

doi:10.3788/gzxb20144309.0912007

# 基于条纹反射的光学表面疵病检测法

赵文川, 钟显云, 刘彬

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

**摘 要:**提出一种基于条纹反射的光学表面疵病检测方法,检测系统由液晶显示屏、CCD 相机和计算机组成.检测时在显示屏上分别显示水平和垂直两个方向正交的正弦性条纹,用 CCD 相机记录经被测表面反射的正弦条纹像,通过相移技术得到两个方向正交的相位分布和对比度分布,通过对比度分布确定被测表面的疵病位置.被测表面表面形相关信息包含在相位分布中,其表面疵病细节信息包含在局部微观相位分布之中.对相位分布进行多项式拟合后相减得到疵病引起的微观相位分布,计算得到表面疵病的梯度分布,积分得其高度分布.实验验证了该方法的可行性.

**关键词:**光学检测;表面检测;条纹反射;光学表面疵病;条纹处理

中图分类号:TP274

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0912007-5

## The Surface Flaws Inspection of Optical Components Based on the Fringe Reflection

ZHAO Wen-chuan, ZHONG Xian-yun, LIU Bin

(Institute of Optics and Electronic, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** A method for the optical surface flaws inspection based on the fringe reflection was proposed. The test system is composed of the liquid crystal display, CCD camera and a computer. The intensity-modulated patterns are generated on the screens on both the horizontal and vertical respectively. The CCD records the pattern images via the tested surface. The phase and amplitude modulation are calculated by the phase-shift technique. The flaws location can be got from the fringe contrast. Also the height of the flaws can be gained by integration from the phase change caused by the flaws. This method is simple and cheap. Compared with other techniques, this technique can get the three dimension information of the flaws. The experimental results have confirmed the feasibility of this method.

**Key words:** Optical testing; Surface testing; Fringe reflection; Optics surface flaws; Fringe analysis

**OCIS Codes:** 220.4840; 120.2650; 120.4630; 120.5700

## 0 引言

光学零件的表面疵病是指光学零件经过抛光加工后其表面存在的麻点、划痕、开口气泡、破点及破边等缺陷,由制作加工流程中或后续的不当处理造成的<sup>[1]</sup>.光学元件表面疵病会对元件造成散射、能量吸收、有害的炫耀、衍射花纹、膜层破坏、激光损伤等.这些缺陷直接影响光学系统的质量,甚至对系统产生致命损害.现代精密光学加工对光学元件表面质量要求越来越高,疵病的研究和检验对于精密光学表面元件质量控制具

有十分重要的意义.目前最常见的是利用疵病的散射特性,采用肉眼进行判定的目测法,但此方法效率不高,易受人为因素影响,无法确定表面疵病的具体类型和精确位置,误判率较高.随着机器视觉技术的快速发展,利用机器视觉的相关技术和方法解决疵病检测问题的研究也越来越多.浙江大学、重庆大学、西南科技大学等利用光学散射理论,采用高分辨率 CCD 相机获取疵病图像,再利用数字图像处理算法,对图像进行识别分析,可以实现精确定位和分类<sup>[2-8]</sup>,但该方法只能得到疵病的位置和大小,无法得到疵病的深度信息.一

**基金项目:**中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”(No. A12K015)和国家自然科学基金(No. 61205007)资助

**第一作者:**赵文川(1983-),男,副研究员,博士研究生,主要研究方向为光学检测和信息光学等. Email:zhaowc168-98@163.com

**收稿日期:**2013-12-16; **录用日期:**2014-04-02

<http://www.photon.ac.cn>

些精密测量设备如原子力显微镜等能探测到表面纳米级的疵病,但难以区分疵病和正常的加工纹理或结构,检测效率低,费用昂贵。

近年来,Markus C. Kanuer<sup>[9]</sup>和 Thorsten Bothe<sup>[10]</sup>等提出采用条纹反射技术对光学镜面和类镜面的三维面形进行测量的方法.该方法能检测被测件表面局部非常微小的缺陷,具有相当高的灵敏度,在一定情况下甚至可以达到纳米级.四川大学刘元坤等采用该技术对瓷砖等类镜面表面进行检测<sup>[11-12]</sup>,德国不来梅大学应用光学研究所采用该技术对铝镜进行检测<sup>[10]</sup>都观察到了元件表面的微观形貌.当光学元件表面存在疵病时,会造成光线散射、能量吸收等,导致光线反射率下降和反射光线的偏折.反射率的下降会引起条纹对比度的降低,通过对对比度的分析,就可以观察到被测面的疵病分布.同时,光线的偏折会引起相位变化,相位测量偏折术对光线的偏折极其敏感,因此可以通过分析其相位变化来检测表面疵病.本文将条纹反射测量技术应用于光学表面疵病检测,通过对比度分布确定被测表面的疵病位置,由局部微观相位分布计算得到表面疵病的三维细节信息,并用实验证明该方法的可行性。

## 1 基本原理

条纹反射测量光学表面面形的基本原理是结构光条纹被光学表面反射后发生变形,通过相移技术测量变形条纹的相位,再根据系统结构参量及光线反射定律计算得到被测表面的法线.如图1所示,系统由液晶显示屏、待测表面和摄像机构成.液晶显示屏显示标准条纹图,被待测物体反射后由 CCD 相机记录.如果待测物体不是标准的平面,则条纹图会发生畸变,畸变的大小取决于反射面的形状和系统的结构.光线偏折示意图如图2,被测物体引起的变形相位分布,除去参考相位即得到由被测物面相对于参考平面的畸变即高度变化引起的相位变化.根据光线偏折原理从相位变化得到光线偏折角,然后由偏折角与物面局部梯度或法向矢量的关系得到待测镜面梯度变化,对其分析计算从而实现了对被测表面的评价<sup>[12-13]</sup>.该技术对被测表面局部非常微小的缺陷具有相当高的灵敏度,在一定情况下甚至可以达到纳米级.事实上,表面疵病的相关信息也包含在变形相位分布中,可将此技术应用于光学表面疵病检测.检测原理如图3,CCD 摄像机通过被测镜观察并记录液晶显示屏上的条纹图像.光学表面没有疵病的区域,其面形是光滑连续的,对应的相位分布也是光滑连续的.而存在疵病的位置,光学表面会有微观的三维突变,这会引入光线的偏折和散射,造成相位分布的突变和图像对比度的下降.需要指出的是,虽然疵病位置光线发生了散射,引起对比度的下降,条纹反射像会变模糊.但是,由于采用的是正弦性条纹,不会

影响到相位测量准确度.文献[11]采用相移技术从条纹图像中提取得到相位分布和对比度分布.文献[14]对相位分布进行多项式拟合后再相减,得到了由该疵病所引起的微观相位分布.从而计算主光线偏折角,得到疵病处的法线向量,积分得到疵病的深度信息.同时,由于发生了散射,疵病位置处的对比度相对于邻近无疵病区域会明显下降.因此,从对比度分布可以快速得到疵病的位置和大小。

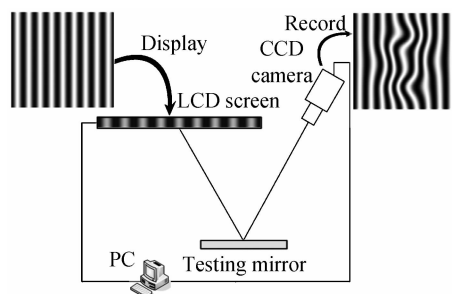


图1 系统装置

Fig. 1 Schematic of the setup

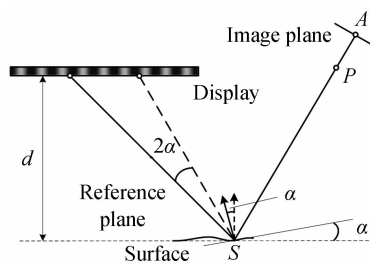


图2 光线偏折示意图

Fig. 2 Schematic of ray deflect

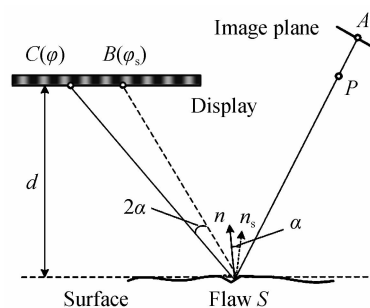


图3 疵病检测原理

Fig. 3 Schematic of surface flaws inspection

液晶显示屏上的标准条纹可表示为

$$I_0(x, y) = a + b \cos [2\pi x / p + \varphi_0(x, y)] \quad (1)$$

式中  $a$  和  $b$  分别为正常量,令  $a = b$ ,  $p$  为条纹周期,  $\varphi_0(x, y)$  是附加相位调制。

经过被测光学表面反射后的条纹函数表示为

$$I(x, y) = a + b \cos [2\pi x / p + \varphi_0(x, y) + \varphi(x, y)] \quad (2)$$

式中  $\varphi(x, y)$  是由被测光学表面引入的相位调制,其分布可以采用相移技术获得.如图3中的  $S$  点,若该处是光滑连续表面不存在疵病,则其对应的相位为  $\varphi_0$ ,该相位也是光滑连续的;若此处有一个疵病,此时该处的相位变化为  $\varphi$ ,差值  $\Delta\varphi$  就是由于表面疵病所引起的相位

变化.对相移相位分布  $\varphi$  进行多项式拟合得到相位分布  $\varphi_s$ ,再相减即  $\varphi - \varphi_s$  得到  $\Delta\varphi$ .再根据式(3)得到表面疵病相对于光滑表面的变化角度  $\alpha$ ,该偏折角与疵病分布的梯度有关<sup>[13]</sup>,然后通过积分就可以得到疵病的深度信息  $S$ .由梯度积分得到三维信息,最简单的方法是按路径积分.但由于实际数据包含噪音,这时积分就与路径相关,不同的积分路径将导致不同的积分结果.本文选用自适应光学中 Southwell 波前算法进行积分.这是一种全局积分技术,不但对噪音有较强的抑制作用,同时也可以处理复杂的联通区域和非等间距分布梯度数据的复杂情况,非常适用于基于条纹反射术的波面测量<sup>[15]</sup>.数据处理的流程如图 4.

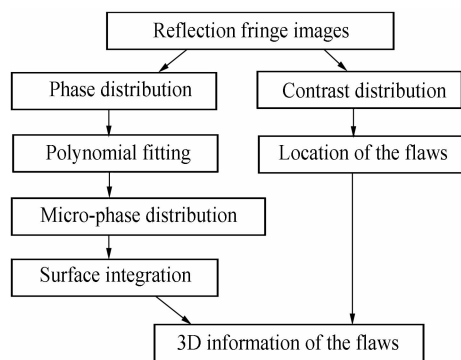


图 4 数据处理流程图  
Fig. 4 The schematic for data-processing

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{d}{p} \tan 2\alpha \tag{3}$$

$$\frac{\partial S(x,y)}{\partial x} = \tan \alpha_x \tag{4}$$

$$\frac{\partial S(x,y)}{\partial y} = \tan \alpha_y$$

## 2 实验结果

实验中,采用  $1\ 280 \times 1\ 024$  的液晶显示屏显示标准条纹,像素点距为  $0.264\ \text{mm}$ ,正弦条纹周期  $p = 8.448\ \text{mm}$ ,采用 Baumer 公司 2/3 英寸 CCD 相机拍摄,分辨率为  $1\ 392 \times 1\ 040$ .被测面为光学平面镜,与显示平面距离  $d = 323\ \text{mm}$ .为降低随机噪音的影响,在进行数据采集时进行了 32 帧平均.实验时,首先标定 CCD 的相机内参量,然后将一标准棋盘格置于被测平面镜位置,再标定得到 CCD 相机坐标系中被测平面镜所在平面的外参量.建立了 CCD 像素点与被测镜面点的映射关系<sup>[7-8]</sup>.接着放置被测平面镜,摄像机记录其反射条纹图样.图 5 为水平和垂直两个方向的条纹图像.图 6 为条纹对比度分布图,从图中可以观察出存在划痕和麻点.选取图中具有代表性的包含了划痕和麻点约  $4.4\ \text{mm} \times 4.4\ \text{mm}$  大小的区域进行详细分析.从条纹图提取相位分布并展开,通过多项式拟合相减后

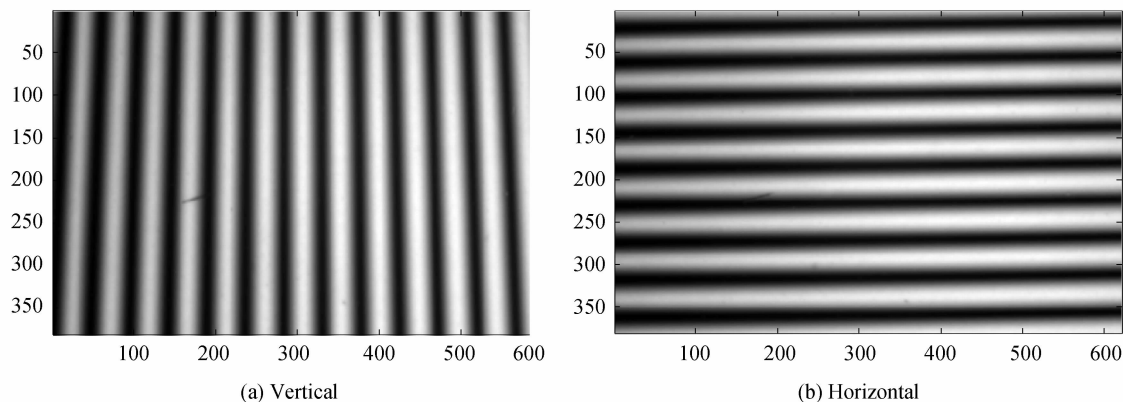


图 5 反射条纹图  
Fig. 5 The reflection fringe

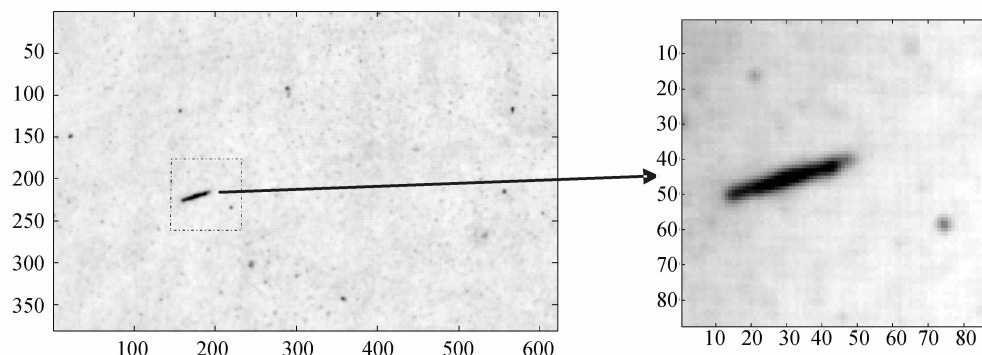


图 6 条纹对比度分布  
Fig. 6 The fringe contrast

得到疵病所引起的微观相位分布,再由式(3)计算得到疵病的梯度分布,如图7.通过积分得到疵病三维信息

如图8,结果显示疵病深度在亚微米量级.

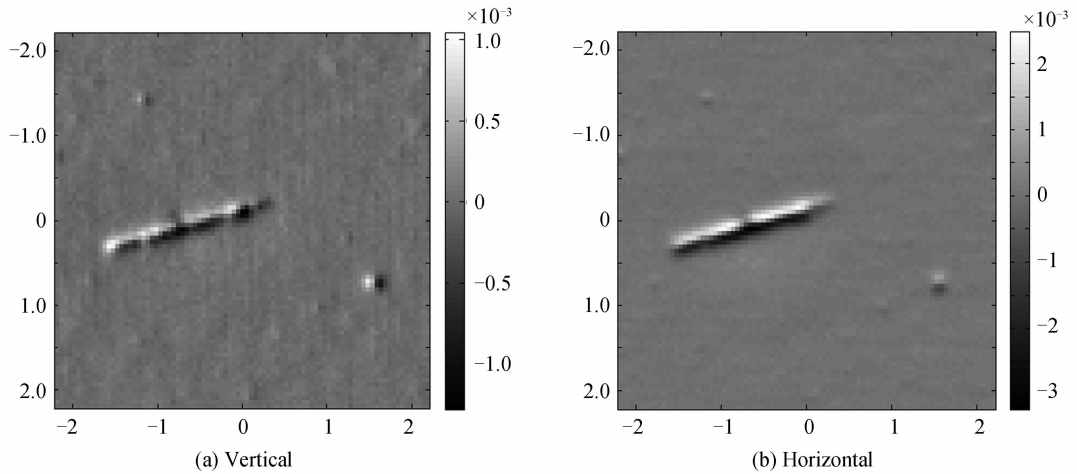


图7 疵病梯度分布  
Fig. 7 The flaws gradient

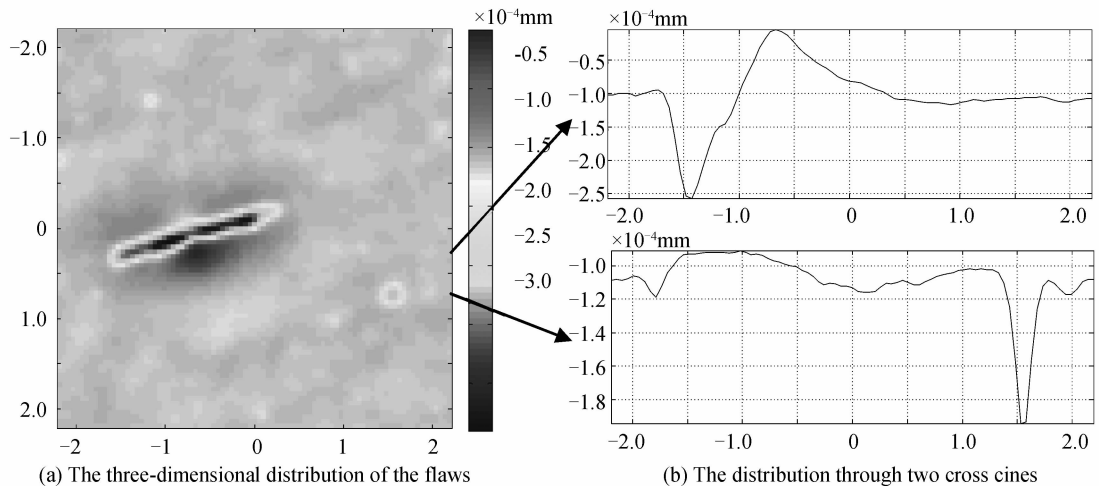


图8 疵病检测结果  
Fig. 8 The inspection results

### 3 讨论

本文讨论了一种基于条纹反射的光学表面疵病检测方法.该方法具有结构简单、成本低、灵活性高等优点.条纹反射测量技术测量对被测面反射的条纹图样,利用疵病所引起的条纹对比度降低和微观相位变化来分析计算表面疵病位置分布和三维高度信息.实验验证了这一方法的可行性,为光学表面疵病的三维检测提供了一种检测方法.

#### 参考文献

- [1] GB/T 1185 - 2006. 光学零件表面疵病[S].
- [2] THOMPSON C E, KNOPP C F, DECKER D E. Optics damage inspection for NIF[C]. SPIE, 1999, **3492**: 921-932.
- [3] YANG Yong-ying, GAO Xin, XIAO Bing, LIU DONG, *et al.* Optical microscopic imaging and digitized evaluation system for super-smooth surface defects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 325-329.

- [4] TAN Heng-yin, LIU Peng-cheng, SHI Bai-xuan. Nondestructive testing of laser induced damage in optical thin films by laser photothermal deflection image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 158-160.
- [5] 谈恒英, 刘鹏程, 施柏焯. 激光光热偏转成像法无损检测光学薄膜的激光损伤[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 158-160.
- [6] DONG We-bin, ZHANG Min, DA Zheng-shang, *et al.* An online inspection image-forming lens for optical defects in high power beams measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 685-688.
- [7] 董卫斌, 张敏, 达争尚, 等. 强激光装置中玻璃疵病在线检测的光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 685-688.
- [8] REN Bing-qiang, HUANG Hui-jie, ZHANG Wei-xin, *et al.* Online inspection apparatus and experiments on optics damage [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2004, **16**(4): 465-468.
- [9] 任冰强, 黄慧杰, 张维新, 等. 光学元件损伤在线检测装置及实验研究[J]. *强激光和粒子束*, 2004, **16**(4): 465-468.
- [10] WANG Xue, XIE Zhi-jiang, SUN Hong-yan, *et al.* Study on

- automatic flaw inspection system for large caliber precision optical surface[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(10): 1262-1265.
- 王雪,谢志江,孙红岩,等. 大口径精密光学元件表面疵病检测系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(10): 1262-1265.
- [8] FAN Yong, CHEN Nian-nian, GAO Ling-ling, *et al.* Digital detection system of surface defects for large aperture optical elements[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 1032-1036.
- 范勇,陈念年,高玲玲,等. 大口径精密表面疵病的数字化检测系统[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 1032-1036.
- [9] MARKUS C K, JURGEN K, GERD H. Phase measuring deflectometry : a new approach to measure specular freeform surfaces[C]. SPIE, 2004, **5457**: 366-376.
- [10] THORSTEN B, LI Wan-song, CHRISTOPH V K, *et al.* High resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. SPIE, 2004, **5457**: 411-422.
- [11] LIU Yuan-kun, SU Xian-yu, WU Qing-yang. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **25**(1): 29-31.
- 刘元坤,苏显渝,吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J], *光学学报*, 2006, **26**(11): 1636-1640.
- [12] LIU Yuan-kun, PETRI Lehtonen, SU Xian-yu. High-accuracy measurement for small scale specular objects based on PMD with illuminated film [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(2): 459-462.
- [13] HECTOR C, JOSE A. Automatic wavefront measurement technique using a computer display and a charge-coupled device camera[J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(4): 822-826.
- [14] YU Liang, SU Xian-yu. Phase unwrapping algorithm based on relative distance guidance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1235- 1239.
- 余亮, 苏显渝. 一种相对距离导向的相位展开算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1235- 1239.
- [15] JING Hai-long, SU Xian-yu, LIU Yuan-kun, *et al.* Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 3D Shape reconstruction technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 37-42.
- 荆海龙, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析[J]. *光电工程*, 2008, **35**(10): 37-42.