

文章编号:1001-4888(2017)04-0445-07

基于高速图像分析的激光器光束稳定性 及光斑质量评价方法研究^{*}

苏晋¹, 路大举², 马沁巍³, 裴鹏昊¹, 马少鹏³, 郭翔¹, 索涛¹

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西西安 710072; 2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900;

3. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要: 机载激光器的光束稳定性及光斑质量是关系到该武器系统毁伤效率的关键性因素。本文基于棱镜分光及数字图像处理技术, 发展了能够在实验室实验中同时获取激光光斑位置和光强分布信息且不会对系统自身工作产生影响的方法及系统, 实现了对激光光束稳定性及光斑质量的评价。该方法利用数字相机采集光斑图像, 并根据像素灰度值计算光斑位置和光强分布。标定实验结果表明, 该方法对光斑位置的测量误差可控制在 1% 以内, 对光斑质量也可以实现很好的评价。

关键词: 机载激光器; 光束稳定性; 激光光斑质量评价

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-047

0 引言

自 1960 年激光发明以来, 由于激光的方向性、瞬时性和能量集中的特点, 被广泛应用于军事领域。例如, 美国的机载激光器 (Airborne Laser, 简称 ABL) 通过发射具有极高能量的连续激光束来摧毁弹道导弹^[1]; 激光制导武器的制导系统瞄准目标并发射连续激光, 引导导弹或炸弹紧紧咬住目标不放, 直到命中。值得注意的是, 这类系统工作时都需要首先将光束精确指向目标^[2]。然而, 在实际应用中, 激光发射装置一般都需要安装在运动平台上。平台在运动过程中的颠簸或动力装置引起的结构振动直接施加在激光发射装置上, 引起微振动与微转动, 往往导致激光光束的抖动, 使其难以保持指向稳定^[3]。考虑到平台运动及其激光发射装置结构的复杂性, 上述振动与转动往往是难以预测的。为了解决这一问题, 科研工作者和工程技术人员将反馈控制技术引入到了激光发射装置的指向系统中, 利用可控高速反射镜及位置探测器来对激光光束的偏折进行实时的补偿校正, 并通过实验室实验来验证原理与技术的可行性^[4]。

典型的室内实验布置如图 1 所示。激光器发射激光光束将首先投射至一个可控角度的二维高速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM), 经过反射后投射至一个平面反射镜, 再经过一次反射后投射至位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD)^[5]。在实验中, 反射镜会由于外激励的作用发生微振动, 从而引起光束的偏折, 导致其投射到 PSD 靶面上的光斑发生偏移。PSD 会实时地探测光斑位置偏移量, 利用此偏移量配合激光投射距离计算得到光束的转角, 之后将其输入至 FSM, FSM 进行相应的反向转动来对光束的偏转进行补偿。

^{*} 收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(11522220)资助

通讯作者: 索涛(1979-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 飞行器结构及材料的动力学行为。Email: suotao@nwpu.edu.cn

这类实验系统中,最为关键的问题就是需要同时对激光光斑的位置信息和光强分布信息进行测量,从而实现光束稳定性和光斑质量的定量化评估。目前,对上述信息进行测量存在以下两点困难:首先,对于光斑位置和质量信息的观测不能够影响 PSD 对于光斑位置的检测,否则将会引起 FSM 的转动误差,影响对光束的稳定控制;更为重要的是,测量中需要同时获取激光光斑位置和光强分布信息。对于 PSD 而言,只能用于测量光斑中心位置,而不能获得整个光束界面的光强分布信息,同时由于受传感器阵列的限制,测量范围有限,其测量结果受环境温度、入射光强等影响较大。为此,可以将激光光束打在光屏上形成光斑,利用 CCD 相机等图像采集设备和图像处理技术实现光斑中心位置的高精度检测^[6]。

本文基于棱镜分光技术将待测激光光束一分为二,一束用于 PSD 探测及控制 FSM 进行转动补偿,一束用于测量光斑的位置和光强分布信息,实现了在不干扰现有系统条件下的独立观测;利用“灰度重心”法对光斑图像进行分析获得光斑的位置信息,通过灰度统计方法对光斑图像进行分析获得光斑的光强分布信息,可以较好地解决上述两个问题。通过标准实验对测量方法的精度进行了标定,结果也证明了实验方法的有效性。

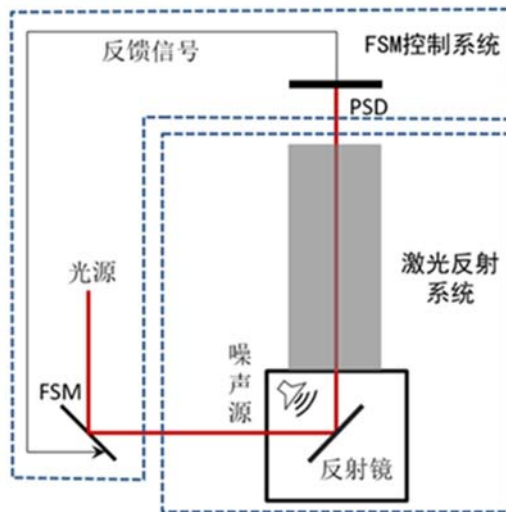


图 1 激光光束抖动控制实验示意图

Fig. 1 Diagram of laser beam jitter control experiment

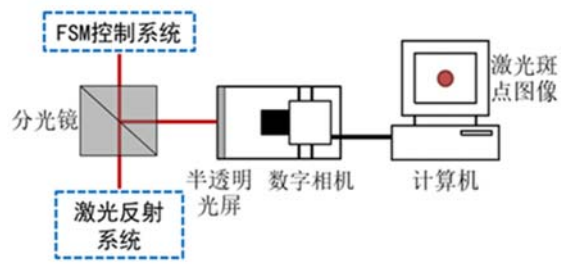


图 2 激光光斑位置及光强分布测量方法示意图

Fig. 2 Diagram of a method to obtain position and intensity distribution of laser spot

1 激光光斑位置及光强分布测量原理

将激光光束投射至分光镜分成两束,一束用于 PSD 探测,另外一束投射至一个固定的半透明光屏上。使用数字相机在光屏的另外一侧拍摄光斑,形成一幅激光光斑图像。控制相机连续采集图像,则可以得到一个记录光斑位置的图像序列,如图 2 所示。

1.1 光斑位置测量

对于单张光斑图像来说,其位置可以使用“灰度重心”法进行计算^[7]。灰度重心法是将数字图像像素的灰度看作是数字图像的“密度”,认为图像中一个斑点的中心位于其“重心”。对于一个平面二维物体,设其占有 xoy 面上的闭区域 D ,在点 (x, y) 处的面密度为 $\rho(x, y)$,其重心坐标为:

$$x_c = \frac{\iint_D x \cdot \rho(x, y) dx dy}{\iint_D \rho(x, y) dx dy}, \quad y_c = \frac{\iint_D y \cdot \rho(x, y) dx dy}{\iint_D \rho(x, y) dx dy} \quad (1)$$

相应地,对于一幅大小为 $M \times N$ 的灰度图像区域,设其每个像素的灰度值为 $I(i, j)$ ($0 < i < m, 0 < j < n$),可以定义标记点的灰度重心坐标为:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} i \cdot I(i, j)}{\sum_{i=1}^{M \times N} I(i, j)}, y = \frac{\sum_{j=1}^{M \times N} j \cdot I(i, j)}{\sum_{j=1}^{M \times N} I(i, j)} \quad (2)$$

式中, M, N, i, j 均为整数。对于一张光斑图像, 使用“灰度重心”法计算得到的坐标可以作为表征该光斑位置的参量, 对整个图像序列中的图像进行处理, 即可计算得到光斑位移。

1.2 光斑光强分布测量

从 ABL 设计的角度上讲, 应该使出射激光光斑的归一化光强 I^G 呈公式 (3) 所示的高斯分布^[8], 但是, 由于反射器件振动及光路中空气折射率等因素的影响, 光斑的实际光强分布往往与理想的分布存在偏差, 导致武器毁伤效率降低。因此建立光斑质量的评价标准是十分必要的。

$$I^G(x, y) = e^{-[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma^2}]} \quad (3)$$

式中, (x_0, y_0) 为光斑的中心; σ 为表征光斑尺寸的特征半径。

评价一个激光光斑质量的标准包括光强的集中程度、光强的连续性和对称性。对于单张光斑图像来说, 可以定义评价光斑光强集中程度的参数

$$\alpha = K\sigma^* \quad (4)$$

式中, K 为图像的物面分辨率。 $\sigma^* = 2\sigma$ 代表光斑在以 (x_0, y_0) 为中心, $\pm\sigma^*$ 范围内的光强之和占光强总和的比例为 95%。 α 值越小, 则占据光强总和 95% 的范围越小, 光强的集中程度越强。

光强的连续性和对称性可以使用一个互相关系数 β 来量化表征。

$$\beta = \frac{\sum \sum | (I - \bar{I}) \cdot (I^G - \bar{I}^G) |}{\sqrt{\sum \sum (I - \bar{I})^2 \cdot \sum \sum (I^G - \bar{I}^G)^2}} \quad (5)$$

式中, I 为原始光强分布; \bar{I} 为原始光强分布的中值; I^G 为对原始光强进行高斯拟合后的光强分布; \bar{I}^G 为对原始光强进行高斯拟合后的光强分布的中值。 β 值越大, 表明原始光斑的光强程度与理论分布的偏差越小, 则光强的连续性和对称性越好。

2 激光光斑位置及光强分布测量的实验验证

本文通过两个标准实验来对方法的精度进行标定。图像采集系统由 XiQ MQ013MG-ON 中速数字相机(帧率 543fps, 分辨率 640×512 pixels)及 Computar 定焦镜头(焦距 8mm)组成。激光光源发射出的激光束投射在一个可精确控制角度的高速摆镜上(一般称之为振镜)为激光光斑施加已知位移, 使用本文发展的方法测量该移动量并与已知位移对比来标定方法的位置识别精度; 使用一个投影器投射已知光强分布的光斑至光屏, 采集图像并使用本文发展的方法求取评价光斑质量的参数, 用已知参数对比来验证方法的有效性。

2.1 光斑位置识别方法的精度验证实验

对光斑位置识别精度进行标定的实验布置示意图如图 4(a) 所示。激光光源发射出的激光束投射在一个振镜上, 光束经过振镜反射后投射在半透明光屏上。在光屏的另外一侧布置中速数字相机来采集图像。实验中, 使振镜的转动角度按照正弦变化, 由此导致的激光光斑位移也会同样呈正弦变化(幅值 50mm, 频率 20Hz), 如图 4(b) 所示。该振镜的阶跃响应时间小于 0.22ms, 控制信号与响应的线性度大于 99.9%, 可以按照控制信号高精度运行。

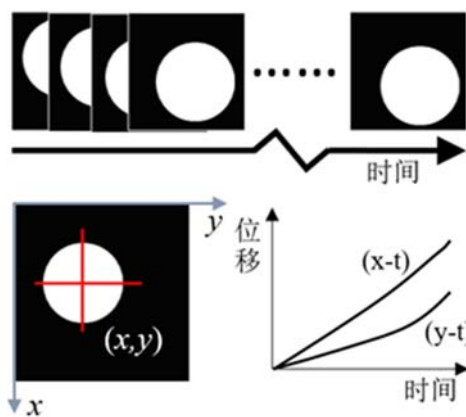
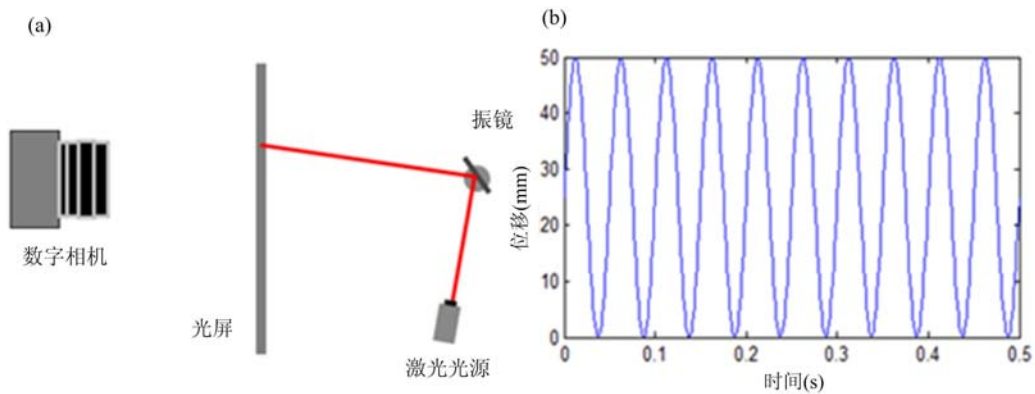


图 3 通过“灰度重心”法测量激光斑点位置及位移原理示意图

Fig. 3 Diagram of the “gray scale centroid” method to obtain position and displacement of laser spot



(a)实验布置示意图;(b)振镜摆动导致的光斑理论位移随时间变化曲线

图4 光斑位置识别精度标定实验

(a)Diagram of experiment; (b)Graph of the theoretical displacement of the spot caused by the tilting of mirror

Fig. 4 Calibration of laserspot position recognition accuracy

使用“灰度重心”法对中速相机采集到的图像进行处理,计算得到每张图像中光斑的位置,并基于此计算光斑的位移。将计算得到的光斑位移与理论位移随时间的变化曲线进行对比,如图5所示。

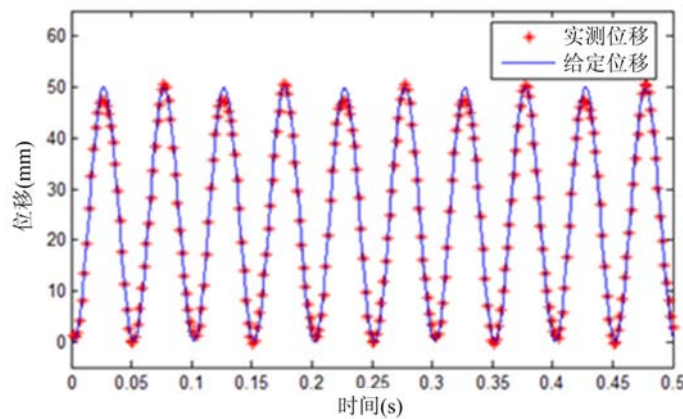


图5 光斑位置识别精度标定实验结果

Fig. 5 The result of calibration for laserspot position recognition accuracy

对测得的光斑位移随时间变化曲线进行正弦拟合,得到曲线的幅值和频率分别为 50.4mm 和 20.01Hz。由此可以计算出位移测量的相对误差为 0.8%,频率测量的相对误差为 0.05%,两个误差均小于 1%,因此可以认为本文发展的方法是有效的。

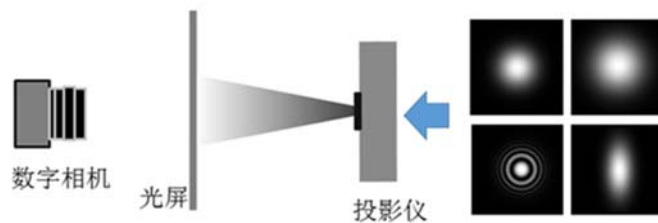


图6 光束质量评价参数的识别精度标定实验示意图

Fig. 6 Diagram of accuracy verification experiment of laser beam quality evaluation parameters

2.2 光斑质量评价方法的有效性验证

对光斑质量评价方法有效性进行验证的实验布置示意图如图6所示。模拟生成图6所示的4幅不同特征的已知灰度分布光斑图像,使用投影仪将光斑图像投射到半透明光屏上,使用数字相机在光屏的另外一侧拍摄光斑图像。

对拍摄到的 4 幅图像的灰度分布进行二维高斯拟合,计算出表征光强集中程度的参数 α 、光强连续性和对称性的参数 β 。将其与模拟生成图像时给出的已知参数进行对比,如表 1 所示。

表 1 实验测量得到的评价光斑质量的参数

Tab. 1 Experimental evaluation parameters of laser beam quality

激光光斑类型	光斑评价参数	实测值
(a)	α	49.884
	β	0.9982
(b)	α	100.637
	β	0.9976
(c)	α	28.324
	β	0.9317
(d)	α	71.01
	β	0.9628

对于如图 7(a)所示的光斑来说,将其灰度重心 (x_0, y_0) 作为中心,在中心周围选择一个边长为 n 个像素的正方形区域作为待分析图像 I 。绘制出的灰度随坐标变化曲面如图 7(a)所示。观察表 1 中的数据可以发现,对于图 7(a)和 7(b)所展示的光斑,表征光强的集中程度的参数 α 的变化与光斑的光强集中程度正相关;对于图 7(c)、(d)与图 7(a)、(b)所示的光斑相比,均不符合式(3)所给出的高斯分布,表征光强连续性和对称性的参数 β 值计算结果都偏小,说明本文方法对评价一个光斑的质量是有效的。

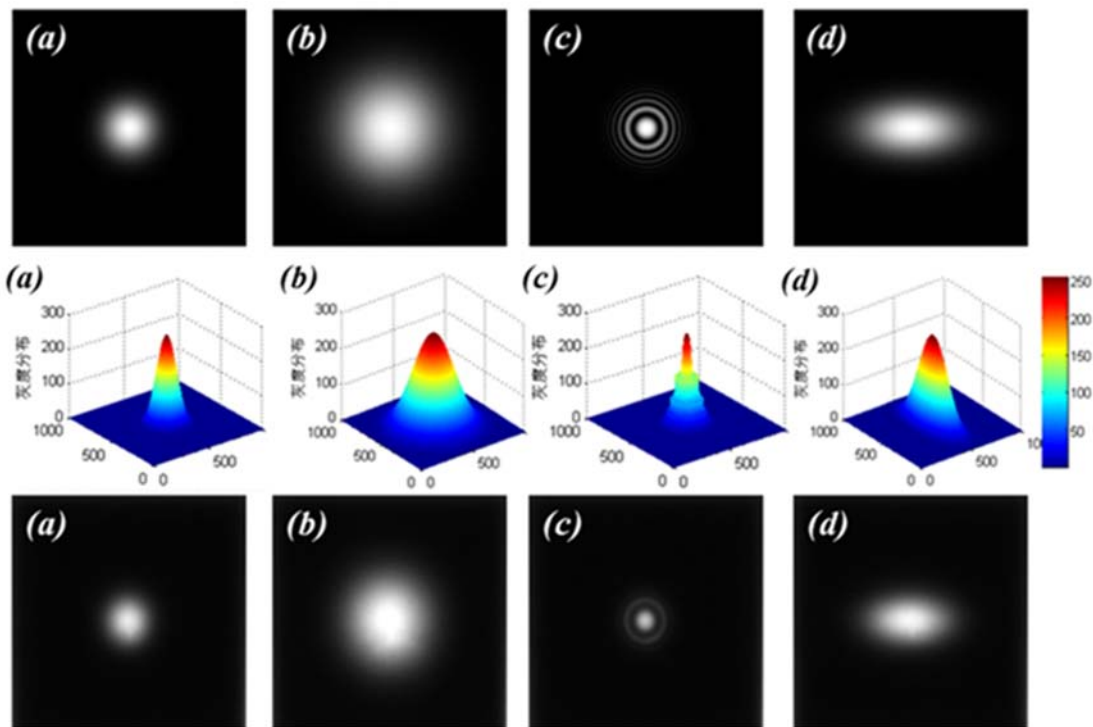


图 7 用于投射的光斑和采集到的光斑图像

Fig. 7 The projected spot and collected spot image

3 方法应用

为了验证本文所提出的测量方法的有效性,设计并实现了一个应用实验来模拟真实实验的场景。具体的实验布置如图 8 所示。将反射镜粘贴到悬臂梁的末端,利用激振器驱动悬臂梁振动来模拟实际

应用中因强噪声引起的反射镜的振动。在反射镜的背面布置加速度传感器来对悬臂梁的振动进行监测,同时使用本文方法测量悬臂梁的振动,对比两种方法测量的结果来对新方法所测结果的正确性进行验证。

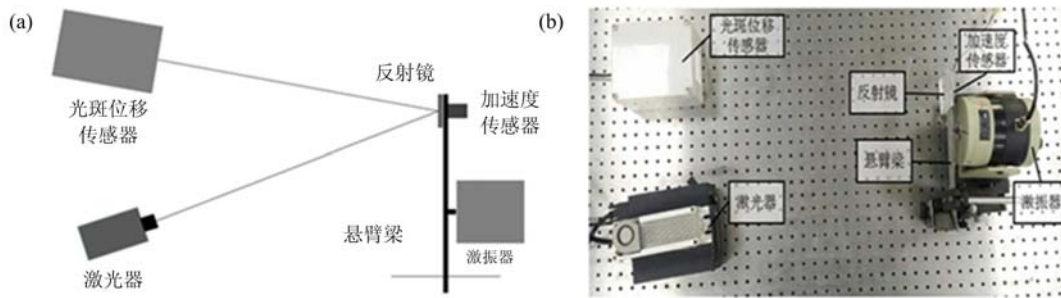


图8 应用实验设计图

Fig. 8 Diagram of experiment used the method

使用两种方法测量得到的光斑位移测量结果如表2所示,其对比曲线如图9所示,观察曲线可以发现二者从频率和振幅上均较为吻合,说明本研究提出的方法对于真实应用是有效的。

表2 两种方法的实验结果

Tab. 2 Experimental result of two methods

结果	加速度传感器	光斑位移传感器
振幅(mm)	21.4	18.6
频率(Hz)	14.658	14.702

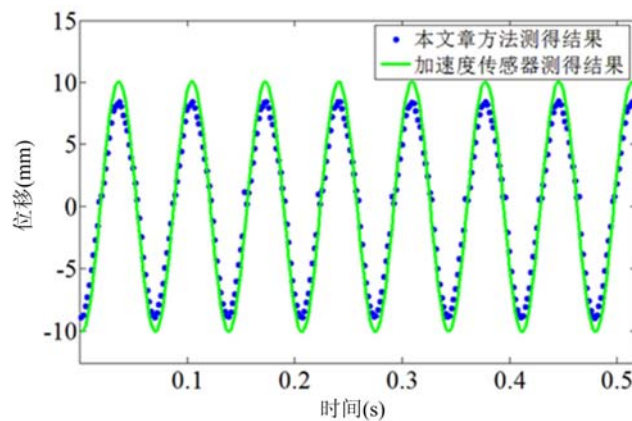


图9 本文提出方法与加速度传感器测量得到结果的对比曲线

Fig. 9 The comparison curve between the method in this paper presented and the acceleration sensor measurement

4 结论

研究发展了一种基于高速图像分析的机载激光器光束稳定性及光斑质量评价方法,实现了相应的测量系统。将“灰度重心”法引入激光光斑图像的位置信息获取中,标定实验结果表明光斑定位误差小于1%;给出了评价一个激光光斑的光强的集中程度、光斑对称性和光强连续性的标准,实验结果表明其对光斑质量的评价较为有效。本文发展的方法可在不干扰现有系统条件下对光束稳定性及光斑质量进行测量,为机载激光器光学控制室内实验提供了一种新的测试手段,其获得的观测结果可为机载激光器光学控制系统设计及标定提供帮助。

参考文献:

- [1] Schulz W G. Building a chemical laser weapon[J]. Chemical & Engineering News, 2004, 82:43-44.
- [2] 郭立东. 舰载激光武器稳定平台控制技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2011 (GUO Lidong. The controller of stabilized platform for shipborne laser weapons[D]. Harbin Engineering University, 2011 (in Chinese))
- [3] 聂光成, 刘敏, 聂宜伟, 等. 机载激光武器跟踪瞄准精度、误差源及控制分析[J]. 电光与控制, 2014, 21(1):73-77 (NIE Guangshu, LIU Min, NIE Yiwei, et al. Accuracy error sources and control of tracking and pointing of airborne laser weapons[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(1):73-77 (in Chinese))
- [4] 聂光成, 刘敏, 魏瑞轩, 等. 模糊自适应PID控制在机载激光武器跟瞄系统中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(2):121-124 (NIE Guangshu, LIU Min, WEI Ruixuan, et al. Application of fuzzy self-adaptive PID controller in the tracking and pointing system of the airborne laser weapon[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2013, 33(2):11-124 (in Chinese))
- [5] 段洁, 孙向阳, 蔡敬海, 等. PSD在激光位移检测系统中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1):549-552 (DUAN Jie, SUN Xiangyang, CAI Jinghai, et al. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1):549-552 (in Chinese))
- [6] 束永生, 伍小平. CCD高精度位置检测的计算机模拟[J]. 实验力学, 1995, 10(1):38-44 (SHU Yongsheng, WU Xiaoping. Computer simulation of high accurate detection based on image sensor CCD[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(1):38-44 (in Chinese))
- [7] Xian W, Qinwei M, Shaopeng M. A Marker locating method based on gray centroid algorithm and its application to displacement and strain measurement[C]. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, IEEE, 2011:932-935.
- [8] 张艳艳, 陈苏婷. 强噪声下激光光斑尺寸的估计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(18):4432-4434 (ZHANG Yanyan, CHEN Suting. Estimation of laser spot size in strong noise[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(18):4432-4434 (in Chinese))

On the Laser Beam Stability and Laser Spot Quality Evaluation Method Based on High-Speed Image Analysis

SU Jin¹, LU Da-ju², MA Qin-wei³, PEI Peng-hao¹, MA Shao-peng³, GUO Xiang¹, SUO Tao¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China; 2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China; 3. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Laser beam stability and laser spot quality of airborne laser are the key factors that affect weapon system damage efficiency. Based on prismatic decomposition and digital image processing technology, a method and a system for simultaneous acquisition of laser spot position and its intensity distribution information in laboratory experiment without affecting the system itself are developed. Thus, the laser beam stability and laser spot quality evaluation are realized. Results of calibration experiment show that spot location measurement error of this system can be controlled within 1%, and laser spot quality can also well evaluated by the system.

Keywords: airborne laser; laser beam stability; laser spot quality evaluation