

文章编号 1004-924X(2016)11-2880-09

## 基于序列图像提高光斑质心定位精度

钱 锋<sup>1,2\*</sup>, 杨名宇<sup>1</sup>, 张晓沛<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 加利福尼亚大学 洛杉矶分校 亨利·萨缪里工程与应用科学学院,  
美国, 加利福尼亚州, 洛杉矶市, CA 90095)

**摘要:**针对激光模拟射击系统对激光光斑进行快速、高精度质心定位的要求,提出了一种基于视频序列图像的光斑检测与高精度质心定位方法。该方法首先利用帧间差分图像和噪声估计参数对射击突发事件进行检测;然后利用噪声估计方法确定光斑的分割阈值,结合形态学滤波对目标光斑和背景噪声进行有效分割,提取光斑区域,同时降低窗口内外噪声。最后,用4帧差分图像合成1帧高分辨率的图像来抑制图像噪声和计算误差的影响,实现光斑质心的高精度定位。实验结果表明,本文方法的光斑质心定位精度与稳定性均优于传统的方法;其中光斑质心定位精度达到了亚像素级别,稳定性度量平均值为0.00049,优于传统方法的0.00297。得到的结果显示,提出的方法有助于提升激光射击系统的性能。

**关键词:**光斑检测;质心定位;灰度重心法;序列图像;激光模拟射击

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162411.2880

## Improvement of localization accuracy of spot centroid based on sequential images

QIAN Feng<sup>1,2\*</sup>, YANG Ming-yu<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-pei<sup>3</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Henry Samueli School of Engineering and Applied Science, University of California Los Angeles, CA 90095, USA)*

\* *Corresponding author, E-mail: zilgard@126.com*

**Abstract:** To meet the requirements of a laser firing simulation system for high speed and high accurate location of laser spot centroids, a novel method based on the video sequential images is proposed for the spot detection and spot centroid location. The method firstly detects the firing events by the subtraction image between every two sequential frames and by the estimated noise parameters. Then, it uses the noise estimation to determine the segmenting threshold of the spot and combines

收稿日期:2016-03-24;修订日期:2016-05-23.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重点发展项目(No. y3cx1ss14c);中科院航空光学成像与测量重点实验室科研基金资助项目(No. y3hc1sr141)

morphologic filtering techniques to extract the spot region out from the background, meanwhile reducing the noises inside and outside of the window. Finally, one high resolution image is generated from 4 subtraction images to decrease the image noise and computing errors and to improve the locating accuracy of the spot centroid. Experimental results indicate that the spot centroid localization precision of laser spot and the average measurement stability of the proposed method are superior to that of the conventional method. The spot centroid localization precision has been reached to sub-pixel level, and the average measurement stability is 0.000 49, far better than the conventional 0.002 97. The method in this study is conducive to improving the performance of laser firing simulation systems.

**Key words:** spot detection; centroid localization; mass of gravity; sequential image; laser firing simulation

## 1 引 言

传统的士兵射击训练,通常采用空枪瞄准和实弹射击相结合的训练方式。空枪瞄准训练效率低,周期长;而实弹射击训练开支大,受训练场地限制,而且容易受天气影响,还要考虑安全因素。这些不利因素使得士兵对射击技能的熟悉和掌握程度受到影响,训练效果非常有限。近年来,以光代弹,人们采用激光射击系统模拟多种武器的射击情况<sup>[1-3]</sup>。这样不仅节省了弹药开支,减少了场地的限制,而且能检验射击效果,可以大大提高战士们的射击水平。

激光模拟系统大致有以下几种:(1)使用光电二极管阵列接收激光信号。但这种方法的后续处理电路复杂,而且容易受到干扰,易出现误触发、误操作现象<sup>[4]</sup>;(2)使用硅光电池做成激光探测器阵列,接收激光信号。这种方法加工困难,后续处理也比较复杂<sup>[5]</sup>;(3)使用摄像机或者摄像头拍摄带有激光光斑的靶面图像,在电脑上进行处理,得到打靶成绩<sup>[6-8]</sup>。该技术也被广泛应用于光学精密跟踪和精密测量等应用中<sup>[9-10]</sup>。其中,射击激光光斑的快速、高精度的质心定位问题是该方法的关键。

影响光斑质心定位精度的关键因素之一来源于传感器在探测光斑时所引入的误差,主要包括传感器离散采样误差、霰粒噪声、读出误差和背景噪声等的影响<sup>[11]</sup>。通常通过阈值法和窗口法来降低这些噪声的影响,进而提高质心的定位精度。但是,阈值选取过大可能滤除光斑的有效信号;阈值过小时,又会引入较大的随机误差<sup>[12]</sup>。窗口法是通过控制窗口的大小,使其与光斑尺寸相匹配,以排除窗口外噪声,从而减少噪声的影响,但无法

抑制窗口内噪声的影响<sup>[13-14]</sup>。文献<sup>[15]</sup>选用 3 帧连续的图像,对第 1、3 帧图像建立处理模型,经过内插后与第 2 帧图像相结合,实现暗弱空间目标的高精度定位。这种使用时间相邻的多帧序列图像内插法来提高图像精度的策略被广泛应用于超分辨领域<sup>[16]</sup>。

本文提出了一种针对 CCD(Charge Coupled-Device)相机所采集的序列图像的高精度质心定位方法。该方法通过背景噪声进行估计,利用帧间差分图像对设计突发事件进行检测。然后利用噪声估计确定光斑的分割阈值,结合形态学滤波和的方法将目标光斑与背景分离,提取光斑区域,同时降低窗口内外噪声的影响,突破了传统通过尺寸控制的窗口法不能降低窗口内噪声的局限。最后,利用 4 帧差分图像合成 1 帧高分辨率图像,以降低图像噪声与计算误差的影响,通过质心的加权求平均法实现光斑质心的高精度定位。通过实验对比分析了本文方法与传统方法的性能。

## 2 基本工作原理

采用视频检测方法模拟激光射击需要解决的 3 个主要问题包括:(1)对射击突发事件进行检测;(2)对激光光斑进行检测与提取;(3)对光斑质心进行高精度定位。本文采用固定 CCD 相机对激光射击的训练靶场进行监视,获取连续的靶面视频图像帧  $i=1,2,3,\dots,N(N$  为总帧数)。通过对两相邻帧  $(k,k+1)$  做差分后取绝对值生成差分图像。若激光光斑目标未出现在视频帧中,由于图像背景不变,则其差分图像中仅包含 CCD 相机的噪声信息;若光斑出现在视频帧中,则该时刻所处的差分图像中存在明显的高亮光斑。因此,通过检测差分图像中是否包含高亮光斑就可以判定

射击事件是否出现,完成射击突发事件的检测。

在光斑的检测与提取过程中,需要将光斑的边缘与周围噪声分割开<sup>[17-18]</sup>,而分割效果的优劣将直接影响后期的光斑质心定位结果。为了提高激光光斑质心的定位精度,在检测到射击事件后,连续存储光斑出现后的 4 帧图第  $j+1$ 、 $j+2$ 、 $j+3$  和  $j+4$  帧,将其分别与前一时刻光斑未出现的帧

$j$  做差并取绝对值,获得 4 帧差分图像  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$ ,如图 1 所示。图  $d_1$  中的亮斑即为射击激光的光斑。随后,将具体介绍如何对射击突发事件进行检测;如何提取目标光斑,并降低窗口内外的噪声影响;最后研究了如何通过序列图像方法提高光斑局部区域的分辨率,以达到提高光斑质心定位精度的目的。



图 1 由序列图像生成差分检测图像的过程

Fig. 1 Procedure of differential images generated from image sequences

## 2.1 射击突发事件检测

### 2.1.1 噪声估计

受 CCD 相机霰粒噪声、读出噪声等的影响,相邻两帧的差分图像并非完全“干净”,它们存在着随机分布的噪声<sup>[19]</sup>。因此,在判断是否出现射击光斑的突发事件时需要先排除噪声的影响。除此之外,在后续的光斑质心定位过程中,这些噪声对定位精度也有较大影响。为了排除噪声的影响,本文抽取射击活动开始前的 10 帧差分图像进行统计,利用其统计特性估计噪声。分别统计 10 帧差分图像的直方图,相加之后获得总的直方图,如图 2 所示。

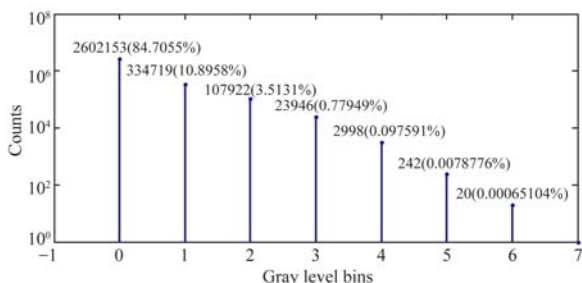


图 2 由 10 帧差分图像获取的总统计直方图

Fig. 2 Integrated statistical histogram of 10 differential images

如图 2 所示,差分图像中约有 84.71% 像素

点的值为零,表明这些像素点不含有噪声。而噪声共占有的像素约为 15.29%,其灰度值呈递减趋势分布在 1~6 之间,最大值为 6。根据实际的实验数据,激光光斑的中心峰值灰度一般在 8 左右,为保留一定的余量,噪声与光斑的分割阈值选为 10。

### 2.1.2 射击突发事件的判定

可以将射击突发事件是否出现的问题建模为二值假设检验:

$$H_j = \begin{cases} H_1: \text{event occurred} \\ H_0: \text{event didn't occur} \end{cases}, \quad (1)$$

其中:  $H_1$  表示在第  $j$  帧和第  $j+1$  帧之间有射击突发事件发生;  $H_0$  表示在第  $j$  帧和第  $j+1$  帧之间不存在射击突发事件。则判定准则为:

$$M_j = \text{card}(\mathbf{R}_s) \begin{cases} \geq \eta, & H_1 \\ < \eta, & H_0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中:  $\text{card}(\ast)$  表示集合中元素的个数;  $\mathbf{R}_s$  表示差分图像中非噪声点的集合;  $\eta$  为光斑判定阈值。根据实际实验数据知,光斑所占像素数为 30 左右,因此取  $\eta$  为 20。集合  $\mathbf{R}_s$  表示为:

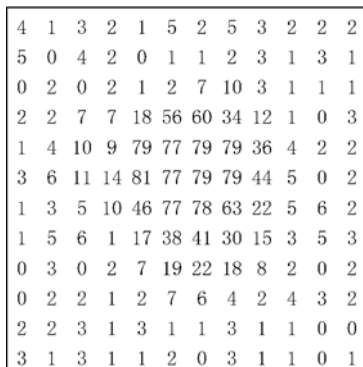
$$\mathbf{R}_s = \{ \mathbf{I}_{x,y} \mid \mathbf{I}_{x,y} \geq \xi \}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{I}_{x,y}$  表示图像中点  $(x, y)$  的灰度值。根据 2.1.1 节噪声估计所提出的经验阈值,  $\xi$  取为 10。简而言之,当前差分图像中,若非噪声点集合  $\mathbf{R}_s$

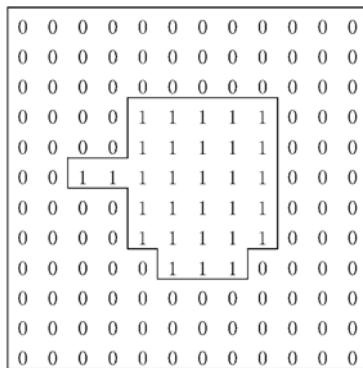
的元素个数不小于阈值  $\eta$ , 则判定此差分图像中存在激光光斑, 即第  $j$  帧与第  $j+1$  帧之间有射击突发事件发生。

### 2.2 光斑的检测与提取

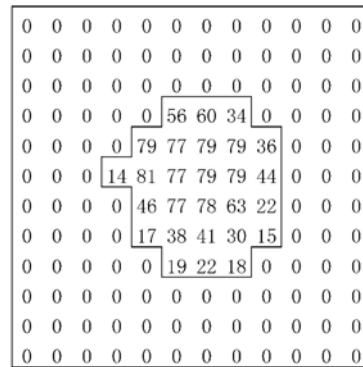
在射击突发事件判定过程中, 需要对差分图像进行遍历搜索, 得到非噪声点集合  $R_s$ 。与此同时, 可通过记录非噪声点的坐标, 对其进行粗定位, 划分出窗口大小为  $12 \times 12$  的光斑区域<sup>[20]</sup>, 如图 3(a)所示。然后, 需要对光斑区域和背景噪声进行分割。本文提出了结合形态学滤波的方法, 代替传统的阈值分割方法<sup>[21-23]</sup>, 能够更好地将目标区域和背景进行分割。依据上小节选取的经验阈值  $\xi=10$ , 对光斑区域进行二值化分割, 得到光斑区域的形态学图像, 如图 3(b)所示。由图可见, 光斑的边缘与背景噪声交织在一起, 给分割带来了一定难度。本文从两方面来解决这一问题: (1)使用形态学滤波的方法对光斑区域进行规整; (2)通过加权平均的质心求法来弱化光斑边缘对质心定位精度的影响。



(a)差分图像中光斑区域的灰度值  
(a)Gray levels of spot region in differential image



(b)经过阈值分割后光斑区域的形态学图像  
(b)Morphological image of spot region after segmentation



(c)经过形态学滤波规整后的光斑区  
(c)Spot region after morphological filtering

图 3 激光光斑的提取

Fig. 3 Extraction process of laser spots

将图 3(b)当作提取光斑区域的模板, 对其进行形态学滤波操作。设该形态学图像(图 3(b))为集合  $B$ , 然后用结构元素  $w$  对  $B$  进行开操作<sup>[10]</sup>, 记为  $B \circ w$ , 即用结构元素  $w$  先对  $B$  进行腐蚀操作, 然后再用  $w$  对  $B$  进行膨胀操作:

$$B \circ w = (B \odot w) \oplus w, \quad (4)$$

其中:操作算子  $B \odot w$  和  $B \oplus w$  分别表示腐蚀与膨胀操作。经过形态学滤波, 得到规整后的光斑区域形态学图像  $B'$ 。然后将  $B'$  作为滤波模板, 对图 3(a)进行滤波:将图 3(a)与  $B'$  中的像素点一一对应,  $B'$  为 1 时保留图 3(a)对应像素点灰度值;  $B'$  为 0 时, 将图 3(a)对应像素点灰度值置为 0。得到的滤波结果如图 3(c)所示。与图 3(b)相比可知, 经过形态学滤波规整后得到的光斑区域图 3(c) 在背景噪声分割的效果上表现得更为出色。

### 2.3 提高光斑质心的定位精度

文献[24]提出使用线性插值的方法提高图像分辨率, 进而提高光斑质心的定位精度。这种方法是对单帧图像进行处理的, 其通过插值方法增加样本数量, 进而降低加权平均中的计算误差, 来提高定位精度, 实际上并未增加图像中的信息量。因此, 本文采用连续的 4 帧图像, 通过填充的方式增加图像的分辨率。CCD 相机采集的帧频一般为  $24 \sim 30$  frame/s, 而 4 帧图像的采集时间为  $0.13 \sim 0.17$  s。在这段短时间内, 认为采集图像中各物体不发生空间上的变化。由于在采集图像时, CCD 等传感器件受其自身的量化机理、器件噪声等的不确定度的影响, 使相同目标在不同帧图像之间有细微的差别, 如图 4 所示。

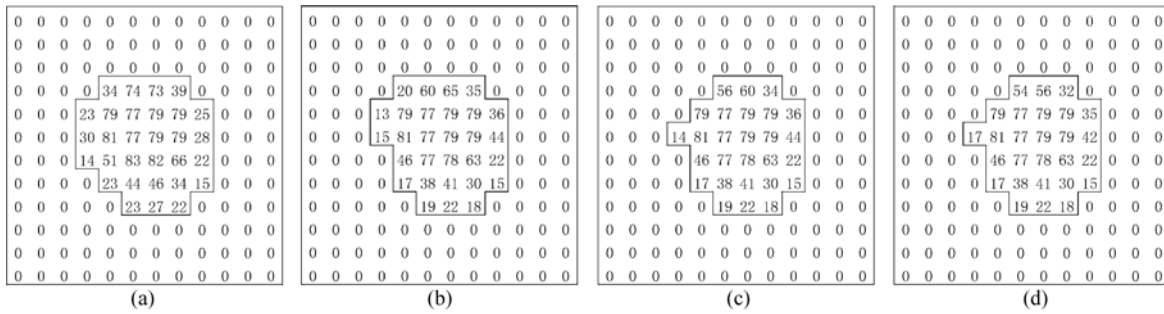


图 4 连续 4 幅差分图像中提取的同一光斑区域

Fig. 4 The same spot region extracted from four sequential differential images  $d_1 \sim d_4$

由图 4 可知,在各帧差分图像中,光斑区域的灰度值在边缘部分存在着差异性,这反映了传感器在测量过程中所存在的不确定性。因此,本文将 4 帧 12 pixel×12 pixel 的光斑区域合成一张 24 pixel×24 pixel 的高分辨率图像,填充过程如图 5 所示。图中演示了其中两帧光斑的网格填充方法:将 24×24 的高分辨率图像划分 2×2 的小格,每个小格中均包含 4 个像素。这 4 个像素分别由低分辨率图像(a),(b),(c),(d)在对应位置处各取一个像素填充。填充顺序为自左而右、自上而下。

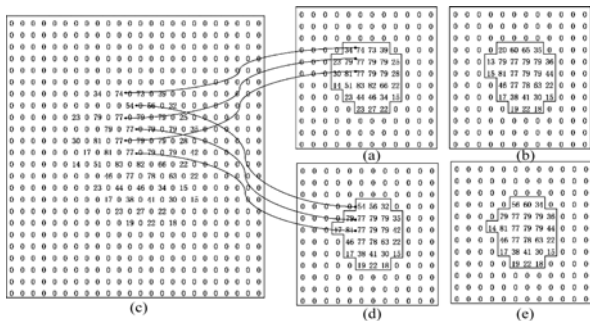
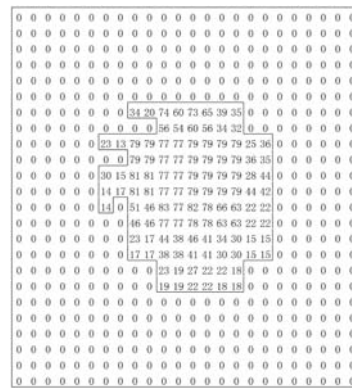


图 5 4 帧光斑区域图像合成示意图

Fig. 5 Synthesis schematic diagram of four spot regions

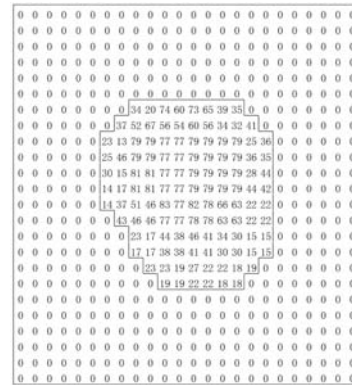
图 6(a)为完全填充后的结果,从图上可以看出,由低分辨率光斑直接填充合成的光斑存在缝隙。接下来,本文采用邻域插值的方法来填补这些缝隙。首先对图 6(a)进行二值化,得到其形态学图像  $S_{bw}$ 。然后对  $S_{bw}$  进行闭操作,得到  $S'_{bw} = S_{bw} \cdot w$ ,即用结构元素  $w$  先对  $S_{bw}$  进行膨胀操作,而后进行腐蚀操作,正好与前文的开操作相反。其公式表达如下:

$$S'_{bw} = S_{bw} \cdot w = (S_{bw} \oplus w) \odot w \quad (5)$$



(a)由四帧低分辨率光斑直接合成结果

(a)Results directly synthesized by four low resolution spots



(b)(a)经过邻域插值后获得的结果

(b)Results by (a) with neighborhood interpolation

图 6 合成后的高分辨率光斑图像

Fig. 6 Synthesized high resolution spot

然后通过比较  $S'_{bw}$  和  $S_{bw}$  之间的差异,取其异或来确定需要插值的像素坐标  $P_{index}$ :

$$P_{index} = (\overline{S'_{bw}} \cap S_{bw}) \cup (S'_{bw} \cap \overline{S_{bw}}), \quad (6)$$

其中:  $\overline{S_{bw}}$  表示对集合的取反操作。获得像素点位置  $P_{index}$  后,计算图 6(a) 对应像素点处 8 邻域中非 0 像素的平均值,将该平均值化整后插入该像素点,完成插值工作。对  $P_{index}$  中元素所标记的像素

点逐一插值后可得到图 6(b), 标记为  $S_{HR}$ 。

对光斑  $S_{HR}$  进行质心定位时, 采用二维一阶修正矩的计算方法<sup>[25-26]</sup>。设光斑的质心坐标为  $(X, Y)$ , 单个像素点的坐标用  $(x, y)$  表示, 该像素点  $(x, y)$  处的灰度值可用  $I(x, y)$  表示, 则:

$$X = \frac{\sum_{(x,y) \in S_{HR}} x \cdot I(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S_{HR}} I(x,y)}; Y = \frac{\sum_{(x,y) \in S_{HR}} y \cdot I(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S_{HR}} I(x,y)}. \quad (7)$$

### 3 实 验

本文实验在激光试验靶场进行, 采用固定 CCD 相机及配套采集设备连续采集目标靶面的视频序列图像。使用激光发射装置对靶面进行射击, 射击间隔约为 4~5 s。激光光斑在靶面上有较长的消隐时间( $\geq 40$  s)。由于光斑质心位置的真实值不易获得, 因此, 对光斑出现后的帧图进行重复采集, 提取目标光斑的质心, 以提取质心的位置稳定度作为算法性能的评价标准。

#### 3.1 评价准则

将一次光斑  $j$  的质心定位视为一次试验, 得到的质心位置为  $(X_{i,j}, Y_{i,j})$ ,  $i=1, \dots, N$ ,  $N$  为总的试验次数;  $j=1, \dots, K$ ,  $K$  为光斑的总数目。则评价函数定义为:

$$M_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(X_{i,j} - \bar{X}_j)^2 + (Y_{i,j} - \bar{Y}_j)^2}, \quad (8)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K M_j, \quad (9)$$

其中:  $M_j$  表示对某一光斑质心定位稳定性的度量,  $\bar{M}$  表示对所有光斑点质心坐标定位稳定性的度量, 其值越小表明质心定位的稳定度越高。

#### 3.2 试验结果与分析

连续采集光斑突发时刻的第  $j$  帧和其后连续的第  $j+1, j+2, \dots, j+N+3$  帧图像, 将最后 4 帧图像与第  $j$  帧分别相减, 取模后得到差分图像  $d_1, d_2, \dots, d_{N+3}$ 。采用本文方法将  $\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ ,  $\{d_2, d_3, d_4, d_5\}$ ,  $\dots$ ,  $\{d_N, d_{N+1}, d_{N+2}, d_{N+3}\}$  提取的光斑区域分别合成高分辨率光斑, 然后进行光斑质心定位。现有的高精度质心定位

方法中效果比较显著的是基于双线性插值提高图像分辨率的方法<sup>[11]</sup>, 本文将其作为对比方法。对比方法将  $d_1, d_2, \dots, d_N$  分别插值为高分辨率图像, 然后采用相同的方法对光斑质心进行定位。实验中, 采集约 1 s 内的帧图进行计算, 得到两种方法所确定的某一光斑质心坐标分布如图 7 所示。

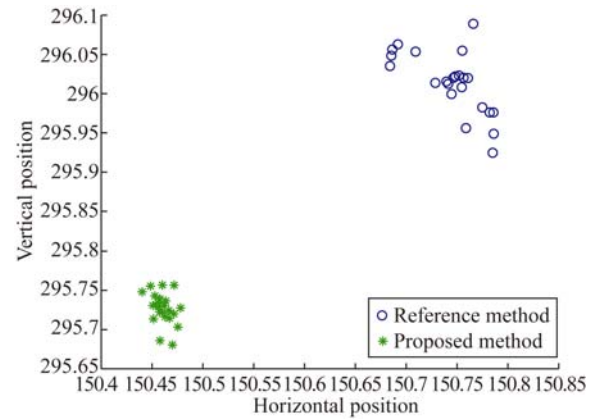


图 7 本文方法与对比方法提取的光斑质心的坐标分布图  
Fig. 7 Distribution of spot centroids extracted by reference methods and proposed method

由图 7 可直观地看到, 本文方法得到的质心坐标更为紧凑, 而对比方法得到的质心分布则较为松散一些, 这表明使用本文算法所提取的质心坐标更为稳定。从数据上看, 本算法定位质心坐标是  $(295.7229 \pm 0.0452, 150.4596 \pm 0.0195)$  较之对比方法的  $(296.0130 \pm 0.0867, 150.7410 \pm 0.0705)$ , 置信区间更小, 表明其定位精度更高; 两种方法的  $M$  值如表 1 所示。由表 1 也可以得知本文算法效果更优。

表 1 某一光斑的质心定位结果

Tab. 1 Centroid localization result for a certain spot		
	Centroid coordinates	$M_j$
Proposed method	$(295.7229 \pm 0.0452,$ $150.4596 \pm 0.0195)$	0.0004
Reference method	$(296.0130 \pm 0.0867,$ $150.7410 \pm 0.0705)$	0.0026

为了证明本文算法的鲁棒性, 本文进行了多次射击试验, 每次试验采用多帧进行比较定位, 如图 8 所示。

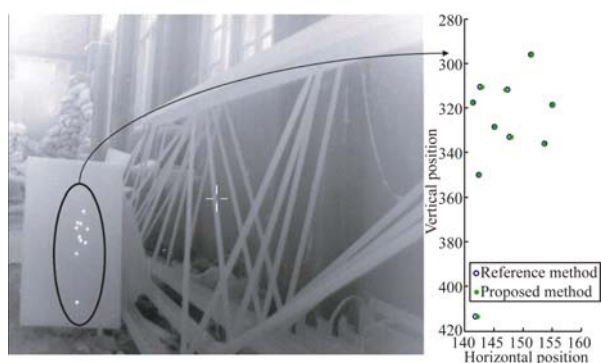


图 8 对多点光斑的质心定位实验

Fig. 8 Centroid location experiment on multiple spots

实验得到了 10 个光斑的试验数据,分别使用两种算法对所有光斑的质心进行定位,得到 10 组质心位置坐标的数据。由公式(8)和(9)计算的  $M$  和  $\bar{M}$ ,来评价两种算法的稳定性,结果如表 2 所示。由表 2 可知,本文算法的稳定性度量  $M$  为 0.000 1~0.000 9,总体平均值  $\bar{M}$  为 0.000 49;而对比算法的  $M$  为 0.002 3~0.004 6, $\bar{M}$  为 0.002 97。因此,由这 10 次光斑的质心定位试验可知,本文算法无论从定位精度上还是稳定性度量准则上都明显优于传统算法。

表 2 实验所有光斑质心定位的结果

Tab. 2 The experimental results of centroid localization for all spots

Spot	Proposed method centroid	$M$	Reference method centroid	$M$
1	(295.722 9±0.045 2,150.459 6±0.019 5)	0.000 4	(296.013 0±0.086 7,150.741 0±0.070 5)	0.002 6
2	(309.322 5±0.029 6,141.694 7±0.037 6)	0.000 6	(309.187 7±0.054 9,141.872 8±0.066 2)	0.002 5
3	(311.552 3±0.045 1,146.972 7±0.024 4)	0.000 6	(311.657 8±0.060 7,146.863 5±0.051 9)	0.002 9
4	(316.979 1±0.024 1,140.327 8±0.034 8)	0.000 3	(317.041 4±0.060 3,140.443 3±0.063 7)	0.002 7
5	(317.549 3±0.028 1,154.837 8±0.042 4)	0.000 4	(317.594 6±0.063 3,154.656 7±0.079 4)	0.004 3
6	(327.330 4±0.048 5,144.739 1±0.010 8)	0.000 6	(327.410 6±0.056 1,144.907 4±0.081 8)	0.003 1
7	(332.619 5±0.011 7,146.954 2±0.013 4)	0.000 1	(332.393 2±0.063 9,146.773 5±0.071 8)	0.002 3
8	(335.360 6±0.048 9,152.031 9±0.049 5)	0.000 9	(335.285 4±0.054 9,152.076 3±0.077 4)	0.004 6
9	(349.756 5±0.017 6,141.356 9±0.036 1)	0.000 5	(349.732 2±0.085 4,141.289 9±0.085 7)	0.002 3
10	(412.413 9±0.036 7,141.662 7±0.019 2)	0.000 5	(412.284 4±0.053 8,141.816 3±0.052 2)	0.002 4
$\bar{M}$	0.000 49		0.002 97	

## 4 结 论

针对激光模拟射击系统的需求本文提出了一种基于视频序列图像的光斑检测与高精度质心定位方法。首先,利用帧间的差分图像对射击突发事件进行检测;然后,利用形态学滤波方法将目标光斑与背景噪声进行分割;最后,将 4 帧差分图像合成为一帧图像,实现光斑质心的高精度定位。

### 参考文献:

[1] ROHM H P. Laser shooting system, United States: US 2007/0021220 A1 [P]. Jan. 25, 2007.

该方法对利用阈值法提取光斑的策略进行了改进,并克服了传统窗口法无法有效降低窗口内噪声影响的缺陷。实验表明:本文方法的光斑质心定位精度达到了亚像素级别,与传统方法相比,光斑质心定位精度与稳定性明显提高。在定义的稳定性度量上,传统方法为 0.002 97,而本文算法为 0.000 49,优于传统算法。本文的研究内容对激光射击系统性能的提升具有重要意义。

[2] KENDIR T, SHECHTER M, CLARK J. Firearm laser training system and method facilitating firearm training for extended range targets with feedback of firearm control, United States: US 7329127 B2

- [P]. Feb. 12, 2008.
- [3] HASEBE H, OKI M. Laser gun and shooting system for the same, United States: US 6962532 B2 [P]. Nov. 8, 2005.
- [4] 吴喜广. 红外激光打靶训练系统的设计[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.  
WU X G. *Design of the infrared laser shooting training system* [D]. Lanzhou: University of Lanzhou, 2012. (in Chinese)
- [5] 王辉. 激光模拟打靶系统设计与靶环图像处理技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.  
WANG H. *Design on laser simulation shooting system and research on target ring image processing technology*[D]. Taiyuan: North University of China, 2010. (in Chinese)
- [6] 张强, 李静, 应自炉, 等. 一种基于图像处理的激光打靶仪设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(12): 90-94.  
ZHANG Q, LI J, YING Z L, *et al.*. Design of laser targeting device based on image processing[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(12): 90-94. (in Chinese)
- [7] 李艳晓, 张磊, 张红刚, 等. 基于双 CCD 探测的外场高精度激光光斑测试技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 59-64.  
LI Y X, ZHANG L, ZHANG H G, *et al.*. Technology of high precision test for laser spot based on double CCD detection in the outfield [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 59-64. (in Chinese)
- [8] 张宁, 沈湘衡. 采用 CCD 相机测量目标靶形心位置精度的方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 279-284.  
ZHANG N, SHEN X H. Verification method for measuring accuracy of shape center location of target by using CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 279-284. (in Chinese)
- [9] BAKER K L, MOALLEM M M. Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wavefront sensors [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5147-5159.
- [10] MEJÍA Y. Extrapolation, interpolation, and identification of spots in Hartmann patterns [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(26): 6073-6082.
- [11] HANCOCK B R, STIRBL R C, CUNNINGHAM T J, *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy [J]. SPIE, 2001, 4284: 43-53.
- [12] 梁春, 廖文和, 沈建新, 等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 430-434.  
LIANG CH, LIAO W H, SHEN J X, *et al.*. An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 430-434.
- [13] BAIK S H, PARK S K, KIM C J, *et al.*. A center detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39: 262-267.
- [14] YIN X M, LI X, ZHAO L P, *et al.*. Adaptive thresholding and dynamic windowing method for automatic centroid detection of digital Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6088-6098.
- [15] 李振伟, 张涛, 张楠, 等. 暗弱空间目标的高精度定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2627-2634.  
LI ZH W, ZHANG T, ZHANG N, *et al.*. High precision orientation of faint space objects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2627-2634. (in Chinese)
- [16] 穆绍硕, 张叶, 贾平. 基于自学习局部线性嵌入的多幅亚像素超分辨率成像[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2677-2686.  
MU SH SH, ZHANG Y, JIA P. Super-resolution imaging of multi-frame sub-pixel images based on self-learning LLE [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2677-2686. (in Chinese)
- [17] 田浩南, 张叶. 基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价[J]. 液晶与显示, 2015, 30(4): 666-672.  
TIAN H N, ZHANG Y. Quality evaluation of stereo image based on edge and characteristic point matching [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 666-672. (in Chinese)
- [18] 刘久文, 潘峰, 李军. 结合图像边缘检测和最小误差替换的隐写方案[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 151-156.  
LIU J W, PAN F, LI J. Steganography based on edge detection and minimum error replacement [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 151-156. (in Chinese)
- [19] 金占雷. CCD 光斑质心算法的误差分析[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(1): 38-44.  
JIN ZH L. Error analysis of centroid algorithm based on CCD [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(1): 38-44. (in Chinese)
- [20] 王薇, 陈怀新. 基于优化探测窗口的光斑质心探

- 测方法[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1249-1252.
- WANG W, CHEN H X. New method for centroid detecting of focal spot based on optimizing detecting window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(8): 1249-1252. (in Chinese)
- [21] OTSU N. A threshold selection method from gray level histogram [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1):62-66.
- [22] VELASCO F R D. Thresholding using the ISO-DATA clustering algorithm [J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1980, 10(11):771-774.
- [23] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing(2nd Edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007, 520-525.
- [24] 夏爱利, 马彩文. 基于图像处理技术的光斑质心高精度测量[J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1542-1545.
- XIA A L, MA C W. Measurement of focal spot centroid based on image processing [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, 22(10): 1542-1545. (in Chinese)
- [25] 潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9):1787-1792
- PAN B, YANG G Q, LIU Y. Study on optimization threshold of centroid algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1787-1792. (in Chinese)
- [26] GUO W J, ZHAO L P, TONG CH SH, *et al.*. Adaptive centroid-finding algorithm for freeform surface measurements [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): D75-D83.

#### 作者简介:



钱锋(1987—),男,湖南长沙人,博士研究生,2011年于中国科学技术大学获得工学学士学位,主要研究方向为图像处理与目标识别。E-mail: zilgard@126.com



杨名宇(1983—),男,吉林松原人,博士,助理研究员,2006年于吉林大学获得学士学位,2012年于中国科学院自动化研究所获得博士学位,主要从事可见光和红外图像中目标检测、目标分割方面的研究。E-mail: ymy1983@163.com



张晓沛(1994—),男,吉林长春人,本科生,现就读于美国加利福尼亚大学洛杉矶分校,亨利·萨缪里工程与应用科学学院,电子工程专业,主要从事机器视觉、人工智能技术研究。E-mail: zxp mirror1994

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)