

文章编号 1004-924X(2015)05-1272-07

基于数字微镜器件实现共焦测量的结构光参数

余 卿^{1,2*}, 叶瑞芳¹, 范 伟¹

- (1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 上海理工大学 光学工程博士后流动站, 上海 200093)

摘要:虽然采用并行共焦测量提升了共焦测量速度,但系统中的传统光分束器件参数固化后难以适应不同的被测对象。本文利用数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)可产生柔性化结构光的特点,将其作为光分束器件引入共焦测量装置以提升系统对被测对象的适应性。理论分析了 DMD 的空间调制方法,搭建了 DMD 的共焦测量装置,研究了 DMD 结构光参数对共焦测量轴向分辨率、横向分辨率以及图像对比度等指标的影响。实验表明,在光学系统参数匹配的条件下,结构光光点参数越小,测量分辨率越高。同时,利用 DMD 进行柔性化照明,改善了因光点参数小造成的图像对比度下降的问题。得到的结果为研究基于 DMD 的跨尺度测量方法提供了研究基础。

关键词:共焦测量;分光器件;数字微镜器件;结构光;柔性化照明

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1272

Parameters of structured lights of DMD used in confocal measurement

YU Qing^{1,2*}, YE Rui-fang¹, FAN Wei¹

- (1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
 2. Postdoctoral Research Station of Optical Engineering, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China)
- * Corresponding author, E-mail: jorson_y@163.com

Abstract: Parallel confocal measurement improves confocal measuring efficiency. However, the parameters of traditional optical divided devices (ODD) are fixed, which are not be suitable for different specimens. As the Digital Micromirror Device (DMD) is a flexible ODD and could produce different types of structured lights, this paper induces the DMDS into the confocal measurement system to improve the suitability of parallel confocal measurement devices. A modulation model of structured light produced by the DMD was analyzed, a confocal measurement device was constructed, and the effects of parameters of structured light from the DMD on the axial resolution, transverse resolution and the image contrast of measuring device were researched. The experiment results indicate that when the optical parameters are matched, the smaller the size of structured light is, the higher the measuring resolution is. Moreover, the DMD also could be applied as a flexible illuminator

收稿日期:2015-02-02;修订日期:2015-03-17.

基金项目:福建省自然科学基金青年创新基金资助项目(No. 2013J05078);华侨大学高层次人才科研启动基金资助项目(No. 12BS109)

to improve the image contrast caused by a smaller structured light size. All of these researches provide a strong support for multi-scale measurement based on DMDs.

Key words: confocal measurement; optical divided device; Digital Micromirror Device (DMD); structured light; flexible illumination

1 引言

随着科技的发展,特别是测量技术的进步,光学方法被广泛用于表面形貌测量。与传统的光学显微测量方法相比,共焦法拥有较高的图像对比度,由于轴向分辨率提高了1.4倍,因而近几年被广泛用于生物医药、工程材料等领域^[1-2]。

目前,提高测量精度和测量效率是共焦测量方法的两个主要发展方向。北京理工大学赵维谦等人利用差动方法进行共焦技术的超分辨研究,所设计的光瞳式差动共焦传感器的横向分辨率优于 $0.2\ \mu\text{m}$,轴向分辨率优于 $2\ \text{nm}$ ^[3-4]。在提高测量效率的研究上,专家学者普遍采用在共焦测量装置中引入光分束器件,将单点测量变成并行测量的方式来提高测量速度。英国帝国理工学院的Grant等研制了基于Nipkow转盘的共焦系统,提高了光束传输效率^[5]。中国计量学院的Shi等利用光纤束代替CCD,成功研制了多光纤并行共焦显微镜,大大提高了信噪比^[6]。涂龙等在 $1\ \text{cm}^2$ 的铜箔制备了 100×100 的小孔阵列,对镀膜平板和螺钉进行了三维测量,轴向分辨率达到 $1\ \mu\text{m}$,横向分辨率达到 $20\ \mu\text{m}$ ^[7]。合肥工业大学的王永红等研究了微透镜阵列的全场并行共焦探测技术,有效解决了测量分辨率和测量速度之间的矛盾^[8]。南昌大学的袁冠伟将光纤束和微透镜阵列相结合,设计了耦合透镜等光学元件,并对设计结果进行了像质评价分析^[9]。上述方法均在一定程度上提高共焦方法的测量效率,但都受限于所用的光分束器件的硬件参数,并且对被测对象有较严格的要求。

本文利用数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)作为光分束器件,分析了DMD结构光的控制方法,构建了基于DMD的并行共焦测量装置。分析了DMD柔性化结构光参数与并行共焦测量相关指标的关系,并利用DMD进行区域化照明,研究了这种柔性化照明方式对各测量指标的提升效果。

2 DMD 结构光调制模型

DMD是TI公司于1987年发明的一种数字光学器件。它由 $10.8\ \mu\text{m}\times 10.8\ \mu\text{m}$ 正方形微镜阵列构成,利用程序控制每个微镜的偏转角度在 -12° 和 $+12^\circ$ 3种状态中切换。作为数字光处理(Digital Light Procession, DLP)的核心器件,DMD目前被广泛应用于数字投影、全息成像^[10]、光刻技术^[11]、表面形貌测量^[12-13]等领域。

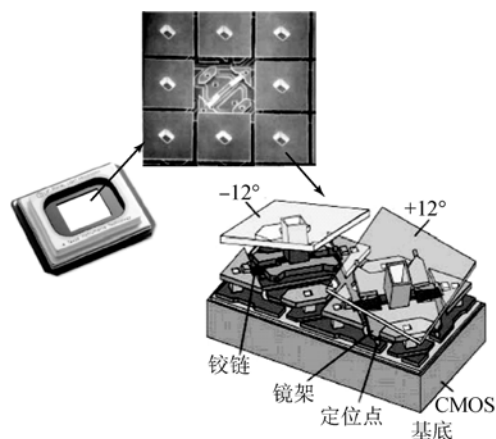


图1 DMD微镜的结构示意图

Fig. 1 Structure of DMD

偏转DMD微镜可对入射光线进行调制,经过DMD微镜阵列调制后所形成的光波场包含了DMD自身的衍射图案和DMD所显示图像的实像及虚像,是一个复杂的二维周期性光波场^[14-15]。本文利用这一特性设计了DMD微镜的控制方法:DMD每个微镜下都有进行寻址的基本静态随机存储器(SRAM)单元,存储器(1,0)的状态决定了微镜的偏转角度,给静态存储器输入一个偏压,即可使对应的微镜偏转到给定的角度;这个偏压的保持时间又决定了微镜偏转角度的保持时间,进而控制了微镜所显示像素的灰度值,因此对微镜的控制可以看作是对以下4个参数的控制:X坐标、Y坐标、偏转电压和偏转电压的加载时间,控制这4个参数可形成用于并行共焦测量的光点群、光点阵列或其他结构光,且光点的类

型、大小、亮度及光点间的距离可做柔性化调制,大大增强了并行共焦测量对不同被测对象的适应性。DMD 对结构光的调制模型如图 2 所示。

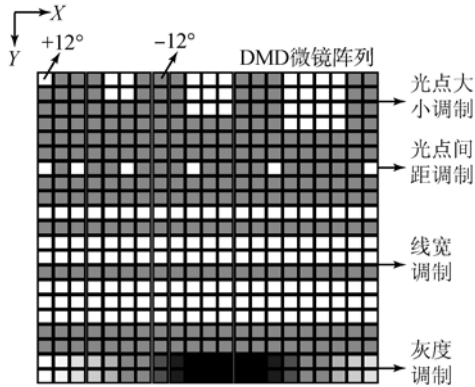


图 2 DMD 对结构光的调制模型

Fig. 2 Modulation model of structured lights by DMD

图 2 展示了所研究的 DMD 对结构光的调制方法及调制效果,它们可通过同一个调制模型完成。

3 基于 DMD 的测量装置

本文设计了基于 DMD 的并行共焦测量装置,其原理如图 3 所示。准直光照射在 DMD 微镜的表面,反射后的光束一部分被吸收板吸收,另一部分进入到测量光路中。DMD 控制器控制 DMD 微镜的偏转参数和振动频率,从而改变进入到测量光路中的结构光参数和照明光强。结构光经测量光路照射在放置于工作台的被测物上,并由被测物反射后经由测量光路进入到光电探测器中,工作台可在上位机的控制下做三维平移。最后由上位机对光电探测器所拍摄的图片进行相应的共焦处理。

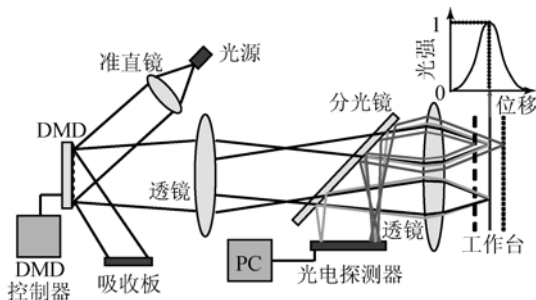


图 3 基于 DMD 的并行共焦测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of parallel confocal measurement based on DMD

为了保证 DMD 微镜阵列表面反射光的光轴与透镜等光学器件的光轴重合,对入射光线与 DMD 的空间位置关系有较严格的要求。入射光线应与不通电时的 DMD 微镜阵列表面呈 66° 入射,这样可使一组结构光垂直于 0° 时的 DMD 微镜阵列表面出射,以便搭建后续光路,如图 4 所示。

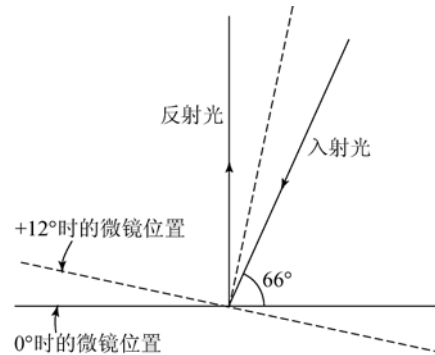


图 4 入射到 DMD 微镜表面的光线角度示意图

Fig. 4 Sketch of angle of incident light illuminating on surface of micromirror

由于 DMD 微镜的旋转轴并非与微镜的轴线平行,而是与其一条对角线平行,因此在光路中安装 DMD 时,应使旋转轴所在的直线平行于水平线,如图 5 所示。

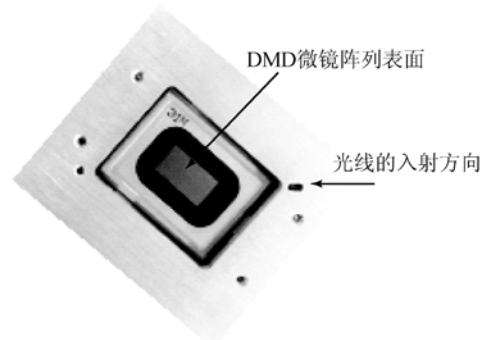


图 5 DMD 在光路中的安装位置示意图

Fig. 5 Sketch of installation position for DMD in optical path

确定了入射光源角度及 DMD 的安装状态后,在 DMD 反射光束后的光轴方向上依次安装调整透镜、分光镜、夹持被测物的工作台及光电探测器等,所搭建的测量装置如图 6 所示。

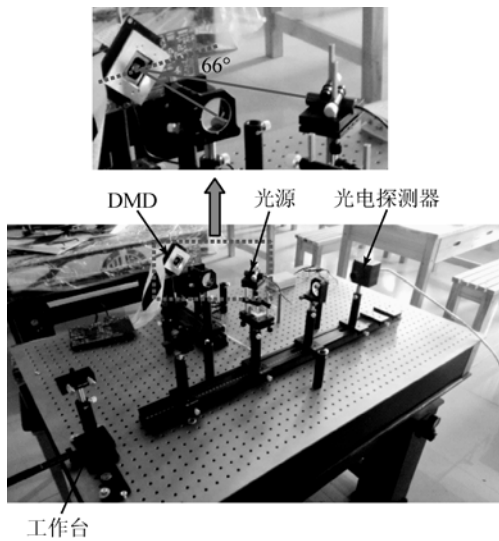


图 6 基于 DMD 的测量装置

Fig. 6 Measurement devices based on DMD

4 实验研究

4.1 轴向分辨率

在共焦测量中,通常设计光阑以阻挡杂散光对图像采集的干扰,这也是共焦测量的轴向分辨率优于普通显微测量的重要原因。在基于 DMD 的并行共焦测量装置中,DMD 对光束的调制类似于光阑的作用,且具备了参数可控的特点,因而能够设计出多种类型的光点阵列。本文分析了这些光点阵列参数与并行共焦轴向分辨率的关系,结果如图 7 所示。图中光点为方形, pixel 表示方形边长所占的像素值。

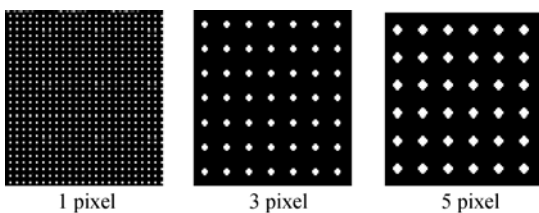


图 7 不同参数的光点阵列

Fig. 7 Some types of point light arrays

以量块为被测对象,用相同光点间距、不同光点尺寸的点阵列作为结构光标定轴向分辨率,得到的光强位移曲线如图 8 所示。图 8 中, s 表示光点的边长, p 表示相邻光点间的中心距。从图中不难发现,这一系列光强位移曲线的半高全宽

(Full Width Half Maximum, FWHM)随着光点尺寸的减小而变小;而另一组实验发现 FWHM 对光点间距的变化不敏感。共焦测量方法中, FWHM 与轴向分辨率紧密关联,因此 DMD 所形成结构光的光点尺寸越小,越能够提高测量装置的轴向分辨率。表 1 计算得到了各光强位移曲线的 FWHM 值。

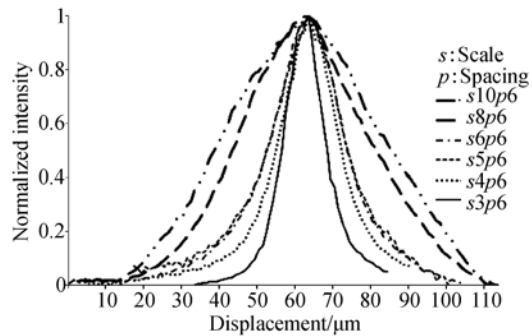


图 8 不同参数的光强位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of light intensity and displacement curves with different parameters

表 1 各光强位移曲线的 FWHM 数值

Tab.1 FWHMs of serial light intensities and displacement curves

| 光点参数/pixel | $s_{10} p_6$ | $s_8 p_6$ | $s_6 p_6$ | $s_5 p_6$ | $s_4 p_6$ | $s_3 p_6$ |
|------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FWHM 数值/ μm | 46.6 | 37.9 | 21.3 | 21 | 17.2 | 11.9 |

4.2 横向分辨率

实验又以硬币表面为被测对象,用不同尺寸的 DMD 结构光分别对硬币进行共焦测量,测量结果如图 9 所示。

图 9 中,(a)和(b)图所采用的光点较大,因此对硬币表面细节的分辨能力较弱,但是几乎没有背景噪声,硬币边缘的对比度高;(c)和(d)图出现了背景噪声,但是对硬币表面细节的分辨能力明显增强;从(e)到(f)图,光点逐渐变小,更多的外界杂散光进入到成像系统,致使背景噪声进一步增强,硬币表面图像信号被淹没,图像细节的分辨能力反而降低了,尤其是在图(f)中,硬币表面细节已几乎淹没在背景噪声中,图像对比度和图像质量下降明显。因此可以得到如下结论:(1)随着 DMD 所形成结构光的光点尺寸逐渐变小,图像的横向分辨率不断增大,但是背景噪声也会增强,这导致了被测物边缘的图像对比度下降;(2)为了

更准确地提取被测物的边缘信息,适当地增大光点尺寸是有必要的;(3)光点通过光学系统成像于 CCD 时,应占据单个 CCD 像素的整数倍,这样可以减少像素不匹配造成的误差。因 DMD、CCD 像素尺寸及光学系统放大倍率已固定,故 DMD 光点尺寸可调并满足一定的阈值要求。具体的横向分辨率数值见表 2。

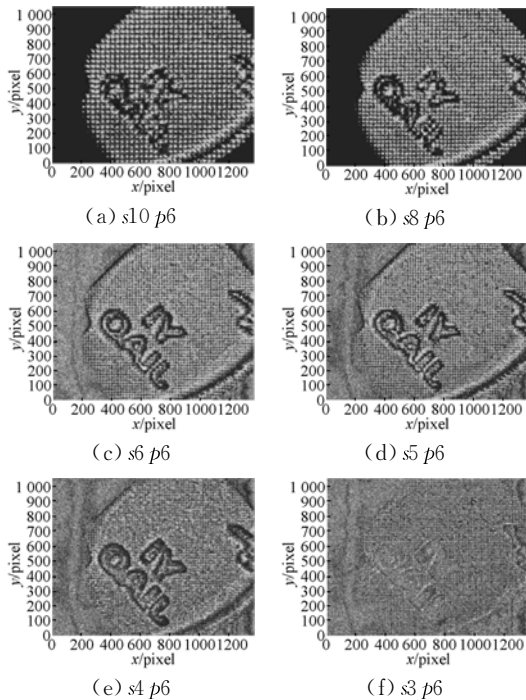


图 9 不同结构光参数下硬币表面测量的实验结果
Fig. 9 Measurement of coin surface with structured lights in different parameters

表 2 不同光点大小的横向分辨率对比

Tab. 2 Transverse resolutions of different light point sizes

| 光点参数/pixel | s10 p6 | s8 p6 | s6 p6 | s5 p6 | s4 p6 | s3 p6 |
|----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 横向分辨率/ μm | 36.3 | 24.6 | 16.5 | 12.9 | 18.6 | 26.1 |

因此,通过变换 DMD 的特征参数可以获得不同的轴向和横向分辨率,以及图像边缘不同的对比度。这种基于 DMD 的测量方法适合用于砂轮等表面形貌复杂,既需获得磨粒群的分布规律,又需测量磨粒清晰边缘及磨粒表面细节的场合。

4.3 区域化照明

从横向分辨率实验中不难发现,有效图像周围的背景噪声会造成图像边缘模糊,影响图像对比度。如果只针对感兴趣的区域进行照明,既不

会有其他区域的反射光线,也不会引入过多的背景噪声,有利于提高图像对比度,这里设计了 DMD 区域化照明方案,该方案与全场照明的对比如图 10 所示。

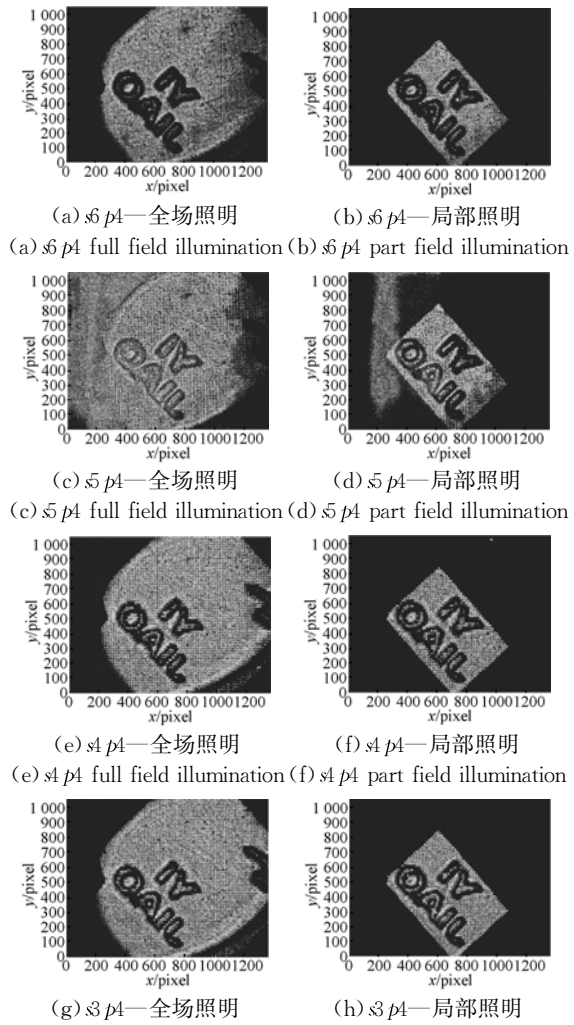


图 10 全场照明与局部照明对比实验
Fig. 10 Comparative experiments of full field illumination and part field illumination

图 10 中,将照明区域限制在字母周边的矩形内,实际上还可以根据被测物的具体形状进行更精准的区域照明。由图(a)~(d)可知,虽然照明区域受到限制,但是图像质量无明显改善;由图(e)和(f)可知,字母边缘变得更加清晰,尤其是图(g)和(h),区域化照明不仅大大减小了背景噪声的干扰,字母边缘更加清晰,横向分辨率也得到了一定的提升。因此,通过限制照明区域可在一定程度上改善因 DMD 结构光光点变小而导致的图像对比度下

降问题,且能够保持横向分辨率基本不变,尤其随着光点的逐渐变小,这种改善效果更加明显。

5 结 论

本文利用 DMD 可以生成各种类型的结构光的特点,将其作为光分束器件用于并行共焦测量装置之中,并研究了 DMD 结构光参数对共焦测量的影响。研究显示,光点参数发生变化,会使共

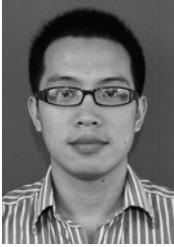
焦测量的轴向、横向分辨率,图像对比度,图像边缘特征等发生相应的变化,这种无需硬件改动的方式将对同时需要探测被测物轮廓和被测物内部细节的跨尺度测量产生积极影响。同时,基于 DMD 的柔性化照明方法可以限制照明区域的大小,减少杂散光的影响,提升图像对比度,还可以改变局部区域的照明亮度,从而为光学测量中普遍存在的“局部反光异常”、“大倾斜角表面测量”等问题提供新的解决方法和方案。

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] 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)
- [3] ZHAO W Q, SUN R D, QIU L R, *et al.*. Laser differential confocal radius measurement [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2345-2360.
- [4] 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.
- [5] GRANT D M, McGINTY J, McGHEE E J, *et al.*. High speed optically sectioned fluorescence lifetime imaging permits study of live cell signaling events [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(24): 15656-15673.
- [6] SHI Y, WANG L Q. Fast confocal endomicroscopy based on multi-fiber parallel scanning [J]. *SPIE*, 2010, 7845: 78451C.
- [7] 涂龙,余锦,樊仲维,等. 基于小孔阵列的并行激光共焦显微检测技术研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(10): 1989-1994.
- TU L, YU J, FAN ZH W, *et al.*. Research on parallel laser confocal microscopy based on a pinhole array [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(10): 1989-1994. (in Chinese)
- [8] 王永红,余晓芬,俞建卫,等. 基于像散的并行全场三维检测新方法[J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(10): 1548-1551.
- WANG Y H, YU X F, YU J W, *et al.*. Whole-filed 3-D profile detecting method based on astigmatism [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(10): 1548-1551. (in Chinese)
- [9] 袁冠伟. 光纤束共焦显微系统的理论分析与设计 [D]. 南昌:南昌大学, 2008.
- YUAN G W. *Theoretical analysis and design on optic-fiber bundle confocal microscopical system* [D]. Nanchang: Nanchang University, 2008. (in Chinese)
- [10] 韩超,韦穗,权希龙,等. 数字微镜器件的全息显示 [J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 190-194.
- HAN CH, WEI S, QUAN X L, *et al.*. Holographic display of digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 190-194. (in Chinese)
- [11] 刘华,卢振武,熊峥,等. 绝对式光栅尺母尺刻划曝光系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1814-1819.
- LIU H, LU ZH W, XIONG ZH, *et al.*. Exposure optical system in lithographic main scale of absolute optical encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1814-1819. (in Chinese)
- [12] 许琦欣,侯文玫,盛世杰,等. 基于数字微镜器件的三维轮廓测量及其性能分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(5): 1138-1144.
- XU Q X, HOU W M, SHENG SH J, *et al.*. 3-dimensional profiler based on digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1138-1144. (in Chinese)
- [13] 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.
- YU Q, YU X F, CUI CH C, *et al.*. Survey of parallel light source technology in parallel confocal measurement [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 652-659. (in Chinese)

- [14] 李俊昌, 宋庆和, 桂进斌. 数字微镜用于菲涅耳衍射全息显示的理论研究[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1459-1463.
LI J CH, SONG Q H, GUI J B. Theory research on Fresnel diffraction hologram display with DMD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1459-1463. (in Chinese)
- [15] 余卿, 余晓芬, 刘文文, 等. 数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0523005-1-5.
YU Q, YU X F, LIU W W, *et al.*. Re-studies on parallel confocal measurement system with digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523005-1-5. (in Chinese)

作者简介:



余 卿(1983—),男,江西新余人,博士,讲师,2005年、2011年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电检测、精密机械设计方面的研究。
E-mail: jorson.y@163.com



叶瑞芳(1982—),女,福建南安人,博士,讲师,2009年于厦门大学获得博士学位,主要从事光电技术、表面形貌测量方法与仪器方面的研究。E-mail: yrf2010@hqu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)