

基于小波变换的光学元件激光损伤 三维形貌重构方法

殷晨轩^{1,2}, 麻云凤^{1,2*}, 程旺¹, 郭广妍¹, 杨学博¹, 白芳¹, 曹灿¹, 周家玮³, 吕玮智^{1,2},
朱永健^{1,2}, 廖利芬¹, 樊仲维¹

¹中国科学院空天信息创新研究院光学工程研究部, 北京 100094;

²中国科学院大学光电学院, 北京 100094;

³中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 为实现激光损伤在线显微三维形貌的快速重构, 提出一种基于小波变换的改进聚焦形貌恢复(SFF)算法。利用三维聚焦评价函数逐点反演深度信息, 重构光学元件激光损伤三维形貌。采用激光损伤在线显微成像装置, 利用所提算法对银反射镜表面激光损伤区域进行三维形貌重构。结果表明: 所提改进算法的清晰度比率、灵敏度、平缓区波动量分别为 2.608、0.131、0.356, 对最大深度为 169.8 μm 的被测区域, 测量相对误差为 1.56%; 相比传统方法, 清晰度比率提升约 1 倍、灵敏度提升约 3 倍、深度测量相对误差降至 1/10, 平缓区波动量可以达传统方法的 1.1 倍。所提算法已用于在线显微损伤判别系统的研制, 实现了激光损伤三维形貌在线快速重构测量。

关键词 激光损伤; 小波变换; 聚焦形貌恢复; 三维形貌重构

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222777

3D Surface Reconstruction of Laser Damage of Optical Element Based on Wavelet Transform

Yin Chenxuan^{1,2}, Ma Yunfeng^{1,2*}, Cheng Wang¹, Guo Guangyan¹, Yang Xuebo¹, Bai Fang¹,
Cao Can¹, Zhou Jiawei³, Lü Weizhi^{1,2}, Zhu Yongjian^{1,2}, Liao Lifan¹, Fan Zhongwei¹

¹Department of Optical Engineering Research, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

³College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract This paper proposes an improved shape-from-focus (SFF) algorithm based on wavelet transform to realize rapid 3D surface reconstruction of laser damage via online microscopic imaging. Here, the depth was retrieved point by point through the 3D focus evaluation function, thereby reconstructing the 3D surface of the laser damage of optical elements. A 3D surface reconstruction experiment was performed on the damaged area of the silver mirror surface using the online microscopic imaging device for laser damage, based on the proposed algorithm. The results show that the definition ratio, sensitivity, and flat fluctuation of the proposed improved algorithm are 2.608, 0.131, and 0.356, respectively, and the relative error is 1.56% for the identified area with a maximum depth of 169.8 μm . As the proposed algorithm's results are compared to those of the traditional method, it is discovered that the definition ratio is increased by approximately one time, the sensitivity is increased by approximately three times, the relative error of depth measurement is reduced to one-tenth, and the flat fluctuation can be 1.1 times that of the conventional method. The proposed algorithm has already been employed in the development of an online microscopic damage detection system to achieve on-line rapid reconstruction and measurement for 3D laser damage topography.

Key words laser damage; wavelet transform; shape from focus; 3D surface reconstruction

收稿日期: 2022-10-17; 修回日期: 2022-11-14; 录用日期: 2022-11-24; 网络首发日期: 2022-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3601400)、短脉冲激光技术团队(GJJSTD20200009)、中国科学院青年创新促进会(Y2021048)

通信作者: *mayf100612@aircas.ac.cn

1 引言

随着激光技术的发展,光学元件激光损伤已经成为高精度、高功率光学系统研发的主要限制因素之一^[1-2]。由于光学元件制备工艺复杂、加工时间长,激光损伤使得光学系统研制成本和周期大大增加。因此,发展相应的光学元件激光损伤探测方法成为研究热点。显微成像探测技术^[3]是一种快捷高效的图像判定方法,利用高分辨率显微镜采集光学元件表面图像,进而通过人眼或算法判定得到损伤情况。

目前,国内外激光损伤的显微成像探测技术可以分为离线^[4]与在线^[5-6]两种。其中离线方法属于辐照后探测,即将辐照后的样品从系统中取下进行显微图像采集,判断损伤情况。这种方法的特点是系统结构比较简单、搭建成本较小,但是频繁的拆卸不仅效率较低,而且易带来装调误差。在线方法最大的特点是即时性,属于辐照中探测,可以记录样品在辐照过程中的表面形貌动态变化,对损伤机理和损伤阈值的研究具有更大的参考价值。

传统显微成像方法采集到的图像只能反映二维形貌,无法从中获取损伤的深度、样品表面粗糙度等信息。在涉及深度测量的任务中,需要借助共聚焦显微镜、扫描隧道显微镜、原子力显微镜等^[7]设备进行观测,但因其测量时间较长、测量范围有限、费用较高,限制了在大范围检测中的使用。随着计算机技术的发展,利用机器视觉来获取深度信息,进而重构三维形貌成为可能,“Shape From X”方法^[8]被提出,其中“X”表示获取深度信息的手段,例如明暗度形貌恢复(SFS)方法、运动形貌恢复(SFM)方法、离焦形貌恢复(SFD)方法与聚焦形貌恢复(SFF)方法等。其中SFS方法与SFM法求解难度较高且精度有限,不适用于重构激光损伤等较小物体的形貌;SFD法^[9]根据当前图像

与参考图像的模糊差异来反演深度信息,难点在于需要得到成像系统的点扩散函数等先验模型;SFF法则根据当前图像的聚焦程度来得到深度信息,不需要借助其他先验条件,且与显微镜采集图像的浅景深特点较符合,因此,本文选择SFF法进行三维形貌重构。

SFF法通过对焦点不同的图像序列中每个像素进行聚焦程度计算得到深度信息,关键在于聚焦评价函数的选择。目前常见的聚焦评价函数可以分为基于空域^[10]的聚焦评价函数、基于频域^[11]的聚焦评价函数与基于统计^[12]的聚焦评价函数。基于空域的聚焦评价函数主要由梯度算子组成,这些算子考察图像像素之间的差异性,认为聚焦区域的差异性相对离焦区域更大,梯度算子有Brenner算子、Sobel算子、Tenengrad算子、Laplacian算子等。基于频域的聚焦评价函数主要考察图像的高低频信息,例如基于小波变换(DWT)的聚焦评价函数与基于离散余弦变换(DCT)的聚焦评价函数。基于统计的聚焦评价函数是针对像素区间的统计意义的,例如基于灰度方差(GLV)、熵、能量(Energy)的聚焦评价函数。

本文搭建了一套激光损伤在线检测装置,根据显微镜景深有限的原理,利用SFF方法进行了激光损伤三维形貌重构;提出了一种基于小波变换的改进三维聚焦评价算子,该算子可以对每个像素的聚焦程度进行度量,进而得到损伤图像中每点的深度信息。相比传统方法,所提算法的重构精度可以提高约1个数量级,视觉效果较好。

2 显微成像在线检测装置

主要围绕显微成像探测方法^[13]进行损伤判定,并搭建了一套激光损伤在线检测装置。检测装置如图1所示,辐照激光光源可选择波长为1064 nm或532 nm的脉冲激光,脉冲重复频率为10 Hz。光束经过整形

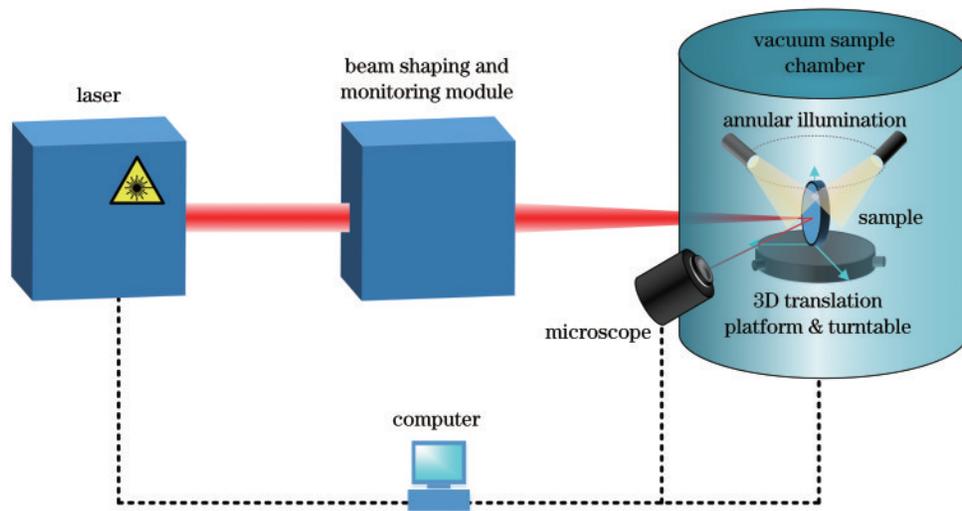


图1 显微成像在线检测装置

Fig. 1 Experimental setup for micro imaging on-line detection

与监测模块进入真空样品室,最终会聚到光学元件样品表面。真空样品室主要由放置在高精度三维电动平移台上的样品转台、环形照明光源、高分辨率变倍显微镜及其他探测模块组成。除了显微成像探测方法,本装置还集成了透射率探测、等离子体探测等多种探测方法,并可以通过上位机实现探测方式的切换。

本装置通过上位机编写控制软件,实现对激光光源、三维电动平移台、样品转台、照明光源、显微镜及其他各类探测器的集中控制,并对采集到的原始图像数据进行处理,可以得到损伤缺陷的形貌参数、损伤概率、损伤等级等信息,从而实现对样品表面损伤情况的实时判定。

其中,图像采集部分主要由高精度电动平移台、显微镜、CCD、照明光源组成,通过编程实现对步进与采图的集中控制。如图 2 所示,平移台由 THORLABS 公司产的 LTS300/M 型电动驱动,可以实现最小 $0.1 \mu\text{m}$ 的步进距离,重复定位精度约 $2 \mu\text{m}$ 。使用 MVOTEM 公司产的 MAZ12.0X 调焦驱动控制显微镜,配置 M Plan Apo L 平场复消色差物镜镜头。使用凌云公司的型号为 LBAS-GE50-23M 的 CCD,采集到的图片大小为 2448×2048 像素,像素大小为 $3.45 \mu\text{m}$ 。照明光源采用环形白光光源,可以为暗场成像提供均匀照明。对于观察到的激光损伤点,从上到下采集一组图像序列,并在上位机中进行损伤三维形貌重构。

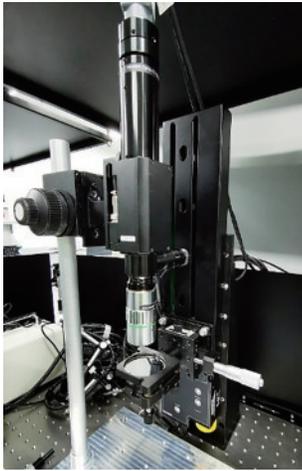


图 2 图像采集部分实物图

Fig. 2 Picture of an image acquisition part

3 基于改进小波变换的 SFF 三维形貌重构算法

3.1 常见聚焦评价函数

早期提出的灰度方差评价函数^[14]通过计算像素邻域区间内灰度值的方差来表征聚焦程度,公式可以描述为

$$F_{\text{Variance}}(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{(i, j) \in \Omega(x, y)} [I(i, j) - \mu]^2, \quad (1)$$

式中: $F_{\text{Variance}}(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的聚焦情况;窗口大小为 $M \times N$; $\Omega(x, y)$ 表示以点 (x, y) 为中心的窗口; I 表示像素灰度; μ 表示窗口内灰度均值。

基于梯度方法,也提出了一系列评价算子。以 Brenner 算子为例,其计算间隔一个像素距离的两个像素灰度差值的平方,计算公式可以描述为

$$F_{\text{Brenner}}(x, y) = \sum_{(i, j) \in \Omega(x, y)} [I(i+2, j) - I(i, j)]^2. \quad (2)$$

Tenengrad 算子计算像素沿 x 与 y 方向的 Sobel 梯度值,再对其求平方和,计算公式可以描述为

$$F_{\text{Tenengrad}}(x, y) = \sum_{(i, j) \in \Omega(x, y)} [S_x(i, j)^2 + S_y(i, j)^2], \quad (3)$$

式中: $S_x(i, j)$ 与 $S_y(i, j)$ 分别表示 x 与 y 方向的 Sobel 梯度值。

还有学者提出一种基于区域能量的评价函数,将 x 方向和 y 方向相邻像素灰度值之差的平方和作为每个像素点的梯度值,再对所有梯度值进行累加求和,计算公式可以描述为

$$F_{\text{Energy}}(x, y) = \sum_{(i, j) \in \Omega(x, y)} \left\{ [I(i+1, j) - I(i, j)]^2 + [I(i, j+1) - I(i, j)]^2 \right\}. \quad (4)$$

此外,还有学者提出一种点锐度聚焦评价函数,计算公式可以描述为

$$F_{\text{Eav}} = \frac{1}{MN} \sum_{(i, j) \in \Omega(x, y)} \sum_{a=1}^8 |dI/dx|, \quad (5)$$

式中: F_{Eav} 为点锐度; dI 为灰度变化幅值; dx 为像元间距离增量。计算过程可以描述为:对图像中每个像素,计算其与周围一圈像素的差值并进行加权求和(权的大小与距离相关,例如对角方向差值需要乘以系数 $1/\sqrt{2}$),将所有像素的平均值记为该图像的点锐度。

小波变换^[15]是一种不同于傅里叶变换的方法,具有多分辨率分析的特点。通常,对图像进行小波变换,可以得到 1 个一级低频系数 LL_1 和 3 个一级高频系数 HL_1 、 LH_1 与 HH_1 ;再次进行小波变换,则又会生成 1 个二级低频系数 LL_2 和 3 个二级高频系数 HL_2 、 LH_2 与 HH_2 ;以此类推,可以得到更高阶的小波变换结果。以小波三级变换为例,其分解原理如图 3 所示。

聚焦清晰的图像通常含有更多的高频分量,因此可以针对小波变换后图像的高低频信息进行计算,将计算结果作为衡量清晰度的指标。如 Yang 等^[16]将高频系数绝对值和作为聚焦评价函数,计算公式可以描述为

$$F_{\text{Wavelet}}(x, y) = \sum_{(i, j) \in \Omega(x, y)} |W_{LH}(i, j)| + |W_{HL}(i, j)| + |W_{HH}(i, j)|. \quad (6)$$

同时,他们还提出另一种聚焦评价函数,通过计算窗口内高频系数方差和来衡量清晰度,计算公式可以描述为

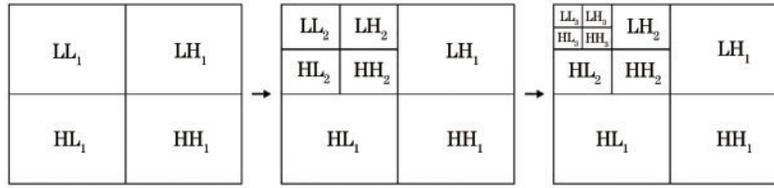


图3 三级分解原理

Fig. 3 Principle of three level decomposition

$$F_{\text{Wave2}}(x, y) = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} \left\{ [W_{\text{LH}}(i, j) - \mu_{\text{LH}}]^2 + [W_{\text{HL}}(i, j) - \mu_{\text{HL}}]^2 + [W_{\text{HH}}(i, j) - \mu_{\text{HH}}]^2 \right\}, \quad (7)$$

式中: $W_{\text{LH}}(i, j)$ 为窗口内高频系数; μ_{LH} 为窗口内高频系数的平均值。Xie 等^[17]用高频系数平方和 M_{H}^2 与低频系数平方和 M_{L}^2 的比值作为聚焦评价函数, 计算公式可以描述为

$$F_{\text{Wave3}}(x, y) = \frac{M_{\text{H}}^2}{M_{\text{L}}^2}, \quad (8)$$

$$M_{\text{H}}^2 = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} [W_{\text{LH}}(i, j)^2 + W_{\text{HL}}(i, j)^2 + W_{\text{HH}}(i, j)^2], \quad (9)$$

$$M_{\text{L}}^2 = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)} W_{\text{LL}}(i, j)^2. \quad (10)$$

3.2 基于改进小波变换的聚焦评价函数

可以看出, 目前主流的聚焦评价函数均集中于图像序列中某一切片, 操作对象相当于一组二维矩阵。通过计算二维矩阵中每一点的梯度等信息, 量化出该点的清晰程度。这种计算方法没有考虑到前后切片的关联性, 因此可能引入噪声, 导致深度判断不正确。本文在基于小波变换的聚焦评价函数基础上, 利用三维窗口^[18]将二维评价函数拓展到三维, 具体定义如下。

对于采集到的图像序列 \mathbf{P} , 可以将其看作 $H \times W \times L$ 的三维像素矩阵, 其中 H 与 W 表示图片长度与

宽度, L 表示图片数量。对某一切片 \mathbf{P}_z 中点 $(x, y)_z$, 取其三维邻域窗口 $\Omega(x, y)_z$, 窗口半宽为 m, n 与 l , 表示以点 $(x, y)_z$ 为中心, 长、宽、高分别为 $2m+1, 2n+1$ 与 $2l+1$ 的像素空间。相应地, 聚焦评价函数变化为

$$F_{\text{Wave3D}}(x, y)_z = \frac{M_{\text{H}}^2}{M_{\text{L}}^2}, \quad (11)$$

$$M_{\text{H}}^2 = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)_z}$$

$$\sum_{z=-l}^{z+l} [W_{\text{LH}}(i, j)^2 + W_{\text{HL}}(i, j)^2 + W_{\text{HH}}(i, j)^2], \quad (12)$$

$$M_{\text{L}}^2 = \sum_{(i,j) \in \Omega(x,y)_z} \sum_{z=-l}^{z+l} W_{\text{LL}}(i, j)^2. \quad (13)$$

每经过一次小波变换, 区间各向尺寸会缩减 $1/2$, 因此, 对于原图像中坐标区间为 $(x_0, x_0 + w) \times (y_0, y_0 + l)$ 的部分, 其在高频与低频系数矩阵中的对应坐标也会发生变换。对于 k 次小波变换, 其在低频系数 LL_k 以及高频系数 $\text{HL}_k, \text{LH}_k, \text{HH}_k$ 中对应的坐标区间可以表示为 $(\frac{x_0}{2^k}, \frac{x_0 + w}{2^k}) \times (\frac{y_0}{2^k}, \frac{y_0 + l}{2^k})$ 。计算聚焦函数时, 需要分别计算各阶系数平方和, 再进行累加。

3.3 SFF 三维形貌重构算法

本文提出一种基于改进小波变换的 SFF 算法, 用以实现对光学元件激光损伤的三维形貌重构。所提重构算法的具体流程如图 4 所示。

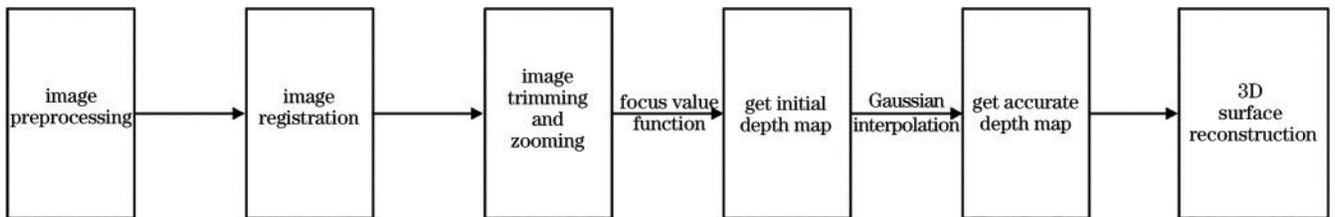


图4 所提重构算法的流程

Fig. 4 Flow chart of the proposed reconstruction algorithm

1) 图像序列采集及预处理。对采集到的原始图像进行预处理, 增加灰度差异, 减少噪声影响。预处理操作包括转灰度图、直方图均衡化、中值滤波等。

2) 图像配准。采集过程中存在机械振动等, 可能使图像产生一定偏移。可以通过图像配准定位减小重构时的误差。

3) 图像裁减及缩放。激光损伤点在图像中的面积

往往较小, 为了减少计算量, 可以通过裁减损伤主体并进行适当缩放的方式来去除不需要的信息。

4) 计算初始深度图。利用所提改进的聚焦评价函数计算聚焦程度, 可以得到每个像素的聚焦测度值。此时利用最大值搜索法, 根据步长和最大值对应的图像序数即可得到每个像素的大致深度。

5) 高斯插值优化深度图。由于平移台和显微镜景

深的限制,步长不可能趋向无穷小,因此最大值所在的图像序列位置不一定是实际聚焦位置。此时可以根据聚焦评价函数在最大值附近呈高斯分布的特点,使用

$$\bar{d} = \frac{(\ln f_m - \ln f_{m+1})(d_m^2 - d_{m-1}^2) - (\ln f_m - \ln f_{m-1})(d_m^2 - d_{m+1}^2)}{2\Delta d(2\ln f_m - \ln f_{m+1} - \ln f_{m-1})}, \quad (14)$$

式中: \bar{d} 为拟合后的深度; f_m 为聚焦评价函数计算出的最大值; d_m 为初始深度图中对应的深度。

6)生成三维形貌。根据插值拟合后的深度信息,可以获得损伤表面的点云数据,利用可视化算法即可重构激光损伤的三维形貌。

3.4 算法对比与验证

为了客观地评价所提算法,以银反射镜表面某激光损伤点为实验样本,分别对聚焦评价函数曲线与三维形貌重构效果进行对比与验证。

首先使用放大倍数为 $5\times$ 的显微物镜,以 $10\ \mu\text{m}$ 的步进距离采集了损伤点的图像序列,共 19 张。在 Python3.9 平台进行编程,对预处理后的图像序列进行计算,得到各类聚焦评价函数的评价曲线。理想的聚焦评价函数曲线应该具有单峰性、无偏性、高灵敏度、高信噪比等特点。为了准确客观地评价聚焦评价函数的性能,选用清晰度比率、平缓区波动量、灵敏度^[20]三项技术指标。

清晰度比率 Q_R 定义为聚焦评价函数最大值与最小值的比值,由于本文对图像序列的聚焦评价函数计算结果进行了归一化,最小值为 0,因此可以将清晰度比率定义为最大值与平均值的比值,值越大,聚焦评价函数区分图像清晰度的能力越好。清晰度比率的计算公式可以描述为

$$Q_R = \frac{f_{\max}}{\bar{f}}, \quad (15)$$

式中: f_{\max} 表示聚焦评价函数值的最大值; \bar{f} 表示聚焦评价函数值的平均值。

平缓区波动量 Q_F 可以用来衡量聚焦评价函数的

高斯插值拟合来获取更精确的深度信息。三点高斯插值方法^[19]的计算公式可以描述为

抗噪性能,值越大,聚焦评价函数的抗噪能力越好,计算公式可以描述为

$$Q_F = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{z=1}^L (f_z - \bar{f})^2}, \quad (16)$$

式中: L 为图像张数; f_z 为其中第 Z 张图片的聚焦评价函数值。

灵敏度 Q_S 可以反映聚焦评价函数的变化剧烈程度,值越大,聚焦评价函数性能越好,计算公式可以描述为

$$Q_S = \frac{f_{\max} - f(Z_{\max} + \epsilon)}{f(Z_{\max} + \epsilon)}, \quad (17)$$

式中: ϵ 表示横坐标偏移量; $f(Z_{\max} + \epsilon)$ 表示偏移点的聚焦评价函数值。

基于SFF的三维形貌重构需要浅景深的成像系统,测量的步长通常应小于成像系统景深的 $1/2$ 。若步长过大,容易发生对焦区域断层;若步长过小,容易引入噪点,且增加了需要采集的图片序列数量,增大计算量。实验中将物镜放大倍数切换为 $20\times$,此时本系统的景深约为 $10\ \mu\text{m}$,故取步长为 $5\ \mu\text{m}$,共采集图像序列 40 张。部分序列图像如图 5 所示,实验中首先对图像进行预处理,中值滤波卷积核大小为 3。将图像序列统一预处理为 400×400 像素大小,以减少计算量。考虑到算法的快速响应性能,使用基于SURF的图像配准算法实现对序列图之间微小位移的快速定位与修正。小波变换有诸多小波基可供选择,如 Haar 小波基(简称 Haar)、Daubechies 小波基(简称 db)、Biorthogonal 小波基(简称 bior)等。经过测试,使用“db2”小波基效果最好。本文使用“db2”小波基,进行 1 次小波变换,所取三维窗口大小为 $9\times 9\times 3$ 。

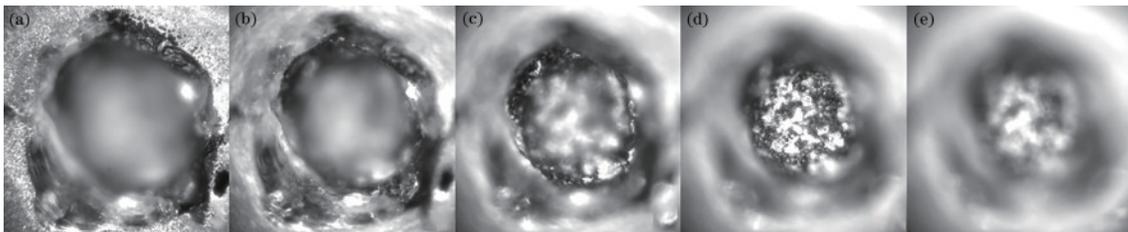


图 5 图像序列。(a)第 1 张;(b)第 10 张;(c)第 20 张;(d)第 31 张;(e)第 40 张

Fig. 5 Image sequence. (a) The 1st image; (b) the 10th image; (c) the 20th image; (d) the 31st image; (e) the 40th image

4 结果与分析

4.1 聚焦评价函数对比结果

对比了几种常用的聚焦评价函数,如基于梯度的

方法(Brenner, Tenengrad, Eav)、基于统计的方法(Variance, Energy)、基于小波变换的方法(Wave1, Wave2, Wave3, Wave3D)等,结果如表 1 所示。其中利用小波变换方法对提到的 3 种二维聚焦评价函数与

表 1 聚焦评价函数性能指标

Table 1 Performance index of the focus evaluation function

Algorithm	Q_R	Q_F	Q_S
$F_{Brenner}$	2.110	0.340	0.080
$F_{Tenengrad}$	1.953	0.338	0.060
F_{Eav}	1.751	0.328	0.049
$F_{Variance}$	1.419	0.305	0.061
F_{Energy}	2.550	0.351	0.117
F_{Wave1}	1.746	0.330	0.044
F_{Wave2}	1.777	0.332	0.042
F_{Wave3}	2.563	0.346	0.116
F_{Wave3D}	2.608	0.356	0.131

所提改进的三维聚焦评价函数进行对比。结果表明：所提改进的聚焦评价函数的清晰度比率、平缓区波动量、灵敏度三项指标均有提高，最多提升了 83.8%、16.7%、211.9%；与二维小波变换聚焦评价函数中表现最优的 Wave3 方法相比，分别提升了 1.8%、2.9%、12.9%。

图 6 展示了各聚焦评价函数曲线，对于本组实验对象，所有聚焦评价函数的最大值均出现在第 11 张图

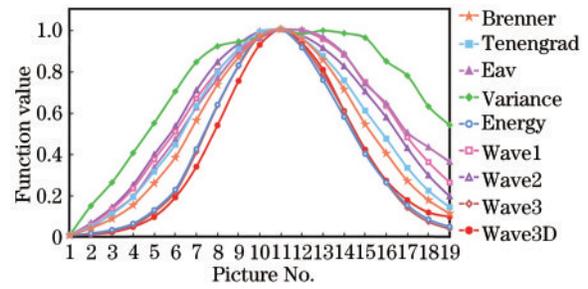


图 6 聚焦评价函数曲线

Fig. 6 Curves of focus evaluation functions

像，表明该图片整体对焦最清晰。其中所提改进聚焦评价函数(Wave3D)曲线呈近似高斯型分布，符合聚焦理论模型，曲线整体更陡峭，在最大值附近波动较大，表明该聚焦评价函数可以较好地地区分出清晰区域。

4.2 三维形貌重构算法验证结果

将样本损伤点放置在金相显微镜下观察，如图 7 所示，损伤总体形貌呈凹坑型。单向转动金相显微镜的高度微调旋钮，使焦平面分别位于损伤的顶部与底部，利用金相显微镜软件内置的测量功能即可得到焦平面移动距离，即最大深度。重复测量 10 次并取平均值，得到最大深度，约为 167.2 μm 。

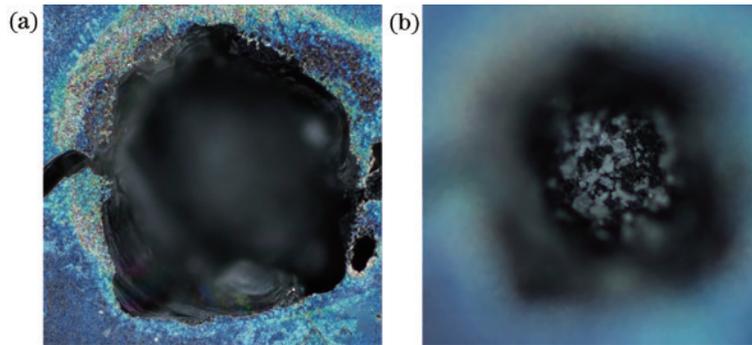


图 7 样本损伤形貌。(a)对焦到顶部；(b)对焦到底部

Fig. 7 Damage morphology of the sample. (a) Focus on the top; (b) focus on the bottom

对所提算法与其他传统方法的重构结果进行对比，结果如表 2 所示。除 Wave3 与所提方法外，其他方法计算得到的结果与真实值差距在 10% 以上；所提算法得到最大深度的相对误差最小，仅有 1.56%，相对传统方法，准确率提高了约 1 个数量级。

对算法处理得到的三维点云数据进行可视化处理，即可实现激光损伤的三维形貌重构。图 8 与图 9 分别为三维点云与表面上色重建后的损伤图像。图 8(a)~(i)与图 9(a)~(i)分别对应 9 种聚焦评价函数的重构结果。可以看出：重构得到的损伤形貌整体呈凹坑型，符合金相显微镜的观察结果；除 Wave3，传统方法重构的损伤表面均存在大量深度突变，表明传统方法受噪声影响较大，对聚焦像素的判断错误较多，原因可能是光照条件限制导致的表面细节缺失和灰尘

表 2 最大深度计算结果

Table 2 Calculation results of maximum depth

Algorithm	Depth / μm	Error / %
$F_{Brenner}$	191.7	14.56
$F_{Tenengrad}$	192.2	14.95
F_{Eav}	190.7	14.06
$F_{Variance}$	193.1	15.49
F_{Energy}	193.8	15.91
F_{Wave1}	186.8	11.72
F_{Wave2}	187.6	12.20
F_{Wave3}	162.0	3.11
F_{Wave3D}	169.8	1.56

等污染物带来的噪声影响；所提重构算法得到的图像表面更平滑，连续性较好，表明算法抗噪性更好。

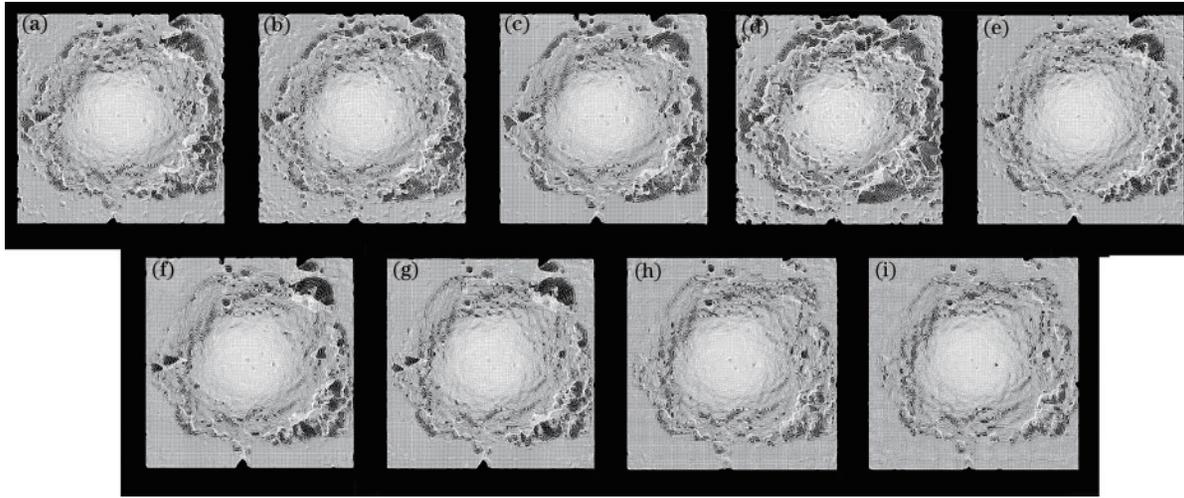


图 8 三维点云俯视图。(a) Brenner; (b) Tenengrad; (c) Eav; (d) Variance; (e) Energy; (f) Wave1; (g) Wave2; (h) Wave3; (i) Wave3D
 Fig. 8 Top view of 3D point cloud map. (a) Brenner; (b) Tenengrad; (c) Eav; (d) Variance; (e) Energy; (f) Wave1; (g) Wave2; (h) Wave3; (i) Wave3D

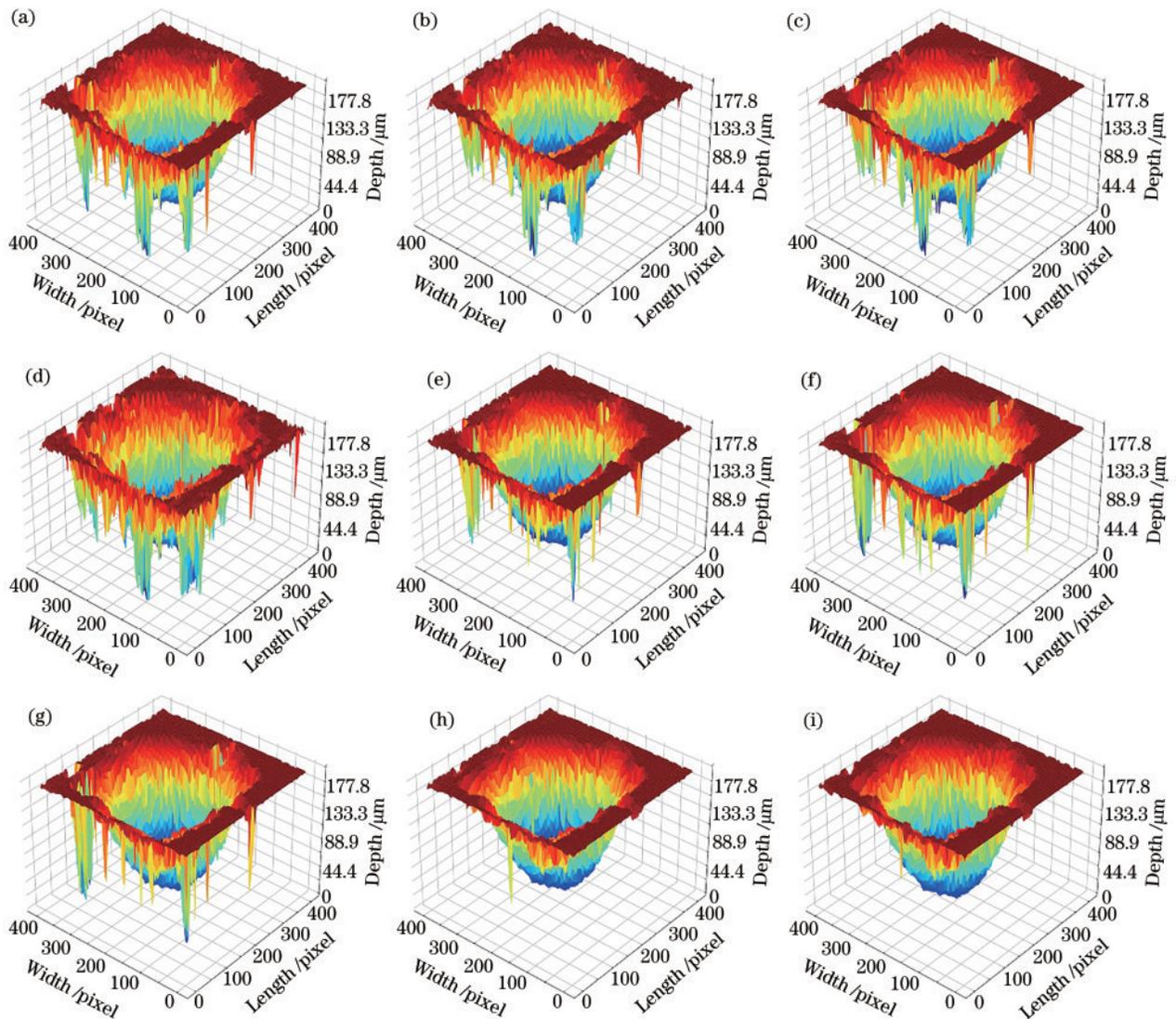


图 9 重构结果对比。(a) Brenner; (b) Tenengrad; (c) Eav; (d) Variance; (e) Energy; (f) Wave1; (g) Wave2; (h) Wave3; (i) Wave3D
 Fig. 9 Comparison of reconstruction results. (a) Brenner; (b) Tenengrad; (c) Eav; (d) Variance; (e) Energy; (f) Wave1; (g) Wave2; (h) Wave3; (i) Wave3D

5 结 论

现有显微成像探测方法难以满足激光损伤在线检测需求,因此介绍了一种激光损伤在线检测方法,并搭建了在线检测装置。针对传统显微成像无法获取深度信息的问题,提出了一种基于 SFF 方法的三维形貌重构算法,并提出一种改进的三维小波变换聚焦评价函数。经过验证:所提聚焦评价函数的清晰度比率、平缓区波动量、灵敏度三项指标相对传统方法最大提升了 83.8%、16.7%、211.9%;与二维小波变换聚焦评价函数中表现最优的 Wave3 方法相比,分别提升了 1.8%、2.9%、12.9%。对本文研制的装置进行了真实损伤样本精度测量,所提算法的有效性得到验证,最大深度的测量误差为 1.56%,较传统方法提高了约 1 个数量级。相对于传统图像法的二维特征分析,所提算法可以提供更多的有效信息,对光学元件激光损伤的显微探测方法、激光损伤机理的研究、微小物体三维形貌的重构与测量等具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Chen L Z, Guan X W, Tan B T, et al. Surface damage features of sapphire by 1064 nm Nd: YAG pulsed laser irradiation[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9543: 954308.
- [2] 张昭琳, 苏俊宏. 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0212002.
Zhang Z L, Su J H. Simulation and reconstruction of 3D microscopic morphology of damaged optical film surface [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0212002.
- [3] 崔辉, 刘世杰, 赵永安, 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.
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.
- [4] Lou W M, Cao P, Hu H T, et al. Electromagnetic simulation model of microscopic scattering dark-field imaging for optical components surface defect detection [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11523: 1152305.
- [5] Rainer F. Mapping and inspection of damage and artifacts in large-scale optics[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3244: 272-281.
- [6] Wei F P, Chen F D, Tang J, et al. Final optics damage online inspection in high power laser facility[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(4): 306-311.
- [7] 张健浦, 孙焕宇, 王狮凌, 等. 熔融石英光学元件亚表面缺陷三维重构技术[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0216001.
Zhang J P, Sun H Y, Wang S L, et al. Three-dimensional reconstruction technology of subsurface defects in fused silica optical components[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0216001.
- [8] 宋琨鹏, 于瀛洁, 牟柯冰. 金相显微镜上实现三维微观形貌恢复[J]. 光学仪器, 2016, 38(5): 388-392.
- [9] Song K P, Yu Y J, Mou K B. Recovery of three-dimensional microscopic morphology by metalloscope[J]. Optical Instruments, 2016, 38(5): 388-392.
- [9] Favaro P, Soatto S, Burger M, et al. Shape from defocus via diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(3): 518-531.
- [10] Zhang X L, Li X F, Liu Z J, et al. Multi-focus image fusion using image-partition-based focus detection[J]. Signal Processing, 2014, 102: 64-76.
- [11] 李景玉, 张荣芬, 刘宇红. 基于小波变换的多尺度图像融合增强算法[J]. 光学技术, 2021, 47(2): 217-222.
Li J Y, Zhang R F, Liu Y H. Multiscale image fusion and enhancement algorithm based on wavelet transform [J]. Optical Technique, 2021, 47(2): 217-222.
- [12] An Y, Kang G, Kim I J, et al. Shape from focus through Laplacian using 3D window[C]//2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking, December 13-15, 2008, Hainan, China. New York: IEEE Press, 2008: 46-50.
- [13] Lou W M, Cao P, Zhang D H, et al. Optical element surface defect size recognition based on decision regression tree[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18): 6536.
- [14] Pertuz S, Puig D, Garcia M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(5): 1415-1432.
- [15] Cheng J, Liu H J, Liu T, et al. Remote sensing image fusion via wavelet transform and sparse representation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 104: 158-173.
- [16] Yang G, Nelson B J. Wavelet-based autofocus and unsupervised segmentation of microscopic images[C]//Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), October 27-31, 2003, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2003: 2143-2148.
- [17] Xie H, Rong W B, Sun L N. Wavelet-based focus measure and 3-D surface reconstruction method for microscopy images[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 9-15, 2006, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2006: 229-234.
- [18] Mahmood M T, Lee I H. Shape from focus based on 3D structure tensor using optical microscopy[J]. Microscopy Research and Technique, 2020, 83(1): 48-55.
- [19] Tian Y Z, Hu H J, Cui H Y, et al. Three-dimensional surface microtopography recovery from a multi-focus image sequence using an omnidirectional modified Laplacian operator with adaptive window size[J]. Applied Optics, 2017, 56(22): 6300-6310.
- [20] Tian Y Z, Cui H Y, Pan Z Y, et al. Improved three-dimensional reconstruction algorithm from a multi-focus microscopic image sequence based on a nonsubsampling wavelet transform[J]. Applied Optics, 2018, 57(14): 3864-3872.