

文章编号: 0253-2239(2007)06-1031-8

# 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\*

杨甬英<sup>1</sup> 陆春华<sup>1</sup> 梁 蛟<sup>1</sup> 刘 东<sup>1</sup> 杨李茗<sup>2</sup> 李瑞洁<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621000)

**摘要:** 根据国际 ISO10110-7 的表面缺陷标准及惯性约束聚变(ICF)工程标准, 提出了一种新颖的光学元件表面缺陷的光学显微散射成像及数字化评价系统, 多束光纤冷光源呈环状分布并以一定角度斜入射到数毫米视场的被检表面, 形成适合数字图像二值化处理的暗背景上的亮疵病图像。对 X,Y 两方向进行子孔径图像扫描成像, 利用模板匹配原理对获得的子孔径图像进行拼接得到全孔径表面疵病图像信息。基于数学形态学建立了可用于大口径表面检测扫描的图像处理的模式识别软件体系, 并应用二元光学制作了标准对比板, 以获得疵病正确的评价依据。最终利用该变倍光学显微镜散射成像系统得到能分辨微米量级表面疵病的图像, 其单个子孔径物方视场约为 3 mm, 对 X,Y 两方向进行 5×5 子孔径图像扫描成像, 并给出了与标准比对的定量数据结果。实验结果表明, 本系统完全可以实现光学元件表面缺陷的数字化评价。

**关键词:** 光学测量; 表面疵病; 显微散射成像; 形态学

中图分类号: TH741.8 文献标识码: A

## Microscopic Dark-Field Scattering Imaging and Digitalization Evaluation System of Defects on Optical Devices Precision Surface

Yang Yongying<sup>1</sup> Lu Chunhua<sup>1</sup> Liang Jiao<sup>1</sup> Liu Dong<sup>1</sup> Yang Liming<sup>2</sup> Li Ruijie<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)  
(<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000)

**Abstract:** A novel measurement and digitalization system of surface defects on optical devices—microscopic scattering imaging is put forward based on international ISO10110-7 surface defects standard and inertial confinement fusion engineering standard. The multi-beam optical fiber cold light source illuminates the detected surface whose view field is about several millimeters in a special angle. The image of bright defects in black background is formed that is suitable for digital image binary processing. The sub-aperture is detected and imaged using the X-Y scanning system. The information of full surface defects is obtained by stitching the sub-aperture images with the template matching principle. A complete digital evaluation software system of large aperture surface imperfections measurement based on morphology is presented. A group of standard reticules are fabricated by binary optics to scale defects. The resolution of the optical system of defects-microscopic scattering imaging is better than sub-micrometer and the view field of a sub-aperture is about 3 mm. An image array of 5×5 sub-aperture is obtained by two-dimensional scanning system. The full image of surface defects is reconstructed, and the quantitative comparison with the standard value is also presented. The experimental results show that the system is valid for measuring defects of precision surfaces.

**Key words:** optical measurement; surface defect; microscopic scattering imaging; morphology

## 1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)系统中, 其各放大级及

物理诊断系统都要有大口径、高激光损伤阈值的高精密光学元件, 而这些光学元件的质量除波前畸

\* 国家自然科学基金联合基金(10476026)资助课题。

作者简介: 杨甬英(1954—), 女, 山东莱芜人, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密检测、纳米测试方面的研究。

E-mail: chuyyy@hzncnc.com

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-10-23

变外,由于表面缺陷、划痕、碎边等各种疵病的存在将造成不同程度散射,从而会严重影响整个系统的正常运行<sup>[1,2]</sup>。因此惯性约束聚变系统采用类同于国际 ISO10110-7 的疵病标准,要求对光学元件表面疵病进行检测控制。与元件表面粗糙度检测用抽样取平均之类的统计方法不同,其难点在于,任意疵病无规则分布、疵病的分辨力要达到微米量级,这样要求物方视场小,必须借助光学显微系统进行微量检测,而整个表面又必须在全孔径宏观范围内定量检测。目前国内光学元件表面几乎均采用目视检测,人为的目视观察评估由于主观因素介入导致检测的准确度低,且效率低。因此对于大口径元件缺陷的数字化的定量检测,是惯性约束聚变系统、国防、国民经济尖端技术研究中需迫切解决的问题。

国内外对光学元件表面疵病检测有许多方法<sup>[3]</sup>,大多是根据疵病对光的不同散射、衍射等特性来判别。最基本及常用的是目视法,通过目视或放大镜观察,疵病由不同方法而呈亮像或暗像。还有高通滤波成像法,即采用特殊光栏,使具有高频成份的疵病散射光成像,可观察暗背景上的亮像。此外各种基于全积分散射技术(Total integral scattering, TIS)的扫描散射显微镜利用小口径激光束及半球收集散射光检测表面。除光散射成像外,还有利用疵病的激光衍射谱图识别进行扫描成像,激光干涉成像的轮廓仪等。但这些方法针对解决大口径表面疵病的数字化评价系统均有许多不足:目视观察的不确定性、低效;检测装置用的激光光源与国际标准确定的卤素灯不统一;检测口径只局限于一个很小的区域;疵病只能定性而无法精确定量及定标等。在精密光学元件的表面加工、检测、镀膜等部门,均采用人为目视的反射或透射的散射成像检

测,没有一个客观统一的数字化标准系统,迫切有待于建立疵病的数字化标准评价系统。

本文提出了最有利于数字化评价与工程标准相符的表面疵病显微散射成像系统,在 CCD 上形成了适合数字图像二值化处理的暗背景上的亮疵病图像。

## 2 光学显微散射暗场成像原理及系统

建立对疵病图像处理的数字化模型,必须获得可以适合于计算机模式识别的疵病图像,因此必须了解光学元件表面疵病的特性从而可以构建一个完善的光学系统。一些精密样品检测得到其主要的疵病是划痕、麻点等,特别是划痕长度可达几十毫米,宽度可从亚微米到几十微米,相对而言检测的长度量跨度较大。国际标准疵病一般采用散射光检测,根据光散射理论来分析疵病,基本上可以用光的几何光学成像解释,特别是长划痕的形状、宽度、边缘及“V”型沟槽的角度。研究光学元件表面的缺陷,有助于深入分析其在像面上的散射成像,特别是从实验及理论上分析缺陷的不同性质,其散射率的变化将是后续定标的一个重要基础。为了深入了解缺陷的性质,对大量的样品利用干涉方法与扫描电镜对其宽度与深度作了详细地数据采集与分析。

图 1 是对惯性约束聚变元件表面疵病特性获取的具有普遍性的实验图。图 1(a)是利用干涉显微镜得到的表征划痕深度的干涉条纹,可以得出经抛光后划痕深度约为 200~300 nm;图 1(b)是对图 1(a)中的划痕用扫描电镜对其宽度测得的单条划痕宽度约为 200~300 nm。如果利用一特殊的研究装置能够获得该划痕的图像,则意味着对疵病可以达到微米量级的分辨力。

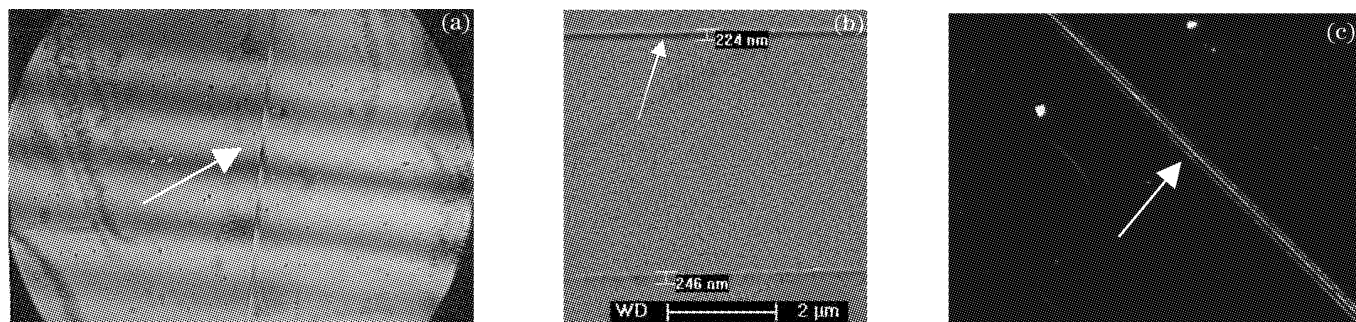


图 1 实验图。(a)干涉显微镜得到的表征划痕深度的干涉条纹,(b)是对(a)中的划痕用扫描电镜测得的宽度,(c)显微散射成像系统得到的划痕图像

Fig.1 Experimental picture. (a) Interference fringes attributed to the scratch deepness obtained by interferometric microscope, (b) width of scratch shown in (a) obtained by scanning electronic microscope, (c) image of scratch obtained by the system of microscopic scattering imaging

了解划痕的反射和散射特性也是建立一个完善检测系统的关键。光散射问题一直是光学研究领域的一个重要的基本问题<sup>[4,5]</sup>。在任何一个光学系统中,偏离主光线方向的几乎所有的方向上均存在散射光。通常可以把主光线以外的方向上的光传播均称为光散射。表面划痕、麻点的散射一般可比入射波长长且宏观不规则,需要几何光学的方法来解决散射场的分布。因此,粗糙表面的几何光学散射可以用一系列分平面光散射叠加而成。如图 2 所示, PQ 为入射表面,其上存在一疵病,其截面类似于“V”型凹坑,其尺寸大于入射光波波长,在其上光波会产生镜面反射。法线  $N_2N'_2$  为正常无疵病表面的法线,  $N_1N'_1$  为疵病中某一分平面的法线。因此当光沿  $AO_2$  入射时,在正常表面的反射光(虚线)沿  $O_2A''$  出射,而在疵病表面,分别按分平面的法线做镜面反射,  $O_1A'$ (实线)即为其中某一出射光线。此时疵病表面的几何光学的散射光就有一系列类似于  $O_1A'$  的光线组成,其方向偏离于主光线  $O_2A''$ 。将该光路放入显微成像系统中,使散射光线  $O_1A'$  系列进入成像系统,而主光线  $O_2A''$  不进入成像系统。完全理想的表面无散射背景为暗,有疵病则可在显微成像系统中观察到暗背景上亮疵病像,并且此亮暗构成的图像将非常有利于数字化的处理。

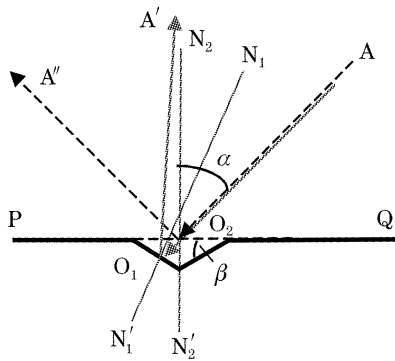


图 2 疵病散射几何光学模型

Fig. 2 Geometrical optical model of surface defect scattering

此外如图 3 所示,表面疵病如刻痕的方向与光照方向(入射光线在样品平面上的投影方向)所成的角度  $\gamma$  和疵病所成像的质量有很大关系。当两者相互垂直时,散射光满足图 2 的疵病散射几何光学模型,进入接收系统成像效果最好;反之如图 4 所示当光沿刻痕方向入射时,入出射光基本满足光的几何反射定律,散射被减弱反射光大部分从另一端逸出,很少有散射光产生并进入样品上方的成像系统。因此随着  $\gamma$  角变小,疵病散射光所成亮像变得越来越暗,实验证明当  $\gamma$  约为  $75^\circ$  时,亮像基本消失。对于

被检表面,其上面的刻痕疵病方向都是不规则、无序的。要实现快速数字化检测,因此必须采用环形分布的光源,使被检表面得到四周环绕照射,无论疵病方向如何,经检测系统的光照系统照射后,均能观察到疵病图像。

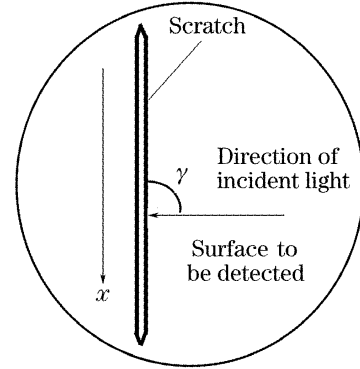


图 3 光垂直于刻痕方向入射

Fig. 3 Incident light perpendicular to scratch direction

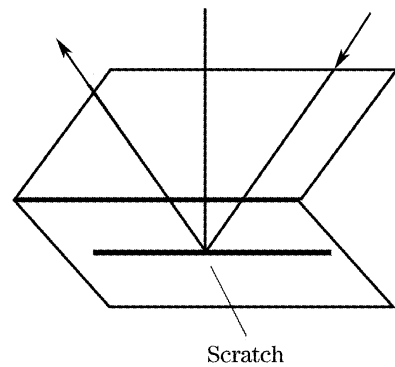


图 4 光沿刻痕方向入射时的光路图

Fig. 4 Incident light along to scratch direction

根据上述分析建立了一个光学元件表面疵病的显微散射成像系统,如图 5 所示。多束光纤光源环形布局,光源采用了可调的 20 V/150 W 卤素灯,符合疵病检测的标准光源,多束光纤数满足  $\gamma$  角要求;为防止检测中的光学元件表面热变形,采用光纤冷光源照明。以特定的角度  $\alpha$  照射被检表面,调整使得到的像的质量最佳。位于光学系统物面上的入射光经被测表面反射从另一端出射,表面疵病诱发的散射光反射后进入光学成像系统,经变倍(由被测物面大小而定)显微放大系统收集并成像于 CCD 上,输入计算机做数字化处理。样品台周边采用全黑不透光、低反射率的材料,减少杂散光对疵病散射光的影响。由此可以得到如图 1(c)所示的疵病图像,其是一暗背景上的亮像,非常适合于数字图像处理。

获取大口径元件的表面上微米量级的疵病信息,必须利用光学系统进行子孔径放大成像,再对获得的子孔径图像进行拼接,得到完整的元件表面图

像信息。本系统利用  $xy$  两个方向的平移扫描来获得表面的子孔径采样, 然后对采集到的图像利用模板匹配及边缘拓展法施行拼接, 实现全孔径样品表面检测。由于采用了环形分布的光源, 使被检表面

得到四周环绕照射, 无论疵病方向、位置如何, 经检测系统的光源照射后, 均能观察到疵病图像。然后又采用了  $XY$  两个方向的平移扫描来获得表面的子孔径采样, 因此可以确保不存在疵病漏检的情况。

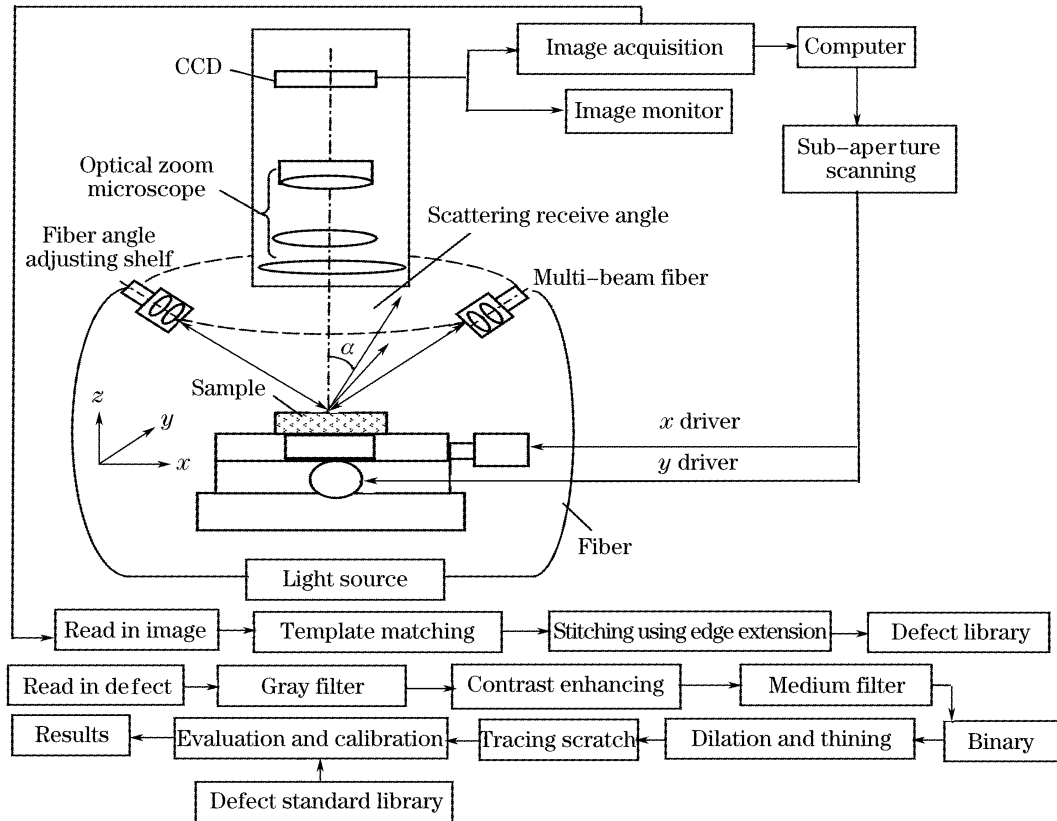


图 5 疵病数字化检测系统及模式识别模型

Fig. 5 Microscopic scattering imaging system and complete digital evaluation software flow chart

实现光学元件表面缺陷的数字化评价很关键的就是疵病图像模式识别及特征提取模型的建立。图 5 的下半部分框图为表面缺陷图像模式识别及特征提取、标准比对的处理流程。首先利用中值滤波消除系统随机噪声、CCD 背景噪声等。在灰度拉伸二值化后, 剔除无疵病的子孔径的冗余信息、有效的压缩数据量。利用数字形态学进行图像分割、利用形态学的膨胀(Dilation)细化(Thinning)等算法, 对二值化图像进行最佳处理, 得到疵病长度宽度等特征信息从而完成疵病模式识别。最终利用二元光学建立一组标准刻线标准板以该标准为基础, 可以在 CCD 上得到一系列与物面实际尺寸相关的几何参量(长、宽、面积等), 对各类疵病加以分类、评估输出结果。

$\Phi 25.7 \sim \Phi 4.0$  mm, 由于 CCD 成像接收面是一个矩形, 因此它对应的物方视场是显微镜物方视场的内接矩形, 这是采集单个子孔径时实际的物方视场。实验时当显微镜成像系统放大倍数为 4.5 倍时, 则对应的物方视场约为 3 mm 左右。在目前实验的基础上, 对缺陷能达到微米量级的分辨力, 则对应的物方视场可达 10 mm 左右。由于被检元件的表面口径可达几百毫米, 因此必须对样品利用  $xy$  两个方

### 3 全孔径疵病图像的扫描采集、数字化特征提取及实验结果

#### 3.1 疵病图像的扫描采集

该系统设计了(0.7~4.5)倍变倍显微镜成像系统, 目视观察时对应的物方线视场孔径大小为

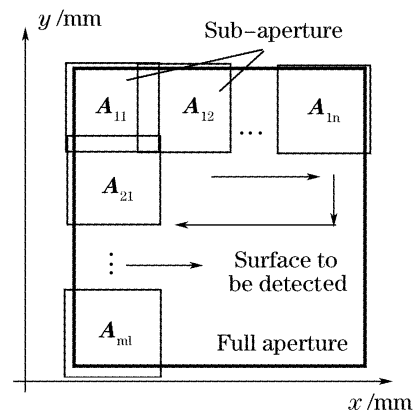


图 6 子孔径扫描

Fig. 6 Scanning of sub-aperture

向的平移控制系统来获得各个子孔径图像扫描采集,然后利用图 5 下部所示的数字图像处理流程实施子孔径图像拼接,才能得到全孔径的疵病图像。扫描如图 6 所示,从元件的左侧上边缘开始,沿  $x$  轴向右扫描,扫描台每移动一间距同步采集一幅图像,并以对应坐标位置命名  $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}$  图像矩阵,按图中的箭头轨迹扫描,完成对整个元件的全孔径图像采集。图 7 所示的是本系统连续采集的  $5 \times 5$  子孔径序列图。

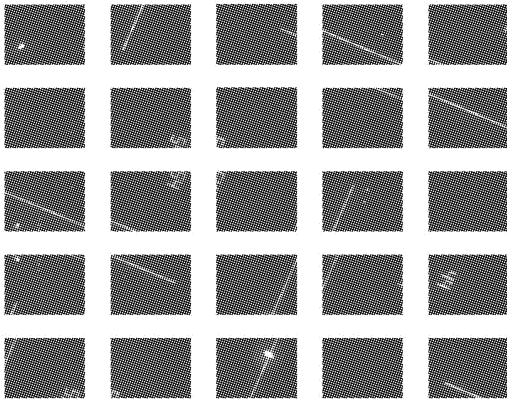


图 7  $5 \times 5$  子孔径图像阵列

Fig. 7 Image array of  $5 \times 5$  sub-aperture

### 3.2 子孔径图像的匹配和拼接

由于对疵病的高分辨力使得物方的视场有限制,所以单个长划痕疵病的像会跨越数个子孔径图像,只有利用模式识别将它们拼接起来形成各个疵病图像,才能正确提取完整的疵病信息。

图像匹配是拼接前的关键步骤,其目的就是要找到相邻图像的重合部分,即实现图像对齐<sup>[6~10]</sup>。相邻两幅图像的边界必须存在重叠区域才能进行匹配,本实验采集所到的相邻的子孔径图像有重叠的部分,重叠比例通过控制电机的移动距离决定。若想仅依靠坐标就实现疵病的拼接,那么所采用的定位台必须达到非常高的精度,这实现起来很困难。因此本文采用了基于模板的匹配算法,直接从待拼接图像的灰度值出发,计算两幅待拼接图像重叠区域的灰度值的差异来判断待拼接图像重叠区域的相似程度,从而得到待拼接图像重叠区域的范围和位置。拼接的成功与否则直接会影响到疵病是否会隔断与完整性。

水平方向匹配、拼接的模型如图 8 所示。把待拼接的两幅图分别定义为包含图和匹配图,在包含图的重叠区域内取一个包含特征信息的模板图像  $T$ ,然后将此模板叠放在匹配图  $S$  上平移扫描,模板  $T$  覆盖下的那块图像叫子图  $Q^{m_1, n_1}$ 。 $(m_0, n_0)$  为模

板  $T$  的左上角像素点在包含图中的坐标,  $(m_1, n_1)$  为子图  $Q^{m_1, n_1}$  的左上角像素点在匹配图中的坐标。

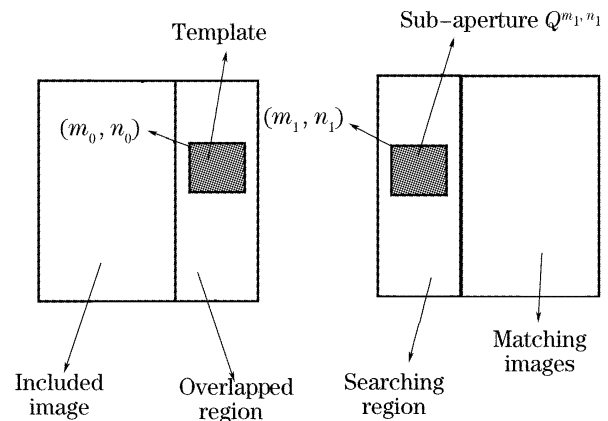


图 8 模板匹配法

Fig. 8 Method of template matching

设  $T(m_0 + i, n_0 + j)$  和  $Q(m_1 + i, n_1 + j)$  分别为模板  $T$ , 子图  $Q^{m_1, n_1}$  内位于坐标  $(m_0 + i, n_0 + j)$  处和  $(m_1 + i, n_1 + j)$  处像素的灰度值,将灰度差值的平方和作为评价函数,来比较模板  $T$  和子图  $Q^{m_1, n_1}$  的相似程度:

$$D(m_1, n_1) = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [Q(m_1 + i, n_1 + j) - T(m_0 + i, n_0 + j)]^2, \quad (1)$$

其中  $M, N$  分别为模板  $T$  的长度和宽度。因此,  $D(m_1, n_1)$  是关于  $m_1$  和  $n_1$  的函数,通常该函数值越小,那么  $T$  和  $Q^{m_1, n_1}$  的相似程度越高。理想状态下,如果  $T$  和  $Q^{m_1, n_1}$  完全一致,则函数值等于 0。但实际情况中往往通过在匹配图中移动模板  $T$  的位置,搜索使这个函数值为最小值来确定最佳匹配位置。匹配图的搜索区域是由电机扫描决定的重叠区域。模板  $T$  在搜索区域内水平和垂直移动,为降低相邻两幅图可能存在垂直方向的交错误差,  $x, y$  两移动方向已基本调整至垂直。

在找到了最佳匹配位置即找到了相邻图像的重合部分,然后调入匹配图,将重合区域覆盖在包含图上,也就是用最佳匹配位置的  $Q^{m_1, n_1}$  完全覆盖住模板  $T$ ,这样就完成了拼接。当相邻两幅的重叠区域没有疵病特征信息,而是黑背景时往往容易导致误匹配,原因是在包含图中很难找到合适的包含特征信息的模板,另一方面由于背景的灰度比较均匀并并无明显差异,因此在匹配图中移动模板时很难找到精确的匹配位置。针对这种特点,根据 CCD 的分辨力、视场大小、步进电机的移动步长等参量计算出相邻两幅子图理论上的重合区域大小直接实现拼接。由于重叠区域内并没有所关注的疵病,这种直接拼

合的方法即使有误差也不会影响对后续的疵病信息的提取,当拼合范围较大时可能存在的积累误差也不会影响对疵病信息的提取,因为程序一搜索到重叠区域含有疵病特征信息的子孔径图就采用了“边缘拓展法”拼接,保证了划痕疵病的完整性和连续性,检测关注的恰恰是疵病。

基于上述相邻两幅图的拼接方法,按照  $A_{11} \sim A_{15}, A_{21} \sim A_{25}, A_{31} \sim A_{35}, A_{41} \sim A_{45}, A_{51} \sim A_{55}$ , 的顺序把图 7 所示的  $5 \times 5$  子孔径序列图拼接就可得到全孔径的疵病图像。除了第一行和第一列的子孔径图只需水平或垂直方向的匹配、拼接以外,其他每一幅子孔径图  $A_{ij} (i=2, \dots, 5, j=2, \dots, 5)$  都既可以与上边相邻的子孔径图像  $A_{i-1,j}$  又可以与左边相邻的子孔径图像  $A_{i,j-1}$  匹配、拼接。因此需要对子孔径图左边和上边的重叠区域内的特征信息量进行比较,来确定按哪个方向为主拼接。由于疵病像的灰度比暗背景的灰度大很多,因此重叠区域内像素的灰度值总和越大,它所包含的疵病特征信息就越多。根据特征信息多少,确定匹配、拼接的主方向。根据边界信息延伸拼接的方法为“边缘拓展法”,它的特点是具有很小的拼接累积误差。图 9 所示的是用“边缘拓展法”对  $5 \times 5$  子孔径序列图拼接的结果,可见由于“边缘拓展法”在拼接时能做到每个子孔径图都能与其相邻的子孔径图精准匹配与拼接,因此跨越几个子孔径图的长划痕都被拼接起来,而且保持了很好的连续性。该方法对于更大的子孔径序列图同样能获得很好的拼接效果。

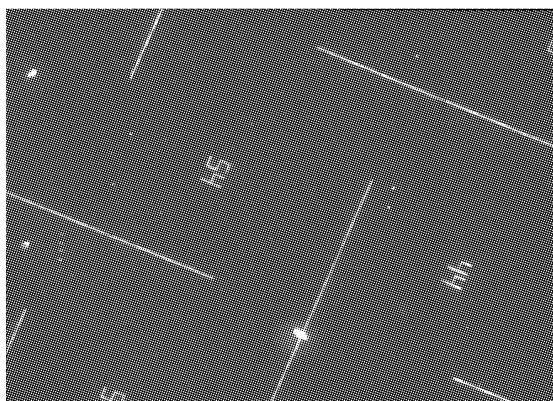


图 9 “边缘拓展法”对  $5 \times 5$  子孔径序列图拼接的结果

Fig. 9 Stitching result of  $5 \times 5$  sub-aperture using edge extension

### 3.3 疵病图像的特征提取

疵病图像的特征提取也是非常关键的环节<sup>[11,12]</sup>。如图 10(a)所示的是拼接后提取的一个完整的划痕疵病。为了减少非均匀光强引起的背景亮度不均匀,使用灰度形态学中的 Top-Hat 运算,它

从原图像中减去开运算后的图像,只要选择结构元素大到不能完全匹配疵病目标,即可将需要的目标从复杂的背景中提取出来,同时也减少了非均匀光强引起的背景亮度不均匀,因此得到的如图 10(b)所示的具有均匀背景的疵病图像。Top-Hat 运算得到的图像通常衬比度很低,通过灰度变换可以增加衬比度,改善疵病提取可靠性。同时利用灰度比例拉伸达到增强衬比度的效果,如图 10(c)所示。

图像中除了划痕疵病和麻点等疵病以外,由于采集数据受到环境干扰而含有噪声,使图像模糊,甚至淹没和改变特征,给图像分析和识别带来困难。为了消除噪声,本系统采用中值滤波的方法,实验结果显示对于消除脉冲噪声是很理想的,而且不会引起严重的模糊,较好地保持了图像的边界。得到的结果如图 10(d)所示。

为了从多值的数字图像中只提取出疵病目标,最常用的方法就是设定某一阈值  $t$ ,用  $t$  将图像的数据分成两部分:大于  $t$  的像素群和小于  $t$  的像素群,例如输入图像为  $f(x, y)$ ,输出图像为  $g(x, y)$ ,则

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq t \\ 0, & f(x, y) < t \end{cases} \quad (2)$$

由此得到一幅二值图像,它可为后面对疵病图像的二值数学形态学操作提供基础,同时使去除冗余信息及特征提取的算法容易实现。对图 10(d)进行二值化,得到如图 10(e)所示的二值图。

由于光照不均匀,划痕等疵病上各处的亮度差异较大,导致二值化后图像中的划痕中部可能有一些空洞甚至发生分离断裂,不利于长度和宽度的精确计算,而利用形态学的膨胀操作,可将断裂处连接起来,并填补空洞,大大增加了疵病图像的连续性和完整性。为了计算划痕的长度,可利用细化运算提取划痕的中轴线。图像细化的过程也就是逐层剥落非骨架部分像素的过程,随着细化的进行,划痕的像按一定规律不断变细,最终得到连续、单个像素宽的细线,如图 10(f)所示。

疵病的几何特征参量可通过计算两个端点间的欧式距离来近似划痕的长度。确定细化后划痕的两个端点坐标  $(m_0, n_0)$  和  $(m_1, n_1)$ ,则其长度近似为  $L = \sqrt{(m_1 - m_0)^2 + (n_1 - n_0)^2}$ 。而划痕的宽度,由图 11 中的几何关系得可得  $d = h \cos \theta$ 。其中  $h$  为图像的数据矩阵的一列当中属于划痕像的像素个数,  $\theta$  为划痕的倾斜角,可通过在细化的划痕上取点求斜率,再求反正切得到。事实上,由于散射成像的原因,以及滤波、二值化等图像预处理操作也可能带来

误差,导致划痕的像在不同的位置处宽度并不完全相等,可取多处宽度值中的最大值或均值作为划痕像的宽度。划痕跨越多个子孔径,因此是疵病计算中较为复杂的,而其余如麻点疵病类似于圆形,评价

时是以面积来计算,相对而言提取麻点的特征信息比较简单,同样利用上述的过程操作可以获取整个孔径的疵病提取。

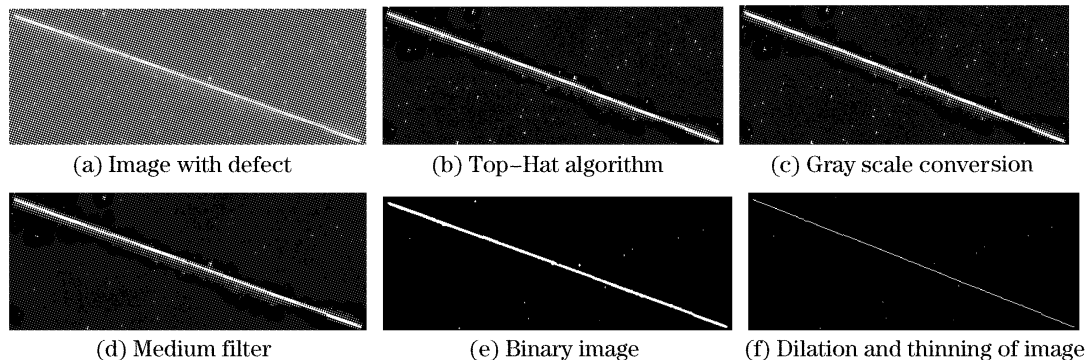


图 10 疵病图像处理流程及结果

Fig. 10 Results and processing flow chart of image with defect

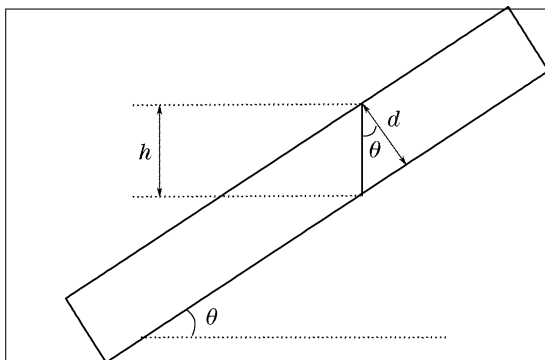


图 11 划痕的宽度计算

Fig. 11 Calculation of scratch width

### 3.4 标准对比

在疵病图像的特征提取中,数字化得到的疵病信息是以像素为单位的,要确定疵病的真实尺度,必须采用标准对比的方法来确定。本文提出利用二元光学来制作标准对比板,将一系列特定长度、宽度、深度的刻线作为标准并模拟疵病,与被检疵病置于同一成像环境中,即同样的放大倍率、光照、同一成像检测系统对其进行成像并且计算,利用标准刻线计算出图像像素大小与物面尺度之间的对比因子,通过换算即可得到对应的被检疵病的大小。对于划痕疵病宽度的计算,由于划痕疵病宽度一般在微米量级,利用光学显微散射成像原理,图像中表征宽度的像素数与实际物面尺度并非成简单的线性关系,而是一个复杂的多次项变化。因此在疵病检测中,对于宽度上的定标利用了标准对比板上对大量不同宽度的线宽数据进行了分析与处理。将标准对比板放置在显微散射成像系统中,对其上面的每一个标准疵病宽进行测量,得到对应的图像上的像素数表示的划痕线宽为  $W'$ 。再结合对应的标准刻线的宽

度  $W$ ,得到标准宽度与成像像素数之间的尺度比例关系。根据实验的数据对其进行多项式曲线拟合,确定对比函数  $g(x)$ 。拟合得到的对比函数基本满足三次函数:

$$g(x) = 0.6818x^3 - 18.2420x^2 + 166.6163x - 514.1105, \quad (3)$$

其中  $x$  为成像在 CCD 上的跨越疵病图像宽度的像素数,  $g(x)$  则为疵病的实际宽度。

对于划痕疵病长度的计算,由于疵病划痕长度远远大于入射光波长,故在长度方向上疵病成像时符合几何光学线性成像,划痕的实际长度与像素值的比值近似于线性关系。因此对不同长度的划痕多次测量取其平均值得到,实际长度和成像像素值之间的对比因子  $k' = L'/L = 0.1139$ , 其中  $L'$  为像素值,  $L$  为划痕实际长度,单位为微米。本文对图 10 中的划痕疵病进行了参量计算,长度方向跨越 587 pixel,由比例因子  $k'$  算出其长度为 5.11 mm,划痕宽度方向跨越 10 pixel,依据(3)式,求解得到其宽度为 9.65  $\mu\text{m}$ 。而此疵病的设计光刻长度为 5 mm,宽度为 10  $\mu\text{m}$ ,经计算得到长度的相对误差为 2.2%,宽度的相对误差为 3.5%。由此完成了疵病的图像拼接、特征提取模式识别及最终的标准对比。

## 4 结 论

提出的一种新颖的光学元件表面缺陷的数字化评价系统。其特点在于可以对任意无规则分布的疵病利用光学显微散射成像达到微米量级的分辨力;特定的多束光纤光源照明形成适合于数字图像二值化处理的暗场的亮疵病图像;利用模板匹配原理对

获得的  $x, y$  两方向扫描的子孔径图像进行拼接得到全孔径表面疵病图像信息;完成了疵病的图像拼接、特征提取模式识别及最终的标准对比等一系列数字自动化评价。在目前实验的基础上,对缺陷能达到微米量级的分辨力,估计扫描检测完一块  $800\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  的光学平板表面需  $1 \sim 2\text{ h}$ , 但是若采用高速扫描电机和高性能的计算机,检测的工作效率可以进一步提高。该研究成果将人为主观的目视观察跃升至客观的计算机数字化的定量检测,为各类大口径光学元件表面缺陷的自动化检测和建立国内外光学元件表面缺陷的数字化评价标准提供了有效的检测方法。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Fengquan, Yang Yongying, Sun Dandan *et al.*. Digital realization of precision surface defect evaluation system [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **6150**: 61500F-1~61500F-5
- 2 Sun Dandan, Yang Yongying, Wang Fengquan *et al.*. Microscopic scattering imaging system of defects on ultra-smooth surface suitable for digital image processing [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **6150**: 6150012-1~6150012-6
- 3 Dai Mingkui, Xu Deyan. The present situation of imperfection testing and research on the optical component [J]. *Optical Instruments*, 1996, **18**(3): 33~39 (in Chinese)  
戴名奎,徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状 [J]. *光学仪器*, 1996, **18**(3): 33~39
- 4 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th Edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 695~734
- 5 Qu Xinghua, He Ying, Han Feng *et al.*. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 547~551 (in Chinese)
- 曲兴华,何 滢,韩 峰等. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 547~551
- 6 Li Ziqin, Wang Qian. Edge similar degree and its application in the comparison of suppressing speckle noise algorithm [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **33**(5): 655~658 (in Chinese)  
李自勤,王 潜. 边缘相似度及其在散斑噪声抑制算法比较中的应用 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 655~658
- 7 Di Hui, Yu Qifeng, Zhang Xiaohu. An algorithm for infrared image enhancement based on gray scale transform [J]. *J. Applied Optic*, 2006, **27**(2): 12~14 (in Chinese)  
邸 慧,于起峰,张小虎. 一种基于灰度变换的红外图像增强算法 [J]. *应用光学*, 2006, **27**(1): 12~14
- 8 Li Zhigang, Ji Yubo, Xue Quan. A fast stitching algorithm for edge overlapping images [J]. *Computer Engng.*, 2000, **26**(5): 37~38 (in Chinese)  
李志刚,纪玉波,薛 全. 边界重叠图像的一种快速拼接方法 [J]. *计算机工程*, 2000, **26**(5): 37~38
- 9 Zhong Li, Hu Xiaofeng. Stitching algorithm for overlapping images [J]. *J. Image and Graphics*, 1998, **3**(5): 368~370 (in Chinese)  
钟 力,胡晓峰. 重叠图像拼接算法 [J]. *中国图象图形学报*, 1998, **3**(5): 368~370
- 10 Cheng Weiming, Chen Mingyi, Ding Zheng *et al.*. Fringe-pattern connection method for shape measurement of 3-D large object [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 74~79 (in Chinese)  
程维明,陈明仪,丁 峥等. 圆柱坐标下的多孔径拼接测量三维面形 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 74~79
- 11 Hui Jianjiang, Liu Zhaohui, Liu Wen. Application of mathematical morphology on infrared image of multi-dim-small target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 626~629 (in Chinese)  
惠建江,刘朝晖,刘 文. 数学形态学在红外多弱小目标提取中的应用 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 626~629
- 12 Yuan Huijing, Wang Yongtian. A new denoising method for small target detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 609~612 (in Chinese)  
袁慧晶,王涌天. 一种抗干扰的弱小目标检测方法 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 609~612