

并行差动共焦轴向测量宽场误差修正方法

叶一青¹, 易定容^{1*}, 蒋威¹, 孔令华^{2**}, 黄彩虹¹

¹ 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

² 福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118

摘要 并行差动共焦三维成像方法通过将照明光分割为多光束, 实现多点并行探测, 解决了传统差动共焦成像中逐点扫描导致的成像效率偏低的问题, 是一种理想的快速高精度三维成像方法。然而, 在并行差动共焦检测过程中, 系统光照不均和光学成像系统的场曲都会引起测量误差。分析了宽场成像过程中不可避免的光照不均及光学系统场曲等因素对并行差动共焦轴向测量的影响, 提出了一种宽场误差的修正方法, 建立了并行差动共焦轴向测量宽场误差修正的理论模型。实验证明, 该方法可以有效地抑制系统光照不均对测量结果的影响, 并且校正了光学成像系统场曲等引起的轴向测量误差, 保证了并行差动共焦纳米量级轴向测量准确度在全视场范围内的普适性。该方法实施过程简便, 适用于其他并行共焦检测方法的误差修正。

关键词 显微; 并行共焦显微镜; 三维形貌测量; 物方差动测量; 误差修正; 光照不均

中图分类号 TH742

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2018001

Wide-Field Error Correction Method for Parallel Differential Confocal Axial Measurement

Ye Yiqing¹, Yi Dingrong^{1*}, Jiang Wei¹, Kong Linghua^{2**}, Huang Caihong¹

¹ College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

² School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China

Abstract The parallel differential confocal three-dimensional imaging method realizes multi-point parallel detection by dividing the illumination light into multiple isolated beams, which solves the problem of low imaging efficiency caused by point-by-point scanning of traditional differential confocal imaging. It is an ideal fast and high-precision three-dimensional imaging method. However, both non-homogeneous illumination and field curvature of an optical imaging system induce errors in the measurement results during the process of parallel differential confocal detection. The effects of inevitable non-homogeneous illumination and field curvature of an optical system during the wide-field imaging process on the parallel differential confocal axial measurement are analyzed, a wide-field error correction method is proposed, and a theoretical model of wide-field error correction is established for the parallel differential confocal axial measurement. The experimental results show that the proposed method can effectively suppress the influence of non-homogeneous illumination on the measurement results and correct the axial measurement error caused by the field curvature of the optical imaging system. It ensures the universality of parallel differential confocal nanometer-scale axial measurement accuracy in the full field of view. The implementation process of this method is simple and convenient, and it is also applicable to error correction of other parallel confocal detection methods.

Key words microscopy; parallel confocal microscopy; 3D topography measurement; object-side differential measurement; error correction; non-homogeneous illumination

OCIS codes 180.1790; 100.6890; 120.6650; 110.6880

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-17; 录用日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(51775200)、华侨大学研究生科研创新基金

* E-mail: yidr@hqu.edu.cn; ** E-mail: klh@fjut.edu.cn

1 引 言

共焦显微技术作为一种非接触式的光学显微测量技术,具有优秀的轴向层析能力,能实现高分辨率成像,已被广泛地应用于精密制造、生命科学和材料科学等领域^[1-3]。传统的共焦显微技术基于共轭成像原理进行单点机械扫描,通过共焦轴向光强响应曲线的峰值定位被测物的轴向高度,可实现微观三维形貌测量。为提高共焦测量的效率,国内外提出了多种分光束的并行共焦显微技术^[4-5],这些方法克服了传统共焦方法逐点扫描测量效率低及视场小的问题,实现了多点并行的全场测量^[6-7]。

在提高共焦轴向测量精度方面,Wang 等^[8]提出了差动共焦显微探测方法,通过像方焦前/后对称的双探测器,构建了探测器输出信号差值与轴向离焦量的函数关系,实现了像方差动共焦测量,轴向分辨率可达 2 nm。Zhao 等^[9]在此基础上提出了具有更高信噪比和轴向超分辨成像能力的三探测器差动共焦测量方法。在提高差动共焦显微镜测量精度和抗干扰能力方面,Liu 等^[10]提出了改进型激光扫描差动共焦显微轴向测量的数据处理方法,该方法可有效抑制加法噪声和乘法噪声,基于该方法的差动共聚焦测量的轴向分辨率可达 1 nm。然而,基于多探测器的差动共焦测量光路结构较为复杂,多探测器的探测方式增加了光路装配难度,其水平方向的测量采用激光点扫描方式,这在一定程度上限制了测量效率的提升。刘志群等^[11-12]提出了基于单探测器的并行差动共焦轴向测量方法,其光路结构简单,减少了像方多探测器光路装配过程中的难度,将横向装配误差降低到一个像素误差范围以内;其并行共轭针孔照明方法采用基于数字微镜器件(digital mirror device, DMD)的结构光照明显微成像方法^[13],解决了快速测量与横向大测量范围间的矛盾。为解决测量系统非均匀光照及样品反射率不均等问题,朱星星等^[14]提出了一种抗干扰并行差动共焦轴向测量方法,测量前需额外采集多幅样品图像及平面反射镜照明光斑图像,并用其补偿与校正误差。然而,提前采集的样品图像受样品的类型或位姿的影响,反射镜光斑图像则受标定光强差动响应曲线线性区的载物台偏移量的影响。因此,该方法存在一定的局限性,未能系统地定量分析非均匀光照等问题引起的误差。

以上差动共焦方法不论是激光扫描共焦方法还是多光束并行共焦测量方法,都是通过不同的数学

模型建立统一的单点光强差动信号与轴向离焦量的函数关系,并对轴向测量误差进行修正以提高测量精度,但未将不同系统的实际照明光路空间的不均匀性以及光学成像系统像差空间的不均匀性等误差纳入修正范围。本文通过引入宽场光照不均修正参数和参考焦面轴向偏移量修正参数,提出了一种并行差动共焦宽场误差修正模型,对轴向测量理论曲线进行了多误差联合修正。该方法能通过修正模型有效地修正系统光照不均问题,并且校正了光学成像系统场曲等引起的参考焦面轴向偏移问题。该修正方法易于实施,适用于现有的以共焦轴向光强响应曲线光强值或者光强差值等推算高度的各种并行共焦检测方法的误差修正。

2 测量原理与误差分析

2.1 并行差动共焦轴向测量原理

并行差动共焦轴向测量方法主要基于共焦显微原理,其结构原理示意图如图 1 所示,其中 sCMOS 为科学级相机。光源产生的白光经过集光镜和全反射棱镜,被 DMD 调制呈周期排列的多路并行点光源阵列,再经准直透镜组、半反半透镜和物镜投射到样品表面,样品表面反射的光信号由探测器采集。DMD 放置在照明光路的视场光阑位置,DMD、样品、图像传感器表面三者空间位置共轭。DMD 形成可开关的并行照明针孔,通过设计 DMD 与图像传感器像素在宽场范围内一一对应的关系,从而满足共轭成像要求。当 DMD 完成全周期并行点光源探测后,即可快速获取样品的全场图像信息。

该系统实现的快速微观三维形貌测量主要是基于差动原理。当样品在焦面位置时,探测器端光强 $I(z)$ 与物方样品的轴向离焦量 z 的关系满足

$$I(z) = \left(\frac{\sin \frac{z}{2}}{\frac{z}{2}} \right)^2. \quad (1)$$

(1)式即共焦轴向光强响应曲线^[15]。样品在焦前 $+z_d$ 处和焦后 $-z_d$ 处的轴向光强响应曲线分别为 $I(z+z_d)$ 和 $I(z-z_d)$,二者的差即为光强差动响应曲线 $I_D(z)$:

$$I_D(z) = I(z+z_d) - I(z-z_d) = \left(\frac{\sin \frac{z+z_d}{2}}{\frac{z+z_d}{2}} \right)^2 - \left(\frac{\sin \frac{z-z_d}{2}}{\frac{z-z_d}{2}} \right)^2. \quad (2)$$

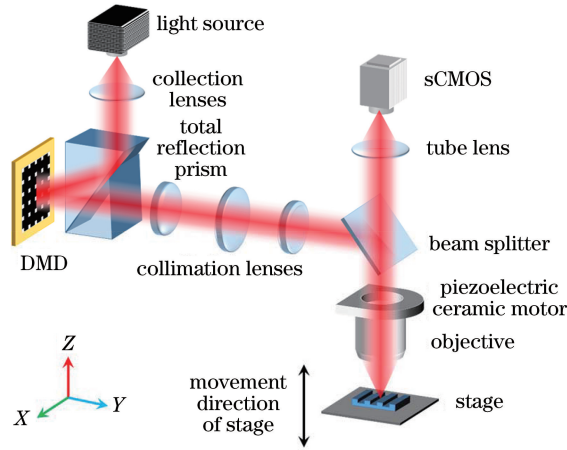


图 1 并行差动共焦轴向测量方法原理示意图

Fig. 1 Schematic of parallel differential confocal axial measurement method

光强差动响应曲线如图 2 所示。由图 2 可知，光强差动响应曲线（黑实线）存在一段线性区（虚线框区域），通过对线性区进行线性函数拟合，标定光强差 $I_D(z)$ 与轴向离焦量 z 的关系（下文称为“轴向测量曲线”），即可通过光强差确定样品的轴向高度。

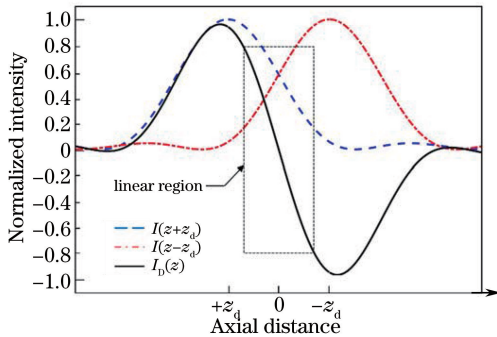


图 2 共焦轴向光强差动响应曲线

Fig. 2 Confocal axial light intensity differential response curves

相比传统共焦显微技术通过定位轴向光强响应曲线峰值来实现样品的轴向测量，差动共焦轴向测量方法通过线性函数计算避免了峰值提取算法的复杂问题，同时光强差动响应曲线线性区的斜率远大于轴向光强响应曲线峰值附近的斜率，光强差动响应曲线线性区对轴向位置的灵敏度更高，能实现更高的轴向测量精度和分辨率。另外，差动轴向测量方法避免了光强峰值法的纵向层层扫描过程，效率更高，通过多点并行测量即可实现微观三维形貌的快速还原。

现有的并行物方差动共焦轴向测量曲线的标定方法为单点标定法，具体如图 3 所示，主要分为以下几个步骤：1)以平面反射镜为样本获取样品的参考

焦面；2)分别将载物台移动至焦前面 P_{+z_d} 和焦后面 P_{-z_d} 处，通过 DMD 将光源调制成一个像素的点光源，通过压电陶瓷电机 (Piezoelectric ceramic motor) 驱动物镜作行程为 z ，步进为 Δz 的轴向扫描，共获取 $z/\Delta z$ 帧图像；3)以每帧图像点光源光斑的最大灰度值作为光斑光强，分别绘制焦前面 P_{+z_d} 和焦后面 P_{-z_d} 的轴向光强响应曲线 $I(z+z_d)$ 与 $I(z-z_d)$ ；4)利用 $I(z+z_d)$ 与 $I(z-z_d)$ 的差获取光强差动响应曲线 $I_D(z)$ ，并对其线性区进行线性函数拟合，即可获得轴向测量曲线 $D(z)$ 。

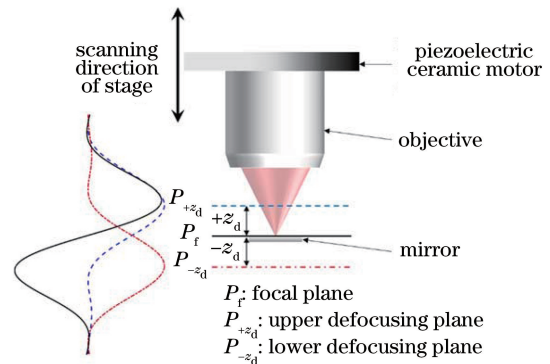


图 3 轴向测量曲线的标定方法示意图

Fig. 3 Schematic of calibration method of axial measurement curve

2.2 并行差动共焦轴向测量结果与分析

本文的并行差动共焦轴向测量的实验平台如图 4 所示。该实验平台在 Motic BA600 显微镜机架上进行改造，显微镜三目型号为 Motic BA410，光源为汞灯光源，图像探测器为滨松 sCMOS 摄像头 C11440，物镜采用 Motic 10×/0.35 消色差物镜。显微成像系统光照不均是不避免的问题，普遍存在光轴中心较亮、视场边缘较暗的现象，国产显微镜

相对于国外进口的显微成像系统,光照不均现象更严重,且低倍数物镜的光照不均现象相比高倍数物镜更明显。



图 4 并行差动共焦轴向测量的实验平台

Fig. 4 Experimental platform for parallel differential confocal axial measurement

根据上述轴向测量曲线的标定方法,压电陶瓷电机扫描行程 z 取值 $100 \mu\text{m}$,步进 Δz 取值 $0.5 \mu\text{m}$,共获取 201 frame 图像,绘制光强差动响应曲线,并对其线性区进行拟合,得到的函数表达式为

$$D(z) = -26.71774z + 5.48387. \quad (3)$$

获取的实测轴向测量曲线如图 5 所示。

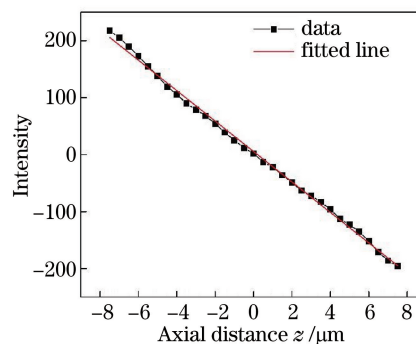


图 5 实测的轴向测量曲线

Fig. 5 Measured axial measurement curve

三维形貌还原的样本采用人民币一角硬币,其实物图及数字条纹区的局部放大图如图 6(a)所示。并行差动共焦轴向测量实验平台采集的硬币条纹区焦前 $10 \mu\text{m}$ 和焦后 $10 \mu\text{m}$ 图片分别如图 6(b)、(c)所示。

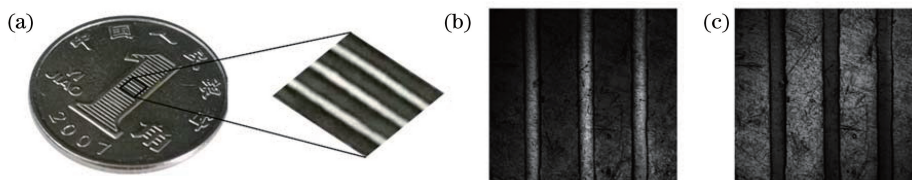


图 6 硬币样本图。(a)硬币样本实物图及条纹区的局部放大图;(b)硬币焦前共焦图;(c)硬币焦后共焦图

Fig. 6 Coin sample. (a) Actual picture and partially enlarged picture of coin sample; (b) confocal picture of coin sample in upper defocusing plane; (c) confocal picture of coin sample in lower defocusing plane

将硬币条纹区焦前和焦后图片对应的像素灰度值相减,并通过上文标定的轴向测量曲线函数表达式(3)式计算轴向高度,即可还原硬币条纹三维形貌,如图 7 所示。由图 7 可见,硬币条纹的三维形貌与实际形貌存在较大的偏差。相较于理想的三维形貌,图 7(b)中三维形貌俯视图虚线圈处的硬币凸台形貌高度高于圈外凸台高度,在全视场中呈显著的

球包状隆起,同时硬币的几处沟槽也存在高度不均的现象。这种误差可能是由并行差动共焦轴向测量实验平台上的显微光学系统的多种误差综合造成的。首先,由于光照的空间不均匀性,光照亮的地方样品表面高度偏高,光照暗的地方样品表面高度偏低。其次,成像光路中的场曲现象和载物台的轻微倾斜等问题也会对样品的轴向测量结果产生不同程

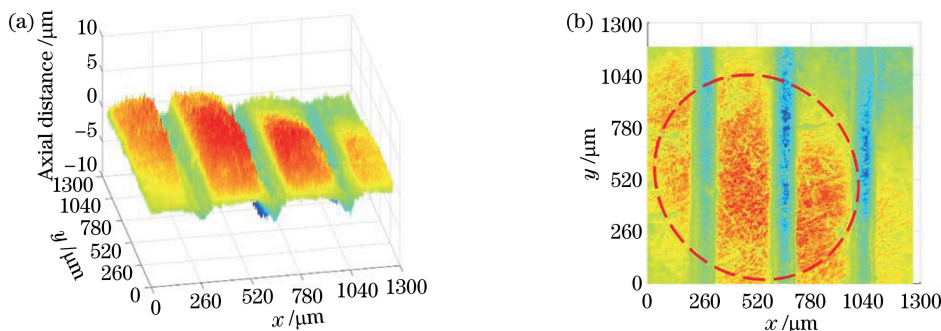


图 7 修正前硬币条纹区的还原图。(a)三维图;(b)俯视图

Fig. 7 Topography of coin stripes before correction. (a) Three-dimensional view; (b) top view

度的影响。这些误差虽然微小,但在微纳量级高精度三维测量时,影响非常突出。因此,需建立一种联合修正全视场范围多种误差的方法,对现有的并行差动共焦轴向测量方法进行多误差修正,使其不但在视场中心区域可以实现高精度的微观三维形貌测量,还能在宽场范围内达到同样的测量效果。

3 误差修正方法

3.1 误差修正理论分析

由上文论述可知,轴向测量曲线的标定准确性将直接影响着三维形貌还原的准确度。轴向测量理论曲线为线性函数,在对二维图像的处理中,其表达式及其过零点式为

$$D(x, y) = aZ(x, y) + b, \quad (4)$$

$$D(x, y) = a \left[Z(x, y) + \frac{b}{a} \right], \quad (5)$$

式中: $D(x, y)$ 为样品焦前/后二维图像在像素点 (x, y) 处的光强差值; $Z(x, y)$ 为样品在 (x, y) 处的高度; x 和 y 分别为二维图像像素点的行数和列数; a 和 b 分别为轴向测量曲线的斜率和截距。

因轴向测量理论曲线为线性函数,影响线性函数特性的参数为其斜率 a 和截距 b (或过零点 b/a)。斜率 a 的数值变化受到光强差动响应曲线峰值大小的影响。光照强度越大,标定所得的轴向测量曲线斜率 a 越大。其次,轴向测量曲线的过零点 b/a 即标定测量曲线时的参考焦面位置。在理想状态下,全视场处于同一个参考焦面且 b/a 取值为0。而在实际测量中,由于物镜存在一定的景深,参考焦面 b/a 无法取得绝对意义上的0值,且光学成像系统中存在的场曲问题或载物台存在的轻微倾斜问题,都将导致视场中不同位置的参考焦面发生轴向偏移,使得过零点 b/a 的数值发生不同程度的改变。然而,现有文献中标定轴向测量曲线的方法以视场中心的光线作为参考,通过视场中心的单点光

源进行轴向测量曲线的标定,曲线标定过程中忽略了视场边缘的光学特性。因此,上述标定的轴向测量曲线(3)式不具备宽场适用性,在计算所得结果中,视场边缘的测量结果会与实际情况存在一定程度的偏差。综上,必须引入用于修正宽场光照不均的参数 $r(x, y)$ 以及用于修正宽场参考焦面轴向偏移的参数 $S(x, y)$ 对轴向测量理论曲线进行修正。

为研究轴向光强响应曲线的峰值大小对轴向测量曲线斜率的影响以获取宽场光照不均修正参数 $r(x, y)$,通过数值模拟软件绘制两条峰值不同的光强差动响应曲线,分别记为 $I_{D_0}(z), I_{D_n}(z)$,其中 n 为曲线编号,如图8所示。

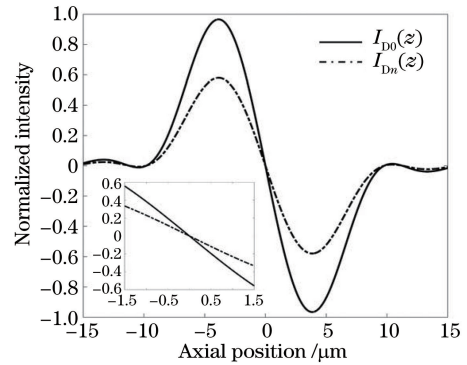


图8 峰值不同的光强差动响应模拟曲线及轴向测量模拟曲线

Fig. 8 Light intensity differential response simulation curve and axial measurement simulation curve with different peak values

$I_{D_0}(z), I_{D_n}(z)$ 分别由两组峰值不同的物方焦前/后轴向光强响应曲线 $I_0(z \pm z_d)$ 和 $I_n(z \pm z_d)$ 相减得到,且两组轴向光强响应曲线的光强峰值满足

$$I_n(z \pm z_d)_{\max} = r_n I_0(z \pm z_d)_{\max}, \quad (6)$$

式中: $I_0(z \pm z_d)_{\max}$ 和 $I_n(z \pm z_d)_{\max}$ 分别为 $I_0(z \pm z_d)$ 和 $I_n(z \pm z_d)$ 的最大值; r_n 为光强峰值比例系数。因此, $I_{D_n}(z)$ 的表达式为

$$I_{D_n}(z) = r_n I_{D_0}(z) = r_n [I_0(z + z_d) - I_0(z - z_d)] = r_n \left[\left(\frac{\sin \frac{z + z_d}{2}}{\frac{z + z_d}{2}} \right)^2 - \left(\frac{\sin \frac{z - z_d}{2}}{\frac{z - z_d}{2}} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

由于轴向测量曲线的斜率近似等于光强差动响应曲线在 $z=0$ 处的导数值,因此,对(7)式在 $z=0$

处求导,得到斜率 a_n 为

$$a_n \Big|_{z=0} = \frac{d[I_{Dn}(z)]}{dz} \Big|_{z=0} = r_n \left[\frac{\frac{z_d}{2} \sin z_d + \cos z_d - 1}{\left(\frac{z_d}{2}\right)^3} \right]. \quad (8)$$

由(8)式可得,轴向测量曲线的斜率 a_n 与轴向测量曲线标定时的载物台偏移量 z_d 以及光强峰值比例系数 r_n 有关。标定轴向测量曲线时,载物台偏移量 z_d 为定值。因此,影响斜率 a_n 的参数为 r_n 。那么,不同光强峰值的轴向测量曲线斜率比为

$$\frac{a_n}{a_0} = \frac{r_n}{r_0}. \quad (9)$$

当以 $I_{D0}(z)$ 作为光强差动响应曲线的参考曲线时, $r_0 = 1$ 。因此

$$\frac{a_n}{a_0} = r_n = \frac{I_n(z \pm z_d)_{\max}}{I_0(z \pm z_d)_{\max}}, \quad (10)$$

即通过光强峰值不同的光强差动响应曲线标定的轴向测量曲线的斜率比等于对应的轴向光强响应曲线的峰值比。在二维图像信息处理中,光强峰值比例系数 r_n 即为宽场光照不均修正参数 $r(x, y)$ 。因此,(5)式变为

$$D(x, y) = ar(x, y) \left[Z(x, y) + \frac{b}{a} \right]. \quad (11)$$

此外,当标定轴向测量曲线的参考焦面发生轴向偏移时,轴向测量曲线的过零点 b/a 数值发生相应改变。将宽场参考焦面的轴向偏移量记为

$S(x, y)$, 此时(11)式可改写为

$$D(x, y) = ar(x, y) \left[Z(x, y) + \frac{b}{a} + S(x, y) \right], \quad (12)$$

那么,轴向高度 $Z(x, y)$ 的表达式为

$$Z(x, y) = \frac{D(x, y) - br(x, y)}{ar(x, y)} - S(x, y). \quad (13)$$

(13)式即为并行差动共焦轴向测量的宽场误差修正理论公式。

3.2 误差修正参数的标定

通过 DMD 将光源调制成 15×16 的单像素点光源阵列以标定误差修正参数。通过 sCOMS 采集参考焦面附近的光斑阵列图像,如图 9(a)所示,其中图 9(b)、(c)分别为图 9(a)中实线框和虚线框处的局部放大图。对比二者可以发现,虽然光斑阵列理论上聚焦于参考焦面,但是并非所有光斑都处于同一聚焦状态,可以推断各个光斑的参考焦面并非在同一轴向位置,各光斑都存在不同程度的轴向偏移。其次,由于光路系统存在光照不均的现象,各光斑的光强值也存在差异。

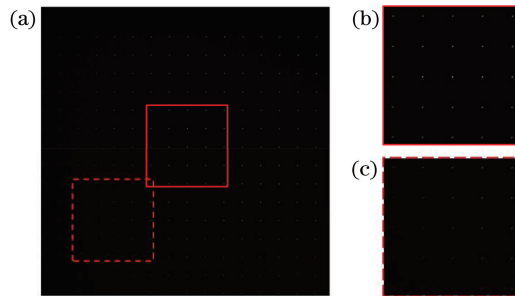


图 9 光斑阵列图。(a)焦面光斑阵列图;(b)实线框放大图;(c)虚线框放大图

Fig. 9 Light spot array images. (a) Light spot array image in focal plane; (b) enlarged view of solid line frame; (c) enlarged view of dotted line frame

通过压电陶瓷电机驱动物镜以 $0.5 \mu\text{m}$ 的步长进行物方焦前/后等距的 $100 \mu\text{m}$ 轴向扫描,获取了 201 张不同离焦状态的光斑阵列图,并绘制了所有光斑的轴向光强响应曲线。其中,一维线上(选取第 9 列)各点的轴向光强响应曲线如图 10 所示。通过图 10 可知,各点的光强峰值存在一定程度的差异,且光强峰值对应的轴向位置在可接受的误差范围内也略微不同,即各点对应着不同的参考焦面。这进

一步验证了上文所述的并行差动共焦轴向测量系统的光照不均现象对轴向光强响应曲线的影响,以及光学成像系统的场曲或载物台的轻微倾斜引起的全视场各点参考焦面的轴向偏移现象。

取全视场光斑阵列各点的轴向光强响应曲线峰值,并对无光点照明区域的光强峰值进行三维数据差值计算,绘制了全视场光强峰值分布图,如图 11 所示。

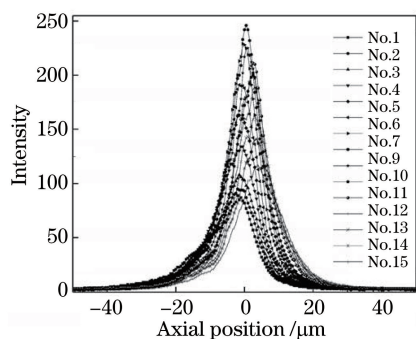


图 10 一维线上各点的轴向光强响应曲线

Fig. 10 Axial light intensity response curves of each point in one-dimensional line

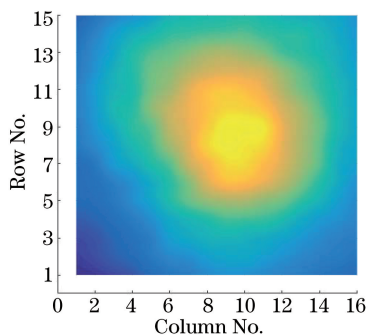


图 11 全视场光强峰值分布图

Fig. 11 Distribution diagram of light intensity peak value in global field of view

由图 11 可见,光照强度峰值呈视场中心到边缘逐渐变弱的现象。将差值所得的全视场光强峰值分布记为 $I(x, y)$ 。根据(10)式,并行差动共焦轴向测量的宽场误差修正理论公式(13)式的光照不均修正参数 $r(x, y)$ 的表达式为

$$r(x, y) = \frac{I(x, y)}{I(x, y)_{\max}}, \quad (14)$$

式中: $I(x, y)_{\max}$ 为全视场光强峰值分布 $I(x, y)$ 的

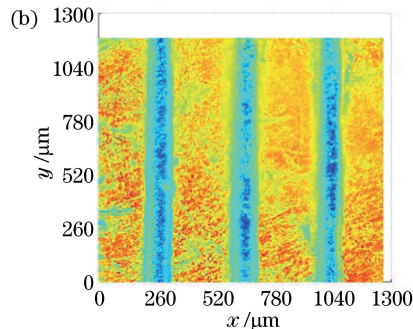
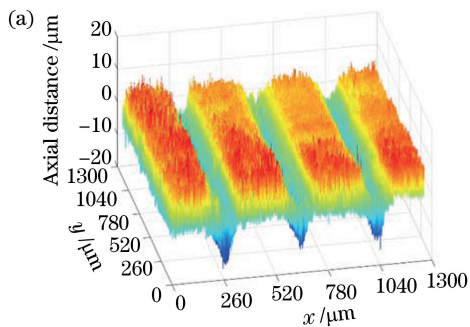


图 13 修正后硬币条纹区的还原图。(a)三维图;(b)俯视图

Fig. 13 Topography of coin stripes after correction. (a) Three-dimensional view; (b) top view

最大值。

选取第九列光斑,绘制一维线上各点的光强差动响应曲线,如图 12 所示。由图 12 虚线框局部放大图可见,各点的光强差动响应曲线的过零点沿轴向存在偏移,此偏移量即为该点的参考焦面的轴向偏移量。对无光点照明区域进行参考焦面轴向偏移量的三维数据差值计算,得到全视场各点的参考焦面轴向偏移量,其即为宽场误差修正理论公式的参考焦面轴向偏移量的修正参数 $S(x, y)$ 。

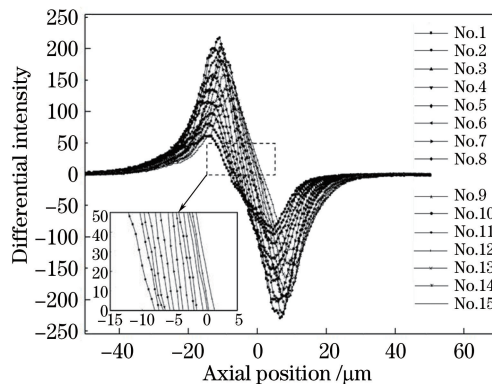


图 12 一维线上各点的光强差动响应曲线

Fig. 12 Light intensity differential response curves of each point in one-dimensional line

将标定所得的光照不均修正参数 $r(x, y)$ 和参考焦面轴向偏移量修正参数 $S(x, y)$ 代入宽场误差修正理论公式(13)式中,对并行差动共焦轴向测量方法的测量结果进行误差修正。误差修正后的一角硬币条纹区的三维形貌图如图 13 所示,对比图 7 所示的硬币条纹区的三维形貌图,可以看出,光照不均引起的凸台形貌即局部球包状隆起问题有了显著的改善。其次,几处沟槽处的高度不均问题也得到了较好的修正,修正后的测量结果更接近于实际形貌。

4 分析与讨论

4.1 修正效果分析

为验证宽场误差修正方法对并行差动共焦轴向测量方法的修正效果,采用 Motic PA53MET-BD-

3D 显微镜对一角硬币相同条纹区进行三维形貌还原,其测量的硬币条纹的三维形貌还原结果如图 14(a)所示。选取垂直于硬币条纹方向的截面位置,绘制硬币条纹截面高度信息,结果如图 14(b)所示,可以看出,硬币凸台高度平均值为 $13.42 \mu\text{m}$ 。

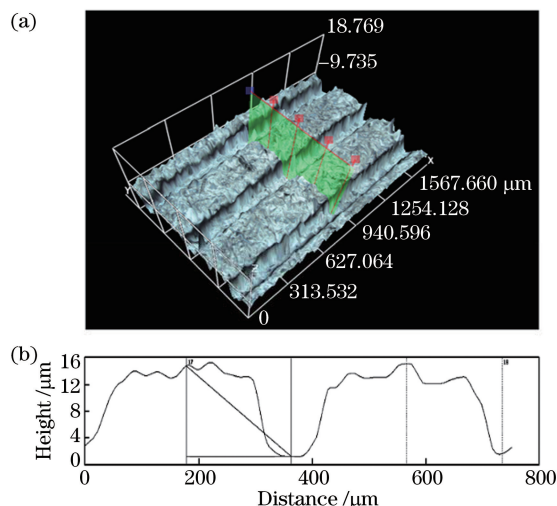


图 14 利用商用显微镜测量的硬币条纹的三维形貌。(a)硬币条纹的三维形貌还原图;(b)硬币条纹的截面高度轮廓曲线

Fig. 14 Three-dimensional topography of coin stripes measured using commercial microscope.

(a) Three-dimensional topography of coin stripes; (b) sectional height profile curve of coin stripes

采用全变分算法^[16],对修正前、后的硬币条纹三维形貌图 7(a)及图 13(a)进行图像修复,修正前、后的

三维形貌分别如图 15(a)、(b)所示。分别选取同一截面位置绘制截面高度轮廓曲线,如图 16 所示。

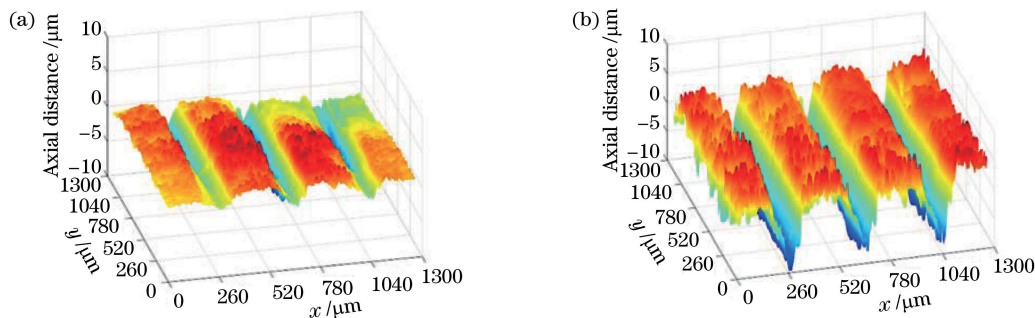


图 15 硬币条纹的三维图像修复图。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 15 Three-dimensional image inpainting figure of coin stripes. (a) Before correction; (b) after correction

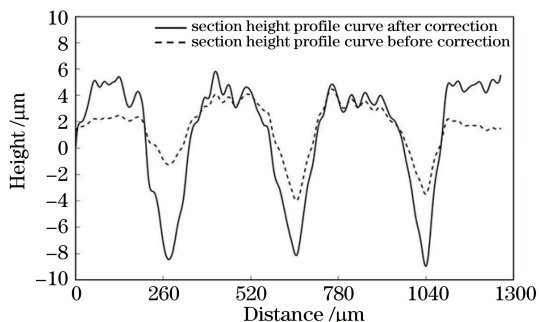


图 16 修正前/后硬币条纹的截面高度轮廓曲线

Fig. 16 Sectional height profile curves of coin stripes before and after correction

修正前的并行差动共焦轴向测量方法所测得的硬币台阶高度平均值为 $7.33 \mu\text{m}$,宽场误差修正方法所测得的硬币台阶高度平均值为 $12.55 \mu\text{m}$ 。修正后的测量结果更接近于商用显微镜的测量结果,并且该方法有效地抑制了光照不均问题和参考焦面轴向偏移问题对样本轴向测量结果的影响。

4.2 修正方法的误差分析

以下通过测量 Applied Nano 公司的 SHS 系列台阶标样 STEP-Si-5-1,对并行差动共焦轴向测量宽场误差修正方法的测量结果进行误差分析。台阶标样图片及测量区域放大图如图 17 所示,测量区域包括

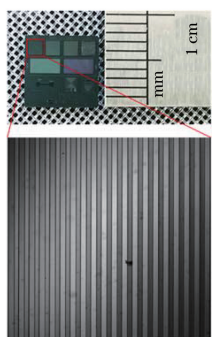


图 17 台阶标样及测量区域放大图

Fig. 17 Step standard sample and enlarged picture of measurement position

20 个台阶,周期为 $50\ \mu\text{m}$,标称高度为 $4.739\ \mu\text{m}$ 。

修正前/后的台阶标样截面高度轮廓曲线如图 18 所示。标样台阶的高度测量结果及其误差分别如表 1 和表 2 所示。修正前的标样台阶高度均方根值为 $2.550\ \mu\text{m}$,平均绝对误差为 $2.303\ \mu\text{m}$,相对

误差为 48.60% ;修正后的标样台阶高度均方根值为 $4.744\ \mu\text{m}$,平均绝对误差为 $0.089\ \mu\text{m}$,相对误差为 1.89% 。相比修正前的测量结果,通过宽场误差修正方法得到的测量结果无论是精度还是平均绝对误差都明显较好。

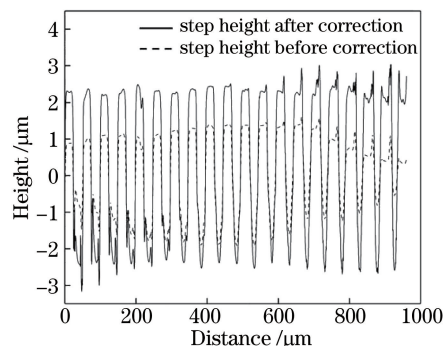


图 18 修正前/后台阶标样的截面高度轮廓曲线

Fig. 18 Sectional height profile curves of step standard sample before and after correction

表 1 修正前/后标样台阶的高度测量结果

Table 1 Height measurement results of standard sample step before and after correction

Step number	Step height after correction / μm	Step height before correction / μm	Step number	Step height after correction / μm	Step height before correction / μm
1	4.717	1.702	11	4.840	3.282
2	4.711	2.016	12	4.671	3.131
3	4.616	2.332	13	4.720	2.918
4	4.754	2.730	14	4.728	2.570
5	4.824	2.784	15	4.740	2.444
6	4.591	2.948	16	4.999	2.204
7	4.612	3.052	17	4.932	1.711
8	4.862	3.188	18	4.663	1.314
9	4.812	3.264	19	4.637	0.962
10	4.818	3.276	20	4.601	0.892

表 2 修正前/后标样台阶的高度误差分析

Table 2 Height error analysis of standard sample step before and after correction

Condition	Root mean square / μm	Mean absolute error / μm	Relative error / %
After correction	4.744	0.089	1.89
Before correction	2.550	2.303	48.60

5 结 论

针对并行共焦检测过程中系统的光照不均及光学成像系统场曲等问题导致的三维形貌测量误差,提出了一种宽场误差修正的方法。首先,基于并行差动共焦轴向测量实验平台,对一角硬币样本的条纹区进行三维形貌测量并对测量结果进行误差分析。之后,结合现有的差动共焦轴向测量理论,引入用于修正宽场光照不均的修正参数和用于修正参考焦面轴向偏移的修正参数,构建了并行差动共焦轴

向测量的宽场误差修正模型,并以点阵光源照明的方式标定了两种修正参数。最后,通过测量硬币条纹和台阶标样分别对该修正方法的修正效果和误差及精度进行分析。结果表明,宽场误差修正方法的测量结果无论是精度还是误差均优于修正前的结果。

该方法通过简单的数学模型,修正了现有的并行共焦系统中普遍存在的非均匀光照问题,并且可以修正光学系统场曲或载物台轻微倾斜等问题对轴向测量的影响,避免了繁杂的光学系统设计过程和

物理校正过程。同时,该方法也适用于现有的多种分光束并行共焦检测技术的误差校正。

参 考 文 献

- [1] Ruckstuhl T, Walser A, Verdes D, et al. Confocal reader for biochip screening and fluorescence microscopy[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 20(9): 1872-1877.
- [2] Department of Engineering and Materials Science, State Natural Science Funds Commission. Report on the development strategy of mechanical engineering: 2011-2020 [M]. Beijing: Science Press, 2010.
国家自然科学基金委员会工程与材料学部. 机械工程学科发展战略报告: 2011~2020[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] He B F, Ding S Y, Wei C E, et al. Review of measurement methods for areal surface roughness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 78-93.
何宝凤, 丁思源, 魏翠娥, 等. 三维表面粗糙度测量方法综述[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 78-93.
- [4] Tu L, Yu J, Fan Z W, et al. Parallel confocal microscopic detection technique and its research progress [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080006.
涂龙, 余锦, 樊仲维, 等. 并行共焦显微检测技术及其研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080006.
- [5] Yu Q, Yu X F, Cui C C, et al. Survey of parallel light parallel confocal source technology in measurement[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 652-659.
余卿, 余晓芬, 崔长彩, 等. 并行共焦测量中的并行光源技术综述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 652-659.
- [6] Zhu Q, Yang X B, Li S M, et al. Spot array optimization of parallel confocal imaging based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0118001.
朱茜, 杨西斌, 李思颀, 等. 基于数字微镜器件并行共焦成像的光点阵列优化[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0118001.
- [7] Hillenbrand M, Weiss R, Endrody C, et al. Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [8] Wang F S, Tan J B, Zhao W Q. Optical probe using differential confocal technique for surface profile [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4222: 194-197.
- [9] Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R. Tri-heterodyne confocal microscope with axial superresolution and higher SNR [J]. *Optics Express*, 2004, 12(21): 5191-5197.
- [10] 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.
- [11] Liu Z 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.
刘志群, 易定容, 孔令华, 等. 基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1449-1457.
- [12] Yi D R, Liu Z Q, Kong L H, et al. A parallel differential confocal method for highly precise surface height measurements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(7): 375-378.
- [13] Liu Z Q, Yi D R, Kong L H, et al. Research on the structured light illumination parallel object-side differential rapid measurement method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(12): 2987-2993.
刘志群, 易定容, 孔令华, 等. 结构光照明并行物方差动快速测量方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(12): 2987-2993.
- [14] Zhu X X, Yi D R, Ye Y Q, et al. High-precision three-dimensional shape measurement based on anti-interference parallel object-side differential axial [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0412001.
朱星星, 易定容, 叶一青, 等. 抗干扰并行物方差动轴向的高精度三维形貌测量 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0412001.
- [15] Liu L, Deng X Q, Wang G Y, et al. Phase-only optical pupil filter for improving axial resolution in confocal microscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(1): 48-51.
刘力, 邓小强, 王桂英, 等. 改善共焦系统轴向分辨率的位相型光瞳滤波器 [J]. *物理学报*, 2001, 50(1): 48-51.
- [16] Qiu L R, Wang L, Liu D L, et al. Image inpainting for the differential confocal microscope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9446: 94463D.