

基于局域信号增强的光学元件损伤检测

田玉婷^{1,2}, 邬融^{1*}, 杨野^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现高功率激光驱动器中大口径光学元件表面疵病的低漏检率识别, 针对微弱疵病的低信噪比特点, 提出了改进的局部信号强度比自适应检测算法。利用信号图像中疵病与邻域非疵病区域的信号强度差异, 构造了一类滤波模板对信号图像进行自适应局域增强, 可有效提高疵病信号强度值和显著增强信号图像的疵病信噪比。对种子图像进行种子点的筛选与自适应区域生长, 并进行精确提取完成损伤区域的完整分割。改进后的局部信号强度比算法能有效识别低信噪比微弱疵病, 在全内反射暗场侧向照明成像条件下, 可识别出约 30 μm 的疵病坏点。与现有的局部信号强度比算法相比具有更低的漏检率, 结果表明等价圆直径在 50 μm 以上的损伤点的漏检率低于 0.4%。

关键词 测量; 损伤检测; 局部信号强度比; 区域生长; 图像分割

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1104001

Optical Damage Inspection Based on Local Signal Enhancement

Tian Yuting^{1,2}, Wu Rong^{1*}, Yang Ye^{1,2}

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To realize the recognition of surface damages with a low missed detection rate on large aperture optical elements in a high power laser driver and according to the low signal-to-noise ratio characteristic of micro-size damages, an adaptive detection algorithm is proposed based on the improved local signal intensity ratio. The signal intensity difference between the damages and their neighbored non-damage area in signal images is adopted to construct a filter template for the adaptive local enhancement of signal images. Thus, the damage signal intensity can be enhanced effectively and the signal-to-noise ratio of damage on signal images can also be improved significantly. As for the seed images, the seed selection and the adaptive regional growth are performed, and the complete segmentation of damage regions is finished by the accurate extraction. The improved local area signal intensity ratio algorithm can be used to effectively recognize the small-size damage points with a low signal-to-noise ratio. Under the total internal reflection lateral illumination in dark fields, the damage points with size of about 30 μm can be recognized. The missed detection rate is lower than that of the existing local area signal strength algorithm. The results show that the missed detection rate is below 0.4% for damage points with equivalent diameter of above 50 μm .

Key words measurement; damage inspection; local signal intensity ratio; regional growth; image segmentation

OCIS codes 120.1880; 140.3330; 120.4630

1 引言

高功率激光驱动器集成了数量众多的大口径终端光学元件。由于光束自聚焦等原因, 高通量激光辐

照会诱导光学元件表面产生损伤, 严重影响装置运行^[1]。美国利弗莫尔实验室研制了缺陷识别与表征系统(FICS)来检测上线前元件表面疵病质量, 研制了终端光学检视系统(FODI)来在线监测元件表面损伤

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-02; 录用日期: 2018-05-11

基金项目: 中国科学院高功率激光物理重点实验室基金(CXJJ-16S040)

* E-mail: 46438131@qq.com

的变化增长状况,并研究了相关图像处理技术^[2-3]。国内大型激光系统对疵病检测技术的研究较少^[4-7],相关图像处理技术的研究尚处于起步阶段^[8-11]。随着更大型激光装置的规划,需要发展更精细、便利的离在线检测技术,相应的检测系统追求 $10^1 \sim 10^2 \mu\text{m}$ 的分辨力^[12-15]。由于待检元件尺寸高达 $300 \sim 400 \text{ mm}$,工程实现极具挑战,美国 FICS 和 FODI 的检测目标为 $50 \mu\text{m}$ 以上尺寸的损伤点。

基于平板光学元件的全内反射原理在暗场环境下自元件侧壁导入条形 LED 光源可形成暗背景上的亮疵病图像,解决了相邻光学元件上的损伤归属判别难题^[16]。全内反射暗场侧向照明技术可获得高信噪比疵病图像,但少量杂散光仍然会在疵病图像中形成局域亮背景^[8,17],以全局亮度信息为检测依据的传统算法不再适用。美国国家点火装置(NIF)检测系统采用基于局部信噪比(LASNR)的损伤检测方法^[18],通过模拟人眼识别物体的机制,以每个像素点的局域信噪比作为检测依据来实现损伤识别。哈尔滨工业大学的冯博等^[17,19]在 LASNR 算法的基础上,提出了局部信号强度比(LASSR)算法。LASSR 算法的主要思想是逐一考察每一像素点在其局域内的目标信号强度与背景强度的比值,若比值高于阈值,则将此像素点设为种子生长基准点,最后进行区域生长获得完整疵病区域。LASSR 算法能高准确率地识别出复杂高亮背景中的疵病,同时具有较强稳健性。但是,LASSR 算法在计算局部信号图像时,对复杂高亮背景抑制的同时也削弱了疵病灰度值,每个疵病目标被削弱的程度不同且与其周围局域内的背景灰度值呈正相关关系。而处于局域高亮背景中的微弱疵病被严重削弱之后可能造成疵病信号强度值过低。

针对上述问题,为进一步降低微弱疵病的漏检率,本文设计了一种改进的局部信号强度比算法,利用局部信号图像中微弱疵病信号强度通常高于邻域非疵病区域强度的特点,构造一类滤波模板对信号图像进行自适应局域增强,大幅提高疵病信号强度值,显著增强信号图像中疵病信噪比。最后对种子点进行筛选与自适应增长,并进行精确提取完成损伤区域的完整分割。改进后的局部信号强度比算法拥有更优异的识别微小疵病的能力,且漏检率更低,为构建高功率激光装置光学元件表面质量的离在线检测系统打下了基础。

2 改进的局部信号强度比分割方法

部分疵病亮度虽然可能低于视场中某局域亮背

景,但在疵病所处的局域内,疵病目标与邻域背景之间通常存在一定的对比度信息,故能快速准确地为人眼所察觉。基于人类视觉特性的 LASSR 算法通过模拟人眼对视场信息的处理机制,以局域对比度信息作为检测依据,可以较好地识别复杂背景下的低信噪比微小疵病。

2.1 背景图像和信号图像的生成

LASSR 算法^[17,19]首先对原始疵病图像进行灰度形态学开运算^[20],弱化明亮的疵病目标,同时保持整体灰度级和较大的明亮背景相对不变,对原始疵病图像先腐蚀再膨胀,得到图像:

$$\mathbf{I}_{\text{open}}(x, y) = \max\{\min[\mathbf{I}(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{I}(x, y)$ 为原始疵病图像。使用高斯低通滤波器得到局部背景图像^[17,19]:

$$v(x, y) = \sqrt{\mathbf{I}_{\text{open}}^2(x, y) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right)}. \quad (2)$$

根据对噪声邻域大小的估计决定高斯滤波器标准差 σ_1 。对 $\mathbf{I}_{\text{open}}(x, y)$ 进行高斯滤波,再将 $\mathbf{I}(x, y)$ 与高斯滤波后的图像相减得到锐化突出的差分图像,即为局部信号图像^[17,19]:

$$u(x, y) = \mathbf{I}(x, y) - \mathbf{I}_{\text{open}}(x, y) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (3)$$

式中标准差 σ_2 取值应小于感兴趣的最小目标。

2.2 信号图像的自适应局域增强

如(3)式所示,信号图像 $u(x, y)$ 为差分图像,疵病目标的灰度值也被削减。当疵病所处局域的背景较暗时,削弱程度较低;当疵病所处局域的背景较亮时,削弱程度较大。处于局域高亮背景中的微弱疵病将被严重削弱,而微弱疵病的亮度通常只略高于其周围局域背景,削弱之后疵病信号强度值过低。为进一步提高疵病识别率,对目标信号进行自适应局域增强。利用信号图像中目标信号强度通常高于邻域非目标信号强度的特点,构造一类滤波模板对信号图像进行自适应局域增强,可大幅提高目标信号强度值,显著增强疵病信噪比。此滤波器的构造方法为:1)将滤波模板等分为 9 个子模板,并应用于信号图像;2)求取中央子模板的最大灰度值,计算周围 8 个子模板的加权均值;3)将最大灰度值与加权均值的比值作为中央子模板的中心像素点[图 1(a)中红色标记像素点]的增强系数;4)将增强系数与最大灰度值的乘积作为红色标记像素的输出值。

图 1(a)为滤波模板 w ,设 w 的尺寸为 $3M \times$

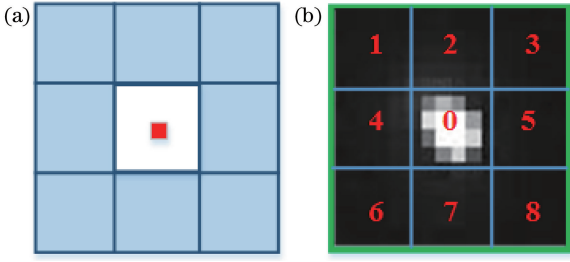


图 1 滤波模板。(a)结构图;(b)模板作用域下的图像子块
Fig. 1 Filtering template. (a) Structural diagram;
(b) image patches in scope of template

$3M, M$ 为图 1(a) 中方形子模板的像素宽度。信号图像自适应局域增强的具体过程如下。

1) 将窗口 ω 应用于信号图像 $u(x, y)$, 得到以 (x, y) 为中心的尺寸为 $3M \times 3M$ 的图像子块, 如图 1(b) 所示。

2) 将此图像子块等划分为 9 个子块, 每个子块的尺寸均为 $M \times M$ 。定义 m_i 为第 i 个子块的灰度均值, 即:

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j^i, \quad (4)$$

式中 N 为子块像素总数, I_j^i 为第 i 个子块的第 j 个像素的灰度值。

3) 计算图 1(b) 中由数字 0 标识的中心子块的最大灰度值

$$L = \max_{j=1,2,\dots,N} (I_j^0). \quad (5)$$

4) 计算邻域 8 个子块的加权平均灰度值

$$m = \sum_{i=1}^8 \epsilon_i \cdot m_i, \quad (6)$$

式中 ϵ_i 为第 i 个子块的权值, 与中心子块越相似则分配越大的权值。 R_i 为第 i 个子块与中心子块的相似度度量, 按照模板匹配的差值平方和算法定义如下:

$$R_i = \sum_{j=1}^N (I_j^i - I_j^0)^2, \quad (7)$$

权值 ϵ_i 定义如下:

$$\epsilon_i = \frac{1/R_i}{\sum_{i=1}^8 (1/R_i)}. \quad (8)$$

5) 将 L/m 作为增强系数, 计算中心子块中心像素点 (x, y) 增强后的值, 即

$$u'(x, y) = L \cdot \frac{L}{m} = \frac{L^2}{m}. \quad (9)$$

6) 按照从左到右、从上到下的顺序, 逐个像素点地在信号图像上移动窗口 ω , 得到一系列图像子块, 对每个子块重复步骤 2) 到步骤 5), 直到信号图

像的所有像素点全部计算完毕, 得到新信号矩阵 $u'(x, y)$ 。

该滤波器能增强疵病信号强度的原因在于, 疵病信号强度通常高于周围暗场区域强度, 故当中心 $M \times M$ 子块包含疵病, 而邻域子块为暗场时, L 高于邻域加权均值, L/m 大于 1, 则

$$\frac{L^2}{m} > L. \quad (10)$$

由于(3)式求出的信号图像已对复杂背景进行了抑制, 信号图像的非疵病区域已较均匀且强度值较低, 故当中心子块为非疵病区域时, 通常 L/m 不会大于 1, 有

$$\frac{L^2}{m} \leq L. \quad (11)$$

当中心子块处于疵病周边暗场时, 则 L 小于邻域加权均值, L/m 小于 1, 疵病边缘外近处强度值得到一定抑制。由上述可知, 疵病信号强度值得到放大, 信噪比显著增强, 利于后续疵病识别; 选用不同大小的模板可实现不同尺寸疵病的增强。理想情况下, 图 1(a) 中包含红色标记像素点的中心窗口尺寸应与疵病大小一致, 可根据疵病的尺寸范围估计设定模板的数量与尺寸范围, 不同模板对信号图像分别进行增强, 综合所有模板的滤波结果选峰值作为输出信号值。

漏检疵病通常为微小疵病, 增强微小疵病的信号强度能降低漏检率, 故实验中为了提高计算速度, 选用单一小尺寸窗口对信号图像进行一次局域增强。微小疵病尺寸通常只有几个甚至单个像素, 实验中令 $M=3$ 。疵病信号强度从中心至边缘一般呈衰减趋势, 当图 1(a) 中的中心窗口尺寸小于疵病尺寸时, 疵病中心区域的增强系数 L/m 略高于 1, 偏离疵病中心的边缘区域, 由于边缘附近存在暗场, 故边缘增强系数将高于中心增强系数。故在小尺寸滤波窗口的作用下, 大尺寸疵病边缘区域的信号强度也能得到小幅度增强。

2.3 种子筛选

定义局部信号强度比矩阵^[17,19]为

$$M(x, y) = \frac{u'(x, y)^2}{v(x, y)^2}, \quad (12)$$

将上式两边平方, 以避免(2)式中 $v(x, y)$ 的平方根运算。LASSR 算法以局域内目标信号强度与背景强度的差异为检测依据, 疵病灰度值通常高于其周围局域背景灰度值, 对信号图像 $u'(x, y)$ 和背景图像 $v(x, y)$ 进行平方非线性映射后, $u'(x, y)$ 的放大

倍数将高于 $v(x, y)$ 中相应像素的放大倍数,故可在不影响检测准确性下避免平方根运算。以往的 $M(x, y)$ 定义中分子为对比度较低的信号图像,这里将分子替换为局域增强后的信号图像,可获得比值更高的 $M(x, y)$ 。

对 $M(x, y)$ 按照(13)式进行分割形成种子图像 $\Gamma(x, y)$, 大于阈值 φ 的点被赋值为 1, 其他为 0。每一组为 1 的像素, 其原始疵病图像对应像素点作为种子储存。种子分割门限 φ 由一维最大熵算法获得。

$$\Gamma(x, y) = \begin{cases} 0, & M(x, y) < \varphi \\ 1, & M(x, y) \geq \varphi \end{cases} \quad (13)$$

2.4 自适应种子生长与精确提取

得到种子图像后, 需进行区域生长实现疵病完整区域的确定。区域生长的原理是将图像中具有相似属性的像素点结合在一起构成一个整体区域^[21]。传统种子生长法以固定阈值作为生长规则, 先计算种子区域的平均灰度值, 再计算种子邻域像素点与均值之差, 若差值小于阈值则将该点加入种子区域, 随着区域生长其均值也不断更新, 重复以上步骤直至不再满足生长规则。

传统种子生长法的不足是由于采用固定阈值(例如初始种子区域的均值或者最大值的一半)作为生长规则, 当阈值低于目标与背景的边界(图 2 中的虚线 C)时, 背景将被认为是目标的一部分, 使得目标生长结果比实际物体偏大^[18]; 当阈值高于目标与背景的边界(图 2 中的虚线 A)时, 目标生长结果比实际物体偏小。

为解决上述问题, 采用文献[12]中的自适应种子生长法, 对每一个种子点, 采用一系列生长阈值进行传统种子生长, 得到生长阈值与生长面积的曲线, 该曲线变化最快的地方即为目标与背景的交界处。采用该处的种子生长阈值, 可得到期望的目标分割边界。此自适应种子生长法的原理为: 在执行种子生长时, 逐渐增加生长阈值, 种子区域灰度均值下降, 总面积逐渐增加; 当阈值低于目标与背景的边界(图 2 中的虚线 B)时, 面积急剧增大, 可将该阈值作为生长终止条件。

信号图像的自适应局域增强采用了 L^2/m 的计算方法, L 为中心小窗口最大值, 故会导致疵病“膨胀”效果, 利于微小疵病探测, 后续实验部分将展示其“膨胀”效果。通常疵病边缘外近处的背景灰度值也较高, 产生“虚光”现象。上述自适应种子生长法在保证疵病尺寸偏差不至于太高的前提下, 仍可能会将疵病周围的少量背景像素点也加入种子区域。

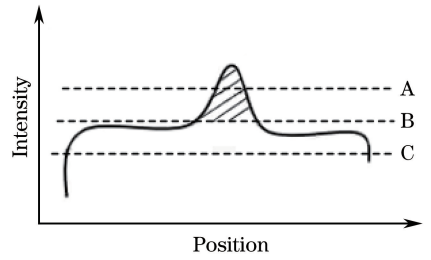


图 2 疵病局域截面图

Fig. 2 Cross-section of damage

信号图像的局域增强和种子生长这两个环节可能会导致尺寸略高问题。为实现疵病的精确提取, 设计如下解决方法, 即在自适应种子生长结束后, 提取每个疵病的水平最小外接矩形作为感兴趣区域(ROI), 在每个 ROI 内分别进行 Otsu 分割。

3 实验结果及分析

图 3(a)为高功率激光装置终端某块光学元件原始疵病图像部分区域, 图 3(b)为其强度分布三维图。图 4 为图 3(a)中红色矩形框的放大显示, 为方便观察, 将其中低对比度疵病区域用红色圆圈进行标识。

3.1 信号图像的局域增强结果

图 5(a)为图 3(a)的信号图像 $u(x, y)$ 。采用 2.2 节算法对 $u(x, y)$ 进行自适应局域增强后得到新信号图像 $u'(x, y)$, 如图 5(b)所示。图 5(c)和图 5(d)分别为图 5(a)和图 5(b)的三维形貌。对比图 3(b)和图 5(c)可知, (1)式和(3)式在抑制背景的同时, 信号图像 $u(x, y)$ 相比原始疵病图像 $I(x, y)$ 整体灰度值有所下降, 疵病区域强度也被削减。每个疵病的削减程度不同且与其周围邻域背景有关, 当疵病所处局域背景较亮时, 削减幅度较高, 处于局域高亮背景中的微弱疵病被严重削弱, 可能造成过低的疵病信号强度值, 故需要对信号图像 $u(x, y)$ 进行增强以降低漏检率。如图 5(d)所示, 信号图像自适应局域增强后疵病信号得到了放大, 信噪比显著增强。

由于增强系数除了与中心小窗口最大灰度值和周围邻域加权均值的比值有关, 还与滤波模板和疵病的尺寸有关, 故每个疵病的增强系数并不相同。观察可知, 大尺寸疵病增强系数呈现中心低、边缘高的特点。如 2.2 小节所述, 由于窗口尺寸 M 设为 3, 当大疵病尺寸高于此值时, 疵病中心区域的增强效果不明显, 而偏离中心的边缘区域附近有暗场, 故边缘增强系数较高。

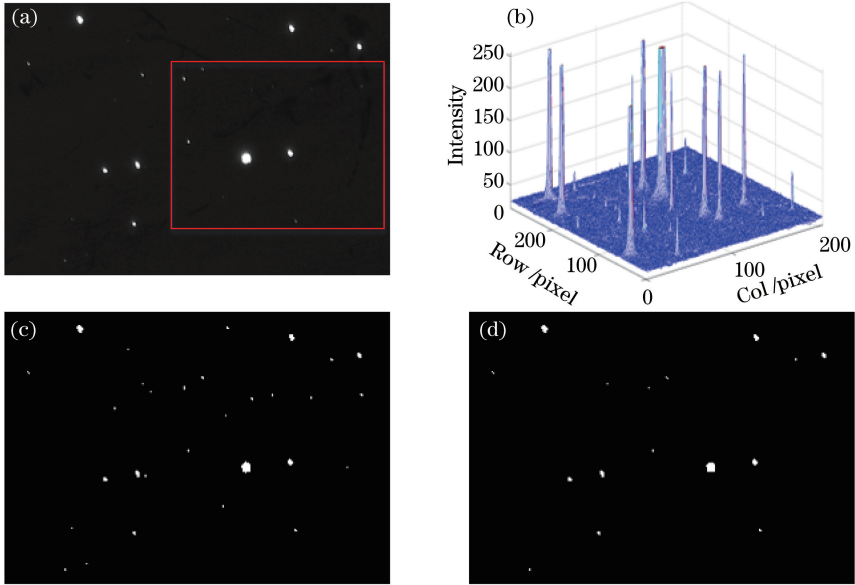


图 3 LASSR 算法改进前后的分割结果比较。(a)原始疵病图像;(b)原始疵病图像强度分布三维图;
(c)改进后的结果;(d)改进前的结果

Fig. 3 Segmentation results before and after improvement of LASSR algorithm. (a) Original damage image;
(b) three-dimensional intensity distribution of original damage image; (c) result after improvement; (d) result before improvement

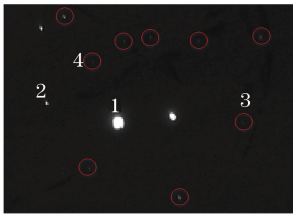


图 4 图 3(a)矩形区域的放大显示

Fig. 4 Enlarged view of rectangular area in Fig. 3(a)

图 5(d)数值范围太大且疵病数量过多,为方便观察,选取图 4 中由数字标识的 4 个疵病,分别显示其信号图像自适应局域增强前后的强度分布三维图,如图 6 所示。由图 6 可知,信号图像局域增强后,疵病目标尺寸变大,产生了“膨胀”效果,利于微小疵病的探测,疵病目标强度增强 4~50 倍不等,信噪比得到了显著提高。

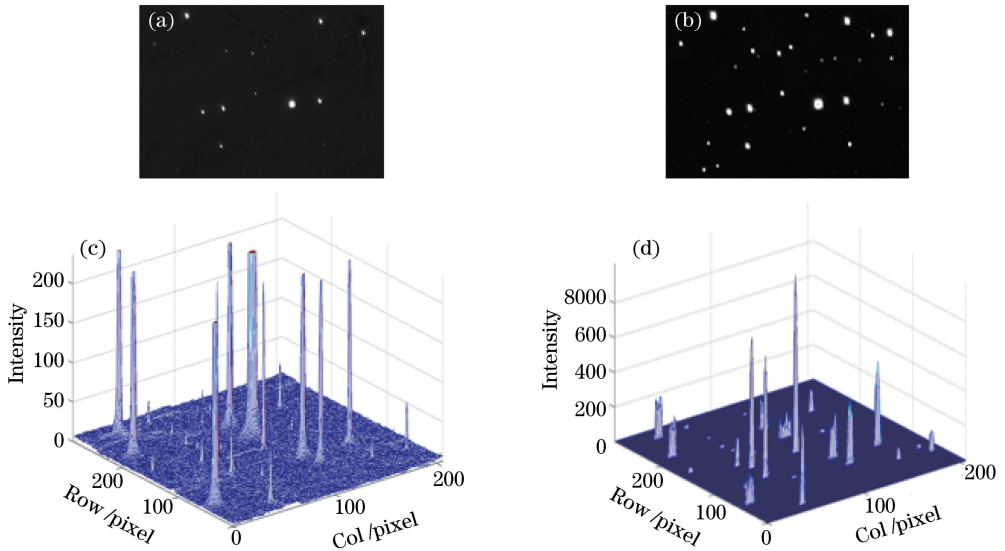


图 5 信号图像。(a)自适应局域增强前;(b)自适应局域增强后;(c)(d)对应(a)(b)的三维形貌
Fig. 5 Signal images. (a) Before adaptive local enhancement; (b) after adaptive local enhancement;
(c)(d) three-dimensional morphologies corresponding to (a) and (b), respectively

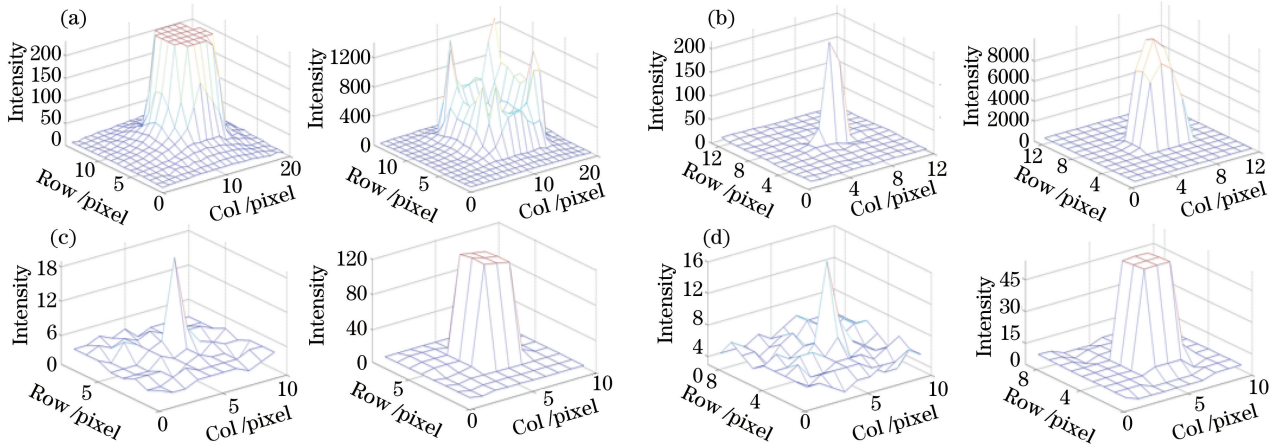


图 6 信号图像自适应局域增强前后的强度分布图。(a)~(d)分别对应图 4 中编号 1~4 疵病

Fig. 6 Intensity distributions of signal images before and after adaptive local enhancement.

(a)-(d) Corresponding to damages numbered by 1-4 in Fig. 4

3.2 分割结果

对图 3(a)采用本文设计的改进局部信号强度比算法进行分割,得到结果如图 3(c)所示。采用原始局部信号强度比算法进行分割,种子门限采用一维最大熵算法获得,得到分割结果如图 3(d)所示。对比图 3(c)、图 3(d)和图 4 可知,改进后的 LASSR 算法由于对信号图像进行了局域增强,疵病信号强度得到放大并且信噪比显著提高,与原始 LASSR 算法相比,具有更低的漏检率,可将对比度极低的微小疵病检测出来,具有更加优异的识别微小疵病能力。与离线平台的检测结果进行比对,该局域内漏检率为 0。

3.3 检测分辨率

图 7(a)为原始损伤图像的局域显示,将其中 4 个对比度极低且能被 CCD 探测到的微弱疵病用红色圆圈进行标识,采用改进后的 LASSR 算法进行分割得到结果如图 7(b)所示。为方便观察,均已作放大显示。观察可知,该算法将其中 4 个微弱疵病准确分割了出来。

采用显微镜(KH-8700, Hirox 公司,日本)检测

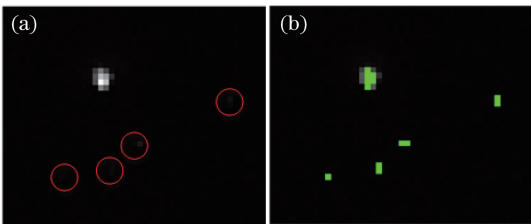


图 7 原始损伤图像与分割结果。

(a)原始损伤图像;(b)分割结果

Fig. 7 Original damage image and its segmentation result.

(a) Original damage image; (b) segmentation result

上述区域,结果如图 8 所示,标记为 1~5 的疵病有效等价圆直径分别为 259.574, 28.451, 32.394, 34.409, 44.121 μm 。改进后的 LASSR 算法具有优异的微弱疵病检测效果,可识别出约 30 μm 的微小疵病。由图 7 和图 8(a)可知,此局域内尺寸更小的疵病因向外散射的光通量过低而被漏检,实验中瞄准 50 μm 以上疵病点的检测。

选取 3 块已下线的终端大口径光学元件作为待测样品 No.1~No.3,对其使用文中设计的改进 LASSR 算法进行分割,将人工检测结果与算法分割结果进行比对评估,统计 50 μm 以上的尺寸的损伤的漏检率。由于待测元件上损伤点数量众多,选取元件的某局域进行人工比对分析,将比对分析结果作为此元件的损伤漏检率参考,得到结果如表 1 所示。结果表明,样品的漏检率均低于 0.4%。

表 1 损伤漏检率结果

Table 1 Results of missed detection rate of damages

| Sample | Damage points | Missed points | Missing detection rate / % |
|--------|---------------|---------------|----------------------------|
| No. 1 | 268 | 0 | 0 |
| No. 2 | 319 | 1 | 0.31 |
| No. 3 | 271 | 1 | 0.37 |

4 结 论

利用改进后的 LASSR 算法,即利用信号图像中目标信号强度通常高于周围邻域非目标强度的特点,构造了一类滤波模板对信号图像进行自适应局域增强,进而大幅提高疵病目标信号强度值,显著增强信号图像的疵病信噪比。信号图像在局域增强的同时,产生了疵病“膨胀”效果,利于微弱疵病的检

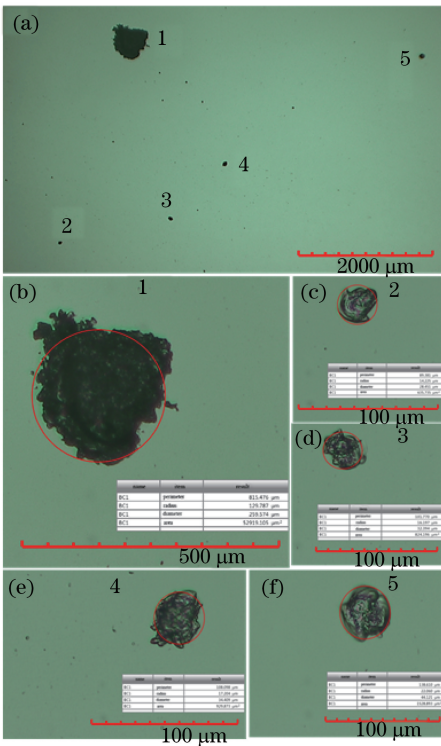


图 8 显微镜测量结果。(a)光学元件的局部区域;(b)~(f)分别为标记 1~5 的损伤点在高倍显微镜下的测量结果

Fig. 8 Measurement results under microscope. (a) Local area of optical element; (b) - (f) corresponding to measurement results of damage points numbered by 1-5 under high magnification microscope

测。改进后的 LASSR 算法具有更加优异的识别低信噪比微小疵病能力,可识别出约 $30\ \mu\text{m}$ 的疵病。与现有的 LASSR 算法相比,改进后的 LASSR 算法具有更低的漏检率,可获得等价圆直径 $50\ \mu\text{m}$ 以上疵病点小于 0.4% 的漏检率,对高功率激光驱动器中的终端大口径光学元件损伤检测的后续研究具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Carr C W, Cross D A, Liao Z M, *et al.* The stochastic nature of growth of laser-induced damage [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9532: 953212.
 [2] Conder A, Azevedo S, Kegelmeyer L, *et al.* Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6720: 672010.
 [3] Spaeth M L, Wegner P J, Suratwala T I, *et al.* Optics recycle loop strategy for NIF operations above UV laser-induced damage threshold [J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 265-294.

[4] 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.
 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.
 [5] Cui H, Liu S J, Zhao Y A, *et al.* Study on total internal reflection microscopy for subsurface damage [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612004.
 崔辉, 刘世杰, 赵元安, 等. 全内反射显微技术探测亚表面缺陷新方法研究 [J]. 光学学报, 2014, 34 (6): 0612004.
 [6] Guo Y J, Tang S X, Jiang X Q, *et al.* Damage inspection of optical surface based on galvanometer scanning [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (6): 0612003.
 郭亚晶, 唐顺兴, 姜秀青, 等. 基于振镜扫描方式的光学元件表面损伤检测 [J]. 光学学报, 2017, 37 (6): 0612003.
 [7] 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.
 [8] Lü X D. Research on defect detection and classification in ICF based on machine learning [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 11-24.
 吕旭冬. 基于机器学习的终端光学元件损伤识别及分类研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 11-24.
 [9] Zhang J, Li D H. Algorithm of optics damage inspection from its dark-field image [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(8): 1109-1112.
 张际, 李大海. 光学元件损伤暗场成像检测的算法 [J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1109-1112.
 [10] Zhang B, Ni K Z, Wang L J, *et al.* New algorithm of detecting optical surface imperfection based on background correction and image segmentation [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911004.
 张博, 倪开灶, 王林军, 等. 基于背景校正和图像分割定量分析光学元件表面疵病的新算法 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911004.
 [11] Miao J, Li Z, Cui Z J, *et al.* Dynamic spectral coding fusion imaging detection technique of surface defects [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (9): 0912002.
 缪洁, 李展, 崔子健, 等. 表面疵病动态彩色编码融

- 合成像检测技术[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0912002.
- [12] Peng Z T. Study on online laser damage detection of optical components in high power laser complex optic components [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2011: 67-74.
彭志涛. 强激光复杂光机组件光学元件激光损伤在线检测技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011: 67-74.
- [13] Feng B, Liu B G, Chen F D, *et al.* Final optics damage online inspection system for ICF[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2519-2524.
冯博, 刘炳国, 陈凤东, 等. ICF 终端光学元件损伤在线检测装置的研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2519-2524.
- [14] 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.
- [15] Feng B, Chen F D, Liu B G, *et al.* RANSAC-SVM based online inspection technique for optics damage in inertial confinement fusion system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0808002.
冯博, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于 RANSAC-LSSVM 回归的惯性约束聚变光学元件损伤在线检测技术[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808002.
- [16] Peng Z T, Wei X F, Yuan H Y, *et al.* Signal noise ratio of total internal reflection edge illumination for optics damage inspection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1111-1114.
彭志涛, 魏晓峰, 元浩宇, 等. 全内反射照明光学元件损伤检测信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1111-1114.
- [17] Feng B. Research on final optics damage online inspection technologies for ICF system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 38-45.
冯博. 惯性约束聚变终端光学元件损伤在线检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 38-45.
- [18] Kegelmeyer L M, Fong P W, Glenn S M, *et al.* Local area signal-to-noise ratio (LASNR) algorithm for image segmentation [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6696: 66962H.
- [19] Feng B, Chen F D, Liu B G, *et al.* Segmentation of small defects in final optics damage online inspection images[C] // IEEE International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP), 2012: 1-4.
- [20] Verbeek P W, Vrooman H A, van Vliet L J. Low-level image processing by max-min filters[J]. Signal Processing, 1988, 15(3): 249-258.
- [21] Agarwal A, Issac A, Dutta M K. A region growing based imaging method for lesion segmentation from dermoscopic images [C] // IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON), 2017: 632-637.