

# 结构光照明并行物方差动快速测量方法研究\*

刘志群<sup>1,2</sup>, 易定容<sup>1</sup>, 孔令华<sup>3</sup>, 王文琪<sup>1</sup>, 刘婷<sup>1</sup>

(1. 华侨大学机电及自动化学院 厦门 361021; 2. 闽江学院物理学与电子信息工程系 福州 350108;  
3. 福建工程学院机械与汽车工程学院 福州 350118)

**摘要:**激光扫描差动共聚焦显微测量方法具有纳米量级的轴向测量精度,然而信号在离焦位置获取,横向分辨率较低,而且使用激光逐点扫描方式,测量速度慢;基于空间光相位调制的结构光照明显微成像方法,可以实现超分辨率成像,但不具备高的轴向测量精度,因此这两种方法都不能满足微纳加工过程中复杂物体微观表面形貌在线、在位测量的要求。将空间光相位调制结构光照明显微成像技术与差动轴向测量方法结合,提出基于结构光照明的并行物方差动快速测量方法。该方法只需要使用一台面阵相机做探测器,在结构光照明相位调制模式下,获取样品在焦前和焦后位置的相位图像并分别合成对应的焦前及焦后高分辨率图像  $I_A$  和  $I_B$ ,对两幅图像进行求差而建立差动信号  $I_D$ ,再根据预先刻度好的差动曲线就可以得出被测样品在各个位置的表面高度。使用该方法对 500 nm 步高、10  $\mu\text{m}$  周期的标准样品进行测量,标准差为 2.8 nm,相对误差为 0.6%,完成一幅包含 2 048  $\times$  2 048 个位置的表面形貌测量耗时 65 ms。测量实验结果表明,该方法可以进行快速、在线纳米量级高精度轴向测量,可以实现 15/s 次三维形貌纳米量级精度测量。

**关键词:**物方差动;结构光照明;空间光调制器;三维形貌还原与测量

**中图分类号:** TH742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Research on the structured light illumination parallel object-side differential rapid measurement method

Liu Zhiqun<sup>1,2</sup>, Yi Dingrong<sup>1</sup>, Kong Linghua<sup>3</sup>, Wang Wenqi<sup>1</sup>, Liu Ting<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Laser scanning differential confocal microscopy measurement method is characterized with its nano-scale axial measurement precision. However, the method suffers potential low lateral resolution because its signal is acquired at defocusing positions. Furthermore, its measurement speed is limited by the sequential scanning of a laser beam. The structured light illumination microscopy imaging method based on spatial light phase modulator can achieve super-high lateral resolution imaging, but does not have a matching high axial measurement precision. Therefore, neither of these two methods meet the requirement of online, on-site measurement of the microscopy surface topography of complex object in micro-nano machining manufacturing process. In this paper, combining the spatial light phase modulated structured light illumination microscopy imaging technique with differential axial measurement method, a parallel object-side differential rapid measurement method based on structured light illumination is proposed. The method uses only an area array camera as the detector to acquire multiple phase images of a sample at opposite but equal distance away from the focal plane under the structured light illumination phase modulated mode. The acquired images are then synthesized to obtain corresponding high resolution images,  $I_A$  and  $I_B$  at opposite de-focused positions respectively. The differential signal  $I_D$  is calculated as the difference between the two images. The surface heights of the sample at different positions can be obtained according to the pre-calibrated differential curve. The proposed method was applied to measure a standard block with the step height of 500 nm at the pitch of 10  $\mu\text{m}$ . The experiment results show that the

proposed method achieves the standard deviation of 2.8 nm and the relative error of about 0.6% ; it takes only 65 ms to complete the surface topographical measurement with the image resolution of  $2\ 048 \times 2\ 048$ . The measurement results show that the method is suitable for fast online nano-scale high precision axial measurement, and can achieve fast 3D topographical nano-scale precision measurement with a speed of 15/s.

**Keywords:** object-side differential; structured light illumination; spatial light modulator; 3D topography recovery and measurement

## 0 引言

随着机械、电子、光学、材料等行业的发展,超精密加工技术也日益精细化、微型化,对表面几何检测的要求也越来越高,如半导体制造业中沟槽的蚀刻深度、曝光的线宽等,都在纳米量级。另外,微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)和纳机电系统(nano electro mechanical system, NEMS)的快速发展也出现了一些新的微纳米器件,如微型齿轮、微型孔、微型台阶等,这些微型器件的几何尺寸也都在微米或纳米量级。这些测量既要有较高的精度,又要有较快的速度<sup>[1]</sup>。超精密表面形貌测量不仅要测量样品的表面粗糙度、形状偏差,还要测量样品的几何参数,如轮廓、膜厚、孔径、三维尺寸等,这就要求测量设备必须具备高的横向分辨率、轴向分辨率以及较大的水平测量范围和纵深<sup>[2]</sup>。三维表面形貌的微纳测量方法有接触式和非接触式两种。接触式测量方法测量精度高,测量结果稳定、可靠,但由于与被测表面接触,容易造成划伤。非接触式测量一般采用光学技术实现,不与被测工件表面接触,不会造成表面永久性破坏,且具有测量速度快、精度高、分辨率高和测量范围大等优点,应用越来越广泛<sup>[3-5]</sup>。

在提高轴向测量精度方面,差动共聚焦显微镜以其高的信噪比和强的抗干扰能力,具有高达纳米甚至亚纳米量级的纵向测量精度。哈尔滨工业大学 Liu J 等人<sup>[6]</sup>研究的改进型激光扫描差动共聚焦显微镜,在像方的焦平面前和焦平面后分别放置两个探测器,利用两个探测器的信号差值与样品轴向位置之间建立函数关系,实现差动共焦测量,轴向分辨率可达 1 nm。基于双摄像头差动共聚焦测量方法,虽然有很高的纵向测量精度,但光轴对中难度大、成本高。北京理工大学 Zhao W. Q. 等人<sup>[7]</sup>等研究的双轴共聚焦显微镜,利用点探测器的轻微横向偏移会带来轴向强度响应曲线偏移的特性,建立成一定角度的双光轴光路(照明光路和探测光路),在探测光路中探测器的前方光轴两侧对称放置针孔,针孔后探测器上两光强的差值与样品轴向离焦量成比例,实现差动测量,精度达纳米量级,相对误差 0.5%。这种光轴成一定夹角的差动测量方法,测量精度高,但对称小孔的制作精度要求较高。哈尔滨工业大学 Liu J 等人<sup>[8]</sup>研究的基于空间相位变换的单探测器数字差分共聚焦显微技术,从

焦前和焦后获得的一系列切片图像中找到最佳位置,将两个位置光强的差与样品的离焦量作为实现差分探测的关系式,实现差分测量,轴向分辨率达到纳米量级。上述文献中的轴向测量精度都达到了纳米量级,但都采用激光点扫描方式成像,获得高纵向测量精度的同时无法实现动态在线测量。另外,信号都在离焦外面获取,强度较弱、聚焦欠佳,图像的水平方向分辨率及对比度会降低。另一种非接触式测量方法白光干涉法具有量程大、灵敏度高等优点,纵向分辨率达到纳米量级,但横向分辨率只能达到微米量级,难以实现三维表面形貌的高精度测量<sup>[9]</sup>。

基于空间光调制的结构光照明显微镜,结合图像处理算法,能够实现横向超分辨率成像。台湾同步辐射研究中心 Chang B. J. 等人<sup>[10]</sup>研究基于空间光调制器(spatial light modulator, SLM)产生干涉照明条纹的结构光照明显微镜,采用四方位调制、三相位合成图像的方法,实现了超分辨率成像,横向分辨率达到 144 nm。霍华德修斯医学研究所 Shao L 等人<sup>[11]</sup>利用 SLM 构成的结构光照明显微镜,将 SLM、半波板和偏振分束器集成为一个二进制相位空间调制器,实现三方位调制、五相位合成图像的成像方法,横向分辨率可达 120 nm。西安光学精密机械研究所 Dan D 等人<sup>[12]</sup>利用数字微镜器件(digital micromirror device, DMD)作为空间光调制器,研制出的荧光结构光照明显微镜,实现了超分辨率成像,横向分辨率达到 90 nm。上述基于空间光调制器的结构光照明显微成像系统中,实现了横向超分辨率成像,但纵向分辨率不高,且目前少有人将结构光照明显微成像技术应用于显微测量。

为了兼顾纵向测量精度、水平方向分辨率和测量速度,本文给出了一种基于结构光照明的物方差动并行快速表面形貌测量方法。测量前刻度系统测量曲线,测量时利用余弦调制的结构照明样品,在焦前和焦后分别获取不同相位照明模式下的图像,利用相位合成算法,得到样本分别在焦前和焦后的合成图像,再利用并行物方差动算法获得样本在水平面上各点的差动曲线。结合预先刻度的测量曲线,即可完成快速高精度并行测量。

## 1 测量方法分析

结构光照明并行物方差动快速测量系统原理如图 1

所示。点光源产生的白光经过集光镜扩束后由 DMD 调制为结构光,照明样本后,由摄像头分别获取样品在焦前  $u_F$  和焦后  $u_B$  (大小与  $u_F$  相同) 位置处不同相位调制照明模式下样品的原始图像,再按照均方根图像合成算法,得到焦前图像和焦后图像,然后利用物方差动轴向测量方法,完成样品高度测量和三维形貌还原<sup>[13]</sup>。

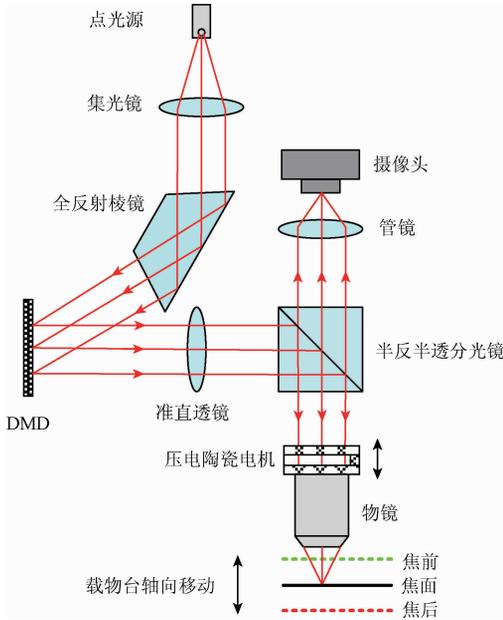


图 1 测量系统原理

Fig. 1 Principle of the measurement system

相比明场照明方式,使用三相正弦结构光调制照明方案,可将显微成像系统的成像分辨率在原有基础上进一步提高<sup>[14]</sup>。假设显微成像系统光学传递函数  $OTF$  可通过的最高频谱为  $k$ ,照明平均光强为  $I_0$ , $\Delta k$  为三相正弦结构光空间调制频率, $OBJ$  为明场成像中的物质反射率,摄像头探测到的样品信号的傅里叶变换  $F(k_x, k_y)$  满足公式:

$$F(k_x, k_y) = OTF(k) \left\{ I_0 \left[ OBJ(k) + \frac{m}{2} \exp(i\varphi_0) \right. \right. \\ \left. \left. OBJ(k - \Delta k) + \frac{m}{2} \exp(-i\varphi_0) OBJ(k + \Delta k) \right] \right\} \quad (1)$$

根据式(1)构造的显微成像系统可以分辨的频域空间如图 2 所示。结构光照明将成像系统的频域空间从只包含一个中心在原点的 0 级频域成份(见图 2 中的粗实线圆圈)所对应的  $OTF(k)$  扩展到多个偏离原点的  $\pm 1$  级频谱成份(见图 2 中的细虚线构成的大圆圈),其偏离原点的方向由照明条纹相位调制方向决定,偏离原点的距离由空间光调制频率  $\Delta k$  决定。选择空间光调制频率  $\Delta k$ ,显微成像系统分辨的最高空间频率可以达到  $k + \Delta k$ ,即空间分辨率提高到  $\frac{1}{k + \Delta k}$ 。本显微成像系统

的光学传递函数  $OTF$  可达到的最高频谱为  $k = \frac{NA}{0.61\lambda}$ ,由于使用 DMD 调制实现三相正弦结构光,当选取 DMD 的 4 个微镜单元为 1 个周期时,经过 DMD 调制的三相照明光源的调制频率  $\Delta k = \frac{M}{4 \times L_{DMD}}$ ,其中  $L_{DMD}$  为数字微镜单元的尺寸, $M$  为显微物镜放大倍数。则经过 DMD 调制的三相正弦结构光成像的分辨率可提高到  $\frac{1}{k + \Delta k} = \frac{1}{\frac{NA}{0.61\lambda} + \frac{M}{4 \times L_{DMD}}}$ 。

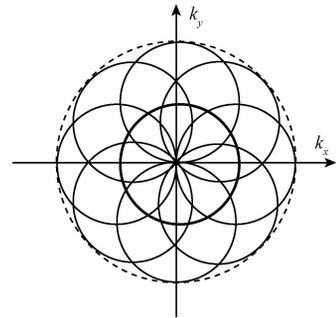


图 2 结构光相位调制照明提高光学分辨率原理

Fig. 2 Principle of improving optical resolution with structured light phase modulation illumination

根据完全相干成像条件<sup>[15]</sup>和光强与物方离焦量之间的关系,通过驱动压电陶瓷电机与载物台配合,可得到样品在焦前  $u_F$  位置时的光强随离焦量  $u$  的变化曲线  $I_f$  和样品在焦后  $u_B$  位置时的光强随离焦量  $u$  的变化曲线  $I_b$ ,两者之差  $I_d$  满足:

$$I_d = I_f - I_b = \left[ \frac{\sin \frac{u + u_F}{2}}{\frac{u + u_F}{2}} \right]^2 - \left[ \frac{\sin \frac{u - u_F}{2}}{\frac{u - u_F}{2}} \right]^2 \quad (2)$$

取  $u_F = 3$ ,根据式(2)得到  $I_f, I_b$  和  $I_d$  曲线如图 3 所示。该曲线是待测物体分别置于焦前  $u_F$  ( $3 \mu\text{m}$ ) 和焦后  $u_B$  ( $3 \mu\text{m}$ ) 位置所获得图像灰度差值  $I_d$  随物体高度  $u$  的变化曲线。

系统配置不同,测量曲线参数也会随之变化。选择放大倍数为 20、数值孔径为 0.75 的物镜,由高精度载物台和压电陶瓷电机驱动的物镜配合<sup>[15]</sup>,系统轴向测量曲线为:

$$I_d = -0.413300u - 0.002827 \quad (3)$$

刻度曲线获得后,把待测量样品放置在载物台上,将载物台分别移到焦前  $u_F$  和焦后  $u_B$  处,控制 DMD 产生余弦一维三相 ( $0^\circ, 90^\circ$  和  $180^\circ$ ) 照明图案,将均匀光调制成不同相位的条纹光后照明样品,用摄像头分别获取焦前和焦后位置上三相调制照明下的样品图像,焦前和

焦后依次获取的三相照明图案下的图像分别为  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$ 、 $I_{F3}$ 、 $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$ 、 $I_{B3}$ ，利用均方根相位合成算法公式<sup>[16-17]</sup>进行计算。

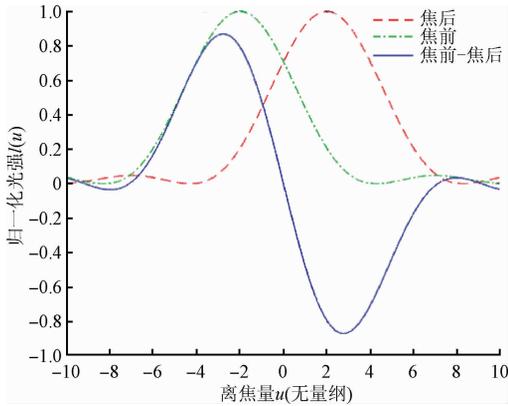


图3 轴向测量曲线仿真

Fig.3 Simulation chart of axial measurement curve

$$I_F = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(I_{F1} - I_{F2})^2 + (I_{F2} - I_{F3})^2} \quad (4)$$

$$I_B = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(I_{B1} - I_{B2})^2 + (I_{B2} - I_{B3})^2} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知合成焦前图像  $I_F$  和焦后图像  $I_B$ ；将两幅图像做相减处理，得到差值  $I_D$ ，即：

$$I_D = I_F - I_B \quad (6)$$

结合  $I_D$  与  $u$  的刻度曲线，即可实现获得轴向高度  $u$  的高精度测量值。

## 2 轴向高精度测量

为了验证结构光照明物方差动并行快速测量方法的测量精度，以 Budget Sensors 的 HS-MG500 校准量块为样品，测量区域选择 HS-MG500 校准量块中 500 nm 高度、10  $\mu\text{m}$  周期的方格区域。测量位置如图4所示。

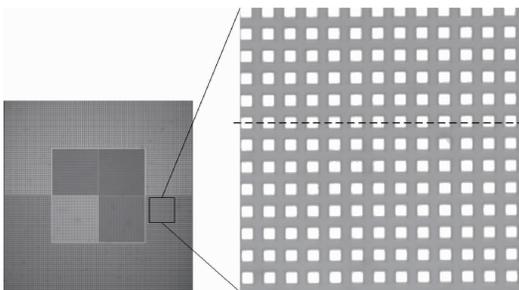


图4 HS-MG500 及测量位置

Fig.4 HS-MG500 and measurement position diagram

选择与刻度测量曲线一致的实验方法测量，将 HS-MG500 校准量块放置于载物台上，以台阶底面作为测量

基准面，聚焦完成后，移动载物台使得台阶底面分别处在焦前 3  $\mu\text{m}$  和焦后 3  $\mu\text{m}$  处，并分别获取三相 (0°、90° 和 180°) 照明下的图像，然后根据式(4)和(5)合成焦前、焦后图像  $I_F$  和  $I_B$ ，再根据式(6)得到差值  $I_D$ ，代入式(3)得到轴向位置，即被测样品的高度。取图4中虚线位置，其纵向高度的测量结果如图5所示，13个柱面台阶的高度平均值为 491.7 nm，标准差为 2.8 nm，相对误差为 0.6%。

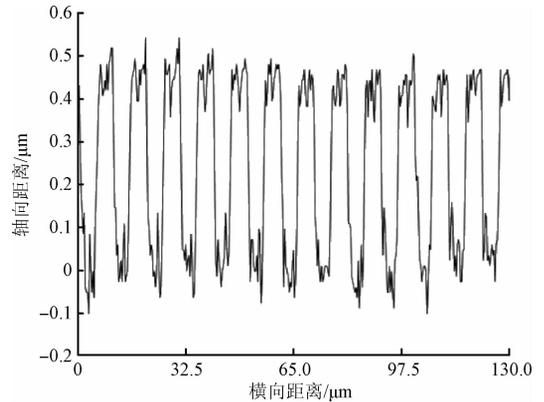


图5 HS-MG500 采样位置高度测量曲线

Fig.5 Height measurement curve of HS-MG500 at sampling position

将样品置于基于白光干涉原理的光学表面轮廓仪 (Zygo NewView 7300) 上，沿图4中的虚线位置测量的结果如图6所示，测量的高度值为 510 nm。再利用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 测量同一区域的结果如图7所示，测量的高度值为 481.08 nm。

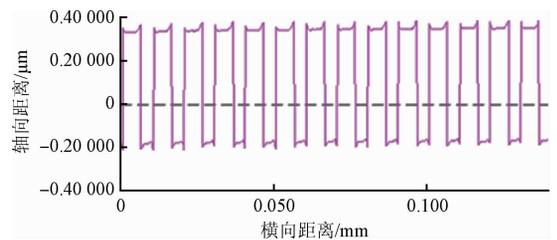


图6 光学表面轮廓仪高度测量曲线

Fig.6 Height measurement curve with optical surface profilometer

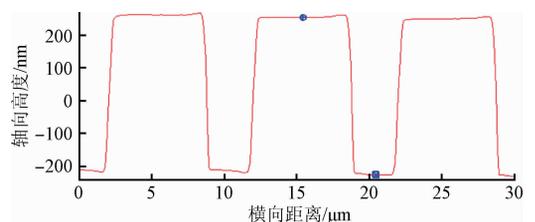


图7 原子力显微镜高度测量曲线

Fig.7 Height measurement curve with AFM

### 3 快速三维形貌还原

该方法除了能够沿某一方向实现高度测量外,还可以实现样品的三维形貌还原与测量,对于图 4 所示的测量区域,以台阶底面作为测量基准面,利用结构光照明并行物方差动测量方法实现该区域的三维形貌还原如图 8 所示。

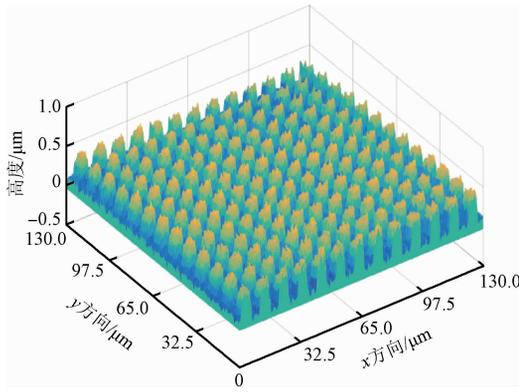


图 8 HS-MG500 三维形貌还原图

Fig. 8 3D topography recovery diagram of HS-MG500

完成此次三维形貌还原和测量需要的时间为 65 ms,其中包括焦前和焦后 6 幅图像的读出时间 60 ms (C11440-22U 数字 sCMOS 相机读出每幅图像的时间为 10 ms),摄像头总曝光时间 3 ms (0.5 ms × 6),载物台从焦前 3 μm 移动到焦后 3 μm 时间 2 ms。而光学表面轮廓仪在设定扫描范围为 5 μm 的条件下,完成一次测量所需要的时间是 1 s。

利用光学表面轮廓仪 (Zygo NewView 7300) 实现的 HS-MG500 样品与图 4 同一位置的三维形貌还原如图 9 所示。再利用原子力显微镜 (Asylum Research Cypher S) 测量同一区域且与图 7 同一位置的三维形貌还原如图 10 所示。

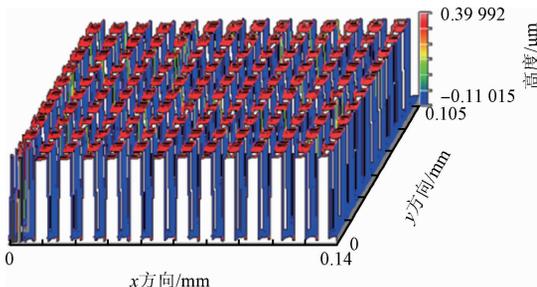


图 9 光学表面轮廓仪实现的 HS-MG500 三维形貌还原图

Fig. 9 3D topography recovery diagram of HS-MG500 with optical surface profilometer

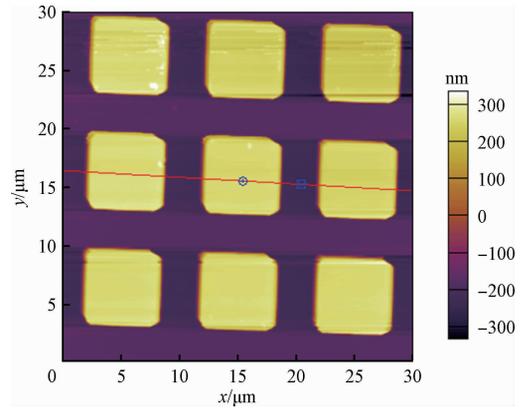


图 10 原子力显微镜实现的 HS-MG500 三维形貌还原图

Fig. 10 3D topography recovery diagram of HS-MG500 with AFM

极细铁粉磨粒 (颗粒直径 0.5 ~ 10 μm) 用于金属或者玻璃表面的研磨,由于具有磁性,便于磁性磨盘吸附。利用结构光照明并行物方差动测量方法对直径 5 μm 的铁粉磨粒的三维形貌还原如图 11 所示。

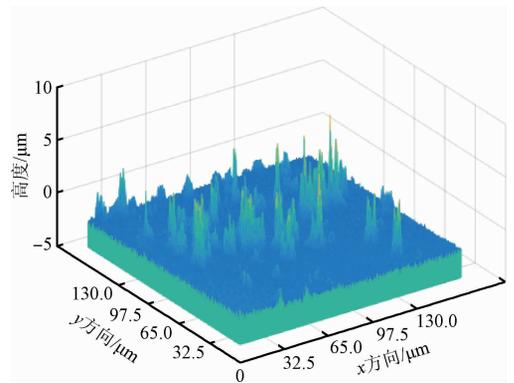


图 11 5 μm 铁粉颗粒三维形貌还原图

Fig. 11 3D topography recovery diagram of 5 μm iron powder particles

### 4 结 论

本文将具有横向分辨率增强效果的空间光相位调制成像方法与能够实现高纵向测量精度的差动共焦测量技术相结合,提出基于结构光照明的并行物方差动快速表面形貌测量方法。在对该方法进行模拟仿真的基础上,借助于基于 DMD 的并行共聚焦显微成像系统,刻度了并行差动轴向测量曲线,并利用该曲线对 HS-MG500 校准量块样品中柱面台阶区域内沿 x 方向 500 nm 高度、10 μm 周期的条纹进行了测量,测量的平均高度为 491.7 nm,标准差为 2.8 nm,相对误差为 0.6%,测量时

间为 65 ms。而同样位置在光学表面轮廓仪(Zygo New-View 7300)上的测量结果为 510 nm,在原子力显微镜(A-sylum Research Cypher S)上的测量结果为 481.08 nm。实验结果表明该方法既可以实现高精度轴向测量,也可以实现 3D 形貌还原,且比光学表面轮廓仪和原子力显微镜具有更快的测量速度。

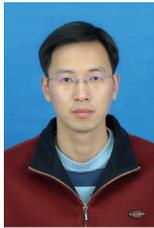
物方差动并行快速测量方法在该系统中使用 DMD 作为空间光调制器,可以增加空间光的调制相位,使其在焦前和焦后获取的图像满足各向同性,可以在提高横向分辨率的同时提高纵向测量精度,解决了差动共聚焦测量中因离焦带来的横向分辨率降低的问题,同时引入物方差动的方法又弥补了结构光照明显微镜轴向分辨率不高的不足。总之,该测量方法为具有结构光照明的显微镜实现三维快速、高精度测量提供了理论依据和实验方法。

## 参考文献

- [ 1 ] 高思田,李琪,施玉书,等.我国维纳几何量计量技术的研究进展[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1822-1829.  
GAO S T, LI Q, SHI Y SH, et al. Research progress of China's micro/nanometer geometric quantity metrology technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8):1822-1829.
- [ 2 ] 王淑珍,谢铁邦,常素萍.复合型超精密表面形貌测量仪[J].光学精密工程,2011,19(4):828-835.  
WANG SH ZH, XIE T B, CHANG S P. Combined profilometer for ultra-precision surface topography[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 828-835.
- [ 3 ] 冯晨熙,杨文军,肖靖.基于超分辨率成像算法的群目标识别研究[J].电子测量技术,2016,39(2):69-71.  
FENG CH X, YANG W J, XIAO J. Target recognition based on the algorithm of super resolution imaging[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2): 69-71.
- [ 4 ] 马云鹏,李庆武,何飞佳,等.金属表面缺陷自适应分割算法[J].仪器仪表学报,2017,38(1):245-251.  
MA Y P, LI Q W, HE F J, et al. Adaptive segmentation algorithm for metal surface defects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1):245-251.
- [ 5 ] 翟雪元,顾廷权,方百友.带钢表面粗糙度在线检测技术最新进展[J].电子测量与仪器学报,2017,31(4):493-500.  
ZHAI X Y, GU T Q, FANG B Y. Review of surface roughness online measurement techniques of steel strip[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 493-500.
- [ 6 ] LIU J, TAN J B, BIN H, et al. Improved differential confocal microscopy with ultrahigh signal-to-noise ratio and reflectance disturbance resistibility[J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6195-6201.
- [ 7 ] ZH W Q, JIAN Q, QIU L R, et al. Dual-axes differential confocal microscopy with high axial resolution and long working distance[J]. Optics Communications, 2011, 284(1):15-19.
- [ 8 ] LIU J, WANG Y, LIU C, et al. Digital differential confocal microscopy based on spatial shift transformation[J]. Journal of Microscopy, 2014, 256(2):126-132.
- [ 9 ] 张文栋,熊继军,薛晨阳,等.基于白光干涉法的双波段三维形貌测试系统[J].仪器仪表学报,2010,31(增刊8):182-186.  
ZHANG W D, XIONG J J, XUE CH Y, et al. Measurement system of three-dimension profile for double wave band based on white-light interferometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(Suppl.8): 182-186.
- [ 10 ] CHANG B J, CHOU L J, CHANG Y C, et al. Isotropic image in structured illumination microscopy patterned with a spatial light modulator[J]. Optics Express, 2009, 17(17):14710-14721.
- [ 11 ] SHAO L, KNER P, REGO E H, et al. Super-resolution 3D microscopy of live whole cells using structured illumination[J]. Nature methods, 2011, 8(12):1044-1046.
- [ 12 ] DAN D, LEI M, YAO B L, et al. DMD-Based LED-illumination super-resolution and optical sectioning microscopy[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 570-570.
- [ 13 ] 刘志群,易定容,孔令华,等.基于并行共聚焦显微镜系统的物方差动轴向测量[J].光学精密工程,2017,25(6):1449-1457.  
LIU ZH Q, YI D R, KONG L H, et al. Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1449-1457.
- [ 14 ] YANG Q, CAO L C, ZHANG H, et al. Method of lateral image reconstruction in structured illumination microscopy with super resolution[J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2016, 9(3): 1630002-1-15.
- [ 15 ] GU M, SHEPPARD C J. Effects of defocus and primary spherical aberration on images of a straight edge in confocal microscopy[J]. Applied Optics, 1994, 33(4):625-630.

- [16] NEIL M A A , JUSKAITIS R , WILSON T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope [ J ]. *Optics Letters*, 1997, 22(24):1905-1907.
- [17] 周兴, 但旦, 千佳, 等. 结构光照明显微镜中的超分辨率图像重建研究 [ J ]. *光学学报*, 2017, 37(3): 3-14.
- ZHOU X, DAN D, QIQN J, et al. Super-resolution reconstruction theory in structured illumination microscopy [ J ]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 3-14.

### 作者简介



刘志群, 2003 年于山东科技大学获得学士学位, 2011 年于福州大学获得硕士学位, 现为现为华侨大学博士研究生, 主要研究方向为共聚焦显微成像。

E-mail: lzq-323@qq.com

**Liu Zhiquan** received his B. Sc. degree from

Shandong University of Science and Technology in 2003 and M. Sc. degree Fuzhou University in 2011. Now he is a Ph. D. candidate in College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University. His main research interest is confocal microscopy imaging.



易定容 (通讯作者), 1990 年于国防科学技术大学获得学士学位, 分别在 1998 年和 2002 年于加拿大麦吉尔大学获得硕士学位和博士学位, 现为华侨大学教授, 主要研究方向为快速微型多光谱成像技术及仪器、先进光学显微成像技术及仪器、医疗光学成像技术及仪器等。

E-mail: yidr@hqu.edu.cn

**Yi Dingrong** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 1990, M. Sc. and Ph. D. degrees both from McGill University, Canada in 1998 and 2002, respectively. Now she is a professor in Huaqiao University. Her main research interests include hand-held non-scanning snap-shot multi spectral imaging technology and equipment, advanced optical microscopic imaging technology and instrument, medical optical imaging technology and instrument, etc.