

文章编号: 0253-2239(2009)11-3057-04

并行共焦显微探测高精度表面坐标信息获取方法

余 卿 余晓芬 毕美华

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 并行共焦显微术能够同时测量多个被测点,大大提高了测量效率,但同时也引入了较大的轴外点像差。已有的数据处理手段不能消除轴外光斑的横向偏移。针对其缺陷,提出了中心扩散法和光强重组法来获取被测光斑的光强位移曲线。实验结果表明,中心扩散法和光强重组法基本消除了轴外点光斑 10 μm 左右的横向偏移;与现有方法比较,这两种方法还将系统的测量稳定性分别提高了 2 倍和 5 倍,满足了并行共焦显微系统高精度快速测量的要求。

关键词 并行共焦显微系统; 光强位移曲线; 中心扩散法; 光强重组法

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3057

Research on High-Precision Acquisitive Method of Surface Coordinate Information Based on Parallel Confocal Microscopy

Yu Qing Yu Xiaofen Bi Meihua

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract Parallel confocal microscopy, which can detect lots of measured points simultaneously, can provide better efficiency in measurement, but bring larger off-axis aberration into the system. The horizontal offset of off-axis facula cannot be eliminated by existing data processing method, so centre-proliferation method and optic-intensity restructuring method are brought up to obtain optic-intensity displacement curves. Experimental results show that the method of centre-proliferation and optic-intensity restructuring can remove horizontal offset of about 10 μm of off-axis facula. In contrast to exiting method, the system's stability has been increased by 2 and 5 times by these two kinds of methods, which can fit the high-precision requirement in rapid measurement.

Key words parallel confocal microscopy; optic-intensity displacement curve; centre-proliferation method; optic-intensity restructuring method

1 引 言

随着科技的进步,对表面形貌检测提出了越来越高的要求,具有非接触、高精度、高速等特点的激光共焦显微镜被广泛应用于生命医药、材料学等领域^[1,2]。相比于单点共焦显微技术,并行共焦显微术同时对多个光斑测量的方式大大提高了测量效率。但是,并行共焦探测同时引入了轴外点像差,随着物面的移动,光斑的横向位置会发生偏移,越靠近边缘的光斑的偏移量越大。已有的获取光强位移曲

线的方法没有考虑光斑的横向偏移,因此在进行图像数据处理之前就已经有了比较大的误差。针对现有方法的缺陷,本文提出了中心扩散法和光强重组法来获取光强位移曲线,消除了因为光斑横向偏移带来的误差,同时还提高了测量的稳定性。

2 理论依据

2.1 并行共焦测量原理

并行共焦显微的原理如图 1 所示。其中 1 为光

收稿日期: 2008-12-11; 收到修改稿日期: 2009-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(50775063)资助项目。

作者简介: 余 卿(1983—),男,博士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: jorson.y@163.com

导师简介: 余晓芬(1954—),女,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器,测量误差与仪器精度理论及应用,自动检测技术及仪表智能化等方面的研究。E-mail: yuxiaofen99@126.com

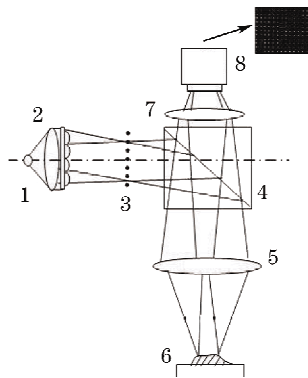


图 1 并行共焦显微原理图

Fig. 1 Principle of parallel confocal microscopy

源, 2 为准直透镜, 3 为微透镜阵列, 4 为分光镜, 5 为凸透镜一, 6 为微动台, 7 为凸透镜二, 8 为 CCD。光源发出的光被微光学器件分束后变成点光源阵列^[3~5], 并由物镜组成像在被测物面形成光斑阵列, 再经过物镜组成像 CCD 像面。其中点光源阵列、物面和 CCD 像面是彼此共轭的。测量时, 随着物面的 Z 向移动, 成像于 CCD 像面的光斑大小发生了变化, 导致 CCD 单个像素点所接收到的光强也会发生变化, 因此可以得到该像素点沿 Z 向的理想特性曲线, 如图 2 所示^[6~10]。

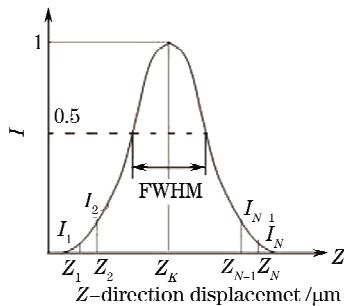


图 2 光强位移曲线

Fig. 2 Optic-intensity displacement curve

2.2 像差分析

由于轴外点像差的存在, 被测光斑的横向位置会随着物面的 Z 向移动发生改变, 这些像差中主要以畸变对被测光斑横向位置的影响最大, 因此本文主要讨论畸变对光斑偏移的影响, 如图 3 所示。

畸变可写成

$$\delta y'_z = y'_z - y' \tag{1}$$

其中 y'_z 表示实际像高, y' 表示理想像高; x 方向的关系类似。

将 y'_z 展开得到

$$y'_z = y + A_1 y^3 + A_2 y^5 + \dots \tag{2}$$

其中 A_1, A_2 等为常数, 有

$$\delta y'_z = A_1 y^3 + A_2 y^5 + \dots \tag{3}$$

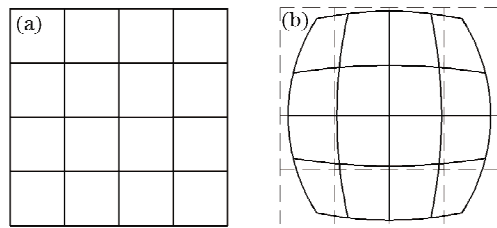


图 3 畸变: (a) 无畸变; (b) 有畸变

Fig. 3 Distortion: (a) without distortion; (b) with distortion

(3) 式中等式右边第 1 项是初级畸变, 第 2 项是二级畸变。在实际光学系统中, 畸变一定存在^[11], 它仅与物高 y 有关。本测量系统中的物高是 2.73 mm, 经过计算得到它带给系统的畸变误差 $\delta y'_z = 7 \mu\text{m}$ 。除了像差, 还存在导轨直线度等误差。在测量过程中, 光斑的最大偏移量是 10 μm , 所选用 CCD 的一个像素大小是 6.45 μm , 因此畸变等像差以及导轨直线度误差会使光斑在测量过程中产生两个像素的偏移。

3 光强位移曲线的获取方法

3.1 已有的方法

已有的光强位移曲线获取方法是: 对于某一个光斑, 选定其中的若干个像素点, 计算它们的平均光强, 当物面发生 Z 向位移时, 框取这若干个像素点的区域中心并不改变。由于没有考虑实际测量中光斑的横向偏移, 因此测量误差比较大。

3.2 中心扩散法

针对已有获取曲线方法的缺陷, 提出了“中心扩散法”: 先找到光斑中最大光强的像素点, 再以它为中心, 划分一定区域, 计算区域中所有像素点的平均光强值作为曲线的纵坐标。当物面发生 Z 向移动时, 必须保证划分区域的中心和该光斑的光强最大值坐标保持一致。

图 4 是 CCD 拍摄的共焦图片的一部分。图 5

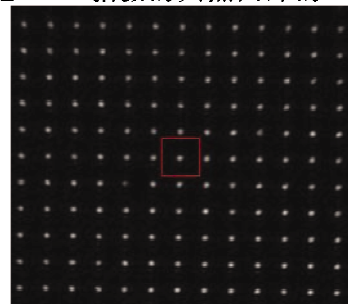


图 4 CCD 拍摄的共焦图片

Fig. 4 Confocal image screened by CCD

14	28	42	42	32	20
28	54	77	81	59	32
43	83	126	133	91	43
44	94	148	156	110	55
38	80	128	140	99	48
29	51	79	88	63	30
17	24	33	36	27	15

图 5 “3×3”光强分布图

Fig. 5 “3×3”Light intensity distribution

是单个光斑的部分光强值分布图,方框区域选定了待测的 9 个像素点。

中心扩散法消除了光斑横向偏移带来的误差,但是同时也存在以下缺点:

1) 选取的点的数量有限,外界噪声很容易引起光斑光强值的变化,影响了光强位移图的准确性;

2) 对某个光斑来说,其中光强最大值的像素点并不一定具有唯一性,一旦出现两个或两个以上的最值点,只能依靠人工手段来判断究竟选取哪个点作为中心,引入了人为误差;

3) 该方法需要寻找光强的最大值,因此在物面发生 Z 向位移后,都要对光斑中心的横坐标做校正。如果采用并行共焦进行多点测量时,这种校正会更加频繁,影响了测量效率。

中心扩散法可以根据需要定义窗口的大小,在一定程度上改善缺点 1,如图 6 所示。但是缺点 2 和缺点 3 是中心扩散法自身带来的误差,必须依靠别的处理方法来克服。

14	28	42	42	32	20
28	54	77	81	59	32
43	83	126	133	91	43
44	94	148	156	110	55
38	80	128	140	99	48
29	51	79	88	63	30
17	24	33	36	27	15

图 6 “3×3”变化到“5×5”

Fig. 6 From “3×3” to “5×5”

表 1 光斑中心横坐标变化情况

Table 1 Horizontal coordinate of facula center

displacement / μm	730	740	750	.....	1230	1240	1250
X-axis / pixel	640	640	640	.....	642	642	642
Y-axis / pixel	420	420	420	.....	421	421	421

4.2 结果分析

分别采用现有方法、中心扩散法和光强重组法

3.3 光强重组法

为了解决上述方法带来的问题,又提出了光强重组法:根据测量速度和测量精度的要求设定阈值,光强值超过阈值的像素点被当作是有效的测量点,再从这些像素点按大小顺序选取出一定数量的被测点进行光强位移曲线的绘制,如图 7 所示。

10	11	12	14	15	12	10	10
11	12	18	26	26	21	14	12
11	14	28	42	42	32	20	14
13	28	54	77	81	59	32	18
17	43	83	126	133	91	43	22
18	44	94	148	156	110	55	24
19	38	80	128	140	99	48	21
18	29	51	79	88	63	30	15
15	17	24	33	36	27	15	12
14	14	15	15	13	12	13	13

图 7 阈值设定为 26 时的光强分布

Fig. 7 Light intensity distribution when the threshold is 26

用光强重组法得到的光强位移曲线也可以消除光斑的横向偏移,且不需要寻找光斑的光强极值点。阈值的设定还可以灵活地调节外界干扰对纵向分辨率影响,阈值较小时,测量点增多,外界的干扰噪声被平均化,但这时的曲线会变得比较平缓,系统的纵向分辨率降低。选择合理的阈值是光强重组法的关键。

4 实验结果分析

4.1 实验概述

为了验证中心扩散法和光强重组法能够消除光斑横向偏移带来的误差,在自主研发的激光并行共焦显微系统中,利用硬币作为被测物,通过实验对比了已有方法、中心扩散法和光强重组法在光斑发生横向偏移时的处理结果。

被测硬币在 $520 \mu\text{m}$ 的行程范围内来回位移 4 次,移动时每隔 $10 \mu\text{m}$ 采集一次图片数据,并记录当时的相对位移值作为光强位移图的横坐标,再按照前文介绍的三种方式进行数据处理^[12~14]。表 1 反映了硬币做 Z 向移动时,其上光斑的横坐标变化情况,其中一个像素表示 $6.45 \mu\text{m}$,因此单个光斑在测量过程中横向偏移了 $10 \mu\text{m}$ 左右。

对数据进行处理得到了表 2 所列的测量结果。

从上述结果中不难看出:采用中心扩散法和光

表 2 三种不同测量方法的实验对比结果
Table 2 Contrast with three different measured ways

	1	2	3	4	average	mean square
existing data processing method / μm	48.25	54.08	46.78	52.01	50.28	2.91
centre-proliferation method / μm	53.45	54.68	55.05	51.67	53.71	1.32
optic-intensity restructuring method / μm	53.99	54.79	55.56	54.35	54.67	0.59

强重组法寻找极值点时,得到的极值点位置的均值都比较接近其真值(55 μm)。其中采用光强重组法得到的极值点位置的均方差只有采用现有方法得到结果的五分之一,而采用中心扩散法得到的均方差结果介于其余两种方法之间。由此可见,在光斑会发生横向偏移的情况下,中心扩散法和光强重组法都能够较好地改善了这种现象,尤其是采用光强重组法的均方差较中心扩散法更小,因而系统的测量稳定性更好,抗干扰能力更强。

5 结 论

已有的光强位移曲线获取方法不能根据实际情况调整选取区域的中心,给系统带来了较大的误差;改进后的中心扩散法和光强重组法能够消除光斑的横向偏移,提高了系统的测量速度和纵向分辨率,使测量更加稳定。从实验结果中分析,和中心扩散法相比,采用光强重组法更能够提高系统的纵向分辨率和测量的稳定性。

参 考 文 献

- 1 Fu Dongxiang, Chen Jiabi, Ma Junshan *et al.*. Two wavelength laser confocal scanning system for microarray and image processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1097~1103
付东翔, 陈家璧, 马军山等. 双波长激光共聚焦生物芯片检测与图像处理[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1097~1103
- 2 Sun Dale, Wu Qiong, Liu Changsheng *et al.*. Application of laser scanning confocal microscopy in roughness characterization of worn surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1409~1414
孙大乐, 吴琼, 刘常升等. 激光共聚焦显微镜在磨损表面粗糙度表征中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1409~1414
- 3 II. J. Tiziani, II. M. Uhde. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(4): 567~572
- 4 W. J. Tian, J. W. Yang *et al.*. New method for measuring the properties of optical systems with microoptic components [C]. *SPIE*, 1996, **2899**: 263~268
- 5 M. Ishihara, II. Sasaki. High-speed surface measurement using a non-scanning multiple-beam confocal microscope [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(6): 1035~1040
- 6 Tian Weijian, Ding Zhihua, Guo Lurong *et al.*. A confocal method for measuring whole-field three-dimensional surface topography [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 757~761
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
- 7 Tian Weijian, Chen Bo, Guo Lurong *et al.*. Theoretical analysis for parallel confocal detecting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1381~1385
田维坚, 陈波, 郭履容等. 并行共焦三维检测方法的理论分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1381~1385
- 8 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 35~39
孙杰, 袁跃辉, 王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 35~39
- 9 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao Jie *et al.*. Imaging resolution analysis of digital holographic microscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1670~1675
王华英, 王广俊, 赵洁等. 数字全息显微系统的成像分辨率分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1670~1675
- 10 Wang Yonghong, Yu Xiaofen, Yu Jianwei *et al.*. A survey of the non-scanning 3-D profile confocal detecting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(4): 8~11
王永红, 余晓芬, 俞建卫等. 非扫描并行三维共焦检测技术综述[J]. *仪器仪表学报(增刊)*, 2003, **24**(4): 8~11
- 11 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 108~109
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 108~109
- 12 Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 10~21
费业泰. *误差理论与数据处理* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 10~21
- 13 Yin Zheming, Ding Chunli. *Proficient in MATLAB 6* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 198~200
尹泽明, 丁春利. *精通 MATLAB 6* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 198~200
- 14 Ge Zhexue. *Proficient in MATLAB* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 109~111
葛哲学. *精通 MATLAB* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 109~111