

# 大范围高精度激光诱导击穿光谱显微对焦系统

蒋章伟<sup>1,2\*\*</sup>, 燕艳<sup>3</sup>, 李阳<sup>1,2</sup>, 毕云峰<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>山东大学(威海)机电与信息工程学院, 山东 威海 264200;

<sup>2</sup>山东大学燃气检测技术中心, 山东 威海 264200;

<sup>3</sup>华晨汽车工程研究院, 辽宁 沈阳 110000

**摘要** 激光诱导击穿光谱(LIBS)信号的稳定性受激发光在目标表面聚焦准确性的影响很大。在海底热液喷口烟卤体探测等应用现场,难以通过对目标样品进行预处理这种常规方法来提高对焦精度,一套快速、高精度对焦系统对 LIBS 探测有重要意义。将显微自动对焦系统与图像对比度评价方法相结合应用于 LIBS 探测系统中以提升对焦精度,以双色激光辅助对焦方法扩大寻焦范围并加快对焦速度。实验证明两种方法结合可以实现 2400  $\mu\text{m}$  的对焦范围和 20  $\mu\text{m}$  的对焦精度,并明显提升对焦速度,有望提高现场探测时的 LIBS 信号质量和光谱采集效率。

**关键词** 机器视觉; 大范围寻焦; 对比度评价; 激光诱导击穿光谱; 图像处理; 显微成像

中图分类号 TP394.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1215004

## Wide-Range and High-Precision Microscopic Focusing System for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

Jiang Zhangwei<sup>1,2\*\*</sup>, Yan Yan<sup>3</sup>, Li Yang<sup>1,2</sup>, Bi Yunfeng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong University (Weihai), Weihai, Shandong 264200, China;

<sup>2</sup> Fuel Gas Detection Institute of Shandong University, Weihai, Shandong 264200, China;

<sup>3</sup> Brilliance Auto R&D Center, Shenyang, Liaoning 110000, China

**Abstract** The focusing accuracy of the excitation laser on the target surface has a great influence on the stability of the spectral signal in the laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) system. But it is difficult to pretreat the natural samples in some special application scenarios, such as the LIBS detection of sediments in the vicinity of deep-sea hydrothermal vents, to improve the focusing accuracy. It is significant to design a focusing system with fast speed and high precision for *in-situ* LIBS detection. In this research, the microscopic autofocus system combined with the image contrast evaluation method is applied to the LIBS detection system in order to improve the focusing accuracy, and the two-color laser diode assisted focusing method is used to expand the focusing range and accelerate the focusing speed. The experiments show that combining the two focusing methods can realize 2400  $\mu\text{m}$  focusing range and 20  $\mu\text{m}$  focusing accuracy, and can speed up the focusing process. The system proposed is hopeful to improve the LIBS signal quality and spectral acquisition efficiency in field detections.

**Key words** machine vision; wide-range focusing; contrast evaluation; laser-induced breakdown spectroscopy; image processing; microscopic imaging

**OCIS codes** 150.0155; 140.3440; 100.2000

## 1 引 言

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术<sup>[1]</sup>是一种典型的原子发射光谱技术,利用高能激光脉冲激发材料产生等离子体,通过采集等离子体冷却过程中发射

的光谱来分析探测目标中的元素。由于具有原位、快速、非接触的特点,LIBS技术被广泛应用于样品的定性定量分析<sup>[2-4]</sup>。LIBS信号质量与激光聚焦的准确性、稳定性密切相关<sup>[5-6]</sup>,激发光聚焦点对目标不同程度的偏离会导致LIBS信号的不稳定甚至探

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-07-13; 录用日期: 2018-07-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0302101)、国家自然科学基金(41503063)

\* E-mail: byf@sdu.edu.cn; \*\* E-mail: jiangzw95@163.com

测失败。在实验室环境下,一般需将固体材料表面打磨平整或使用长焦透镜聚焦,使目标表面的激光能量密度保持稳定。当探测海底热液喷口附近矿物沉淀形成的烟囱体等不规则目标时,由于现场加工条件和水体吸收等因素的影响,常规实验室方法很难实施,一套具有高精度自动对焦功能的 LIBS 系统将有助于提高光谱信号的质量和采集效率。

采用显微光学系统更容易满足 LIBS 探测对对焦精度的高要求<sup>[7]</sup>。但是显微光学系统存在景深过浅<sup>[8-9]</sup>、视场较小的问题,并且离焦时会降低图像对比度,这导致寻焦范围非常小,难以判断目标偏离激光焦点的方向。苗立刚等<sup>[10]</sup>针对寻焦范围小的问题提出了一种基于预测的对焦算法,这种方法能在一定程度上扩大寻焦范围,但是对探测目标表面的连续性提出了一定要求。张小波等<sup>[11]</sup>提出了一种激光三角法改进的显微镜快速自动对焦算法,该算法能够快速判别正负离焦状态,并且在使用 50 倍物镜的条件下能达到 $\pm 30 \mu\text{m}$ 的寻焦范围,但是对焦时间较长,且结构上的问题会导致光斑鬼影。Hsu

等<sup>[12]</sup>基于像散法提出了一种自动对焦算法,使用四象限探测器探测激光光斑的形状信息,建立数学模型准确地计算对焦误差信号(FES),但是由于 FES 与实际离焦量之间并不是严格的线性关系,这会影响到对焦的准确性和控制的快速性、可靠性。

为满足海底热液喷口烟囱体 LIBS 探测对寻焦范围、对焦精度、对焦速度的要求,本文结合对比度评价对焦<sup>[13-14]</sup>,提出了一种新型的双色辅助激光对焦方法。该方法可快速判别正负离焦状态,且计算量小,对焦速度快,对焦精度高。可根据不同水体环境调整对焦偏移量,兼顾激发效率和光谱吸收效率,有望提升深海复杂环境下光谱信号的采集质量和效率。

## 2 系统原理与方法

具有自动对焦功能的显微 LIBS 探测系统由固体脉冲激光器、光谱仪、无限远校正显微物镜、高精度一维电动平台、CMOS 工业相机、辅助半导体激光器和计算机等组成。系统整体结构如图 1 所示。

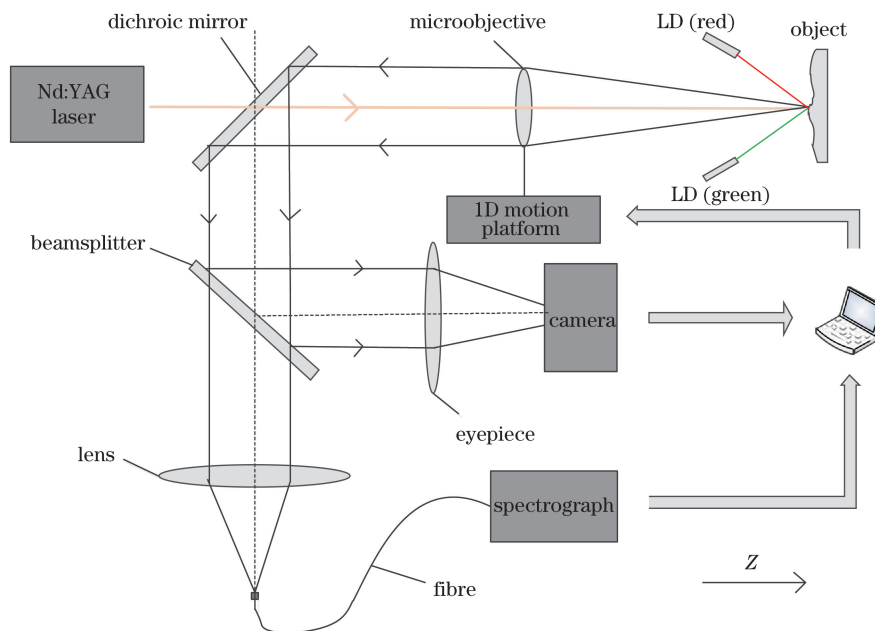


图 1 LIBS 探测自动显微对焦系统示意图

Fig. 1 Diagram of automatic microscopic focusing system for LIBS detection

首先,调整红、绿辅助指示激光束在激发光的会聚焦点上重合。系统工作状态下,若目标偏离焦点,辅助激光将在目标表面投射两个光斑,反射后于工业相机处成像,图像由计算机处理后可获得相关参数,从而控制电动平台带动显微物镜在 Z 轴方向移动,使探测目标处于焦平面的一定范围内。然后关闭双色辅助激光,使探测目标直接成像,并对图像进

行对比度评价。小步长控制运动平台带动显微物镜精确寻焦,最终使探测物体表面位于显微镜头的焦平面上。对焦完成后,关闭照明光、辅助激光和工业相机,即可进行正常的 LIBS 采集。

### 2.1 双色激光辅助大范围寻焦

如前文所述,当探测目标准焦(即探测目标表面位于显微物镜焦平面)时,红、绿两辅助激光器射出

的光线在目标表面重合,反射的光线经无穷远校正的显微物镜后平行,再经成像透镜会聚后,于相机 CMOS 传感器主光轴位置处成像,即此时所成图像上红、绿两光斑重合。当探测目标表面处于正离焦状态(目标在焦平面与物镜之间)时,反射的光线经显微物镜和成像透镜后在传感器的一侧成像(如图 2 细实线所示),同时,绿色指示光线会在另一侧成像(图 2 中未画出绿光成像光路,其与红光成像光路对称)。红绿两光斑的相对距离与离焦距离呈正相关,据此可计算当前状态的离焦量。当探测目标表面处于负离焦状态(探测目标在焦平面远离物镜一侧)时,经显微物镜和成像透镜后,反射的光线在 CMOS 前会聚后,于 CMOS 传感器处呈扩散像斑(如图 2 虚线所示),此时红色光斑与主光轴的相对位置与目标处于正离焦状态时相反,这可作为判断正负离焦状态的依据。同样,绿色光线会在另一侧成像。

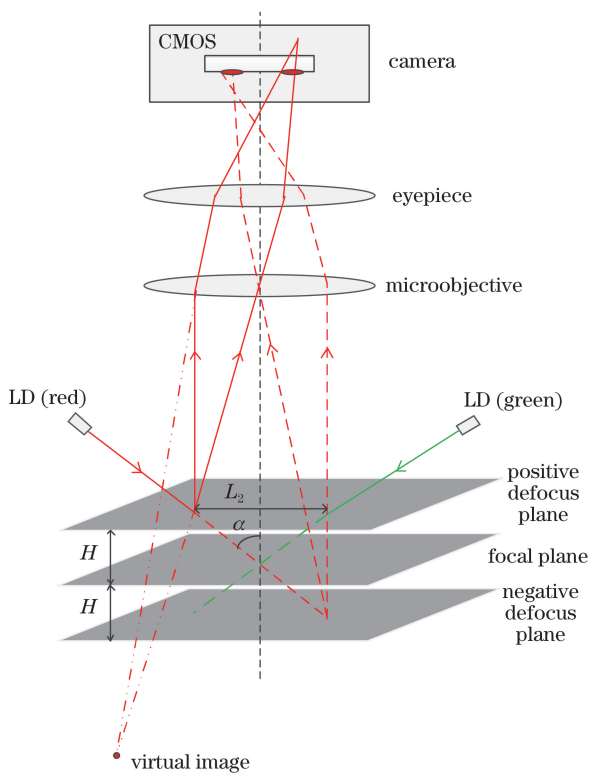


图 2 两种离焦状态成像示意图

Fig. 2 Imaging of two defocus states

假设红、绿两激光器射出的光束与相机主轴的夹角为  $\alpha$ ,探测目标在  $Z$  轴方向上的离焦距离为  $H$ ,则两指示光斑在探测目标表面的距离  $L_2$  为

$$L_2 = 2H \tan \alpha. \quad (1)$$

由于 CMOS 上两光斑的距离与探测目标上的光斑距离对应成比例,在 CMOS 上的实际距离为

$$L_1 = ML_2, \quad (2)$$

式中: $M$  为放大倍数。放大倍数的值由成像透镜的焦距和显微物镜的焦距共同决定。 $M$  的计算公式为

$$M = \frac{L}{F}, \quad (3)$$

式中: $L$  为成像物镜的焦距, $F$  为显微物镜的焦距。根据(1)~(3)式可得

$$H = \frac{L_1 F \cot \alpha}{2L}, \quad (4)$$

简化系数,可得

$$H = AL_1 \cot \alpha, \quad (5)$$

式中: $A$  为简化的常数系数。

参数  $L_1$  为相机 CMOS 上两光斑的实际距离。成像后两光斑的像素距离(两光斑定位中心位置的像素间距)与相机的像素尺寸直接相关,像素尺寸越大,则像素距离越小;反之,像素距离越大。由(5)式可知,寻焦范围的大小与工业相机 CMOS 的尺寸也有很大的关系,尺寸越大,则寻焦范围越大。确定图像上两光斑的距离后,可经过一次计算迅速达到焦平面位置,大大提高对焦速度。

当探测目标的离焦距离较远,红绿光斑成像不完全时,系统也可根据图像中红绿分量的分布状况判断正负离焦状态,从而控制执行机构移动,使红绿光斑完整成像,然后进行进一步对焦。通过这种方法可增大系统对焦范围。

## 2.2 图像对比度精密寻焦

使用双色辅助激光的对焦方法可快速判断焦平面位置,扩大寻焦范围。但是成像质量受到衍射以及辅助激光入射角度、能量稳定性等因素的影响,对图像进行处理时往往难以精确定红绿光斑的定位中心,因此不易进一步提升对焦精度。本文以图像对比度评价对焦作为补充。

图像对比度评价对焦的关键在于评价函数的设计<sup>[15-19]</sup>。考虑到实际需求,采用计算较为简单的图像像素亮度标准差(STD)作为评价图像清晰度的指标。其基本原理为:当探测目标偏离焦平面较远时,成像较为模糊,像素亮度的标准差较小;反之,标准差较大。标准差最大的图像所在位置即为焦平面位置。标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (6)$$

式中: $\mu$  为所行或列像素亮度的平均值, $x_i$  为每一个像素的亮度值, $N$  为行或列的像素数。为了进

一步降低计算量,可根据实际成像情况选取评价兴趣区(ROD),对中间行和中间列像素的亮度分别计算标准差。

### 3 结果与分析

根据上述原理在实验室搭建了一套显微成像对焦系统。系统采用的 CMOS 工业相机传感器尺寸为  $1/2''$ ,分辨率为  $1536 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$ 。考虑到等离子体易对显微镜头造成伤害,选取了 Nikon  $20 \times$ 长工作距离金相物镜,其工作距离为  $11 \text{ mm}$ 。辅助激光是由半导体激光器发射的  $650 \text{ nm}$  的红色激光和  $532 \text{ nm}$  的绿色激光。二向色镜为 Thorlabs DMLP950R,其截止波长为  $950 \text{ nm}$ 。使用 OptoSigma TSDM60-20 一维

运动平台带动显微物镜移动进行对焦,其行程为  $40 \text{ mm}$ ,定位精度为  $1 \mu\text{m}$ ,直线度为  $0.002 \text{ mm}$ 。整套控制软件使用 LabVIEW 编写。

#### 3.1 基于双色辅助激光成像对焦

基于双色辅助激光成像定位系统进行寻焦的过程主要分为两个阶段。

在第一阶段,离焦距离较大,反射的红绿光束投射到 CMOS 传感器边缘,不能完全成像,如图 3 所示。但由于两个光斑的颜色不同,对图像像素的颜色分布进行分析即可确定目标处于何种离焦状态。这种方法可以极大地提升对焦范围。经实验验证,在实验系统中可以将寻焦范围扩大至焦平面  $\pm 1200 \mu\text{m}$  处。经过初步判断后,可控制一维运动平台带动显微物镜移动一定步长,实现两光斑完全成像。

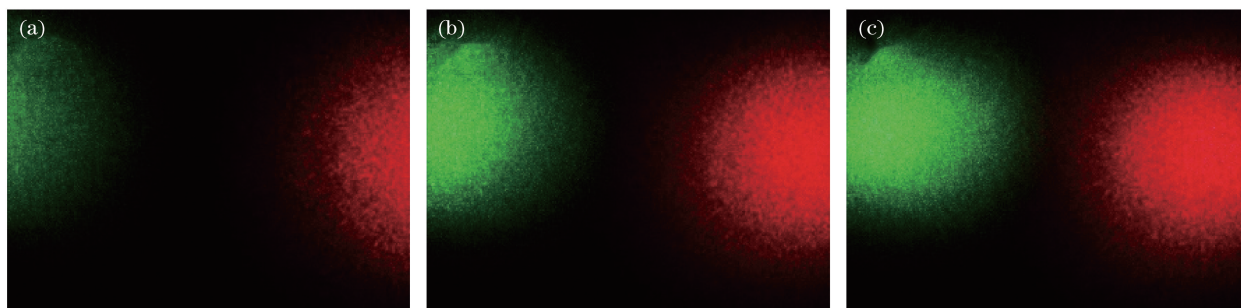


图 3 光斑不完全成像图

Fig. 3 Incomplete spot imaging

在第二阶段,初步对焦使光斑完全成像后,可进行光斑中心像素距离的计算。探测目标从正离焦状态到负离焦状态的过程中,红绿两光斑经历

了从完全分离到重合、再到分离的过程。在此过程中,红绿光斑的相对位置发生了交替。图 4 所示为实验成像图。

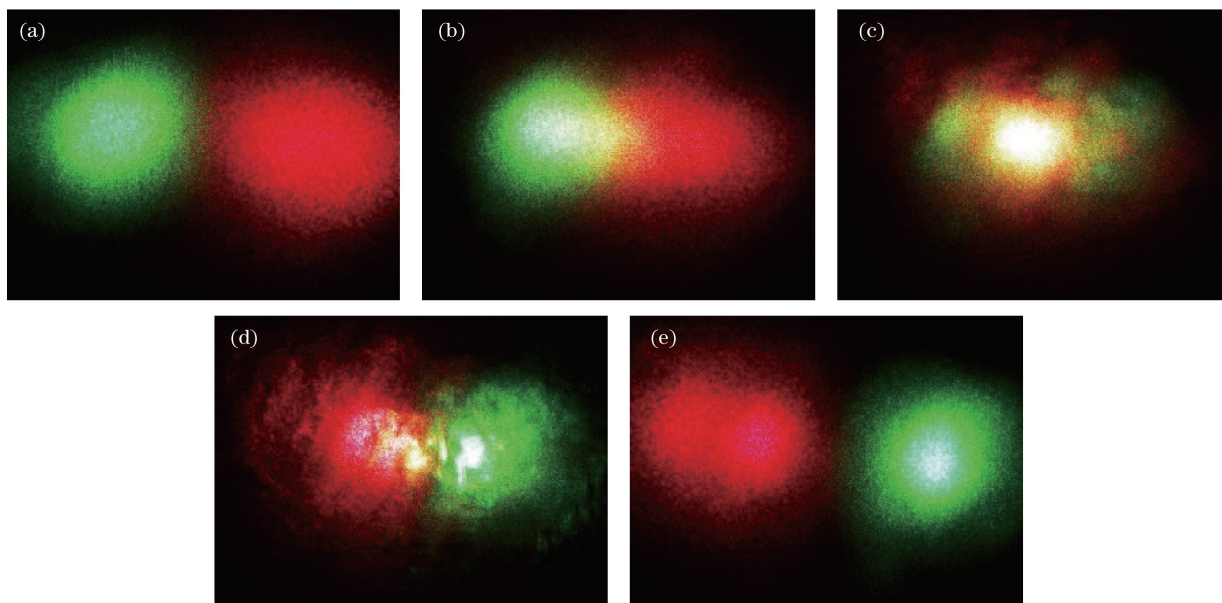


图 4 光斑完全成像图

Fig. 4 Complete spot imaging

实际成像光斑的边缘位置高频噪声明显,影响对光斑中心的判断,需要对图像进行降噪处理。选用巴特沃斯低通滤波器对图像进行滤波处理,可去除噪点,并且使图像的边缘更加平滑。滤波器产生公式为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v)/D_0]^{2n}}, \quad (7)$$

式中: $D_0$ 为巴特沃斯低通滤波器的截止频率, $n$ 为巴特沃斯滤波器的阶数。经过测试,将截止频率定为40 Hz,阶数为4。将图像转化为灰度图后,其各像素点灰度强度如图5所示。

当处于图5(a)和图5(e)所示两位置时,可以明

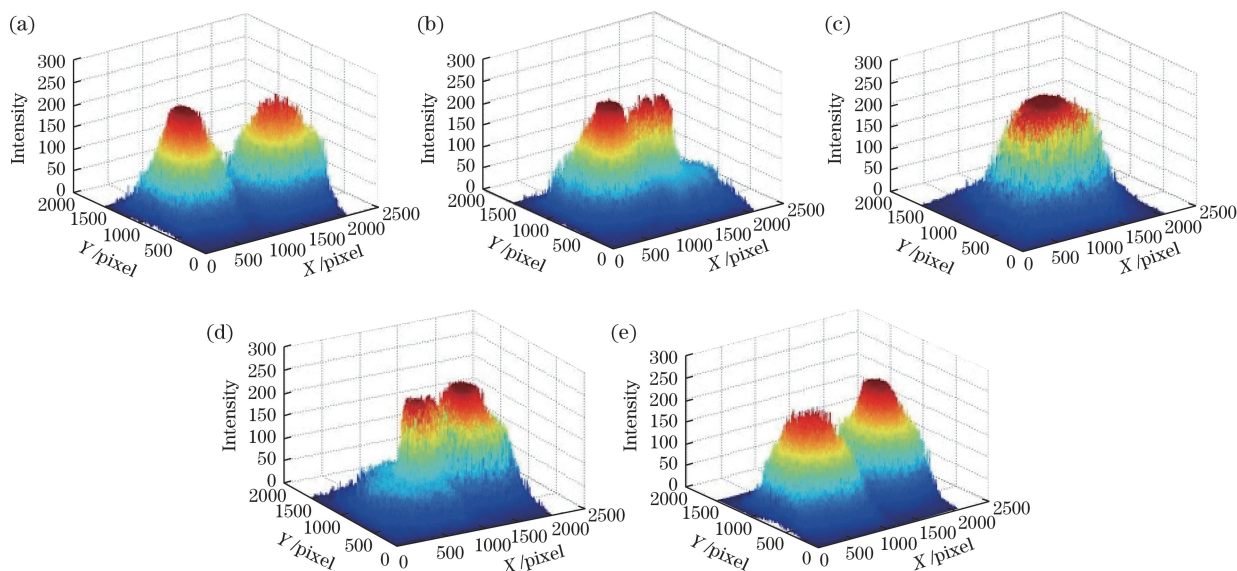


图5 光强分布图

Fig. 5 Light intensity distribution maps

为解决焦平面附近位置的判别问题,通过中值滤波对图像作进一步处理,使红色光斑更加平滑。然后对图像进行二值化处理,舍弃亮度不够的区域,降低中心定位难度。最后选取二值化后的图像重心作为光斑的定位中心。按照上述方法对连续采集的图像进行处理,得到光斑中心的像素距离与探测目标离焦距离间的关系,如表1和图6所示。

显微成像系统对振动很敏感,且辅助激光束通过光阑时会发生衍射,这些都会对成像产生影响,使光斑具有不规则性。选取光斑重心作为光斑的定位中心,这种替代方法并不能精准表示光斑中心,所以造成了图6中数据点连接曲线的线性度欠佳。当离焦距离小于 $100 \mu\text{m}$ 时,两光斑的重合面积较大,光斑中心间距小,像素亮度容易饱和,很难确定两光斑定位中心的确切位置,所以导致曲线的斜率较小。

舍弃焦平面 $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内的无效数据后,对数

显分辨出两个峰,进而非常容易地确定两光斑中心并计算其距离。当处于图5(b)和图5(d)所示两位置时,两光斑的距离非常近,红色光斑的强度梯度不平滑。这是由于相机CMOS传感器设计时仿照人眼,其感光区域的像素点排列为BG、GR(Bayer阵列),绿色感光单元占一半密度。传感器对绿色的敏感度强于红色,绿色光斑会对红色光斑成像造成影响,使红色光斑区域亮度饱和的像素增多,不易精准确定红色光斑中心,计算两光斑的距离时会产生误差。当探测目标处在焦平面上时,如图5(c)所示,两光斑的亮度强度峰重合。

据进行线性最小二乘拟合,拟合直线如图6所示。计算得到光斑像素距离差后,可以据此确定离焦距离,控制执行机构移动,一次计算执行后即可使目标处于焦平面 $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内。

基于双色辅助激光的对焦方法,只需采集并处理1~2幅图像即可迅速判断正负离焦状态并接近焦平面,而传统的采用不断缩小步长来逼近焦平面的寻焦方法至此需采集处理30~40幅图像。此外,使用传统的逐次逼近的寻峰方法时,执行机构带动显微镜镜头移动的距离也远大于本文系统所移动的距离,因此本文系统对焦速度得到了显著提升。

### 3.2 基于图像对比度评价对焦

考虑到显微成像系统对环境的敏感性,加快对焦速度会减小环境对探测的影响,从现场应用的角度出发,使用基于图像像素亮度标准差的评价函数作为准焦的判别标准。这种方法能够降低计算量,提升对焦速度。

表 1 离焦距离与图像双色光斑中心距离对应关系

Table 1 Relationship between the defocus distance and the two-color spot center distance

Defocus distance / $\mu\text{m}$	Pixel distance /pixel	Defocus distance / $\mu\text{m}$	Pixel distance /pixel	Defocus distance / $\mu\text{m}$	Pixel distance /pixel
475	1407.5000	150	223.3752	-175	190.0569
450	1327.5000	125	82.5207	-200	393.7493
425	1254.2000	100	27.3013	-225	533.0809
400	1175.4000	75	12.0203	-250	661.4308
375	1101.7000	50	8.6250	-275	746.3239
350	1026.5000	25	3.7311	-300	817.1268
325	980.3187	0	2.0381	-325	887.7337
300	917.3111	-25	5.3427	-350	944.5840
275	885.0653	-50	15.9099	-375	1015.5000
250	804.9607	-75	67.5093	-400	1114.6000
225	715.3268	-100	128.8011	-425	1277.4000
200	589.5747	-125	149.4676	-450	1401.8000
175	412.7080	-150	175.3470	-475	1468.8000

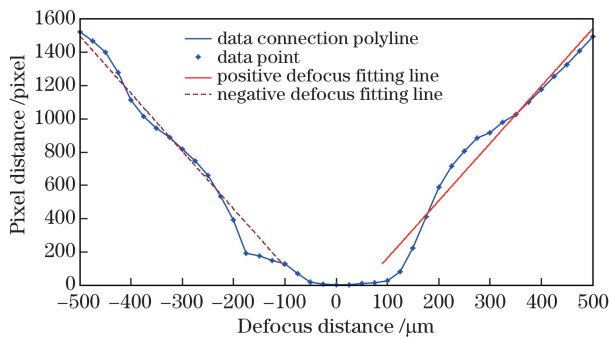


图 6 离焦距离与图像双色光斑中心间距对应关系

Fig. 6 Relationship between the defocus distance and the two-color spot center distance

在距焦平面 $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内,以步长 $20 \mu\text{m}$ 取 11 幅实际探测目标成像图,其中偏离焦平面 $-80, -40, 0, 40, 80 \mu\text{m}$ 处的图像如图 7(a)~(e)所示。

由图 7 可以明显看出,在 20 倍的显微成像系统中,在距焦平面 $\pm 100 \mu\text{m}$ 处,实物成像已经非常模糊。若只使用基于实物成像的对焦算法,20 倍显微成像系统的寻焦极限只能达到距焦平面 $\pm 150 \mu\text{m}$ 处。对连续采集的图像进行灰度处理,划定 ROI,取中间行和中间列的所有像素亮度值进行标准差运算,所得结果如表 2 所示。可以看出,以 $20 \mu\text{m}$ 步长采集图像后,以焦平面为中心,图像像素亮度标准

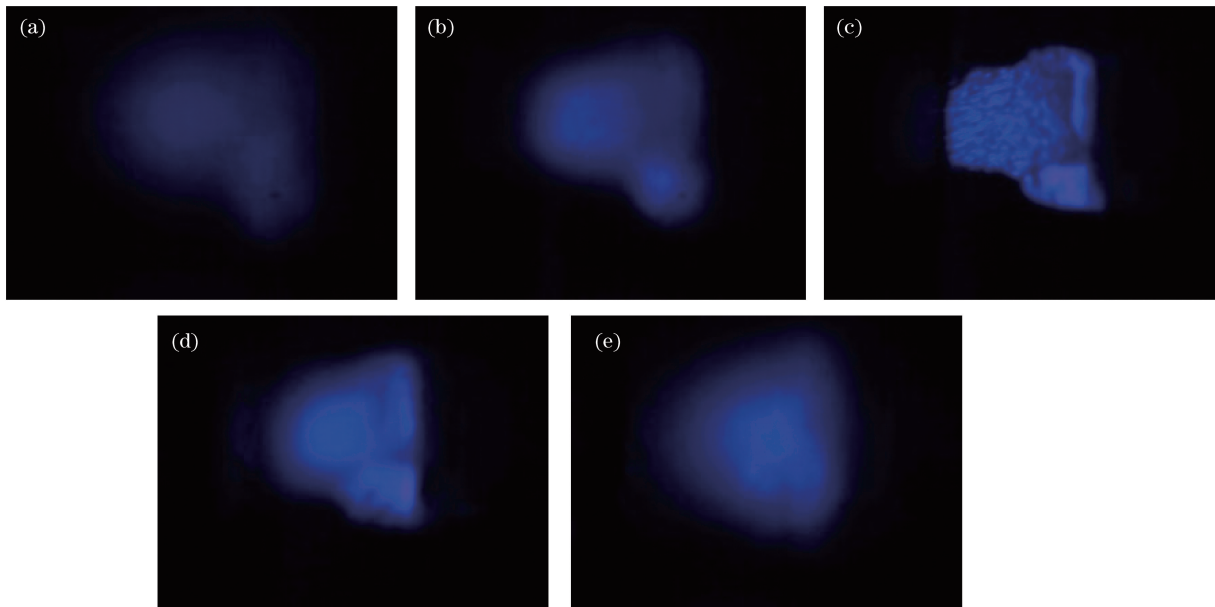


图 7 实物成像图

Fig. 7 Physical imaging maps

表 2 图像像素亮度标准差  
Table 2 Standard deviation of image pixel brightness

Defocus distance / $\mu\text{m}$	Horizontal STD	Vertical STD	Defocus distance / $\mu\text{m}$	Horizontal STD	Vertical STD
-80	9.1247	10.5315	20	13.7186	15.4348
-60	12.3589	13.5396	40	12.6334	13.3821
-40	13.5678	16.0603	60	10.7733	11.4970
-20	13.1859	16.3127	80	7.6790	7.4425
0	14.2103	18.3880	100	6.1405	4.9038

差与离焦距离间的关系具有较好的单调性。使用基于图像像素亮度标准差评价方法对焦后,可以使待测目标准确置于焦平面 $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内,相较于只使用双色辅助激光对焦方法所能达到的 $100 \mu\text{m}$ 的对焦精度提升了 $80\%$ 。这种方法达到的精度能够满足收集高质量光谱信号的精度要求。

## 4 结 论

针对海底热液喷口烟囱体 LIBS 探测对寻焦范围、对焦精度、对焦速度的要求,提出了双色激光辅助结合图像对比度评价的自动对焦方法。实验证明,在 $20$ 倍显微成像系统中,对焦精度能够达到 $20 \mu\text{m}$ ,能够收集到高质量光谱信号。使用基于图像清晰度评价函数的步进式对焦方法的寻焦范围仅为 $300 \mu\text{m}$ ,采用双色激光辅助方法能够达到 $2400 \mu\text{m}$ ,与前者相比提升了 $8$ 倍。由于该方法采集、处理的图像数量减少,最多仅需采集 $12$ 幅图像,算法计算量减小,对焦速度加快,相较于逐次逼近寻峰对焦方法的对焦时间缩短了 $2/3$ 以上。本文系统能够满足 LIBS 探测系统对大范围、高精度的寻焦要求,提升对焦速度,也可应用于其他具有类似需求的显微探测领域,具有较好的适用性。

## 参 考 文 献

- [1] Hahn D W, Omenetto N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part I: review of basic diagnostics and plasma-particle interactions: still-challenging issues within the analytical plasma community[J]. Applied Spectroscopy, 2010, 64(12): 335A-336A.
- [2] Guo L B, Zhu Z H, Li J M, *et al.* Determination of boron with molecular emission using laser-induced breakdown spectroscopy combined with laser-induced radical fluorescence[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2634-2642.
- [3] Cheng X, Yang X Y, Zhu Z H, *et al.* On-stream analysis of iron ore slurry using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9144-9149.
- [4] Jia Y, Zhao N J, Liu W Q, *et al.* Continuous online detection method of heavy metals in water based on LIBS technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0611001.  
贾尧, 赵南京, 刘文清, 等. 基于 LIBS 技术的水体重金属连续在线检测方法[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0611001.
- [5] Lin Z X, Li J, Lu J D, *et al.* Influence of lens to samples distance on laser-induced breakdown spectroscopy measurement[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(4): 17-20.  
林兆祥, 李捷, 陆继东, 等. 透镜到样品表面距离对 LIBS 测量的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 17-20.
- [6] Li Y. Quantitative analysis of metal elements using LIBS and its relevant impact factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.  
李颖. LIBS 在金属元素定量分析中的应用及其影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [7] Liao J L, Gao W R. Development of compact spectrally encoded microscopy imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0518001.  
廖九零, 高万荣. 小型光谱编码显微成像系统的研制[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0518001.
- [8] Wang D J, Ding X, Zhang T, *et al.* A fast auto-focusing technique for the long focal lens TDI CCD camera in remote sensing applications[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 190-197.
- [9] Liu C S, Jiang S H. Design and experimental validation of novel enhanced-performance autofocusing microscope[J]. Applied Physics B, 2014, 117(4): 1161-1171.
- [10] Miao L G, Xuan B, Peng S L. Fast autofocusing algorithm in microscopy[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(1): 9-12.  
苗立刚, 轩波, 彭思龙. 显微镜的快速自动对焦算法[J]. 光电子 • 激光, 2007, 18(1): 9-12.
- [11] Zhang X B, Fan F M, Cheng L L. Improvement for

- fast auto-focus system using laser triangulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1784-1791.
- 张小波, 范富明, 程良伦. 激光三角法改进的显微镜快速自动对焦方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1784-1791.
- [12] Hsu W Y, Lee C S, Chen P J, *et al.* Development of the fast astigmatic auto-focus microscope system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(4): 045902.
- [13] Huang W Q, You L R, Liu S J. Automatic focusing algorithm based on improved gray contrast function[J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(11): 3008-3009.
- 黄伟琼, 游林儒, 刘少君. 基于改进的灰度对比度函数的自动对焦方法[J]. *计算机应用*, 2011, 31(11): 3008-3009.
- [14] Mir H, Xu P, Chen R, *et al.* An autofocus heuristic for digital cameras based on supervised machine learning[J]. *Journal of Heuristics*, 2015, 21(5): 599-616.
- [15] Chen G J, Zhu M F, Zhang K S. Image definition evaluation function in auto-focusing process[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(2): 165-169.
- 陈国金, 朱妙芬, 张克松. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. *数据采集与处理*, 2009, 24(2): 165-169.
- [16] Wang Y R, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Autofocus evaluation function based on saturate pixels removing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1210001.
- 王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1210001.
- [17] Wei K S, Karuppanan S, Ridzuan Bi M. Development of an optical strain measurement method using digital image correlation[J]. *Asian Journal of Scientific Research*, 2013, 6(3): 411-422.
- [18] Bai T S. Research on optical microscopic auto-focus based on visual image[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- 柏天舒. 基于视觉图像的光学显微自动对焦技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [19] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfortable contrast range of stereo image based on salient region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0215001.
- 胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0215001.