反射表面的测量原理,直接建立了绝对相位与复合表面深度之间的关系,适用于非连续镜面/漫反射复合表面的三维测量。多颜色通道条纹的应用实现了不同反射特性被测物的同时测量,使得在表面反射特性未知的情况下也能清楚地分辨物体表面的反射性质以做不同的后续处理。研制了相应的测量系统,并对系统进行了标定。复合反射台阶和实际复合表面物体的测量实验证明所提出的方法精确获取了非连续复合表面物体的三维形貌。

在所提测量方法时具体实现过程中,通过引入一水平移动台等效实现双屏结构,使得在测量复合反射物体时无法一次性获取形貌重建所需的相位信息。而水平移动台的引入降低了系统的稳定性。因此,下一步的研究重点是把通过半透半反镜实现的双平行显示屏引入该方法,从而一次性获取变形条纹,实现增强系统的稳定性。同时对影响标定精度和测量精度的各种因素进行详细的分析和相应的补偿处理,以提高三维测量精度。

### 参考文献:

- [1] Sansoni G, Trebeschi M, Docchio F. The-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation [J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 568–601.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Liu Dong, Yan Tianliang, Wang Daodang, et al. Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917001. (in Chinese)
- [5] Wang Yueming, Zhang Zonghua, Gao Nan. Review on three-dimensional surface measurement of specular objects based on full-field fringe reflection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1014–1026. (in Chinese)
- [6] Huang L, Idir M, Zuo C, et al. Review of phase measuring deflectometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 247–257.
- [7] Sandner M. Optical measurement of partially specular surfaces by combining pattern projection and deflectometry techniques[D]. Germany: FernUniversität in Hagen, 2015.
- [8] Huang L, Asundi A. Study on three-dimensional shape measurement of partially diffuse and specular reflective surfaces with fringe projection technique and fringe reflection technique[C]//*Proceedings of SPIE, Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications*, 2011, 8133: 813304.
- [9] Yi Jingya. 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, 2016. (in Chinese)
- [10] Zhang Z H, Zhang D, Peng X. Performance analysis of a 3D full-field sensor based on fringe projection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 341–353.
- [11] Liu Y, Huang S H, Zhang Z H, et al. Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1–8.
- [12] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [13] Towers C E, Towers D P, Jones J D C. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(7): 788–800.
- [14] Zhang Zonghua, Guo Jiao, Wang Yuemin, et al. Parallel-alignment and correction of two displays in three-dimensional measuring system of specular surfaces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 289–296. (in Chinese)