

# 基于数字相关的二值条纹投影轮廓术中离焦的定量评估方法

江会交<sup>1,2</sup>, 尹卓异<sup>3</sup>, 张琴<sup>1</sup>, 林清华<sup>1</sup>, 林金兰<sup>1</sup>, 康新<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>莆田学院机电与信息工程学院, 福建 莆田 351100;

<sup>2</sup>福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350109;

<sup>3</sup>东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189;

<sup>4</sup>南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 为了消除投影仪的伽马效应,近年来二值条纹投影轮廓术得到快速发展。如何确定合适的离焦量是二值条纹离焦投影三维测量的关键问题。离焦不足时,条纹会包含高阶谐波;离焦过度的话,条纹对比度降低,相位分辨率降低,同时噪声的影响相对变大。离焦不足或离焦过度都会影响相位测量精度。为了解决这一问题,基于数字相关法提出一种最优离焦量的确定方法。该方法利用条纹与其二阶微分的相关性来确定最佳离焦量,以获得准正弦条纹。在欠离焦和过离焦情况下,相关系数均较小,只有当条纹为准正弦条纹时,相关系数取得极大值。对该方法进行了数值模拟和实验验证。实验结果表明,所提方法具有速度快、准确性高的优点,可在二值条纹投影过程中实时跟踪相关系数并确定最佳离焦量。

**关键词** 成像系统; 二值离焦; 数字相关; 定量评估; 二阶微分; 条纹投影轮廓术  
中图分类号 TP319 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223240

## Quantitative Evaluation of Binary Defocusing in Fringe Projection Profilometry Based on Digital Correlation

Jiang Huijiao<sup>1,2</sup>, Yin Zhuoyi<sup>3</sup>, Zhang Qin<sup>1</sup>, Lin Qinghua<sup>1</sup>, Lin Jinlan<sup>1</sup>, Kang Xin<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>College of Electromechanical and Information Engineering, Putian University, Putian 351100, Fujian, China;

<sup>2</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350109, Fujian, China;

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

<sup>4</sup>School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China

**Abstract** Binary fringe projection profilometry has experienced significant growth in recent years to eliminate the gamma effect of projectors. Determining the appropriate defocus amount is crucial for three-dimensional measurement in binary fringe defocus projection. Insufficient defocusing can result in fringes containing higher-order harmonics, while excessive defocusing can reduce fringe contrast, decrease phase resolution, and relatively increase noise impact. Both insufficient and excessive defocusing can affect the phase measurements accuracy. To address this problem, a method for determining the optimal defocus amount based on digital correlation is proposed. This method utilizes the correlation between fringes and their second-order derivatives to determine the optimal defocus amount and achieve quasi-sinusoidal fringes. In both under-defocus and over-defocus situations, the correlation coefficient is small, and it reaches its maximum value only when the fringes are quasi sinusoidal. The method was numerically simulated and experimentally validated. The experimental results show that the proposed method offers fast speed and high accuracy, enabling real-time tracking of the correlation coefficient during the binary fringe projection process and determining the optimal defocus amount.

**Key words** imaging systems; binary defocusing; digital correlation; quantitative evaluation; second-order differential; fringe projection profilometry

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-20; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划(KYCX22\_0223)、莆田学院研究生创新基金(2021101)

通信作者: \*ckkang@njust.edu.cn

## 1 引言

条纹投影轮廓术(FPP)由于非接触、低成本、高精度、全场测量等优点被广泛应用在逆向工程、质量控制、生物医学、虚拟现实等众多领域<sup>[1-3]</sup>。在FPP中,通常采用相移算法求解包裹相位,这要求相机采集到的变形条纹图的灰度值为正弦分布。然而,由于投影仪的非线性伽马效应,即使投影标准的正弦条纹图,相机采集到的变形条纹图也并非正弦。为了解决这一问题,二值离焦技术被提出<sup>[4-5]</sup>。该技术将二值条纹图(可编码)投影到物体表面,通过调节投影仪的离焦量,使投影至待测物体表面的条纹图呈正弦分布,可有效避免投影仪伽马效应带来的非线性问题。另一方面,因为投影二值条纹图只需两个灰度值,比投影8位的灰度图速度要快得多,便于高速动态测量<sup>[6]</sup>,所以二值离焦技术备受学者关注。

在二值离焦技术中,确定合适的离焦量是关键问题。离焦不足时,条纹会包含高阶谐波,影响条纹正弦性。离焦过度时,条纹对比度降低,相位分辨率降低,同时噪声的影响相对变大。即离焦不足和离焦过度都会降低条纹图的正弦性或信息熵,从而带来相位测量误差。因此,确定合适的离焦量对提高三维测量的精度具有重要意义。

为了确定合适的离焦量,Kamagara等<sup>[7]</sup>提出一种基于离散傅里叶变换(DFT)的方法。该方法通过对二值离焦条纹图的基频光谱能量(FSE)和总光谱能量(TSE)来判断二值条纹是否达到最佳离焦状态。当条纹的FSE和TSE相等时,认为条纹达到最佳离焦程度。然而,在过度离焦情况下,该方法的敏感性并不理想。对于由离焦不当引起的相位测量误差,相位补偿是一种有效的方法。Zhang等<sup>[8]</sup>建立了相位误差与深度之间关系的数学模型,用于矫正任意深度范围内由不恰当的离焦带来的相位误差。在投影仪离焦不变的情况下,摄像机采集到的条纹图的正弦性与条纹间距有关,基于此,Zheng等<sup>[9]</sup>提出一种高度动态的离焦响应方法,以离焦度和谐波响应参数为变量,实时计算最佳条纹间距并调整间距以得到正弦条纹。Li等<sup>[10]</sup>基于深度学习提出一种被动离焦方法,对于不同的条纹间距可以生成高质量的三步正弦条纹图以适应较大的测量深度。Kang等<sup>[11]</sup>利用五点差分算法结合Levenberg-Marquardt(LM)算法对离焦图进行离焦程度的定量评估并确定最优离焦量,但LM算法需要预先给定一个合适的初始值才能收敛至全局最优解。对于镜面反射物体的三维测量,偏振结构光是有效手段。Zhu等<sup>[12]</sup>利用LCD投影仪对偏振结构光进行编码,并通过离焦技术抑制投影仪的非线性问题,该方法设备简单并可有效提高测量精度。

本文基于数字相关法提出一种二值离焦量化评估方法以确定最优离焦量。首先,选取一个目标窗口。

因为在FPP中,不论相机和投影仪如何放置,相机采集到的整幅条纹图严格来说都不是等周期的,同时每一点也不是等离焦的。所以为确保评估的准确性,所提方法是在一个目标窗口上进行的。目标窗口的大小一般选取5个左右条纹周期。因为正弦函数的二阶微分还是正弦函数,因此可通过计算窗口与其二阶微分的相关系数来评估窗口条纹的正弦性。在欠离焦和过离焦情况下,相关系数均较小,条纹正弦性较差。当条纹为准正弦条纹时,相关系数达到极大值,此时离焦量为最优离焦量。数值模拟和实验验证了所提方法的准确性。同时,由于该方法是在一个目标窗口上进行的,且相关系数计算量比较小,所以该方法速度快,可在离焦过程中通过实时跟踪相关系数来确定二值条纹的最佳离焦量。

## 2 原理

### 2.1 二值离焦频谱分析

方波二值条纹图在单个周期内可描述为

$$f(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < T/2 \\ 0, & T/2 \leq x < T \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 为条纹周期; $x$ 为垂直于条纹方向的坐标。对式(1)进行傅里叶级数展开:

$$f(x) = 0.5 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{(2n+1)\pi} \sin[2\pi(2n+1)x/T] \quad (2)$$

由式(2)可知,方波二值条纹图中包含直流分量 and 一系列奇次谐波分量。光学离焦过程实质是系统的点扩散函数(PSF)的调制过程。根据傅里叶光学理论,离焦可看作是光学系统或器件的PSF的傅里叶变换,相当于在频域中进行高斯低通滤波,通过滤除高次谐波提取基频得到准正弦条纹。一般光学系统的PSF可近似为二维高斯函数:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 表示二维高斯函数的标准差,与投影仪的离焦程度有关。 $\sigma$ 越大离焦程度越大。数值模拟时可通过调整 $\sigma$ 的大小来模拟不同程度的离焦。投影仪离焦输出图像的强度可通过输入图像的强度与二维高斯函数之间的卷积来获得:

$$I_{\text{out}}(x, y) = I_{\text{in}}(x, y) \otimes G(x, y) \quad (4)$$

式中: $I_{\text{out}}(x, y)$ 为输出图像的强度; $I_{\text{in}}(x, y)$ 为输入图像的强度; $\otimes$ 表示卷积。

由于二维高斯函数的傅里叶变换仍是二维高斯函数<sup>[13]</sup>,因此式(4)在频域中使输入图像的低频分量通过,抑制其高频分量。若高频分量完全被抑制,仅留下基频分量和直流分量,则输出条纹图即为正弦条纹图。这要求在实际操作过程中精确控制投影仪的离焦量。若离焦量较小,则不能有效地消除高次谐波分量。若

离焦量过大,会导致条纹的对比度降低,相位分辨率降低,同时噪声的影响相对变大。因此,不恰当的离焦都会影响条纹图的正弦性或信息熵,带来相位测量误差。为了说明这种现象,图 1 给出了 4 种不同离焦程度的条纹图及其频谱。其中,条纹灰度值进行了归一化并添加了标准差为 2/256 的噪声。图 1(a1)、(a2)、(a3)是

没有离焦的情况。可以看到,其频谱包含无数高次谐波。图 1(b1)、(b2)、(b3)是离焦不足的情况,由于离焦效应,其高次谐波明显被抑制一部分。图 1(c1)、(c2)、(c3)是离焦适当的情况,高次谐波基本都被滤除,只保留了直流分量和基频。图 1(d1)、(d2)、(d3)是离焦过度的情况,噪声的影响相对变大。

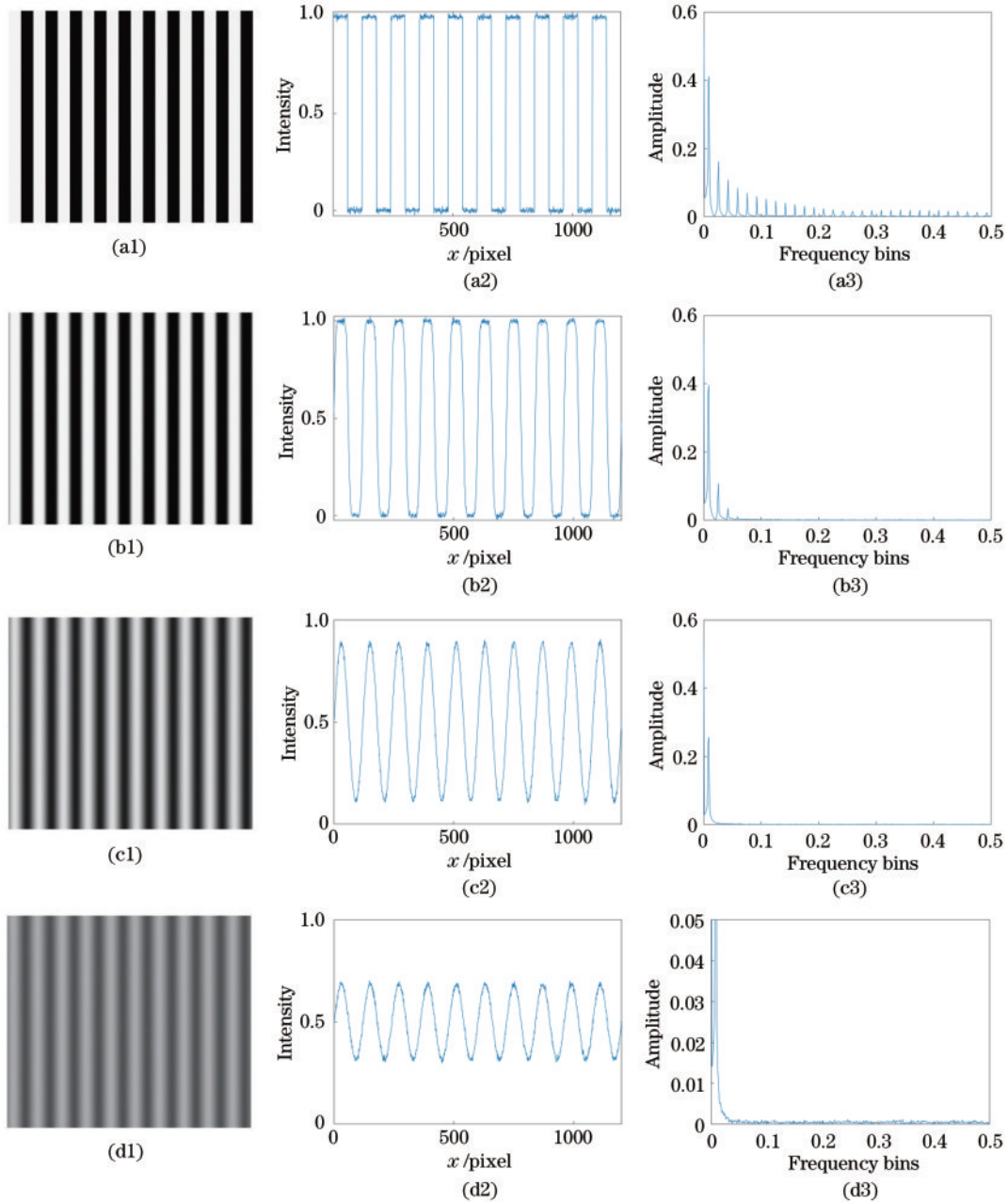


图 1 二值离焦条纹频谱分析。(a1)~(a3) 未离焦;(b1)~(b3) 离焦不足;(c1)~(c3) 离焦适当;(d1)~(d3) 离焦过度

Fig. 1 Spectrum analysis of binary defocusing fringes. (a1)~(a3) No defocusing; (b1)~(b3) insufficient defocusing; (c1)~(c3) appropriate defocusing; (d1)~(d3) excessive defocusing

## 2.2 相移算法

等步长的  $N$  步相移算法是最常用的相位求解算法,其具有精度高、速度快、计算简单等优点。假设相机采集到的变形条纹图是正弦分布,其灰度可表示为

$$I_n(x, y) = b(x, y) + a(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \delta_n], \quad (5)$$

式中:  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  是相移步数;  $I_n(x, y)$  是第  $n$  幅图像的灰度值;  $b(x, y)$  是背景光强;  $a(x, y)$  是强度调制参数;  $\varphi(x, y)$  是待求解的包裹相位; 相移量  $\delta_n = 2\pi(n - 1)/N$ 。式(5)中有 3 个未知量,因此至少需要 3 个方程才能对未知量进行求解,即相移步数至少需



要 3 步。当  $N \geq 4$  时,可通过最小二乘法求解相位:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N (I_n \sin \delta_n)}{\sum_{n=1}^N (I_n \cos \delta_n)}. \quad (6)$$

对式(6)的求解是基于相机采集到的变形条纹图是正弦分布的假设下进行的,因此只有满足该条件,式(6)求解的包裹相位值才是准确的。但在实际测量过程中,由于投影仪的非线性效应,相机采集到的变形条纹图并非正弦,因此采用(6)式并不能获得精确相位值。然而,对等步长的  $N$  步相移算法而言,其相移步数越多,抗噪声能力越强,同时,受条纹非正弦性影响越小<sup>[14]</sup>。即相移步数越多,相位测量精度就越高。一般来说,当  $N \geq 9$  时,相位的解就非常接近精确值<sup>[15]</sup>。因此,本研究在分析非正弦性引起的相位误差时采用十二步相移算法计算的相位值来代表精确的相位解。另外,四步相移算法对条纹的非正弦性还是比较敏感的<sup>[16]</sup>,因此用四步相移算法获得的相位值与精确相位值(十二步相移算法求解)之差来反映条纹非正弦性引起的相位误差,以验证所提方法的准确性。

### 2.3 二值离焦定量评估

在 FPP 中,不论相机和投影仪如何放置,相机采集到的条纹图严格来说都不是等周期的,同时,每一点也不是等离焦的。另外,物体表面上每一点到相机镜头的距离都不相等,同样,曲面上每一点到投影仪镜头距离也都不相等,所以采集到的变形条纹图不可能做到每个区域离焦程度都一样。因此,为了确保评估的准确性,在视场中心附近选择一个目标窗口进行离焦量的评估。目标窗口的大小一般选取 5 个左右条纹周期。窗口可以选在标定板上,也可以选在被测物体光滑表面上。首先,沿条纹方向对窗口灰度进行平均,以增强算法的稳定性:

$$I(x) = \sum_{y=1}^w I(x, y) / w, \quad (7)$$

式中:  $I(x, y)$  是窗口的灰度值;  $w$  是窗口的高度。在这里,假设条纹方向沿  $y$  轴。当然,在实际投影时,条纹方向不一定严格沿着  $y$  轴,但这不会影响所提算法的有效性。对式(7)进行二阶微分:

$$I''(x) = [I(x+2) + I(x-2) - 2I(x)] / 4. \quad (8)$$

由于正弦函数的二阶微分还是正弦函数,理论上二者的相关系数等于 1(实际条纹总有噪声,相关系数达不到 1)。对于离焦不足或离焦过度的条纹,条纹的正弦性比较差,窗口与其二阶微分的相关性相对较弱,相关系数比较小。当条纹的正弦性达到最佳状态时,相关系数取得极大值,此时即是最佳离焦状态。为了计算方便,在计算相关系数之前,先对  $I(x)$  和  $I''(x)$  进行归一化处理:

$$I^*(x) = \frac{2I(x) - \max(I) - \min(I)}{\max(I) - \min(I)}, \quad (9)$$

$$I''^*(x) = \frac{2I''(x) - \max(I'') - \min(I'')}{\max(I'') - \min(I'')}. \quad (10)$$

记  $I^*$  为  $I_A$ , 同时为了避免出现负相关,取  $I''^*(x)$  的相反数  $I_B$  进行相关计算。相关系数<sup>[17]</sup>的表达式为

$$c = \frac{\sum_n (I_A - \bar{I}_A)(I_B - \bar{I}_B)}{\left[ \sum_n (I_A - \bar{I}_A)^2 \sum_n (I_B - \bar{I}_B)^2 \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

式中:  $c$  为相关系数;  $\bar{I}_A$ 、 $\bar{I}_B$  为  $I_A$ 、 $I_B$  的平均值;  $n$  表示一维数组  $I_A$  ( $I_B$ ) 的长度。相关系数  $c$  越大,二值离焦条纹越接近于正弦分布。

## 3 数值模拟

对图 1(b1)、(c1)、(d1) 进行相关性分析,  $I_A$  和  $I_B$  如图 2 所示。为了方便分析,窗口及其二阶微分均进行了  $[-1, +1]$  归一化处理。图 2(a) 是离焦不足的情况,图 2(b) 是离焦适当的情况,图 2(c) 是离焦过度的情况。从图 2 可以看出,在适当离焦的情况下,二值离焦条纹与其二阶微分之间的相关性最大。在离焦不足和离焦过度的情况下,分别受高次谐波和噪声的影响,二值离焦条纹与其二阶微分之间的相关性较差。3 种情况下的相关系数分别为 0.5439、0.9812 和 0.9269。

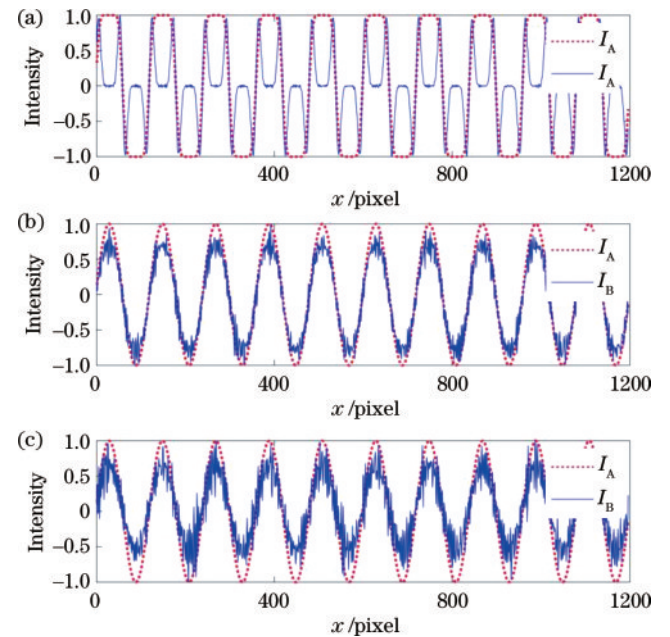


图 2 二值离焦条纹与其二阶微分之间的相关性。(a) 离焦不足; (b) 离焦适当; (c) 离焦过度

Fig. 2 Correlation between binary defocusing fringes and its second-order differential. (a) Insufficient defocusing; (b) appropriate defocusing; (c) excessive defocusing

最佳离焦量对应最小相位误差,因此可根据最小相位误差来确定最佳离焦量。由条纹的非正弦性引起的相位误差仅发生在条纹周期内,整体相位分布不受影响。在离焦不足时,相位误差主要是由高次谐波分量引起的,并呈现周期性,如图 3(a)、(c) 所示。

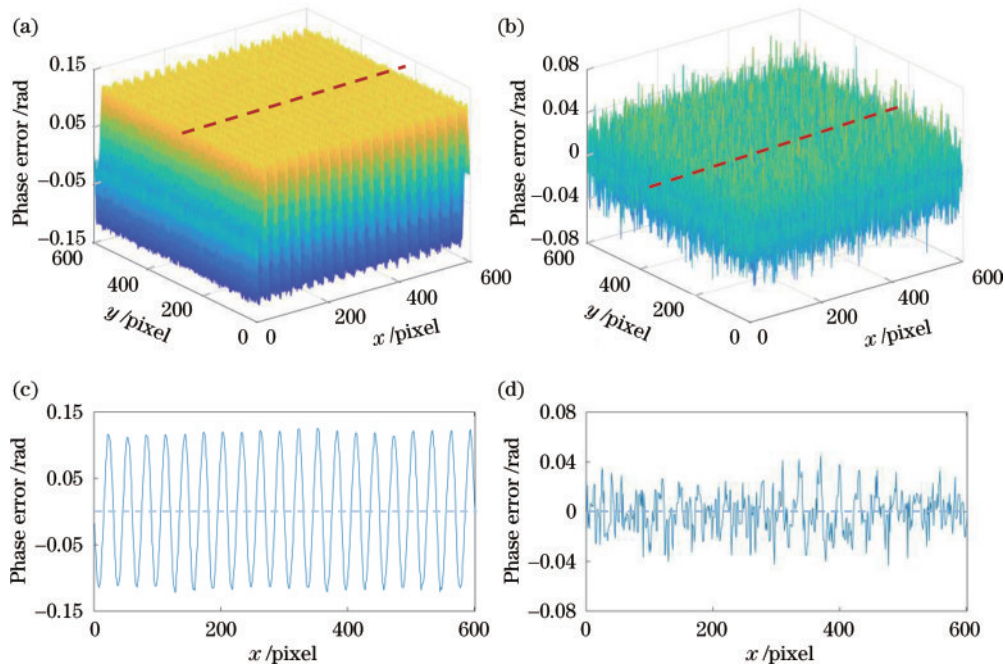


图3 相位误差分析。(a)离焦不足情况下的相位误差3D图;(b)离焦过度情况下的相位误差3D图;(c)图3(a)第300行相位误差;(d)图3(b)第300行相位误差

Fig. 3 Phase error analysis. (a) 3D plot of phase error in the case of insufficient defocusing; (b) 3D plot of phase error in the case of excessive defocusing; (c) phase error of line 300 in Fig. 3(a); (d) phase error of line 300 in Fig. 3(b)

图3(a)是相位误差的3D图,图3(c)是图3(a)第300行相位误差。在离焦过度时,相位误差主要是由噪声引起的,并呈现随机性,如图3(b)、(d)所示。图3(b)是相位误差的3D图,图3(d)是图3(b)第300行相位误差。可见,欠离焦和过离焦都会引起较大相位误差。

为了验证最大相关系数对应最小相位误差的正确性,用计算机模拟一系列  $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$  不同离焦程度的条纹图,条纹周期为  $120 \text{ pixel}$ ,并将标准差为  $2/256$  的噪声添加到归一化的灰度值中。图4(a)是这一系列不同离焦程度的条纹图的相关系数,横轴  $\sigma$  表示离焦量。图4(b)是用四步相移算法求解的相位与精确相位进行对比所得到的不同离焦程度下的相位误差平均值。此处相位误差平均值是指整幅条纹图相位误差绝对值的平均值。从图4(a)可以看出,随着离焦量的增大,相关系数先增加后减小,存在一个极大值。而图4(b)中的相位误差,先减小后增大,存在一个极小值。通过对比发现,这两个极值所对应的离焦量吻合得很好,这说明图4(a)中最大相关系数所对应的离焦量即为最佳离焦量,验证了所提方法的正确性。

另外,把所提方法与文献[7]中方法进行了对比,如图4(c)所示。文献[7]以 TSE-FSE 作为离焦程度的评估参数。该参数在不发生过度离焦的情况下,能很好地确定最佳离焦量,但在离焦过度的情况下,该方法的灵敏度表现不佳。

## 4 实验

### 4.1 所提方法

图5为实验装置,投影仪型号为 DLP6500FLQ,相机型号为 uEye UI-3370CP-M-GL R2。两台计算机分别用于投影二值条纹图和采集离焦条纹图。正常情况下,为了验证所提方法的有效性,需要采集一系列不同离焦程度的条纹图,而且每个离焦状态下需要采集 12 幅等步长相移条纹图(计算相位误差所用),此过程比较繁琐。为了便捷,利用一平板形成一渐离焦条纹图。为了使离焦的渐变比较显著,平板的法线方向与投影仪的光轴夹角大概为  $45^\circ$ ,这样相机采集到的条纹图的离焦渐变会比较显著。实验共采集 12 幅等步长相移渐离焦条纹图,如图6(a)所示。图6(b)为条纹图灰度分布。从图6可看出,左侧条纹处于欠离焦状态,右侧条纹处于过离焦状态,且条纹对比度逐渐降低。

因为条纹图离焦渐变比较显著,因此相应的相关系数变化从左到右也比较显著。图7(a)是相关系数的3D图,图7(b)是图7(a)第350行的数据(因为采用窗口评估,所以该行的数据实际是图6(a)的第500行的相关系数)。为了验证所提方法的正确性,根据十二步和四步相移算法计算相位误差,具体如图7(c)所示。图7(d)是图7(c)的第500行的相位误差,也就是对应图6(a)的第500行的相位误差。从图7(b)、(d)可以看出,最大相关系数所对应的位置与最小相位误差



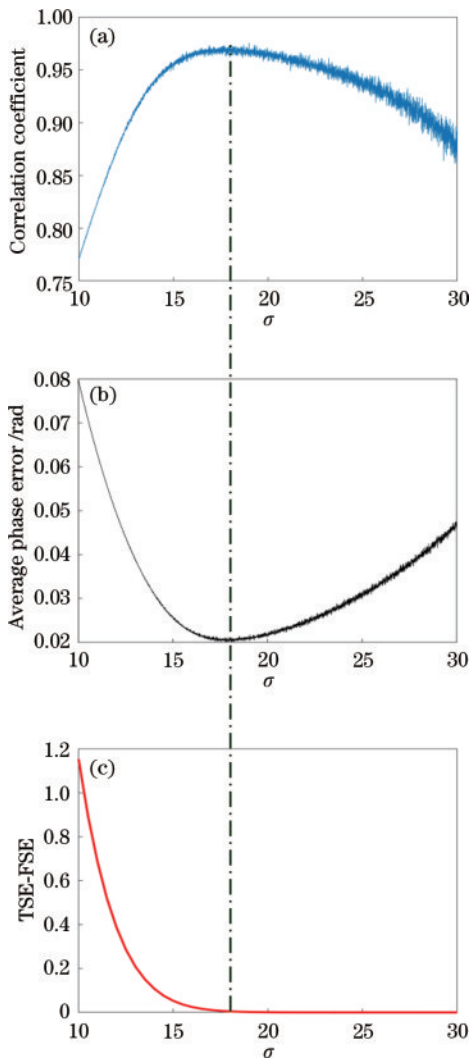


图 4 相关系数和相位误差模拟结果及与文献[7]的对比。

(a) 相关系数; (b) 相位误差平均值; (c) 文献 [7]

Fig. 4 Simulation results of correlation coefficient and phase error, as well as the comparison with reference [7].

(a) Correlation coefficient; (b) average phase error; (c) reference [7]

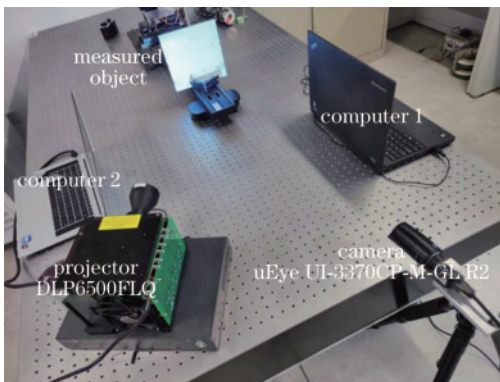


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

所对应的位置吻合得很好,这说明该位置的离焦程度是最佳的,从而证明了所提方法的正确性。另外,从

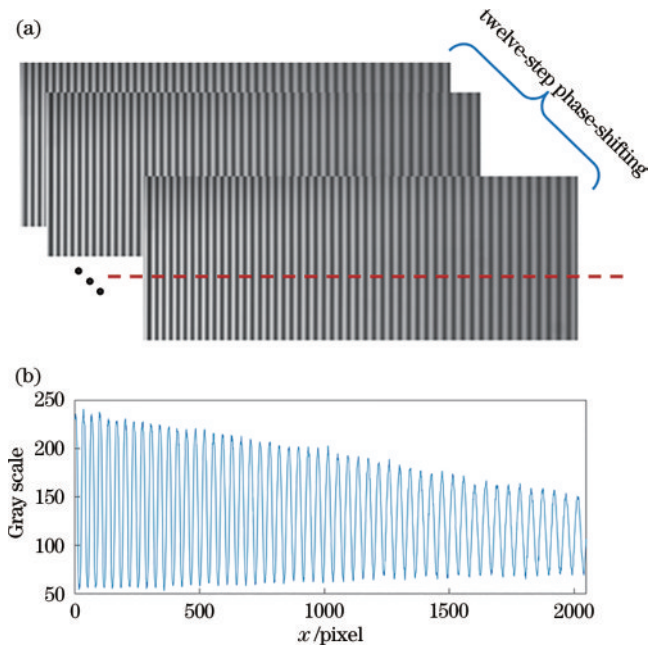


图 6 采集的渐离焦条纹图。(a)12步相移渐离焦条纹图;

(b) 条纹图灰度分布

Fig. 6 Progressively defocused binary fringe pattern captured.

(a) Twelve-step phase-shifting progressively defocused fringe patterns; (b) gray scale reduced fringe contrast

图 7(d) 还可以看出: 在欠离焦的位置(左侧), 相位误差呈周期性分布, 这主要是由高次谐波分量引起的; 在过离焦的位置(右侧), 相位误差呈随机分布, 这主要是由噪声引起的。这与模拟结果(图 3)是一致的。

#### 4.2 三维测量

对表面连续光滑的圆柱面进行三维形貌测量。在不同离焦程度下(离焦程度小步长逐渐增大)采集了 8 组变形条纹图, 每组包括 12 幅等步长相移条纹图。从每组变形条纹图中取  $401 \text{ pixel} \times 401 \text{ pixel}$  的窗口(图 9 中方框区域)计算相关系数, 计算结果如图 8(a) 所示。为了与文献[7]方法对比, 图 8(a) 中的纵坐标是 1 与相关系数  $c$  之差, 这样就变为  $1-c$  的最小值对应最佳离焦状态。从图 8(a) 可看出, 第 4 组变形条纹图具有最佳离焦量。图 8(b) 是文献[7]的评估结果(评估前条纹图先归一化处理)。可以看出, 第 4 组基本对应较小的 TSE-FSE, 但在后面过离焦的情况下, 该方法就失去了敏感性, 这跟图 4(c) 的模拟结果是一致的。图 9 是第 4 组(所提方法确定的最佳离焦条纹图)四步相移变形条纹图。图 10 是对第 4 组条纹图利用四步相移算法得到的相位 3D 图。

为了进一步说明第 4 组条纹图的离焦程度是 8 组中最最佳的, 基于十二步相移和四步相移计算了第 3 组、第 4 组和第 5 组条纹图中同一窗口的相位误差平均值, 具体如图 11(a) 所示。图 11(a1)、(a2) 和 (a3) 分别对应第 3 组、第 4 组和第 5 组条纹图, 相应的误差平均值分别为  $0.0335 \text{ rad}$ 、 $0.0201 \text{ rad}$ 、 $0.0390 \text{ rad}$ 。由图 11(a)

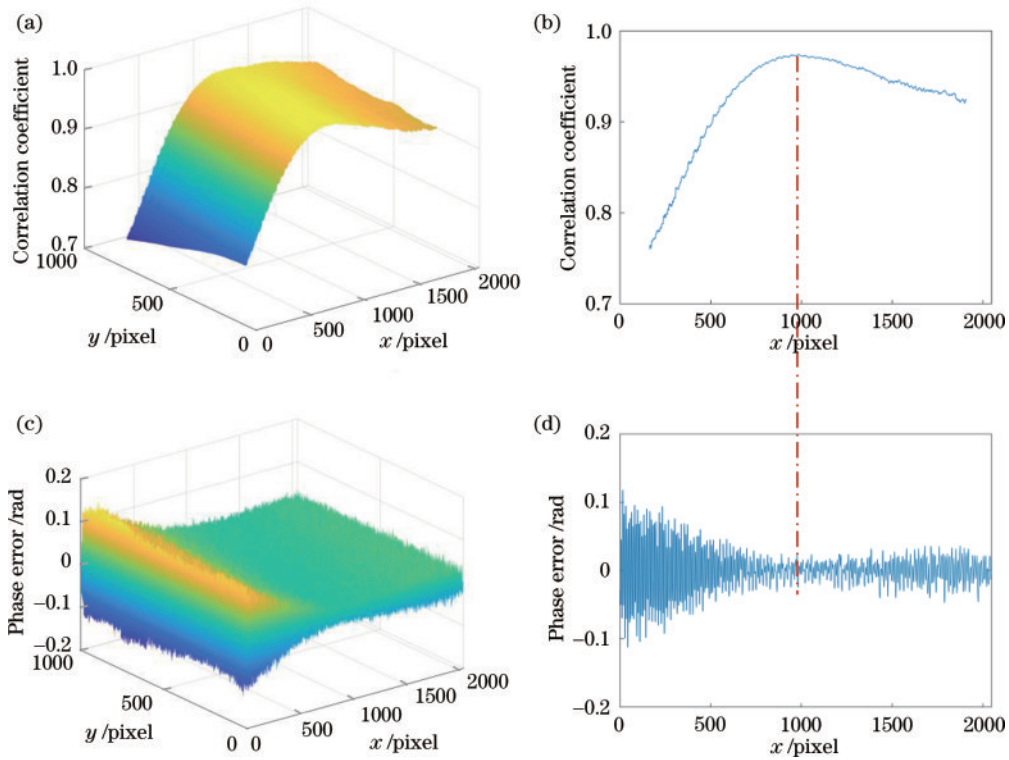


图7 所提方法实验结果。(a)相关系数的3D图;(b)图7(a)一横截面相关系数分布;(c)相位误差的3D图;(d)相应截面的相位误差分布  
Fig. 7 Experimental results of the proposed method. (a) 3D plot of the correlation coefficients; (b) correlation coefficient of a cross-section of Fig. 7(a); (c) 3D plot of the phase errors; (d) phase error distribution of the corresponding cross-section

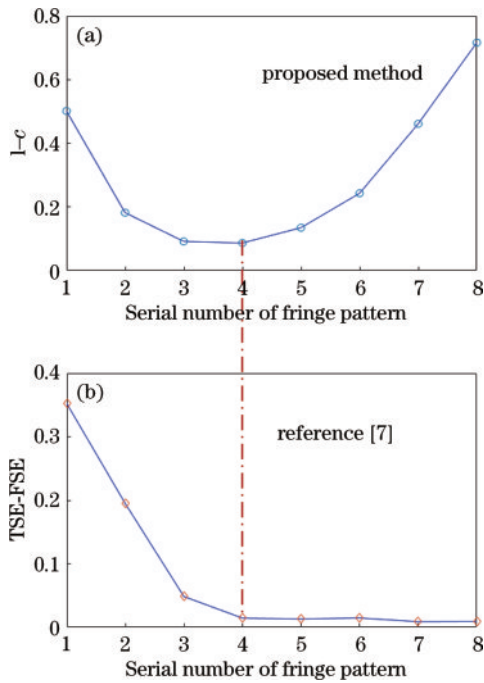


图8 所提方法与文献[7]方法对比。(a)所提方法对实验条纹图离焦的评估结果;(b)文献[7]相应的评估结果  
Fig. 8 Comparison between the proposed method and the method of reference [7]. (a) Evaluation result of defocus of experimental fringe patterns using the proposed method; (b) the corresponding results by reference [7]

可知,第4组的相位误差最小,这与图8(a)相吻合,从而证明了所提方法的正确性。另外,给出了被测物体

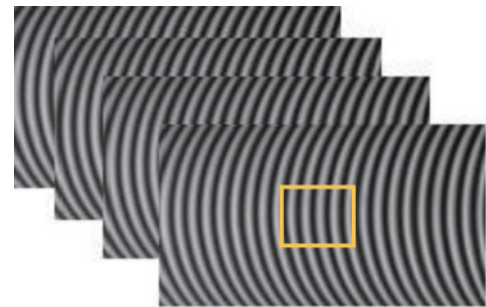


图9 投影到被测物体表面的第4组四步相移条纹图  
Fig. 9 Four-step phase-shifting fringe patterns of group 4 projected on the object surface measured

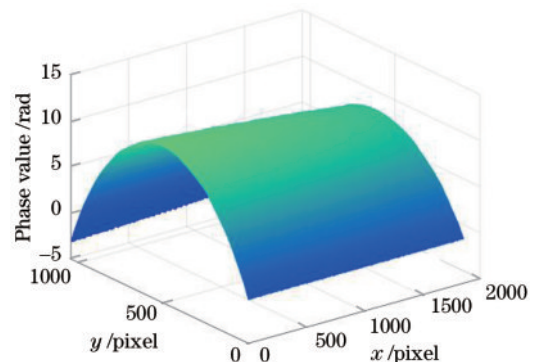


图10 用第4组条纹图和四步相移法得到的物体相位3D图  
Fig. 10 3D plot of the phase value of the measured object obtained using group 4 fringe patterns and four-step phase-shifting algorithm

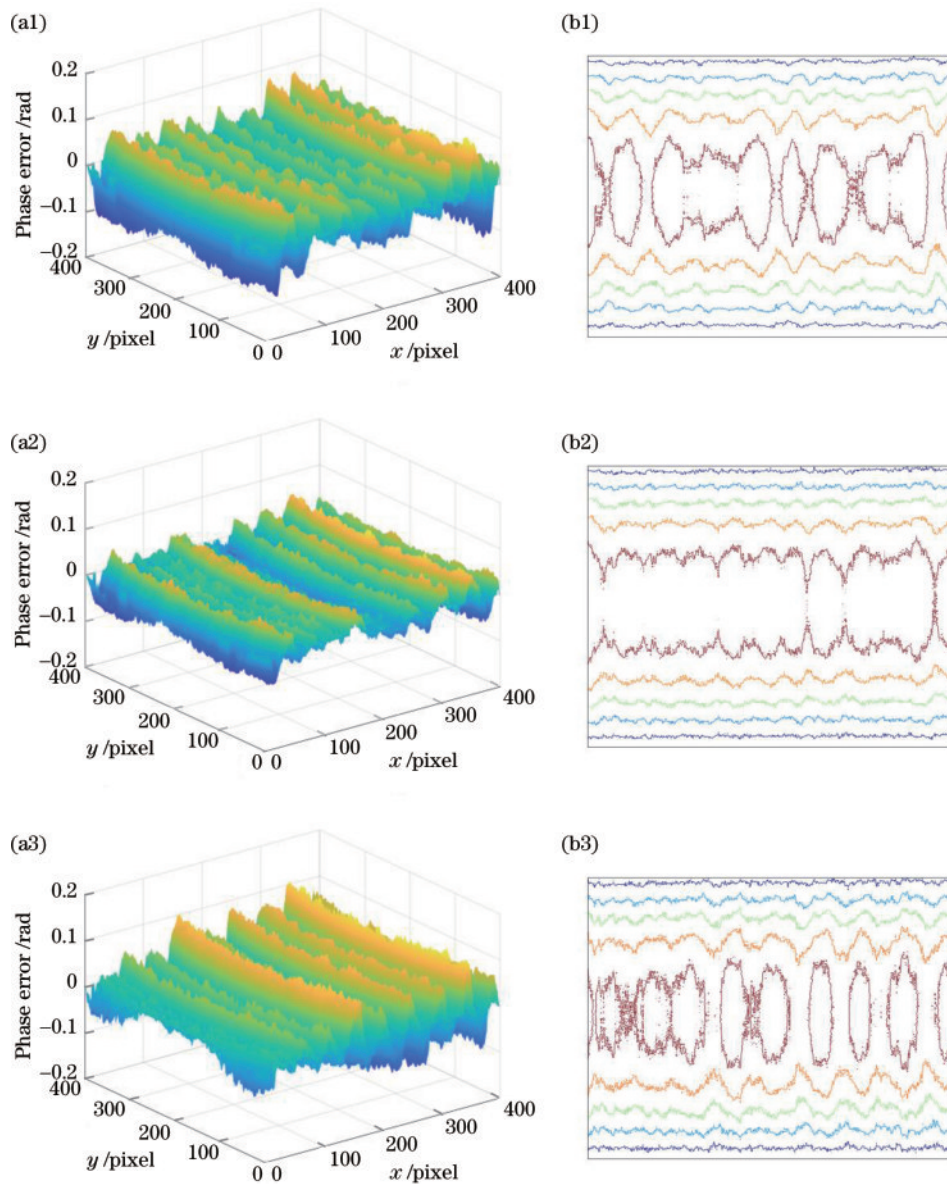


图 11 相位误差与等高线。(a1)第3组相位误差;(a2)第4组相位误差;(a3)第5组相位误差;(b1)第3组等高线;(b2)第4组等高线;(b3)第5组等高线

Fig. 11 Phase error and contours. (a1) Phase error of group 3; (a2) phase error of group 4; (a3) phase error of group 5; (b1) contour map of group 3; (b2) contour map of group 4; (b3) contour map of group 5

三维重建结果的等高线,具体如图 11(b)所示,图 11(b1)、(b2)、(b3)分别对应第 3 组、第 4 组和第 5 组条纹图。从图 11(b)可看出,图 11(b2)的等高线相比于图 (b1)和(b3)来说较为光滑,这说明第 4 组的相位测量精度最高,即离焦程度最接近于正弦。

需要特别指出:在本次三维测量过程中,由于采集过程是离散的,也就是说条纹图样本的离焦量是离散的。因此,即使离焦量的步长比较小,也不能保证能恰巧采集到最佳离焦状态的条纹图。在实际进行三维测量时,可以控制投影仪连续离焦。本课题组已经实现了离焦过程中相关系数的实时计算,也就是说可以通过实时跟踪相关系数锁定相关系数极大值并以此确定二值离焦最佳状态。

## 5 结 论

基于数字相关技术提出一种确定二值条纹投影最佳离焦量的方法,有效解决了二值条纹投影 FPP 中条纹离焦问题。数值模拟和实验验证了该方法的准确性。与已有方法的对比突出了所提方法的优越性,即使在过离焦情况下仍然具有很好的敏感性。同时,由于所提方法是在一个目标窗口上进行的,且相关系数的计算量比较小,所以该方法速度快,可实时跟踪相关系数,并根据相关系数的极大值来确定二值条纹的最佳离焦程度。随着自动二值离焦技术的发展,基于 FPP 的高速高精度三维测量将成为可能。



## 参 考 文 献

- [1] Gorthi S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [3] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19493-19510.
- [4] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using a projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [5] Lei S Y, Zhang S. Digital sinusoidal fringe pattern generation: Defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(5): 561-569.
- [6] 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.  
Fu L N, Yang J W, Li Y L, et al. Binary fringe-defocused projection technology: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 1415011.
- [7] Kamagara A, Wang X Z, Li S K. The optimal defocus selection based on normed Fourier transform for digital fringe pattern profilometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(28): 8014-8022.
- [8] Zhang J R, Zhang Y J, Chen B, et al. Full-field phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting profilometry with projector defocusing[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 467-478.
- [9] Zheng Z J, Gao J, Zhuang Y Z, et al. The high dynamic defocus response method for binary defocusing fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3749-3752.
- [10] Li Y, Shen J F, Wu Z J, et al. Passive binary defocusing for large - depth 3D measurements based on deep learning [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(24): 7243-7253.
- [11] Kang X, Yin Z Y, Dong S, et al. Evaluating binary defocusing quantitatively in real-time for fringe projection profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(6): 064110.
- [12] Zhu Z M, Dong Y W, You D D, et al. Accurate three-dimensional measurements based on polarization-defocused encoded structured light[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112128.
- [13] Wang T. Research on three-dimensional measurement technology based on binary defocusing structured light [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [14] 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.
- [15] Silva A, Muñoz A, Flores J L, et al. Exhaustive dithering algorithm for 3D shape reconstruction by fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): D31-D38.
- [16] Zuo C, Chen Q, Feng S J, et al. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19): 4477-4490.
- [17] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.