

文章编号 1004-924X(2017)06-1449-09

基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量

刘志群^{1,2}, 易定容^{1*}, 孔令华³, 张勇贞¹, 刘婷¹, 王梓¹

(1. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 闽江学院物理学与电子信息工程系, 福建 福州 350108;

3. 福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 差动共聚焦显微成像技术可以获得很高的轴向测量精度, 然而已有的差动共聚焦测量技术主要适用于激光扫描共聚焦, 还不能满足微纳加工过程中对工件进行非接触式的在线、在位测量的要求。本文在分析差动共聚焦显微成像系统能够实现轴向测量原理的基础上, 提出了适用于并行共聚焦技术的轴向测量方法。该方法利用均匀白光照明, 在像方只需要使用一台相机做探测器, 在物方通过移动载物台分别对样品在焦前和焦后两次成像, 根据预先刻度好的差动曲线就可以得出物体表面的高度。理论模拟与实验结果均表明, 该方法可以实现高精度的轴向测量, 对 500 nm 的台阶样品测量的平均误差为 2.9 nm, 相对误差为 0.58%。该方法简单、廉价、测量精度高, 可以用于普通显微镜, 易于实现样品的三维快速形貌还原与测量。

关键词: 三维形貌测量; 物方差动共焦; 并行轴向测量; 非接触式; 数字微镜器件

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1449

Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy

LIU Zhi-qun^{1,2}, YI Ding-rong^{1*}, KONG Ling-hua³,
ZHANG Yong-zhen¹, LIU Ting¹, WANG Zi¹

(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)

* Corresponding author, E-mail: yidr@hqu.edu.cn

Abstract: The differential confocal microscopic imaging technology can obtain high axial measurement accuracy. However, existing differential confocal microscopic imaging techniques mainly employed to laser scanning confocal microscopy can not satisfy requirements of non-contact online and on-site measurement for workpieces during micro-nano machining processes. Axial measurement methods that were applicable to parallel confocal technology were proposed based on the analysis that differential confocal microscopic imaging system could realize axial measurement principle. In the method, a uniform white light illumination was used. The image space only needed a camera as detector, and the

收稿日期: 2016-07-20; **修订日期:** 2016-09-08.

基金项目: 国家科技支撑计划一级子课题资助项目 (No. 2012BAI23B04); 福建省中青年骨干教师教育科研项目 (No. JAT160394); 华侨大学高层次人才引进人才科研启动资金资助项目 (No. Z14Y0064)

object space made twice imaging of samples before and after the focal point by moving the objective table, then the height of the object surface could be obtained according to the scaled differential curve in advance. Both the theoretical simulation and experimental results are indicated that the method can realize axial measurement with high accuracy. For the measurement of step samples with 500 nm, the average error is 2.9 nm and the relative error is 0.58%. The method is simple and low-cost with high measurement accuracy, thus can be used for general microscope and be easy to realize rapid restoration and measurement of three-dimensional images for samples.

Key words: 3D topography measurement; object-side based differential confocal method; parallel axial measurement; non-contact; Digital Micro-mirror Device(DMD)

1 引言

随着超精密加工技术的发展,复杂形面的在线、在位三维测量要求不断提高,既要有较高的测量精度,又要有较快的测量速度^[1]。目前,三维形貌测量方法有接触式和非接触式两种。其中,接触式测量方法存在测量时间长、结构复杂,测头半径需补偿,不能测量软质材料等局限。非接触式测量一般采用光学技术实现。与接触式测量方法相比,非接触式测量方法不需要接触被测工件表面,不会造成表面的永久性破坏,且具有测量速度快、精度高、分辨率高和测量范围大等优点,因此应用越来越广泛^[2-4]。非接触式测量主要有光强法、基于偏振光干涉聚焦法、显微干涉法、白光干涉法和共焦显微测量方法等。其中,共焦显微测量法因具有高精度、高分辨率和独特的轴向层析成像能力,而广泛应用于微纳检测、精密测量等领域^[5-6]。

近年来,非接触式测量的相关研究大多以提高测量速度或测量精度为目的。在速度提高方面,人们使用数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)作为空间光调制器,再结合图像处理算法实现快速测量。西安光学精密机械研究所姚保利等研制了基于 DMD 的超分辨率和光学荧光切片显微镜,该显微镜采用 DMD 的一维(x 方向)相位调制,达到了超高的横向分辨率(约 90 nm),轴向层切直径为 100 μm 的谷物花粉颗粒 303 层,耗时 58 s^[7]。华侨大学余卿等人研究了基于 DMD 的并行共焦测量方法,利用硬币作为被测量对象,达到了 11.9 μm 的轴向分辨率^[8]。

台北科技大学陈亮嘉等利用 DMD 调制白光光源进行微纳表面测量,其轴向分辨率可以达到 0.1 μm ^[9-10]。

在轴向精度提高方面,研究人员使用双摄像头构成差动共聚焦显微测量系统。哈尔滨工业大学谭久彬等人研究的改进型超高信噪比和抗干扰的激光扫描差动共聚焦显微镜,其轴向分辨率可达 1 nm^[11]。北京理工大学赵维谦等设计的高分辨率和长工作距离的双轴激光扫描差动共聚焦显微镜,在测量盖玻片厚度时的测量误差小于 0.5%^[12]。上述两类非接触式测量方法均采用利用激光扫描方式,除测量速度较慢外,不是测量精度无法满足加工要求,就是测量光路系统复杂,光轴对中难度大。

本文提出了一种基于并行共聚焦显微系统的物方差动快速轴向测量方法。该方法利用均匀白光照明,测量前刻度系统测量差动曲线,测量时只需获取焦前和焦后两幅图像即可完成快速轴向测量,易于满足在线或在位测量的要求。

2 物方差动测量原理分析

2.1 测量原理

物方差动测量系统如图 1 所示。点光源产生的白光经过扩束、均匀后进入测量成像光路,照射到放置在载物台上的样本,样本的反射光进入摄像头成像。刻度测量时,将平面反射镜放置在载物台上,将载物台调整到焦前 u_F (实验设定参数)处,使用压电陶瓷电机驱动物镜做轴向扫描的同时获取系列图像,模拟不同高度物品在固定离焦量 u_F 时图像灰度随物体高度的变化。之后将载

物台移动到焦后 u_B (与 u_F 大小相等),使用压电陶瓷电机驱动物镜做类似轴向运动的同时获取系列图像,模拟不同高度物体在离焦量 u_B 时图像灰度随物体高度的变化。通过对摄像头获取的图像进行相减处理,完成测量曲线的刻度(参见式(14)及图 4)。该测量曲线是待测物体分别在焦前焦后所获得的图像灰度差值 I_T 随着物体高度 u 的变化曲线。获得刻度曲线后,把待测量样品放置在载物台上,再将载物台分别移到焦前 u_F 和焦后 u_B 处,获取两幅图像并做相减处理,根据差值 I_T 和刻度曲线,即可得到样品的轴向高度 u 。

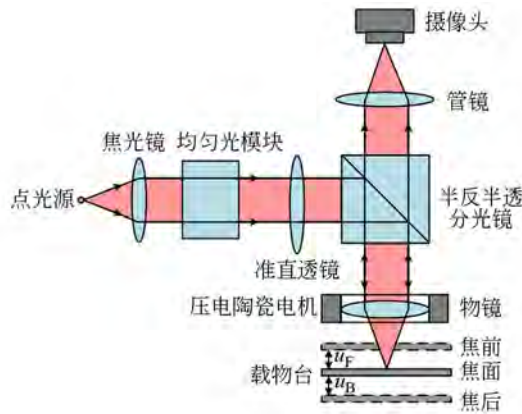


图 1 物方差动测量系统原理图

Fig. 1 Principle of object-side based differential measurement system

2.2 理论分析

由点照明和点探测构成的反射式显微成像示意图如图 2 所示,成像符合完全相干成像条件^[13]。在图中建立三维坐标系,光源空间为 $S(x_0, y_0, z_0)$,物空间为 $O(x_1, y_1, z_1)$,探测器空间为 $D(x_2, y_2, z_2)$,其矢量表示为 r_i ,其中 $i=0, 1, 2$ 。

根据三维完全相干成像理论,近光轴和线性成像条件下^[13],光源照射到物体上的光场分布为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} s(r_0) h_1(r_1 - Mr_0) dr_0. \quad (1)$$

经过物体反射后进入探测器空间的光场分布为:

$$U(r_2, r_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(r_0) h_1(r_1 - Mr_0) h_2(Mr_2 - r_1) o(r_s - r_1) dr_0 dr_1, \quad (2)$$

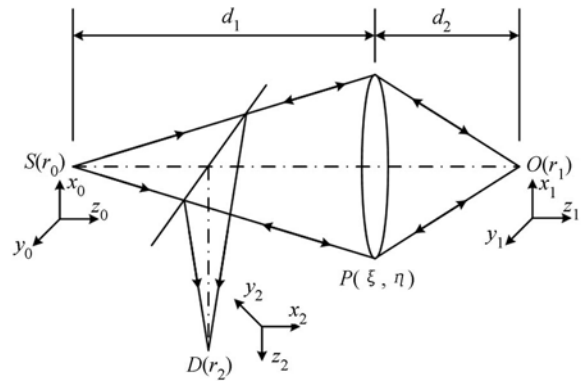


图 2 反射式显微镜成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflective microscopy

其中: h_1 为物镜的点扩散函数, h_2 为集光透镜的点扩散函数(该测量系统中物镜和集光透镜为同一个透镜), s 为光源的振幅, o 为物体的振幅反射率函数, $r_s(x_s, y_s, z_s)$ 为物体被扫描到的位置坐标, M 为透镜放大因子的对角矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} -M & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 \\ 0 & 0 & M^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中矩阵内参数 M 为透镜的放大因子, $M = d_2 / d_1$, 且 $d_1 > d_2$ 。

假设光源为理想点光源,有 $s(r_0) = \delta(r_0)$, 则式(1)为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} s(r_0) h_1(r_1 - Mr_0) dr_0 = h_1(r_1). \quad (4)$$

式(2)变为:

$$U(r_2, r_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(r_1) h_2(Mr_2 - r_1) o(r_s - r_1) dr_1. \quad (5)$$

假设探测器的灵敏度分布函数为 $D(r_2)$, 则探测器端的光场强度为:

$$I(r_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(r_1) h_2(Mr_2 - r_1) o(r_s - r_1) dr_1 \right|^2 \cdot D(r_2) dr_2. \quad (6)$$

分别建立物方位置和探测器端的归一化坐标 $v(v_x, v_y, u)$ 和 $v(v_{Dx}, v_{Dy}, u_D)$, 其中 u 和 u_D 分别为物方和探测器端的轴向归一化坐标, (v_x, v_y) 和 (v_{Dx}, v_{Dy}) 分别为物方和探测器端的径向归一化坐标。当被测物体为理想的平面反射镜时,光轴上的光场强度为:

$$I(u, u_D) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(v_x, v_y, u) h_2(v_{Dx} - v_x, v_{Dy} - v_y, u_D) dv_x dv_y \right|^2 D(v_{Dx}, v_{Dy}) dv_{Dx} dv_{Dy}. \quad (7)$$

假设探测器为点探测器,且没有径向偏移和轴向位移(即 $v_D=0$),此条件下式(7)变为:

$$I(u) = |h_1(v_x, v_y, u) h_2(v_x, v_y, u)|^2. \quad (8)$$

由于物镜和集光透镜为同一个透镜,因此物空间和像空间具有相同的光瞳函数 $P(\xi, \eta)$ 。假设孔径归一化后的圆形透镜的半径坐标为 $\rho = (\xi^2 + \eta^2)^{1/2}$,其光瞳函数为:

$$P(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, \rho \leq 1 \\ 0, \text{其它} \end{cases}. \quad (9)$$

令物方径向坐标 $v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$,则有:

$$h_1(v, u) = h_2(v, u) = h(v, u) = \int_0^1 P(\rho) e^{j u \rho^2} J_0(v \rho) \rho d\rho, \quad (10)$$

其中 $J_0(v\rho)$ 为零阶贝塞尔函数。在透镜的半径范围内($\rho \leq 1$),有 $P(\rho) = 1$;对于光轴上的点,即 $v=0$,有 $J_0(v\rho) = 1$,则式(10)变为:

$$\begin{aligned} h(v, u) &= \int_0^1 P(\rho) e^{j u \rho^2} J_0(v \rho) \rho d\rho = \\ &= \int_0^1 e^{j u \rho^2} \rho d\rho = \frac{1}{j u} (e^{j u} - 1) = \\ &= \frac{1}{j u} e^{j \frac{u}{2}} (e^{j \frac{u}{2}} - e^{-j \frac{u}{2}}). \end{aligned} \quad (11)$$

根据欧拉公式,式(11)变为:

$$\begin{aligned} h(v, u) &= \frac{1}{j u} (\cos \frac{u}{2} + j \sin \frac{u}{2}) 2j \sin \frac{u}{2} = \\ &= \frac{2}{u} (\cos \frac{u}{2} + j \sin \frac{u}{2}) \sin \frac{u}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

在满足以上条件的前提下,由式(8)得点探测器端光强 $I(u)$ 与物方轴向离焦量 u 之间的函数关系为:

$$\begin{aligned} I(u) &= |h_1(v_x, v_y, u) h_2(v_x, v_y, u)|^2 = \\ &= |h_1(v, u) h_2(v, u)|^2 = |h^2(v, u)|^2 = \\ &= \left| \frac{\sin \frac{u}{2}}{(\frac{u}{2})^2} (\cos \frac{u}{2} + j \sin \frac{u}{2}) \right|^2 = \\ &= \left[\sqrt{\left(\frac{\sin \frac{u}{2}}{\frac{u}{2}} \right)^2} \right]^2 = \left[\frac{\sin \frac{u}{2}}{\frac{u}{2}} \right]^2. \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(13)得到的光强 $I(u)$ 与物方轴向离

焦量 u 之间的关系曲线,如图 3 所示。

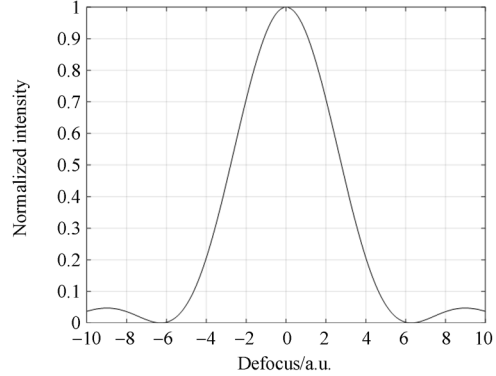


图 3 光强与样本轴向离焦量间的关系曲线

Fig. 3 Relation curve between light intensity and defocus

在样本测量前,先通过高精度载物台和压电陶瓷电机驱动的物镜配合对轴向测量曲线进行刻度。具体步骤如下:

(1)移动载物台到焦前 u_f 处,压电陶瓷电机驱动物镜做轴向扫描,得到焦前轴向光强与离焦量的轴向特性曲线 I_F ;

(2)移动载物台到焦后 u_f 处,压电陶瓷电机驱动物镜做轴向扫描,得到焦后轴向光强与离焦量的轴向特性曲线 I_B ;

(3)将 $I_F - I_B$,即得到轴向测量曲线 I_T ,即有:

$$I_T = I_F - I_B = \left[\frac{\sin \frac{u+u_f}{2}}{\frac{u+u_f}{2}} \right]^2 - \left[\frac{\sin \frac{u-u_f}{2}}{\frac{u-u_f}{2}} \right]^2. \quad (14)$$

取 $u_f = 3$,得到 I_F, I_B 和 I_T 曲线如图 4 所示。

由图 4 可得,当 $u_f = 3$ 时,取式(14) I_T 曲线(焦前-焦后)中的线性区间 $[-2, 2]$ 作为测量区段,在该区间内,归一化光强 $I_T(u)$ 和无量纲离焦量 u 之间的函数关系表达式为:

$$I_T(u) = -0.526900u. \quad (15)$$

用该曲线实现轴向测量的步骤如下:

(1)完成样品对焦后,移动载物台到焦前 u_f 处,获取图像,并取图像中任一点 $P(x, y)$ 的光强值 I_F ;

(2)移动载物台到焦后 u_f 处,获取图像,再取图像中该点 $P(x, y)$ 的光强值 I_B ;

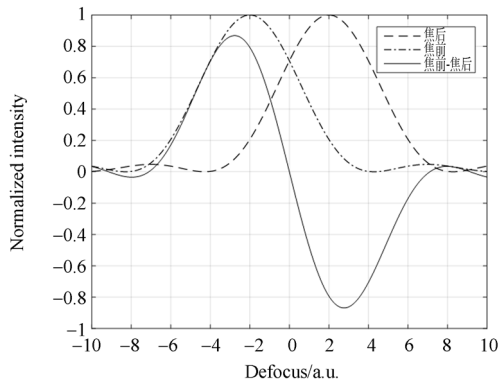


图 4 轴向测量曲线仿真图

Fig. 4 Simulated axial measurement curves

(3)取 $I_F - I_B$, 得到 I_T ;

(4)根据式(15), 求出点 $P(x, y)$ 离焦面的距离 u , 即可得到样品上每一点到焦面的距离。

在测量过程中, u_F 的取值会将影响测量曲线 I_T 的斜率, 即影响轴向测量范围和灵敏度。不同 u_F 值对应的轴向测量曲线如图 5 所示, 由图可见, 在相同的轴向测量范围内, 当 $u_F = 3$ 时, 测量曲线的灵敏度最好。

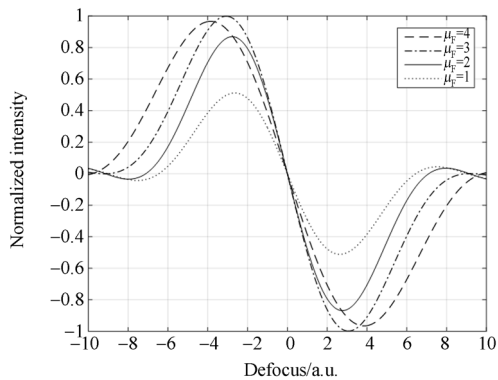


图 5 不同 u_F 对应的轴向测量曲线

Fig. 5 Axial measurement curves with different u_F

3 测量系统刻度

3.1 系统组成

物方差动并行共聚焦显微测量方法的测量曲线刻度及测量实验是在基于 DMD 的共聚焦显微镜上完成的^[14]。共聚焦显微测量系统如图 6 所示, 本系统包括汞灯光源、均匀光模块、Motic BA410 显微镜平台、DMD 及控制器、压电陶瓷电机、高精度载物台和 sCMOS 摄像头。



图 6 基于 DMD 的共聚焦显微测量系统

Fig. 6 Confocal microscopy measurement system based on DMD

3.2 测量系统刻度方法

选用 $20\times/0.75$ 的物镜, 将镀铝膜的平面反射镜作为样本放置于载物台上, 设置 DMD 照明模式, 调整载物台使平面镜位于焦面上。将载物台移到焦前 $u_F = 6 \mu\text{m}$ 的位置, 如图 7 所示。

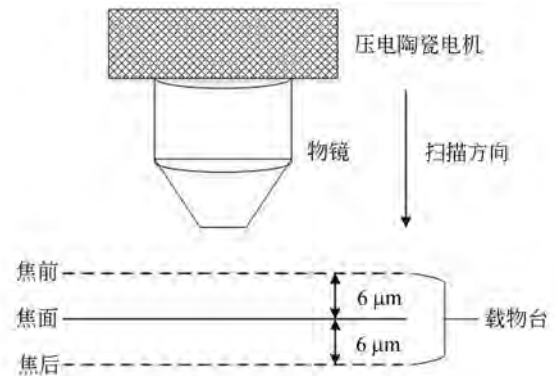


图 7 测量系统刻度原理图

Fig. 7 Illustration for measurement curve calibration using a PI motor and a XYZ-stage

固定载物台位置, 驱动装有物镜的压电陶瓷电机进行轴向扫描, 扫描模式设置如下: 起始位置在 $0.000\ 076\ \text{mm}$, 步进为 $100\ \text{nm}$, 扫描范围为 $40\ \mu\text{m}$, 扫描方向如图 7 中箭头方向所示。得到载物台在焦前 u_F (取 $6\ \mu\text{m}$) 位置的 400 幅扫描图像, 取每一幅图像的最大灰度值, 得出光强随离焦量的变化关系, 即得到焦前轴向特性曲线 I_F 。本实验采用压电陶瓷电机, 也可以使用常规的步进电机。将载物台移到焦后 $u_F = 6\ \mu\text{m}$ 的位置, 扫描方式与焦前相同, 得到焦后轴向特性曲线 I_B 。将 $I_F - I_B$,

得到并行共聚焦显微镜实现物方差动测量的轴向测量曲线 I_T 。实验测得的 I_F , I_B 和 I_T 曲线如图 8 所示。

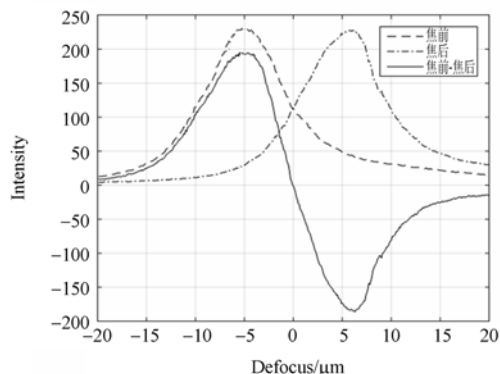


图 8 轴向测量刻度曲线图

Fig. 8 Calibration curve of axial measurement

测量曲线刻度条件如下: $20\times/0.75$ 物镜, 镀膜平面反射镜样本, DMD 设置单点照明模式, DMD 单个微镜尺寸为 $13.68\ \mu\text{m}\times 13.68\ \mu\text{m}$, $u_F=6\ \mu\text{m}$, 滨松 C11440-22CU 数字 sCMOS 相机, 像元尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}\times 6.5\ \mu\text{m}$, 曝光时间为 $0.2\ \text{ms}$ 。

根据图 8 中的刻度曲线(焦前-焦后曲线), 在 $[-5\ \mu\text{m}, 5\ \mu\text{m}]$ 的线性区间内, 光强 $I_T(u)$ 与离焦量 u 之间的关系如表 1 所示。

表 1 光强 $I_T(u)$ 与离焦量 u 数值对应表

Tab. 1 Numerical correspondence of light intensity $I_T(u)$ to defocus u

光强 $I_T(u)$	离焦量 $u/\mu\text{m}$
192	-4
163	-3
110	-2
59	-1
-1	0
-44	1
-85	2
-126	3
-152	4

将表 1 中的数据进行归一化处理, 消除因被测样品表面反射率不同造成的影响, 并将其拟合为一次函数, 其表达式为:

$$I_T(u) = -0.480\ 000u + 0.067\ 836. \quad (16)$$

表达式(15)与表达式(16)在同一坐标系内的

曲线如图 9 所示。由图可见, 在测量曲线的后半段, 即对焦后位置的测量存在一定偏差, 两条曲线的相关系数为 0.999 4。

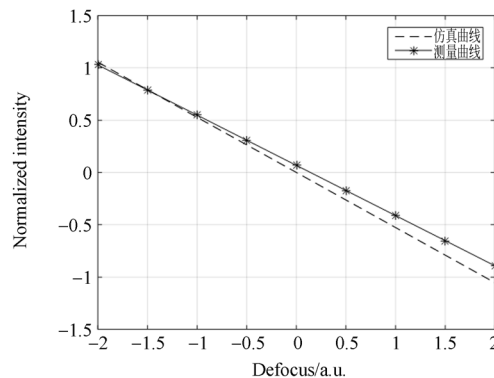


图 9 仿真和刻度的轴向测量曲线对比图

Fig. 9 Comparison between simulated and calibrated axial measurement curves

4 测量实验与结果

为了检验物方差动并行共聚焦显微测量方法的测量精度, 以 Budget Sensors 的 HS-MG500 校准量块为样品, 测量点选择 HS-MG500 校准量块中一个宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 、高度差为 $500\ \text{nm}$ 的台阶顶面, 该顶面尺寸为 $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$, 测量位置如图 10 中黑色框内的标注。

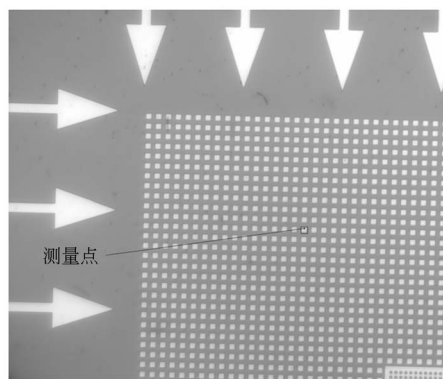


图 10 HS-MG500 校准量块测量图

Fig. 10 Schematic diagram of HS-MG500 calibration gauge

选择与刻度测量曲线一致的实验方法, 将 HS-MG500 校准量块放置于载物台上, 设置 DMD 的照明针孔为 1 个数字微镜单元, 以台阶底面作为测量基准面, 聚焦完成后, 在焦前 $6\ \mu\text{m}$ 和焦后 $6\ \mu\text{m}$ 处分别获取两幅图像。由于测量系统

中 1 个数字微镜单元($13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$)成像时对应 2×2 个摄像头像素($6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$)^[14],因此,在 DMD 单点照明模式下获取的图像中对应 4 个像素,选择焦前图像中的一个像素单元,其坐标值为(1157,918)。当载物台移动到焦后以及重复该项测量实验时,其坐标值出现了错位,这是由载物台的轴向移动重复精度误差引起的。对测量图像中所取的观测点(1157,918)进行 4 次实验,得到其焦前和焦后坐标如表 2 所示。

表 2 测量点焦前和焦后坐标值

Tab. 2 Coordinate values of measuring point with defocus of $6 \mu\text{m}$

焦前 $6 \mu\text{m}$ 坐标	焦后 $6 \mu\text{m}$ 坐标
(1157,918)	(1157,920)
(1158,918)	(1157,921)
(1158,918)	(1158,921)
(1158,918)	(1158,922)

注:表中坐标值为滨松 C11440-22CU 数字 sCMOS 相机获取的 2048×2048 图像中的坐标位置。

由于该实验是基于 DMD 单点照明模式的轴向测量,可对被测量点像素的偏离进行修正。由表 2 可得,像素点的偏离范围为 4×4 个像素,而 1 个数字微镜单元又对应 2×2 个摄像头像素,因此本文将 10×10 个像素作为一个图像分割区域,取该区域内的最大灰度值,将其归一化后的数值带入式(16),即可得到被测台阶面的高度。测量实验使用 $20 \times$ 物镜,则 10 个像素对应到物空间后的实际尺寸为 $3.25 \mu\text{m}$,小于两个台阶面之间的距离 $5 \mu\text{m}$,确保一次测量中焦前与焦后的区域位于一个台阶面上。对图 10 中的被测位置进行 4 次测量,修正后的测量结果如表 3 所示,测量得到被测台阶面的平均高度值为 497.1 nm ,测量平均误差为 2.9 nm ,相对误差为 0.58% 。

表 3 $P(x_0, y_0)$ 点修正后的测量结果

Tab. 3 Measurement results of $P(x_0, y_0)$ after correction

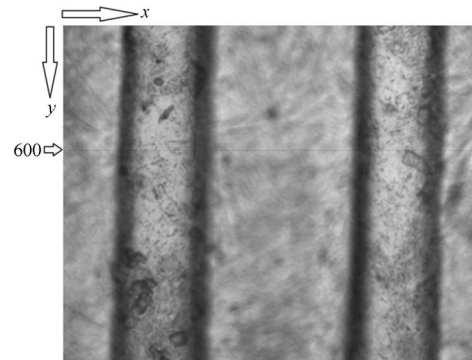
测量次数	测量值/nm
第一次测量	498.6
第二次测量	495.3
第三次测量	496.8
第四次测量	497.7

为了检验在线、在位测量的效果,将一枚硬币放置于载物台上,测量位置如图 11(a)中黑色框标注,以沟槽底面作为测量基准面,聚焦完成后,分别在焦前 $6 \mu\text{m}$ 和焦后 $6 \mu\text{m}$ 处获取两幅图像,如图 11(b)和 11(c)所示。图像沿 y 方向取 600 像素行,利用物方差动测量方法测得轴向高度沿 x 方向的变化如图 11(d)所示。



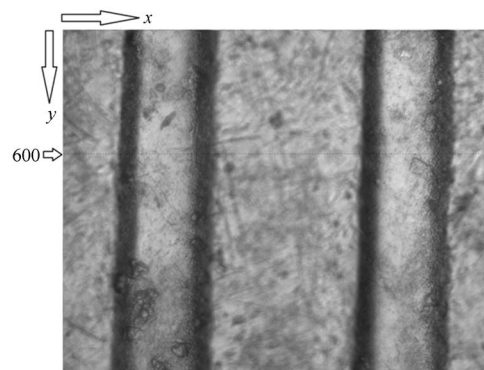
(a) 硬币及测量位置

(a) Coin and measuring position



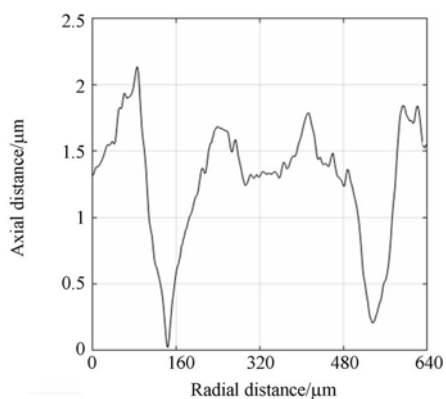
(b) 焦前 $6 \mu\text{m}$

(b) Image captured at $6 \mu\text{m}$ in front of focal plane



(c) 焦后 $6 \mu\text{m}$

(c) Image captured at $6 \mu\text{m}$ behind focal plane



(d) 采样位置高度测量曲线

(d) Measured height profile of coin at horizontal line position shown in (b) and (c)

图 11 硬币测量结果

Fig. 11 Results for coin measurement

5 结 论

本文在分析激光扫描差动共焦测量技术获得高轴向测量精度的基础之上,提出物方差动并行轴向测量方法。首先对该方法进行了模拟仿真,

借助基于 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 500 nm 的方形柱面高度进行了测量,测量平均值为 497.1 nm,绝对误差平均值为 2.9 nm,相对误差为 0.58%。理论模拟与实验结果均表明该方法可以实现高精度的轴向测量。在理论分析和实验校验的基础上,以硬币作为样品,将照明方式调制为并行方式,即可快速得到样品的在线、在位测量结果。

测量系统轴向 Z 与横向 XY 方向不严格垂直这一问题可以通过简单的刚性矩阵变换消除。在获取焦前和焦后两幅图像,取焦前图像中任一点 $P(x, y)$ 和焦后图像中对应点 $P'(x, y)$,建立仿射变换矩阵,修正由载物台的轴向重复精度误差引起的测量点横向偏移问题,可以得到每一点修正后的横向位置。

物方差动并行测量方法也适用于普通显微成像系统,即对普通显微镜做少量改动,也可实现轴向快速、高精度测量。因此,该测量方法为基于显微镜的三维快速、高精度测量提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学学科发展战略报告(2011~2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Department of Engineering and Materials Science, NNSFC. Report on the Development Strategy of Mechanical Engineering (2011~2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 吴兆喜, 黄元庆. 基于光学原理的三维形貌测量技术研究[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 654-658.
WU ZH X, HUANG Y Q. Study on optical methods for 3-D shape measurement[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 654-658. (in Chinese)
- [3] 胡小唐, 傅星, 刘庆纲, 等. 微纳检测技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2009.
HU X T, FU X, LIU Q G, *et al.*. *Micro-Nano Detection Technology* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2009. (in Chinese)
- [4] 崔长彩, 余卿, 张遂, 等. 金刚石砂轮表面形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3167-3174.
CUI CH C, YU Q, ZHANG A, *et al.*. Measure-
- ment system of surface topography for diamond grinding wheel[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3167-3174. (in Chinese)
- [5] 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.
TU L, YU J, FAN ZH W, *et al.*. Parallel confocal microscopic detection technique and its research progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080006. (in Chinese)
- [6] 邱丽荣, 李佳, 赵维谦, 等. 激光共焦透镜曲率半径测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 246-252.
QIU L R, LI J, ZHAO W Q, *et al.*. Laser confocal measurement system for curvature radii of lenses [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 246-252. (in Chinese)
- [7] DAN D, LEI M, YAO B L, *et al.*. DMD-based LED-illumination super-resolution and optical sectioning microscopy[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1116.
- [8] 余卿, 叶瑞芳, 范伟. 基于数字微镜器件实现共焦测量的结构光参数[J]. 光学精密工程, 2015, 23

- (5): 1272-1278.
- YU Q, YE R F, FAN W. Parameters of structured lights of DMD used in confocal measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1272-1278. (in Chinese)
- [9] CHEN L C, KAO W J. Development of white light confocal microscopy with innovative fringe projection for full-field micro surface profilometry [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics, IEEE*, 2005: 301-306.
- [10] CHEN L C, KAO W C, HUANG Y T. Automatic full-field 3-D profilometry using white light confocal microscopy with DMD-based fringe projection [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 505-507: 361-366.
- [11] 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.
- [12] ZHAO W Q, JIANG 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.
- [13] GU M. *Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes* [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1996.
- [14] YI D R, LIN S H, HUANG S M, *et al.*. Progress report towards a digital mirror device based confocal microscopic system [J]. *SPIE*, 2013, 9046: 90460K.

作者简介:



刘志群(1980—),男,山东昌乐人,博士研究生,2011年于福州大学获得硕士学位,主要从事共聚焦显微成像理论与技术的研究。E-mail: lzq-323@qq.com

导师简介:



易定容(1969—),女,重庆合川人,教授,博士生导师,1990年于国防科学技术大学获得学士学位,1998年、2002年于加拿大麦吉尔大学分别获得硕士、博士学位,主要从事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、计算机视觉检测及仪器、医疗成像技术及仪器、光学病理检测(含活体)等方面的研究。E-mail: yidr@hqu.edu.cn