



DOI: 10.12086/oe.2024.240024

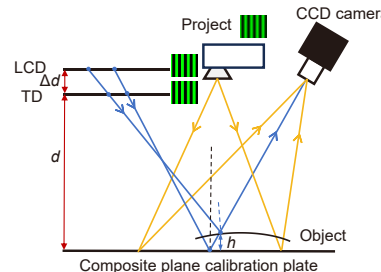
## 基于离焦二值显示和条纹投影的复合表面三维测量方法

邵金凤<sup>1</sup>, 倪育博<sup>1</sup>, 孟召宗<sup>1</sup>, 高楠<sup>1</sup>, 高宇森<sup>1</sup>, 杨泽青<sup>1</sup>,  
张国锋<sup>2</sup>, 尹伟<sup>3</sup>, 赵洪伟<sup>2,3</sup>, 张宗华<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>河北工业大学机械工程学院, 天津 300401;

<sup>2</sup>西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049;

<sup>3</sup>中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065



**摘要:** 由于复合表面物体中漫反射部分和镜面部分反射性质不同, 受到相机景深的限制, 镜面成像的正弦条纹发生离焦, 从而引起相位误差。为了实现复合表面物体的高效、高精度测量, 本文提出了一种离焦二值结合正弦条纹的复合表面三维形貌测量方法。首先, 本文基于刀边法与二次模糊法对系统离焦程度进行分区标定, 解决了由于相机倾斜放置导致参考面离焦程度不同的问题。然后, 建立二值条纹相位误差模型, 确定最佳条纹宽度和离焦量范围。最后, 对轻微离焦区域的二值条纹进行离焦补偿, 确保相机采集的条纹均在最佳离焦范围内。在此基础上进行三维形貌测量。实验结果表明, 所提方法使镜面部分误差从原来的 0.033 mm 降至 0.019 mm, 提高了复合表面测量精度。

**关键词:** 复合表面测量; 二值离焦技术; 离焦估计; 参数选择; 离焦补偿

**中图分类号:** TH741

**文献标志码:** A

邵金凤, 倪育博, 孟召宗, 等. 基于离焦二值显示和条纹投影的复合表面三维测量方法 [J]. 光电工程, 2024, 51(4): 240024

Shao J F, Ni Y B, Meng Z Z, et al. Three-dimensional shape measurement of composite surface based on defocused binary display and fringe projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(4): 240024

## Three-dimensional shape measurement of composite surface based on defocused binary display and fringe projection

Shao Jinfeng<sup>1</sup>, Ni Yubo<sup>1</sup>, Meng Zhaozong<sup>1</sup>, Gao Nan<sup>1</sup>, Gao Yusen<sup>1</sup>,  
Yang Zeqing<sup>1</sup>, Zhang Guofeng<sup>2</sup>, Yin Wei<sup>3</sup>, Zhao Hongwei<sup>2,3</sup>, Zhang Zonghua<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

<sup>3</sup>National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract:** Due to the different reflective properties of the diffuse and specular components in composite surface objects and the limitations imposed by the camera depth of field, defocusing of sinusoidal fringes occurs in specular

收稿日期: 2024-01-25; 修回日期: 2024-02-21; 录用日期: 2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2341275, 52075147); 河北省教育厅科学研究资助项目 (JZX2024021)

\*通信作者: 张宗华, zh Zhang@hebut.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

imaging, leading to phase errors. To achieve the efficient and high-precision measurement of composite surface objects, this paper proposes a method for three-dimensional surface topography measurement by combining defocused binary patterns with sinusoidal fringes. Firstly, the paper partitions and calibrates the defocus level of the system based on the edge and second-order blur methods, addressing the issue of varying defocus levels of the reference surface due to the tilted placement of the camera. Then, a binary fringe phase error model is established to determine the optimal fringe width and the defocus range. Finally, defocus compensation is applied to the binary fringes in the slightly defocused region, ensuring that the captured fringes are within the optimal defocus range. Three-dimensional surface topography measurement is conducted based on this approach. Experimental results show that the proposed method reduces the error in the specular component from 0.033 mm to 0.019 mm, thereby improving the accuracy of composite surface measurement.

**Keywords:** composite surface measurement; binary defocusing technique; defocus estimation; parameter selection; defocus compensation

## 1 引言

由于非接触、精度高及快速全场测量等优点, 结构光技术被广泛应用于物体的三维形貌测量<sup>[1-3]</sup>。伴随着先进制造业的发展, 智能制造等前沿领域出现兼具镜面和漫反射特性的复合表面部件, 亟待进行精密测量。然而复合表面中镜面部分与漫反射部分的反射性质不同。在现有的光学测量方法中, 无法在仅使用某一种方法的情况下, 实现复合反射表面三维信息的高效高精度测量。刘小红等<sup>[4]</sup>将条纹投影测量技术和直接相位偏折术相结合, 在同一世界坐标系下建立了相位与深度直接关系的数学模型, 实现了连续、非连续复合反射表面三维形貌的高效率测量。但由于利用半透半反镜和显示屏实现直接相位偏折术子系统同轴光路中的双屏显示, 系统结构较为复杂, 标定过程困难且测量视场较小, 因此刘硕等<sup>[5]</sup>提出使用一块透明显

示屏取代系统中的半透半反镜和一块显示屏, 搭建基于条纹投影和双屏透射显示的复合表面测量系统, 使系统结构简化的同时, 提高了测量精度。但相机捕捉到镜面和漫反射表面两部分的反射条纹成像深度不同。在对镜面部分进行测量中, 被测物深度变化成像面距离成倍增加。同时加上透明显示屏 TD (transparent display) 和液晶显示屏 LCD (liquid crystal display) 位置的约束, 相机一般无法满足景深的需求, 而使其中一个成像面处于离焦状态。加入投影仪测量漫反射表面后, 反射成像面处于三个不同的空间位置, 相机聚焦难度也增加, 如图 1 所示。此时传统正弦条纹由于离焦导致的模糊问题不可避免, 相位误差变大。近年来在结构光技术中投影的二值条纹图案经离焦后可近似正弦条纹<sup>[6-8]</sup>, 因此可以提高结构光在离焦模糊时的信噪比。二值离焦技术使得复合表面不同成像位置的精确测量具有可行性。通过在离焦区域预先生成二值

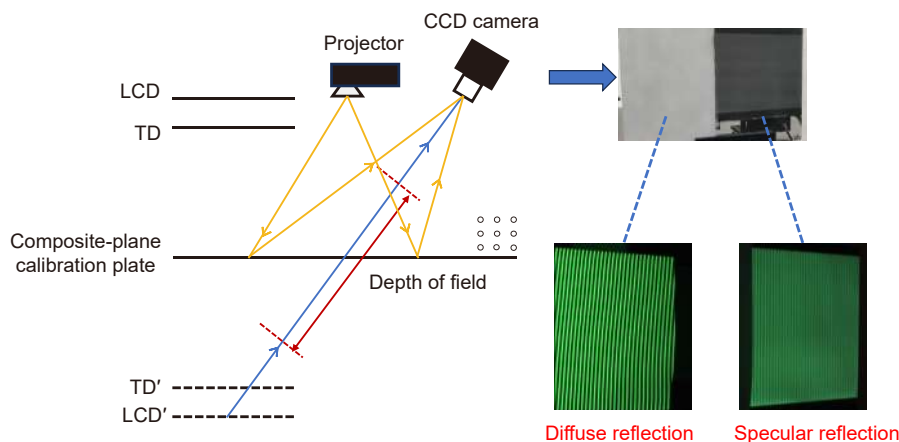


图 1 复合表面测量系统中相机景深示意图

Fig. 1 Schematic diagram of camera depth of field in composite surface measurement system

条纹,从而使相机采集到的二值条纹经该测量系统固有的离焦现象后成为类正弦条纹,最终满足测量精度。

离焦二值条纹的相位质量受离焦程度和条纹宽度这两个参数的影响,因此如何量化并选择合适参数是二值离焦投影的关键问题。Wang 等<sup>[9]</sup>对投影仪系统离焦现象进行数学分析,提出了离焦参数选择策略。但未考虑到实际的点扩散函数在同一平面会发生动态变化。Hu 等<sup>[10]</sup>建立了一个在线量化并自适应调整条纹间距的判定框架,但在线测量受被测件表面形貌影响较大,测量具有局限性。Zheng 等<sup>[11]</sup>提出了一种新的主动形状投影散焦轮廓术。该方法通过直接量化二值条纹的物理深度散焦关系来重建三维形状,适用于垂直扫描系统,然而工作效率低。Gao 等<sup>[12]</sup>提出了基于离焦度的相位展开及融合算法,测量时需要投影多个模式条纹,速度较慢。针对直接相位偏折测量系统,由于相机景深限制和测量大深度镜面物体带来的离焦问题,Shi 等<sup>[13]</sup>提出将离焦二值条纹应用到镜面测量中,解决了镜面物体离焦模糊问题,提高了测量精度。然而该方法中定性选择合理的空间位置和条纹宽度,具有较大随机性以及局限性。

为解决相机景深限制,导致系统部分区域离焦模糊的问题,本文提出在基于条纹投影和透射显示的复合表面测量系统中,采用二值条纹和传统正弦条纹结合的测量方法,即将相机聚焦到复合参考面后双显示屏分时显示二值条纹,投影仪投影正弦条纹。同时由于相机和参考面存在夹角而导致同一平面离焦程度不同,针对该问题,本文提出了一种基于刃边法和二次模糊法相结合的方法,准确地分区量化系统点扩散函数 PSF (point spread function)。建立相位误差模型,根据系统实际离焦量,选择二值条纹的最佳条纹宽度,并对轻微离焦区进行离焦补偿。使用具有最佳参数的二值条纹和正弦条纹,完成复合表面的三维形貌测量。通过多次实验,验证本方法在一定测量范围内具有较高测量精度。

## 2 理论推导

### 2.1 刃边法估计 PSF 参数

系统离焦的过程可建模为目标信号与点扩散函数 PSF 进行卷积的过程。离焦后的图像 $I(x,y)$ 表示为

$$I(x,y) = f(x,y) \otimes G(x,y), \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 表示原清晰图像, $G(x,y)$ 代表 PSF 函数,可以近似成高斯低通滤波,表示为

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为高斯核,用来表征相机的离焦程度,在实际光学系统中与图像到相机的距离有关。

在图像边缘处计算高斯核参数是一种广泛应用的离焦估计方法<sup>[14-16]</sup>,图 2 为其原理示意图。通常认为成像系统的 PSF 模型符合各向同性分布,因此分析原清晰信号和输出图像信号的一维方向具有可行性。则图像模糊的一维表达式为

$$i(x) = f(x) \otimes g(x), \quad (3)$$

式中: $i(x)$ 被称为边缘扩散函数 ESF (edge spread function), $f(x)$ 为原始清晰边缘,即阶跃函数, $g(x)$ 为高斯函数的一维表达式,称为线扩散函数 LSF(line spread function)。

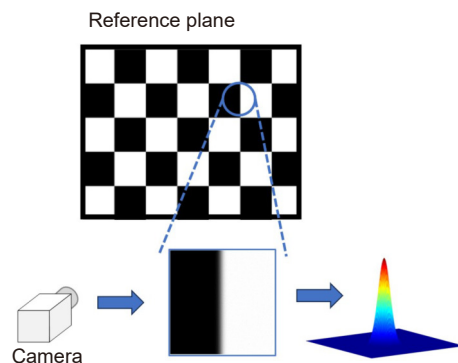


图 2 刃边法原理

Fig. 2 Principle of knife-edge method

考虑到实际采集图像中噪声的影响,对刃边法进行优化改进,利用二次拟合和初始值约束,实现自适应计算。主要的步骤为:首先,用 Canny 算子对其进行边缘检测,获得图像刃边中心位置;然后,使用最小二乘法对扩散边缘的亮度分布进行非线性拟合,利用误差函数模型来拟合 ESF 并去除噪声。由于系统具有线性叠加性,ESF 可以写成高斯函数的积分,即误差函数的形式,如式(4):

$$i(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sigma}\right) + \frac{1}{2} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x}{\sigma}} \exp(-t^2) dt + \frac{1}{2}. \quad (4)$$

最后,对去噪信号求微分并利用拟合的 ESF 进行初始参数约束,进行 LSF 拟合,具体表达如式(5):

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

通过两次拟合和参数约束,即使在初始值不准确的情况下,也能一次得到稳定准确的数据,无需迭代操作,适用于数据量大、操作繁琐的情况,实现平面不同高斯核的准确测量。

### 2.2 二次模糊法修正 PSF 参数

为了扩大刃边法的高精度测量范围, 并将实际测得相机高斯核和计算机高斯核进行统一, 本文提出二次模糊法来辅助估计高斯核修正, 通过施加已知二次模糊的方法进行模糊系数校正, 原理如图 3 所示。相机采集图像后, 使用刃边法算得的实际高斯核记为  $\sigma_c$ , 对应到显示屏像素的高斯核记为  $\sigma_d$ , 本文需要统一  $\sigma_c$  和  $\sigma_d$ 。由相机放置带来的透视问题, 在一定范围内对信号的拉伸比例视为常数, 如式 (6):

$$\frac{L_{x_c}}{L_{x_d}} = \varepsilon, \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon$  作为该范围内的拉伸系数, 为未知常数,  $L_{x_c}$  为相机视场的扩散边缘像素个数, 其与  $\sigma_c$  呈正相关,  $L_{x_d}$  为显示屏视场的扩散边缘像素个数, 通常认为显示屏的高斯核  $\sigma_d$  与扩散边缘成正相关, 关系式为

$$L_{x_d} = 6\sigma_d + 1. \quad (7)$$

此时  $\sigma_d$  和修正因子  $\varepsilon$  作为待估计的未知数, 通过施加已知二次模糊的方法求得。生成已知高斯核  $\sigma_{d1}$  的棋盘格, 由相机采集已知离焦和系统离焦叠加后的图像, 并使用刃边法进行高斯核标定, LSF 表达式为

$$g(x) \otimes g'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_c^2 + \sigma_{c1}^2)}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_c^2 + \sigma_{c1}^2}\right), \quad (8)$$

式中:  $g(x)$  为原系统离焦滤波,  $g'(x)$  为相机视场下的已知离焦滤波,  $\sigma_{c1}$  为已知  $\sigma_{d1}$  对应的实际高斯量, 由式 (10) 推导得到:

$$\sigma_1^2 = \sigma_c^2 + \sigma_{c1}^2, \quad (9)$$

式中:  $\sigma_1$  为已知模糊和系统模糊叠加后的图像模糊核, 可由刃边法求得。同理, 再次生成已知高斯核  $\sigma_{d2}$  的棋盘格, 并联立式 (8)、(9)、(11) 求解方程, 即可得到系数修正因子  $\varepsilon$  和显示屏像素下系统实际高斯核  $\sigma_d$ 。

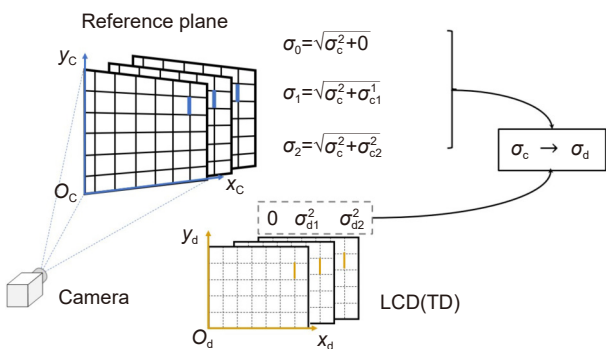


图 3 二次模糊法示意图

Fig. 3 Diagram of secondary defocusing method

### 2.3 二值离焦技术及相位误差分析

标准的方波二值条纹是由多个不同频率的正弦条纹叠加而成, 离焦过程可滤掉高次谐波。在相同离焦程度下, 二值条纹比同周期正弦信噪比高。把具有一定周期像素的二进制条纹应用高斯滤波器滤除掉三次及以上谐波, 仅保留方波的基频和一次谐波时, 即达到理想离焦状态, 可以获得具有连续相位的最佳正弦条纹图像。因此二值离焦技术中相位误差和二值条纹周期  $T$ 、高斯核  $\sigma$  有关。本文分析并建立二值条纹离焦度、周期宽度与相位误差的数学模型, 用于最佳参数选择。条纹重构误差正比相位误差<sup>[17]</sup>, 而离焦二值技术的相位误差主要来源于谐波误差和相机噪声, 表示为

$$\sigma_\varphi^2 = \sigma_{\varphi_{di}}^2 + \sigma_{\varphi_f}^2 = \frac{2\nabla_{di}^2}{Nb^2} + \frac{2\nabla_f^2}{Nb^2}, \quad (10)$$

式中:  $\sigma_\varphi$  为相位误差,  $\nabla$  为光强的干扰误差,  $\sigma_{\varphi_{di}}$  为谐波带来的误差,  $\sigma_{\varphi_f}$  为相机噪声带来的误差,  $\nabla_{di}$  为二值条纹的高次谐波对信号带来的影响,  $\nabla_f$  为相机噪声对信号的干扰,  $b$  为条纹调制度, 即一次谐波系数,  $N$  为相移步数, 本文为 4。

分析离焦二值条纹的谐波误差时, 根据 1.1 节中式 (1) 和 (2), 进行傅里叶变换, 表达式为

$$I(j\omega) = F(j\omega)G(j\omega) = A\pi\delta(\omega) + 2A \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k-1)} e^{-\frac{[(2k-1)\omega_0]^2}{2D_0^2}} \cdot \{\delta[\omega \pm (2k+1)\omega_0]\}, \quad (11)$$

式中:  $\omega = 2\pi/x$ ,  $A$  为振幅,  $D_0 = 1/\sigma_{di}$  为低通滤波器的截止频率,  $\omega_0$  为方波角频率,  $k$  为谐波级次。空域  $k$  次谐波如式 (12) 所示:

$$a_k = \begin{cases} \frac{A}{2}, & k = 0 \\ \frac{2A(-1)^{\frac{k-1}{2}}}{\pi k} e^{-\frac{2[k\pi\sigma_{di}]^2}{T^2}}, & k = 1, 3, \dots \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $\sigma_{di}$  为低通滤波器的高斯核,  $a_k$  为信号  $k$  次谐波系数, 此时由高次谐波引起的误差可以表示为

$$\sigma_{\varphi_{di}} = \sqrt{\frac{(\sum_{k=3}^{\infty} \text{abs}(a_k))^2}{2a_1^2}}. \quad (13)$$

通常认为相移法中的噪声是高斯加性噪声, 当相机的噪声误差成为误差的主要来源时, 其方差与信号零频  $a_0$  成正比<sup>[18]</sup>。因此噪声对条纹强度的干扰满足高斯分布, 可以表达为

$$\nabla_f = \mathcal{N}(0, a_0 f_n), \quad (14)$$

式中:  $f_n$  是系统噪声因子, 可通过实验得到;  $\mathcal{N}$  为正态分布。

由式 (12) ~ (14) 可得, 归一化后的相位标准差为

$$\sigma_{\text{norm}}(\sigma_{\text{di}}, T) = \frac{T}{T_{\text{max}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sum_{k=3}^{\infty} \frac{1}{k^2} e^{-\frac{4(k^2-1)(\pi\sigma_{\text{di}})^2}{T^2}} \right) + \frac{\pi^2 f_n}{16A} e^{-\frac{4(\pi\sigma_{\text{di}})^2}{T^2}}}. \quad (15)$$

### 3 二值结合正弦条纹的测量方法

在基于条纹投影和透射显示的复合表面测量系统中, 出于标定和测量精度的考虑, 电荷耦合器件 CCD (charge coupled device) 相机聚焦于参考面中心。此时, 投影仪成像清晰而直接相位偏折测量系统的双屏显示图像往往处于轻微或中度离焦。根据系统标定原理和流程<sup>[19]</sup>, 完成系统参数标定。由于成像系统相机存在倾斜角度, 并且焦点和实际像距难以准确定位, 本文通过显示和分析棋盘格图案完成系统双显示屏的离焦标定, 一方面可以根据棋盘格的边缘模糊程度分区评估离焦, 另一方面棋盘格角点作为标识点可以实现定位功能。

分区离焦标定并在测量中对二值条纹进行补偿离

焦的流程如图 4 所示, 主要分为以下步骤: 首先, TD 和 LCD 显示棋盘格图像, 相机在超出景深范围的情况下采集到模糊的图像。利用刃边法和二次模糊法对图像进行分析, 分区测量出两屏实际高斯核。其次, 移动参考面, 完成整个系统双显示屏实际高斯核  $\sigma$  与距离  $d$  的标定。然后, 根据建立的二值条纹最佳离焦度、周期与相位误差模型; 并结合系统测量范围内的实际模糊程度, 选择出最佳参数的条纹, 并确定其相位误差较小的平缓区域。最后, 考虑到相机倾斜摆放可能使部分区域条纹未达到正弦性, 因此对平缓区域外的轻微离焦条纹预先进行高斯补偿。根据式 (9) 计算高斯函数的参数并和条纹进行卷积, 使其经系统模糊后达到最佳离焦范围, 确保相机采集的变形条纹图均在最佳离焦范围内, 呈现较好的正弦性。

通过双显示屏进行显示合适的二值条纹, 投影仪显示正弦投影, 最终使相机拍摄到清晰的正弦或类正弦条纹。利用相位解算方法<sup>[20-21]</sup> 求解参考位置和被测物体的相位, 并通过系统标定求得系统参数, 最终根据同一坐标系下深度与相位之间的直接关系模型, 恢复被测复合表面的三维形貌。图 5 展示了系统结构测量原理图, 其中,  $d$  为 TD 与复合参考平面之间的距离,  $\Delta d$  为 LCD 与 TD 之间的距离,  $h$  为被测物相对于参考平面的高度。

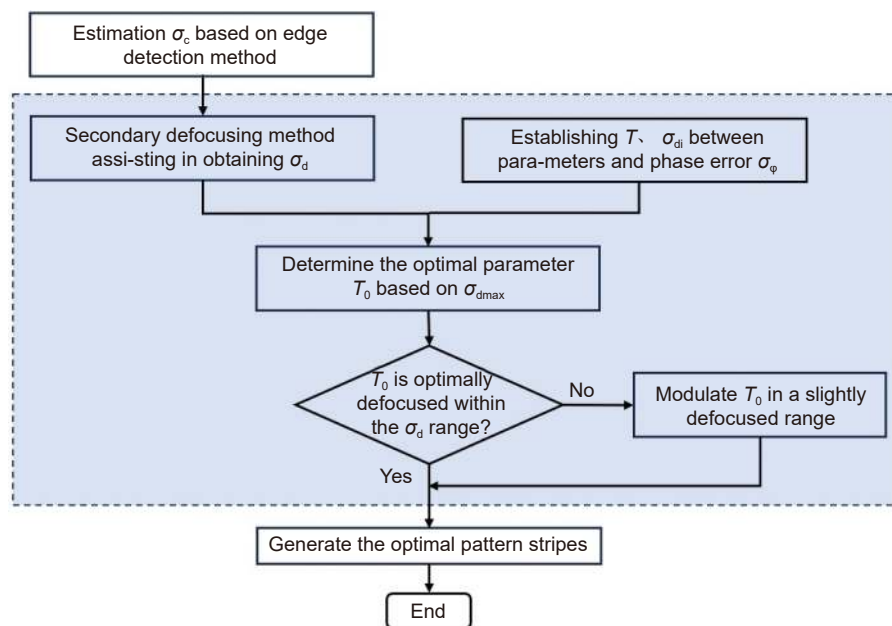


图 4 系统参数选择策略流程图

Fig. 4 Flow chart of system parameter selection strategy

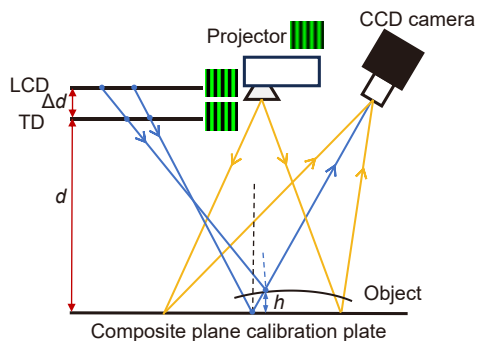


图 5 基于条纹投影和直接相位偏折的复合表面测量系统模型

Fig. 5 Composite surface measurement system model based on fringe projection and direct phase measure deflectometry

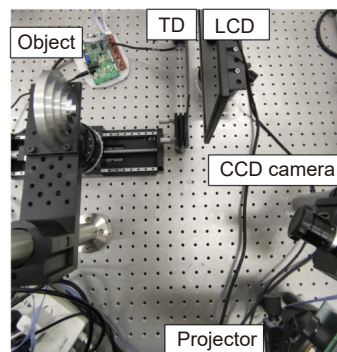


图 6 复合表面测量系统实物图

Fig. 6 Hardware setup of the composite surface measurement system

## 4 实验结果及分析

为验证所提方法的有效性, 搭建条纹投影和双屏透射显示的复合表面测量系统, 如图 6 所示。系统硬件包括彩色相机 (SVCam-ECO445, 分辨率为 1296 pixel×964 pixel)、投影仪 (DLP LightCrafter 4500, 分辨率为 912 pixel×1140 pixel)、LCD (尺寸为 13.3 英寸, 1 英寸=2.54 cm, 分辨率为 1366 pixel×768 pixel)、TD (NVS133, 尺寸为 13.3 英寸, 分辨率为 1366 pixel×768 pixel) 和被测物体, 另有复合标定板、水平移动台、角位移台和多个支撑架等实验辅助设备。

### 4.1 离焦标定方法评估

为了对系统离焦程度进行量化分析, 本文进行了实验。首先, 为验证离焦估计方法的有效性, 本文进行了两次仿真实验。第一个实验中生成大周期二值条纹, 并使用  $\sigma_g=1, 1.5, 2, 3, 4$  和 5 pixel 的已知高斯滤波仿真模糊并进行测量, 实验结果分析如图 7(a) 所示。刃边法在  $\sigma_g \geq 2$  的情况下, 对系统随机噪声具

有高效鲁棒性且测量精度在 0.01 pixel 以上。第二个实验中, 生成已知高斯调制后的边缘图片后, 利用刃边法和二次模糊相结合的方法分析相机采集的图片, 测得 36 组数据, 结果如图 7(b) 所示最终测得实际系统高斯核  $\sigma_{d0}$  为  $3.477 \pm 0.046$  pixel, 证明刃边法和二次模糊相结合的方法可以实现准确测量。

本文利用显示屏和透明屏分别显示棋盘格, 进行离焦标定。图 8(a) 为棋盘格边缘对应的高斯核, 去掉离群值后将其插值拟合成平面。之后移动参考面, 靠近相机的方向记为正, 远离相机的方向为负, 分别测得 LCD、TD 两屏在参考面处、-10 mm 处和+10 mm 位置的高斯核  $\sigma_d$ , 如图 8(b) 所示。其中 LCD+10 mm 处和 TD-10 mm 处高斯值相近, 这是由两者位置所决定。

### 4.2 二值最佳离焦方法评估

根据式 (15), 建立仿真模型, 如图 9(a) 所示。当二值条纹轻微离焦时, 由于没有完全消除高次谐波, 相位误差较大。当二值条纹过度离焦时, 高次谐波基本被消除, 条纹信噪比降低, 容易受到外界噪声干扰,

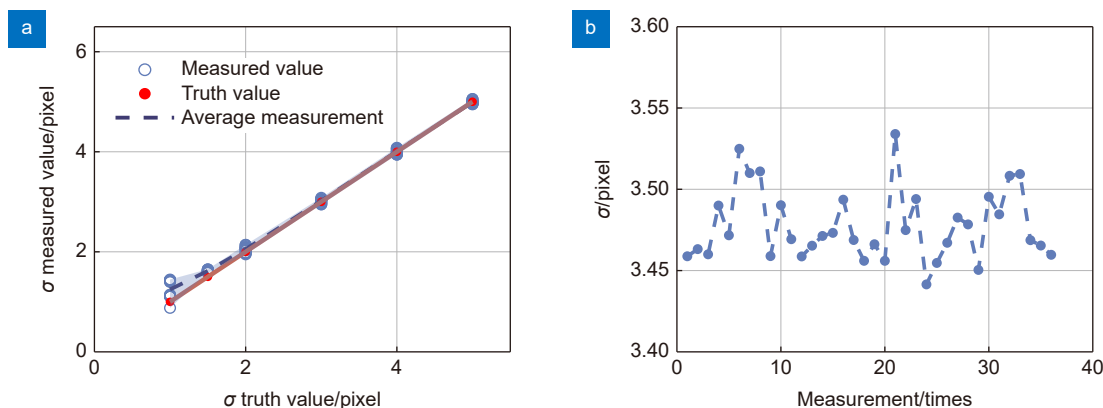


图 7 离焦量化方法仿真。(a) 仿真刃边法结果分析; (b) 同一位置实际高斯核估计

Fig. 7 Defocus quantification method simulation. (a) Analysis of results of simulated edge method; (b) Estimation of defocus amount

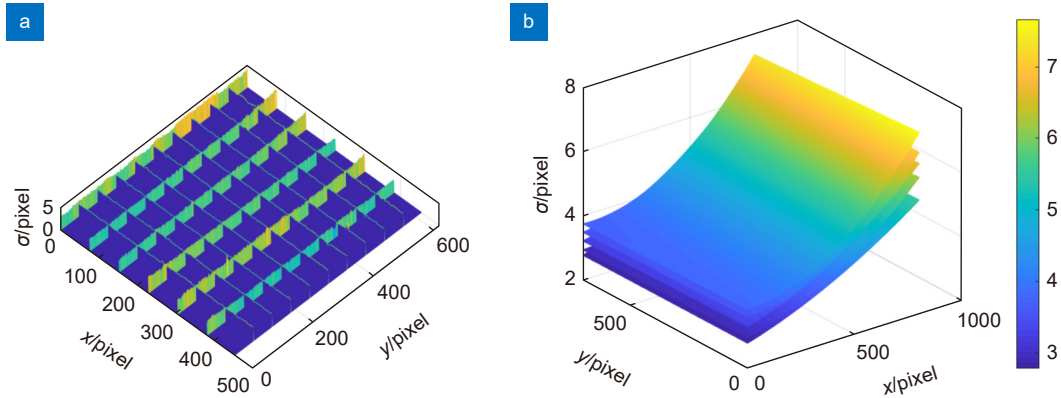


图 8 离焦标定。(a) 边缘离焦值; (b) 多个位置平面拟合离焦值

Fig. 8 Defocus calibration. (a) Edge defocus value; (b) Defocus values fitted to multiple positions using plane fitting

进而导致相位误差逐渐增大, 符合基本原理分析。利用聚焦系统, 生成  $T=21$  pixel 的二值条纹, 进行已知高斯调制后求解相位, 如图 9(b) 所示。实验结果与数学模型趋势近似一致, 证明了该数学模型可以应用于本文二值参数选择。

以显示屏经参考面反射为例, 根据 4.1 节所得高斯核进行分析, 此时显示屏最大高斯核为 7.131 pixel。

根据数学模型, 选择最佳参数  $T=26$  pixel 条纹, 并得到  $T=26$  pixel 时高斯核与相位误差的关系, 如图 10(a) 所示。LCD 前端由于距离相机较近, 存在轻微离焦区域, 如图 10(b) 所示。对该区域条纹进行离焦补偿, 分别显示  $T=26$  pixel 未离焦补偿条纹和离焦补偿后的条纹, 并由相机采集。经频谱分析, 条纹在相机后端视场处于适当离焦状态, 如图 11(b)。但在

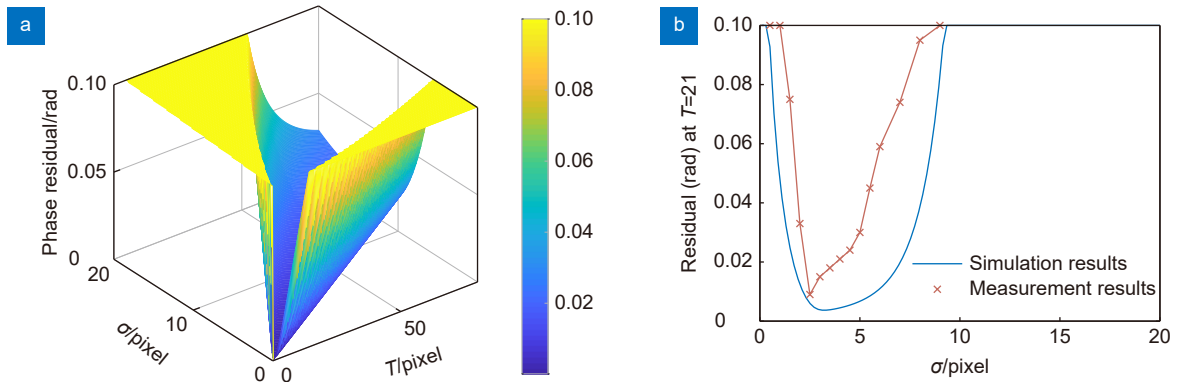


图 9 相位误差模型分析。(a) 相位误差仿真; (b) 实验误差对比

Fig. 9 Analysis of phase error model. (a) Simulation of the phase error; (b) Experimental and simulation error comparison

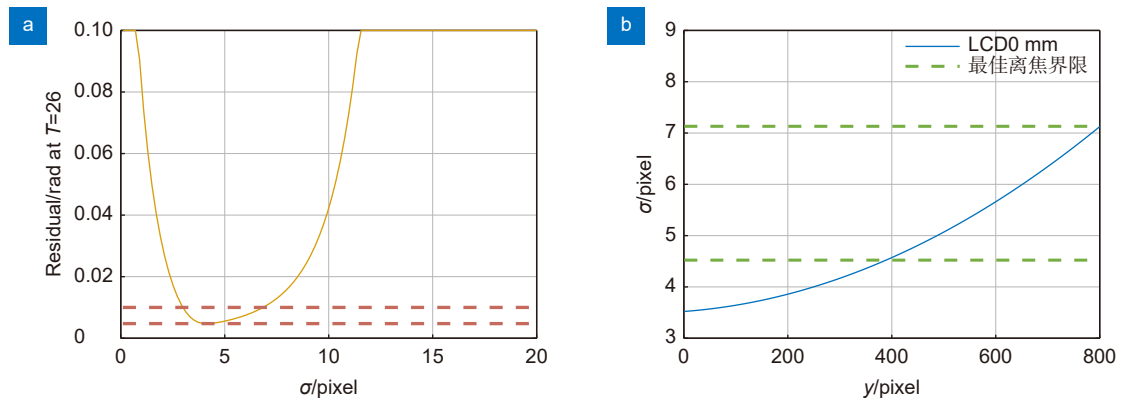


图 10 LCD-参考面的最佳离焦分析。(a) 最佳离焦量选择; (b) LCD 离焦范围

Fig. 10 Optimal defocusing analysis of the LCD-reference surface. (a) Optimal defocusing selection; (b) Defocusing range of LCD

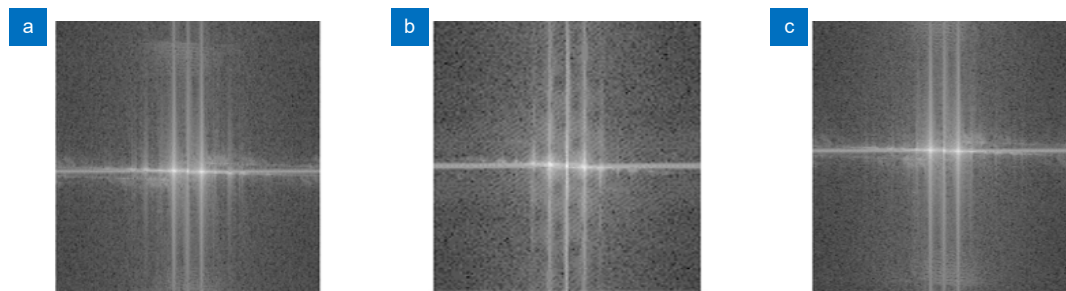


图 11 参考平面频谱分析。(a) 前端二值; (b) 后端二值; (c) 前端调制二值

Fig. 11 Reference plane spectrum analysis. (a) Binary at the front end; (b) Binary at the back end; (c) Modulated binary at the front end

相机前端视场出现三次及以上谐波, 如图 11(a), 证明此时轻微离焦。补偿后的条纹在相机前端视场 (轻微离焦区) 高次谐波消失, 如图 11(c)。证明离焦补偿后的条纹具有良好的正弦性, 扩大了二值条纹的适用范围, 同时进一步证明了 4.1 节双屏高斯核估计的准确有效。

### 4.3 三维测量实验

为验证所提方法的有效性和精度, 选择复合表面物体进行三维形貌恢复实验。如图 12(a) 为电脑标识的实物图, 其中 Lenovo 标志为镜面, 其余表面为漫反射面。图 12(b) 为特制地环形台阶的实物图, 其中台阶 1~3 级为镜面表面, 4~6 级为漫反射表面。对复合物体使用二值-正弦条纹相结合的测量方法, 即显示屏和透明屏显示补偿后的二值条纹, 投影仪投影传统正弦条纹进行测量, 并通过相机采集后使用四步相移法和最佳三条纹选择法获得绝对相位并计算深度信息。

以显示屏测量深度变化明显的台阶为例, 将其以平行于参考面的方向摆放到参考位置附近。镜面台阶表面深度变化约 7 mm, 在 4.1 节离焦标定区域内。

利用棋盘格角点对其进行定位后, 对显示屏反射在被测台阶附近的离焦进行分析, 选择二值最佳参数  $T=23$  pixel, 并分析  $T=23$  pixel 时的最佳离焦范围, 为 3.517 pixel~6.365 pixel, 如图 13(a) 所示。本文选择条纹序列为 [49 48 42] 且满足四步相移的二值条纹, 因此还需要对另外两组不同宽度的二值条纹进行分析, 如图 13(b) 所示, 被测物附近的离焦量都可以使条纹数目为 49 和 48 的二值条纹保持较好的正弦性, 无需离焦补偿, 但条纹数目为 42 的二值条纹在前端视场轻微离焦, 其中参考面附近轻微离焦区域大, 因此利用式 (9) 对较大的轻微离焦区域进行离焦补偿, 最终

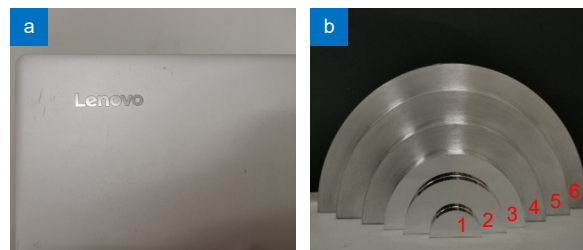


图 12 复合表面物体。(a) 电脑标识; (b) 环形台阶  
Fig. 12 Composite surfaces object. (a) Computer identification; (b) Ring step

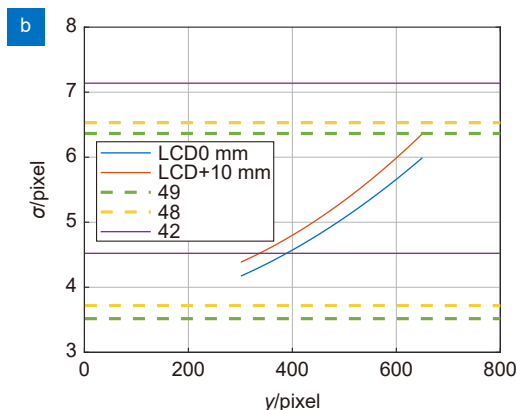
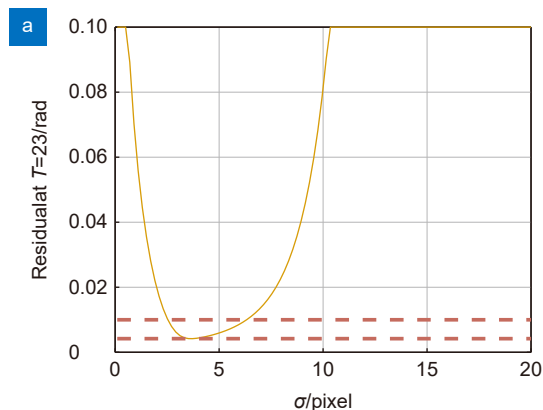


图 13 LCD-被测台阶的最佳离焦分析。(a) 最佳离焦量选择; (b) LCD 部分范围离焦量

Fig. 13 Optimal defocus analysis of the LCD-measured step. (a) Optimal defocusing selection; (b) Defocusing amount for LCD component



确保条纹在 0~10 mm 深度范围内均适度离焦。

通过双显示屏显示未补偿的二值条纹和传统正弦条纹, 与本文方法作对比, 如图 14 所示。采用未补偿的二值条纹, 此时条纹个数为 42 时正弦性并不理想, 相位展开过程中有毛刺。采用传统正弦条纹时远离相机且深度较大的部分对比度较差, 个数为 49 的正弦条纹较为明显, 因此导致部分像素相位不准确。采用本文所提方法进行补偿后的二值条纹, 相位展开效果最好, 同时使用投影仪在清晰的聚焦面投射正弦条纹用来测量漫反射部分, 如图 14(d) 所示。

对镜面部分进行单独形貌分析, 如图 15 所示, 使用传统未补偿的二值条纹进行三维形貌恢复时效果最差, 靠近相机部分的表面较为弯曲, 如图 15(a)。使用传统正弦条纹时远离相机深度较大的部分表面成像效果不佳, 而且部分数据缺失, 如图 15(b)。使用

本文方法测得的各个区域形貌表面都较为光滑。结合漫反射部分的测量数据, 对图 12 中复合物体三维形貌进行恢复, 最终结果如图 16 所示。

为了评估该方法的精度, 对台阶高度进行计算, 并与传统正弦条纹方法作对比。将三坐标测量仪 CMM (coordinate measuring machine) 测得的相邻台阶高度作为参考值, 如表 1 第二列所示。将本文二值-正弦条纹相结合的测量方法和传统正弦条纹的测量方法获得的台阶表面点云数据拟合到一个平面上, 计算另一台阶表面所有像素点到拟合平面的距离并求取平均值, 作为相邻台阶面之间的高度, 如第三列、第四列所示。分别计算与参考值之间的测量误差, 列于表中第五列、第六列。由实验结果可知, 本文所提方法相较于传统测量方法, 可将系统精度提高 8~14  $\mu\text{m}$ , 具有较高的精度。

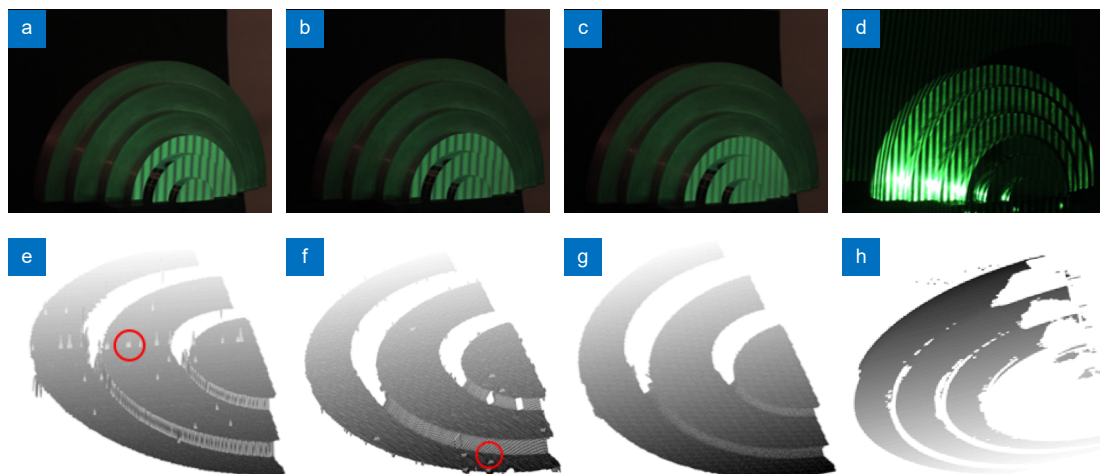


图 14 台阶相位展开及对比。(a) 未调制的二值条纹图; (b) 传统正弦条纹图; (c) 调制后的二值条纹图; (d) 正弦条纹图; (e) 图 (a) 的绝对相位; (f) 图 (b) 的绝对相位; (g) 图 (c) 的绝对相位; (h) 图 (d) 的绝对相位

Fig. 14 Phase unwrapping and comparison of step. (a) Uncompensated binary fringes; (b) Sinusoidal fringes; (c) Compensated binary fringes; (d) Sinusoidal fringes; (e) Absolute phase of (a); (f) Absolute phase of (b); (g) Absolute phase of (c); (h) Absolute phase of (d)

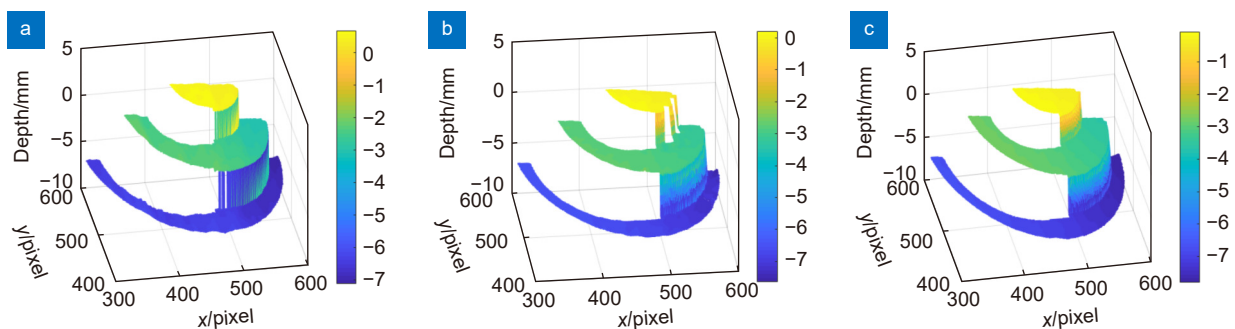


图 15 镜面部分三维形貌对比。(a) 未调制的二值条纹; (b) 正弦条纹; (c) 调制后的二值条纹

Fig. 15 Comparison of three-dimensional topography for specular components. (a) Uncompensated binary fringes; (b) Sinusoidal fringes; (c) Compensated binary fringes

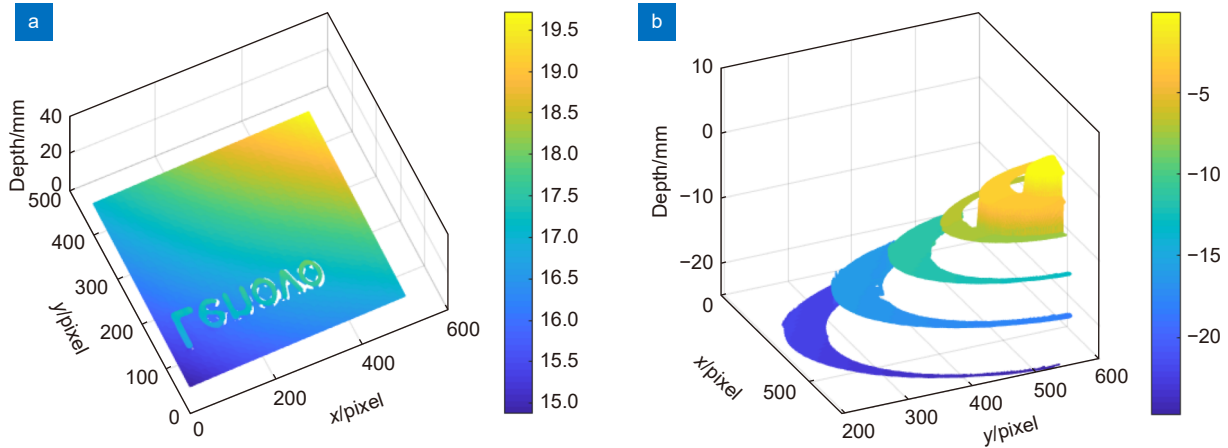


图 16 复合表面物体三维形貌恢复。(a) 电脑标识表面形貌; (b) 台阶重建深度

Fig. 16 Results of three-dimensional surface topography reconstruction for composite objects. (a) Surface topography of computer identification; (b) Reconstructed depth of step

表 1 三维结果对比

Table 1 Comparison of three-dimensional results

Step plane	Measured by CMM /mm	Measured by proposed value /mm		Absolute error /mm	
		Binary-sin fringe	Sin fringe	Binary-sin fringe	Sin fringe
1-2	3.000	2.978	2.970	0.022	0.030
2-3	4.000	4.019	4.033	0.019	0.033
3-4	5.000	5.039	5.051	0.039	0.051
4-5	5.500	5.523	5.521	0.023	0.021
5-6	6.500	6.478	6.477	0.022	0.023

## 5 结论

本文提出了一种二值结合正弦条纹测量复合表面三维形貌的方法, 解决了相机景深限制而引起条纹离焦模糊的问题, 扩展了测量深度范围。通过显示屏显示棋盘格图片估计系统 PSF, 有效解决了由于相机具有一定摆放角度而导致参考面离焦程度不同的问题。稳定准确地获取双屏的高斯核大小后, 通过最佳参数选择及后续的离焦补偿, 扩大二值条纹适用范围, 使相机采集理想的类正弦和正弦条纹。实验证明, 相较于传统正弦测量, 该方法精度在镜面和镜面/漫反射面衔接部分提高了 8~14  $\mu\text{m}$ , 较大程度上抑制了高次谐波和系统噪声, 实现了高精度的复合表面物体三维形貌测量。虽然原理上补偿后的二值条纹适用范围较广, 但由于使用参考面平移进行分区离焦标定的方法具有局限性, 该方法仅适用于简单形貌的复合反射表面物体三维测量, 针对梯度变化大的复杂形貌物体表

面离焦量如何确定, 未来有待进一步研究和改进。

## 参考文献

- [1] Li Y X, Qian J M, Feng S J, et al. Deep-learning-enabled dual-frequency composite fringe projection profilometry for single-shot absolute 3D shape measurement[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, 5(5): 210021.
- [2] Wang Y M, Zhang Z H, Gao N, et al. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. *Opt Precis Eng*, 2018, 26(5): 1014-1027.  
王月敏, 张宗华, 高楠, 等. 基于全场条纹反射的镜面物体三维形貌测量综述[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1014-1027.
- [3] Xiang Z L, Zhang Q C, Wu Z J. 3D shape measurement and texture mapping method based on structured light projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(12): 220169.  
向卓龙, 张启灿, 吴周杰. 结构光投影三维形貌测量及纹理贴图方法[J]. *光电工程*, 2022, 49(12): 220169.
- [4] Liu X H, Zhang Z H, Gao N, et al. 3D shape measurement of diffused/specular surface by combining fringe projection and direct phase measuring deflectometry[J]. *Opt Express*, 2020, 28(19): 27561-27574.
- [5] Liu S, Zhang Z H, Gao N, et al. Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220340.  
刘硕, 张宗华, 高楠, 等. 复合表面形貌测量中通道串扰和色差消除方法[J]. *光电工程*, 2023, 50(4): 220340.
- [6] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2018, 106: 119-131.
- [7] Fu L N, Yang J W, Li Y L, et al. Binary fringe defocused projection technology: a review[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2022, 59(14): 1415011.  
付莉娜, 杨静雯, 李雁玲, 等. 二值条纹离焦投影技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(14): 1415011.
- [8] Xing S P, Cai N, Lin B. High-quality 3D shape measurement based on ant colony phase jitter optimization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210114.  
邢生平, 蔡宁, 林斌. 基于蚁群相位抖动优化的高质量三维形貌测

- 量[J]. *光电工程*, 2021, **48**(7): 210114.
- [9] Wang Y F, Zhao H J, Jiang H Z, et al. Defocusing parameter selection strategies based on PSF measurement for square-binary defocusing fringe projection profilometry[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(16): 20351–20367.
- [10] Hu Y, Liu Z, Yang D Z, et al. Online fringe pitch selection for defocusing a binary square pattern projection phase-shifting method[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(21): 30710–30725.
- [11] Zheng Y, Wang Y J, Li B W. Active shape from projection defocus profilometry[J]. *Opt Lasers Eng*, 2020, **134**: 106277.
- [12] Zheng Z J, Gao J, Zhang L Y, et al. A novel defocus-degree-based phase unwrapping and fusion algorithm for high-speed and large-depth-range 3D measurement[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, **70**(4): 4278–4288.
- [13] Shi Y Q, Chang C X, Liu X H, et al. Infrared phase measuring deflectometry by using defocused binary fringe[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(13): 3091–3094.
- [14] Rao G, Song L B, Zhang S, et al. Depth-driven variable-frequency sinusoidal fringe pattern for accuracy improvement in fringe projection profilometry[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(16): 19986–20008.
- [15] Meng H, Li B, Yang Y S. Restoration of infrared image target information based on edge method[J]. *Laser Infrared*, 2020, **50**(3): 374–379.  
孟浩, 李博, 杨耀森. 基于刃边法的红外图像目标信息复原[J]. *激光与红外*, 2020, **50**(3): 374–379.
- [16] Tian S H, Huang Y M, Xu Y J, et al. Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(7): 230040.  
田思恒, 黄永梅, 徐杨杰, 等. 利用离焦光斑的离轴望远镜失调校正方法研究[J]. *光电工程*, 2023, **50**(7): 230040.
- [17] Li J L, Hassebrook L G, Guan C. Optimized two-frequency phase-measuring-profilometry light-sensor temporal-noise sensitivity[J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, **20**(1): 106–115.
- [18] Servin M, Padilla M, Garnica G. Statistical theory of digital interferometry: a tutorial with applications to fringe projection profilometry[J]. *Opt Lasers Eng*, 2022, **150**: 106848.
- [19] Xiao Y X, Zhang Z H, Liu S, et al. Method for three-dimensional shape measurements of composite surface based on fringe projection and dual-transparent display screens[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2023, **60**(3): 1006–4125.  
肖月新, 张宗华, 刘硕, 等. 基于条纹投影和双屏投射显示的复合表面三维形貌测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(3): 1006–4125.
- [20] Towers C E, Towers D P, Jones J D C. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry[J]. *Opt Lasers Eng*, 2005, **43**(7): 788–800.
- [21] Chu D Y, Zhang G H, Song R J, et al. Priori knowledge assisted dynamic 3D shape measurement with fringe projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 210449.  
楚冬娅, 张广汇, 宋仁杰, 等. 先验知识辅助的条纹投影动态三维形貌测量[J]. *光电工程*, 2022, **49**(8): 210449.

## 作者简介



邵金凤(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学检测和三维成像等方面的研究。

E-mail: jinfengshao\_09@126.com



【通信作者】张宗华(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 1996、1998、2001年于天津大学获得学士、硕士和博士学位, 主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析方面的研究。

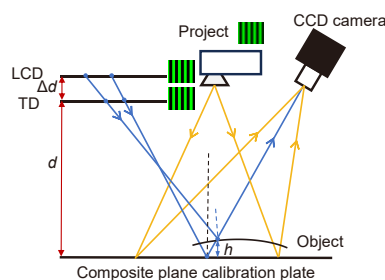
E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Three-dimensional shape measurement of composite surface based on defocused binary display and fringe projection

Shao Jinfeng<sup>1</sup>, Ni Yubo<sup>1</sup>, Meng Zhaozong<sup>1</sup>, Gao Nan<sup>1</sup>, Gao Yusen<sup>1</sup>, Yang Zeqing<sup>1</sup>, Zhang Guofeng<sup>2</sup>, Yin Wei<sup>3</sup>, Zhao Hongwei<sup>2,3</sup>, Zhang Zonghua<sup>1\*</sup>



**Overview:** In the field of smart manufacturing, there is a growing need for the precise measurement of composite surface components exhibiting both specular and diffuse reflection characteristics. The construction of a measurement system based on fringe projection and phase-shifting deflectometry allows for the non-destructive and rapid acquisition of three-dimensional information for composite surface objects. However, the structured light by reflecting from the measured surface, exhibits different imaging positions, significantly increasing the difficulty in camera focusing and leading to defocusing blur issues, causing phase errors.

To expand the system measurement range and achieve the efficient and high-precision measurement of composite surface objects, this paper proposes a method for three-dimensional surface topography measurement by combining defocused binary patterns with sinusoidal fringes. Firstly, considering the varying defocus levels on the same plane due to the angle between the camera and the reference plane, the paper introduces a method combining the edge and second-order blur methods. It utilizes a chessboard pattern to accurately partition and quantify the defocus level, completing system defocus calibration. Secondly, based on the established model of optimal defocus, period, and phase error for binary fringes, and considering the actual blur level within the system measurement range, the paper selects the optimal width of binary fringes and the range of defocus, determining smooth regions with minimal phase error. Then, considering that the tilted placement of the camera may cause some regions of the fringes to deviate from sinusoidal behavior, slightly defocused fringes outside the smooth regions are pre-compensated with a Gaussian filter. This is done by calculating the parameters of the Gaussian function and convolving it with the fringes, ensuring that the deformed fringe patterns captured by the camera are within the optimal defocus range. This operation effectively suppresses high-order harmonics of binary fringes, expanding their applicability. Finally, appropriate binary fringes are displayed on two screens, and sinusoidal projection is displayed on the project, allowing the camera to capture clear sinusoidal and quasi-sinusoidal fringes. This method completes three-dimensional surface topography measurement for the composite surface.

The method employs the combination of the edge method and the second-order blur method for defocus assessment, achieving a measurement accuracy of 0.1 pixel or more and ensuring accurate measurement of full-field defocus in the dual-screen system. Experimental results show that the combination of binary and sinusoidal fringes proposed in this paper reduces errors in the specular part and the transition region between specular and diffuse components from 0.033 mm to 0.019 mm, enhancing the accuracy of composite surface measurement.

Shao J F, Ni Y B, Meng Z Z, et al. Three-dimensional shape measurement of composite surface based on defocused binary display and fringe projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(4): 240024; DOI: [10.12086/oe.2024.240024](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240024)

Foundation item: Project supported by Natural Science Foundation of China (U2341275, 52075147), and Scientific Research Project of Education Department of Hebei Province (JZX2024021)

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; <sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; <sup>3</sup>National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

\* E-mail: zh Zhang@hebut.edu.cn