

基于稀疏矩阵的光学元件表面疵病检测

陈晨¹, 王红军^{1*}, 王大森², 田爱玲¹, 刘丙才¹, 朱学亮¹, 刘卫国¹

¹西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021;

²中国兵器科学院宁波分院, 浙江 宁波 310022

摘要 提出了一种基于稀疏矩阵的表面疵病快速拼接方法。该方法采用环形白光光源均匀地照射到被测元件表面, 光经显微散射暗场成像系统后形成暗背景下的亮疵病图像。通过对光学元件的 x, y 方向进行扫描, 得到子孔径拼接图像。基于稀疏矩阵和图像拼接, 对子孔径图像进行快速拼接, 得到全孔径疵病图像。基于最小外接矩形原理, 对图像疵病进行识别和分类, 最终得到 7 个光学元件表面疵病划痕, 其最大长、宽分别为 15.2110 mm 和 0.0297 mm; 麻点有 5 个, 其最大长、宽分别为 0.1089 mm 和 0.0967 mm。将测量得到的划痕宽度与标准划痕宽度进行对比, 得到划痕宽度的相对误差范围为 $-5.00\% \sim 5.50\%$ 。在此基础上, 对实际的光学表面进行检测, 得到光学元件表面疵病信息。

关键词 测量; 疵病检测; 显微散射暗场成像; 图像拼接; 稀疏矩阵; 疵病识别

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404007

Surface Defect Detection of Optical Components Based on Sparse Matrix

Chen Chen¹, Wang Hongjun^{1*}, Wang Dasen², Tian Ailing¹,
Liu Bingcai¹, Zhu Xueliang¹, Liu Weiguo¹

¹Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

²The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo, Zhejiang 310022, China

Abstract A fast mosaic method of surface defects based on sparse matrix is proposed. In the method, a ring white light source is used to irradiate uniformly on the component surface under test, and thus a bright defect image is formed in a dark background by a microscopic scattering dark field imaging system. Then the sub-aperture stitching image is obtained by scanning the x and y directions of optical elements. Based on sparse matrix and image stitching, the fast stitching of sub-aperture images is carried out to obtain a full-aperture defect image. Based on the principle of minimal external rectangle, the image defects are identified and classified. Seven defects on the surface of optical components are finally obtained, in which the largest one has a length of 15.2110 mm and a width of 0.0297 mm. Simultaneously there exist five pock marks, in which the largest one has a length of 0.1089 mm and a width of 0.0967 mm. The relative error range of scratch width is $-5.00\% \sim 5.50\%$ after comparison between the measured and standard scratch widths. On this basis, the actual optical surface is detected, and the surface defect information of optical elements is obtained.

Key words measurement; defect detection; microscopic scattering dark field imaging; image mosaic; sparse matrix; defect recognition

OCIS codes 120.4630; 110.0180; 100.3008

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2018-12-20; 录用日期: 2019-01-04

基金项目: 总装备部项目(JCKY2016208A001)、科技部国际合作项目(2015DFA10360)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1703)

* E-mail: whj0253@sina.com

1 引言

随着光学产业的蓬勃发展,光滑光学元件在各个领域的应用越来越广泛,同时,对光学元件表面质量也提出了越来越高的要求,尤其在天文学、医学和航空航天领域对光学元件表面质量的要求更为苛刻^[1-3]。目前光学元件表面质量的评价主要包括面形偏差、表面粗糙度及表面疵病三个方面。相较于其他缺陷而言,光学元件表面疵病的存在范围小、分布区域广且随机^[4-5],但其对整个元件工作的影响却很集中且破坏力强。此外,大多数光学系统都选用激光作为光源,这时表面疵病的存在就会引起激光损伤,进一步对光学元件造成损伤,影响光学系统的整体性能。表面疵病是指光学表面有效孔径内的局部缺陷,是由制造流程和处理不当造成的。目前,最为常见的光学表面疵病是划痕、麻点和开口气泡^[6-8]。因此通过对光学元件表面疵病的检测,尽可能地减少光学元件加工过程中的损伤是非常重要的。

自20世纪90年代初开始,基于机器视觉的光学元件表面缺陷检测技术就已经逐步发展起来。1996年Raafat等^[9]基于机器视觉系统对玻璃和塑料表面质量进行检测,检测目标主要是表面划痕、气泡、裂纹等;1999年Kim等^[10]提出了一种基于机器视觉的快速检测方法,实现对液晶显示器和等离子体显示面板的在线质量检测;2006年孙丹丹^[11]对光学表面缺陷检测散射成像理论进行了建模及系统分析研究;2007年杨甬英等^[12]基于显微散射暗场成像原理及机器视觉对光学表面疵病进行检测,并建立了数字化的评价系统;2015年王世通^[13]对光学表面缺陷的特性进行了研究,并提出全新的标准比对板设计和制作方法,建立了疵病检测量化的标定系统,实现对疵病的正确度量;同年,Zhang等^[14]针对大孔径光学元件表面缺陷的检测,提出了一种包含两种成像系统的高效精密仪器,一种是由分辨率为 $10\ \mu\text{m}$ 的线扫描相机构成的暗场成像系统,另一种是由分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 的显微镜构成的亮场成像系统;2016年孙佳明^[15]对激光陀螺反射镜基片表面疵病进行了测量,采用旋转多次测量来避免疵病信息的丢失;2016年李阳^[16]提出基于同轴反射光与散射光干涉的光学掩模版微米级疵病检测系统;2017年罗茂等^[17]根据光学元件材料性质的不同对表面疵病进行了多光谱测量。在前人的基础上,本文针对大口径光学

元件表面疵病检测时拼接图像过多、图像数据量过大造成的拼接速度慢等问题,提出了利用稀疏矩阵原理来减少图像数据量以缩短拼接时间的方法,完成对大口径光学元件的快速检测。

2 显微散射暗场成像原理及系统

2.1 显微散射暗场成像原理

理想状态下,当一束平行光入射到光学元件表面上时会发生透射与反射现象。在表面疵病存在的情况下,这种不均匀性引起光束偏离理想的传播方向而向四周散开,即产生了散射。如图1所示,光线 A_1O_1 以一定的角度照射在光学元件表面,产生折射光 O_1A_2 和反射光 O_1A_4 ,在表面疵病存在的情况下,除了产生折射光和反射光之外,还有部分光 O_2A_5 以一定的发散角反射到空气中,即散射光。

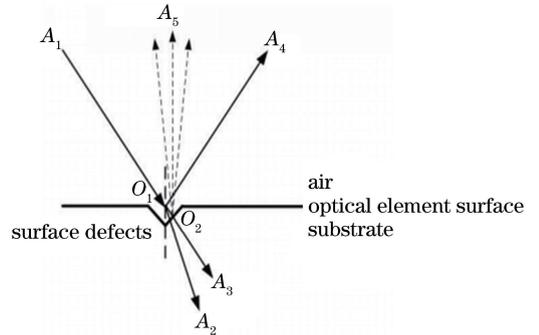


图1 表面疵病产生的散射光示意图

Fig. 1 Schematic of scattered light caused by surface defects

显微散射暗场成像原理图如图2所示。通过控制显微物镜位置、光源角度,利用斜入射使反射光与折射光无法进入成像系统,从而形成暗场;所产生的散射光的表面疵病可视为一个二次光源,散射光通过显微物镜的会聚后照射到互补金属氧化物半导体(CMOS)靶面上,得到放大的表面疵病图像,再经

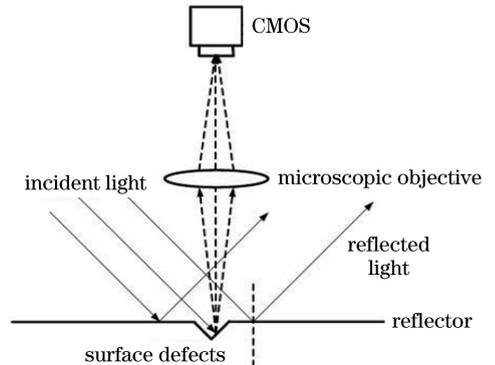


图2 显微散射暗场成像原理图

Fig. 2 Principle diagram of microscopic scattering dark field imaging

过疵病图像处理即可获得其位置与形状信息。

2.2 显微散射暗场成像测量系统

根据显微散射暗场成像原理,建立光学元件表面疵病显微散射暗场成像系统,如图3所示。光源照射被测元件,表面疵病引起的背向散射光进入显微成像系统并会聚在CMOS的靶面上,反射光未进入系统,形成暗场,使疵病图像形成暗背景下的亮像。这种系统受背景光影响较小,分辨率高,系统结构简单。除此之外,疵病中划痕方向与光照方向之间的夹角对疵病的成像质量有很大影响,当光线沿疵病方向照射到光学元件表面疵病上时,光线将遵循反射定律,沿反射方向出射,这时将没有散射光进

入系统,出现疵病的漏检。由于疵病在光学元件表面上的分布是随机的、不规则的,因此,在检测系统中采用环形照明,使各个方向上都有光照,无论疵病的方向如何分布,经环形照明后都能被检测到,避免了疵病的漏检。

要实现对大口径光学元件表面疵病的检测,检测精度需达到微米级,因此需要利用光学系统将子孔径图像进行放大,以得到清晰的疵病图像。由于被检元件的表面口径可达几百毫米,因此必须利用 x 、 y 两个方向的平移控制系统来获得各个子孔径图像,再利用稀疏矩阵原理和图像拼接原理完成对大口径光学元件疵病的拼接。

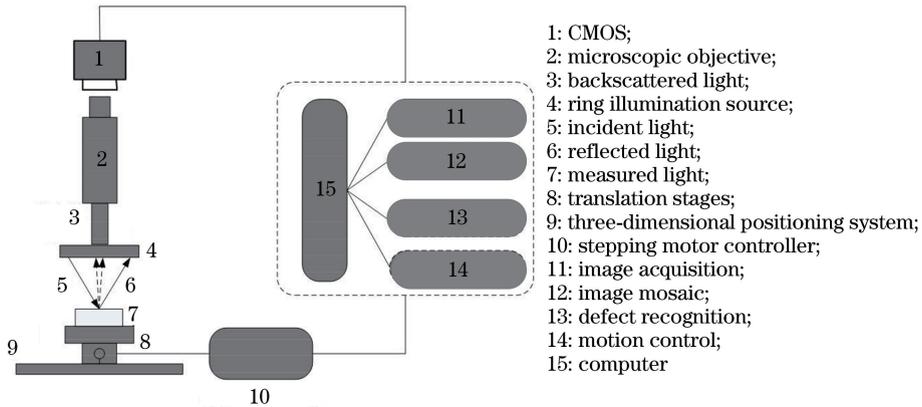


图3 表面疵病显微散射暗场成像系统

Fig. 3 Microscopic scattering dark field imaging system for surface defects

对全口径疵病图像中的疵病进行识别、提取和分类。光学元件表面疵病检测的步骤为:1)对单个疵病图像进行滤波处理,消除图像中的系统噪声和背景噪声;2)对图像进行二值化处理,并利用数学形态学中的腐蚀和膨胀算法对图像中的孔洞进行填充;3)利用稀疏矩阵原理和图像拼接原理对图像进行拼接;4)基于区域识别算法及最小外接矩形对图像中的疵病进行识别,计算图像中疵病的长、宽、面积等信息,并据此对疵病种类进行区分。

3 疵病图像的采集及处理

3.1 全口径疵病图像扫描采集

对大口径光学元件表面疵病进行采集时,通过电控平移台控制元件沿 x 、 y 轴运动,以获得全口径疵病图像采集,扫描路径如图4所示。图中 n 表示平移台沿 x 轴移动了 n 步, m 表示平移台沿 y 轴移动了 m 步。从光学元件的左上角开始,沿 x 轴移动平移台,通过控制平移台移动的距离,确定两幅图像之间的相对位置,平移台每移动一步采集一幅图像。

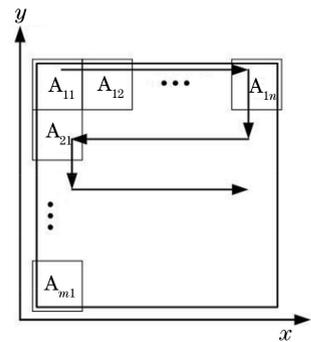


图4 子孔径图像扫描采集路径

Fig. 4 Scanning acquisition path of sub-aperture images

将第一行沿 x 轴正方向采集的图像依次命名为 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} 、 \dots 、 A_{1n} ,再将平移台沿 y 轴每移动一次采集一幅图像,命名为 A_{2n} ,之后沿 x 轴负方向依次移动平移台,每移动一次采集一幅图像,并将采集图像依次命名为 A_{2n} 、 \dots 、 A_{23} 、 A_{22} 、 A_{21} ,以此类推,直到采集完整个光学元件,由此得到了整个光学元件的子孔径疵病图像。根据上述的扫描路径对标准板进行扫描,采集25幅子孔径疵病图像,如图5所示。

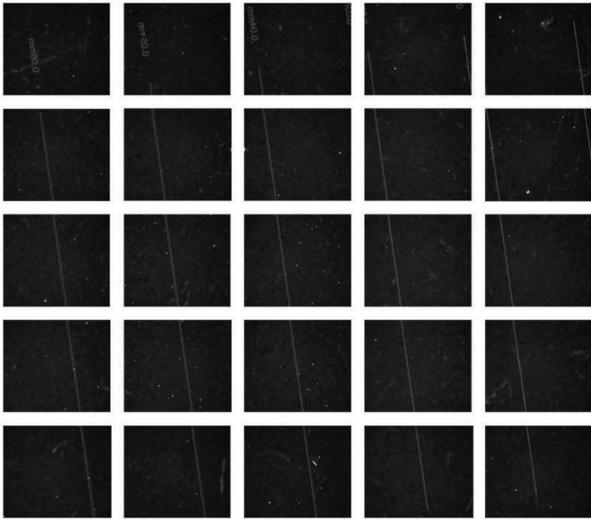


图 5 子孔径疵病图像

Fig. 5 Sub-aperture defect images

3.2 子孔径疵病图像的滤波去噪

在图像采集过程中,由于环境、仪器自身的精度

以及实验人员操作等的影响,不可避免地会在最终采集到的疵病图像上形成噪声。在该测量系统中,图像噪声主要来源于空气中的灰尘和系统中光学元件自身的缺陷。在图像处理中,如果图像中有较大的噪声,则会影响疵病检测的结果。预处理是图像处理的首要阶段,是在目标识别之前对采集到的图像进行改善处理,其主要目的是最大限度地消除各类噪声对图像中目标区域的影响、衰减图像不需要的特征,而将其中重要的特征有选择地突出。有效的图像预处理将大大提高后续图像分析识别的效果。因此,在对疵病图像进行识别之前,先要对图像进行预处理。

图像去噪是图像处理中的第一步,去噪效果的好坏直接影响后续的图像处理工作。目前比较经典的图像去噪算法主要有包括:均值滤波、中值滤波、维纳滤波和高斯滤波^[18]。本文选用疵病图像最中间的图像为例,用以上 4 种滤波方法对疵病图像进行处理,结果如图 6 所示。

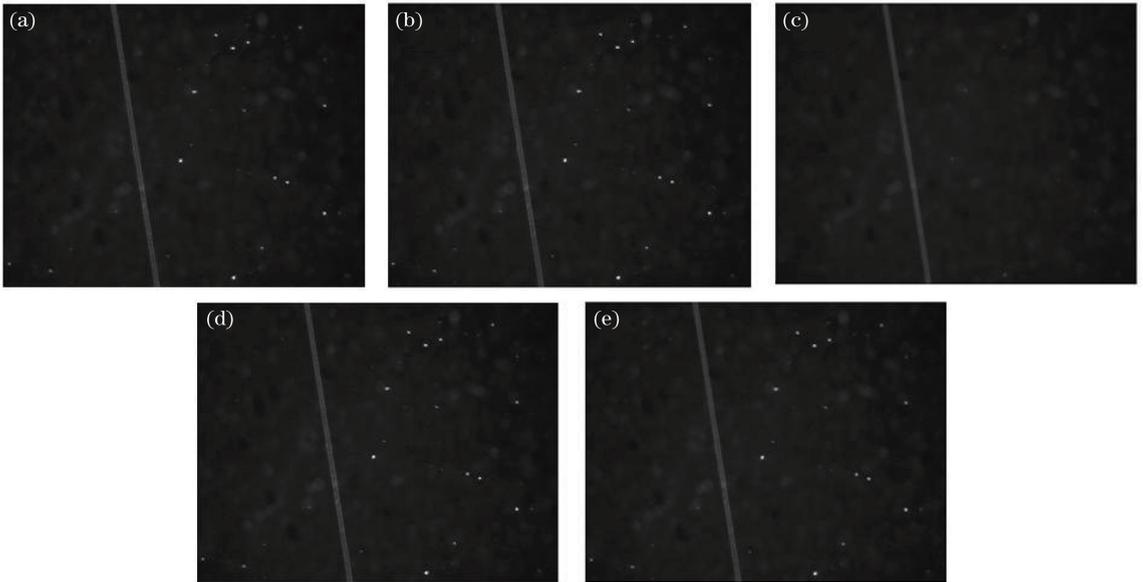


图 6 滤波处理后的图像。(a)原始图像;(b)均值滤波;(c)中值滤波;(d)维纳滤波;(e)高斯滤波

Fig. 6 Images after filtering. (a) Original image; (b) mean filtering; (c) median filtering; (d) Wiener filtering; (e) Gaussian filtering

从原始图像中可以看出图中有很多细小的亮点,这是由灰尘造成的,在进行疵病识别时应将这些噪声滤掉。使用 4 种滤波方法对图像进行处理,从图 6 中可以看出:均值滤波只是将图像模糊化,去噪效果并不明显;中值滤波主要是对椒盐噪声进行处理,处理效果较好;维纳滤波和高斯滤波对图像中亮点的去除效果较差。因此,本文采取中值滤波对图像进行处理。

3.3 图像的二值化

在图像的预处理过程中,图像二值化的目的是将

图像中的特征目标从图像背景中提取出来。其原理是通过合适的方法选取合适的阈值,然后遍历整个图像,比较图像中的灰度值与阈值,将像素值大于阈值的像素点的值设为 1,否则设为 0,这时图像中就只有 0 和 1 两种像素,称为二值图像。例如输入图像为 $f(x, y)$,输出图像为 $g(x, y)$,阈值为 t ,则有

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > t \\ 0, & f(x, y) \leq t \end{cases} \quad (1)$$

在测量时,光学元件底部灰尘的不均匀性造成测量图像灰度值分布不均匀。在进行图像二值化

时,当灰度值等于或大于疵病灰度值时,将噪声视为目标提取出来。图像二值化结果如图 7(a)所示。

3.4 图像的数字形态学操作

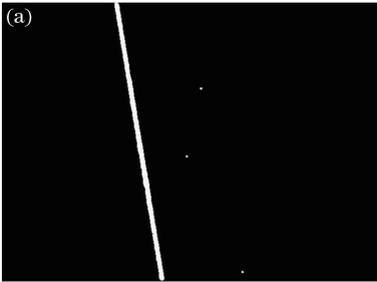
数学形态学是一门建立在格论和拓扑学基础之上的图像分析学科,是数学形态学图像处理的基本理论。在图像的采集过程中,环境、光照不均匀等因素会造成采集到的划痕、麻点亮度分布不均匀。在图像二值化的过程中,划痕、麻点会出现空洞或将噪声视为目标提取出来,这些空洞和噪声会影响疵病检测的种类和数量。因此,需要对图像进行数学形态学操作,以填充图像中的空洞并消除图像中的噪声。本文主要使用腐蚀和膨胀、开运算和闭运算。

腐蚀是一种最基本的数学形态学运算,其作用是消除图像的边界点,使得边界向内部收缩。通过腐蚀可以消除较小且没有意义的干扰物。假设 F 为一个二值图像, X 为其连通域, S 为结构元素,当 S 的原点移动到 (x, y) 处时,将其记为 S_{xy} ,则图像中的 X 被 S 腐蚀的表达式为

$$E = \{x, y \mid S_{xy} \subseteq X\}, \quad (2)$$

式中: E 为腐蚀后的图像。此时如果 S 完全包含在 X 中,则在腐蚀后的图像中该点为 1,否则为 0。

膨胀是腐蚀的反操作,是将背景点中与目标区域所接触的部分合并到目标区域中,使得目标区域的边界向外扩张的一个过程。膨胀可以消除目标区域中的一些小颗粒噪声,但主要是用来填补目标区域中的空白。图像中的 X 被 S 膨胀的运算表达



式为

$$D = F \oplus S = \{x, y \mid S_{xy} \cap X \neq \emptyset\}, \quad (3)$$

式中: \emptyset 为空集; D 为膨胀后的图像。当 S 的原点移动到点 (x, y) 时,如果 S 中至少包含一个像素值为 1 的点,则在膨胀后的图像中该点为 1,否则为 0。

在叙述膨胀、腐蚀的原理时,可以明显地看到腐蚀运算和膨胀运算都存在缺陷。经过膨胀处理的图像,目标区域的面积会大于原来的面积;而经过腐蚀处理后的图像,目标物的面积会小于原来的面积。因此,在数学形态学的操作中提出了开运算和闭运算。开运算的实质是用同一个结构元素对图像先进行腐蚀、再进行膨胀的运算,其定义式为

$$F \circ S = (F \ominus S) \oplus S, \quad (4)$$

式中: \circ 表示开运算; \oplus 表示前者被后者膨胀; \ominus 表示前者被后者腐蚀。闭运算与开运算正好相反,是对图像先进行膨胀、再进行腐蚀的运算,其定义式为

$$F \bullet S = (F \oplus S) \ominus S, \quad (5)$$

式中: \bullet 表示闭运算。开运算可以基本保持疵病目标的原有大小不变,而且可以去除小颗粒噪声,使图像中只留下疵病特征目标的相关像素。闭运算通常用来连接断开的邻近目标和填充目标区域内的细小空洞,同时具有不明显改变目标区域大小的优点,这对后续利用最小外接矩形对块状疵病区域进行定位和评价有着巨大作用。因此,利用闭运算对图像进行形态学处理,处理后的图像如图 7(b)所示。

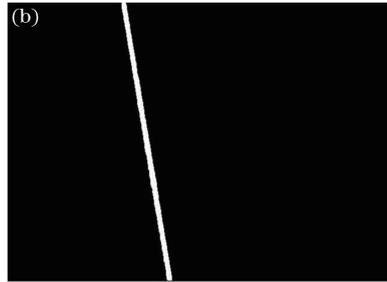


图 7 预处理图像。(a)二值化图像;(b)形态学处理后的图像

Fig. 7 Preprocessed images. (a) Binary image; (b) morphologically processed image

4 子孔径疵病图像拼接及识别

4.1 子孔径图像拼接

图像拼接是大口径光学元件表面疵病检测最关键的一步。在大口径光学元件检测中,由于光源照射范围、显微成像系统的口径、CCD 视场的限制,无法经过一次成像就完成对大口径光学元件表面疵病的检测。在本系统中,采用多幅图像拼接的技术来

完成对大口径光学元件表面疵病的检测。为了实现快速拼接,将稀疏矩阵原理与图像拼接原理相结合,完成对大口径光学元件表面疵病的检测。

在大口径光学元件的检测中,由于口径较大、拼接图像太多、拼接的数据量太大,造成图像拼接时速度缓慢,拼接出的图像数据量过大,导致后续疵病识别速度缓慢,影响整个疵病检测过程。疵病在整个光学元件表面只占一小部分,疵病呈亮

像,其余为暗,这时可以用稀疏矩阵的方式来保存疵病图像,大大降低图像的数据量,在进行图像运算时更加快速,从而提高图像拼接和图像处理的速度。

本文利用平移拼接和稀疏矩阵拼接两种拼接方法对图像进行拼接。平移拼接是将疵病图像按照其

位置关系进行拼接,拼接图像如图 8(a)所示。稀疏矩阵拼接是先利用稀疏矩阵原理将图 7 中的疵病图像保存为稀疏矩阵,对无疵病的图像利用稀疏矩阵进行快速拼接,对有疵病的图像利用图像拼接原理将疵病图像拼接为全孔径疵病图像,全孔径疵病拼接图像如图 8(b)所示。

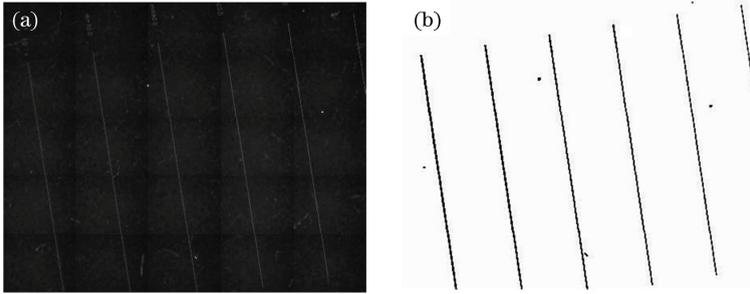


图 8 拼接图像。(a)平移拼接图像;(b)稀疏矩阵拼接图像

Fig. 8 Mosaic images. (a) Translation mosaic image; (b) sparse matrix mosaic image

4.2 全孔径疵病图像的识别及评价

要对疵病进行评价,首先要对图像像素进行标定,然后再识别疵病的尺寸信息。在前面的工作中,已经提取出了一个完整的、轮廓清晰的疵病图像。从图 8 中可以看出表面分布随机,形状不规则,对疵病尺寸进行测量时采用最小外接矩形算法,该算法的原理是将图像物体在 90° 范围内等间隔地旋转,每次记录其轮廓在坐标系方向上的外接矩形参数和外接矩形面积,当图像外接矩形的面积最小时,即为最小外接矩形。对图像进行疵病识别的结果如图 9 所示。

表 1 疵病结果统计表

Table 1 Statistical table of defect results

Defect serial number	Length / mm	Width / mm	Area / mm^2	Defect type
1	0.0455	0.0414	0.0019	Pockmark
2	13.7059	0.0626	0.8580	Scratch
3	14.3088	0.0494	0.7069	Scratch
4	0.1089	0.0967	0.0105	Pockmark
5	14.8946	0.0412	0.6137	Scratch
6	0.1773	0.0397	0.0070	Scratch
7	15.2110	0.0297	0.4518	Scratch
8	0.0630	0.0513	0.0032	Pockmark
9	15.1866	0.0211	0.3204	Scratch
10	0.0233	0.0233	0.0005	Pockmark
11	0.1067	0.0759	0.0081	Pockmark
12	4.9350	0.0095	0.0469	Scratch

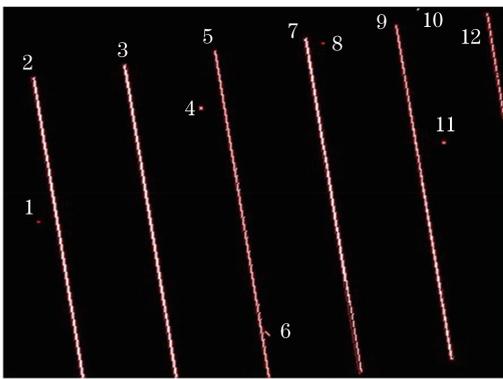


图 9 疵病识别图像

Fig. 9 Defect recognition image

计算最小外接矩形的长、宽、面积,即为图像中疵病的长、宽、面积,再利用疵病的长宽比,判断疵病类型。美国的表面疵病标准(美军标 MIL-PRP-13830 及 MIL-O-13830)规定疵病横向长宽比小于 4:1 的为麻点,反之为划痕。由此对疵病的类型进行了区分。检测结果如表 1 所示。

表 1 给出了标准划痕板上测得的划痕、麻点的长、宽、面积、划痕类型等信息,从表中可以得到测量区域的疵病个数为 12,其中划痕有 7 个,麻点有 5 个。其中最大的划痕长为 15.2110 mm,宽为 0.0297 mm;最小划痕长为 0.1773 mm,宽为 0.0397 mm;最大的麻点长为 0.1089 mm,宽为 0.0967 mm;最小的麻点长为 0.0233 mm,宽为 0.0233 mm。

4.3 误差分析

标准值是指采用多种可靠的分析方法,由具有丰富经验的分析人员经过多次测定得出的比较准确的结果。测量值指使用测量仪器和工具,通过测量和计算得到一系列测量数据。采用标准划痕板作为

被测件,经过显微散射暗场成像系统及计算机处理得到划痕的测量结果。测量仪器及计算过程中的误差,造成测量值与真实值之间存在误差。由于标准板只给出了划痕宽度的标准值,因此只对划痕的宽度误差进行计算,误差大小如表 2 所示。

表 2 划痕宽度误差

Table 2 Scratch width errors

Serial number	Measured value / mm	Standard value / mm	Error / mm	Relative error / %
2	0.0626	0.06	0.0026	4.34
4	0.0494	0.05	-0.0006	-1.20
6	0.0412	0.04	0.0012	3.00
9	0.0297	0.03	-0.0003	-1.00
11	0.0211	0.02	0.0011	5.50
14	0.0095	0.01	-0.0005	-5.00

表 2 中给出了划痕宽度的测量值、标准值、两者之间的误差及相对误差。可以看出:在测量宽度为

0.06 mm 的划痕时,误差最大;在测量宽度为 0.03 mm 的划痕时,误差最小;在测量宽度为 0.03 mm 时的划痕时,相对误差最小;在测量宽度为 0.02 mm 时的划痕时,相对误差最大;总体的误差范围为 $-0.0003 \sim 0.0026$ mm,相对误差范围为 $-5.00\% \sim 5.50\%$ 。

上述是对标准划痕板进行处理后得到表面疵病的信息。在此基础上,对光学元件表面疵病也进行了检测。采用 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的光学元件,按照上述的扫描路径采集 16 幅子孔径图像。以其中两幅图像为例,如图 10 所示。对图像进行上述一系列的处理,得到处理后的图像如图 11 所示;然后利用稀疏矩阵及图像拼接原理对图像进行拼接,得到完整的疵病图像,如图 12(a)所示;最后对拼接后的图像进行疵病识别及检测,得到疵病的长、宽信息。疵病识别结果如图 12(b)所示,检测结果如表 3 所示。

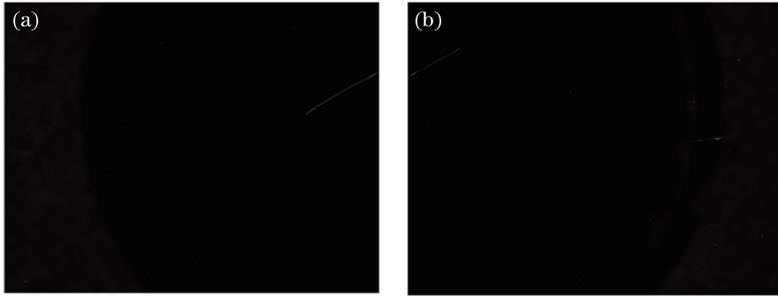


图 10 光学元件子孔径疵病图像。(a)图像 1;(b)图像 2

Fig. 10 Sub-aperture defect images of optical element. (a) Image No. 1; (b) image No. 2

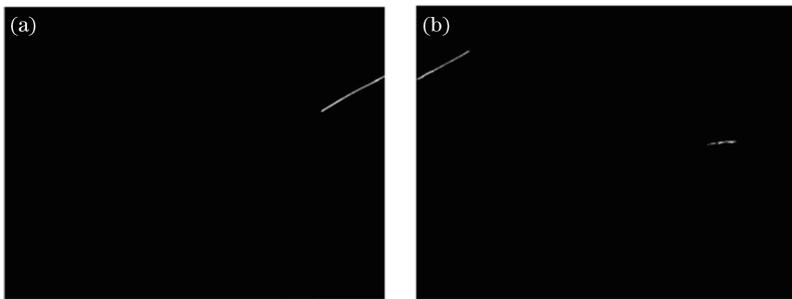


图 11 处理后的光学元件的子孔径图像。(a)图像 1;(b)图像 2

Fig. 11 Sub-aperture images of processed optical elements. (a) Image No. 1; (b) image No. 2

表 3 光学元件检测结果统计表

Table 3 Statistical table of test results of optical elements

Defect serial number	Length / mm	Width / mm	Area / mm ²	Defect type
1	1.3675	0.0235	0.0322	Scratch
2	0.3092	0.0218	0.0067	Scratch
3	0.4667	0.0263	0.0122	Scratch

从表 3 中可以看出光学元件表面疵病共有 3 个划痕。表中最大划痕的长和宽分别为 1.3675 mm 和 0.0235 mm,最小划痕的长和宽分别为 0.3092 mm 和 0.0218 mm。

5 结 论

光学元件因其检测口径大、检测精度高、检测速

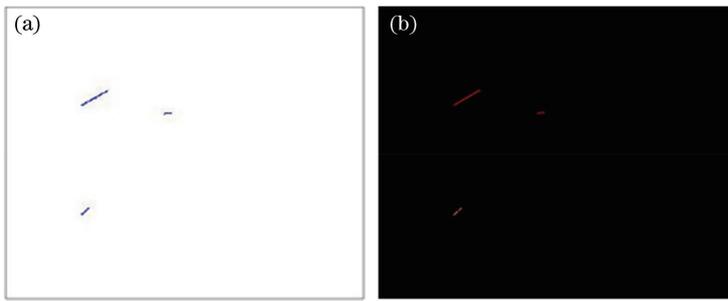


图 12 拼接图像及疵病识别图像。(a)稀疏矩阵拼接图像;(b)疵病识别图像

Fig. 12 Mosaic image and defect recognition images. (a) Sparse matrix mosaic image; (b) defect recognition image

度要求高等特点,一直是光学元件检测的难点,本文采用了显微散射暗场成像系统,通过高精度、高速度的图像采集得到光学元件子孔径拼接图像;利用稀疏矩阵和图像拼接原理对获得的 x 、 y 两方向的子孔径图像进行快速拼接,得到了全孔径表面疵病图像,大大提高了疵病拼接的速度;利用最小外接矩形原理对图像中的疵病进行识别和分类,完成了对光学元件表面疵病的快速精准化测量。首先对标准划痕板进行检测,得到的划痕有 7 个,最大长、宽分别为 15.2110 mm 和 0.0297 mm;麻点有 5 个,最大长、宽分别为 0.1089 mm 和 0.0967 mm。将划痕的宽度与标准宽度进行对比并计算误差,得到划痕宽度的测量误差范围为 $-0.0003 \sim 0.0026$ mm,相对误差范围为 $-5.00\% \sim 5.50\%$ 。基于此,对光学元件表面疵病进行测量,得到了光学元件表面疵病信息。测得表面疵病共有 3 个划痕,最大划痕的长和宽分别为 1.3675 mm 和 0.0235 mm,最小划痕的长和宽分别为 0.3092 mm 和 0.0218 mm。

参 考 文 献

- [1] Yang X Y. Microscopic scattering detection method for super smooth surface defects[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. 杨星宇. 超光滑表面疵病的显微散射检测方法[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [2] Zhang B. Scattering scanning method for surface defect detection of optical components[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014. 张彬. 散射扫描法光学元件表面疵病检测技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [3] Zhang J W. Research on optical surface defect detection system and image processing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2016. 张家伟. 光学表面疵病检测系统及图像处理技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [4] Xiang Y C, Lin Y X, Ren Z Y. Study on surface defect detection method for optical element[J]. Optical Instruments, 2018, 40(1): 79-87. 向弋川, 林有希, 任志英. 光学元件表面缺陷检测方法研究现状[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 79-87.
- [5] Liberati F. Measure of surface and bulk defects in any transmitting or reflecting optical component[J]. Proceeding of SPIE, 1993, 1781: 170-175.
- [6] Klingsporn P E. Determination of the diameter of an isolated surface defect based on Fraunhofer diffraction [J]. Applied Optics, 1980, 19(9): 1435-1438.
- [7] Endoh H, Hiwatashi Y, Hoshimiya T. Nondestructive evaluation of simulated and actual surface defects using a photoacoustic microscope[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3740: 55-56.
- [8] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. Ruan Q Q, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2011. 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [9] Raafat H, Taboun S. An integrated robotic and machine vision system for surface flaw detection and classification[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 30(1): 27-40.
- [10] Kim S W, Yoon D S. Rapid defect inspection of display devices with optical spatial filtering[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3824: 255-261.
- [11] Sun D D. Study on the characteristics of precise surface defects and optical microscopic scattering imaging system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 孙丹丹. 精密表面缺陷特性及光学显微散射成像系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [12] Yang Y Y, Lu C H, Liang J, et al. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1031-1038. 杨甬英, 陆春华, 梁蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报,

- 2007, 27(6): 1031-1038.
- [13] Wang S T. Theoretical modeling and systematic analysis of scattering imaging for precision surface defect detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
王世通. 精密表面缺陷检测散射成像理论建模及系统分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [14] Zhang Z T, Tao X, Xu D, *et al.* Surface flaws detection algorithms for large aperture optical element [C] // International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2015: 485-490.
- [15] Sun J M. Research on the dark field scattering microscopic detection system for surface defects of laser gyro reflector substrate[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2016.
孙佳明. 激光陀螺反射镜基片表面疵病暗场散射显微检测系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [16] Li Y. Detection and quantitative evaluation of surface defects of super smooth spherical optical elements [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
李阳. 超光滑球面光学元件表面缺陷检测及定量化评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [17] Luo M, Bu Y, Xu J H, *et al.* Optical element surface defect measurement based on multispectral technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0104001.
罗茂, 步扬, 徐静浩, 等. 基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0104001.
- [18] Shao J, Ye J F, Wang S, *et al.* Background noise suppress method for hydroxyl tagging velocimetry measurement in combustion flow field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0309001.
邵珺, 叶景峰, 王晟, 等. 基于燃烧场羟基示踪测速的噪声去除方法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0309001.