

## 基于子孔径特征数据集的光学表面疵病拼接方法

王颖茹, 王红军\*, 朱学亮, 刘丙才, 岳鑫, 田爱玲

西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021

**摘要** 针对大口径光学元件表面疵病检测中子孔径图像数量较多、在全孔径拼接过程中存储及处理数据量大的问题,提出了一种基于子孔径特征数据集的光学表面疵病拼接方法。该方法由子孔径图像及其重叠区域图像中提取疵病特征数据构建子孔径特征数据集,并通过特征数据集实现子孔径相对位置关系确定及全孔径疵病拼接。通过实验验证,本文方法可以有效实现全孔径疵病目标拼接,并且与基于模板匹配法的全孔径图像拼接方法相比,两种方法获得的全孔径疵病图像的疵病检测结果基本一致,而本文方法在拼接过程中处理的子孔径特征数据集的数据量为 3.26 MB,获得的全孔径疵病数据转换出的全孔径疵病图像的数据量为 20.9 kB,有效降低了全孔径拼接过程中的处理及存储数据量。

**关键词** 疵病检测; 特征提取; 子孔径拼接; 稀疏矩阵

**中图分类号** TN247

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231154

## 1 引言

随着现代光学技术的发展,精密光学元件构成的光学系统在航空航天、工业等领域的应用愈发广泛<sup>[1-3]</sup>。而在光学元件生产、加工及使用过程中造成的元件表面局部微观缺陷<sup>[4-5]</sup>会导致光学系统光束质量下降,降低元件的激光损伤阈值,影响系统成像质量甚至威胁系统运行安全<sup>[6-7]</sup>。因此,对光学元件表面进行疵病检测有着十分重要的意义。

目前,常见的非接触式检测方法有滤波成像法<sup>[8]</sup>、全内反射法<sup>[9]</sup>以及显微散射暗场成像法等。其中,显微散射暗场成像法基于光学表面疵病散射特性结合子孔径图像拼接实现大口径光学元件表面疵病检测,具备检测效率高、检测结果直观等特点,并且随着机器视觉技术在疵病检测领域的广泛应用,暗场成像法逐渐成为光学表面疵病自动化检测的重要方法<sup>[10]</sup>。而在利用显微暗场成像法进行疵病检测时,成像系统的视场与分辨率无法兼得,为获得高分辨率的疵病图像,采集时的物方视场将有所限制,对于划痕类型疵病,其所成的像通常会跨越多个子孔径区域,只有对疵病所处的子孔径进行拼接,才能保证光学表面疵病信息的完整性。因此,对疵病图像的准确无错位拼接是表面疵病信息完整检测的关键一步。2007年杨雨英等<sup>[11]</sup>提出一种光学元件表面疵病数字化评价系统,利用边缘拓展法拼接获得全孔径疵病图像并进行疵病检测,通过实验分析该系统

对疵病可达到微米量级分辨率。2013年Liu等<sup>[12]</sup>提出了一种基于重叠区域特征的多循环图像拼接算法,解决由于重叠区域无疵病特征或仅含贯穿划痕特征造成的误拼接问题。2015年Yin等<sup>[13]</sup>对从暗场图像中利用尺度不变特征变换(SIFT)算法提取出的特征匹配点对,提出利用并行聚类算法筛选出最佳特征匹配点对来计算变换矩阵实现图像的快速准确拼接。2019年陈晨等<sup>[14]</sup>提出一种基于稀疏矩阵的光学元件表面疵病检测方法,该方法利用稀疏矩阵和图像拼接原理实现子孔径图像的快速拼接。2020年Chen等<sup>[15]</sup>提出一种基于目标追踪和自适应扫描路径修正的疵病图像拼接方法,实现了子孔径图像的准确拼接并完成疵病信息检测。上述检测方法在子孔径图像匹配拼接过程中大部分都是基于采集到的疵病图像进行处理,但对于大口径精密光学元件,其表面疵病较少且分布离散,在子孔径图像匹配拼接时,图像存储及处理数据量大,且随着检测口径的增加而增加,会消耗大量的检测时间。

因此,针对上述问题本文提出一种基于子孔径特征数据集的表面疵病拼接方法,该方法首先提取子孔径图像及其重叠区域图像的疵病特征数据构建子孔径特征数据集。然后基于构建的特征数据集进行子孔径匹配关系确定及子孔径疵病拼接,得到全孔径疵病数据。最后通过实验验证本文方法的可行性并获取被测光学元件表面的疵病信息。

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-09-25; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2023-11-13

基金项目: 基础科研项目(JCKY2020426B009)、陕西省科技厅秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-066)

通信作者: \*whj0253@sina.com

## 2 子孔径特征数据集构建

子孔径特征数据集是获取全孔径区域疵病的基础。首先对采集到的子孔径图像进行预处理得到二值化的子孔径图像,并通过图像剪裁获取对应的重叠区域图像,然后提取二值化子孔径图像及其重叠区域图像中包含的疵病特征数据来构建相应的子孔径特征数

据集,用于子孔径类型区分、子孔径间匹配关系确定以及子孔径疵病拼接。构建的子孔径特征数据集中主要包含疵病数量、疵病类型、疵病形状特征以及相对位置特征等数据。将各个子孔径及其重叠区域图像中提取出的特征数据利用单元数组以一行作为一个子孔径数据存储单元依次存储,从而完成子孔径特征数据集的构建,对应的子孔径特征数据单元结构如图 1 所示。

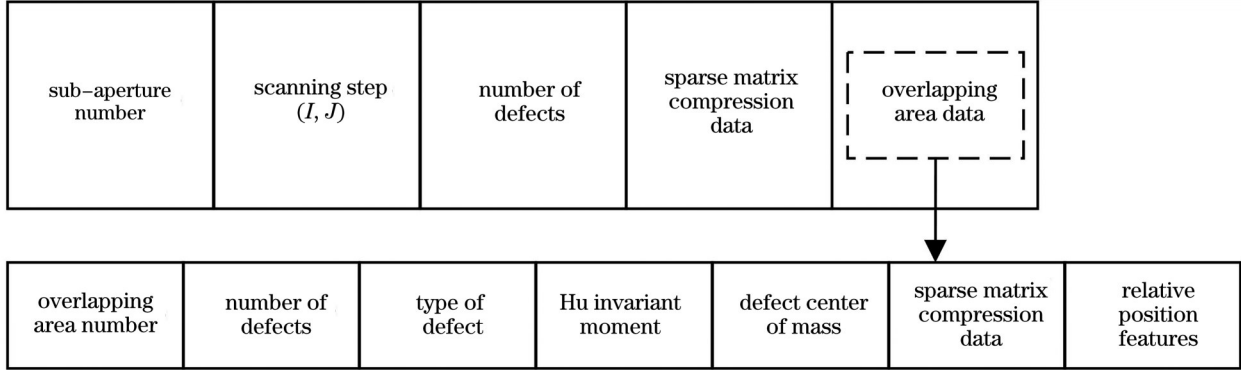


图 1 子孔径特征数据单元结构图

Fig. 1 Sub-aperture feature data cell structure

### 2.1 疵病数量及疵病类型数据

对于采集到的光学元件表面子孔径图像,通过统计各个子孔径区域内包含的疵病数量可以有效区分包含疵病和未包含疵病的子孔径,而疵病类型则可以作为重叠区域类型区分的依据。

利用连通区域标记法对二值化子孔径图像及其重叠区域图像中的疵病目标进行八邻域检测并进行标记,直至整幅图像检测完成,统计标记的数量即为该区域的疵病数量。其次,对图像中标记出的疵病目标利用最小外接矩形算法(MER)获得疵病目标区域最小外接矩形的长宽值,并计算长宽比进行疵病类型判断,依据美国军用标准 MIL-PRF-13830B 规定,将长宽比大于等于 4:1 的疵病视为划痕,小于则为麻点。

### 2.2 疵病形状特征数据

不变矩是一种常用的区域形状描述符,具备平移、旋转以及尺度不变性<sup>[16]</sup>。因此,利用 Hu 不变矩对疵病区域进行描述,计算各个疵病区域的 7 个 Hu 不变矩值来表示疵病的形状特征。

对于数字图像  $f(x, y)$ , 其  $p + q$  阶矩定义为

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y). \quad (1)$$

相应的  $p + q$  阶中心矩定义为

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y), \quad (2)$$

式中:  $x_0 = m_{10}/m_{00}$ ,  $y_0 = m_{01}/m_{00}$  为利用零阶矩和一阶矩计算出的区域质心。

对其进行归一化,归一化中心矩定义为

$$\eta_{pq} = \mu_{pq} / \mu_{00}^\gamma, \quad (3)$$

式中:  $\gamma = 1 + (p + q)/2$ ,  $p + q = 2, 3, \dots$ 。

利用归一化二阶、三阶中心矩得到 7 个 Hu 不变矩计算公式:

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}, \quad (4)$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \quad (5)$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2, \quad (6)$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2, \quad (7)$$

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) \left[ (\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \left[ 3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right], \quad (8)$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02}) \left[ (\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}), \quad (9)$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) \left[ (\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \left[ 3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right]. \quad (10)$$

### 2.3 疵病相对位置特征

对于部分麻点疵病,其形状相似程度较高,但不同麻点疵病在图像区域中的位置是存在差异的,通过计算疵病质心坐标与所属重叠区域图像长宽尺寸的比值得到每个疵病的相对位置特征,从而对疵病进行区分。

疵病相对位置计算公式为

$$x'_0 = \frac{x_0}{l}, y'_0 = \frac{y_0}{w}, \quad (11)$$

式中:  $x_0, y_0$  为疵病质心的横、纵坐标值;  $l, w$  为重叠区域图像的长、宽值。

## 2.4 稀疏矩阵压缩存储数据

由于精密光学元件表面疵病较少且分布离散,经过图像二值化预处理后,少量的疵病区域像素值为1,大量的背景区域像素值为0。因此,利用稀疏矩阵压缩存储方式保存图像中非零元素的值及所在位置,以减少数据存储量。稀疏矩阵压缩存储采用三元组法,三元组结点定义为 $[r, c, a_{rc}]$ ,其中, $r$ 表示行号, $c$ 表示列号, $a_{rc}$ 表示元素值,二维数组中的每一个非零元素由一个三元组结点唯一确定,从而实现稀疏矩阵的压缩存储。

## 3 基于子孔径特征数据集的疵病拼接

全孔径区域疵病拼接主要包括子孔径区域匹配及子孔径疵病拼接。首先基于构建的子孔径特征数据集进行子孔径间匹配关系的确定,然后利用各子孔径间匹配关系及压缩存储的稀疏矩阵数据实现子孔径疵病拼接。

### 3.1 基于特征数据集的子孔径匹配

依据子孔径重叠区域特征数据进行子孔径匹配关系确定。首先判断出存在匹配关系的子孔径重叠区域,然后利用匹配重叠区域内的疵病特征构建最优疵病匹配点对集合并完成偏移量参数计算。

#### 3.1.1 重叠区域匹配关系确定

相邻子孔径的重叠区域存在匹配关系,因此利用重叠区域所属子孔径对应的扫描步数进行匹配关系确定。从重叠区域数据单元中筛选出存在疵病特征的重叠区域,并根据重叠区域编号中的字符特征判断对应重叠区域在所属子孔径中的位置,将其分为左右相邻类型和上下相邻类型,然后在各类型中根据重叠区域对应的子孔径扫描步数进行重叠区域编号顺序调整,从而得到重叠区域间的匹配关系。其中,子孔径扫描步数对应子孔径图像采集时平移台的移动步数用 $(I, J)$ 表示, $(I=0, 1, 2, \dots; J=0, 1, 2, \dots)$ ,其中, $I$ 表示沿 $X$ 轴方向移动的步数, $J$ 表示沿 $Y$ 轴方向移动的步数。如图2所示,以 $4 \times 4$ 孔径区域序列为例,其中各个子孔径的扫描步数表示如下:子孔径区域1的扫描步数为 $(0, 0)$ ,子孔径区域2的扫描步数为 $(1, 0)$ ,其余孔径区域依次类推。则左右相邻类型和上下相邻类型重叠区域编号顺序调整步骤如下。

1) 上下相邻类型重叠区域。根据扫描步数中纵向扫描步数 $I$ 值确定各个重叠区域所属子孔径对应的采集列数,再分别对各列中的纵向扫描步数 $J$ 值由小到大排序,并根据排序结果调整对应重叠区域编号的顺序,将调整完顺序的下区域编号整理为一行,将上区域编号整理为一行,按列拆分,每一列拆分结果中包括一个下区域编号,一个上区域编号,共同组成一组存在匹配关系的重叠区域匹配对。

2) 左右相邻类型重叠区域。根据扫描步数中纵

$A_{0,0}(1)$	$A_{1,0}(2)$	$A_{2,0}(3)$	$A_{3,0}(4)$
$A_{0,1}(8)$	$A_{1,1}(7)$	$A_{2,1}(6)$	$A_{3,1}(5)$
$A_{0,2}(9)$	$A_{1,2}(10)$	$A_{2,2}(11)$	$A_{3,2}(12)$
$A_{0,3}(16)$	$A_{1,3}(15)$	$A_{2,3}(14)$	$A_{3,3}(13)$

图2  $4 \times 4$ 子孔径区域序列图

Fig. 2 Sub-aperture area array of  $4 \times 4$

向扫描步数 $J$ 值确定各个重叠区域所属子孔径对应的采集行数,再分别对各行中的横向扫描步数 $I$ 值由小到大排序,并根据排序结果调整对应重叠区域编号的顺序,将调整完顺序的右区域编号整理为一行,将左区域编号整理为一行,按列拆分,每一列拆分结果中包括一个右区域编号,一个左区域编号,共同组成一组存在匹配关系的重叠区域匹配对。

#### 3.1.2 重叠区域偏移量参数计算

对存在匹配关系的两重叠区域,从重叠区域数据单元中提取各区域包含的疵病特征数据。通过计算重叠区域间疵病Hu不变矩特征及相对位置特征的欧氏距离<sup>[17]</sup>进行疵病相似性度量,确定出重叠区域间的相似疵病对并构成最优疵病匹配点对集合,然后基于匹配点对集合完成偏移量参数计算。

以两相邻子孔径重叠区域为例,利用疵病的7个Hu不变矩特征数据和2个相对位置特征数据共同构建相似性度量特征数据 $F$ ,则待匹配孔径1重叠区域中第 $i$ 个疵病的第 $n$ 个特征值表示为 $F_{1i}(n)$  $(i=1, 2, \dots, n_{num1}; n=1, 2, \dots, 9)$ , $n_{num1}$ 为重叠区域中包含的疵病数量。待匹配孔径2重叠区域中第 $j$ 个疵病的第 $n$ 个特征值表示为 $F_{2j}(n)$  $(j=1, 2, \dots, n_{num2}; n=1, 2, \dots, 9)$ , $n_{num2}$ 为重叠区域中包含的疵病数量。对两重叠区域中疵病特征采用欧氏距离进行相似性度量,欧氏距离定义式为

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^9 [F_{1i}(n) - F_{2j}(n)]^2}, \quad (12)$$

式中: $D_{ij}$ 表示两疵病间相似性度量结果,数值越小代表两疵病越相似。重复上述判断过程,直到待匹配孔径1重叠区域中 $n_{num1}$ 个疵病均与待匹配孔径2重叠区域中 $n_{num2}$ 个疵病完成匹配,并利用匹配疵病对的质心坐标构成最优疵病匹配点对集合。

基于求解出的最优疵病匹配点对集合,对重叠区

域水平、垂直方向上的偏移量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  进行计算, 计算公式为

$$\Delta x = \sum_{k=1}^N \frac{x_{1k} - x_{2k}}{N}, \quad (13)$$

$$\Delta y = \sum_{k=1}^N \frac{y_{1k} - y_{2k}}{N}, \quad (14)$$

式中:  $x_{1k}$ 、 $x_{2k}$  分别表示最优疵病匹配点对集合中第  $k$  组匹配点对中匹配点在待匹配孔径 1、待匹配孔径 2 重叠区域中的横坐标;  $y_{1k}$ 、 $y_{2k}$  分别表示最优疵病匹配点对集合中第  $k$  组匹配点对中匹配点在待匹配孔径 1、待匹配孔径 2 重叠区域中的纵坐标;  $N$  表示重叠区域最优疵病匹配点对集合中匹配点对的个数。

### 3.2 基于特征数据集的子孔径疵病拼接

基于子孔径重叠区域疵病特征将子孔径区域分为含有其他疵病特征类型、仅含划痕特征类型以及无疵病特征类型。优先拼接重叠区域含有疵病特征子孔径区域, 并且对于既与左边相邻子孔径区域匹配又与上边相邻子孔径区域匹配的情况, 优先选择含有其他疵病特征类型的重叠区域为主拼接方向。而对于重叠区域无疵病特征类型的子孔径则根据理论位置确定子孔径的拼接位置。在子孔径疵病拼接时, 首先利用子孔径对应的扫描步数计算出的初始位置及其重叠区域偏移量结果计算子孔径间准确的相对位置, 其次将子孔径特征数据集中存储的疵病稀疏矩阵压缩存储数据转换到对应拼接位置完成疵病拼接, 最后将全孔径下疵病拼接结果转换成全孔径疵病图像显示。

要确定各个子孔径区域间准确的位置关系, 首先就要确定各个子孔径在全局坐标系下的初始位置, 存储在子孔径特征数据集中的扫描步数  $(I, J)$  数据表示每幅子孔径图像在采集时平移台沿  $X$ 、 $Y$  轴方向移动的扫描步数, 则每个子孔径在全局坐标系下的初始位置表示为  $[I \cdot (L - \Delta M), J \cdot (W - \Delta M)]$ , 其中  $\Delta M$  为剪裁的重叠区域宽度,  $L$ 、 $W$  为子孔径区域的长、宽值。然后依据子孔径重叠区域计算出的偏移量调整子孔径的初始位置, 从而得到各个子孔径之间准确的位置

关系。

在拼接过程中, 考虑偏移量的累积问题。假设相邻子孔径重叠区域总的偏移量为  $\Delta d_n$ , 各个子孔径间相对位置与偏移量对应关系如图 3 所示, 以图中第一行子孔径区域为例, 子孔径  $A_{1,0}$ 、 $A_{2,0}$ 、 $A_{3,0}$  的准确位置计算公式为

$$P_{A_{1,0}} = P'_{A_{1,0}} + \Delta d_1, \quad (15)$$

$$P_{A_{2,0}} = P'_{A_{2,0}} + \Delta d_1 + \Delta d_2, \quad (16)$$

$$P_{A_{3,0}} = P'_{A_{3,0}} + \Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3, \quad (17)$$

式中:  $P'_{A_{1,0}}$ 、 $P'_{A_{2,0}}$ 、 $P'_{A_{3,0}}$  分别表示子孔径  $A_{1,0}$ 、 $A_{2,0}$ 、 $A_{3,0}$  的初始位置。

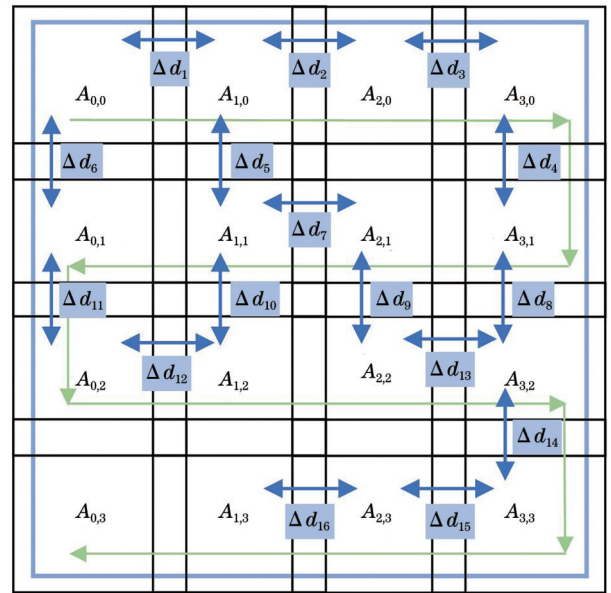


图 3 子孔径间相对位置及偏移量对应关系

Fig. 3 Correspondence of relative positions and offsets between sub-apertures

## 4 实验研究

### 4.1 图像采集与特征数据集构建

利用图 4 所示的显微散射暗场成像装置采集光学元件表面子孔径图像, 该装置主要由图像采集模块和

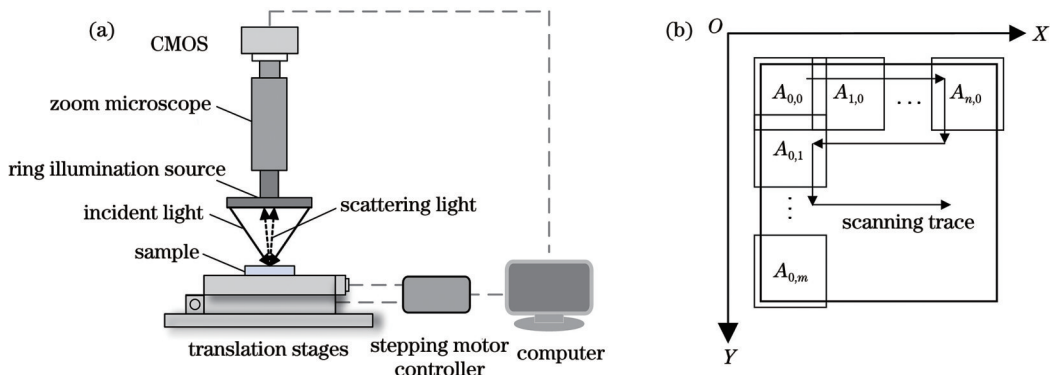


图 4 显微散射暗场检测系统。(a) 显微散射暗场成像装置; (b) 子孔径扫描路径

Fig. 4 Microscopic scattering dark field detection system. (a) Microscopic scattering dark field imaging device; (b) scanning path of sub-aperture

运动控制模块构成。运动控制模块采用微纳光科的 WN202WA100 × 100 电控整体组合台, 平移台的重复定位精度为 2 μm, 图像采集模块由 CMOS 相机、显微镜镜头以及环形光源构成, 其中显微镜镜头采用桂林视百科 spze6180 型号的 0.7 × ~ 4.5 × 变倍显微镜镜头, CMOS 相机采用 Imaging Source 的 DMK 37AUX273 型号工业相机, 该相机的像素大小为 3.45 μm × 3.45 μm, 采集子孔径图像的分辨率为 1280 pixel × 960 pixel。在实验中, 变倍显微镜镜头的放大倍数为 1 × 时, 采集的单幅子孔径图像对应的视场范围约为 4.4 mm × 3.3 mm, 利用电控平移台控制光学元件沿图 4(b) 所示的扫描路径移动, 每移动一步采集一幅子孔径图像, 并保存该幅图像对应的平移台扫描步数

( $I, J$ ), ( $I=0, 1, 2, \dots; J=0, 1, 2, \dots$ ), 依次类推, 直到完成光学元件表面被测区域的子孔径图像采集。同时, 对采集到的子孔径图像在电脑端进行预处理和疵病特征数据提取。

本文利用显微暗场成像装置对待测光学元件表面采集 16 幅子孔径图像, 并基于采集到的子孔径图像利用第 2 节方法进行疵病特征数据提取并构建子孔径特征数据集, 对于其中不存在疵病的子孔径区域只保留子孔径的编号以及扫描步数信息, 其余数据单元赋空值。其中, 在提取重叠区域特征数据时, 剪裁子孔径图像左、右侧 1/4 区域, 上、下侧 1/3 区域作为检测重叠区域, 而对于边缘子孔径则需根据剪裁方向上是否与其他子孔径相邻有选择地提取重叠区域。构建的子孔径特征数据集中包含的数据信息如表 1 所示。

表 1 子孔径特征数据集包含的数据信息

Table 1 Data information contained in the sub-aperture feature dataset

Serial number	Sub-aperture number	Scanning steps	Number of defects	Sparse matrix compression data	Overlapping area data
1	1	[0, 0]	10	1 × 1 cell	1 × 7 cell
2	2	[1, 0]	7	1 × 1 cell	1 × 7 cell
3	3	[2, 0]	9	1 × 1 cell	1 × 7 cell
4	4	[3, 0]	7	1 × 1 cell	1 × 7 cell
5	5	[3, 1]	7	1 × 1 cell	1 × 7 cell
6	6	[2, 1]	5	1 × 1 cell	1 × 7 cell
7	7	[1, 1]	7	1 × 1 cell	1 × 7 cell
8	8	[0, 1]	7	1 × 1 cell	1 × 7 cell
9	9	[0, 2]	2	1 × 1 cell	1 × 7 cell
10	10	[1, 2]	4	1 × 1 cell	1 × 7 cell
11	11	[2, 2]	2	1 × 1 cell	1 × 7 cell
12	12	[3, 2]	3	1 × 1 cell	1 × 7 cell
13	13	[3, 3]	6	1 × 1 cell	1 × 7 cell
14	14	[2, 3]	6	1 × 1 cell	1 × 7 cell
15	15	[1, 3]	2	1 × 1 cell	1 × 7 cell
16	16	[0, 3]	5	1 × 1 cell	1 × 7 cell

以其中的子孔径区域 10 为例, 其重叠区域数据单元中包含的数据信息如表 2 所示。表 2 中, 重叠区域编号利用重叠区域在对应子孔径中的位置表示, 例如

10\_s 表示该重叠区域位于子孔径 10 的上部。而重叠区域包含的疵病类型中, 麻点疵病类型用“0”表示, 划痕疵病类型用“1”表示。

表 2 子孔径 10 重叠区域数据单元包含的数据

Table 2 Data contained in the sub-aperture 10 overlapping area data cell

Overlapping area number	Number of defects	Type of defect	Defect center of mass	Hu invariant moment	Sparse matrix compression data	Relative position
10_s	2	[0; 0]	2 × 1 cell	2 × 1 cell	1 × 1 cell	2 × 1 cell
10_x	0	-	-	-	-	-
10_y	0	-	-	-	-	-
10_z	1	[0]	1 × 1 cell	1 × 1 cell	1 × 1 cell	1 × 1 cell

Note: defect type 0 represents dig defect, and 1 represents scratch defect.

## 4.2 匹配效果分析

利用本文方法基于构建的子孔径特征数据集计算重叠区域匹配关系及对应的偏移量参数,同时,对相关重叠区域图像使用模板匹配法进行偏移量参数计算,

对于含有其他疵病特征类型的子孔径图像,模板匹配法的计算误差不超过 2 pixel<sup>[18]</sup>,因此将本文方法计算结果与模板匹配法计算结果进行对比分析。本文方法与模板匹配法计算结果如表 3 所示。

表 3 匹配子孔径重叠区域间偏移量计算结果  
Table 3 Calculated offsets between overlapping areas of matched sub-apertures

Serial number	Results of proposed method		Results of the template matching method		Calculated deviation in X direction /pixel	Calculated deviation in Y direction /pixel
	$\Delta x$ /pixel	$\Delta y$ /pixel	$\Delta x$ /pixel	$\Delta y$ /pixel		
1	-2.4	-3.5	-2.7	-4.1	0.3	0.6
2	-2.3	-4.6	-2.5	-4.5	0.2	-0.1
3	0.6	-5.3	0.5	-4.5	0.1	-0.8
4	5.2	4.3	4.9	3.9	0.3	0.4
5	5.3	7.8	4.5	7.5	0.8	0.3
6	4.7	3.2	4.5	2.5	0.2	0.7
7	5.0	5.6	4.9	4.9	0.1	0.7
8	4.9	3.6	4.5	3.5	0.4	0.1
9	5.6	6.7	5.1	6.5	0.5	0.2

由表 3 可知,本文方法偏移量计算结果与模板匹配法计算结果基本一致, X、Y 方向上计算偏差均小于 1 pixel。而在偏移量参数计算过程中,模板匹配法首先需要提取特征模板,然后用该模板遍历待匹配图像的重叠区域,在这一过程中模板每移动一次计算一次模板与检测区域间的灰度信息相似度,最后从全部结果中选取相似度最高的区域位置作为最佳匹配位置,并且所选取模板的数量越多,计算量就越大,计算耗时越长。而本文方法利用子孔径扫描步数快速确定子孔径重叠区域间的匹配关系,并依据重叠区域包含的疵病特征数据完成偏移量参数计算,由于已经提取出了各个疵病区域的特征数据,在计算时可以直接进行匹配重叠区域间所有疵病目标区域的相似性度量并完成偏移量参数计算,无需进行不相关区域间的对比,从而简化计算过程,提高偏移量参数的计算效率。

为了更加直观地显示子孔径区域的匹配拼接效果,对上述 9 组存在匹配关系的子孔径区域提取区域包含的疵病特征数据,分别利用直接拼接方法和本文方法进行子孔径区域匹配拼接,利用本文方法进行疵病拼接时,拼接的移动步长由两部分构成,一部分为重叠区域间计算得到的偏移量参数,另一部分为匹配方向上子孔径尺寸减去重叠区域尺寸后剩余区域的尺寸,两部分之和即为待匹配孔径疵病拼接的移动步长。利用计算出的移动步长对待匹配子孔径区域中的疵病稀疏矩阵压缩存储数据进行坐标转换完成疵病拼接,并将完成拼接的子孔径疵病数据

转换成图像显示。而直接拼接法则根据子孔径区域间的理论位置完成子孔径图像的拼接,其中使用的子孔径图像由特征数据集中保存的稀疏矩阵压缩存储数据转换得到。两种方法的拼接结果如图 5 所示。

从图 5 结果图像中的疵病部分可以看出,与直接拼接法获取的结果相比,使用本文方法得到的结果图像改善了直接拼接结果中疵病部分存在的位置偏差情况,麻点和划痕疵病不存在明显错位。因此,本文方法可以有效实现子孔径区域的准确匹配。

## 4.3 全孔径疵病拼接及疵病检测

在全孔径疵病拼接实验中,分别利用基于模板匹配法的全孔径图像拼接方法<sup>[11]</sup>和本文基于子孔径特征数据集的全孔径疵病拼接方法获取全孔径疵病图像,两种方法的全孔径疵病拼接结果图像如图 6 所示。为方便观察,将基于子孔径特征数据集拼接得到的全孔径疵病图像转化成疵病分布图进行显示,疵病分布图如图 7 所示。其次,对基于模板匹配法获得的全孔径疵病图像进行预处理,并分别对其预处理结果图像和基于本文方法获得的全孔径疵病图像利用区域标记法和最小外接矩形算法进行疵病数量和疵病类型的识别检测,两幅全孔径疵病图像中疵病数量检测结果如图 8 所示。

由图 8 可知,两种方法获得的全孔径疵病图像中均检测出 51 个疵病目标,对应的检测结果中编号为 1、25、31 的疵病目标为划痕疵病,其余疵病目标均为麻点疵病。而在疵病拼接过程中主要影响的是分布在多

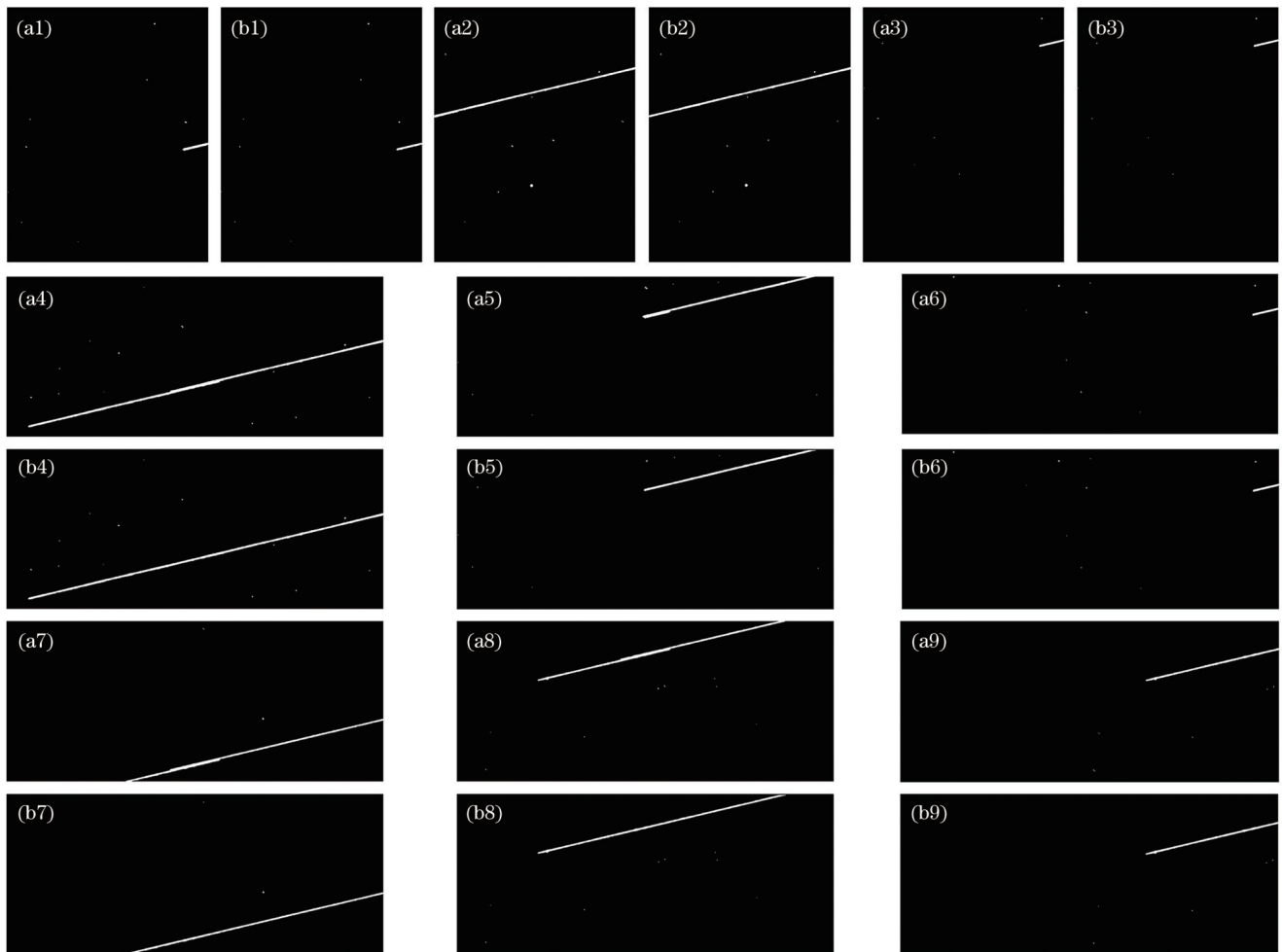


图 5 子孔径区域匹配拼接结果图像。(a)直接拼接法拼接结果图像;(b)本文方法拼接结果图像

Fig. 5 Matching stitching result images of sub-aperture area. (a) Stitching result images of the direct stitching method; (b) stitching result images of proposed method

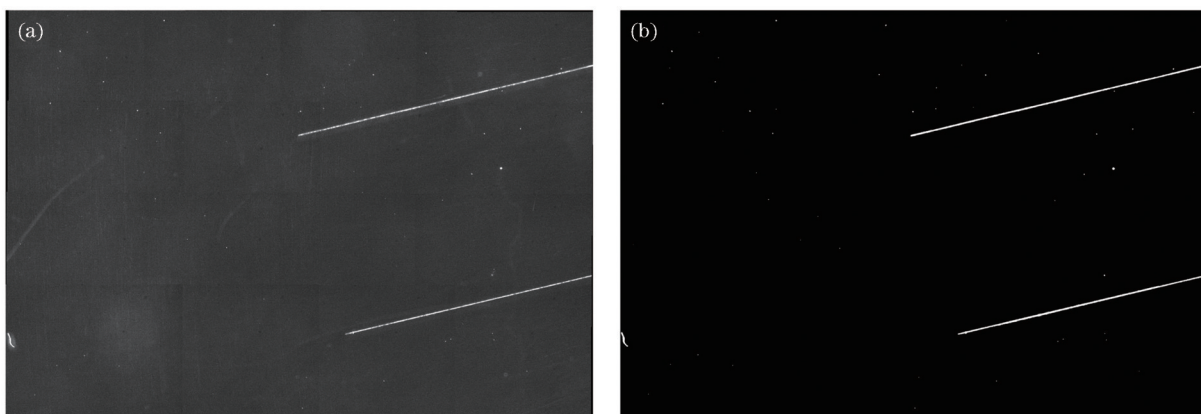


图 6 全孔径拼接结果图像。(a)基于模板匹配法的全孔径拼接图像;(b)基于特征数据集的全孔径拼接图像

Fig. 6 Stitching result images of full aperture. (a) Full aperture stitching image based on template matching method; (b) full aperture stitching image based on feature dataset

个子孔径区域中的划痕疵病,因此对两种方法得到的全孔径拼接结果图像中跨越多个子孔径区域的划痕疵病(编号为 25、31 的划痕疵病)进行分析。此外,由于实验中划痕疵病部分对应的原始子孔径图像的重叠区域存在其他类型疵病特征,使用模板匹配法可以准确完成疵病拼接<sup>[12,18]</sup>,因此将基于模板匹配法全孔径疵

病图像中检测到的划痕疵病的长度和等效面积数据作为对比参考。利用最小外接矩形算法分别对图 8 所示的全孔径疵病图像中编号为 25、31 的划痕疵病进行尺寸参数计算,计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知,两种方法获得的划痕疵病检测结果基本一致。因此,基于特征数据集的疵病拼接方法可

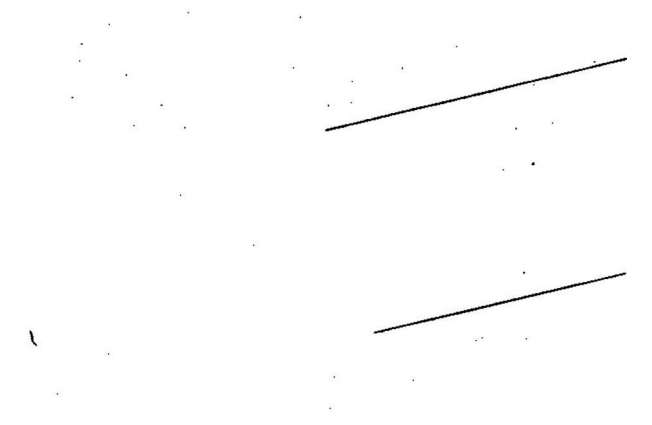


图 7 基于特征数据集拼接的全孔径图像对应的疵病分布图  
Fig. 7 Defect distribution image corresponding to full aperture image based on feature dataset stitching

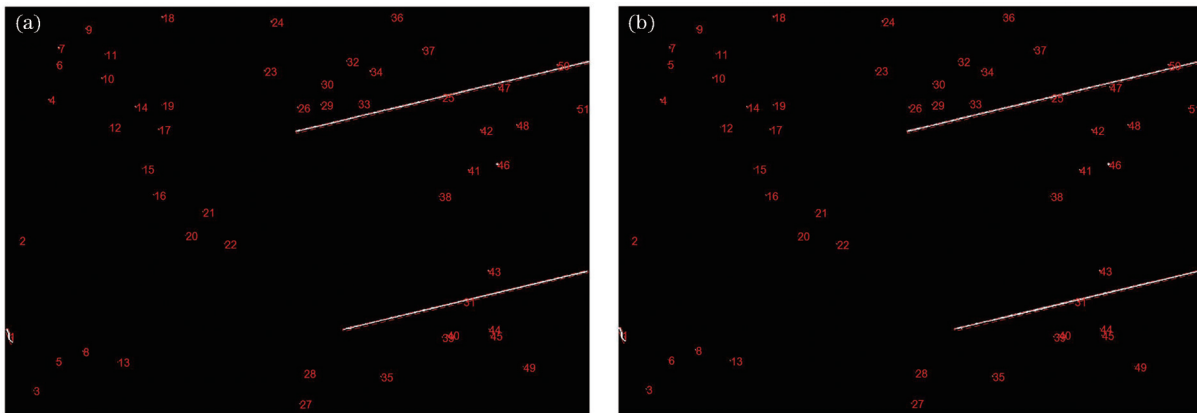


图 8 全孔径图像疵病检测结果。(a)基于模板匹配法全孔径图像的检测结果;(b)本文方法全孔径图像的检测结果  
Fig. 8 Defect detection results of full aperture image. (a) Detection result of full aperture image based on template matching method; (b) detection result of full aperture image of proposed method

表 4 划痕疵病检测结果

Table 4 Detection results of scratch defects

Defect number	Detection results of proposed method		Detection results of template matching method		Calculation deviation of length /mm
	Length /mm	Area /mm <sup>2</sup>	Length /mm	Area /mm <sup>2</sup>	
25	7.5746	0.4543	7.5704	0.4540	0.0042
31	6.3213	0.4081	6.3262	0.4083	-0.0049

## 5 结 论

本文提取子孔径图像及其重叠区域图像中的疵病特征数据构建子孔径特征数据集作为全孔径疵病拼接的基础,实现光学元件表面全孔径区域疵病拼接。实验结果表明,基于子孔径特征数据集的光学表面疵病拼接方法可以有效实现全孔径疵病拼接,并且与基于模板匹配法的全孔径图像拼接方法相比,两种方法得到的全孔径图像的疵病检测结果基本一致。而在拼接过程中,本文方法基于子孔径区域中的疵病特征数据进行处理,相较于基于模板匹配法的全孔径拼接方法有效减少了拼接过程中的处理及存储数据量。

以有效实现全孔径内疵病目标拼接。此外,在全孔径疵病拼接过程中,利用模板匹配法拼接图像时,处理的单幅子孔径图像的数据量为 1.17 MB,每完成一幅子孔径图像的匹配拼接,对应的处理及存储数据量随之增加,最终的全孔径拼接结果图像的数据量为 9.24 MB。而本文方法则通过构建的子孔径特征数据集实现全孔径疵病拼接,基于 16 幅子孔径图像构建的子孔径特征数据集的数据量为 3.26 MB,拼接时主要依据计算出的子孔径间位置关系处理各个子孔径区域存储的疵病数据,从而降低拼接过程中的处理及存储数据量,利用拼接完成的全孔径疵病数据转换出的全孔径疵病图像的数据量为 20.9 kB。因此,与基于模板匹配法的全孔径图像拼接方法相比,本文方法可以实现全孔径疵病拼接并且有效减少了拼接过程中的存储及处理数据量。

## 参 考 文 献

- [1] 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.  
Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.
- [2] 汪越, 刘爱云, 石旺舟, 等. 远红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1122005.  
Wang Y, Liu A Y, Shi W Z, et al. Design and simulation of far infrared microscopic imaging optical systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1122005.
- [3] 贾文波, 秦天翔, 黄蕴涵, 等. 红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2311002.  
Jia W B, Qin T X, Huang Y H, et al. Design and analysis of optical system of an infrared dual-band imaging spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2311002.



- [4] 陆敏, 王治乐, 高萍萍, 等. 光学元件的疵病检测及现状[J]. 光学仪器, 2020, 42(3): 88-94.  
Lu M, Wang Z L, Gao P P, et al. Defect detection and current situation of optical components[J]. Optical Instruments, 2020, 42(3): 88-94.
- [5] 汤文龙, 梁尚娟, 焦翔, 等. 抛光过程中光学元件表面划痕的形成和控制[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202009.  
Tang W L, Liang S J, Jiao X, et al. Formation and control of scratches on surfaces of optical components during polishing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202009.
- [6] 赵元安, 邵建达, 刘晓凤, 等. 光学元件的激光损伤问题[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(1): 011004.  
Zhao Y A, Shao J D, Liu X F, et al. Tracking and understanding laser damage events in optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(1): 011004.
- [7] 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): 78-87.  
Xiang Y C, Lin Y X, Ren Z Y. Study on surface defect detection method of optical element[J]. Optical Instruments, 2018, 40(1): 78-87.
- [8] 沈卫星. 相干滤波成像系统测量光学元件表面疵病[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 361-362, 365.  
Shen W X. Surface defects of the optical elements measured by the coherent filter imaging system[J]. Optical Technique, 2000, 26(4): 361-362, 365.
- [9] 杨菲菲, 缪洁, 谢雨江, 等. 全内反射技术检测大口径光学元件体内缺陷[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0604005.  
Yang F F, Miao J, Xie Y J, et al. Internal defects of large optics detected by total internal reflection technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0604005.
- [10] 李成瑞. 曲面光学元件表面缺陷检测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
Li C R. Research on defect detection method for curved optical surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [11] 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.  
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.
- [12] Liu D, Wang S T, Cao P, et al. Dark-field microscopic image stitching method for surface defects evaluation of large fine optics [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5974-5987.
- [13] Yin Y J, Xu D, Zhang Z T, et al. Surface defect detection on optical devices based on microscopic dark-field scattering imaging [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 61(1): 24-32.
- [14] 陈晨, 王红军, 王大森, 等. 基于稀疏矩阵的光学元件表面疵病检测[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0404007.  
Chen C, Wang H J, Wang D S, et al. Surface defect detection of optical components based on sparse matrix[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0404007.
- [15] Chen X, Li J Q, Sui Y X. A new stitching method for dark-field surface defects inspection based on simplified target-tracking and path correction[J]. Sensors, 2020, 20(2): 448.
- [16] 赵珊, 王彪, 唐超颖. 基于链码表示的手臂静脉特征提取与匹配[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0515003.  
Zhao S, Wang B, Tang C Y. Arm vein feature extraction and matching based on chain code[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0515003.
- [17] 丁悦, 吴静静, 蒋毅, 等. 基于改进HU不变矩的快速图像匹配算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 124-127.  
Ding Y, Wu J J, Jiang Y, et al. Fast image matching algorithm based on improved HU invariant moment[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(2): 124-127.
- [18] 苏森. 大口径光学元件表面疵病检测[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.  
Su S. Large optical component surface defects detection[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.

## Optical Surface Defect Stitching Method Based on Sub-Aperture Feature Dataset

Wang Yingru, Wang Hongjun\*, Zhu Xueliang, Liu Bingcai, Yue Xin, Tian Ailing  
*Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an Technological University,  
Xi'an 710021, Shaanxi, China*

### Abstract

**Objective** With the development of optical technology, the application fields of optical elements and optical systems are becoming increasingly extensive; however, localized microscopic defects on the surface of optics affect the corresponding system performance. Therefore, it is necessary to detect defects on the optical surface. With the development of machine vision technology, the microscopic scattering dark-field imaging method of noncontact detection has become an important method for automated surface defect detection. However, in large-aperture fine optics, there are fewer defects on the surface and a large number of sub-aperture images. When using defect images for sub-aperture stitching, the amount of data used for image storage and processing is high and increases with the size of the detection aperture, which requires a significant amount of time for detection. Accordingly, a surface defect stitching method is proposed based on a sub-aperture feature dataset, which uses the constructed sub-aperture feature dataset to realize full-aperture defect stitching, thereby reducing the amount of data stored and processed during the stitching procedure.

**Methods** To perform full-aperture defect stitching, the defect feature data (defect number, type, shape feature, relative position feature, and sparse matrix data) in the binarized sub-aperture image and its overlapping area image were extracted and the sub-aperture

feature dataset could be constructed. Then, based on the constructed feature dataset, for the sub-apertures containing defects in the overlapping areas, the overlapping area matching relationship and the offset parameters between the matched overlapping areas were solved and combined with the initial position calculated from the number of scanning steps of the sub-apertures to obtain an accurate positional relationship between the sub-apertures. For sub-apertures without defects in the overlapping areas, the stitching position was determined based on the theoretical position. Finally, the defect sparse matrix data of each sub-aperture were transformed to the corresponding position using coordinates to realize full-aperture defect stitching. As described herein, the sub-aperture feature dataset was constructed based on the feature data extracted from the images captured using the microscopic scattering dark-field imaging device. Full aperture defect stitching was completed based on the dataset, and then compared with the full-aperture stitching results based on the template matching method to analyze and validate the effectiveness of the proposed research method.

**Results and Discussions** The constructed sub-aperture feature dataset (Table 1) was adopted to calculate the overlapping area matching relationship and the corresponding offset parameter, and compared with the offset calculation results obtained using the template matching method (Table 3). The offset calculation results of this study are basically consistent with those of the template matching method. During the offset calculation in the proposed method, the feature data of all the defective areas extracted from the overlapping areas are used to calculate the offset parameter without the need for comparison between unrelated regions, thereby simplifying the calculation process and improving the corresponding efficiency. Meanwhile, some sub-aperture areas were selected for matching and stitching and compared with the results of the direct stitching method (Fig. 5), showing that the method in this study improves the positional deviation that exists in the defective part of the results of the direct stitching method. Thus, this method can effectively realize the accurate matching of sub-aperture areas. Finally, the full-aperture defect images were obtained using the full-aperture defect stitching method based on the feature dataset and the full-aperture stitching method based on the template matching method (Fig. 6). The number and type of defects and some of the scratch size data in the full-aperture image were detected using the connected component labeling algorithm and the minimum enclosing rectangle algorithm (Fig. 8, Table 4). The defect detection results of the full-aperture images obtained using the two methods are basically consistent. In addition, in the process of full-aperture stitching, when stitching images using the template matching method, the data volume of a single processed sub-aperture image is 1.17 MB, and the corresponding processing and storage data volume increases with each completed image stitching, the data volume of the final full-aperture stitching result image is 9.24 MB. However, the method in this study is based on the feature dataset to complete the full-aperture defect stitching; the data volume of the constructed feature dataset is 3.26 MB, and the final data volume of the full-aperture defect image converted from the full-aperture defect data is 20.9 kB. Thus, the proposed method can effectively obtain full-aperture defects, and the volume of stored and processed data in the stitching process is less than that of the image-based stitching method.

**Conclusions** In this study, we extracted the feature data in a defect image to construct a sub-aperture feature dataset and complete full-aperture defect stitching. This was compared with the full-aperture image stitching method based on the template matching method. The results of the defects detected in the full-aperture images corresponding to the two methods are basically consistent. During the full-aperture stitching process, the proposed method uses the feature dataset to determine the relative positional relationship of the sub-aperture and to complete the stitching of full-aperture defects, effectively reducing the volume of processed and stored data in the stitching process compared with the image stitching method based on the template matching method.

**Key words** defect detection; feature extraction; sub-aperture stitching; sparse matrix