

文章编号 1004-924X(2013)04-0841-08

激光光斑位置精确测量系统

黄继鹏^{1,2}, 王延杰^{1*}, 孙宏海¹, 张少迪^{1,2}

(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)

摘要:设计了一种激光光斑位置测量系统,用于提高激光照射器监测系统测量激光光斑位置时的测量精度。分别介绍了测量系统的组成及它们的信号连接关系。针对激光光斑图像采集过程中的后向散射现象,提出基于异步距离选通的激光后向散射抑制技术。为了克服大气湍流扰动对激光光斑成像的影响,利用改进的盲解卷积算法对激光光斑图像进行事后图像处理。最后,对光斑图像进行畸变校正,并利用高斯曲面拟合算法提取光斑位置。设计了若干仿真实验,并应用该系统处理了实际外场实验。结果表明,所设计的激光光斑位置测量系统的测量精度不超过 0.3 pixel。

关键词:激光光斑;位置测量;激光后向散射;盲解卷积算法;大气湍流;短波红外

中图分类号:TN247 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132104.0841

Precise position measuring system for laser spots

HUANG Ji-peng^{1,2}, WANG Yan-jie^{1*}, SUN Hong-hai¹, ZHANG Shao-di^{1,2}

(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)*

* *Corresponding author, E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn*

Abstract: A laser spot measuring system was designed to improve the position precision of a laser designator surveillance systems. All the components of the laser spot measuring system were introduced, respectively, and the relationship of all connected signals among these components was given. According to the laser backscattering in collecting laser spot images, a method was proposed to restrain the laser backscattering based on an asynchronous range-gating technology. To weakening the impact of atmospheric turbulence on laser spot imaging, an improved blind deconvolution algorithm was applied to the image process after the events for the laser spot image. Finally, the distortion of the spot image was adjusted and the spot position was computed by Gauss surface fitting method. The simulation experiments were designed and a practical field experiment was performed by the proposed system. The experimental results show that the precision of this laser spot measuring system is better than 0.3 pixel.

Key words: laser spot; position measurement; laser backscattering; blind deconvolution algorithm; atmosphere turbulence; short wave infrared

收稿日期:2012-12-02;修订日期:2012-12-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61172111);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA7031010B)

1 引言

激光制导是导弹制导的常用技术之一,该技术的实质是利用导引头跟踪激光光斑能量分布的中心位置,而脉冲激光光斑能量分布的测量与激光照射器的性能有关。在武器外场实验时,常用激光照射器监测系统来测量激光照射器的照准精度。为了提高光斑的测量精度,研究人员对影响测量精度的因素进行了大量研究。研究表明,相机光学系统畸变带来的误差因素对光斑测量精度的影响很小,可以忽略;但是诸如大气湍流、气溶胶散射、靶面和像面之间的透射变换等因素的影响不容忽视^[1-3]。考虑这些因素,本文设计了一个基于图像测量法^[4]的激光光斑位置测量系统,用以对激光光斑图像进行采集、处理和计算。讨论了几种提高光斑测量精度的关键技术:图像事后复原技术、异步距离选通技术、光斑图像畸变校正技术以及光斑位置细分方法。最后,为了验证光斑测量系统的测量精度,设计了光斑畸变校正实验和大气后向散射抑制实验,并应用该系统进行了实际外场实验。

2 激光光斑位置测量系统

激光光斑位置测量系统由短波红外相机、四象限探测器和信号处理系统构成,如图 1 所示。

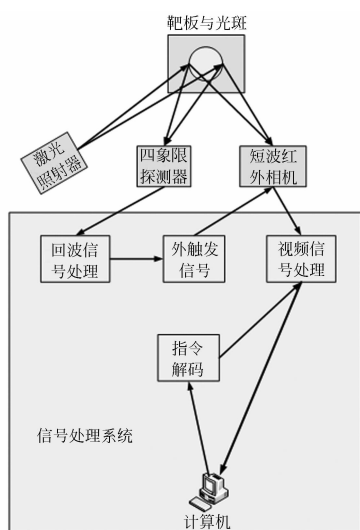


图 1 激光光斑位置测量系统

Fig. 1 Measurement system for laser spot positions

实验过程中,激光器将激光照射到靶板上,利用短波红外相机实时采集激光光斑和靶板图像,以计算目标靶板和光斑在视场中的位置。四象限探测器用于接收激光回波信号,包括激光后向散射信号以及激光光斑反射信号。回波信号经信号处理系统处理后,提取激光光斑反射信号,并生成短波红外相机外触发选通时序,以抑制激光后向散射。短波红外图像送入信号处理系统之后,首先利用盲解卷积算法完成图像复原,减弱大气湍流对激光光斑成像的影响,然后校正激光光斑畸变。最后利用高斯曲面拟合法提取激光光斑位置,显示激光光斑相对于靶板的位置以及激光光斑的能量分布,并将光斑和目标靶板图像传送给指控系统。

3 激光光斑位置测量关键技术

3.1 激光后向散射抑制技术

激光在大气中传播时,激光的后向散射将严重影响激光器监测系统对光斑位置的测量。激光后向散射的强度和距离有关^[5],因此根据距离有选择地接收反射光,可以抑制激光后向散射,这就是所谓的距离选通技术。同步距离选通技术广泛应用于主动照明^[6],但在本文中激光器的脉冲时序是未知的,因此本文采用异步距离选通技术,如图 2 所示。该技术使用灵敏度较高的四象限探测器^[7]接收激光回波信号,并通过信号处理器处理激光回波信号确定相机的选通脉冲。

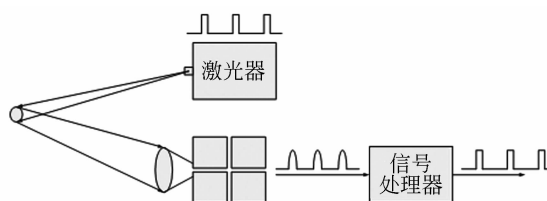


图 2 异步距离选通系统示意图

Fig. 2 Sketch map of asynchronous range-gated system

四象限探测器接收的激光回波信号是后向散射和目标反射信号合成的结果。由于激光器发射的激光脉冲成高斯分布,因此,返回的激光脉冲是由一系列与发射脉冲形状相似的反射波叠加而成。为了确定相机选通的准确时刻,本文提出将激光回波信号分解,从分解得到的分量中筛选出

完整的目标反射回波信号。

已知一个均匀分布的点列 $\{x_k: k=1, \dots, N\}$, 每个点对应的数值为 $\{y_k: k=1, \dots, N\}$, 将返回的波形分解成高斯函数的形式:

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-(x-x_i)^2/2\sigma_i^2}. \quad (1)$$

于是有:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f(x_k) - y_k)^2} < \epsilon, \quad (2)$$

其中: $y = f(x)$ 是一个单调函数, 参数为 $\{a_i, x_i, \sigma_i: i=1, \dots, n\}$. 在满足精度 ϵ 情况下, 利用 n 个高斯函数分量拟合波形曲线即可确定参数, 进而可以得到各个高斯函数分量的幅值、中心位置和半宽度。

令:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-(x-x_i)^2/2\sigma_i^2} - f(x). \quad (3)$$

回波信号分解的目的是使 $g(x)$ 在对应合成回波各点处取得极小值, 即:

$$\text{grad}F(x) = \text{grad} \sum_t g_t^2(x) = 0. \quad (4)$$

这个问题可以描述为: 一个系统含有 N 个观测值和 $3n$ 个未知系数。这些系数可以利用非线性最小二乘法求得, 构造出的迭代方程为:

$$A(k) = \begin{bmatrix} g_{11}(x(k)) & \cdots & g_{1m}(x(k)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N1}(x(k)) & \cdots & g_{Nm}(x(k)) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$x(k) = -[A(k)^T A(k)]^{-1} A(k)^T f(x(k)), \quad (6)$$

$$x(k+1) = x(k) + \square x(k), \quad (7)$$

其中: $m = 3n$, k 表示迭代次数, $g_{ij}(x) = \partial g(i)/\partial x_j$ 。

迭代前先确定回波分量的个数, 可以根据观测波形拐点的数量推导出用于拟合的高斯函数分量的个数。但是背景噪声的随机变化有时会产生拐点, 这会导致虚假高斯点的出现, 即实际上并不存在的反射信号。为了避免这一问题, 在定位拐点之前应先对波形进行平滑处理, 以消除高频噪声, 提高信号的信噪比。另外, 为了避免得到的最小二乘解陷入局部最小值, 必须初始化高斯函数分量的参数, 根据波形曲线的连续拐点位置和间隔对每个高斯函数分量的初始中心位置和半宽度进行估计。设某两个连续拐点属于同一高斯函数分量, 连续拐点的位置为 l_{2i-1} 和 l_{2i} , 则第 i 个高斯

函数分量的位置 x_i , 半宽度 σ_i 可以表示为:

$$x_i = (l_{2i-1} + l_{2i})/2, \quad (8)$$

$$\sigma_i = |l_{2i-1} - l_{2i}|/2. \quad (9)$$

在迭代过程中对参数值进行优化。为了使优化的结果更为合理, 这里约束优化的高斯函数分量的幅值为正, 而且半宽度大于或等于激光输出脉冲的半宽度。迭代采用 Levenburg-Marquardt 方法, 即当参数估计值远离最小值时应用最陡下降法确定步长, 当参数估计值接近最小值时则用牛顿法确定步长。算法步骤为:

(1) 对观测到的波形进行平滑处理, 并隔离曲线拐点;

(2) 为迭代求解设定初始值: 利用拐点个数估计分解高斯函数分量的个数, 利用公式(8)和公式(9)估计分量的初始参数;

(3) 利用公式(5)、(6)、(7)迭代求解分量参数, 并使用 Levenburg-Marquardt 方法对参数初始估计值进行优化;

(4) 按公式(2)计算拟合曲线和观测曲线之间的误差, 如果满足精度要求则停止; 否则, 继续迭代求解。

3.2 大气湍流扰动图像复原技术

大气湍流扰动引起大气介质的折射系数随机波动, 这使激光在传播过程中其光学波前发生失真, 产生光强闪烁和光束漂移等现象, 严重影响激光光束在大气中远距离传播的质量以及激光光斑的成像质量。为了提高激光光斑位置的测量精度, 本文采用盲解卷积算法对激光光斑图像进行图像复原。经典的盲解卷积算法有叠代盲目反卷积(Iterative Blind Deconvolution, IBD)算法^[8]、模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法^[9]、非负支持域有限的递归逆滤波(Nonnegativity and Support Constraint Recursive Inverse Filtering, NAS-RIF)算法^[10]、全变差(Total Variation, TV)算法^[11]等, 但这些经典算法不容易收敛, 即使收敛, 得到的最优解也不唯一, 且为了筛选最优解还需要添加新的约束。因此, 本文在 TV 算法的基础上提出了一种改进算法, 并从数学上证明了该算法是收敛的。

为了提高目标函数的收敛性和收敛速度, 引入惩罚机制改进 TV 正则化方法, 并称改进后的

算法为惩罚全变差 (Penalized Total Variation, PTV), 如下式所示:

$$PTV(u, f) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|u_i - D_i f\|_2^2 + \sum_i \|u_i\|_2, \quad (10)$$

$$PTV(v, h) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i - D_i h\|_2^2 + \sum_i \|v_i\|_2. \quad (11)$$

改进的算法中引入两个变量 u 和 v , β 为惩罚系数。式(10)和式(11)中第一项为惩罚项, 于是目标函数可以定义为:

$$L(f, h) = \sum \|g - f \otimes h\|_2^2 + \alpha_1 PTV(f) + \alpha_2 PTV(h). \quad (12)$$

由于惩罚项的引入, 增添了两个新的变量, 因此交替最小化方法也需要做相应的改进, 基本步骤为:

- (1) 给定初始值 f^{00} 和 h^{00} 以及允许误差 ϵ ;
- (2) 求 h^0 使得下式取最小值:

$$L(h) = \frac{1}{\alpha_2} \sum \|g - f^{00} \otimes h\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i - D_i h\|_2^2 + \sum_i \|v_i\|_2. \quad (13)$$

- 1) 利用初始值 h^{00} , 求 v^0 使得下式取最小值:

$$PTV(v) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i - D_i h^{00}\|_2^2 + \sum_i \|v_i\|_2. \quad (14)$$

- 2) 利用得到的 v^0 , 求 h^{01} 使得下式取最小值:

$$PTV(h) = \frac{1}{\alpha_2} \sum \|h - f^{00} \otimes h\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \|v_i^0 - D_i h\|_2^2. \quad (15)$$

- 3) 验证是否满足 $PTV(v^0, h^{01}) < \epsilon$, 如果不满足, 则继续循环; 如果满足, 则使 $h^0 = h^{0n}$, 算法进行下一步。

- (3) 求 f^1 使得下式取最小值:

$$L(f) = \frac{1}{\alpha_2} \sum \|g - f \otimes h^0\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \|u_i - D_i f\|_2^2 + \sum_i \|u_i\|_2. \quad (16)$$

- 1) 利用初始值 $f^{10} = f^{00}$, 求 u^0 使得下式取最小值:

$$PTV(u) = \frac{\beta}{2} \sum_i \|u_i - D_i f^{10}\|_2^2 + \sum_i \|u_i\|_2. \quad (17)$$

- 2) 利用得到的 u^0 , 求 f^{11} 使得下式取最小值:

$$PTV(f) = \frac{1}{\alpha_1} \sum \|g - f \otimes h^0\|_2^2 + \frac{\beta}{2} \sum_i \|u_i^0 - D_i f\|_2^2. \quad (18)$$

- 3) 验证是否满足 $PTV(u^0, f^{11}) < \epsilon$, 如果不满足, 则继续循环; 如果满足, 则使 $f^1 = f^{1n}$, 算法进行下一步。

- (4) 将 f^1 和 h^0 代入目标函数式(12)中, 验证是否满足 $L(f^1, h^0) < \epsilon$, 如果不满足, 则继续循环; 如果满足, 则停止循环。

3.3 光斑畸变校正技术

本文采用短波红外相机对激光光斑进行采集, 可以清晰地拍摄到目标靶板和激光光斑图像。但是由于相机光轴与靶板之间存在一定的角度, 二者之间存在透射变换, 采集到的光斑图像会发生“畸变”, 因此在计算光斑位置之前, 首先要校正光斑畸变图像。本文利用已知的目标靶板特征对短波红外图像中的光斑进行校正, 具体方法为: 首先提取所拍图像中目标靶板 8 个角点的坐标, 然后利用先验知识人为设定这 8 个角点的理想坐标, 接着利用这些已知信息求取 8 参数矩阵, 最后利用 8 参数矩阵将实际拍摄到的图像点转换为理想坐标点, 从而克服透视变换, 校正光斑畸变。

3.4 光斑位置细分方法

为了使光斑位置的测量精度达到亚像素级, 本文采用细分算法计算光斑位置。常用的细分方法是质心法, 该方法用图像像素灰度的简单加权求平均值, 因此在定位能量均匀分布的光斑中心时精度较高, 而且计算简单。但本文要定位的激光光斑能量服从高斯分布, 因此质心法并不适合。由于激光光斑图像中心部分的能量高并逐渐向偏离中心的方向衰减, 可以应用曲面拟合法计算其位置。

- (1) 高斯曲面拟合法:

$$\varphi(x, y) = \frac{k}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (19)$$

其中: σ 为高斯偏移量, (x_0, y_0) 为光斑中心, k 为亮度系数。

- (2) 抛物曲面拟合法:

$$p(x, y) = a(x-x_0)^2 + b(y-y_0)^2 + c, \quad (20)$$

其中: (x_0, y_0) 为光斑中心, a, b 和 c 为抛物面系数。

除此以外,还有其它的曲面拟合方法,如贝塞尔曲面拟合、样条曲面拟合等。文献[12]利用不同的曲面拟合法计算星点位置来识别星图。由于恒星在 CCD 像面上的像分布类似于激光光斑图像的强度分布,因此可以利用星敏感器拍摄到的星点模拟激光光斑图像。由文献[12]可知,高斯曲面拟合法识别星图的成功率最高,而且细分精度可达 0.1 pixel,满足位置精度的计算要求。详细的验证方法和数据比较分析请见文献[12],这里不再赘述。

4 测量实验与结果

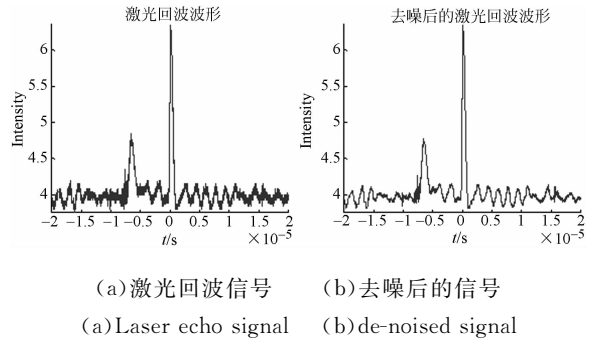
4.1 激光后向散射抑制试验

为了验证本文提出的异步距离选通法抑制激光后向散射的能力,采用波长为 1.06 μm 的激光器照射目标,并利用短波红外相机(0.9~1.7 μm)拍摄激光光斑和目标靶板图像。由前文可知,大气中气溶胶的散射作用对激光传播的影响很大,突出表现为激光后向散射现象,如图 3 所示。



图 3 激光后向散射外场实验图
Fig. 3 Laser back-scattering experiment

在外场实验中,选择距离相机约 1.0 km 处的烟囱作为目标,图中可以清晰地看到激光后向散射现象。由于目标反射光和激光后向散射光一同进入相机中成像,因此影响光斑的定位精度。利用响应范围为 0.4~1.1 μm 的四象限探测器探测到的激光回波信号如图 4(a)所示,为了准确确定回波分量的拐点位置,需要对回波信号进行去噪处理,结果如图 4(b)所示。提取回波分量参数,其中幅值较大的两个回波分量可以视为最强的后向散射信号和目标反射信号,数据如表 1 所示。



(a)激光回波信号 (b)去噪后的信号
(a)Laser echo signal (b)de-noised signal

图 4 激光信号

Fig. 4 Laser signals

表 1 激光回波信号统计结果

Tab. 1 Statistic results of laser echo signals

类别	幅值/V	中心位置/μs	脉冲宽度/μs
后向散射信号	4.789	-6.56	2.02
目标反射信号	6.362	0.152	2.05

将幅值最大的回波分量作为目标反射信号来确定相机选通时刻。图 5 是采用异步距离选通法处理后采集到的激光光斑图像。



图 5 抑制后向散射试验结果图
Fig. 5 Result of back-scattering restrained

图 3 中,激光后向散射的光斑中心定位为(72.95,113.68),采用异步距离选通法抑制后向散射后,光斑中心定位为(72.14,113.36)。

因此,定位偏差为:

$$E = \sqrt{(72.95 - 72.14)^2 + (113.68 - 113.35)^2} = 0.87, \quad (21)$$

即激光后向散射存在 0.87 pixel 的定位偏差。

4.2 光斑畸变校正试验

实验用的靶板尺寸为 1 640 mm×1 220 mm,为了验证本文提出的光斑畸变校正精度,在靶板

上的固定位置设置 13 个直径为 5 mm 的定位孔, 如图 6 所示。其中, 4 个定位孔圈定 1 320 mm × 1 100 mm 的矩形区域, 并在该矩形区域中心以及 4 条边的中心分别安置一个定位孔, 其它 4 个定位孔分别为矩形区域对角线的 4 等分点, 并且每个定位孔上都装有红外发光二极管。

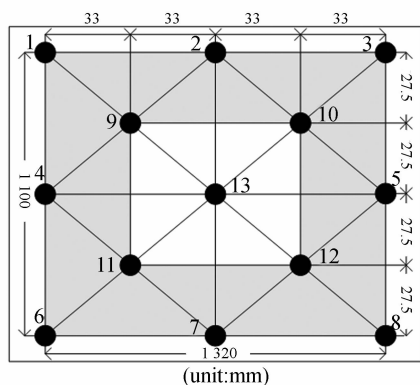
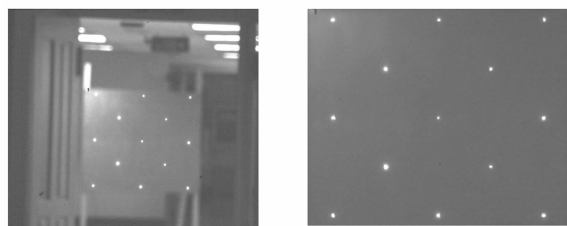


图 6 实验靶板示意图

Fig. 6 Experimental target board

首先利用矩形区域外围的 8 个红外发光二极管作为标志灯校正靶板区域, 然后通过定位中间 5 个红外发光二极管计算算法精度。验证校正精度的具体步骤为: 计算短波红外图像 8 个红外发光二极管的透视变换 8 参数矩阵, 并利用该 8 参数矩阵对短波红外图像进行透视变换, 计算各个定位孔的位置, 确定畸变校正精度。

靶板上的定位孔为人工钻孔, 和理想位置偏差不大于 1 mm, 远远小于一个像素, 对测量精度的影响可忽略不计; 发光二极管大部分埋在靶板中, 露出部分约为 2 mm, 相对于拍摄距离这部分误差亦可忽略不计; 此外, 实验室内温度恒定, 空气分布均匀, 流动不明显, 影响测量精度的主要因素为发光二极管的光点定位算法精度。



(a) 靶板图像 (b) 靶板畸变校正结果

(a) Image of target board (b) Result of board adjustment

图 7 靶板图像及畸变校正结果

Fig. 7 Target board image and its adjustment result

图 7(a) 为实际拍摄到的靶板图像。由于使用短波红外相机拍摄图像, 红外发光二极管发光属于红外波段, 实验效果更好。因此, 实验利用红外发光二极管的位置来验证校正精度。表 2 所示为 1~8 号红外发光二极管的定位结果。

表 2 定位红外发光二极管 1~8

Tab. 2 Positions of infrared diodes 1-8

灯号	定位	灯号	定位
1	(225.13, 198.27)	5	(461.54, 310.58)
2	(346.43, 202.55)	6	(218.37, 410.50)
3	(465.74, 205.19)	7	(339.25, 413.21)
4	(221.33, 304.28)	8	(459.75, 416.70)

利用 1~8 号红外发光二极管求得透视变换 8 参数矩阵, 并对靶板图像做校正处理, 结果如图 7(b) 所示。

9~13 号灯在畸变校正后的靶板区域图像位置以及实际位置如表 3 所示。

表 3 定位红外发光二极管 9~13

Tab. 3 Positions of diodes 9-13

灯号	图像定位	理论位置
9	(77.02, 53.03)	(77, 53)
10	(181.89, 53.11)	(182, 53)
11	(77.12, 140.10)	(77, 140)
12	(181.97, 140.01)	(182, 140)
13	(129.87, 96.88)	(130, 97)

校正误差为:

$$E = \sqrt{\sum_{i=9}^{13} (L_{ix} - L_{ix}^0)^2 + \sum_{i=9}^{13} (L_{iy} - L_{iy}^0)^2}, \quad (22)$$

其中: (L_{ix}, L_{iy}) 为第 i 个发光二极管的定位坐标, (L_{ix}^0, L_{iy}^0) 为第 i 个发光二极管的理论坐标。计算结果为 0.286, 即畸变校正算法的误差不超过 0.3 pixel。

4.3 实际外场试验

利用提出的异步距离选通技术抑制激光后向散射, 采集到的激光光斑图像如图 8(a) 所示。由图 8(a) 可以看出, 激光光斑图像受大气湍流影响, 光斑边缘很模糊, 并且光斑能量分布发生抖动, 利用盲解卷积图像事后复原算法对光斑图像进行恢复, 结果如图 8(b) 所示。

为了消除由于透射变换导致的激光光斑失

真,对光斑图像进行畸变校正,校正后的光斑图像如图8(c)所示。提取到的激光光斑的中心位置

相对于靶板位置为:(160.21,62.98),光斑能量分布如图9所示。

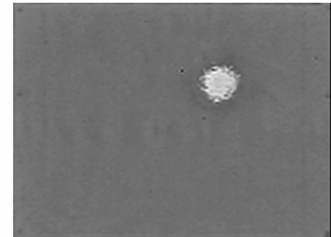


(a) 短波红外相机采集的激光光斑图像

(a) Laser spot image captured by short wave infrared camera



(b) 事后复原的光斑图像
(b) Spot image after registration



(c) 校正处理后的光斑图像
(c) Image after adjustment

图8 外场实验的光斑图像

Fig. 8 Spot images in outdoor test

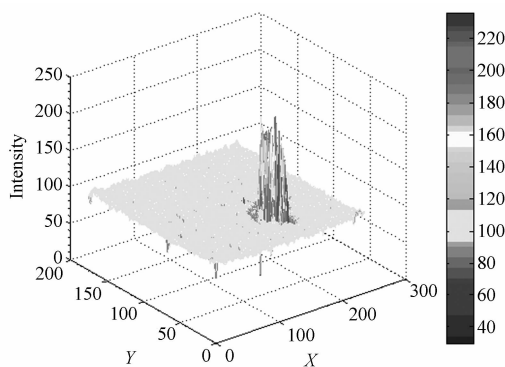


图9 激光光斑能量分布

Fig. 9 Distribution of laser spot energy

5 结 论

本文设计了一个激光光斑测量系统。首先对可提高光斑测量精度的相关技术进行了研究,并设计了仿真实验以验证算法的计算精度。激光后向散射抑制实验的结果表明,后向散射现象基本消除,后向散射对光斑定位的偏差为0.87 pixel。在室内几乎没有大气湍流影响的情况下,验证了光斑畸变校正精度,结果表明精度不超过0.3 pixel。最后进行了外场实验,用激光后向散射抑制技术采集图像,再用改进的盲解卷积技术对图像进行复原。在对光斑图像畸变校正之后,给出了高精度的定位结果和激光光斑的能量分布。本文提出的技术可有效提高激光光斑位置的测量精度,对激光制导武器的研究有重要意义。

参考文献:

- [1] 史亚莉,高云国,张磊,等. 提高CCD激光自准直测角精度的硬件方法[J]. 光学精密工程,2008,16(4):726-732.
SHI Y L,GAO Y G,ZHANG L, et al.. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):726-732. (in Chinese)
- [2] 董小刚,朱海军,谢永成. 纳秒脉冲激光图像的现场采集及快速分析[J]. 红外与激光工程,2011,40(1):57-60.

DONG X G,ZHU H J,XIE Y CH. Online acquisition and speedy analysis of the nanosecond pulse laser image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1):57-60. (in Chinese)

- [3] 王振宝,冯国斌,杨鹏翎,等. 近红外激光光斑功率密度时空分布探测器[J]. 红外与激光工程,2011,40(5):935-938.

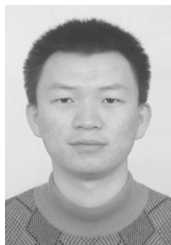
WANG ZH B,FENG G B,YANG P L, et al.. Detector array for measuring spatio-temporal distribution of near infrared laser power density [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5):935-938. (in Chinese)

- [4] 宋建中,韩广良,顾海军. 提高外场脉冲激光光斑测量距离的有效方法[J]. 光学精密工程,2002,10(3):300-303.
SONG J ZH, HAN G L, GU H J. Effective methods for raising the measured distance of the pulse laser spots removed target in outfield [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):300-303. (in Chinese)
- [5] 杨玉兰,孙金霞,付国柱. 主动成像系统中大气后向散射的分析和处理[J]. 液晶与显示,2009,24(1):126-130.
YANG Y L, SUN J X, FU G ZH. Analysis and treatment in atmosphere back-scattering of active imaging system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(1): 126-130. (in Chinese)
- [6] XU S W, ZHANG S C, TANG S W. Design and implementation of the laser range-gating imaging synchronization control system [C]. 2011 *International Conference on Electronics and Optoelectronics*, 2011, 2:237-244.
- [7] 邢超. 激光回波信号采集技术[J]. 红外,2006,27(4):29-36.
XING CH. Research on laser echo acquiring technique [J]. *Infrared*, 2006, 27(4):29-36. (in Chinese)
- [8] AYERS G R, DAINTY J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(7):547-550.
- [9] KUNDUR D, DIMITRIOS H. Blind image deconvolution [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 4(3):43-65.
- [10] KUNDUR D. *Blind deconvolution of still images using recursing inverse filtering*[D]. Toronto: University of Toronto, 1995.
- [11] CHAN T, WONG C K. Total variation blind deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(3):370-376.
- [12] 张少迪,王延杰,孙宏海. 三角剖分以及径向基函数神经网络在星图识别中的应用[J]. 光学精密工程,2012,20(2):395-402.
ZHANG SH D, WANG Y J, SUN H H. Application of triangulation and RBF neural network to star pattern recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):395-402. (in Chinese)

作者简介:



黄继鹏(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于东北师范大学获得学士学位,主要从事数字图像处理、图像匹配,高速图像存储方面的研究。E-mail: huangjp2009@126.com



孙宏海(1980—),男,汉族,吉林长春人,副研究员,主要从事图像处理,高速相机的研发。Email:meredith_2004@163.com



张少迪(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于吉林大学获得理学学士学位,主要从事实时数字图像处理、星图识别方面的研究。E-mail: zhangsd529@yahoo.com.cn

导师简介:



王延杰(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理,电视跟踪和自动目标识别技术的研究。E-mail:wangyj@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)