

文章编号: 1003-501X(2012)06-0080-05

自动聚焦在激光诱导击穿光谱检测中的应用

郑 毅, 周卫东, 李科学, 钱惠国, 李霞芬, 秦雪飞

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要: 本文将自动聚焦方法应用于激光诱导击穿光谱(LIBS)检测技术中, 利用自动聚焦方法控制激光在样品表面的聚焦位置和焦斑大小, 以克服激光诱导击穿光谱系统检测样品时光谱强度的起伏变化较大的缺点, 提高 LIBS 系统重复测量的精密度。并采用灰度差分法评价函数和改进后的爬山法成功实现了激光诱导击穿光谱技术检测中焦点位置的自动搜寻和调节, 为 LIBS 检测仪开发了一套自动聚焦系统和相应的软硬件, 较好地减小了 LIBS 光谱强度多次重复测量的相对标准偏差。

关键词: LIBS 检测技术; 自动聚焦; 信号稳定性

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2012.06.014

The Application of Auto-focusing System in the LIBS Techniques

ZHENG Yi, ZHOU Wei-dong, LI Ke-xue,
QIAN Hui-guo, LI Xia-fen, QIN Xue-fei

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang Province, China)

Abstract: In order to overcome the shortage of the large variation of spectrum intensity in Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and to improve the measurement accuracy in term of the relative standard deviation of the line intensity from repeating measured spectrum, an auto-focusing system is integrated into the LIBS technique and used to control the size and position of the laser focus on the sample surface. Based on the gray level difference analysis method and a modified hill-climbing algorithm, an auto-focusing system, including hardware and software, is developed and used to automatically locate the laser focus point and then adjust the sample positions in LIBS measurements. The RSD of the repeating measurements is then improved.

Key words: LIBS detection technique; auto-focusing; signal stability

0 引 言

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术用高能脉冲激光聚焦后轰击样品的表面, 当激光能量大于等离子体产生阈值时, 样品表面产生等离子体雾气, 然后利用光谱仪对等离子体中的原子和离子的发射光谱进行采集并且对元素的成份以及含量进行分析。由于 LIBS 技术的检测精度高, 对样品表面的损害小, 多元素同时检测等优势, 使得以 LIBS 为基础的检测仪的应用领域越来越多, 可广泛用于固体、液体、气体元素成份的实时测量, 具有广阔的应用前景^[1-3]。但一般 LIBS 检测对样品的表面要求高, 需要平整表面才能保证信号的稳定性, 需要对样品表面进行处理, 或不断手动调节, 费时费力。本文基于 LIBS 检测仪的实际需求, 采用自动聚焦的方法解决样品表面凹凸不平带来的光谱信号不稳定的问题, 并成功开发了一套用于 LIBS

收稿日期: 2011-10-31; 收到修改稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178034); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1100268); 浙江省高校重大科技攻关项目(ZD2009006);

浙江师范大学科技创新团队资助项目

作者简介: 郑毅(1986-), 男(汉族), 浙江湖州人。硕士, 主要从事激光光谱检测仪器研究。

通信作者: 周卫东(1966-), 男(汉族), 安徽安庆人。博士、教授, 主要从事激光光谱与激光技术研究。E-mail: wdzhou@zjnu.cn。

检测仪的自动聚焦系统, 较好地提高了光谱信号的稳定性。

1 自动聚焦系统结构

该自动聚焦系统是由工业 CCD 摄像机, 三轴电机驱动器, 三轴电机控制器, 聚焦微调架以及基于 LabVIEW 的控制软件组成, 如图 1 所示。

样品台是由三个电移台组成, 分别负责控制其在 X, Y, Z 三轴的移动, 样品台在三轴上移动的分辨力都为 $0.625 \mu\text{m}$, 其中 Z 轴电移台负责控制样品台的上下移动, 并配合控制软件完成自动聚焦功能, 而 X, Y 轴电移台的移动则在水平方向移送检测样品, 进行不同采样点的光谱采集。三轴电机控制器是基于 AT89S52 单片机自行开发的, 软件通过串口控制其产生控制信号给三轴电机驱动器来驱动 X, Y, Z 三轴电移台的步进电机运转, 该电机控制器还具有产生激光器外触发信号的功能, 实现激光与自动聚焦系统的时序控制。CCD 摄像头置于样品台左上方 30° 处, 用于拍摄自动聚焦所需的图像。在 LIBS 仪器的顶部配备了一个用于聚焦脉冲激光的聚焦透镜。

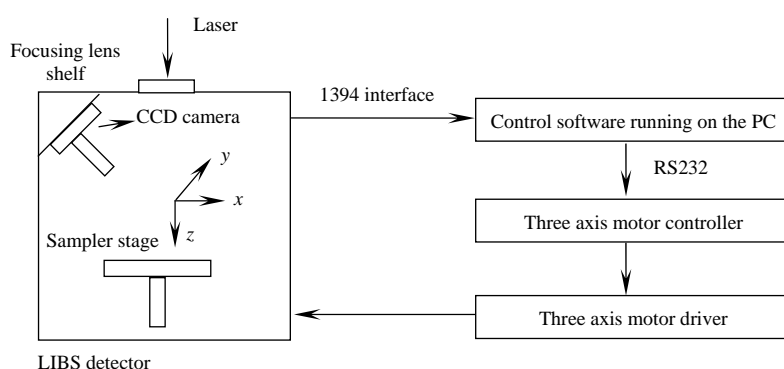


图 1 自动聚焦系统结构图

Fig.1 Autofocus system structure

2 自动聚焦系统实现原理

自动聚焦系统的工作原理是通过图像传感器采集图像, 利用图像清晰度评价函数判断图像清晰度, 将结果反馈给电机控制系统的同时配合搜索算法以达到自动聚焦的目的^[4]。通过工作原理可知, 要完成一个自动聚焦系统的设计, 必须具备两个条件: 图像清晰度的评价函数选取以及自动聚焦搜索算法。

判断图像清晰度的评价函数有很多种, 主要理论依据是分析空域与频域两方面的图像信息, 在选用清晰度评价函数时, 除了考虑其无偏性、单峰性、灵敏度和信噪比等基本特性, 还要考虑检测仪在检测时自动聚焦的速度以及抗干扰性等方面的要求^[5]。在比较了各种评价函数之后, 决定采用灰度差分法。这是一种形式简单但非常有效的聚焦评价函数, 对图像平均灰度变化具有恒不变性, 抗亮度变化以及抗噪声的能力强, 同时由于其所要求的计算量相对较小, 计算速度快, 是目前聚焦系统上普遍采用的一种方法。灰度差分法评价函数的表达式^[6]如式(1)所示。

$$F(i) = \sum_{(x,y)} (|f_i(x, y) - f_i(x, y-1)| + |f_i(x, y) - f_i(x-1, y)|) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: $f_i(x, y)$ 表示图像中像素点坐标为 (x, y) 点的灰度值; $F(i)$ 为评价函数值, 当图像满足聚焦时, $F(i)$ 取最大值。

本文通过多组实验验证了灰度差分法的实用性。图 2 中是一组从焦点位置开始、以及每次向上移动 5 mm 后拍摄获得的 5 幅图像, 其中图 2(a)位于聚焦位置。表 1 列出各位置图像所对应的评价函数值, 可以看出聚焦较离焦图像的评价函数值差别明显。

LIBS 检测仪采用的自动聚焦搜索算法是改进后的爬山法, 该方法解决了传统爬山法会陷入局部最优的问题^[5]。该搜索算法的流程图如图 3 所示, 首先以一个较大的步长走遍全程, 电机每走一步, 计算当前的

聚焦评价函数值, 并且记录该值以及此时样品台所在位置, 当走完全程后比较得出评价函数值的最大值, 并根据记录的样品台位置使其回到最大值位置的前一站。然后以此为出发点, 以聚焦评价函数最大值位置的后一站为终点, 减小样品台运行的步长, 第二次走遍全程, 同样记录下这一全程中聚焦评价函数的最大值及其电机位置。如此反复进行, 直到步长小于设定的阈值, 结束搜索。最后使样品台停止在聚焦评价函数最大值处, 完成自动聚焦。

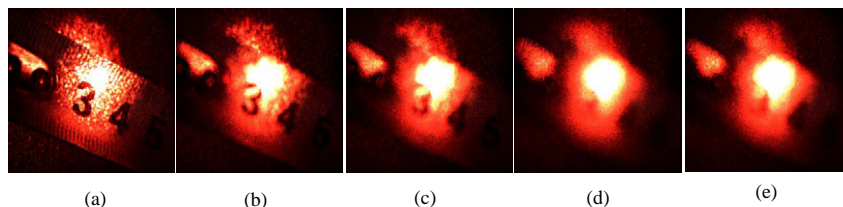


图 2 每隔 5 mm 拍摄的 5 幅图像

Fig.2 Images at every 5 mm

表 1 图像清晰度评价函数值

Table 1 Image clarity evaluation function value

Number	Fig.2(a)	Fig.2(b)	Fig.2(c)	Fig.2(d)	Fig.2(e)
Function value	364 808	202 098	187 846	180 972	182 905

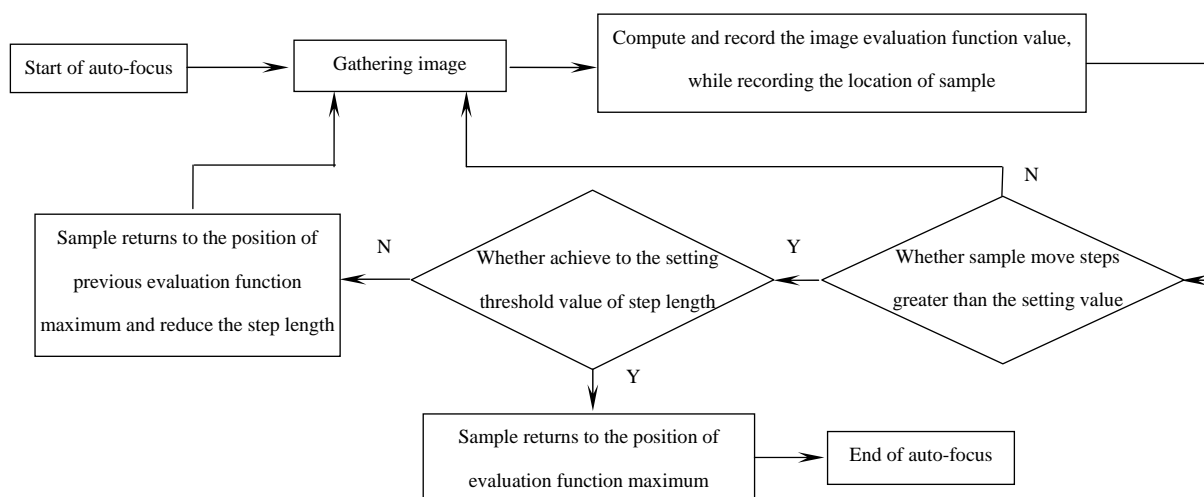


图 3 搜索算法的流程图

Fig.3 Search algorithm flow chart

3 自动聚焦系统工作流程

在使用 LIBS 检测仪检测前, 可以利用自动聚焦系统的自校正功能检查激光聚焦于样品表面的焦点位置与 CCD 摄像机成像清晰点的位置是否重合, 并加以调节。自校正功能的工作流程是: 首先调节样品台, 使其位于 CCD 摄像头的焦平面上, 并成最清晰像(样品台调节精度为 $10\ \mu\text{m}$), 然后通过检测仪上方的聚焦透镜微调架将激光聚焦于样品台表面。系统在完成自校正后, 将需要检测的样品放入样品台, LIBS 检测仪便可以工作, 进行光谱信号的采集。每当样品台沿 X , Y 轴移动一个位置时, 系统都会针对样品表面的不平整重新调节样品台上下的位置, 使激光始终聚焦于样品表面, 同时外触发激光器与光谱仪同时工作, 完成样品表面多点光谱的采集, 图 4 是系统工作流程图。自动聚焦的范围根据样品表面的凹凸不平的程度自行设置。

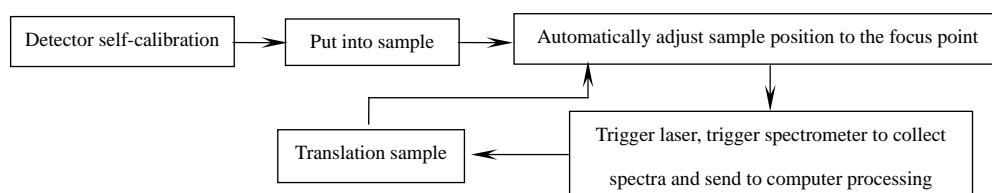


图 4 系统工作流程图

Fig.4 System work flow chart

4 自动聚焦方法提高 LIBS 信号稳定性

在利用 LIBS 检测样品时, 如果样品表面凹凸不平就会导致采样点激光焦斑大小和功率密度的变化, 从而严重影响激光等离子体发射光谱谱线强度的稳定性, 因此需要对样品表面进行处理, 限制了 LIBS 技术快速、现场检测优势的发挥。采用自动聚焦的方法能够根据样品表面高低起伏的不同, 自动调节样品的位置, 使激光采样点始终在聚焦透镜的焦点上, 从而能很好的保持光谱信号的稳定性。表 2 是一组利用自动聚焦方法与不使用自动聚焦方法采集到的土壤光谱信号的相对标准偏差的比较。实验采用波长 1 064 nm 的调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光, 激光能量是 46 mJ, 检测的样品是表面不平整的土壤(图 5), 石英光纤探头距靶点约 5 mm, 与待测样品的夹角为 45°。

表 2 标准偏差对比

Table 2 RSD comparison

	Fe II	Fe I	Si I	Fe II	Fe II	Pb I	As I	Si I	Al I
Wavelength/nm	238.20	248.33	251.61	259.94	261.19	283.31	286.04	288.16	308.22
No auto-foucs RSD	0.22	0.22	0.23	0.22	0.23	0.21	0.21	0.23	0.22
Atuo-foucs RSD	0.13	0.15	0.1	0.13	0.14	0.16	0.16	0.14	0.15

谱线的相对标准偏差(RSD)可以用来评价光谱信号的稳定性, RSD 越低则说明检测到的光谱信号越稳定, 检测精密度越高。从表 2 可以看出, 在不使用自动聚焦的时候, 由于土壤样品表面高低起伏使得光谱信号的 RSD 在 21%~23% 之间, 使用自动聚焦方法后, 土壤光谱信号的 RSD 会大大的降低, 在 10%~16% 之间, 这说明了自动聚焦方法可以解决样品表面不均造成的谱线 RSD 过高的问题, 提高 LIBS 检测的精密度。

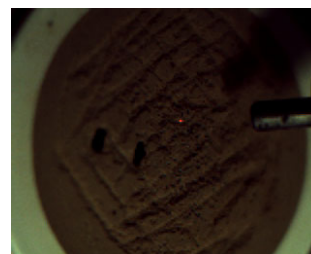


图 5 表面不平整的土壤样品

Fig.5 Uneven surface soil samples

5 结 论

采用 LIBS 检测土壤等固体样品, 光谱信号的稳定性目前已经成为制约其发展和实际应用的瓶颈, 其原因就是由于样品表面凹凸不平, 使得每次激光轰击样品时, 激光在样品表面的聚焦位置和焦斑大小难以精确重复, 样品烧蚀程度不一致, 导致激光等离子体光谱信号有较大的起伏, 使检测信号的相对标准偏差增大, 引起较大的测量误差; 虽然可以通过表面处理方法使表面趋于平整, 减小这种偏差, 但耗时费力, 不利于充分发挥 LIBS 技术的快速、在线检测的优势。

本文将自动聚焦方法应用于 LIBS 光谱检测技术中, 尝试利用自动聚焦的方法控制激光在样品表面的聚焦位置和焦斑大小, 以提高系统信号稳定性, 并采用灰度差分法评价函数和改进后的爬山法成功实现了 LIBS 检测中焦点位置的自动搜寻和调节, 并为 LIBS 检测仪开发了一套自动聚焦系统和相应的软硬件。本文的初步研究结果表明, 采用自动聚焦方法能够减小了样品表面不均导致的光谱信号的起伏, 对改善 LIBS

技术检测表面粗糙样品时信号起伏有一定的效果,从而为提高检测的可重复性和减小误差提供了一个可能的途径。尽管这里初步的实验结果的标准偏差仍较大,通过后续努力,比如说采用精度更高的三维移动平台,以及更合适的聚焦透镜等,应该会取得更好的结果,从而推动 LIBS 技术的实际应用。

参考文献:

- [1] Winefordner J D ,Gornushkin I B ,Correll T ,*et al.* Comparing several atomic spectrometric methods to the super stars :special emphasis on laser induced breakdown spectrometry ,LIBS ,a future super star [J]. **J. Anal. At. Spectrom**(S0267-9477) ,2004 , **19**(9) : 1061-1083.
- [2] DeLucia F C , Samuels A C , Harmon R S , *et al.* Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) : A Promising Versatile Chemical Sensor Technology for Hazardous Material Detection [J]. **IEEE Sensors Journal**(S1530-437X) , 2005 , **5**(4) : 681-689.
- [3] Gaudioso R , Dell'Aglia M , Pascale O D , *et al.* Laser Induced Breakdown Spectroscopy for Elemental Analysis in Environmental ,Cultural Heritage and Space Applications :A Review of Methods and Results [J]. **Sensors**(S1424-8220) ,2010 , **10**(8) : 7434-7468.
- [4] 任四刚, 谢利利. 自动聚焦在图像测量中的应用 [J]. 重庆邮电学院学报, 2002 , **14**(3) : 70-72.
REN Si-gang , XIE Li-li. Application of Autofocus in the Measurement of Image [J]. **Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications** , 2002 , **14**(3) : 70-72.
- [5] 朱孔凤, 姜威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数 [J]. 红外与激光工程, 2005 , **34**(4) : 464-468.
ZHU Kong-feng , JIANG Wei , WANG Duan-fang , *et al.* New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. **Infrared and Laser Engineering** , 2005 , **34**(4) : 464-486.
- [6] 王立强, 林斌, 徐向东, 等. 基于 USB Video Camera 的自动对焦系统 [J]. 光电工程, 2001 , **28**(5) : 32-34.
WANG Li-qiang , LIN Bin , XU Xiang-dong , *et al.* An Automatic Focusing System Based on USB Video Camera [J]. **Opto-Electronic Engineering** , 2001 , **28**(5) : 32-34.