

引用格式: WANG Hua-dong, FU Hong-bo, JIA Jun-wei, *et al.* LIBS Autofocus Method Based on Acutance of Surface Image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(6): 0630001
王华东,付洪波,贾军伟,等. 基于表面图像锐度的 LIBS 自动对焦方法[J].光子学报,2019,**48**(6):0630001

基于表面图像锐度的 LIBS 自动对焦方法

王华东^{1,2},付洪波¹,贾军伟^{1,2},周琪琪^{1,2},倪志波¹,董凤忠^{1,2}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 光子器件与材料安徽省重点实验室,合肥 230031)
(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

摘 要:利用自行设计的集成微区成像激光诱导击穿光谱系统,分析了孔径光阑设定、目标区域大小以及样品表面反射率对表面图像位置敏感特性的影响.结果表明,表面图像锐度在大孔径设定下对位置更为敏感,适用于自动对焦过程;反射率对表面图像锐度的位置敏感特性影响较小,且部分表面图像的锐度也可用于辅助激光诱导击穿光谱对焦;不同样品不同目标区域大小,图像锐度最大值对应表面位置具有很好的重复性,在此基础上,建立了基于表面图像锐度的自动对焦方法.
关键词:光谱学;激光诱导击穿光谱;自动对焦;图像处理;非接触测量
中图分类号:O439;O433.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/gzxb20194806.0630001

LIBS Autofocus Method Based on Acutance of Surface Image

WANG Hua-dong^{1,2}, FU Hong-bo¹, JIA Jun-wei^{1,2}, ZHOU Qi-qi^{1,2}, NI Zhi-bo¹, DONG Feng-zhong^{1,2}
(1 *Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)
(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract: By using a homemade laser induced breakdown spectroscopy system integrated with a micro-imager, the influence of aperture, region of interest, reflectivity of sample on position sensitivity of image acutance was analyzed. The results show that image acutance is more sensitive to the position under larger aperture, larger aperture is more suitable for the autofocus process. The reflectivity of sample has a little influence on the position sensitivity of image acutance, and the acutance of the partial image can also be used to assist the laser induced breakdown spectroscopy focus. The surface position corresponding to the maximum acutance has good repeatability for different samples and different region of interest. On this basis, an autofocus method based on the acutance of the surface image was established.
Key words: Spectroscopy; Laser induced breakdown spectroscopy; Autofocus; Image processing; Non-contact measurements
OCIS Codes: 300.6210; 120.4640; 140.3440; 100.2000

0 引言

激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)利用脉冲激光聚焦样品表面形成等

基金项目:国家自然科学基金(No.61505223)
第一作者:王华东(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为激光诱导击穿光谱及应用.Email:whdm818@163.com
导师(通讯作者):董凤忠(1965—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为新型光纤传感、高灵敏光谱探测以及有毒有害气体快速在线监测等.Email: fzdong@aiofm.ac.cn
收稿日期:2019-01-15;录用日期:2019-03-14

离子体,通过分析等离子体发射光谱实现元素成分分析.其作用机制决定了它实时、非接触、微损耗的优点,被广泛用于深空探测^[1, 2]、深海探测^[3, 4]、医疗健康^[5]、生产制造^[6]、及资源环境^[7-10]等领域.微损耗得益于聚焦脉冲激光与样品作用区域小,这也导致激光诱导等离子体发射光对激光聚焦点和样品表面的相对位置较为敏感^[11, 12],同时影响 LIBS 分析稳定性.

为提高 LIBS 分析稳定性,在采集光谱之前,需要先调整激光聚焦点和样品表面的相对位置实现对焦. LIBS 对焦一般包括调整 LIBS 系统焦距和调整待测样品位置两种方法.调整 LIBS 系统焦距不仅需要复杂的光机设计,还要对调整焦距引起的光谱强度变化进行校准^[1, 12].调整待测样品位置是固定焦距 LIBS 分析装置常采用的方法^[13-16],适用于样品位置易于调整情况.两种调整方式都需要先评价对焦状态.对焦状态评价的直接依据是光谱信号的优劣,韩振宇等^[12]建立了基于 LIBS 谱峰面积的自动对焦方法,但由于 LIBS 微损耗的特点,预采集光谱会破坏样品表面,损失部分信息.MAURICE S 等^[1]研制的 ChemCam 集成了连续激光测距装置辅助 LIBS 对焦,由于增加了激光测距系统,其结构相对复杂.另外也有不少研究者采用结构光照明成像方法实现 LIBS 自动对焦^[13-15],但该类方法同样需要在既有系统的基础上增加结构光照明,增加了系统的复杂性.

好奇号在火星服役期间,ChemCam 连续激光自动对焦装置中激光器能量锐减致使其自动对焦功能损坏.针对这一问题,PERET L 等^[17]利用 ChemCam 集成的远程微区成像装置,提出了基于图像锐度的自动对焦方法,在既有硬件的基础上恢复了 ChemCam 的自动对焦功能.另外,NOVOTNY J 等^[16]分别采用图像梯度和空间频率两个参数评价图像锐度,研究了图像锐度的位置敏感特性,但他们仅研究了图像锐度评价的算法,未对成像系统结构和目标区域选取进行研究,也未考虑表面反射率等因素的影响.本文结合已有研究基础,搭建了集成微区成像的 LIBS 分析系统,并在此基础上研究了基于表面图像锐度的 LIBS 对焦方法,重点分析了成像系统光阑设定、目标区域大小以及样品表面反射率对基于图像锐度的 LIBS 对焦方法的影响,在不增加硬件的基础上实现了 LIBS 自动对焦.

1 实验

1.1 实验系统

集成微区成像的 LIBS 系统装置示意图如图 1 所示,包含计算机、电控单元和光学单元.其中计算机主要实现硬件设备的控制和数据的采集分析;电控单元接受并完成相应的计算机指令;光学单元主要包括 LIBS 分析模块、微区成像模块和三维移动平台.激光器和光谱仪构成 LIBS 分析模块,实现光谱采集;LED 环形光源和 CMOS 相机构成成像模块,实现表面图像采集;三维移动平台的主要作用是样品位置的调整.

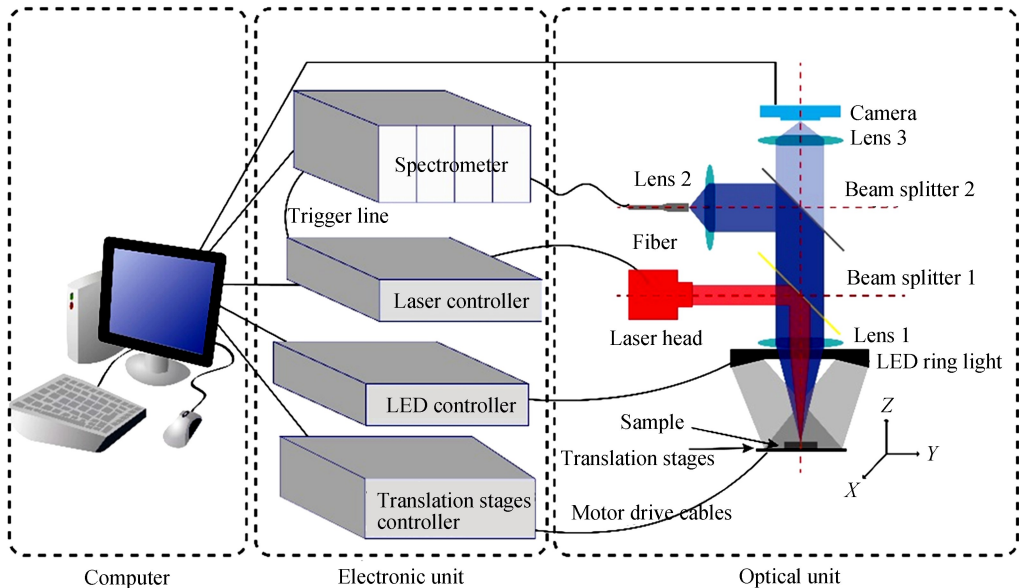


图 1 Schematic diagram of the experimental setup

Fig.1 实验装置示意图

集成微区成像 LIBS 系统的光学单元中,LIBS 模块和成像模块采用同轴结构,二者共用同一物镜,其结构示意图如图 2 所示,局部放大图像为物镜焦点与样品表面的相对位置关系.图 2 中,激光器(Laser head)发出的光经分束镜 1(Beam splitter1)反射后经凸透镜 1(Lens1)聚焦至样品表面,实现样品激发,产生激光诱导等离子体;等离子体发出的光同样经凸透镜 1(Lens1)收集,透过分束镜 1(Beam splitter1),经分束镜 2(Beam splitter2)反射至凸透镜 2(Lens2),而后耦合进入光纤,最终进入光谱仪,实现 LIBS 光谱的采集,其中凸透镜 2(Lens2)设有可调光阑用于调整进光量;LED 环形光源实现样品照明,漫反射光经凸透镜 1(Lens1)和凸透镜 3(Lens3)成像至探测器光敏面(Camera),实现样品表面图像的获取,其中凸透镜 3(Lens3)设有可调光阑,用于调整曝光量和成像景深.

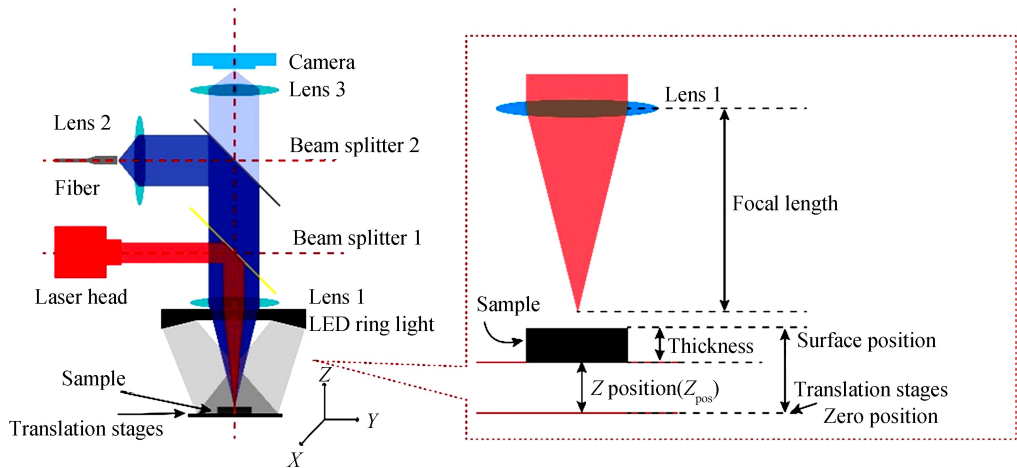


图 2 Coaxial optical system of the optical unit
Fig.2 光学单元同轴光路系统

实际实验过程中需要调整样品位置以实现 LIBS 分析,样品厚度及样品形态的差异是 LIBS 对焦需要的主要原因.如图 2 局部放大图所示,由于三维移动平台 Z 轴调节范围限制(调节范围 0~30 mm)和样品厚度的不确定性,Lens1 焦点通常设定在 Z 轴零点以上特定位置,具体可根据样品厚度的变化范围进行调节,本次实验设置焦点位于三维移动平台 Z 轴零点以上 18 mm 附近.实际实验过程中关心的是样品表面位置(Surface position),它包含样品位置(Z_{pos})和样品厚度(Thickness)两个部分,样品表面位置与透镜焦点之间的距离通过调整样品位置(Z_{pos})实现.辅助 LIBS 自动对焦方法的关键在于识别不同样品或同一样品不同区域的厚度差异,测量分析位置表面的高度,为样品位置的调节提供依据.

1.2 实验样品与数据采集处理

考虑不同反射率对表面图像锐度的影响,实验选用厚度均匀的发黑铝块、铝块和铜块,分别标记为样品 1、样品 2 和样品 3.三个样品的表面图像如图 3 所示,表面反射率差异较大.另外,为验证分析图像最清晰时表面位置的差异,所选三个样品的厚度均不同,分别为 10.00 mm、8.00 mm 和 8.60 mm;厚度均匀的目的在于便于通过厚度测量验证实验结果.

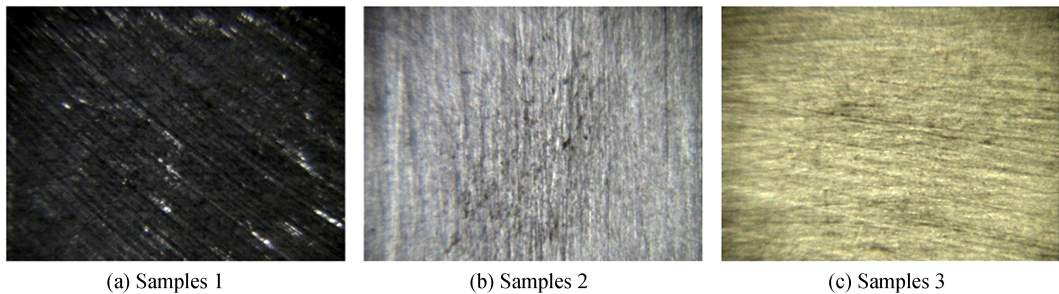


图 3 Surface images of three different samples (size: 11.00 mm×8.25 mm)
Fig.3 三个不同样品的表面图像(尺寸:11.00 mm×8.25 mm)

图像采集通过三维移动平台、LED 环形灯和 CMOS 相机协同工作实现,具体过程由自行编写的程序实现.对于放置好的样品,调整对应的光阑尺寸,首先开启 LED 环形灯,控制三维移动平台以 0.5 mm 为步长调整样品高度位置从 0 mm 至 29 mm,分别抓取并存储对应条件下的表面图像,实现图像采集.

图像锐度与图像的边缘对比度有关,能够反映图像的主观清晰度,且基于边缘检测的图像分析方法也不易受整体光照强度变化的影响.为探究所搭建系统获得图像的锐度变化规律,采用图像边缘检测的方法分析图像锐度.单个图像处理流程如图 4 所示,原始图像经灰度转换、图像裁剪后得到特定尺寸的灰度图,再与二阶微分算子进行相关运算来提取图像边缘特征,最后通过求和得到图像锐度.

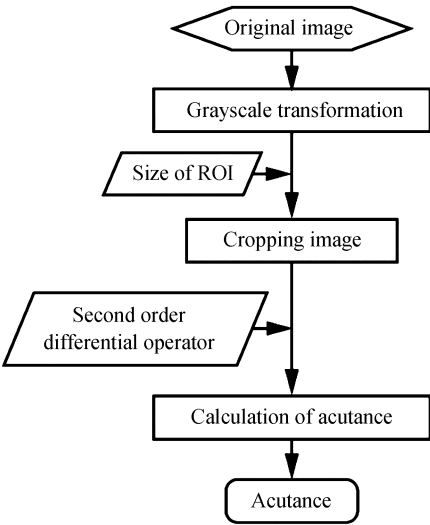


图 4 The flowchart of single image processing
Fig.4 单个图像处理流程

2 结果与讨论

2.1 图像锐度的位置敏感特性

由于成像系统景深的影响,图像锐度具有明显的位置敏感特性,即不同位置图像清晰度差异较大.图 5 显示了样品 3 在 3 个不同样品位置的表面图像,可以直观地看出表面图像的位置敏感特性.为定量衡量图像的锐度变化特征,结合图 4 所示的图像处理方法,计算表面高度位置单次扫描过程中共 59 幅图像的锐度值,绘制锐度相对位置的变化曲线.

图 6 为样品 3 在单次扫描过程中图像锐度随样品高度位置的变化关系.考虑图像采集的位置有限,为提高位置分析的精细度,最终曲线采用三次样条插值进行处理,并将其整体归一化至[0,1]区间.从图中可以看出,图像锐度曲线具有明显的极大值位置.这为 LIBS 对焦提供了参考位置,为解决样品厚度及样品形态的差异引起的 LIBS 对焦问题提供了可能.

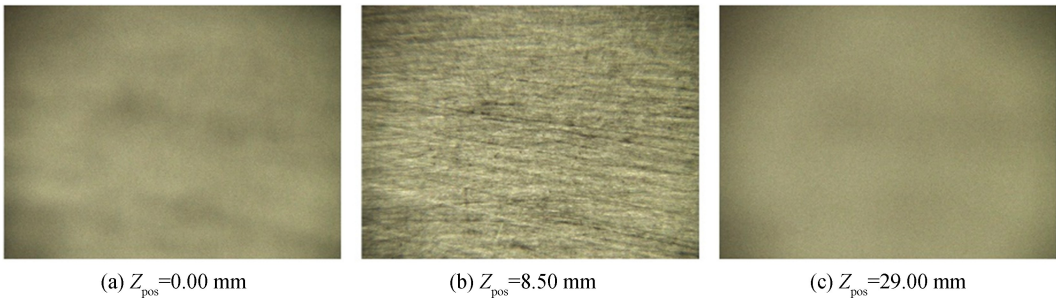


图 5 Surface images of three specific positions of sample 3
Fig.5 样品 3 在 3 个特定位置的表面图像

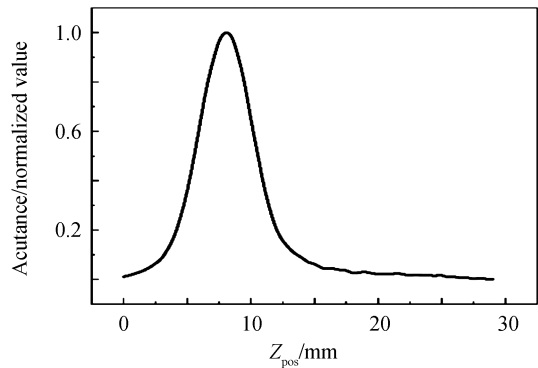


图 6 Position sensitivity of surface image
Fig.6 表面图像的位置敏感特性

2.2 光阑尺寸对位置敏感特性的影响

如图 2,成像光路主要由 Lens1 和 Lens3 组成,两者均为固定焦距的透镜,其中 Lens3 光阑可调节.考虑图像锐度的位置敏感特性主要受景深影响,而光阑影响成像景深,所以进一步分析了不同光阑大小对图像锐度变化特性的影响.

图 7 显示了不同光阑设定下,样品表面图像锐度随样品位置变化的特性,其中横坐标对应不同样品位置,纵坐标对应归一化的表面图像锐度.对于三种不同的光阑设定,图像锐度的位置敏感特性曲线均出现峰值位置,且不同光阑设定下的峰值位置相对一致.另外,对于不同的光阑设定,图像锐度的位置敏感特性略有差异,主要表现为光阑孔径越大图像锐度在峰值位置附近的锐度变化越快.因此在光阑较大的情况下,图像锐度对距离更为敏感,这更有利于辅助 LIBS 自动对焦.

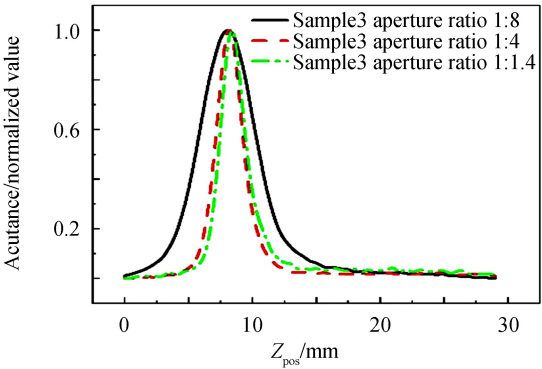


图 7 Effect of aperture on the position sensitivity of surface image
Fig.7 孔径光阑对表面图像位置敏感特性的影响

2.3 目标区域大小对位置敏感特性的影响

在大光阑孔径设定的基础上,进一步研究了选取图像区域(Region of Interest, ROI)大小对图像锐度计算的影响.鉴于 LIBS 分析的焦点位于图像中心位置,分别选取三种不同大小的中心区域用于计算图像锐度以研究区域大小对图像锐度的位置敏感特性的影响.以样品 3 为例,图 8 显示了三种区域选取及其对应的区域大小,其中矩形区域的中心位置与 LIBS 分析的采样点重合.

三种区域选取对应表面图像锐度位置敏感特性曲线如图9所示.结果表明,尽管在区域选取较小时,曲

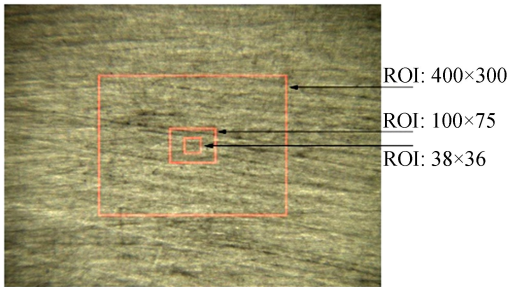


图 8 Selection of ROI of Sample3
Fig.8 样品 3 的目标区域选取

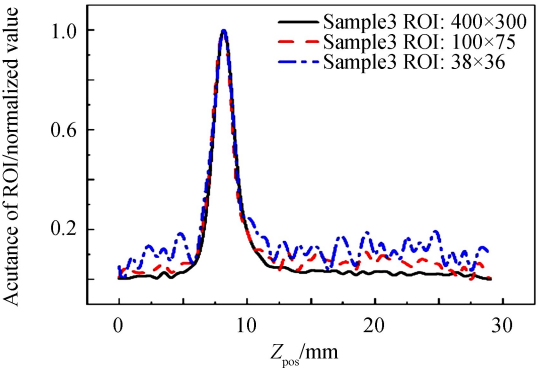


图 9 Effect of ROI of Sample3 on the position sensitivity of surface image
Fig.9 样品 3 目标区域对表面图像位置敏感特性的影响

线波动较大,但三种目标区域选取所得的锐度曲线最大值对应位置较为一致,说明较小目标区域选取也可用于标定锐度最大值位置,用于 LIBS 对焦的参考位置。

ROI 为 38×36 时对应的实际区域大小约为 $0.52\text{ mm}\times0.50\text{ mm}$,这与单个镜片聚焦时烧蚀坑尺寸大小相当.分析可知,采用 38×36 的图像进行锐度计算时,依然能够获得较为稳定的锐度最大位置用于辅助 LIBS 对焦.与单反相机“所见即所得”特点类似,此时用于对焦分析的图像区域即为用于 LIBS 分析的区域,即用于辅助对焦的区域与周围表面信息无关。

2.4 不同反射率样品的位置敏感特性

为进一步分析图像锐度位置敏感特性的可重复性,研究不同反射率样品对表面图像锐度位置敏感特性的影响,对比分析了表面发黑铝合金样品(样品 1)和普通铝合金样品(样品 2)表面图像锐度的位置敏感特性,如图 10.可以看出,样品 1 和样品 2 的表面图像同样显示了很好的位置敏感特性.与图 9 类似,它们的锐度最大值位置同样具有明显的峰值位置,且三种目标区域选取能够得到相近的样品最大值位置.值得指出的是,样品 1 在 ROI 为 38×36 时,曲线波动较大,存在多个峰值,推断其主要是由表面反射率较低导致图像噪声较大引起的。

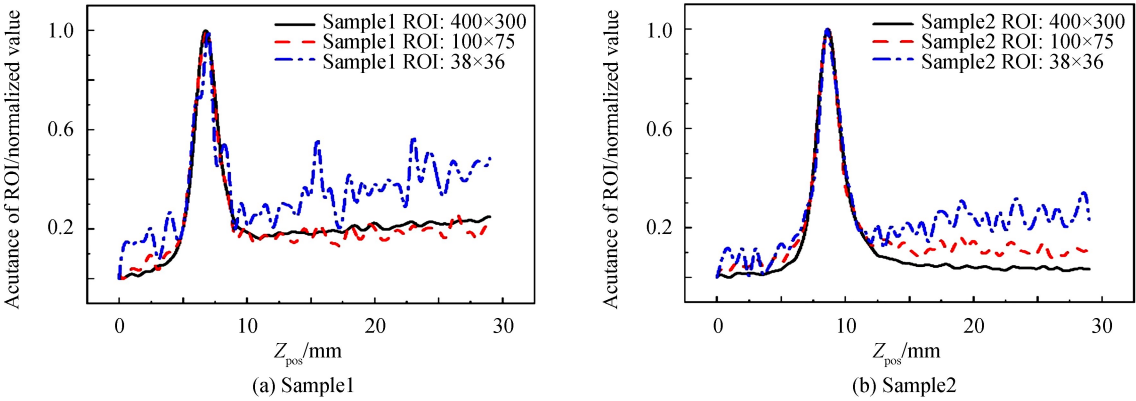


图 10 Effect of ROI on the position sensitivity of surface image
Fig.10 目标区域对表面图像锐度随样品位置变化特性的影响

另外,比较三个样品位置最大值对应的位置发现,它们对应的 Z_{pos} 均不同,这主要是由样品厚度不同引起的.结合图 2 局部放大图所示的位置关系,考虑样品自身厚度,整理了锐度最大值对应的样品表面位置,见表 1.同时计算了同一样品不同目标区域选择下,锐度最大值对应表面位置(Surface position)的均值、标准差(Standard Deviation, STD)和相对标准差(Relative Standard Deviation, RSTD);以及不同样品在同一目标区域选择下,样品锐度最大值对应表面位置的均值、标准差和相对标准差。

表 1 锐度峰值对应表面位置统计
Table 1 Summary of surface positions of different acutance peaks

	Surfaceposition/mm			Mean	STD	RSTD
	400×300 pixels	100×75 pixels	38×36 pixels			
Sample1	16.76	16.85	16.95	16.85	0.08	0.46%
Sample2	16.63	16.61	16.57	16.60	0.02	0.15%
Sample3	16.77	16.73	16.75	16.75	0.02	0.10%
Mean	16.72	16.73	16.76	/	/	/
STD	0.06	0.10	0.16	/	/	/
RSTD	0.38%	0.59%	0.93%	/	/	/

从表 1 中可以看出,对于同一样品,选取不同目标区域进行锐度计算时,三种样品锐度最大值对应表面位置的标准差分别为 0.08 mm 、 0.02 mm 和 0.02 mm ,均远小于 1 mm .同样地,对于不同样品,同一目标区域选择进行锐度计算时,三种目标区域锐度最大值对应表面位置标准差分别为 0.06 mm 、 0.10 mm 和 0.16 mm ,也都远小于 1 mm .这说明较低反射率(样品 1)和较低的 ROI(38×36)会导致锐度最大值对应表面位置的计算精度降低,但锐度最大值对应表面位置相对一致,为基于图像锐度的自动对焦方法提供了依据。

2.5 表面图像锐度辅助 LIBS 对焦方法

基于所搭建的集成微区成像的 LIBS 系统,分析了表面图像的位置敏感特性,验证了基于表面图像锐度对焦的可行性.在此基础上,建立了基于表面图像锐度的自动对焦方法,包括校准过程和对焦过程.

校准过程主要是针对特定类型的待测样品,分析它进行 LIBS 分析的最佳表面位置和图像锐度最大位置,并计算两者之间的偏置,供后续同类型样品对焦使用.其基本流程如图 11 所示,首先扫描不同位置的表面图像,而后扫描不同位置 LIBS 光谱,在此基础上计算图像锐度最大位置和 LIBS 光谱最佳位置,进而计算两者之间的偏置.需要说明的是图像扫描应在 LIBS 光谱扫描之前,因为 LIBS 分析会在表面形成烧蚀坑,影响图像分析.

在完成校准过程获得 LIBS 光谱最佳分析位置与图像锐度最大位置之间的偏置之后,即可对其他同类型样品进行对焦,其过程如图 12 所示.在进行 LIBS 分析之前,首先对样品进行图像扫描,而后计算表面图像锐度最大位置,根据校准过程中图像锐度最大位置和 LIBS 光谱最佳位置的偏置计算进行 LIBS 光谱采集的最佳位置,而后通过设定样品位置,调整位移平台完成对焦.

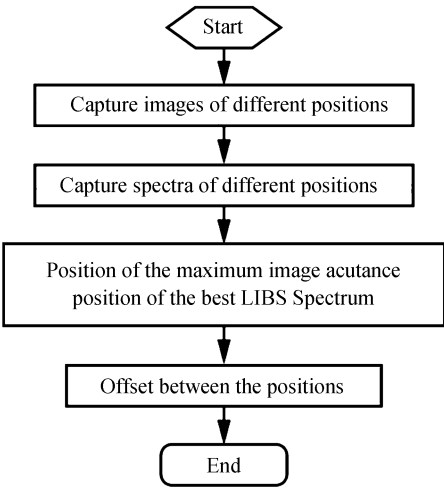


图 11 Calibration process of the autofocus method
Fig.11 自动对焦方法校准过程

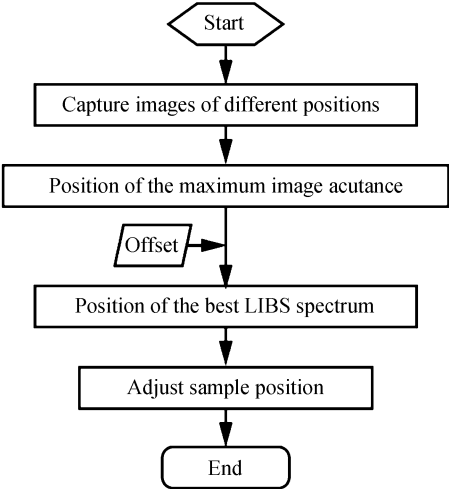


图 12 Autofocus process
Fig.12 自动对焦过程

基于表面图像锐度的自动对焦通过编写硬件控制程序和数据处理程序控制各个元器件协同工作来实现.另外,由于不同类型实验样品 LIBS 最佳对焦位置的略有差异,在实际实验中需要选择同类样品中的一部分进行校准分析来确定图像锐度最大位置和 LIBS 光谱最佳位置的偏置.

3 结论

在所搭建集成微区成像 LIBS 系统的基础上,分析了样品表面图像的位置敏感特性.结果表明,微区图像具有明显的位置敏感特性;且光阑孔径越大,表面图像锐度对距离越敏感,更适用于 LIBS 对焦;另外,不同目标区域选取均能获得图像锐度最大位置;对于表面反射率较小的样品,在目标区域选取较小时,图像噪声较大,但其表面图像锐度最大位置仍具有很好的一致性.因此,基于表面图像锐度的 LIBS 对焦方法可以只采用 LIBS 分析区域的图像,不受周围表面信息影响.最后,在完成表面图像锐度位置敏感特性分析的基础上,建立了基于表面图像锐度的 LIBS 对焦方法,为 LIBS 自动对焦提供了一种可行方案.

参考文献

[1] MAURICE S, WIENS R C, SACCOCCIO M, *et al.* The ChemCam instrument suite on the mars science laboratory (MSL) rover: science objectives and mast unit description[J]. *Space Science Reviews*, 2012, **170**(1-4): 95-166.
[2] WIENS R C, MAURICE S, BARRACLOUGH B, *et al.* The ChemCam instrument suite on the mars science laboratory (MSL) rover: body unit and combined system tests[J]. *Space Science Reviews*, 2012, **170**(1-4): 167-227.
[3] GUO J, LU Y, CHENG K, *et al.* Development of a compact underwater laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) system and preliminary results in sea trials[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(29): 8196-8200.
[4] THORNTON B, TAKAHASHI T, SATO T, *et al.* Development of a deep-sea laser-induced breakdown spectrometer for in situ multi-element chemical analysis[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, **95**:

20-36.

- [5] GAUDIUSO R, MELIKECHI N, ABDEL-SALAM Z A, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy for human and animal health: a review[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2018, **152**: 123-148.
- [6] ZENG Q, PAN C, LI C, *et al.* Online monitoring of corrosion behavior in molten metal using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2018, **142**: 68-73.
- [7] HAI R, FARID N, ZHAO D, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopic characterization of impurity deposition on the first wall of a magnetic confined fusion device: experimental advanced superconducting Tokamak[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2013, **87**: 147-152.
- [8] ZHANG Da-cheng, FENG Zhong-qi, LI Xiao-gang, *et al.* Quantitative analysis of aluminium alloy with remote laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0847010.
张大成, 冯中琦, 李小刚, 等. 远程激光诱导击穿光谱定量分析铝合金中的微量元素[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0847010.
- [9] DONG Mei-rong, LONG Jia-jian, CHEN Si-ru, *et al.* Laser-induced molecular spectroscopy for carbon with different element speciation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0847001.
董美蓉, 龙嘉健, 陈思如, 等. 激光诱导分子光谱应用于碳元素形态分析[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0847001.
- [10] FENG Jia-chen, XU De-gang, WANG Yu-ye, *et al.* Compact low-energy high-repetition rate laser-induced breakdown spectroscopy for lead element detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(1): 0114002.
冯佳琛, 徐德刚, 王与焯, 等. 一种小型化的低能量、高重频激光诱导击穿光谱系统用于铅元素分析[J]. 光子学报, 2018, **47**(1): 0114002.
- [11] WANG Jing-ge, CHEN Xing-long, FU Hong-bo, *et al.* Influence of the lens-to-sample distance on laser induced plasma [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(9): 326-333.
王静鸽, 陈兴龙, 付洪波, 等. 透镜到样品的距离对激光诱导等离子体的影响[J]. 光学学报, 2014, **34**(9): 326-333.
- [12] HAN Zhen-yu, PAN Cong-yuan, AN Ning, *et al.* The auto-focusing remote laser-induced breakdown spectroscopy system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(2): 304-308.
韩振宇, 潘从元, 安宁, 等. 自动聚焦激光诱导击穿光谱远程测量系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(2): 304-308.
- [13] ASHRAFKHANI B, BAHREINI M, TAVASSOLI S H. Repeatability improvement of laser-induced breakdown spectroscopy using an auto-focus system[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2015, **118**(5): 841-846.
- [14] CORTEZ J, FARIAS FILHO B B, FONTES L M, *et al.* A simple device for lens-to-sample distance adjustment in laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, **71**(4): 634-639.
- [15] MOTTO-ROS V, NEGRE E, PELASCINI F, *et al.* Precise alignment of the collection fiber assisted by real-time plasma imaging in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2014, **92**: 60-69.
- [16] NOVOTNY J, MALINA R, KAISER J, *et al.* Implementation of an autofocus algorithm based on searching the best in-focus image into a table-top laser-induced breakdown spectroscopy setup[J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(10): 103604.
- [17] PERET L, GASNAULT O, DINGLER R, *et al.* Restoration of the autofocus capability of the ChemCam instrument onboard the Curiosity rover[C]. 14th International Conference on Space Operations, 2016: 2539.