

复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证

郭志南, 刘小红, 张宗华*

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要 基于全场相位计算的光学测量方法可获取物体表面的三维(3D)形貌,全场条纹投影轮廓术和相位测量偏折术分别用于漫反射表面和镜面物体形貌的测量。工业生产和日常生活中存在许多由漫反射面和镜面共同组成的复合表面物体,快速测量这些物体的表面形貌是保证其质量的关键。因此,提出了一种基于相位测量偏折术和条纹投影轮廓术的复合表面 3D 形貌测量方法,同时建立了相应的仿真系统。仿真分析了不同结构参数对 3D 测量结果的影响,对测量系统参数进行了优化,得到最佳参数配置。仿真和实验结果表明,优化后的测量系统能准确、高效地获得复合表面物体的 3D 形貌数据。

关键词 三维形貌测量; 复合表面; 仿真分析; 相位测量偏折术; 条纹投影轮廓术

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191202

Simulation and Verification of Three-Dimensional Shape Measurement Method for Composite Surface

Guo Zhinan, Liu Xiaohong, Zhang Zonghua*

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

Abstract Optical measurement methods based on full-field phase calculation can obtain three-dimensional (3D) shape of object surfaces. Full-field fringe projection profilometry and phase measuring deflectometry are used to measure the shape of diffuse surfaces and specular surface objects, respectively. There are many composite surface objects composed of diffuse surfaces and specular surfaces in industrial production and daily life. Rapid measurement of the surface shape of these objects is the key to ensuring their quality. Therefore, a composite surface 3D shape measurement method based on phase measurement deflectometry and fringe projection profilometry is proposed in this work, and a corresponding simulation system is established. The influence of different structural parameters on the 3D measurement results is analyzed by simulation, and the parameters of the measurement system are optimized to obtain the optimal parameter configuration. Simulation and experimental results show that the optimized measurement system can accurately and efficiently obtain the 3D shape data of composite surface objects.

Key words three-dimensional shape measurement; composite surface; simulation analysis; phase measuring deflectometry; fringe projection profilometry

OCIS codes 120.6650; 120.4290; 120.4820; 120.5050

1 引言

光学三维测量技术具有成本低、效率高、准确、非接触等优点,广泛应用于精密制造、工业检测、文物保护、服装设计等领域^[1-3]。根据被测对象表面反射性质的不同,可将光学三维测量技术分为针对漫反射物体和针对镜面物体两大类。

条纹投影轮廓术(FPP)是测量漫反射物体中最常用的光学测量技术之一。骆凤等^[4]引入傅里叶变换进行条纹分析,经频域滤波、逆变换等操作实现相位重建。Huang 等^[5-6]利用三步相移以及改进的三步相移算法结合高速条纹投影、采集设备实现了对平滑、连续漫反射物体的高速测量。Zhang 等^[7-8]将最佳条纹选择算法和多通道彩色编码方法用到

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-02-08; 录用日期: 2020-02-13

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

* E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn

FPP中,克服了传统FPP无法测量大梯度、不连续表面的问题。

相位测量偏折术(PMD)因具有高动态范围、全场测量等优点,被广泛应用于镜面物体的测量。Bothe等^[9]提出了一种用水平和垂直方向相位确定反射点位置,然后对斜率进行积分得到深度信息的单目PMD系统。Knauer等^[10]利用双相机确定被测物上某点的法线方向,解决了镜面反射歧义性问题。Tang等^[11]提出了一种利用虚拟抛物面测量非球面镜的PMD。Liu等^[12]提出了一种直接相位测量偏折术(DPMD),直接建立绝对相位和深度之间的数学模型,避免了传统PMD的斜率积分过程,可测量非连续和孤立表面的物体。

工业生产和日常生活中存在多种由漫反射面和镜面共同组成的复合表面物体,这类物体的三维形貌无法用单一的FPP或PMD获取。Huang等^[13]利用FPP和立体PMD测量了反射属性介于漫反射和镜面反射之间的类镜面,同时分析了条纹投影技术和条纹反射技术在测量部分漫反射和部分镜面反射物体时的灵敏度和精度。Sandner^[14]和岳慧敏等^[15]分别利用FPP和基于梯度积分的PMD对复合表面物体进行测量。前者用FPP预先获得的被测物体初始高度作为立体PMD的迭代初值,以恢复被测物体的三维形貌。后者在测量时投影仪和显示屏分时工作,需要根据被测物体表面的反射性质设置迭代修正参数和迭代初值。两种方法均能实现复合表面的测量,但无法测量非连续复合表面和实现该类表面不同

反射部分的同时测量。

为了同时测量非连续、孤立的复合表面,本文提出了一种结合DPMD和FPP的复合表面物体三维测量方法,并仿真分析了主要系统参数对测量结果的影响,最后通过实验验证了该方法的有效性。

2 复合表面测量系统的基本原理

图1为复合表面三维形貌测量系统的原理图,主要由两个液晶显示屏(LCD)、一个CCD相机、一个分束器(BS)及一个数字投影仪(DLP)组成。LCD₁通过BS得到的成像面LCD'₁和LCD₂构成平行双屏结构,与CCD相机一起组成复合系统镜面测量部分^[12];DLP与CCD相机组成复合系统漫反射测量部分,两个部分的参考面在同一个位置,记为R。Δd为LCD₂到LCD'₁的距离,d为LCD'₁到镜面参考面的距离,A为参考镜面上的任意一点,D为复合表面上的任意镜面反射点。φ_{r₂}、φ'_{r₁}分别为LCD₂上r₂位置处、LCD'₁上r₁位置处入射到A点的绝对相位值,φ_{m₂}、φ'_{m₁}分别为LCD₂上m₂位置处、LCD'₁上m₁位置处入射到D点的绝对相位值,ΔL₁为φ'_{r₁}与φ'_{m₁}的距离,θ'和φ分别为A点的反射角和D点的二倍梯度角。F和F''分别为DLP和CCD的焦点,L为CCD相机到参考面的距离。L_p为DLP到参考面的距离,B为复合表面上任意漫反射部分的点,C为漫反射参考面上的任意点,O'O为DLP的光轴,O''O为CCD相机的光轴,相交于参考面上同一点O(也可不相交)。η为B点进入相机的

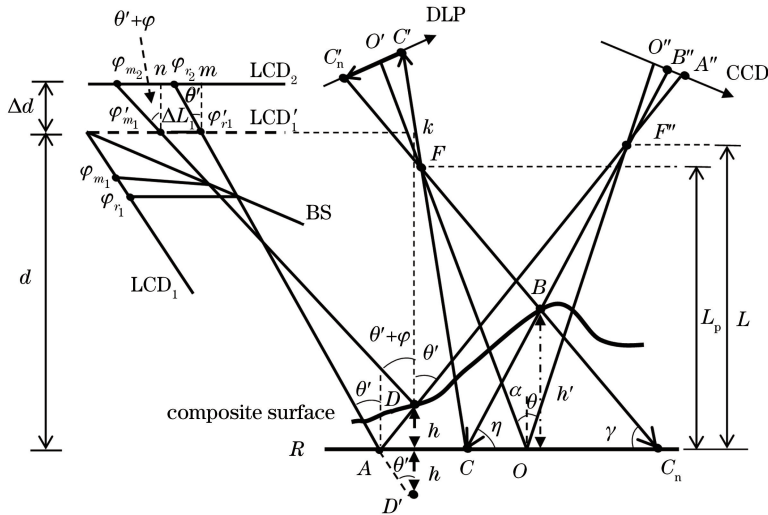


图1 复合表面三维形貌的测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional shape measurement of composite surface

光线与参考面的夹角, γ 为投影仪投向 B 点的光线与参考面的夹角, α 为投影仪光轴与参考面法线的夹角。LCD 单像素的物理尺寸为 $d_L \times d_L$, DLP 的分辨率、单像素物理尺寸、焦距分别为 $X_D \times Y_D$ 、 $d_D \times d_D$ 、 f_D , CCD 的分辨率、单位像素物理尺寸、焦距分别为 $X_C \times Y_C$ 、 $d_C \times d_C$ 、 f_C 。

当无被测物时, CCD 中的 A'' 为 LCD₂ 和 LCD₁' 屏幕上绝对相位 φ_{r_2} 和 φ'_{r_1} 经参考镜面 A 点反射到相机的成像点。有被测物时, CCD 中 A'' 为 LCD₂ 和 LCD₁' 屏幕上 φ_{m_2} 、 φ'_{m_1} 经复合物体镜面部分 D 点反射到相机的成像点。 n 、 m 分别为 LCD₁' 上 φ'_{m_1} 和 φ'_{r_1} 向 LCD₂ 做垂线的垂足, D' 为 D 关于参考镜面的对称点, AD' 为参考镜面上 A 点入射光线的延长线。根据 LCD 上相位与条纹之间的关系, 得到 φ_{r_2} 与 m 的间距为 $(\varphi'_{r_1} - \varphi_{r_2}) \cdot d_q / 2\pi$, 其中, d_q 为单个条纹的宽度。由于 φ'_{r_1} 、 φ_{r_2} 和 m 三点可构成直角三角形, 即

$$(\varphi'_{r_1} - \varphi_{r_2}) \cdot d_q / 2\pi = \Delta d \cdot \tan \theta', \quad (1)$$

$$(\varphi'_{m_1} - \varphi_{m_2}) \cdot d_q / 2\pi = \Delta d \cdot \tan(\theta' + \varphi). \quad (2)$$

由图 1 中几何关系可知

$$\Delta L_1 = (d - h) \cdot \tan(\theta' + \varphi) - (d + h) \cdot \tan \theta'. \quad (3)$$

由 LCD 上相位与条纹之间的关系, 得到

$$\Delta L_1 = (\varphi'_{r_1} - \varphi'_{m_1}) \cdot d_q / 2\pi. \quad (4)$$

当没有被测物时, CCD 中的 B'' 为漫反射参考面 C 的成像点。当有被测物时, CCD 中的 B'' 为复合表面漫反射部分 B 的成像点。若 B'' 的相位差 (C 、 B 之间的相位差) 为 $\Delta\varphi$, 则 B 在 DLP 中的对应点 C'_n 可表示为

$$X_n = X_0 + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot P, \quad (5)$$

$$C'_n = X_n \cdot d_D, \quad (6)$$

式中, X_n 和 X_0 分别为 C'_n 和 C' 在 DLP 中的像素位置, P 为单个条纹的像素周期。利用投影关系可得到 C'_n 在参考面上的点 C_n , 由几何关系得到

$$\gamma = \operatorname{arccot} \frac{O'C'_n}{O'F} - \alpha, \quad (7)$$

$$\eta = \operatorname{arccot} \frac{O''B''}{O''F''} - \theta. \quad (8)$$

由(1)式~(4)式可得到复合表面镜面部分的高度, 由(5)式~(8)式可得到复合表面漫反射部分的高度, 则复合表面的高度可表示为

$$H = \begin{cases} \frac{\Delta d \cdot (\varphi_{m_1} - \varphi_{r_1}) - d \cdot [(\varphi_{r_1} - \varphi_{r_2}) - (\varphi_{m_1} - \varphi_{m_2})]}{(\varphi_{m_1} - \varphi_{m_2}) + (\varphi_{r_1} - \varphi_{r_2})} (\text{specular surface}) \\ \frac{CC_n}{\cot \eta + \cot \gamma} (\text{diffuse surface}) \end{cases}. \quad (9)$$

综上所述, 系统参数 Δd 、 d 、 P 、 θ' 和 α 会影响复合表面三维形貌测量的结果。其中, θ 为 θ' 的一个特殊值, 可通过对相机标定得到, 因此, 在分析系统参数对复合表面三维测量结果的过程中可用 θ 代替 θ' 。

3 复合表面测量仿真系统及影响因素

在上述数学模型的基础上, 通过建立显示屏、参考面、被侧面、相机之间的数学模型以及投影仪、参考面、被侧面之间的数学模型模拟实际系统中条纹图的投影、采集过程, 然后对条纹图进行处理得到绝对相位图, 计算复合表面的高度。复合表面仿真系统由测量镜面部分的数学模型^[16]和测量漫反射部分的数学模型组成。

3.1 复合表面镜面反射测量仿真模型的建立

测量时用垂直方向的正弦条纹, 因此, 相位只与水平方向的位置有关, 如图 2 所示。LCD₁' 和 LCD₂'

分别为 LCD₁'、LCD₂ 在参考镜面 R 中的镜像。记光线 O_2O 与 LCD₂、LCD₁' 和参考镜面的交点 O_2 、 O'_1 、 O 的 x 坐标分别为 x_{o_2} 、 x'_{o_1} 、 x_o , 光线 A_2A 与 LCD₂、LCD₁' 和参考镜面的交点 A_2 、 A'_1 、 A 的 x 坐标分别为 x_2 、 x'_1 、 x , CCD 中 O'' 、 A'' 的 x 坐标分别为 X_{OC} 、 X , 显示屏的分辨率为 $X_{LCD} \times Y_{LCD}$, D_{H2} 和 D'_{H1} 的 x 坐标为 x_{H2} 、 x'_{H1} , O'_2 的 x 坐标为 x'_{o_2} 。将参考镜面 R 等效为由单位物理尺寸为 $d_M \times d_M$ 的离散点组成的平面, 由图 2 可得到 LCD₂ 上的坐标 x_2 和 LCD₁' 上的坐标的 x'_1 分别为

$$x_2 = X_{LCD} - x + x_o - x'_{o_2}, \quad (10)$$

$$x'_1 = x_2 + \frac{\Delta d}{d_L \cdot \left(\frac{L}{AO} + L \cdot \tan \theta \right)}. \quad (11)$$

为模拟 LCD 条纹在复合表面镜面部分的投影, 利用文献[17]中的迭代法求出物面上任意一点和参考面间的坐标关系, 再利用图 2 中的 ΔL_1 、 ΔL_2 求

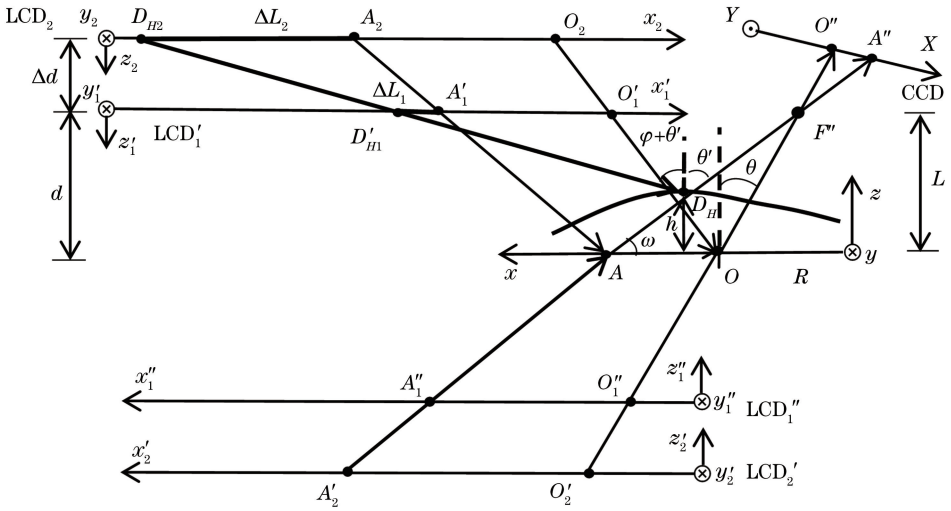


图2 复合表面 DPMD 测量的几何模型

Fig. 2 Geometry of the composite surface DPMD measurement

出复合表面上任意镜面反射点 D_H 对应两个 LCD 上的位置 D_{H2} 和 D_{H1} 的坐标 x_{H2} 、 x'_{H1} ，可表示为

$$x'_{H1} = x'_1 - \frac{\Delta L_1}{d_L}, \quad (12)$$

$$x_{H2} = x_2 - \frac{\Delta L_2}{d_L}. \quad (13)$$

根据 x_{H2} 、 x'_{H1} 可得到 LCD_2 和 LCD_1' 投影到复合表面镜面反射部分的条纹。

相机采集模型如图3所示，其中， MN 、 $M_C N_C$

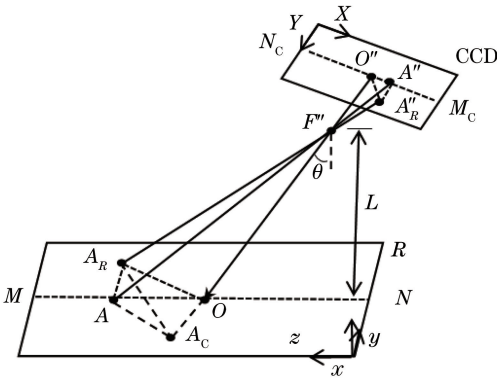


图3 采集模型

Fig. 3 Acquisition model

分别为参考镜面 R 和 CCD 靶面 x 轴方向上的对称轴， A 为参考面上任意一点 A_R 在 MN 上的垂足， A''_R 为 A_R 在 CCD 上的像点， A'' 为 A''_R 在 $M_C N_C$ 上的垂足， A_C 为 A 在相机光轴延长线上的垂足。由图3中的相似三角形 ($\triangle O''A''F''$ 和 $\triangle A_C A F''$ 、 $\triangle A''_R A'' O''$ 和 $\triangle A_R A A_C$) 可得到参考面上 A_R 在 CCD 中的对应位置，其横纵坐标 X 、 Y 可表示为

$$\begin{cases} X = \frac{X_C}{2} + \frac{f_C \cdot (x - x_o) \cdot d_M \cdot \cos \theta}{d_C \cdot \left[(x - x_o) \cdot d_M \cdot \sin \theta + \frac{L}{\cos \theta} \right]} \\ Y = \frac{Y_C}{2} + \frac{(y - y_o) \cdot d_M \cdot f_C}{d_C \cdot \left[(x - x_o) \cdot d_M \cdot \sin \theta + \frac{L}{\cos \theta} \right]} \end{cases}. \quad (14)$$

3.2 复合表面漫反射测量仿真模型的建立

图1中的 DLP 与 CCD 相机组成基于 FPP 的复合表面漫反射测量部分。DLP 和 CCD 有相似的几何结构，因此可将 DLP 在参考面的投影过程当作3.1节中 CCD 采集条纹的逆过程。图1中漫反射参考面(与镜面参考面同一位置)上点 $C(x, y, 0)$ 与 DLP 上点 $C'(X', Y', 0)$ 的关系为

$$\begin{cases} x = x_o - \frac{\left(\frac{X_D}{2} - X' \right) \cdot d_D \cdot \frac{L_p}{\cos \alpha}}{d_M \cdot \left[f_D \cdot \cos \alpha - \left(\frac{X_D}{2} - X' \right) \cdot d_D \cdot \sin \alpha \right]} \\ y = y_o + \frac{\left(Y' - \frac{Y_D}{2} \right) \cdot d_D \cdot \left[(x_o - x) \cdot d_M \cdot \sin \alpha + \frac{L_p}{\cos \alpha} \right]}{d_M \cdot f_D} \end{cases}. \quad (15)$$

图 1 中复合表面漫反射部分任意点 B 对应 DLP 上的 C'_n , 用文献[17]中的迭代法可得到 B 点的位置 $B(x, y, h')$, 逐点运算 DLP 上的点就能得到复合表面漫反射部分的条纹图。相机采集的仿真

中, 将被测漫反射部分中每一个点所在的平面视为新的参考面, 利用 3.1 节中相机和参考面之间的关系, 可得到物面上的点在 CCD 中的成像位置, 可表示为

$$\begin{cases} X = \frac{X_C}{2} + \frac{f_C \cdot \cos \theta \cdot [(x - x_o) \cdot d_M + h'(x) \cdot \tan \theta]}{d_C \cdot \left\{ \sin \theta \cdot [(x - x_o) \cdot d_M + h'(x) \cdot \tan \theta] + \frac{L - h'(x)}{\cos \theta} \right\}} \\ Y = \frac{Y_C}{2} + \frac{(y - y_o) \cdot d_M \cdot f_C}{d_C \cdot \left\{ \sin \theta \cdot [(x - x_o) \cdot d_M + h'(x) \cdot \tan \theta] + \frac{L - h'(x)}{\cos \theta} \right\}} \end{cases} \quad (16)$$

3.3 复合表面测量仿真系统验证

为验证测量仿真系统的有效性, 对 $H = 0.99$ ($\sqrt{r^2 - [(x - x_o) \cdot d_M]^2 - [(y - y_o) \cdot d_M]^2} - 0.99r$) ($r = 350 \text{ mm}, H > 0$) 的复合球冠模型进行了仿真实验, 其中, r 为球冠半径。该复合曲面 $y > y_o$ 的部分为镜面反射面, $y \leq y_o$ 的部分为漫反射面。相关参数: 两个 LCD 的分辨率均为 $X_{LCD} \times Y_{LCD} = 2560 \text{ pixel} \times 1600 \text{ pixel}$, 单像素物理尺寸 $d_L \times d_L = 84.75 \mu\text{m} \times 84.75 \mu\text{m}$, $d = 160 \text{ mm}, \Delta d = 45 \text{ mm}$, O_2 为 LCD_2 中心; DLP 的分辨率 $X_D \times Y_D = 1140 \text{ pixel} \times 912 \text{ pixel}$, 单像素物理尺寸 $d_D \times d_D = 7.6 \mu\text{m} \times 7.6 \mu\text{m}$, $L_p = 310 \text{ mm}, f_D = 11.9 \text{ mm}$,

$\alpha = 0^\circ$; CCD 的分辨率 $X_C \times Y_C = 1296 \text{ pixel} \times 964 \text{ pixel}$, 单像素物理尺寸 $d_C \times d_C = 3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$, $L = 310 \text{ mm}, f_C = 8.0 \text{ mm}, \theta = 33.7^\circ$; 复合系统投射正弦条纹的周期和参考面的尺寸分别为 $30 \text{ pixel}, 65.93 \text{ mm} \times 49.30 \text{ mm}$ 。图 4 和图 5 为复合表面测量仿真系统产生的条纹图。图 6(a) 为恢复后的复合表面三维形貌, 图 6(b) 为计算值与预设原始高度的误差分布。测量得到复合表面高度的计算值与原始预设值之间的均方根误差 (RMS) 为 $4.3779 \times 10^{-5} \text{ mm}$, 这表明该仿真系统能准确地测量复合表面。

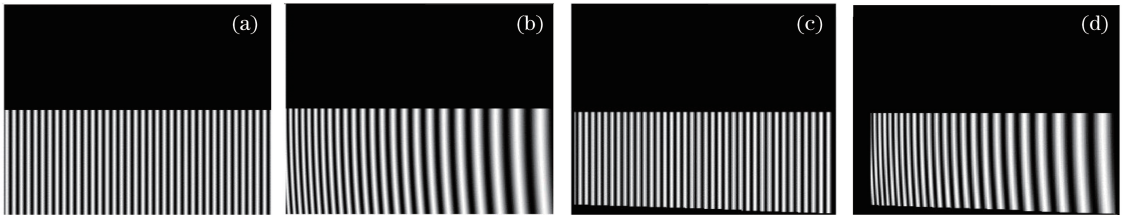


图 4 仿真的镜面条纹图。(a)参考面;(b)被测面;(c)相机采集的参考面;(d)相机采集的被测面
Fig. 4 Specular fringe image obtained by simulation. (a) Reference surface; (b) measured surface; (c) reference surface collected by camera; (d) measured surface collected by camera

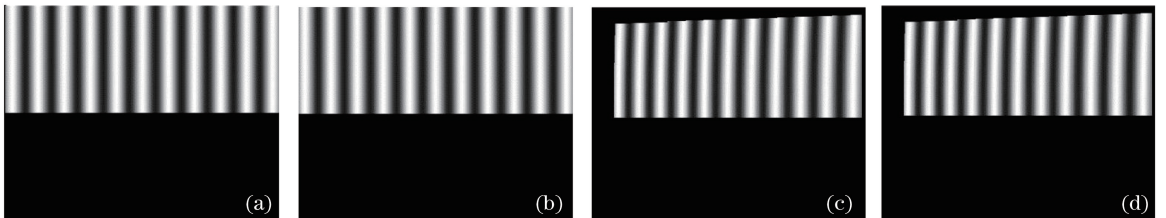


图 5 仿真的漫反射条纹图。(a)参考面;(b)被测面;(c)相机采集的参考面;(d)相机采集的被测面
Fig. 5 Diffuse fringe image obtained by simulation. (a) Reference surface; (b) measured surface; (c) reference surface collected by camera; (d) measured surface collected by camera

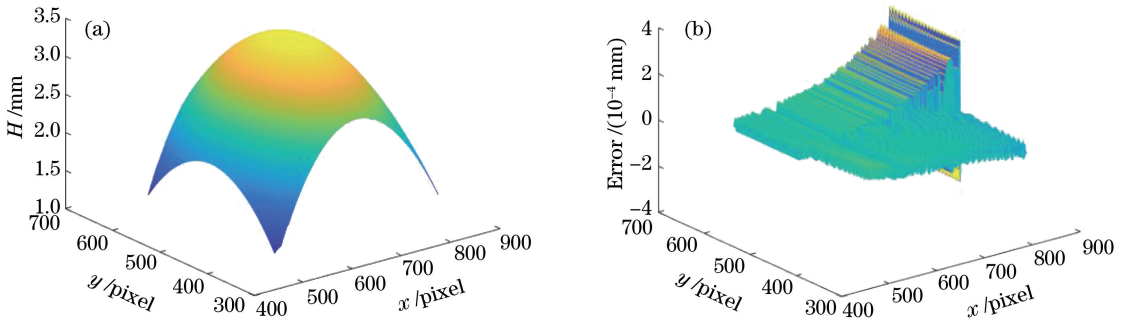


图6 复合表面的高度和误差分布。(a)高度;(b)误差分布

Fig. 6 Height and error distribution of the composite surface. (a) Height; (b) error distribution

3.4 系统参数对复合表面三维测量结果的影响

用高度为5 mm的复合平面分析系统参数 Δd 、 d 、 P 、 θ 和 α 对测量结果的影响,各系统参数的初始

值与3.3小节相同,每次只改变其中一个参数,结果如图7所示。在LCD和DLP的原始条纹中加入2.5%的高斯噪声,用来模拟实际的测量环境。

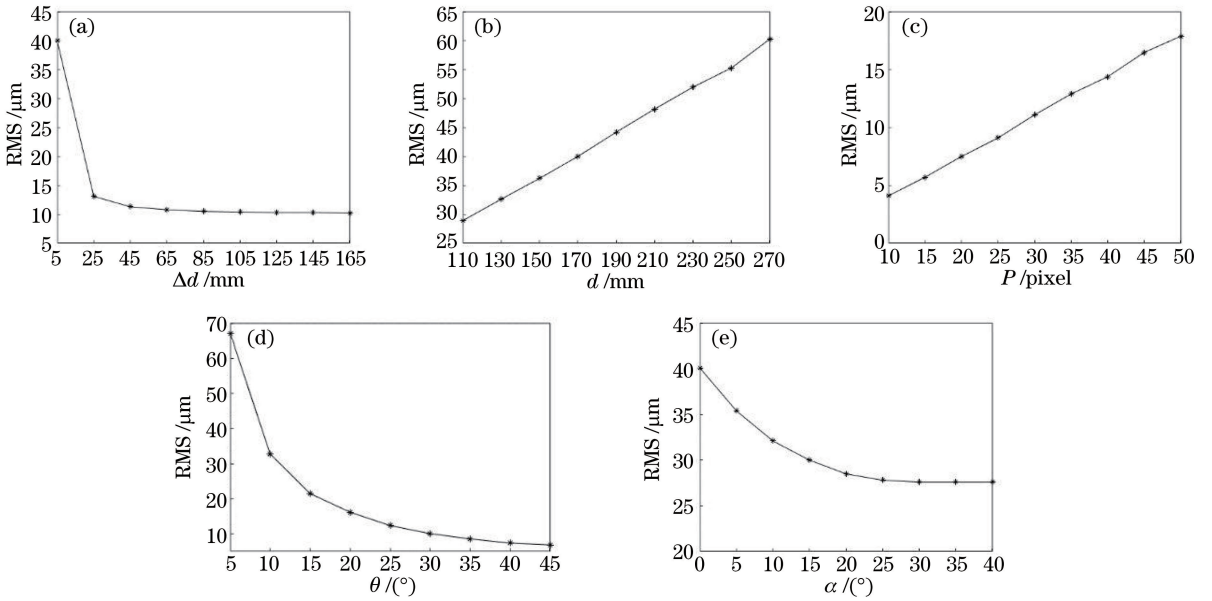


图7 系统参数对RMS的影响。(a) Δd ; (b) d ; (c) P ; (d) θ ; (e) α

Fig. 7 Effect of system parameters on RMS. (a) Δd ; (b) d ; (c) P ; (d) θ ; (e) α

在仿真屏幕LCD₂和LCD₁间距 Δd 对复合表面测量系统影响的过程中,对距离为5~165 mm区间内,间隔为20 mm的数据进行实验。通过计算每个数据的RMS评价该参数对测量结果的影响,由图7(a)可知,在测试区间内RMS随 Δd 的增大而减小。由(1)式和(2)式可知,当相机光轴与参考镜面法向量之间的角度不变时,每个LCD上的点入射到参考镜面上的相位和入射到复合表面镜面反射部分的相位差会随 Δd 的增加而增加,从而提高信噪比和测量精度。

取 d 在110~270 mm区间内间隔为20 mm的数据进行仿真实验,得到参数 d 对测量结果RMS的影响如图7(b)所示,可以发现,测试区间

内RMS随 d 的增加而增大。对(9)式中的 d 求偏导,得到

$$\frac{\partial H}{\partial d} = \frac{(\varphi_{m_1} - \varphi_{m_2}) - (\varphi_{r_1} - \varphi_{r_2})}{(\varphi_{m_1} - \varphi_{m_2}) + (\varphi_{r_1} - \varphi_{r_2})} \quad (17)$$

可以发现,(17)式的结果为正值,因此 d 越大,RMS越大。

对10~50 pixel区间内间隔为5 pixel的数据进行仿真实验,如图7(c)所示,可以发现,测试区间内RMS随参数 P 的增加而增大。原因是条纹周期 P 越大,相邻条纹间的距离越大,从而导致信噪比降低。实际设置参数 P 时,应在保证相机能分辨出条纹情况下,适当减小条纹周期 P 。

取 θ 在5°~45°区间内间隔为5°的数据进行仿

真实实验,结果如图 7(d)所示。可以发现,测试区间内 RMS 随 θ 的增加而减小。原因是增大 θ 会使(9)式中 $\varphi_{m_1} - \varphi_{m_2}$ 、 $\varphi_{r_1} - \varphi_{r_2}$ 、 $\varphi_{r_1} - \varphi_{m_1}$ 的值增大,对噪声有很好的抑制作用。其次,增大 θ 也可以提高系统测量的灵敏度和信噪比。因此,在保证复合表面不被自身遮挡的条件下,增大相机光轴和参考面法向量间夹角 θ 可提高测量精度。

对 $0^\circ \sim 40^\circ$ 区间内间隔为 5° 的数据进行仿真,结果如图 7(e)所示。可以发现,测试区间内 RMS 随 α 的增加而减小。因此实际设置参数 α 时,在保证复合表面不被自身遮挡以及梯形畸变不影响测量的情况下,增大 α 可提高测量精度。

4 实验验证

为验证该方法的有效性,搭建了实际的复合表面三维测量系统,如图 8 所示。为简化实验,用水平移动台将单显示屏移动到两个位置,以等效复合测量系统中的双屏结构。实际测量系统由单个 LCD、DLP、CCD 相机、带圆环的复合标准面、两个水平移动台以及一些辅助夹具组成。

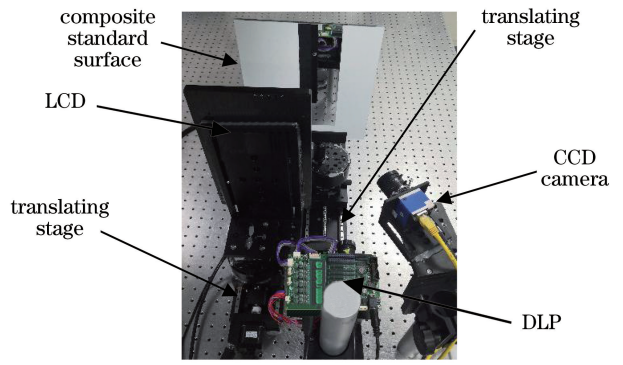


图 8 复合表面测量系统

Fig. 8 Measuring system of composite surface

标定好相机和系统参数后,标记 LCD 所在的位置为位置 1。LCD 在位置 1 投射红条纹、DLP 同时投射蓝条纹,相机采集经复合表面调制的条纹图,分离红蓝颜色通道数据。水平台移动 LCD 一段距离 (Δd) 后的位置为位置 2,此时关闭投影仪,相机拍摄 LCD 经复合表面镜面反射的条纹图。对条纹图分别进行相位解调、相位展开,以恢复物体的三维形貌。为验证 3.4 节中的结论,用图 8 中的标准复合平面作为被测物,结果如图 9 所示。

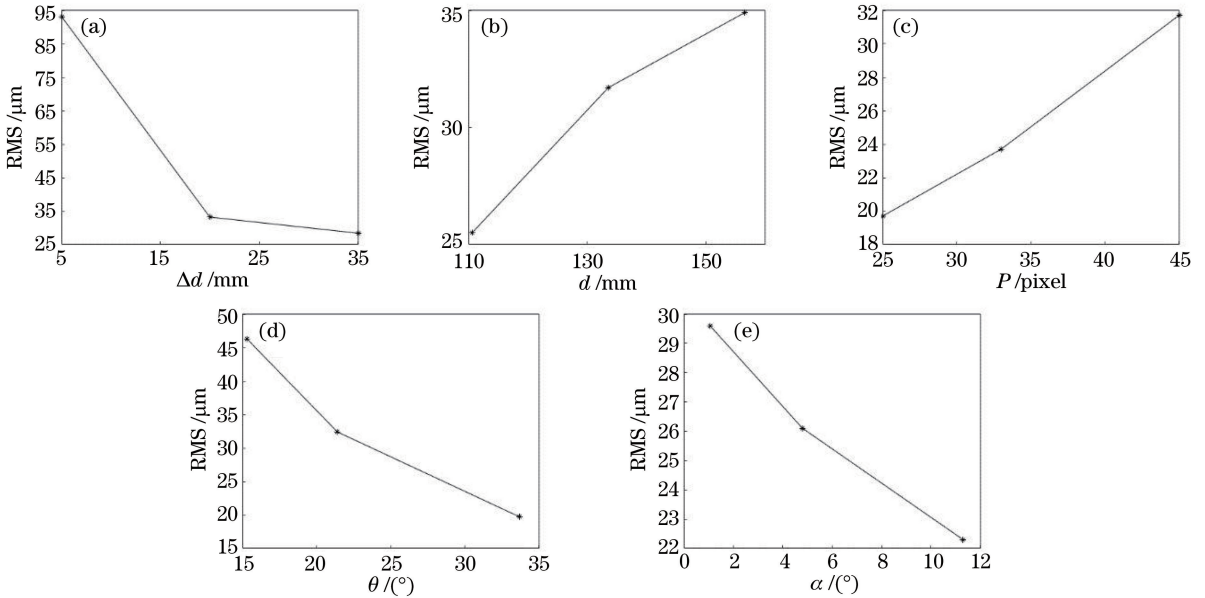


图 9 实际测量系统参数对 RMS 的影响。(a) Δd ; (b) d ; (c) P ; (d) θ ; (e) α

Fig. 9 Effect of actual measurement system parameters on RMS. (a) Δd ; (b) d ; (c) P ; (d) θ ; (e) α

图 9(a) 中的 Δd 分别为 5.000, 20.000, 35.000 mm, 图 9(b) 中的 d 分别为 110.599, 133.599, 156.599 mm, 图 9(c) 中的 P 分别为 25, 33, 45 pixel, 图 9(d) 中的 θ 分别为 15.3° 、 21.4° 、 33.7° , 图 9(e) 中的 α 分别为 1.1° 、 4.8° 、 11.3° 。可以发现,系统参数 Δd 、 d 、 P 、 θ 和 α 对测量结果 RMS 的影响趋势与 3.4 中的仿真结果一致。

综合考虑相机景深、条纹清晰度、元器件的遮挡等因素,使 Δd 、 d 、 P 、 θ 和 α 分别为 20.000 mm、110.599 mm、33 pixel、 28.9° 、 11.3° , 对图 10(a) 中的圆形复合台阶进行测量,三维重建结果如图 10(c) 所示,图 10(b) 是位置 1 处的条纹图,表 1 为测量结果的精度。可以发现,相邻台阶面间最大绝对误差和 RMS 分别为 0.030 mm 和 0.031 mm,

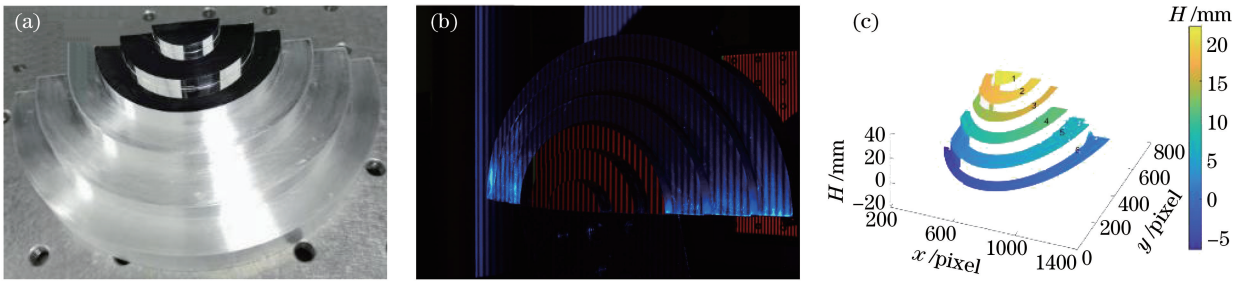


图 10 复合表面的三维重建结果。(a)被测复合台阶;(b)位置 1 的条纹图;(c)高度图

Fig. 10 Three-dimensional reconstruction result of composite surface. (a) Tested composite steps; (b) fringe pattern of position1; (c) height map

表 1 复合台阶实验结果

Table 1 Experimental results on the composite step

unit: mm

Step	Actual distance	Measured distance	Absolute error	RMS
1-2	3.0001	2.974	0.026	0.026
2-3	3.9998	4.024	0.024	0.025
3-4	5.0015	5.031	0.030	0.031
4-5	5.4978	5.524	0.026	0.028
5-6	6.4997	6.472	0.028	0.030

这表明本方法能准确、高效地测量复合表面物体。

5 结 论

提出了一种结合直接相位测量偏折术和条纹投影轮廓术测量复合表面的新方法,并建立了复合表面三维形貌测量仿真系统。详细分析了五个系统参数对复合表面测量结果的影响,结果表明,复合表面测量结果的 RMS 随屏幕 LCD_2 和 LCD_1' 间距 Δd 、 θ 、 α 的增加而减小,随 d 、 P 的增加而增大。该结果可以帮助实际复合表面测量系统选择最优的参数配置,提高实验的效率和测量精度。最后利用优化的参数对一个标准台阶进行测量,结果表明,本方法能准确、高效地测量非连续复合表面物体。

参 考 文 献

- [1] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 18-31.
- [2] Zhang Z H, Wang Y M, Huang S J, et al. Three-dimensional shape measurements of specular objects using phase-measuring deflectometry [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(12): 2835.
- [3] Huang L, Idir M, Zuo C, et al. Review of phase measuring deflectometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 247-257.
- [4] Luo F, Chen W J, Su X Y. Improve measurement range and accuracy of Fourier transform profilometry by Hilbert transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110701.
- [5] 骆凤, 陈文静, 苏显渝. 利用 Hilbert 变换提高傅里叶变换轮廓术的测量范围和精度 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110701.
- [6] Huang P S, Zhang S. Fast three-step phase-shifting algorithm [J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5086-5091.
- [7] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement [J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 123601.
- [8] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Phase and colour calculation in colour fringe projection [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9(6): S81-S86.
- [9] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection [J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6444-6455.
- [10] Bothe T, Li W S, von Kopylow C, et al. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [J]. Proceeding of the SPIE, 2004, 5457: 411-422.
- [11] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [J]. Proceeding of the SPIE, 2004, 5457: 366-376.
- [12] Tang Y, Su X Y, Wu F, et al. A novel phase measuring deflectometry for aspheric mirror test [J].

- Optics Express, 2009, 17(22): 19778-19784.
- [12] Liu Y, Huang S J, 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): 10293.
- [13] 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[J]. Proceeding of the SPIE, 2011, 8133: 813304.
- [14] Sandner M. Hybrid reflectometry-3D shape measurement on scattering and reflective surfaces [2019-12-18]. https://www.researchgate.net/publication/303444255_Hybrid_Reflectometry_-_3D_shape_measurement_on_scattering_and_reflective_surfaces.
- [15] Yue H M, Li R, Pan Z P, et al. Face structure light three-dimensional measuring system: CN106197322B [P]. 2019-04-02.
岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 一种面结构光三维测量系统及其测量方法: CN106197322B [P]. 2019-04-02.
- [16] Zhao P, Gao N, Zhang Z H, et al. Performance analysis and evaluation of direct phase measuring deflectometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 103: 24-33.
- [17] Zhou D, Wang Z Y, Gao N, et al. Virtual fringe projection system with nonparallel illumination based on iteration [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(6): 065201.