文章编号 1674-2915(2013)05-0652-08

并行共焦测量中的并行光源技术综述

余 卿[1*],余晓芬[2],崔长彩[1],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.合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:并行共焦测量技术的核心是将单点共焦测量变成多点同时扫描测量,从而使共焦测量速度显著提高。本文介绍了共焦测量技术原理,综述了用于并行共焦的并行光源技术,分析了这些方法的优点和不足。结合作者近年来的研究成果,重点阐述了基于微透镜阵列和数字微镜器件(DMD)产生并行光源的新方法。分析和研究了DMD的空间光调制机理,最终建立了一种单光源双光路并行像散共焦测量系统。

关 键 词:共焦显微镜;并行光源;并行共焦测量;三维形貌术;微透镜阵列;数字微镜器件
中图分类号:TH742.9 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20130605.0652

Survey of parallel light source technology in parallel confocal measurement

YU Qing[1*], YU Xiao-fen[2], CUI Chang-cai[1], YE Rui-fang[1], FAN Wei[1]
(1. *College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen* 361021, *China*;
2. *School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei* 230009, *China*)
Corresponding author, E-mail: jorson. y@163. com

Abstract: Parallel confocal measurement technology changes traditional simple scanning into a multi-spot scanning, and it will improve the efficiency of measurement significantly. In this paper, the working principle of confocal measurement technology is introduced and some methods to produce a parallel light source in the parallel confocal measurement are surveyed. Then, it analyzes the advantages and disadvantages of these methods. At last, it presents the latest research achievements, and describes new methods to produce the parallel light source based on the micro lens array and the Digital Micro-lens Device(DMD). By analysis of the mechanism of spatial light modulation, it establishes a laser parallel astigmatism measuring system based on a parallel light source and dual beam paths.

Key words: confocal microscopy; parallel light source; parallel confocal measurement; 3-D topography; micro-lens array; Digital Micro-lens Device(DMD)

收稿日期:2013-07-11;**修订日期**:2013-09-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50775063);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-10-0116);华侨大学高层次人才科研启动费资助项目(No. 12BS109)

1　引　言

随着科技的发展,制造技术的不断进步,人们对制造产品的要求越来越高,而制造工具的几何参数及表面形貌特征会对产品的质量产生重要的影响,因此,对于制造工具表面形貌的高精度测量成为了研究的热点[1-3]。表面形貌测量的方式很多,可分为接触式和非接触式,其中接触式测量需要修正触针的测量力,且对被测对象表面的硬度有要求,应用范围受到限制;非接触测量具有无破坏性的显微观察能力,在表面形貌测量中受到欢迎[4-7]。在众多非接触测量方法中,共焦测量技术以其高精度、高分辨率,以及良好的轴向层析能力和三维重构能力,在表面微纳测量和生物医药等领域得到了广泛的应用[8-11],目前,国内外均已有成熟产品投放市场。

传统的共焦测量技术依靠光源点、被测物点和探测器像点 3 点共轭的关系完成成像,是一种单点共焦测量,其测量效率很低,而且为了完成对具有一定面积表面的测量,需要一套扫描装置,而扫描装置的机构复杂,价格昂贵,其产生的机械振动也会对测量精度和速度造成影响。为了解决上述问题,人们开始关注并行共焦测量技术。这种测量方法通过光分束器件将单光束变成多光束,将单点测量变成多光束测量,极大地提高了测量效率。本文对近年来国内外并行共焦测量技术研究进行了综述。

2　共焦测量技术原理

2.1　单点共焦测量技术

共焦显微镜的原理是 Minsky 于 1957 年首先提出的[12],和传统光学显微镜相比,它具有对比度高、分辨率高和独特的层析能力等特点。

图 1 是一种单点扫描共焦显微镜,被测物被放置在工作台上,且有工作台推动做 z 向移动,经过一系列光学系统后由探测器接收到来自于被测物面的反射信号,该信号会随着工作台的 z 向移动发生变化。当被测物面移动到某个位置时,探测器接收到的光强信号出现极大值。利用点光源、被测物面的物点及探测器像点彼此共轭的关系,即可完成共焦测量。

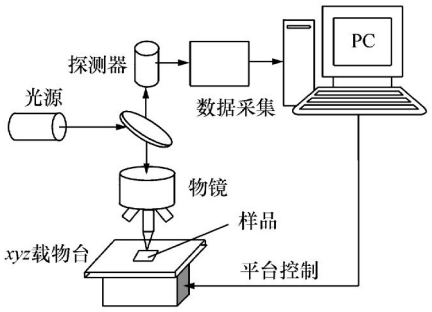


图 1　共焦显微镜系统框图

Fig. 1　Confocal measurement system

探测器探测到的被测物点光强的变化和工作台的 z 向位移值之间的关系称为光强位移曲线,如图 2 所示。

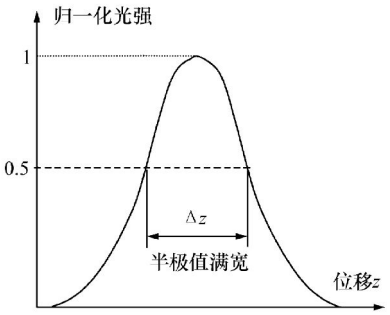


图 2　光强位移曲线

Fig. 2　Curve of intensity and distance

光强位移曲线中,极大值所对应的 z 轴坐标即为该被测物点的相对高度值。得到一点的高度信息后,工作台再做 x、y 向移动,可获得被测物面内其他物点的高度信息,结合这些物点水平方向上的坐标信息,即可描绘出被测物表面的三维形貌。

2.2　并行共焦测量技术

为了提高共焦测量的测量效率,降低由扫描装置带来对精度的影响,近年来,一种并行共焦技术引起各国专家的普遍关注[13]。这种共焦测量术无需扫描,而是引入了一个光分束器件,对光束进行分割,将单点扫描变成了多点并行探测,实现了全场同步测量,大大提高了测量速度。其中,常

见的光分束器件主要有 Nipkow 转盘、微针孔阵列、微透镜阵列、光纤束、数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)等等,下面将分别介绍各种光分束器件在并行共焦测量中的应用现状。

3 国内外并行共焦测量技术研究现状与分析

3.1 Nipkow 转盘

Nipkow 盘最早是在 1884 年由德国科学家 Nipkow 提出的。1985 年 M. Petran 和 M. Hadravsky 等人结合光学显微镜和共焦显微镜的特点,在共焦显微镜中用 Nipkow 盘代替了单个针孔,实现了多光束的分时扫描测量,提高了测量速度。他们制备的 Nipkow 转盘上有 2×10^5 个直径为 20 μm 的针孔,针孔按照螺旋线状排列分布,每一时刻被测物面被不同针孔处的光源所照明,被测物面上被照明的点、照明针孔、共焦剖面像上的像点彼此共轭[14]。由于 Nipkow 转盘的高速旋转会对人眼或其它光电信号接收器件产生积分效应,从而给人一种观察到全场剖面的错觉。Nipkow 转盘及 Nipkow 转盘法原理如图 3 所示。

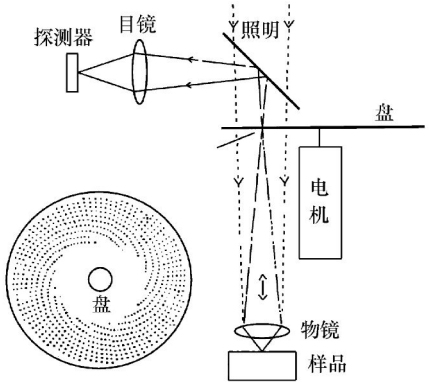


图 3 Nipkow 转盘法原理图

Fig. 3 Principle of Nipkow method

2007 年,英国帝国理工学院的 Grant 等人采用频率为 50 MHz 的超连续谱皮秒脉冲激光器,结合 Nipkow 转盘实现了多点并行共焦探测[15],其实验系统如图 4 所示。

Nipkow 转盘的制作比较复杂,对针孔的尺寸和位置要求严格,并且转盘上同一时刻只有一组

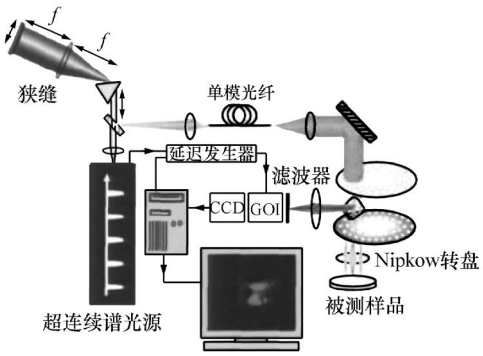


图 4 帝国理工大学的实验系统

Fig. 4 Experimental system from Imperial College, London

针孔透光、视场小、光能利用率低,转动时带来的振动误差会对测量精度造成影响。

3.2 微针孔阵列

微针孔阵列利用针孔的遮光与透光来产生光源阵列。这种方法简单,但是由于遮光区域较大,光能量利用率低,且当针孔直径小时会产生衍射效应。

西安交通大学孔兵等人采用 500 × 500 的微针孔阵列构建了并行共焦测量系统[16],如图 5。该系统的测量范围为 5 mm × 5 mm,精度为 13 μm。

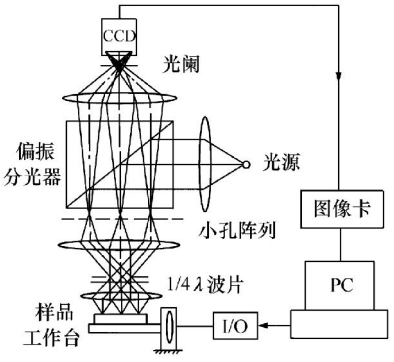


图 5 基于微针孔阵列的并行共焦探测系统

Fig. 5 Parallel confocal measurement system based on pinhole array

3.3 微透镜阵列

微透镜阵列是微光学元件中的一种重要器件。在并行共焦测量中,微透镜阵列有以下特点:(1)较高的能量利用率、较低的噪声;(2)较宽的

频带,无衍射色差;(3)较小的单元周期和较大的相对孔径。

H. J. Tiziani 等人直接用微透镜阵列来代替共焦光学系统中的物镜,实现了全场并行共焦检测[17],系统原理如图 6 所示。

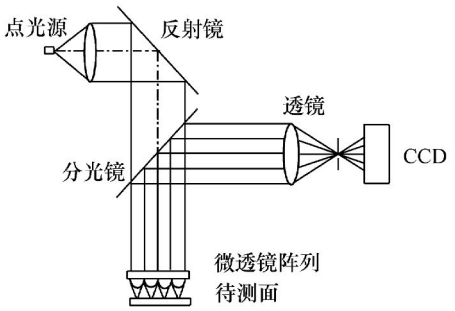


图 6　基于微透镜阵列的并行共焦系统

Fig. 6　Parallel confocal measurement system based on micro-lens array

与 Nipkow 转盘法相比,基于微透镜阵列的并行共焦测量法大大提高了系统的光能利用率,而且扩大了测量时的视场。但是,由于微透镜阵列周期的限制,系统的横向分辨率有所降低,而且直接采用微透镜阵列作为物镜除了限制了系统的纵向测量范围以外,还会把杂散光也传递到探测器之中,从而降低了系统的信噪比,影响了测量精度。

德国的 Eisner. M 等人使用微透镜阵列和微针孔阵列组成了微光学合成器件应用于共焦系统之中[18],其基本原理如图 7 所示。

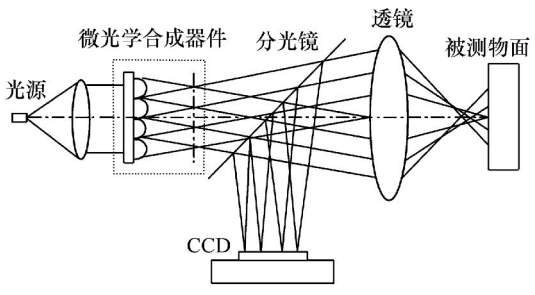
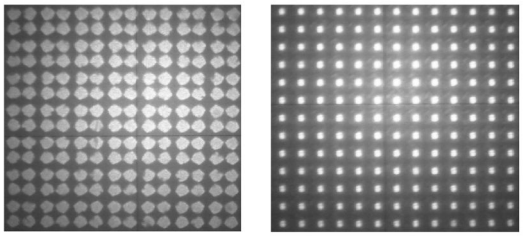


图 7　基于微光学合成器件的并行共焦测量系统

Fig. 7　Parallel confocal measurement system based on micro-optics synthetic device

此微光学合成器件利用微透镜阵列提高了光能利用率,利用微针孔阵列作为光阑阻挡了杂散光的通过,增大了系统的信噪比,如图 8 所示。



(a) 微针孔阵列　(b) 合成分束器件

(a) Micro-lens array　(b) Micro-optics synthetic device

图 8　微针孔阵列和合成分束器件显微对比图

Fig. 8　Contrast of micro-lens array and micro-optics synthetic device

浙江大学的田维坚等人同样在共焦系统中采用了这种方法,实现了全场共焦测量,所研制的检测系统的视场范围为 4 mm × 4 mm,最大纵向测量范围为 1 mm,精度为 20 μm,相对误差 < 10%[19]。

合肥工业大学的王永红等人研究了基于微透镜针孔阵列的全场并行共焦探测技术,详细分析了各种误差因素对并行共焦检测精度的影响,并提出了改善和消除这些误差的建议和途径,有效解决了测量分辨率和测量速度之间的矛盾[20]。

3.4　光纤束

光纤技术与共焦技术的结合,产生了光纤共焦显微术,采用光纤束对光线进行分束的同时,也能够使光的能量均匀化,有利于共焦测量的进行,但是光纤耦合时能量损失严重。早在 1993 年,

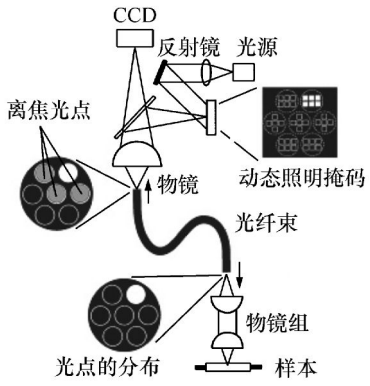


图 9　光纤束共焦测量系统

Fig. 9　Parallel confocal measurement system based on optical fibre bundle

Arthur F. Gmitro 和 David Aziz 就提出了这个概念[21],但是,他们所构建的系统是采用机械扫描方式来获取图像的,成像速度慢、光能利用率低。为此,Pierre M L 等人采用弧光灯照明,将光纤束应用到共焦系统中[22],因为光纤束共焦系统的光纤束有效点扩散函数是单根光纤的点扩散函数之和,和点扫描的单光纤共焦系统一次只能获得一个共轭物点的信息相比,光纤束共焦系统能一次性获得全场物点的信息,实现了并行测量,提高了成像速度,其系统结构如图9所示。

3.5 DMD

上述光分束器件对光线进行分束时各有特点,但是它们都存在一个共同的不足之处:器件一旦制成,其光学参数就固定了,若要改变其对光源分束后的光源点的分布及尺寸就必须更换光学器件,这不仅提高了成本,还限制了并行共焦系统的部分应用。因此,学者们又对可变参数的并行光源展开了研究。DMD 就是一种柔性化的数字光源,它由一定像素的微镜阵列构成(有多种规格:800×600,1 024×768,1 280×1 024等,单位是pixel),每一个微镜的大小固定、彼此的间距也是固定的,且可以绕着各自的旋转轴做±12°的偏转,即每个微镜都有+12°、0°和-12°等3种状态,图10是DMD微镜的结构示意图。

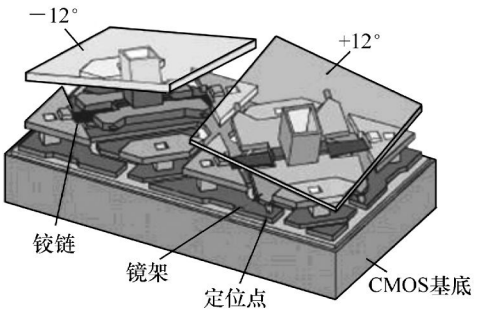


图10 DMD微镜的结构示意图

Fig. 10 Construction of micromirror in DMD

DMD上的每一个微镜都可以通过程序控制在3种状态中变化,因而很容易实现对光线的分束,分束后的光线粗细、间距等参数都可以得到控制,与其他光分束器件相比,DMD有无可比拟的便捷性,各国研究人员将其应用于并行共焦测量,取得了一定的研究成果。

2001年,美国加州大学的 Fainman 等人研究制作了基于 DMD 的并行共焦显微镜,其轴向分辨率为(3.00±0.16) μm[23],原理如图11所示。2011年,上海理工大学的侯文玫等人研制了基于DMD的并行共焦显微镜,如图12所示。

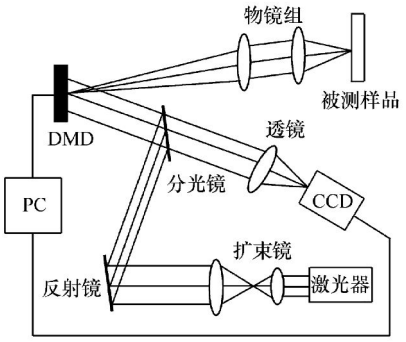


图11 基于DMD的荧光并行共焦显微镜

Fig. 11 Fluorescence parallel confocal measurement system based on DMD

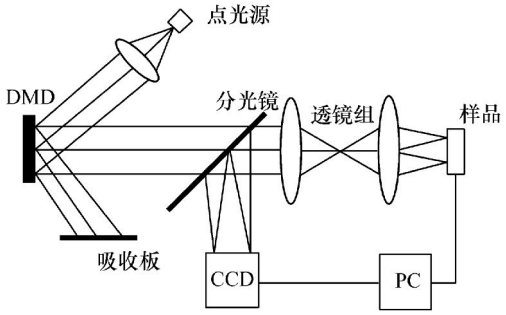


图12 基于DMD的并行共焦显微光路图

Fig. 12 Parallel confocal measurement system based on DMD

它利用DMD对光源进行调制,形成了并行共焦测量模型,在保证分辨率不下降同时,大大提高了测量速度,并获得了系统的深度响应曲线,成功还原了被测物表面的微结构[24]。

DMD虽然在光线分束时表现出了很好的柔韧性,但是,它对分束后的光线并不会产生会聚作用,即使采用远心光路缩小其投射在物面上的光斑大小,也难以与微透镜阵列对光线的分束聚焦作用等效,即采用DMD进行并行共焦测量,纵、横向分辨率都会比采用微透镜阵列时下降。无论如何,DMD仍是一种非常好的数字光学器件,它

对扩大并行共焦测量的应用范围产生了重大的影响。

4　激光并行共焦测量技术讨论

激光的单色性显著优于其他光源,其频谱宽度非常窄,当应用于共焦测量时,有利于提高轴向分辨率。但是激光应用在并行共焦测量时,会产生泰伯效应,造成光路方向上重复出现物方的像,严重影响了测量效果。泰伯效应实际上是一种光的衍射现象,当单色光透过周期性物体(如针孔阵列)时就会产生,因此,采用激光或其他频谱宽度较窄的光源的并行共焦显微镜都无法回避这一问题。作者研究了多种并行光源技术,并通过理论推导,分析和研究了 DMD 的空间光调制机理,发现相干光经过 DMD 调制后所形成的光波场是一个包含了 DMD 自身的衍射图案、DMD 所显示图像的实像和虚像的复杂二维周期性光波场,而在 DMD 用于并行共焦探测时,只需用到 DMD 的零级衍射图案中所包含的 DMD 所显示图像的实像并不会产生泰伯效应[25]。利用 DMD 构建参考光源寻找正焦面的位置,再利用微透镜阵列构建测量光源进行精确测量,最终建立了一种单光源双光路并行像散共焦测量系统[26],如图 13 所示。

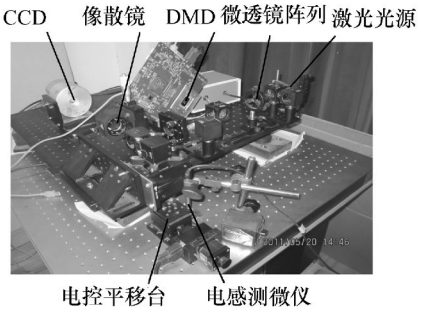


图 13　单光源双光路激光并行像散共焦测量系统实验装置

Fig. 13　Experiment system of laser parallel astigmatism measurement based on single parallel light source and dual beam paths

5　结束语

并行共焦测量技术以其高精度、高分辨率、高效率和良好的层析能力被应用于工程材料、生物医学等的三维形貌测量之中,在国内外引起了众多专家学者的广泛研究。并行共焦测量技术的核心问题之一是产生并行光源。并行光源产生的方式主要有 Nipkow 转盘、微针孔阵列、微透镜阵列、DMD、光纤束等等,这些光分束器件各有优劣,其中微透镜阵列不仅对光线有分束作用,同时还能对分束后的微小光线聚焦,更有利于共焦测量的进行。当激光或其他频谱宽度很窄的单色光引入到并行共焦测量时,可以提高测量分辨率,然而又会将泰伯效应带入到测量之中,严重影响并行共焦测量的进行。作者通过研究 DMD 的空间光调制模型,得出了它不会产生泰伯效应的结论,与微透镜阵列组合构成单光源双光路激光并行共焦测量系统,可以在消除泰伯效应影响的前提下有效提高并行共焦测量的分辨率,为并行共焦测量提供了一种新方法。

参考文献:

[1]　姚楠,王中林. 纳米技术中的显微学手册[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
YAO N,WANG ZH L. *Handbook of Microscopy for Nanotechnology*[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006. (in Chinese)

[2]　CHEN F J,YIN S H,HUANG H,*et al*.. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*,2010,50(5):480-486.

[3]　XIE J,WEI F,ZHENG J H,*et al*.. 3D laser investigation on micron-scale grain protrusion topography of truncated diamond grinding wheel for precision grinding performance[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*,2011,51(5):411-419.

[4]　YANG J M,QIU L R,ZHAO W Q,*et al*.. Laser differential reflection-confocal focal-length measurement[J]. *Opt. Express*,2012,20(23):26027-26036.

[5] MOISEEV N N,TSELMINA I Y. Measurement of the roughness parameters with the use of an interference microscope[J]. *Measurement Techniques*,2012,55(9):990-994.

[6] 刘洪兴,张巍,巩岩. 光栅参数测量技术研究进展[J]. 中国光学,2011,4(2):103-110.
LIU H X,ZHANG W,GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Optics*,2011,4(2):103-110. (in Chinese)

[7] 李平平,张启灿. 产生正弦光栅的二值化面积编码新方法[J]. 中国光学,2011,9(1):36-41.
LI P P,ZHANG Q C. New method of sinusoidal grating generation based on area encoding[J]. *Chinese Optics*,2011,9(1):36-41. (in Chinese)

[8] THOMAS R,ANDREAS W,VERDES,*et al*.. Confocal reader for biochip screening and fluorescence microscopy[J]. *Biosensors and Bioelectronics*,2005,20(9):1872-1877.

[9] 张旭,徐维奇. 激光扫描共聚焦显微镜技术的发展与应用[J]. 现代科学仪器,2001,76(2):21-23.
ZHANG X,XU W Q. Development of confocal microscopy and its application[J]. *Modern Scientific Instruments*,2001,76(2):21-23. (in Chinese)

[10] 曾毅波,蒋书森,黄彩虹,等. 激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用[J]. 光学 精密工程,2008,16(7):1241-1246.
ZENG Y B,JIANG SH S,HUANG C H,*et al*.. Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system[J]. *Opt. Precision Eng*.,2008,16(7):1241-1246. (in Chinese)

[11] 马小军,高党忠,杨蒙生,等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学 精密工程,2011,19(1):17-22.
MA X J,GAO D ZH,YANG M SH,*et al*.. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology[J]. *Opt. Precision Eng*.,2011,19(1):17-22. (in Chinese)

[12] MINSKY M. Microscopy Apparatus:US,3013467[P]. 1961-01-06.

[13] TRUSK T C. 3*D Reconstruction of Confocal Image Data*[M]. Berlin:Springer Verlag,2011:243-272.

[14] PETRAN M,HADRAVSKY M,BOYDE A. The tandem scanning optical microscope[J]. *Scanning*,1985,7:97-108.

[15] 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.

[16] 孔兵,王昭,谭玉山,等. 基于针孔阵列的多光束共焦三维测量系统[J]. 中国激光,2002,29(3):263-266.
KONG B,WANG ZH,TAN Y SH,*et al*.. Multi-beam confocal system using pinhole array[J]. *Chinese J. Lasers*,2002,29(3):263-266. (in Chinese)

[17] TIZIANI H J,ACHI R,KRMEN R N,*et al*.. Theoretical analysis of confocal microscopy with microlenses[J]. *Appl. Opt*.,1996,35(1):120-125.

[18] ESINER M,LINDEIN N,SCHWIDER J. Confocal microscopy with a refractive microlens-pinhole array[J]. *Opt. Lett*.,1998,23(10):748-749.

[19] 田维坚,丁志华,郭履容,等. 一种全场三维共焦检测的新方法[J]. 光学学报,1998,18(6):757-761.
TIAN W J,DING ZH H,GUO L R,*et al*.. A Confocal method for measuring whole-field three-dimentional surface topography[J]. *Acta Optica Sinica*,1998,18(6):757-761. (in Chinese)

[20] 王永红. 基于全场并行共焦的检测技术与系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2003.
WANG Y H. Research on the detecting technologies and system based on whole-field parallel confocal[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2003. (in Chinese)

[21] GMITRO A F,AZIZ D. Confocal microscopy through a fiberoptic imaging bundle[J]. *Opt. Lett*.,1993,18(8):565-567.

[22] LANE P M,DLUGAN A L,RICHARDS-KORTUM R,*et al*.. Fiber-optic confocal microscopy using a spatial light modulator[J]. *Opt. Lett*.,2000,25(24):1780-1782.

[23] FAINMAN Y,BOTVINICK E,PRICE J. 3-D Quantitative imaging of the microvasculature with the texas instruments digital micromirror device[J]. *SPIE*,2001,4457:137-144.

[24] HOU W M,ZHANG Y B. Fast parallel 3D profilometer with DMD technology[C]. *SPIE*,2011,8321:1-7.

[25] 余卿. 激光并行共焦测量系统的并行光源研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2011.

YU Q. Research on the parallel light source in laser parallel confocal measurement system[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2011. (in Chinese)

[26] 余卿,余晓芬,崔长彩. 单光源双光路激光并行共焦测量系统设计[J]. 光学 精密工程,2013,21(2):281-286.
YU Q,YU X F,CUI CH C. Design of laser parallel confocal measurement system with single source and dual beam paths [J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(2):281-286. (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、精密机械设计等方面的研究,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,主要从事光电检测、激光应用方面的研究,E-mail:yrf2010@ hqu. edu. cn

余晓芬(1954—),女,安徽合肥人,博士,教授,博士生导师,1982 年、2000 年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事现代检测技术及仪器、微纳米测量、在线检测技术及系统等方面的研究, E-mail: yuxiaofen99 @ hotmail. com

范　伟(1981—),男,宁夏银川人,博士,讲师,2002 年、2009 年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事微纳驱动、电机智能控制方面的研究,E-mail:fanwei@ hqu. edu. cn

崔长彩(1972—),女,山东胶南人,博士,教授,博士生导师,1996 年于佳木斯大学获得学士学位,2003 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事表面微形貌重构、几何量精密测量技术与优化算法应用技术等方面的研究,E-mail: cuichc@ hqu. edu. cn