

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802052

高反射镜表面疵病激光散射显微成像检测^{*}

杨 飞 高爱华 刘卫国 秦文罡

(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 西安 710021)

摘 要: 反射镜表面疵病散射直接影响光学测试系统的性能、精度等多项重要指标。反射镜表面疵病的散射量可借助激光散射显微镜进行检测,为了保证整个系统的检测效率及精度要求,在硬件系统的设计上,设计显微物镜镜头、计算光斑的大小及 CCD 的功率谱响应;在软件系统的设计上,利用软件编写激光散射显微成像测试系统软件,能利用步进电机对反射镜表面进行扫描,同时控制图像采集卡采集图像并保存,重点研究如何快速有效地对采集到的子孔径图像进行精确配准,为后续图像的拼接处理奠定基础。通过分析整个测试系统的精度,×20 倍率下能够分辨 5~10 μm 疵病。

关键词: 激光散射;显微成像;图像配准;拼接处理

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

High reflection mirror surface defects of laser scattering imaging detection

Yang Fei Gao Aihua Liu Weiguo Qin Wengang

(Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Film Technology and Optical Inspection, School of Optoelectronic Engineering,
Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The scattering of defects on the surface of the mirror directly affects the performance and accuracy of the optical testing system. The scattering of the surface defect of the mirror can be detected by the laser scattering microscope. In order to ensure the detection efficiency and precision of the whole system, the microlens lens, the size of the spot and the power spectrum response of CCD are designed in the design of the hardware system. The software of microscope imaging test system can use step motor to scan the mirror surface, control the image acquisition card to collect the image and save the image. It focuses on how to accurately and accurately collect the sub aperture images, and lay a foundation for subsequent image mosaic. By analyzing the accuracy of the whole test system, it is able to distinguish 5~10 μm defects by ×20 magnification.

Keywords: laser scattering; microscopic imaging; image registration; stitching processing

0 引 言

在科学技术高度发展的今天,超光滑表面的光学元件^[1]在各种领域中的应用已经越发的不可或缺,诸如航空镜头、光刻设备以及激光位移干涉仪的反光镜等都对镜片面型的质量有着很高的要求,在激光器的谐振腔、激光核聚变系统、大规模集成电路基片、微光元件等器件为主的光电子领域有着广泛的应用,高反射镜作为典型的超光滑表面的光学元件,其表面的精密检测变得尤为重要。目前国内对外对超光滑表面疵病检测的方法有许多种,总的可以分为成像法和能量法两大类^[2-3],这些方法大都是利用光学元件表面疵病对光的散射特性进行研究的。在国内,各大科研

高校及研究所在利用散射法^[4]进行疵病检测方面发表了一定数量的高水平文章,现有的积分散射仪就是通过能量法进行疵病检测的,虽然在精度上能达到一定的要求,但却不能直观地描述疵病表面的外部特征;而对于成像法,合肥知常光电科技有限公司生产的超光滑表面激光散射缺陷检测设备具有一定的先进性,但是检测效率在一些特殊场合及专门领域还需改进。

为了有效地检测出高反镜表面的微米量级的疵病,这就需要在硬件系统选取和软件系统设计两个方面综合考量,以解决现有疵病检测装置不能直观高效地对疵病特征进行描述的缺点,因此高反射镜表面激光散射显微成像检测系统的研究变得意义重大。

收稿日期:2018-08-28

* 基金项目:国防科工局(JCKY2016208A001)项目资助

1 检测系统组成及测量原理

“高反射镜表面激光散射显微成像检测系统”,总体上可以分为 3 部分。1)激光光路的设计,包括对激光光源的扩束准直以及照射角度的要求;2)显微成像系统的设计,包括对显微成像物镜参数的计算以及 CCD 相机的选取;3)计算机软件设计,通过控制步进电机实现对旋转平移台控制,通过图像采集卡获取 CCD 相机采集到的图像信息,进而实现对疵病信息的处理与分析。检测系统如图 1 所示。

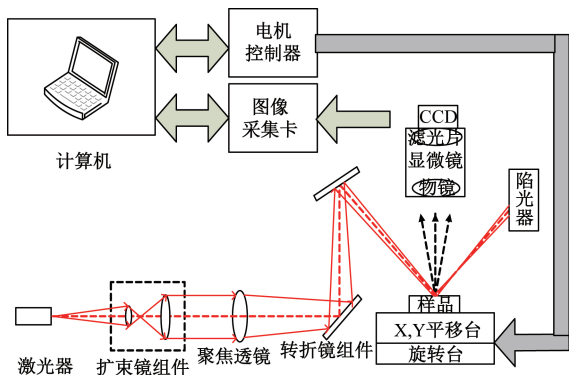


图 1 检测系统原理

1.1 硬件系统设计的参数计算

首先为了确保被测元件表面的疵病划痕等可以被检测出,对 $\Phi 5$ mm 样品反射镜表面疵病进行放大 20 倍的显微成像系统的设计,选择可以满足要求的特定的成像物镜,即对物镜镜头的光圈、焦距、景深及镜头分辨率等光学参数进行选择计算。其次根据被检测反射镜表面尺寸,计算镜头视场的大小。最后根据显微物镜与被测反射镜的相对位置关系以及 CCD 视场大小确定光源光斑尺寸的大小。选择 $\beta = \times 20$ 倍的显微物镜的数值孔径 $NA = 0.3$,根据反射镜、光学镜头以及 CCD 三者之间成像的位置关系^[5],设定合理的工作距离 L ,由高斯成像公式^[6](式(1))算得焦距,再由式(2)、(3)求得相对孔径大小,最后由式(4)计算显微镜头的分辨率。

$$f = \frac{L \times \beta}{1 + \beta} \quad (1)$$

$$F = \frac{f}{D} \quad (2)$$

$$NA = \frac{1}{F} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (4)$$

为了实现高倍显微检测的目的,选择波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为成像光源可以满足要求,又根据设定的工作距离选择了合适的镜筒长度,视场根据 CCD 靶面尺寸计算,最后对显微成像系统各个参数进行确定,利用 ZEMAX 光学设计软件,选择合适的初始结构,输入相应的

光学参数,优化设计得到物镜结构如图 2 所示。

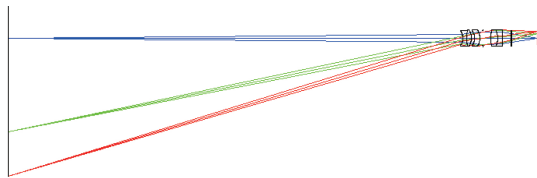


图 2 显微物镜结构

光斑尺寸的选择过程如图 3 所示,由于所选择的 CCD 成像有效面积大小为 $6.45 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$,CCD 观察时等效像方视场 $y' = \phi 8.06 \text{ mm}$,则换算到物方的子孔径大小为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$,在选择光斑尺寸的实际过程中,为了使得整个 CCD 光敏面接收子孔径的散射光成像,选择光源的尺寸要完全覆盖显微成像的子孔径大小,当选择光源的尺寸为 $\Phi 0.5 \text{ mm}$ 时,换算到 CCD 像面的视场为 10 mm ,此时已经完全覆盖 CCD 的整个光敏面。若选择光源尺寸较小,则会因为不能充分利用 CCD 的感光面而造成隧道效应,且如果光源尺寸小到不能完全覆盖整个子孔径区域,则被光源照射的区域不能完全成像在 CCD 上,影响后续的图像拼接结果。适当增大光斑的尺寸,可以使光照均匀,成像质量更好,但如果过大,虽然像方视场可以完全被覆盖,但 CCD 上成的像仍然是子孔径对应的那部分,所以不免造成光能量的损失。综上选择 $\Phi 0.5 \text{ mm}$ 为光源的光斑尺寸大小。

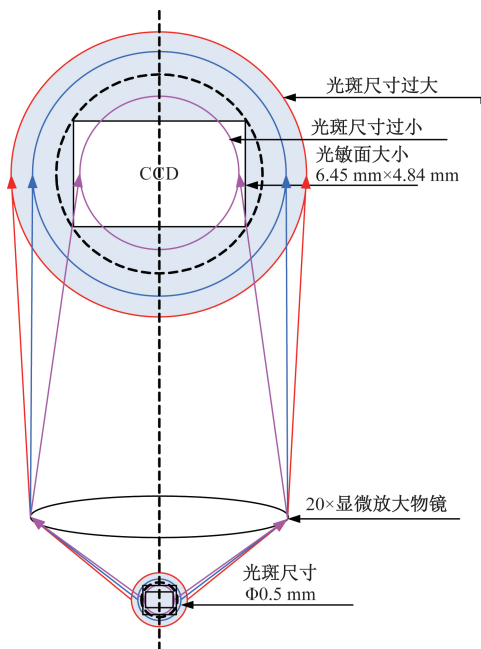


图 3 光斑尺寸的选择示意图

基于要检测的反射镜表面区域大小和物镜放大倍率的要求,选择性能稳定性良好且光敏面合适的 CCD 相机,由于每一次只能检测反射镜表面一小部分,因此选择面阵

CCD 相机,再综合考虑 CCD 相机的光电转换特性、光谱范围、动态范围、暗电流及分辨率等参数,对 CCD 相机进行选取。除此之外,还要考虑到光源的相对光谱功率分布与 CCD 的光谱响应相匹配的问题,不仅能够节省能量,还能减少多余能量造成的热稳定性差的影响。

由于被测样品为 Φ5 mm 的高反射镜,要求其表面的散射率在 1~10 ppm($1\text{ ppm}=1\times 10^{-6}$)的范围内,则当光功率为 20 mW 的激光器照射到反射镜表面,散射的光能量为 $20\text{ mW}\times 1\times 10^{-6}=2\times 10^{-5}\text{ mW}$,根据所选镜头的数值孔径,估算到散射光能量有一半进入显微成像系统,即 CCD 光敏面接收到的能量为 $1\times 10^{-5}\text{ mW}$,把辐射功率换算成光功率为 $1.5\times 10^{-6}\text{ lm}$,再根据 CCD 的光敏面面积,计算 CCD 的单位面积上接收的光照度 $E_v=\frac{\phi_v}{S}=0.048\text{ lx}>0.0001\text{ lx}$,所以选择灵敏度为 0.0001 lx 的 CCD 可以满足要求。

1.2 LabVIEW 编写激光散射显微镜测试系统软件

使用 LabVIEW 软件编写激光散射显微镜测试系统^[7],能利用步进电机控制旋转平移台对反射镜样品表面进行扫描,同时控制图像采集卡采集图像并保存,最后由计算机分析和处理所采集到的图像信息。

1) 图像采集与保存

在测试之前,预先设定好扫描的路径,则整个测试系统会按指定的路径顺序扫描完激光反射镜表面的所有子孔径范围,并将采集到的子孔径图像按顺序进行保存,图像采集与保存的总体测试流程如图 4 所示。

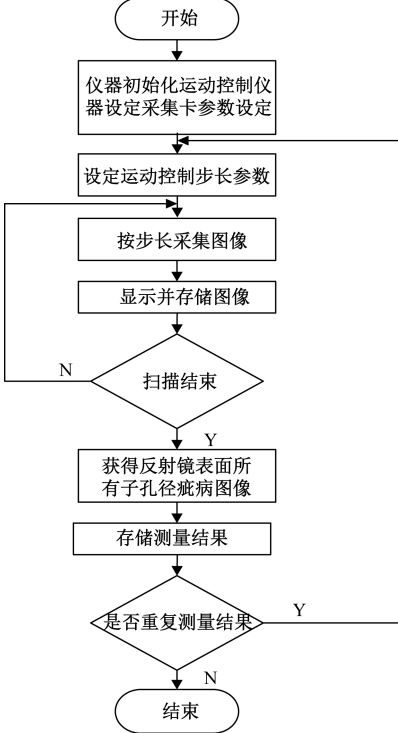


图 4 图像采集与保存的总体测试流程

2) 图像剪切处理

在×20 倍率下,十字叉线 2 mm 范围内,设置步进距离为 0.4 mm,则得到 25 张子孔径图像,按顺序排列如图 5 所示。

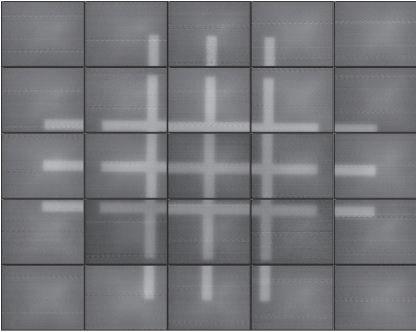


图 5 十字叉线示意图

经过多次对不同步进距离下采集到的子孔径图像进行剪切拼接处理,很明显选择合适的步进距离可以使拼接的全口径图像在保存原有图像特征的前提下,进行二次拼接的效率更高,根据光斑大小结合 CCD 相机所能测得的子孔径的大小选择 0.4 mm 为电机扫描时的步进距离,为高效完成拼接工作提供重要保证。

拼接前首先用标准分辨率板标定了被测样品每一次步进的距离与图像上像素移动的关系,这样便可以找到相邻两幅图像的重叠区域,然后从左到右对子孔径图像进行横向剪切,从上到下进行纵向剪切,得到拼接后的图像如图 6 所示。

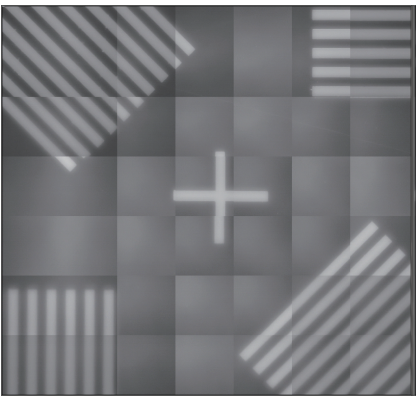


图 6 剪切拼接结果

从拼接结果看出,对无明显特征点相邻两幅图像进行剪切处理,不影响拼接结果,而对有疵病特征点的相邻两幅图像的边缘^[8],只进行简单的剪切处理会出现明显的错位现象,这种错位是由于在进行子孔径图像采集时,平移台的定位所引起的误差,而且这个误差^[9]在后续的拼接会积累放大,所以需要通过一些图像处理手段保证拼接的正确性。

3) 基于特征点位置匹配的图像拼接

在拼接图像时,如何选择相邻两幅图像的重叠区域^[10],可以最有效率地检测出疵病,而且相邻两幅图像的重叠区域并不是光斑的同一位置区域照射成像的,所以存在拼接时的误差,影响测试效率。为了降低相邻两幅图像之间由于光照条件带来的亮度差异,利用直方图均衡化^[11]的方法对采集到的子孔径图像进行预处理,将图像的灰度信息扩散到了全部灰度级范围^[12],为后续的图像特征区域搜索奠定基础。

由于被测高反射镜表面的疵病多为条状和点状特征^[13],且分布比较离散,可以通过对子孔径图像进行二值化预处理,通过判断剪切重叠区域的边缘特征是否有疵病目标存在,来选择进行拼接的方式,对于大部分相邻子孔径进行拼接时,只需要简单的剪切拼接就可以达到目的,而对于剪切边缘存在疵病目标的子孔径图像进行拼接时,需要通过特征点位置进行精准匹配^[13],实现疵病图像的无缝拼接,这样就通过一个条件结构简化了复杂的图像拼接算法。

剪切拼接的算法实现起来比较简单,所以本文就重点针对特征点位置匹配的图像拼接算法进行创新介绍,为了高效完成多副子孔径图像的拼接工作,采用一种中和改进的图像拼接算法,该算法不但结合比值法^[14]和块区域法^[15]两种特征点匹配的优势,而且嵌入了重叠区域边缘疵病目标识别算法,在多幅子孔径图像进行拼接时,保证拼接质量的同时,拼接速度也得到了提高。

基于特征点位置匹配过程主要包括图像配准和图像融合两个步骤,而图像配准作为图像拼接的关键,选取特征模板组^[16]和搜索特征区域便成为能否拼接成功关键的第一步。借鉴已有的选取特征模板的方法,通过计算模板中像素方差值的方法,选取具有最大像素方差和的模板作为标准模板,因为图像中的细节特征是由灰度的边缘或者拐点所决定的,而边缘或者拐点处的灰度起伏最大,即该处的方差值最大,应用如下公式选取特征模板:

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |I(i, j) - w| \quad (5)$$

$$S_{\text{result}}(x, y) = \text{MAX}(S(x, y)) \quad (6)$$

式中: $I(i, j)$ 表示模板中的像素值大小; w 为模板中像素的灰度平均值。在进行特征模板组的选取过程中,模板的尺寸大小是需要考虑的问题,通过对疵病图像多次定位特征模板发现,选择一组尺寸分别为 3×3 、 6×6 和 9×9 的特征模板组成的递进式特征模板组时,在不影响子模板定位精度的前提下,扩大了特征模板组中的子模板之间的相对距离,提高了算法的稳定性,为后面高效完成特征区域的搜索奠定了基础。另一个需要考虑的问题便是如何高效确定 3 个子模板的坐标位置,首先通过式(5)和(6)求出最佳的 3×3 大小的特征模板,由于选取特征模板组时,尽量选取同一疵病目标周围的细节特征,在选取 6×6 和 9×9 两

个子模板时,以 3×3 子模板的中心为圆心,分别以 r 为半径画圆,圆的表达式如式(7)所示,其中 $O(x_1, y_1)$ 为 3×3 子模板的中心坐标。

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r^2 \quad (7)$$

搜索特征模板的过程中只要圆弧包含的区域不超过搜索区域,在这个区域上寻找满足最佳细节特征的 6×6 和 9×9 特征模板,记录下它们与 3×3 子模板之间的位置信息,在这里用极坐标 $r(\theta)$ 表示,如式(8)所示, A 表示此模板与圆心 O 的距离, θ 为模板与圆心之间的连线与 X 轴正向的夹角。

$$r(\theta) = Ae^{j\theta} \quad (8)$$

这样就提取到了 3 个具有最佳细节特征子模板的位置坐标,构成特征模板组。此方法有效缩小了需要搜索的整个重叠区域的范围,省去了每一个特征模板都要遍历搜索的繁琐,高效完成整个特征模板组的提取。

根据最大像素方差法首先在相邻两幅子孔径图像 T1、T2 的重叠区域首先选取 3×3 的子模板 M1,假设选择的两个 6×6 和 9×9 特征模板在以子模板 M1 的中心为圆心,以 $r=6$ 和 $9(\text{pixel})$ 为半径的圆上,根据图像特性,此模板必定在其对应的轨迹圆上取得最大像素方差值,这样便在限定区域得到了在同一疵病目标上的 3 个不同位置的细节特征,构成了一个由 3 个很小的模板所组成的特征模板组。如图 7 所示。

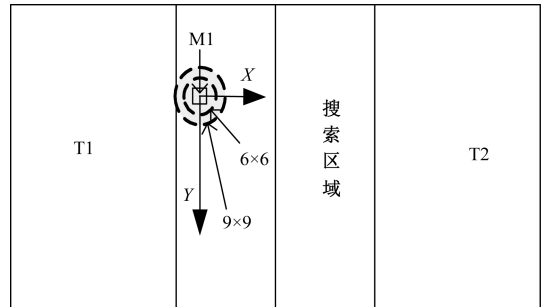


图 7 特征模板组提取

模板匹配就是在搜索区域内寻找与特征模板信息最匹配的区域,首先匹配 3×3 的特征模板,在待匹配图像 T2 的搜索区域中以 3×3 的模板 P1 由左至右,自上而下进行搜索。为了说明特征模板和匹配模板之间灰度信息的相关性,定义均方误差(MSE)函数如式(9)所示,通过表达式可以看出,模板 P1 每移动一个位置,便可计算模板覆盖区域 P1 与特征模板 M1 的像素差值,理论上讲,这个均方误差值越小代表两个模板的灰度信息越匹配,但实际中,由于光照差异及电控台的平移精度误差的影响,匹配过程当中存在一系列误匹配的现象,相邻两幅图像之间不可能直接通过最小均方误差精确得到特征点的匹配,所以需要为差值函数设定一个标准阈值 α ,当设定的标准阈值大于 α 时,满足要求的模板数量迅速增加导致匹配所花费的时间变长,

不利于后面求精提取;当设定的标准阈值小于 α 时,在两幅图片之间干扰过大的情况下就很难得到满足条件的特征模板,进而导致算法失败。

$$S_{3 \times 3}(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 [P_1(i, j) - M_1(i, j)]^2 \quad (9)$$

式中: $P_1(i, j)$ 和 $M_1(i, j)$ 分别为两个模板中对应像素的灰度值。

所以通过式(9)计算得到的与 3×3 特征模板 M_1 匹配的模板并不是唯一的,而是一系列都有可能与 M_1 相关的模板组成的模板群,因此后面介绍的就是如何通过其他的两个子模板来快速精准地找到与 M_1 最相关的匹配模板 P_1 。通过前面介绍,两个 6×6 和 9×9 特征模板是在以 3×3 特征模板的中心为圆心,以 $r=6$ 和 $9(\text{pixel})$ 为半径的圆上,并且两个特征模板在各自的轨迹圆上是灰度信息变化最大即细节特征最明显的两个模板,知道了其相对位置关系,只需要从模板群中任意选择一个匹配模板 P_1 ,然后以 P_1 的中心为圆心,以 $r=6$ 和 $9(\text{pixel})$ 为半径画圆,找到两个圆上灰度信息变化最大的区域,并记录此时相对于 P_1 的位置关系,用极坐标 $R(\beta)$ 表示为式(10),同理 β 也表示与 X 轴正方向的夹角,这样用一个循环结构便可以得到模板群中所有的 $R(\beta)$ 值,与之前确定的特征模板组的相对位置极坐标 $r(\theta)$ 做差值,差值函数用 S_j 表示为式(11), S_j 的最小值对应的 3×3 匹配模板 P_1 就是最相关的匹配。

$$R(\beta) = A e^{i\beta} \quad (10)$$

$$S_j = R(\beta) - r(\theta) \quad (11)$$

上述算法实际上是通过将 3×3 特征模板进行两次筛选来获得其最佳匹配模板,第 1 次根据均方差函数,设定合适阈值来挑选与 3×3 特征模板相关性较大的匹配模板群,将这些相关性较大的模板先逐一保存起来,第 2 次依次计算每个相关性较大的 3×3 模板所对应的两个 6×6 和 9×9 特征模板的相关性大小,根据他们之间的极坐标位置关系,采用一种圆函数检测搜索的方式提取相关性最大的两个 6×6 和 9×9 模板,通过再次求精匹配筛选出 3×3 特征模板的最佳匹配模板。利用 LabVIEW 软件编写上述算法流程,对相邻两幅带有条纹状和块状目标的图像进行配准,特征点配准后进行位置拼接的结果如图 8 所示。

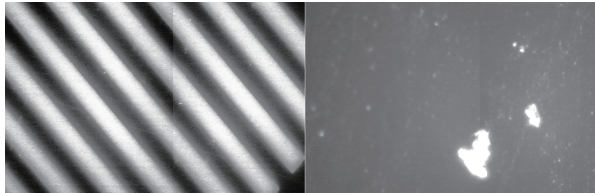


图 8 配准结果

该算法改善了原有剪切拼接算法所造成的边缘特征错位的现象,提高了拼接的精度。但是拼接效果图仍存在明显的拼缝,因此选择加权平均法图像融合算法,加权平均图

像融合算法的原理就是对原图像的像素值按照距离图像边缘距离与重叠区域的宽度做比值计算其权值,使得从左到右按照从 1~0 的规律来进行平滑过渡,然后进行加权平均得到融合图像的像素值,对图 8 中块状目标进行融合的效果图如图 9 所示。

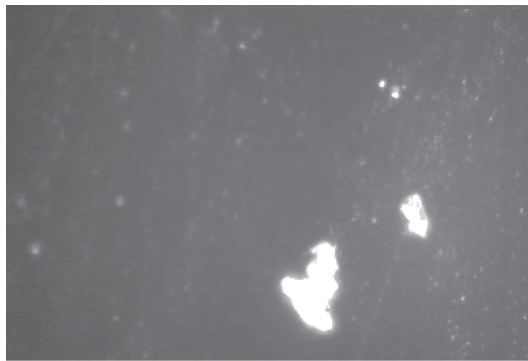


图 9 融合结果示意图

4) 基于 Harris 角点检测图像拼接

为了对比说明本文图像拼接方法的优势,同时用 MATLAB 编写了基于 Harris 角点检测的图像拼接算法程序,并借助 RANSAC 算法,得到匹配精度最高的单应性矩阵 H ,最终得到拼接效果。由于此算法已经成熟运用,这里不做详细介绍。RANSAC 算法求精匹配如图 10 所示,最终匹配结果如图 11 所示。

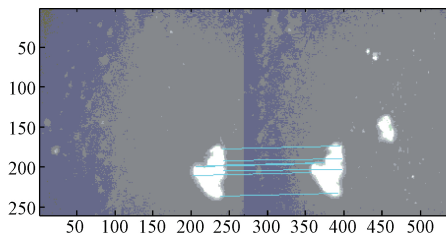


图 10 RANSAC 算法求精匹配



图 11 融合结果

2 测试系统精度分析

经过对整个检测系统所能实现的精度进行估计,运动

控制装置重复定位误差为 3 μm ,根据 CCD 测量灵敏度和空间采样定理的需要,尺寸精度要大于 2 个像元的空间尺寸 Δ ,所以选择 3 个像元空间尺寸作为测量精度要求,CCD 一个像元的空间尺寸为 8 μm ,则 CCD 光敏面上所允许拼接的误差为 24 μm ,换算到物方的误差为 $24/20=1.2\ \mu\text{m}$,所以整个系统的误差为 $3+1.2=4.2\ \mu\text{m}$,所以能够分辨 5~10 μm 的疵病;由于进行图像拼接时,子孔径数量较多,如何更高效地进行图像拼接,成为整个检测系统的关键点,拼接前,首先需要判断相邻两幅图像需要进行标称距离剪切还是需要特征点位置匹配,然后在前面剪切拼接的基础上完成整个高反射镜表面被检测区域的图像拼接工作。因此进行相邻两幅图像拼接的时间成为影响拼接快慢的关键所在,需要得到高效的图像疵病拼接算法。

2.1 图像配准精度分析

对拼配准前后图像分别以左上角为坐标原点,利用 NI-VISION 中边缘检测的图像处理子 VI 标定同一位置目标在 X、Y 两个方向的尺寸误差,对未拼接前左边图像的尺寸标定如图 12 所示。

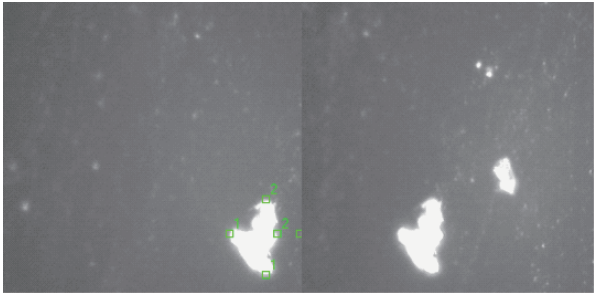


图 12 原图像目标尺寸标定

测得未拼接前左边块状疵病目标边缘点 X 方向的详细信息数据如表 1 所示,测得未拼接前左边块状疵病目标边缘点 Y 方向的详细信息数据如表 2 所示,对配准后图像的尺寸标定示意图如图 13 所示,测得配准后块状疵病目标边缘点 X 方向的详细信息数据如表 3 所示,测得配准后块状疵病目标边缘点 Y 方向的详细信息数据如表 4 所示。

表 1 X 方向上目标边缘检测的数据

Edge #	X Position/pixel	Y Position/pixel	Distance/pixel	Strength	Noise	Rising
1	200.974 3	202	171.974 3	92.666 7	4.111 1	1
2	242.644 1	202	213.644 1	70	0	0

表 2 Y 方向上目标边缘检测的数据

Edge #	X Position/pixel	Y Position/pixel	Distance/pixel	Strength	Noise	Rising
1	233	237.919 6	20.080 4	68.666 7	4	1
2	233	172.340 9	85.659 1	66	9.666 7	0

表 3 X 方向上目标边缘检测的数据

Edge #	X Position/pixel	Y Position/pixel	Distance/pixel	Strength	Noise	Rising
1	200.974 3	202	171.974 3	92.666 7	4.111 1	1
2	242.613 2	202	213.613 2	72.333 3	0	0

表 4 Y 方向上目标边缘检测的数据

Edge #	X Position/pixel	Y Position/pixel	Distance/pixel	Strength	Noise	Rising
1	233	237.919 7	20.080 5	68.666 9	4	1
2	233	172.341 0	85.659 2	66	9.666 8	0

配准前后数据对比可知,Y 方向尺度几乎不存在误差,而 X 方向尺度由于配准存在微小误差,误差值为 0.030 9,不到 1 个 pixel,转换为距离参数则远远小于本文要求的 24 μm 的拼接误差,在误差允许范围内。上述精度评价结果说明,该配准方法在进行高反射镜表面疵病检测时,能够直观地对疵病特征进行显示,并且可以达到一定的精度要求。

2.2 图像拼接时间对比

由于整个图像处理程序需要对多幅子孔径图像进行拼接,但是只有根据标称距离剪切时,剪切边缘存在疵病信息的需要利用上述算法进行拼接。所以图像拼接算法的高效性影响整个测试系统的最终检测时间,这里对两幅图像进行特征算法拼接所消耗的时间进行计算,如表 5 所示。

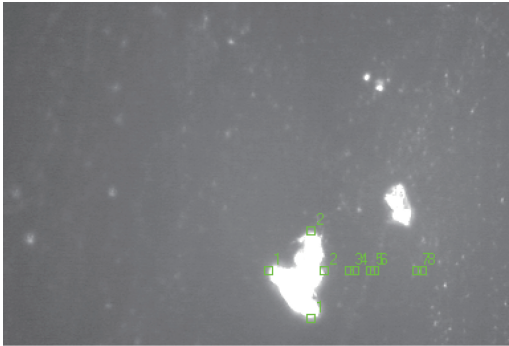


图 13 配准后图像尺寸标定

表 5 两种图像拼接算法的时效性对比

Harris 角点检测 图像拼接算法	基于改进后的特征点 位置匹配算法
NCC Found 25 matches	模板配准时间: $t_1=4.154\text{ s}$
RANSAC 7 matches left	图像融合时间: $t_2=2.076\text{ s}$
Elapsed time is 27.331 305 seconds	总的拼接时间: $T=t_1+t_2=6.230\text{ s}$

对比可知,Harris 角点检测图像拼接所用时间为 27.331 305 s,而基于特征位置匹配的图像拼接算法所用时间为 6.230 s,所以此拼接方法更适合高反射镜表面微米量级的疵病检测,虽然两幅图像之间的拼接时间不能说明整个检测系统的效率,但在众多的子孔径图像当中,除了少数需要进行算法拼接外,其余都是剪切拼接,所以此拼接策略为后续高效完成整个反射镜表面疵病检测奠定了基础。

3 结 论

为实现检测特定精密光学元件表面疵病,并实现高自动化、高精度的探测,利用 CCD 散射显微成像技术对激光反射镜表面的疵病信息进行检测识别,针对高反射镜表面疵病较少,且分布比较离散,而且整个显微成像系统畸变小,CCD 与反射镜样品仅存在平移而基本无旋转,所以在图像拼接时,不需要考虑旋转、畸变等问题。本文通过对采集到的子孔径疵病图像进行灰度校正,选择了一种基于改进后的特征点位置匹配算法,该算法适用于多幅子孔径图像之间的拼接,实现对高反射镜表面微米量级的疵病信息进行直观显示,进而高效完成整个测试系统的检测要求。

参考文献

[1] 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.

[2] 戴名奎,徐德衍.光学元件的疵病检验与研究现状的[J].光学仪器,1996,18(3):33-36.

[3] 戴名奎,徐德衍.光学元件的疵病检验与研究现状(续)[J].光学仪器,1996,18(4):32-39.

[4] 王科.光学元件表面疵病散射法检测技术研究[D].西安:西安工业大学,2013.

[5] 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.

[6] 马林江.超光滑表面疵病检测与图像处理技术的研究[D].南京:南京理工大学,2015.

[7] 黄敬霞,张斌.激光散射显微镜的自动检测系统[J].红外与激光工程,2007(S1):274-276.

[8] 肖冰.大口径光学元件表面疵病自动化检测系统关键问题讨论与研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[9] 李艾星.基于机器视觉的大口径精密光学元件表面疵病的识别研究[D].重庆:重庆大学,2007.

[10] 徐止喜.基于匹配的图像拼接关键技术研究 with 实现[D].成都:电子科技大学,2013.

[11] 胡社教,涂桂林,江萍.基于灰度相关图像拼接的改进算法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2008(6):863-865.

[12] 何攀利,范铁生.基于灰度相关改进算法的图像拼接[J].沈阳大学学报,2006,18(2):37-39.

[13] HARTLEY R,GUPTA R.Linear pushbroom cameras[C].Third European Conference on Computer Vision,1994.

[14] 刘严严,徐世伟,周长春,等.基于比值法图像拼接算法研究[J].电子测量技术,2008,31(7):56-58.

[15] 尹丽华,安居白,夏妍妍.基于特征点匹配的图像拼接算法[J].大连海事大学学报,2007(S1):163-164,174.

[16] 杨郑.基于块匹配和特征点匹配的图像拼接算法研究[D].成都:西南交通大学,2009.

作者简介

杨飞,硕士研究生,主要研究方向为光电信息检测与处理。

E-mail:875552406@qq.com

高爱华,教授,主要研究方向为光电测试技术、信号处理。

E-mail:freegah@126.com