

## 相移与焦移法在调制度测量轮廓术中的应用

陆泳屹, 钟敏\*, 赵旭, 王嘉卉, 张学琴, 李敏, 甘曜玮, 戴湘麟, 黄锱志

成都信息工程大学光电工程学院, 四川 成都 610225

**摘要** 提出一种基于相移与焦移法的三维面形垂直测量方法, 当投影仪变焦扫描被测物体的深度信息时, 将三步相移中的三帧条纹图依次连续循环投影到被测物体表面上, 相机同步采集对应的条纹图。在计算投影仪每一焦距值对应的条纹图的调制度分布时, 利用该焦距位置及其前后相邻焦距值位置处的三帧条纹图近似计算该焦距位置处的调制度分布, 并根据调制度值最大值与深度信息的关系重建被测物体的三维形貌。实验结果表明, 所提方法的条纹投影量和数据采集量仅占传统三步相移法的 1/3, 却可获得与传统三步相移法几乎相同的测量精度。在 1100  $\mu\text{m}$  测量深度范围内, 相移与焦移法对任意位姿斜面的测量均方根误差平均值可达 4.98  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 测量; 光学微观三维面形测量; 调制度测量轮廓术; 垂直测量; 相移方法

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1512004

## Application of Phase-Shifting and Focal-Switching Method in Modulation Measurement Profilometry

Lu Yongyi, Zhong Min\*, Zhao Xu, Wang Jiahui, Zhang Xueqin, Li Min, Gan Yaowei,  
Dai Xianglin, Huang Kaizhi

College of Optoelectronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China

**Abstract** A three-dimensional vertical surface measurement method based on phase-shifting and focal-switching method is proposed. When the projector scans the depth information of the measured object, the three-frame fringe patterns in the three-step phase-shifting method will be projected to the surface of the measured object as a continuous loop, and the corresponding fringe patterns are collected synchronously by the camera. When calculating the modulation distribution of the fringe pattern for each focal length value of the projector, the modulation distribution at the focal length position is approximately calculated by using the three-frame fringe patterns of the focal length position and its adjacent position before and after the focal length value, and the three-dimensional shape of the measured object is reconstructed according to the relationship between the maximum modulation value and the depth information. Experimental results show that the amount of fringe projection and data collection of the proposed method is only one third of that of the traditional three-step phase-shifting method, but the measurement accuracy is almost the same as that of the traditional three-step phase-shifting method. In the depth range of 1100  $\mu\text{m}$ , the average root-mean-square error for the inclined plane with different poses can reach 4.98  $\mu\text{m}$  by using phase-shifting and focal-switching method.

**Key words** measurement; optical microscopic three-dimensional surface shape measurement; modulation measurement profilometry; vertical measurement; phase-shifting method

## 1 引言

随着计算机技术、光电技术和电子技术等高新技术的发展, 三维面形微观测量在精密仪器、材料科学、

工业产品质量监测和医学领域等领域中获得了广泛的关注。该技术可分为接触式测量法和非接触式测量法。

常见的接触式测量法包括三坐标测量法

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-02-17; 录用日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61801057)、四川省教育厅项目(18ZB0124)、大学生创新创业训练项目(202010621108, 202110621229, 202110621232, 202210621251)

通信作者: \*zm1013@cuit.edu.cn

(CMM)<sup>[1-2]</sup>和扫描探针显微镜技术(SPM)<sup>[3-5]</sup>。在CMM中,利用三个互相垂直的运动轴建立空间坐标系,利用测头可精密地测出被测零件在空间坐标系中的数值。SPM利用纳米级细小探针在样品表面进行扫描,进而获得样品表面的结构信息,该方法可以实现原子级分辨率。接触式测量法虽然测量精度较高,但是测量速度缓慢,且容易损害被测物体的表面。

随着光学技术和电子元件的快速发展和应用,非接触式测量技术的形成更加有效地避免了检测过程中对被测样品产生的损害,该技术具有高速、无损和便捷等优点,主要包括共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)<sup>[6-8]</sup>、干涉测量技术<sup>[9-15]</sup>、激光三角法(LTM)<sup>[16]</sup>和结构光法<sup>[17-22]</sup>等。CLSM是一种高分辨率的显微成像技术,该技术每次只对空间上的一个焦点进行成像,逐点扫描被测物体,进而获得物体的二维图像或三维图像。干涉测量技术主要包括单波长干涉术(SWI)<sup>[9]</sup>、双波长干涉术(DWI)<sup>[10-11]</sup>和白光干涉扫描术(WLI)<sup>[12-15]</sup>;SWI存在相位模糊的问题,且无法完成对高度跳变超过半个波长的物体的测量;DWI测量量程有限;WLI不仅对外界环境要求较高,还对被测物体反射率要求较高。LTM根据光的反射规律和相似三角形原理获得物体的三维数据,但其算法复杂且计算量较大。

结构光法可分为基于三角原理的测量技术和基于垂直原理的测量技术。基于三角原理的光学三维面形测量技术,如相移轮廓术、傅里叶变换轮廓术、小波变换轮廓术、Moiré轮廓术和S变换轮廓术等<sup>[23-31]</sup>,是将物体的高度信息调制在条纹的相位中,通过解相位获得被测物体的三维轮廓,但该技术无法完成对高度变化剧烈的物体的测量,如深孔、凹槽等。基于调制度原理的光学三维面形垂直测量技术能很好地克服上述缺陷,将被测物体的深度信息调制在条纹的调制度中,通过提取调制度信息重建被测物体的三维面形。调制度测量轮廓术可利用傅里叶变换法(FTM)<sup>[17]</sup>、小波变换法(WTM)<sup>[18-19]</sup>和相移法(PSM)<sup>[20]</sup>实现调制度的提取和物体三维面形的重建。为提高测量速度,正交光栅投影被提出<sup>[21-22]</sup>,只需一帧条纹图即可重建被测物体的三维面形。虽然该方法能够满足高效测量工作的需求,但是系统标定过程中需要利用机械平移台来完成对光栅成像距离的改变,并需要测量多组数据来建立调制度与高度间的映射关系。与此同时,由于系统利用投影镜头的前景深或后景深的X形交叉区域进行测量,因此系统的工作距离将会被限制在很窄的范围内。随着光学技术和电子元件的进一步发展,电子可调镜头在调制度测量轮廓术中的应用有效提高了投影条纹成像位置改变的速度和准确性<sup>[32-34]</sup>。然而,在调制度提取的单帧条纹处理技术中,由于FTM属于全局分析法,故当基频分量与零频分量或高频分量出现混叠时,基频信息的提取将不准确,这会直接影响到物体三维面形的测量精度。虽然 $\pi$ 相移法<sup>[35]</sup>和正交光栅法<sup>[36]</sup>可有效消除零频对基频的影响,但是这两种方法

也基于傅里叶变换的,其滤波操作也会导致物体细节的丢失。WTM由于变换的冗余性,故其不存在唯一的逆变换。PSM是多帧条纹分析工具,其测量精度比FTM和WTM高,具有更好的鲁棒性,但该方法至少需要三帧条纹才能完成对每个位置处调制度分布的计算。

本文提出了一种基于相移与焦移法的三维面形垂直测量方法。在投影仪进行变焦扫描被测物体深度信息时,利用三步相移中的三帧条纹图依次连续循环投影深度信息到被测物体的表面,并利用相机同步采集对应的条纹图。在计算投影仪每一焦距值的调制度分布时,利用该焦距及其前后相邻焦距值的条纹图进行调制度值分布的近似计算,进而重建被测物体的三维形貌。所提方法既减少了条纹图的投影数和采集量,又能避免被测物体细节的丢失,可获取与基于传统三步相移法(TS-PSM)的调制度测量技术几乎相同的精度。为验证所提方法的有效性,实验将TS-PSM和所提方法(PM)进行比较。实验结果表明,PM只需要TS-PSM 1/3的条纹投影量和数据采集量,就可达到几乎与PSM相同的测量精度。

## 2 基本原理

基于相移与焦移法的调制度测量轮廓术的基本原理如图1所示。根据成像原理,物平面上的每个点只有在焦平面上的成像才是最清晰的,在焦平面的前后成像将会随着距离的增大逐渐变得模糊。假设被测物体为一圆点,理想情况下其像在焦平面上将会是一个等大的圆点,当成像面与焦平面不重合时,该点在成像面上将会形成一个扩大的圆形斑点,且圆形斑点的直径会随着成像平面与焦平面距离的增大而增大。当投影仪将条纹投影到平面上时,只有焦平面P3处能获得最清晰的图像,在焦平面前后位置(P1、P2、P4、P5)的像将会出现不同程度上的模糊。这种模糊程度可以用调制度值来描述。传统三步相移技术将在每一个离焦位置处投影三帧相位相差 $2\pi/3$ 的条纹图( $n=0, n=1, n=2$ ),如P2平面将采集到条纹图 $I_{H_1}^{(0)}, I_{H_1}^{(1)}$ 和 $I_{H_1}^{(2)}$ ,并利用这三帧条纹图完成调制度提取。相移与焦移法依次连续循环投影三帧条纹图到平面上,如P1面投影条纹 $n=0$ ,采集光场分布 $I_{H_0}^{(0)}$ ,P2面投影条纹 $n=1$ ,采集光场分布 $I_{H_1}^{(1)}$ ,P3面投影条纹 $n=2$ ,采集光场分布 $I_{H_2}^{(2)}$ ,P4面投影条纹 $n=0$ ,采集光场分布 $I_{H_3}^{(0)}$ ,P5面投影条纹 $n=1$ ,采集光场分布 $I_{H_4}^{(1)}$ ,P2位置处的调制度将利用 $I_{H_0}^{(0)}, I_{H_1}^{(1)}$ 和 $I_{H_2}^{(2)}$ 完成计算。若在P1和P5之间选取更多等间距的像平面,采集条纹图并计算图片集的调制度分布,则提取每一平面调制度图中任意同名像素点 $(x, y)$ 的调制值即可获得如图1所示的曲线,该曲线反映了在光轴方向上调制度值与深度信息的关系。

### 2.1 传统三步相移法提取调制度

当依次投影TS-PSM三帧条纹图到被测物体表面上时,电荷耦合器件(CCD)在焦平面上所采集到的条纹图可表示为

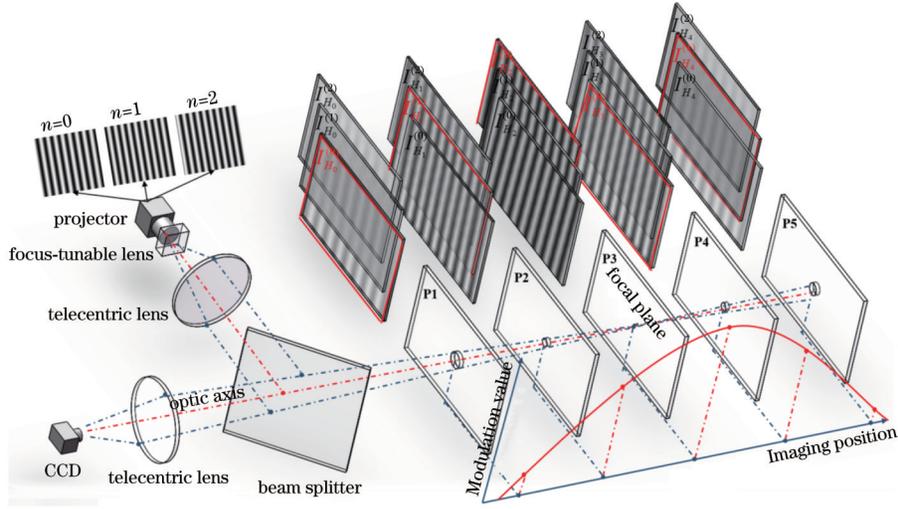


图 1 基于相移与焦移法的调制度测量轮廓术的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of modulation measurement profilometry based on phase-shifting and focal-switching method

$$I_{H_t}^{(n)}(x, y) = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \cos \left[ 2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y) + \frac{2\pi n}{3} \right] \right\}, n = 0, 1, 2, \quad (1)$$

式中:  $t$  为被测物体的序列号;  $H_t$  为深度位置;  $R(x, y)$  为被测物体表面的反射率;  $M$  为测量系统的放大倍数;  $B(x, y)$  为环境光强;  $C(x, y)$  为条纹对比度;  $f_0$  为条纹周期;  $\Phi_0(x, y)$  为初始相位。

焦平面上的调制度值  $M_f(x, y)$  可以表示为

$$M_f(x, y) = \sqrt{\left[ \sum_{n=0}^2 I_{H_t}^{(n)}(x, y) \sin\left(\frac{2\pi n}{3}\right) \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^2 I_{H_t}^{(n)}(x, y) \cos\left(\frac{2\pi n}{3}\right) \right]^2}, \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得

$$M_f(x, y) = \frac{3R(x, y)C(x, y)}{2M^2}. \quad (3)$$

根据成像原理, 离焦平面上的图像在数学上可以看作焦平面位置的图像和点扩散函数的卷积, 即

$$I_{H_t, \text{off}}^{(n)}(x, y; \delta) = G(x, y; \delta) \otimes I_{H_t}^{(n)}(x, y), \quad (4)$$

式中:  $\delta$  表示离焦程度;  $\otimes$  表示卷积符号;  $G(x, y; \delta)$  表示点扩散函数, 可用二维高斯函数来表征, 其数学表达

式为

$$G(x, y; \delta) = \frac{1}{2\pi\sigma_{H_t}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_{H_t}^2}\right), \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{H_t}$  为点扩散函数的标准偏差, 通常正比于模糊斑半径  $r$  的大小, 即  $\sigma_{H_t} = Cr$ , 其中  $C$  是一个和光学测量系统有关的常数。将式(1)和式(5)代入式(4)中, 当离焦程度为  $\delta_1$  时(扩散函数的标准偏差为  $\sigma_{H_t}$ ), 被测物体表面上采集到的三帧光场可表示为

$$\begin{cases} I_{H_t}^{(0)} = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_t}^2\right) \cos[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y)] \right\} \\ I_{H_t}^{(1)} = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_t}^2\right) \cos\left[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right] \right\}, \\ I_{H_t}^{(2)} = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_t}^2\right) \cos\left[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y) + \frac{4\pi}{3}\right] \right\} \end{cases}, \quad (6)$$

将式(6)简化, 可得

$$\begin{cases} I_{H_t}^{(0)} = A(x, y) + F_1(x, y) \cos \Phi_{H_t}^{(0)} \\ I_{H_t}^{(1)} = A(x, y) + F_1(x, y) \cos \Phi_{H_t}^{(1)}, \\ I_{H_t}^{(2)} = A(x, y) + F_1(x, y) \cos \Phi_{H_t}^{(2)} \end{cases}, \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} A(x, y) = \frac{R(x, y)B(x, y)}{M^2} \\ F_1(x, y) = \frac{R(x, y)C(x, y)}{M^2} \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_t}^2\right), \\ \Phi_{H_t}^{(n)} = 2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y) + \frac{2n\pi}{3}, n = 0, 1, 2 \end{cases}, \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)中可得到离焦程度为  $\delta_1$  的像平面处的调制度分布为

$$M_{H_1}(x, y; \sigma_{H_1}) = \frac{3R(x, y)C(x, y)}{2M^2} \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_1}^2\right) = M_I(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_1}^2\right). \quad (9)$$

### 2.2 相移与焦移法提取调制度

利用相移与焦移法获取离焦程度为  $\delta_1$  的像平面处(点扩散函数的标准偏差为  $\sigma_{H_1}$ )及其前后位置( $\delta_0, \sigma_{H_0}$ 和 $\delta_2, \sigma_{H_2}$ )处的三帧条纹图,其表达式为

$$\begin{cases} I_{H_0}^{(0)} = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_0}^2\right) \cos\left[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y)\right] \right\} \\ I_{H_1}^{(1)} = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_1}^2\right) \cos\left[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right] \right\} \\ I_{H_2}^{(2)} = \frac{R(x, y)}{M^2} \left\{ B(x, y) + C(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_2}^2\right) \cos\left[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y) + \frac{4\pi}{3}\right] \right\} \end{cases} \quad (10)$$

在实际测量中,投影焦距变化很小,因此光场信息变化可近似为  $\delta_0 \approx \delta_1 \approx \delta_2, \sigma_{H_0} \approx \sigma_{H_1} \approx \sigma_{H_2}$ ,对比式(6)和式(10),可将式(10)化简为

$$\begin{cases} I_{H_0}^{(0)} = A(x, y) + F_0(x, y) \cos \Phi_{H_1}^{(0)} \\ I_{H_1}^{(1)} = A(x, y) + F_1(x, y) \cos \Phi_{H_1}^{(1)} \\ I_{H_2}^{(2)} = A(x, y) + F_2(x, y) \cos \Phi_{H_1}^{(2)} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$F_n(x, y) = \frac{R(x, y)C(x, y)}{M^2} \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_n}^2\right), \quad n = 0, 1, 2; \quad (12)$$

$I_{H_0}^{(0)}, I_{H_1}^{(1)}, I_{H_2}^{(2)}$  分别表示离焦程度为  $\delta_0, \delta_1, \delta_2$  的像平面上的三帧相移图。在离焦程度为  $\delta_1$  的像平面及其前后位置处,由于投影焦距变化很小,因此  $F_0(x, y)$  和

$F_2(x, y)$  可利用  $F_1(x, y)$  分布来表示,即  $F_0(x, y) = F_1(x, y) - \epsilon_1, F_2(x, y) = F_1(x, y) + \epsilon_2$ ,且  $\epsilon_1 \approx 0, \epsilon_2 \approx 0$ ,式(11)可改写为

$$\begin{cases} I_{H_0}^{(0)} = A(x, y) + [F_1(x, y) - \epsilon_1] \cos \Phi_{H_1}^{(0)} \\ I_{H_1}^{(1)} = A(x, y) + F_1(x, y) \cos \Phi_{H_1}^{(1)} \\ I_{H_2}^{(2)} = A(x, y) + [F_1(x, y) + \epsilon_2] \cos \Phi_{H_1}^{(2)} \end{cases}, \quad (13)$$

将式(7)代入式(13)中,可得

$$\begin{cases} I_{H_0}^{(0)} = I_{H_0}^{(0)} + \epsilon_1 \cos \Phi_{H_1}^{(0)} \\ I_{H_1}^{(1)} = I_{H_1}^{(1)} \\ I_{H_2}^{(2)} = I_{H_2}^{(2)} - \epsilon_2 \cos \Phi_{H_1}^{(2)} \end{cases}, \quad (14)$$

将式(14)代入式(2)中,近似计算得到离焦程度为  $\delta_1$  的像平面处的调制度分布,即

$$\begin{aligned} M'_{H_1}(x, y; \sigma_{H_1}) &= M_{H_1}(x, y; \sigma_{H_1}) = \sqrt{\left[\sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right)\right]^2 + \left[\sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right)\right]^2} \approx \\ &\left\{ \left[\sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right)\right]^2 + \sqrt{3} \epsilon_2 \cos \Phi_{H_1}^{(2)} \sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right) - \left[\frac{-\sqrt{3} \epsilon_2}{2} \cos \Phi_{H_1}^{(2)}\right]^2 + \right. \\ &\left. \left[\sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right)\right]^2 + 2 \sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right) \left[\epsilon_1 \cos \Phi_{H_1}^{(0)} + \frac{\epsilon_2}{2} \cos \Phi_{H_1}^{(2)}\right] + \left[\epsilon_1 \cos \Phi_{H_1}^{(0)} + \frac{\epsilon_2}{2} \cos \Phi_{H_1}^{(2)}\right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (15) \end{aligned}$$

若  $\epsilon_1 \approx 0, \epsilon_2 \approx 0, \sqrt{3} \epsilon_2 \cos \Phi_{H_1}^{(2)} \sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right) \approx 0, \left[\frac{-\sqrt{3} \epsilon_2}{2} \cos \Phi_{H_1}^{(2)}\right]^2 \approx 0, 2 \sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right) \left[\epsilon_1 \cos \Phi_{H_1}^{(0)} + \epsilon_2 \cos \Phi_{H_1}^{(2)}/2\right] \approx 0, \left[\epsilon_1 \cos \Phi_{H_1}^{(0)} + \frac{\epsilon_2}{2} \cos \Phi_{H_1}^{(2)}\right]^2 \approx 0$ ,则式(15)可近似为

$$M'_{H_1}(x, y; \sigma_{H_1}) = M_{H_1}(x, y; \sigma_{H_1}) = M_I(x, y) \exp\left(-\frac{1}{2} f_0^2 \sigma_{H_1}^2\right) \approx \sqrt{\left[\sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right)\right]^2 + \left[\sum_{n=0}^2 I_{H_1}^{(n)} \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right)\right]^2}, \quad (16)$$

对比式(9)和式(16)可知,利用相移与焦移法在离焦程度为  $\delta_1$  的像平面处可近似获得调制度表达式,该方法仅需 TS-PSM1/3 的条纹投影量和采集量。

### 2.3 系统标定

由图1可知,调制度曲线由上升沿和下降沿两段组成,只有当调制度值最大时,调制度值与深度值之间

的映射关系才是唯一的,其他调制度值均对应两个深度值。因此,仅用一条调制度曲线无法根据已知调制度值确定深度信息。在实际测量中,根据最大调制度值和高度值映射关系的唯一性重建被测物体的三维面形,因此需要改变投影仪的焦距,选用不同焦距的调制度分布,利用调制度最大值来建立高度-调制度查找表,即系统标定。

基于相移与焦移法调制度测量轮廓术的测量系统由投影仪(Light Crafter PRO6500,分辨率为1920 pixel×1080 pixel,尺寸为7.56 μm×7.56 μm)、电子变焦镜头(ETL,EL-16-40-TC)、分束镜、相机(Point Grey,GS3-U3-23S6M)和两个远心镜头(放大率为1.055,工作距离为43.8 mm,景深为1.1 mm)组成。投影仪、ETL和相机由控制器完成精确同步控制。ETL安装在投影仪的镜头上,可通过设置不同的电流值来改变投影仪焦距。标定深度为1100 μm,任意两相邻标定面之间的距离为100 μm,即系统标定过程中选取了12个标定面,每个标定面改变的电流值数量为K=317。

如图2所示,在系统标定过程中,将距投影仪最近的标定面t=1设置为参考面,即高度为H(1,x,y)=0。连续改变317次ETL电流值,并同时投影和采集317帧两两相位差为2π/3的条纹图,利用相移与焦移法计算每个焦距位置(电流值)对应的调制度值。将不同焦距位置(电流值)对应的调制度图按采集顺序进行编号,即S(t,x,y)=k,k=1,2,3,⋯,K,t=1,2,3,⋯,T(T=12为标定面的总数量)。S(t,x,y)的取值为k,

即第S(t,x,y)=k幅调制度图(本文中的焦移与相移法在每个投影仪变焦位置处均投影一幅条纹图,S(t,x,y)=k的编号也对应条纹图的序列号)。对于任意像素点(x,y),提取调制度图集在该像素点处的调制度值,即可获得如图2所示的调制度曲线分布M<sub>H<sub>t</sub></sub>,记录参考面位置处调制度值最大的序列号S<sub>max</sub>(1,x,y)[S<sub>max</sub>(1,x,y)=k,k=1,2,3,⋯,K],即可建立像素点(x,y)深度值H(1,x,y)=0与调制度最大值序列号S<sub>max</sub>(1,x,y)之间的映射关系。将标定面移动至如图2所示的t=2位置处,重复上述操作,即可建立深度值H(2,x,y)=100 μm与调制度最大值序列号S<sub>max</sub>(2,x,y)之间的映射关系。由于每个标定面均利用相同的317个电流值依次改变投影仪的焦距,因此不同标定面对应的调制度最大值序列号S<sub>max</sub>(t,x,y)肯定不同。当12个标定面均进行了上述操作,即完成系统标定,建立了深度值H(t,x,y)与调制度最大值序列号S<sub>max</sub>(t,x,y)之间的映射关系。为建立t=1和t=12位置之间任意深度值和调制度最大值的拟合关系,将已知深度值和调制度最大值序列号进行拟合插值,即

$$H(t,x,y) = a(x,y) + b(x,y)S_{\max}(t,x,y) + c(x,y)S_{\max}^2(t,x,y), \quad (17)$$

式中:a(x,y),b(x,y),c(x,y)为二次曲线拟合的系数。

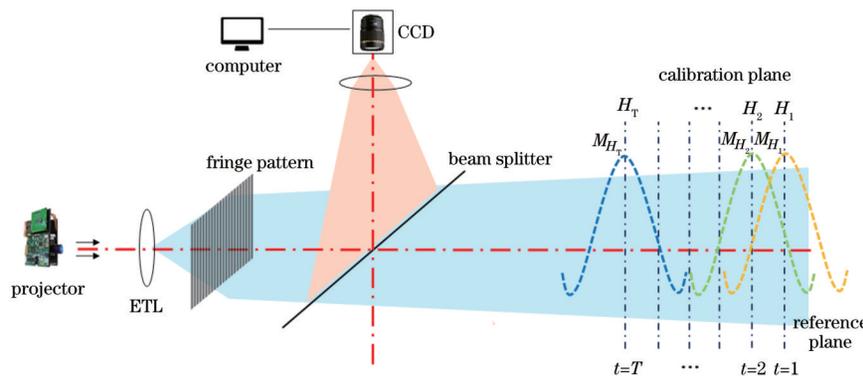


图2 测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

在标定和测量的过程中,所有的图像尺寸均被裁剪为800 pixel×1000 pixel以减少计算量。图3显示了(400,500)像素点处的高度-调制度最大值序列号的映射关系。为检验测量系统的精度,实验将两个平面以任意位姿放置于标定空间范围内(斜面测量),并用测量结果与其拟合平面的差值来评价测量精度。

为验证PM的有效性,将其重建结果与TS-PSM的结果进行对比。因此,在测量过程中,每个电流值下均投影和采集了三帧条纹图,分别用两种方法完成斜面的高度重建。两种方法重建结果对应的误差分布如图4所示。测量平面一的均方根误差分别为4.88 μm

(TS-PSM)和4.89 μm(PM),测量平面二的均方根误差分别为4.92 μm(TS-PSM)和5.06 μm(PM),平均均方根误差分别为4.90 μm(TS-PSM)和4.98 μm(PM)。

为进一步检验测量系统的精度,实验对两个直径为800 μm的球体进行了测试,并用测量结果与其拟合球面的差值来评价测量精度。图5显示了两种方法重建结果对应的误差分布。测量球面一的均方根误差分别为0.75 μm(TS-PSM)和0.91 μm(PM),测量球面二的均方根误差分别为0.68 μm(TS-PSM)和0.79 μm(PM),平均均方根误差分别为0.72 μm(TS-PSM)和

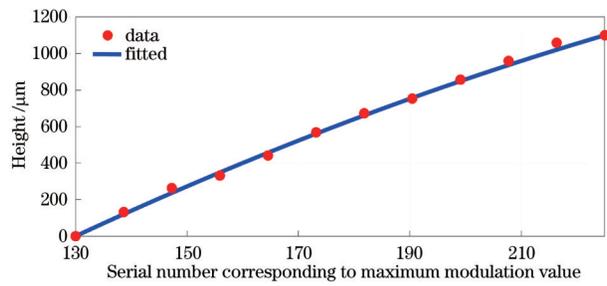


图 3 (400,500)像素点处高度分布与调制度最大值序列号间的关系

Fig. 3 Relationship between height distribution and serial number corresponding to maximum modulation value at pixel (400, 500)

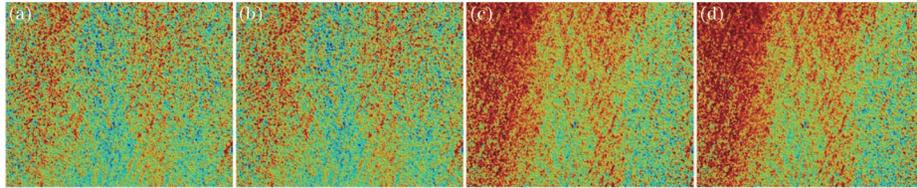


图 4 被测平面与拟合理想平面的误差分布。(a) TS-PSM 所得的被测平面一的误差分布；(b) PM 所得的被测平面一的误差分布；(c) TS-PSM 所得的被测平面二的误差分布；(d) PM 所得的被测平面二的误差分布

Fig. 4 Error distribution between tested plane and fitted ideal plane. (a) Error distribution of first tested plane obtained by TS-PSM; (b) error distribution of first tested plane obtained by PM; (c) error distribution of second tested plane obtained by TS-PSM; (d) error distribution of second tested plane obtained by PM

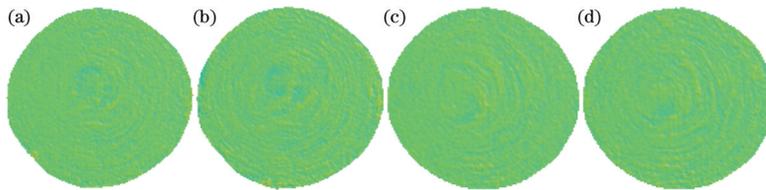


图 5 被测球体与标准球体的误差分布。(a) TS-PSM 所得的被测球体一的误差分布；(b) PM 所得的被测球体一的误差分布；(c) TS-PSM 所得的被测球体二的误差分布；(d) PM 所得的被测球体二的误差分布

Fig. 5 Error distribution between tested ball and standard ball. (a) Error distribution of first tested ball obtained by TS-PSM; (b) error distribution of first tested ball obtained by PM; (c) error distribution of second tested ball obtained by TS-PSM; (d) error distribution of second tested ball obtained by PM

0.85 μm(PM)。平面和球面物体的检测结果表明, PM 几乎可达到 TS-PSM 的测量精度。

此外,在系统标定过程中,本文共采用 12 个标定面,每个标定面下投影仪变焦 317 次,即变焦与相移法在标定时需要采集  $12 \times 317$  幅条纹图,而 TS-PSM 在每个变焦位置需要采集三帧条纹图,即需要采集  $12 \times 317 \times 3$  幅条纹图。同理,在测量某个物体时,变焦与相移法的条纹投影量(CCD 图片采集量)为 317 幅条纹图,而 TS-PSM 的条纹投影量(CCD 图片采集量)为  $317 \times 3$  幅条纹图。因此,变焦与相移法只需要 TS-PSM 1/3 的数据投影量和采集量。在投影仪每个变焦位置处调制度分布的计算过程中,变焦与相移法利用该焦距位置及其前后相邻焦距值的三帧条纹图进行三步相移法近似计算该焦距位置的调制度值分布,而 TS-PSM 直接利用该焦距位置处三帧条纹图进行三步相移法计算。虽然两者计算时原数据不同,但是 317 个变焦位置均需利用三步相移法计算对应的调制度分

布,因此三维重建运算量一致。综上所述,虽然 PM 与 TS-PSM 三维重建运算量一致,但是 PM 只需要 TS-PSM 1/3 的数据投影量和采集量,且 PM 几乎可达到 TS-PSM 的测量精度。

### 3 实验验证

为进一步验证 PM 的有效性,实验首先对一个表面带有凸出字母“TURN”的物体进行测量,并分别采用 TS-PSM 和 PM 进行三维面形重建。所有采集图像均被裁剪为  $800 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 。图 6(a)为待测物体,6(b)~(d)分别为序列号  $S(O_1, x, y) = 100$ 、 $S(O_1, x, y) = 150$ 、 $S(O_1, x, y) = 200$  时的条纹图,  $O_1$  表示表面带有凸出字母“TURN”的被测物体。由此可见,随着 ETL 电流值的改变,投影仪焦点平面从上到下依次扫描过被测物体的表面。

分别使用 TS-PSM 和 PM 对每个电流值对应的采集条纹进行调制度提取,图 7 显示了图 6(b)从左至右

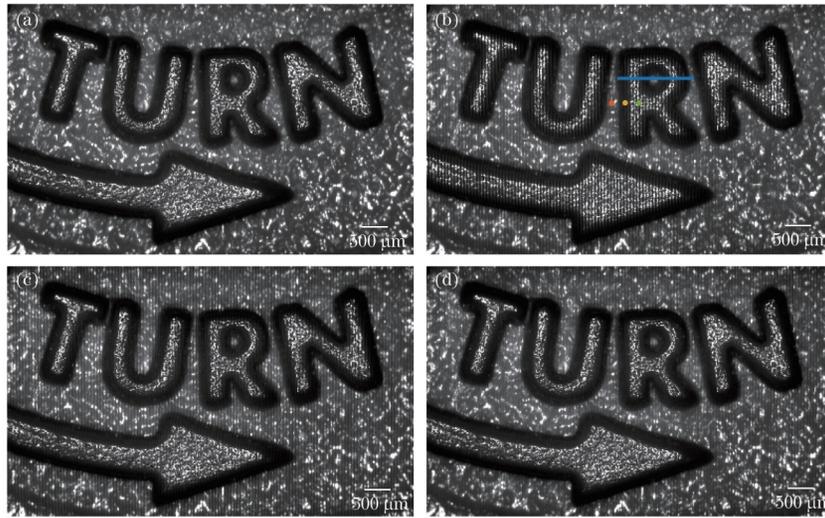


图 6 被测物体。(a) 表面带有凸出字母“TURN”的被测物体；(b)  $S(O_1, x, y)=100$  时的条纹图；(c)  $S(O_1, x, y)=150$  时的条纹图；(d)  $S(O_1, x, y)=200$  时的条纹图

Fig. 6 Measured object. (a) Measured object with protruding letter "TURN" on surface; (b) fringe pattern when  $S(O_1, x, y)=100$ ; (c) fringe pattern when  $S(O_1, x, y)=150$ ; (d) fringe pattern when  $S(O_1, x, y)=200$

三个标记点的调制度曲线,其中实线表示 TS-PSM 提取的调制度曲线,虚线表示 PM 提取的调制度曲线。

对比两种方法所得的结果,可以发现,两种方法计算得到的调制度曲线几乎重合。

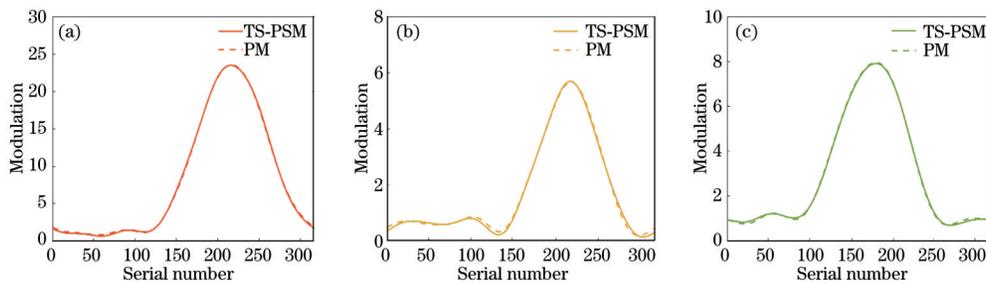


图 7 不同位置处两种方法得到的调制度曲线对比。(a)图 6(b)中最左侧标记点；(b)图 6(b)中中间标记点；(c)图 6(b)中最右侧标记点

Fig. 7 Comparison of modulation curves obtained by two methods at different locations. (a) Left point marked in Fig. 6(b); (b) middle point marked in Fig. 6(b); (c) right point marked in Fig. 6(b)

图 8(a)和图 8(b)分别显示了由 TS-PSM 和 PM 两种方法重建的结果。可以发现,两种方法均能获得较好的效果。为更清晰对比两种方法的重建效果,图

8(c)给出了图 6(b)标记线段位置的剖面图,实线表示 TS-PSM 的重建结果,虚线表示 PM 的重建结果,结果表明 PM 可获得与 TS-PSM 几乎一致的重建效果。



图 8 实验结果。(a) TS-PSM 重建结果；(b) PM 重建结果；(c)剖面图对比

Fig. 8 Experimental results. (a) Reconstruction result obtained by TS-PSM; (b) reconstruction result obtained by PM; (c) profile comparison

为进一步验证基于相移与焦移法的调制度测量轮廓术的有效性和可行性,实验对另一个表面带有凸出字母“PUSH”的物体进行了面形测量。图 9(a)为被测

物体,图 9(b)为  $S(O_2, x, y)=150$  时的条纹图,  $O_2$  表示表面带有凸出字母“TURN”的被测物体。分别采用 TS-PSM 和 PM 两种方法对待测物体的表面轮廓进行

重建,结果如图 9(c)和图 9(d)所示。图 9(e)给出了图 9(b)中标记线段位置处利用两种方法重建的剖面图,实线表示 TS-PSM 的重建结果,虚线表示 PM 的重建

结果,结果也表明 PM 能获得与 TS-PSM 几乎一致的重建效果。

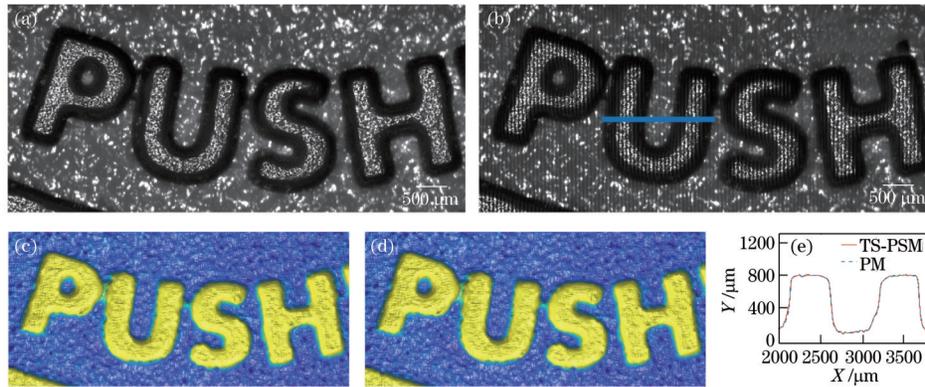


图 9 重建结果对比。(a)表面带有凸出字母“PUSH”的被测物体;(b)  $S(O_2, x, y)=150$  时的条纹图;(c) TS-PSM 重建结果;(d) PM 重建结果;(e)剖面图对比

Fig 9 Comparison of reconstruction results. (a) Measured object with protruding letter "PUSH" on surface; (b) fringe pattern when  $S(O_2, x, y)=150$ ; (c) reconstruction result obtained by TS-PSM; (d) reconstruction result obtained by PM; (e) profile comparison

## 4 结 论

提出利用相移与焦移法完成光学微观三维面形的垂直测量。在测量过程中,利用电子变焦镜头完成投影仪变焦扫描被测物体的深度信息,将三步相移中的三帧条纹图依次连续循环投影到被测物体表面上,相机同步采集对应的条纹图。在计算投影仪每一焦距值的条纹调制度分布时,利用前后相邻焦距值的条纹图进行近似计算以得到该焦距处的调制度值分布,从而重建被测物体的三维形貌。所提方法减少了条纹图的投影量和采集量,仅使用了 TS-PSM 1/3 的数据采集量,却获得了与其几乎相同的测量精度。

### 参 考 文 献

- [1] Wang S, Liu S G, Mao Q. A CMM-based method of control point position calibration for light pen coordinate measuring system[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5592.
- [2] Alblalaid K, Kinnell P, Lawes S, et al. Performance assessment of a new variable stiffness probing system for micro-CMMs[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 492.
- [3] Whitehouse D J. Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces[J]. *CIRP Annals*, 1988, 37(2): 649-653.
- [4] Meng W J, Zhao K S, Wang J H, et al. 30 T scanning tunnelling microscope in a hybrid magnet with essentially non-metallic design[J]. *Ultramicroscopy*, 2020, 212: 112975.
- [5] Wu Z B, Gao Z Y, Chen X Y, et al. A low-temperature scanning probe microscopy system with molecular beam epitaxy and optical access[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 113705.
- [6] Ohkubo S. Development of birefringence confocal laser scanning microscope and its application to sample measurements[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2019, 31(6): 926-933.
- [7] Zhang Z Q, Ibrahim M, Fu Y, et al. Application of laser scanning confocal microscopy in the soft tissue exquisite structure for 3D scan[J]. *International Journal of Burns and Trauma*, 2018, 8(2): 17-25.
- [8] Paddock S W, Eliceiri K W. Laser scanning confocal microscopy: history, applications, and related optical sectioning techniques[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2014, 1075: 9-47.
- [9] Griffiths C L, Weeks K J. Optical monitoring of molecular beam epitaxy growth of AlN/GaN using single-wavelength laser interferometry: a simple method of tracking real-time changes in growth rate[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2007, 25(3): 1066-1071.
- [10] Sagues M, Pineiro E, Cerri E, et al. Two-wavelength phase-sensitive OTDR sensor using perfect periodic correlation codes for measurement range enhancement, noise reduction and fading compensation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 6021-6035.
- [11] Min J W, Yao B L, Gao P, et al. Dual-wavelength slightly off-axis digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(2): 191-196.
- [12] Pavliček P, Mikeska E. White-light interferometer without mechanical scanning[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124: 105800.
- [13] Luo S J, Suzuki T, Sasaki O, et al. Signal correction by detection of scanning position in a white-light interferometer for exact surface profile measurement[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(13): 3548-3554.
- [14] Srivastava V, Inam M, Kumar R, et al. Single shot white light interference microscopy for 3D surface profilometry using single chip color camera[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, 20(6): 784-793.
- [15] Yang W J, Liu X J, Lu W L, et al. A novel white light interference based AFM head[J]. *Journal of Lightwave*

- Technology, 2017, 35(16): 3604-3610.
- [16] Dong Z X, Sun X W, Liu W J, et al. Measurement of free-form curved surfaces using laser triangulation[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3527.
- [17] Su X Y, Su L K, Li W S. New Fourier transform profilometry based on modulation measurement[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3749: 438-439.
- [18] 黄静静, 陈文静, 苏显渝, 等. 小波变换在调制度测量轮廓术中的应用[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0707001.  
Huang J J, Chen W J, Su X Y, et al. Application of wavelet transform in modulation measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0707001.
- [19] 钟敏, 陈锋, 肖朝. 小波变换减小调制度轮廓术中非线性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071205.  
Zhong M, Chen F, Xiao C. Research on the nonlinearity mitigation by wavelet transform method in modulation profilometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071205.
- [20] Su L K, Su X Y, Li W S, et al. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes[J]. Applied Optics, 1999, 38(7): 1153-1158.
- [21] 窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制度测量轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1858-1862.  
Dou Y F, Su X Y, Chen Y F. A fast modulation measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1858-1862.
- [22] 卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制度比的结构光三维面形垂直测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704003.  
Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase-shifting and modulation ratio[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704003.
- [23] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.  
Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [24] 李付谦, 陈文静. 正交光栅相移轮廓术的相位误差分析及其校正[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1412002.  
Li F Q, Chen W J. Phase error analysis and correction for phase shifting profilometry using crossed grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1412002.
- [25] 张海花, 李勇, 张启灿. 基于旋转光栅投影的动态三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2312005.  
Zhang H H, Li Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement based on rotating grating projection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2312005.
- [26] 杨超智, 曹益平. 基于单帧四灰阶条纹投影的实时相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1812003.  
Yang C Z, Cao Y P. Real-time phase measuring profilometry based on single-shot four-grayscale fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812003.
- [27] 常丽, 杨继敏. 基于校正多相位快速傅里叶变换算法的叠栅条纹相位差测量[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612006.  
Chang L, Yang J M. Moire fringe phase difference measurement based on correcting MPFFT algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612006.
- [28] 金晖, 张明, 周国鹏, 等. 条纹投影测量系统的相位误差抑制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1412001.  
Jin H, Zhang M, Zhou G P, et al. Phase error restraint method for fringe projection measurement system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1412001.
- [29] Zhong J G, Weng J W. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2560-2562.
- [30] Harding K G, Bieman L H. High-speed moire contouring methods analysis[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3520: 27-35.
- [31] Zhong M, Chen F, Xiao C. A frequency-based window width optimized two-dimensional S-Transform profilometry[J]. Optics Communications, 2017, 402: 1-8.
- [32] Zhong M, Cui J, Hyun J S, et al. Uniaxial three-dimensional phase-shifting profilometry using a dual-telecentric structured light system in micro-scale devices [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(8): 085003.
- [33] Jing H L, Su X Y, You Z S, et al. Uniaxial 3D shape measurement using DMD grating and EF lens[J]. Optik, 2017, 138: 487-493.
- [34] Jing H L, Su X Y, You Z S. Uniaxial three-dimensional shape measurement with multioperation modes for different modulation algorithms[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 034115.
- [35] Zhong M, Cheng K, Chen F, et al. Application of orthogonal fringe patterns in uniaxial microscopic 3D profilometry[J]. OSA Continuum, 2020, 3(11): 3206-3217.
- [36] Zhang X Q, Cheng K, Lu Y Y, et al. Uniaxial microscale 3D surface shape measurement based on  $\pi$  phase-shifting method[J]. OSA Continuum, 2021, 4(11): 2852-2861.