

# 基于光谱估计与多光谱技术的光学元件表面疵病检测

杨言若<sup>1,2</sup>, 步扬<sup>1\*</sup>, 徐静浩<sup>1</sup>, 王少卿<sup>1</sup>, 王向朝<sup>1</sup>, 李杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621000

**摘要** 为实现精密光学元件表面疵病的高效测量和精确统计,提出了一种基于光谱估计和多光谱技术的光学元件表面疵病检测方法。该方法利用光谱估计提取白光图像中不同波长的单光谱疵病图像,并合成多光谱疵病图像,然后采用优化后的 OTSU(Otsu Image Segmentation Algorithm)分别对单光谱与多光谱疵病图像进行分析。基于该方法搭建了光学元件表面疵病检测装置,获得了白光照明条件下光学元件表面疵病的图像。实验结果表明,与原始白光图像相比,合成多光谱图像的疵病检出数量提升了 1.85 倍,疵病检出面积最大增加了 6.0 倍,检测效率得到明显提高。根据光学元件表面疵病的特性选取不同波长组合来生成单光谱与多光谱图像,可更加高效精确地检测出传统检测技术不易检出的疵病信息。

**关键词** 测量; 疵病检测; 光谱估计; 多光谱技术; 疵病数量; 疵病面积

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0904002

## Measurement of Surface Defects of Optical Elements Based on Spectral Estimation and Multispectral Technique

Yang Yanru<sup>1,2</sup>, Bu Yang<sup>1\*</sup>, Xu Jinghao<sup>1</sup>, Wang Shaoqing<sup>1</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1</sup>, Li Jie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optical Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621000, China

**Abstract** A method based on spectral estimation and a multispectral technique is proposed to accurately and efficiently measure surface defects of optical elements. Using this method, we estimate and obtain single spectral defect images at different wavelengths and compose a multispectral defect image from different single spectral defect images. The optimized OTSU (Otsu Image Segmentation Algorithm) is used to analyze and compare the images. A defect measurement system of optical elements is developed, and color defect images are obtained upon white-light illumination. The experimental and analytical results show that single spectral or composing multispectral images from different wavelength combinations detect more defects accurately and efficiently. In the composite image, the number of detected defects increases by 1.85 times, and the area of detected defects increases by approximately 6.0 times for different kinds of defects compared to the original white-light image. The composing images from optimized wavelength combinations can be used to detect and obtain different small defects with high efficiency and high quality.

**Key words** measurement; defect measurement; spectral estimation; multispectral technique; defect number; defect area

**OCIS codes** 120.4630; 110.0180; 110.4190; 330.7326

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61405210)、国家科技重大专项(2009ZX02205-001,2016ZX02201-001)、广西高校光电信息处理重点实验室开放基金(KFJJ2016-03)

\* E-mail: buyang@siom.ac.cn

# 1 引 言

经抛光加工后的光学元件表面仍存在麻点、划痕等疵病<sup>[1-2]</sup>。在精密光学系统(如飞秒激光器)中,光学元件表面的疵病会引起衍射,从而产生噪声光斑,导致光学系统的精度降低<sup>[3-4]</sup>。同时,光学元件表面的疵病还会吸收大量光能量,产生热应力,导致光学元件表面甚至整个光学系统遭到破坏<sup>[5-6]</sup>。因此,在使用精密光学系统前均需要对其光学元件进行表面疵病精密检测。

根据检测原理不同,光学元件表面疵病检测方法主要有目视法<sup>[7]</sup>、滤波成像法<sup>[8-11]</sup>、暗场成像法<sup>[12-13]</sup>等。目前主流的表面疵病检测方法为基于白光照明和传统光学显微成像术的暗场成像法。基于该方法的检测装置通常使用白光作为照明光源,使用灰度相机作为成像单元。在该装置拍摄的图像中,元件表面疵病的细节信息容易被掩盖或者忽略<sup>[14]</sup>。采用多光谱技术检测疵病的方法可以弥补上述方法的不足。传统的多光谱检测方法一般采用滤波片分光法等物理分光方法来提取疵病。受到可用滤波器件的限制,传统的多光谱检测方法的检测效率远不能满足高效准确的光学元件疵病图像检测要求<sup>[15]</sup>,且其不能根据疵病类型快速准确地选择不同类型的滤波器件。本文采用光谱估计算法提取疵病的单光谱分光图像,利用多光谱技术合成新的多光谱疵病图像<sup>[16]</sup>,利用优化后的 OTSU (Otsu Image Segmentation Algorithm)筛选最佳疵病合成图像,在最佳疵病合成图像中进行疵病位置检测和数量统计,从而提高疵病检测的精度和效率,降低疵病检测成本。

# 2 基本原理

对光学元件的表面疵病进行图像再现受很多与波长相关的因素影响,如光源的光谱辐射分布  $E(\lambda)$ 、电荷耦合元件/互补金属氧化物半导体 (CCD/CMOS) 传感器的光谱灵敏度  $S(\lambda)$ 、滤波器件的光谱传输率  $f_i(\lambda)$ 、光学系统的光谱传输率  $L(\lambda)$ 、被测物体某一位置  $S(x, y)$  处的表面反射率  $r(\lambda, x, y)$ 、噪声  $n_i(x, y)$  等,其中  $\lambda$  为光谱波长,  $i$  为 CCD/CMOS 的响应通道,  $(x, y)$  为像素点的位置。

根据光谱辐射的原理,像素点  $(x, y)$  处的输出信号可表示为

$$v_i(x, y) = \int_{\text{vis}} f_i(\lambda) E(\lambda) S(\lambda) \cdot L(\lambda) r(\lambda, x, y) d\lambda + n_i(x, y), i \in \{r, g, b\}, \quad (1)$$

式中:  $r$  为 CCD/CMOS 的红光通道,  $g$  为绿光通道,  $b$  为蓝光通道。

将连续波长离散化后写成向量或矩阵形式,并在可见光范围(400~700 nm)内对反射光谱每隔 5 nm 进行离散化,即  $\mathbf{r} = [r_{400}, r_{405}, \dots, r_{700}]^T$ ,  $\mathbf{r}$  为  $61 \times 1$  的向量,  $r_{400}$  为波长为 400 nm 时的反射光谱率。令  $\mathbf{A} = \mathbf{F}^T \mathbf{E} \mathbf{S}$  为系统矩阵,代表整个疵病检测系统的特性,则探测图像的计算公式为

$$\mathbf{V} = \mathbf{F}_1^T \mathbf{E} \mathbf{S} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{n} = \mathbf{A} [r_{400}, r_{405}, \dots, r_{700}]^T + \mathbf{n}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为探测图像;  $\mathbf{F}_1$  为滤波器件光谱传输率矩阵;  $\mathbf{E}$  为源光谱辐射分布矩阵;  $\mathbf{S}$  为 CCD/CMOS 光谱灵敏度矩阵;  $\mathbf{n}$  为噪声矩阵。

考虑成像系统为线性系统,基于最小二乘法可使估计反射光谱  $\mathbf{r}'$  与被测物体实际反射光谱  $\mathbf{r}$  之间的方差  $e = \langle |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \rangle$  最小化,估计反射光谱为

$$\mathbf{r}' = \mathbf{G} \mathbf{v}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{v}$  为输出信号,  $\mathbf{G}$  为光谱估计矩阵。根据维纳方法可得到矩阵  $\mathbf{G}$  为

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_{rr} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{R}_{rr} \mathbf{A}^T + \mathbf{R}_{nn})^{-1} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}^T (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^T + \mathbf{R}_{nn})^{-1}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{R}_{rr} = \langle \mathbf{r} \mathbf{r}^T \rangle$  为被测物体实际反射光谱  $\mathbf{r}$  的自相关矩阵,该矩阵可通过反射光谱测得;  $\mathbf{R}_{nn} = \langle \mathbf{n} \mathbf{n}^T \rangle$  为噪声的自相关矩阵,可通过测量 CCD 的噪声图样获得。通过比对矩阵元均为 0 的  $\mathbf{R}_{nn}$  与矩阵元均为  $\bar{N}_{DC}$  的  $\mathbf{R}_{nn}$  ( $\bar{N}_{DC}$  为暗环境下噪声直流分量的均值), (4) 式采用的是矩阵元均为  $\bar{N}_{DC}$  的  $\mathbf{R}_{nn}$ 。矩阵  $\mathbf{r}$  是通过分光光度计测得的由标准色卡光谱反射率构成的矩阵,在采用分光光度计标定反射率时,已考虑暗场成像入射光和反射光角度、CCD 相对位置。矩阵  $\mathbf{v}$  是装置测得的标准色卡的 RGB 矩阵。光谱估计矩阵  $\mathbf{G}$  为  $61 \times 3$  的矩阵,实验中矩阵  $\mathbf{G}$  为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -0.006301 & 0.024998 & 0.147081 \\ -0.018179 & 0.035803 & 0.175487 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.452833 & -0.111536 & -0.043865 \end{bmatrix}_{61 \times 3} \circ \quad (5)$$

根据(3)~(5)式,通过输出信号  $\mathbf{v}$  以及光谱估计矩阵  $\mathbf{G}$  可计算出反射光谱。根据光谱估计公式得到

400~700 nm 范围内的不同波长的估计反射光谱。设置滤波矩阵  $F$ , 对估计光谱进行光谱选择与合成, 将选取的三个指定波段的光谱图像作为新图像的 RGB 三个分量进行重新合成, 则光学元件表面疵病的多光谱合成图像  $I$  为

$$I = F \cdot r' = F \cdot G \cdot v. \quad (6)$$

当间隔 5 nm 离散化 400~700 nm 波长区间时,  $F$  为  $3 \times 61$  的矩阵,  $F$  的每行只有一个元素为 1, 其他元素均为 0。因此, 多光谱合成图像  $I$  为

$$\begin{bmatrix} I_r \\ I_g \\ I_b \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ v_g \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ v_g \\ v_b \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中:  $M$  为拟合矩阵;  $v_i$  为输入图像对应通道响应值;  $I_i$  为输出图像对应通道响应值,  $i \in \{r, g, b\}$ 。

利用光谱估计技术获取不同波长的单光谱图像, 结合多光谱技术进行图像合成, 从而实现对疵病的优化表征, 便于后续的疵病准确高效识别与提取, 该算法的主要流程如图 1 所示。

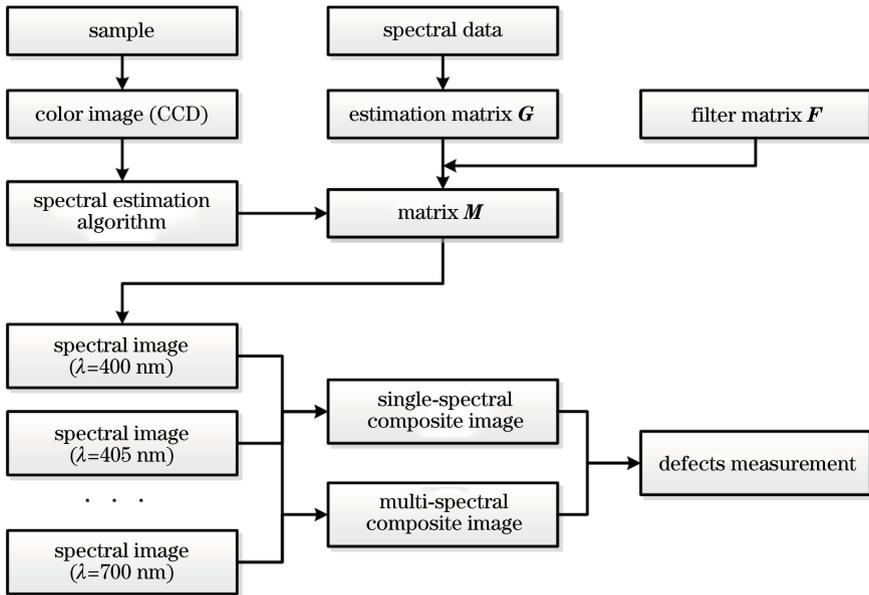


图 1 基于光谱估计与多光谱技术的疵病检测算法流程图

Fig. 1 Flow chart of defect measurement algorithm based on spectral estimation and multispectral technique

### 3 基于光谱估计与多光谱技术的光学元件表面疵病检测装置

为便于比对, 光学元件表面疵病检测装置仍然采用基于光学显微暗场成像技术的结构。如图 2 所示, 照明光源发出的白光通过光纤分光器被分成 4 束对称布局的平行光, 每束平行光均斜入射到被测光学元件表面, 实现近似环形照明。装置采用三维纳米位移台 (XYZ Stage) 对被测光学元件进行准确对焦和显微光学定位, 被测光学元件表面的散射光经过显微成像光学单元后会聚到彩色相机像面。为避免相干光噪声, 装置光源采用 LUMEN DYNAMICS 公司 X-CiteX 系列非相干光源, 光源波长范围为 300~750 nm, 显微光学单元放大倍率为  $10 \times$ 。在可见光波段, 该检测装置的分辨率为

$0.87 \sim 1.53 \mu\text{m}$ 。与传统光学显微暗场成像装置所使用的灰度相机不同, 该系统采用彩色相机以获得多光谱图像。

### 4 实验与分析

实验所采用的被测光学元件样品为标准疵病检测板 (Target ISO 14997 Scratch/Dig Standard-DA074)。在相同光照条件下采集样品在同一视场内的疵病图像, 选定区域如图 3 所示。为降低背景噪声, 检测图像会减去入射光源强度为零时的 CCD 图像。OTSU<sup>[17]</sup> 常被用于光学元件表面疵病检测。为满足大视场下的光学元件表面疵病检测需求, 实验中采用预分块优化后的 OTSU 进行疵病点检测。为便于结果展示, 暗场图像均经过反色处理。

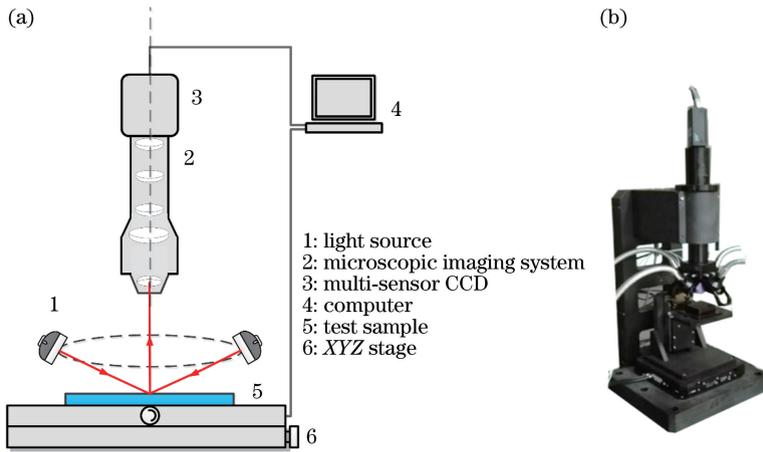


图 2 疵病检测系统。(a)检测系统结构图;(b)检测系统实物图

Fig. 2 Defect measurement system. (a) Schematic of defect measurement system; (b) picture of experimental system

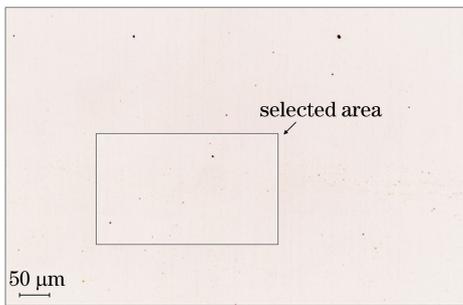


图 3 同一视场内选定区域的疵病图

Fig. 3 Defect image of selected area in the same field of view

### 4.1 单光谱合成图像

#### 4.1.1 疵病检出数量

将滤波矩阵  $F$  的三个波长设置为相同值,可得到 400~700 nm 的光谱灰度图像。不同波长下单光谱图像的疵病数量检测结果如图 4 所示。需要说明的是在对白光图像(彩色图像)进行检测时,需会先将其转换为灰度图像再进行检测。

如图 4 所示,采用传统白光图像检测得到的疵

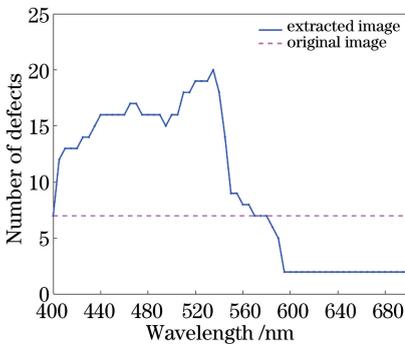


图 4 同一区域内不同波长的单光谱图像的疵病数量

Fig. 4 Number of defects of single spectral image in the same area at different wavelengths

病数量为 7 个,在 400~700 nm 波长范围内单光谱合成图像的疵病检出数量最少为 2 个,最多为 20 个(增加了 1.85 倍)。当波长在 405~545 nm 的范围内时,疵病检出数量均超过原始图像疵病检出数量,并且在 510~540 nm 波段,疵病检出数量相对较多,为 18~20 个。当波长在 550~700 nm 的范围内时,随着波长的增加,疵病检出数量逐渐减小并最终稳定为 2 个。疵病检测结果与课题组前期所采用的基于滤波片方法的光学表面疵病检测结果<sup>[14]</sup>一致,表明本文所提出的方法具有有效性。

在检测过程中,对所有图像均进行了去噪处理。不同的去噪强度,其检测结果也不相同。噪声强度为 55 表示光源强度为零,即图像的背景光噪声最大。作为对比,保持其他实验条件不变,当噪声强度为 50 和 70 时分别进行疵病数量的检测,实验结果如图 5 所示。

由图 5 可知,当背景中有噪点存在时,疵病检出数量会受去噪强度的影响。在 400~545 nm 范围内,去

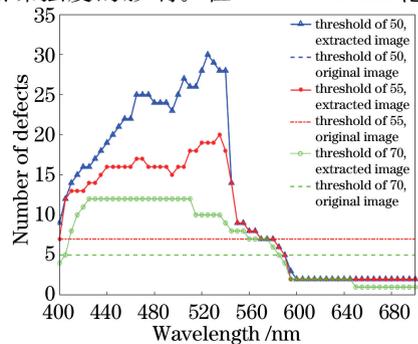


图 5 同一区域内不同波长、不同去噪强度下的单光谱图像的疵病数量

Fig. 5 Number of defects of single spectral image in the same area under different wavelengths and de-noising intensities

噪强度越低,疵病检出数量越多,并在 500~545 nm 波段,疵病检出数量有最大值。在 550~700 nm 范围内,疵病检出数量几乎不受去噪强度的影响。

#### 4.1.2 疵病面积

选择原白光图像中大小各异的疵病,计算其在不同波长图像中的疵病像素面积。如图 6 所示,选定白光图像中的疵病 1,2,3,其疵病像素数分别为 24,18,1。

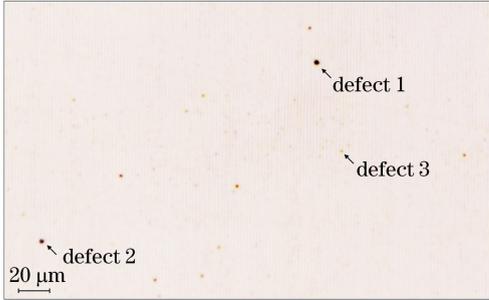


图 6 测量图像中选定的疵病 1,2,3

Fig. 6 Selected defects 1, 2, and 3 in measurement image

如图 7 所示,在 415~540 nm 波段内,选定疵病的像素数均大于白光图像中疵病的像素数,并且在 455~500 nm 波段内疵病的像素数有最大值。疵病 1,2,3 的像素面积最大值时对应的波长并不重合,三个选定疵病的像素面积分别在 470 nm、480~485 nm 和 465~470 nm 达到峰值,并且相对原图像疵病像素面积分别增加 14(0.6 倍)、7(0.4 倍)和 6(6.0 倍)个像素。对于不同尺度的疵病,其像素面积最大值的波段并不相同,并且尺度越大的疵病在峰值波长合成图像中的像素面积越大。在 540~700 nm 波段内,选定疵病的像素面积均小于原白光图像疵病的像素面积,疵病 3 的检出像素面积减小为 0,即已无法识别与检测。

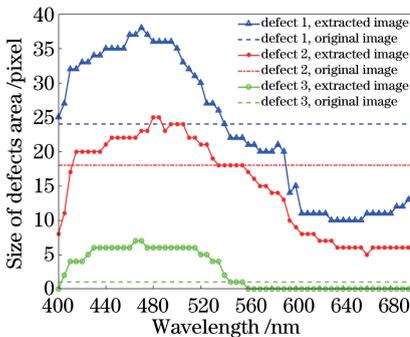


图 7 不同波长的单光谱图像中疵病 1,2,3 的像素面积

Fig. 7 Pixel areas of defects 1, 2, and 3 in single spectral image at different wavelengths

#### 4.1.3 疵病位置

由图 8 可知,白光图像的缺陷检出数量为 7 个,

波长为 440,500,505 nm 的单波长合成图像的缺陷检出数量均为 16 个。小尺寸的疵病检出位置并未完全重合,疵病 1 在波长为 440 nm 与 500 nm 合成图像中出现,疵病 2 在波长为 500 nm 和 505 nm 合成图像中出现,疵病 3 在波长为 440 nm,500 nm 和 505 nm 合成图像中出现,其中疵病 1,2,3 在白光图像中均未被检出。疵病 1,2,3 在被检出时的像素数均在 2~4 之间,并且只能被特定波段检测到。针对小尺寸的疵病,其材料、疵病的特性不同使得疵病在图像中的 RGB 分量不同,利用不同的单波长图像可以凸显这些小尺寸的疵病,而这些疵病在白光图像中不易被检测出来。大尺寸的疵病在大多数单光谱图像和白光图像中均能被检出。

## 4.2 多光谱合成图像

### 4.2.1 疵病检出数量

设置滤波矩阵  $F$  的三个波长并进行多光谱合成,可得到多光谱彩色合成图像。每个波长有 61 种选择,故多光谱彩色合成图像有  $61^3$  种不同的组合。对每种波长组合下的多光谱合成图像进行疵病数量检测,统计得到疵病的检出数量。

如图 9 所示,对选定疵病的检出数量立体图像的  $r$  分量进行切片,选取  $r$  分量波长分别为 475,500,565,650 nm,其中  $x,y$  轴分别为  $g,b$  分量选取波长, $z$  轴为疵病检出数量。在白光图像中,疵病的检出数量为 7,在图 9 中用  $z=7$  的平面表示。在不同  $r$  分量的合成图像中,疵病检测结果的峰值数量和位置不同。当选取波长组合中  $r$  分量为 445~570 nm、 $g$  分量为 500~545 nm、 $b$  分量为 415~575 nm 或者  $r$  分量为 415~520 nm、 $g$  分量为 420~500 nm、 $b$  分量为 400~540 nm 时,合成图像的疵病检出数量将显著优于白光图像,其中最多疵病检出数量为 19。当  $r$  分量选定时,若  $g$  分量选定波长大于 595 nm,则多光谱合成图像的疵病检测数量均下降至 2~3 个。由光谱估计原理知,影响检测结果最主要的因素是疵病缺陷的光谱反射率,不同尺寸、不同特性的疵病缺陷在不同波长情况下的光谱反射率不同。实验结果也表明,选取合适的波长可以检测出更多的白光条件下无法检出的疵病。

### 4.2.2 疵病面积

选择白光图像中大小各异的疵病,计算其在不同波长组合的多光谱合成图像中所占的像素面积。如图 6 所示,选定原图像中的疵病 1,2,3,其像素面积分别为 24,18,1 个像素。

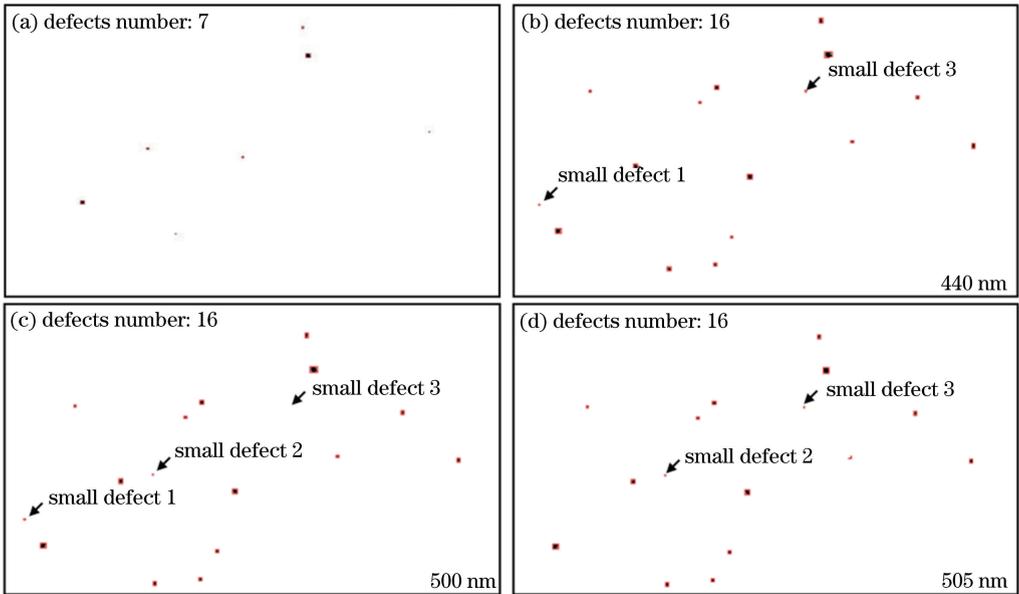


图 8 不同波长的单光谱图像疵病检测结果。(a)原始图像;(b)  $\lambda=440$  nm;(c)  $\lambda=500$  nm;(d)  $\lambda=505$  nm

Fig. 8 Defect detection results of single spectral image at different wavelengths.

(a) Original image; (b)  $\lambda=440$  nm; (c)  $\lambda=500$  nm; (d)  $\lambda=505$  nm

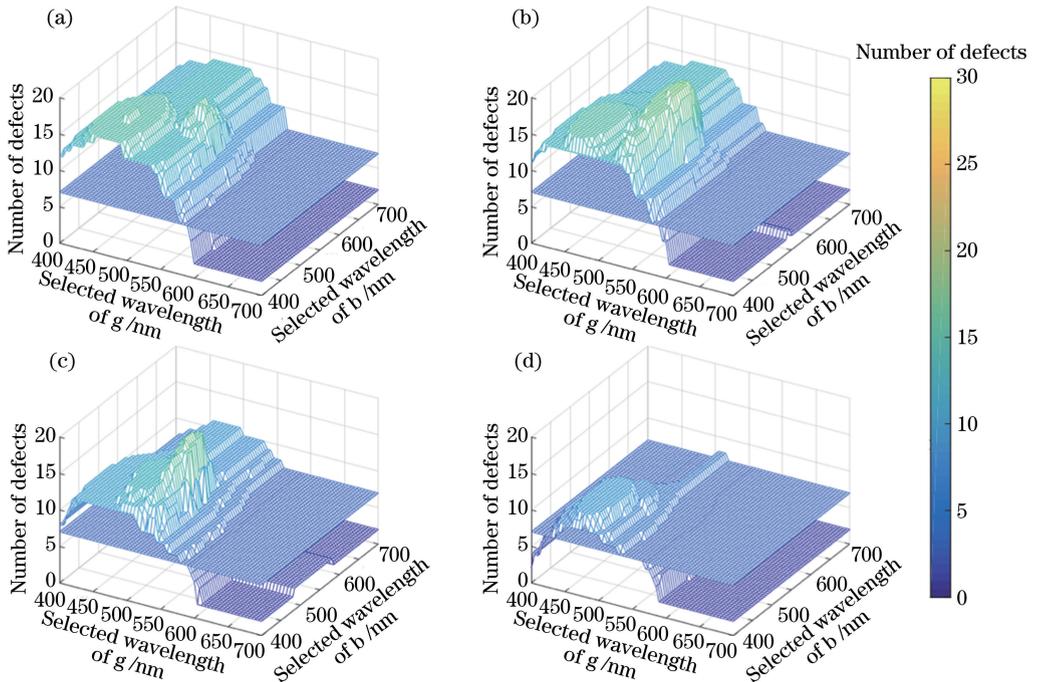


图 9 不同波长组合的多光谱合成图像疵病数量。(a)  $\lambda=475$  nm;(b)  $\lambda=500$  nm;(c)  $\lambda=565$  nm;(d)  $\lambda=650$  nm

Fig. 9 Number of defects of multispectral images with different wavelength combinations.

(a)  $\lambda=475$  nm; (b)  $\lambda=500$  nm; (c)  $\lambda=565$  nm; (d)  $\lambda=650$  nm

如图 10 所示,对选定疵病的像素面积立体图像  $r$  分量进行切片,选取  $r$  分量波长分别为 475, 500, 565, 650 nm,其中  $x$ 、 $y$  轴分别为  $g$ 、 $b$  分量选取波长, $z$  轴为疵病的像素面积。图 10 中的上、中和下曲面分别对应疵病 1, 2, 3 的像素面积,对应的最大

像素面积分别增至 38, 25, 6 个像素。当  $r$  或  $g$  分量的选定波长在 405~550 nm 之间时,三个疵病检出像素面积均维持在原图疵病检出面积之上,当  $r$  或  $g$  分量的选定波长增大到 565 nm 时,三个疵病检出像素面积均减小至原图疵病检出像素面积之下。

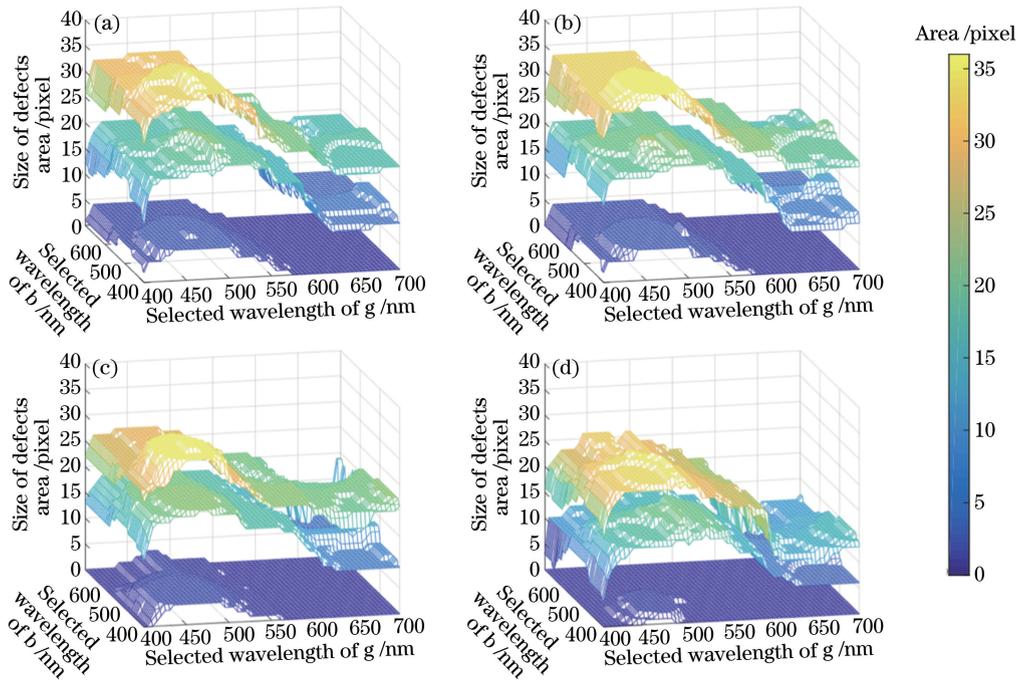


图 10 不同波长组合的多光谱合成图像疵病 1、2 和 3 的像素面积。

(a)  $\lambda = 475$  nm; (b)  $\lambda = 500$  nm; (c)  $\lambda = 565$  nm; (d)  $\lambda = 650$  nm

Fig. 10 Pixel areas of defects 1, 2, and 3 of multispectral images with different wavelength combinations.

(a)  $\lambda = 475$  nm; (b)  $\lambda = 500$  nm; (c)  $\lambda = 565$  nm; (d)  $\lambda = 650$  nm

#### 4.2.3 疵病位置

选定图 11(a)中的小尺寸的疵病 1, 2, 3, 采用

不同波长组合的多光谱合成图像进行疵病位置检测。

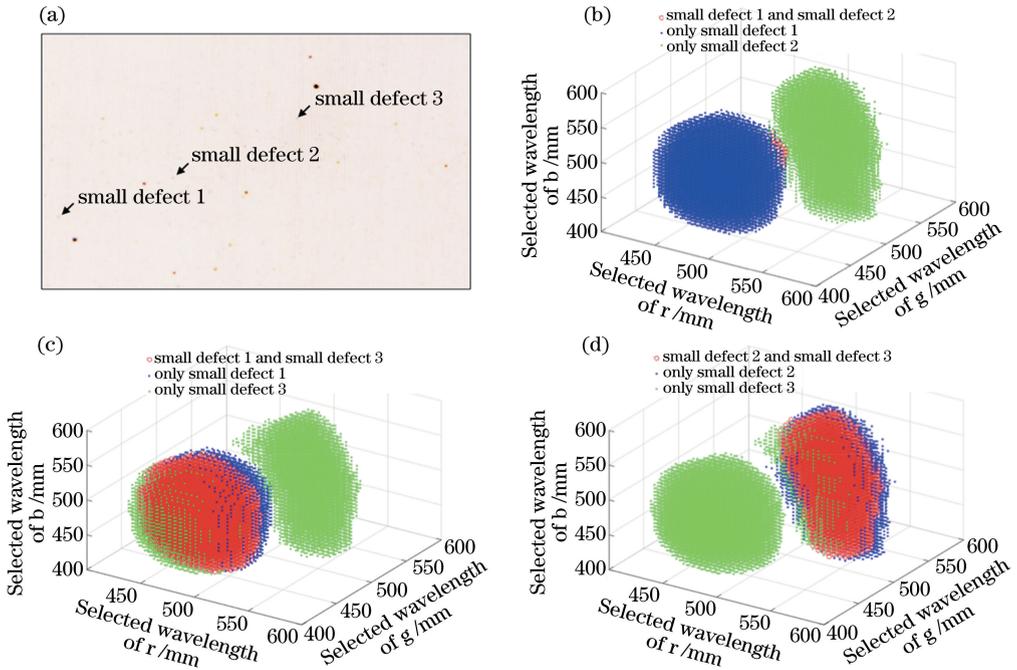


图 11 不同波长组合的多光谱合成图像中识别小尺寸的疵病 1、2 和 3。

(a) 疵病选取; (b) 疵病 1、2 识别波长分布; (c) 疵病 1、3 识别波长分布; (d) 疵病 2、3 识别波长分布

Fig. 11 Defects 1, 2, and 3 used for small size recognition in multispectral images with different wavelength combinations.

(a) Selected defects; (b) detected wavelengths of defects 1 and 2; (c) detected wavelengths of defects 1 and 3;

(d) detected wavelengths of defects 2 and 3

如图 11(b)~(d)所示,红色区域为同时检测出两个疵病的波长组合,绿色区域和蓝色区域为仅识别出其中一个疵病的波长组合。图 11(b)能同时检测出疵病 1 和 2 的波长组合范围较小,图 11(c)和 (d)能同时检测出疵病 1 和 3、疵病 2 和 3 的区域很大。疵病 2 的检出区域有两个,疵病 1 和 3 的检出区域只有一个,其中疵病 1 和 3 的检出区域与疵病 2 的检出区域有部分重合。由此可知,小尺寸的疵病对识别波长具有选择性,合适的波长组合能够识别更多小尺寸的疵病。相对于单光谱合成图像,多光谱合成图像采用不同合成波长进行组合,可以提升对不同波长具有选择性的小尺寸的疵病的检测能力。

## 5 结 论

提出了一种基于光谱估计与多光谱技术的光学元件表面疵病检测方法。该方法利用光谱估计提取不同波长的单光谱图像,采用多光谱技术合成不同波长组合的多光谱图像,并分别利用单光谱图像和多光谱图像对光学元件的疵病进行检测。基于该方法搭建了一套光学元件表面疵病检测装置,获得了在白光照下光学元件表面疵病检测的实验结果。对单光谱图像和多光谱合成图像进行分析,结果表明相比于简单的白光图像,选取合适波长的合成图像能检测出更多小尺寸疵病,并且不同波长对同一尺寸疵病的筛选性也不同。在单光谱合成图像中,选定单波长在 405~545 nm 范围内的图像能检测出更多不同位置的小尺寸疵病。在多光谱合成图像中,当 RGB 分量选定波长为 r(445~570 nm)、g(500~545 nm)、b(415~575 nm)和 r(415~520 nm)、g(420~500 nm)、b(400~540 nm)时,该方法能检测出更多不同位置、不同特性的疵病,相比于传统的检测方法,该方法的疵病检出数量提升了 1.85 倍,疵病检出面积最多增加了 6.0 倍。相比于传统暗场显微成像检测方法,提取不同波长组合的多光谱合成图像的方法,可以明显提高对光学元件疵病的检测能力。此外,该方法不再受到物理分光的条件限制,不仅能够明显提高疵病检测效率,还能显著降低疵病检测的成本。

## 参 考 文 献

[1] The British Standards Institution. Optics and photonics: preparation of drawings for optical elements and systems: part 7 surface imperfection

tolerances: ISO 10110-7 [S]. UK: BSI Standards Limited, 2008.

- [2] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Surface imperfections of optical elements: GB/T 1185-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 光学零件表面疵病: GB/T 1185-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] Liu Z Y, Zhang Y H, Ding J J, *et al.* Propagation of a filamentary femtosecond laser beam with high intensities at an air-solid interface[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(2): 021401.
- [4] Shavit O, Ferber Y, Papeer J, *et al.* Femtosecond laser-induced damage threshold in snow microstructured targets[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e7.
- [5] Bercegol H, Bouchut P R, Lamaignère L, *et al.* The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5273: 312-324.
- [6] Zhang X, Zhou W, Dai W J, *et al.* Surface phase defects induced downstream laser intensity modulation in high-power laser facility [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2016, 4: e6.
- [7] Dai M K, Xu D Y. The present situation of imperfections testing and researching on the optical components[J]. Optical Instruments, 1996, 18(3): 33-36.
- 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): 33-36.
- [8] Baker L R. Microscope image comparator[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1984, 31(6): 611-614.
- [9] Baker L R. Inspection of surface flaws by comparator microscopy[J]. Applied Optics, 1988, 27(22): 4620-4625.
- [10] Baker L R. On-machine measurement of roughness, waviness, and flaws[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1333: 248-256.
- [11] Liberati F. Measure of surface and bulk defects in any transmitting or reflecting optical component[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1781: 170-174.
- [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.

杨雨英, 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] 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.
- [14] 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.
- [15] Vagni F. Survey of hyperspectral and multispectral imaging technologies [R]. Neuilly-sur-Seine Cedex, France: North Atlantic Treaty Organization, Research and Technology Organization, 2007: TR-SET-065-P3.
- [16] Lenz R, Meer P, Hauta-Kasari M. Spectral-based illumination estimation and color correction[J]. *Color Research & Application*, 1999, 24(2): 98-111.
- [17] Vala H J, Baxi A. A Review on OTSU image segmentation algorithm [J]. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, 2013, 2(2): 387-389.