

# 鱼眼成像型激光告警系统光斑中心亚像元定位方法

董红军 周中亮 王 龙

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要** 光斑中心精确定位是成像型激光告警系统威胁激光准确定向的基础。分析了鱼眼成像型激光告警系统成像光斑特点, 针对 CMOS 传感器像元非完全填充结构和入射角区域光斑能量分布非对称造成定位误差大的问题, 基于光斑高斯分布特征, 提出将二维高斯分布函数积分分解为两个坐标方向一维积分的乘积, 利用误差函数级数近似光斑灰度高斯积分, 通过能量响应最大像元和次大像元的灰度比求解光斑中心坐标的细分算法, 最后通过实验对比研究了新方法的定位性能。结果表明, 本方法受像元非完全填充和镜头非对称像差的影响较小, 近轴区域和入射角大于  $60^\circ$  的轴外区域定位精度分别达到  $1/80$  和  $1/70$  pixel, 最大误差小于  $1/30$  pixel。本方法计算相对简单、定位精度较高, 且对不同位置光斑定位精度稳定, 能够满足大视场激光告警装备的指标要求。

**关键词** 成像系统; 光斑定位; 激光告警; 亚像元; 填充率; 误差函数

中图分类号 V448.2; TN977

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0917002

## Subpixel Location Algorithm for Laser Spot in Fish-Eye Imaging Laser Warning System

Dong Hongjun Zhou Zhongliang Wang Long

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

**Abstract** The directional accuracy of threatening laser is highly dependent on the laser spot center location accuracy for the imaging laser warning system. The spot features of wide field-of-view fish-eye imaging laser warning system are analyzed. As the low fill factor of CMOS sensor and the energy distribution asymmetry of spot in big incident angle region will affect the location accuracy of spot center, an improved algorithm is proposed. Firstly, it separates the two-dimensional Gaussian function integral of pixel intensity readings into a product of two one-dimensional integrals. Then the Gaussian function integrals which are difficult to solve even by numerical means are inverted using an error function approximation approach. Finally, the spot center coordinates are derived in terms of the intensity ratios of neighboring pixels. The accuracy and stability are verified and compared with traditional algorithm by experiment. The experimental results show that this method can reduce the location error caused by incomplete fill ratio of CMOS pixel and large unsymmetrical optical aberration of fish-eye lens. The spot positioning precision in paraxial region and big incident angle region are  $1/80$  and  $1/70$  pixel, respectively. The maximum error is less than  $1/30$  pixel. It can satisfy the system requirements of laser warning equipment, including real time, higher precision, as well as strong stabilization for spots in different areas of CMOS sensor.

**Key words** imaging system; spot location; laser warning; subpixel; fill ratio; error function

**OCIS codes** 110.2970; 110.2990; 200.3050

## 1 引 言

随着激光技术的发展, 激光装备大量运用于现代战争。制导激光、测距激光、反卫星激光等各种激

光对军事目标构成了越来越严重的威胁。作为光电对抗领域的重要组成部分, 激光告警直接影响到被保护目标的战场生存。成像型激光告警器作为光电

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-05-17

基金项目: 国防预研项目资助课题。

作者简介: 董红军(1981—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事光电对抗及红外图像处理方面的研究。

E-mail: dhjoptics@126.com

对抗告警设备中的一大类型,可以实现激光威胁源的精确定向,通常用于精确告警引导有源干扰或火力摧毁指向,而针对反卫星激光武器的星载告警设备的告警准确性和定向精度还往往与国家战略和政治决策相关<sup>[1,2]</sup>。激光告警系统的定向精度是系统设计者和作战指挥员关心的问题。

成像型激光告警器通常由广角远心鱼眼透镜、窄带滤光片和面阵成像器件构成。系统的定向精度首先决定于成像器件的分辨率,对于高精度的要求,成像设备本身设计制作的限制使其往往达不到指标要求,为进一步提高定向精度,需通过细分算法对激光光斑进行精确的中心定位<sup>[3]</sup>。目前用于中心定位的细分算法主要有基于边缘和基于灰度的两大类,基于边缘的方法适合于图像形状明确的大目标,小目标定位则大多采用基于灰度的算法来处理<sup>[4~7]</sup>。基于灰度的方法主要有质心法、加权质心法和高斯曲面法。由于点目标成像近似呈高斯分布,采用质心法估计中心位置时,权值的绝对值随像元离目标像点灰度中心的距离增大而线性增长,过多依赖于峰值两侧的弱信号,而未充分利用更高信噪比的目标图像中心信息,加权质心法针对这一问题做了改进<sup>[7]</sup>。高斯曲面法充分利用了光斑灰度分布信息,相比质心法可以取得更高的定位精度,但需要较多像元信息,且由于要进行对数和迭代运算使得计算复杂度很高<sup>[8,9]</sup>。如何更有效地利用像元灰度信息来提高光斑定位精度是细分算法研究的重点。

本文建立了一种基于高斯规律,利用误差函数级数近似高斯积分,通过相邻像元灰度比来求解光斑中心坐标的亚像元细分算法。通过对比实验研究发现,该方法定位精度高于质心法及加权质心法,与高斯曲面拟合方法精度相当,受像元填充率和光斑非对称性影响较小,对传感器面阵不同位置的光斑都具有良好的定位精度。

## 2 光斑特征及定位难点

### 2.1 系统结构

鱼眼成像型激光告警系统的组成结构如图1所示。鱼眼透镜的超大视场(FOV)可覆盖半球空域,实现凝视探测;窄带滤光片滤除杂散光,降低虚警率,实现对特定波长的告警;CMOS成像传感器响应灵敏度高,像元密度大,单像元尺寸小,从而可以实现对激光威胁源的精确定向。鱼眼透镜通过对图像的压缩畸变实现对半球空域的成像,随着激光入射角的增大,成像探测器像元间距所对应空间的可

分辨角增大,构成大视场探测和精确定向之间的矛盾。

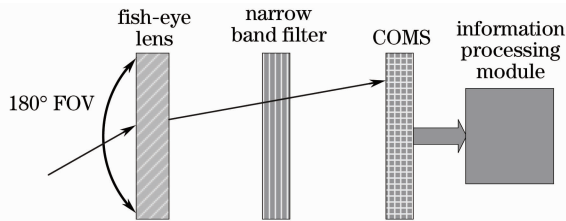


图1 告警系统组成框图

Fig.1 Block diagram for laser warning system

### 2.2 光斑特点

激光通常作为平行光束处理,通过大气传输后到达告警系统时的光斑远大于镜头的集光孔径,通过圆形孔径光阑接收符合夫琅禾费衍射理论,入射光通过光阑后聚焦形成艾里斑。

鱼眼镜头焦距较短,通常只有几毫米到十几毫米,镜头工作于聚焦状态时,入射激光的成像光斑大小在几微米到几十微米之间,光斑可能覆盖数个像元,也可能出现亚像元情况。亚像元情况对激光的探测和光斑定位极为不利,小的光斑落在盲元或像元间的死区时会造成漏警,也无法进行光斑中心的细分定位。成像型激光告警系统通常也采取微离焦处理,使光斑直径达到相应的尺寸,既便于目标探测,也可以获得较好的定位精度。按照亚像元细分算法的研究结果,成像光斑直径在3 pixel左右是较为合理的离焦量<sup>[10,11]</sup>。

鱼眼镜头通过“非相似”成像思想,引入大量的“桶形”畸变实现对物空间的压缩,属于大像差镜头。在近轴区域,光斑呈圆形;随着光线入射角的增大,像差增大,成像光斑并非圆对称。本告警系统所用短波红外鱼眼镜头的成像公式为

$$h = f \sin \omega, \quad (1)$$

式中 $h$ 为像高, $f$ 为镜头焦距, $\omega$ 为激光入射角。镜头的径向放大率 $\beta_r$ 和切向放大率 $\beta_t$ 存在关系<sup>[12]</sup>

$$\beta_t = \left( \frac{\omega}{\sin \omega} \right) \beta_r. \quad (2)$$

由(2)式可知,球形物面上的圆形面元投影到像平面上的椭圆,视场角越大,椭圆的长轴越长,椭圆越扁。以本系统中视场角 $180^\circ$ 的鱼眼镜头为例,激光入射角大于 $60^\circ$ 时,光斑呈现明显的椭圆特征;入射角 $\omega$ 为 $90^\circ$ 时,切向放大率 $\beta_t$ 达到径向放大率 $\beta_r$ 的1.57倍。

图2为1319 nm连续激光辐照某型短波红外鱼眼式激光告警系统的成像光斑。系统工作在微量离

焦状态,第一行为近轴区域光斑,第二行为入射角大于  $60^\circ$  时的光斑。可见,在入射角小的近轴区域,光斑灰度分布近似圆对称,而在大入射角的区域,光斑

演变为椭圆,光学系统的非对称性像差如彗差、像散、畸变等导致光斑能量分布表现出明显的非对称性。

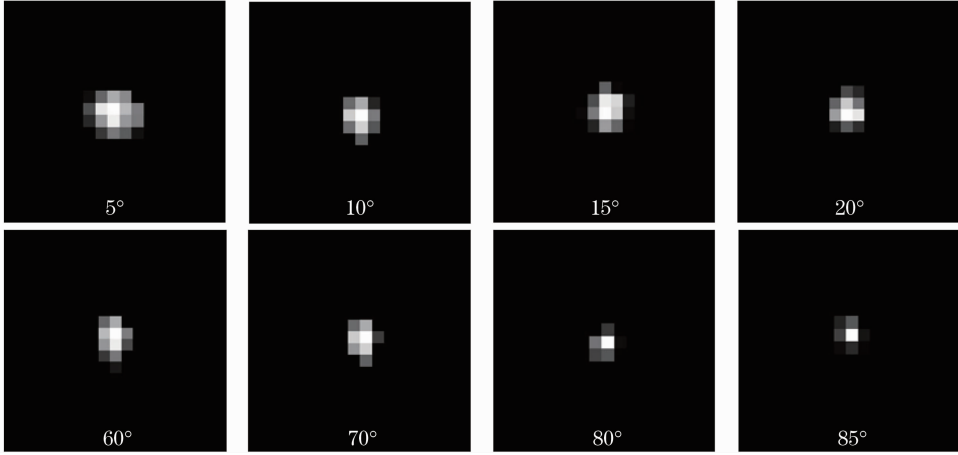


图2 不同激光入射角的光斑图像

Fig. 2 Laser imaging spots at various laser incident angles

### 2.3 定位难点

对于采用 CMOS 传感器的系统,由于 CMOS 的像元填充率通常在  $30\% \sim 70\%$ ,传感器在对其表面的光强分布进行空间积分采样时,像元填充率和感光区形状对其采样效果有直接影响,非光敏区域所造成的死区对光斑定位精度的影响是不容忽视的<sup>[13~15]</sup>。像元积分采样过程中落在非光敏区域的光斑能量不被响应,造成光斑点扩展函数畸变,最终使光斑定位出现误差,甚至随着光斑落在传感器阵列位置的不同出现大的跳变<sup>[16,17]</sup>。

传统的质心方法都以光斑能量分布对称为前提<sup>[18,19]</sup>,因而只适用于小视场系统和面阵中央区域的光斑。光学系统离轴成像的非对称性使得对边缘区域光斑的定位误差较大,对于  $180^\circ$  视场系统,当激光入射角度较大时,光斑非对称特征明显,质心方法不能满足定位精度要求。

激光告警系统往往和防护或干扰装置组成一体化的装备,因此其对光斑定位的实时性要求比较高。一些曲面拟合算法虽然可以获得较好的精度,但较为复杂<sup>[5,8,9]</sup>,无法满足告警系统反应时间指标。

## 3 基于高斯分布的亚像元方法

光学焦平面上激光光斑为光学系统的点扩展函数,光斑能量分布可用二维高斯函数来近似表示。基于此,提出一种利用误差函数级数近似像元光强高斯函数积分、通过相邻像元灰度比求解光斑中心的定位方法。

考虑高斯强度分布的光源通过鱼眼镜头后照射 CMOS 传感器表面,像元光敏区域结构为矩形,假设 CMOS 在有效区域所有像元光电性能相同,在整个光敏面上响应具有均匀性、线性。CMOS 面阵上某一像元  $k$  的强度为

$$I_k = \frac{I_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \iint_k \exp\left[-\frac{(\xi_x - x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(\xi_y - y)^2}{2\sigma_y^2}\right] d\xi_x d\xi_y, \quad (3)$$

式中  $I_0$  为入射光斑的总能量,  $(x, y)$  为光斑能量中心,  $(\sigma_x, \sigma_y)$  为二维高斯分布的标准差,在这里表示光斑能量分布的高斯半径,由于能量分布在  $x, y$  方向上互不相关,对于每一个像元或每一行每一列而言,积分都在一个矩形区域内进行,则二维积分可以变为两个一维积分的乘积,有

$$I_k = \frac{I_0}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{(\xi_x - x)^2}{2\sigma_x^2}\right] d\xi_x \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{y_1}^{y_2} \exp\left[-\frac{(\xi_y - y)^2}{2\sigma_y^2}\right] d\xi_y. \quad (4)$$

进一步表示为

$$I_k = \frac{I_0}{\pi} g(x, \sigma_x, x_1, x_2) g(y, \sigma_y, y_1, y_2). \quad (5)$$

由误差函数 erf 和高斯函数积分之间的关系,  $g$  可以表示为两个误差函数的差分,以  $x$  轴方向为例进行研究:

$$g(x, \sigma_x, x_1, x_2) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(x_2 - x)\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(x_1 - x)\right] \right\}$$

$$\operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(x_1 - x)\right], \quad (6)$$

式中  $(x_1, x_2)$  为像元边界,  $x$  为光斑中心在  $x$  轴方向的位置,  $\sigma_x$  为光斑在  $x$  方向的弥散半径。

CMOS 像元结构如图 3 所示, 为了找到  $x$  轴方向上光斑中心的亚像元位置, 把相邻像元的响应灰度进行比较,

$$I_1 = Ag(x, \sigma_x, a, b), I_2 = Ag(x, \sigma_x, c, d), \quad (7)$$

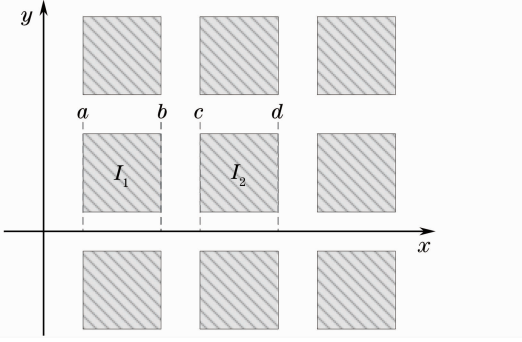


图 3 CMOS 探测器光敏阵列结构

Fig. 3 Light sensitive array of CMOS detector

式中  $a, b, c, d$  为  $x$  轴方向的像元边界,  $A$  表示像元采样积分影响因子, 对于尺寸相同的像元是一致的, 则有

$$g(x, \sigma_x, a, b) - \frac{I_1}{I_2}g(x, \sigma_x, c, d) = 0. \quad (8)$$

由于  $g$  是高阶非线性的, 为了求解  $x$  需要进行近似处理:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\left(z - \frac{z^3}{3} - \frac{z^5}{5 \cdot 2!} - \dots\right). \quad (9)$$

通过(9)式可以对  $g$  进行近似:

$$g = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(b-x) - \frac{1}{3}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(b-x)\right]^3 + \frac{1}{5 \cdot 2!}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(b-x)\right]^5 - \dots \right\} - \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(a-x) - \frac{1}{3}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(a-x)\right]^3 + \frac{1}{5 \cdot 2!}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x}(a-x)\right]^5 - \dots \right\}. \quad (10)$$

式中  $\sigma < 1$  时(10)式具有良好的收敛性<sup>[20]</sup>, 进一步展开并整理可得

$$g = \sum_n \frac{(-1)^{n-1}(b^{2n-1} - a^{2n-1})}{(2n-1)(n-1)!(\sqrt{2}\sigma_x)^{2n-1}} + x \sum_n \frac{(-1)^{n-1}(b^{2n} - a^{2n})}{n!(\sqrt{2}\sigma_x)^{2n+1}} + x^2 \sum_n \frac{(-1)^n(2n)(b^{2n-1} - a^{2n-1})}{2!n!(\sqrt{2}\sigma_x)^{2n+1}} + x^3 \sum_n \frac{(-1)^n(2n+2)(2n+1)(b^{2n} - a^{2n})}{3!(n+1)!(\sqrt{2}\sigma_x)^{2n+3}} + x^4 \sum_n \frac{(-1)^{n-1}(2n+2)(2n+1)(2n)(b^{2n-1} - a^{2n-1})}{4!(n+1)!(\sqrt{2}\sigma_x)^{2n+3}} + \dots \quad (11)$$

将(11)式近似到二阶, 由(8)式可得

$$\alpha x^2 + \beta x + \gamma = 0, \quad (12)$$

式中系数分别为

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \frac{I_1}{I_2}, \beta = \beta_1 - \beta_2 \frac{I_1}{I_2}, \gamma = \gamma_1 - \gamma_2 \frac{I_1}{I_2}, \quad (13)$$

式中  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  分别为第一个像元和第二个像元在(11)式中的展开系数。根据像元边界、光斑的高斯半径及相邻像元的灰度比, 求解上述方程可以得到光斑中心在  $x$  轴的坐标。

如果  $I_2$  为响应灰度值最大的像元,  $I_1$  为相邻的灰度值次大的像元, 求解得到的两根中较小的根为光斑中心位置坐标, 较大的根则代表  $I_2$  另一边的像元灰度值为次大的情况。 $y$  轴坐标的求解与此相同。

上述方法将二维高斯积分分离到两个坐标轴, 用误差函数级数描述高斯积分, 避免了对数和迭代运算, 相比高斯曲面拟合方法计算复杂度大大减小; 用二维高斯函数积分描述像元灰度响应, 与将像元

灰度值直接看成高斯分布上一个数据点的算法相比, 更符合实际情况, 从而提高了计算精度; 算法只利用光斑中心附近响应最大和次大像元的灰度值来进行求解, 避免使用距离光斑中心较远像元的信息, 能从一定程度上克服光斑非对称和噪声的影响。

## 4 光斑定位实验与结果

为了分析本方法的定位效果, 搭建如图 4 所示的实验系统。实验中分别用激光照射两型告警系统探测器。光源采用 MLL-H 型连续固体激光器, 波长  $1.319 \mu\text{m}$ , 发射光斑直径  $2 \text{ mm}$ , 发散角  $1.5 \text{ mrad}$ , 输出功率  $0 \sim 1 \text{ W}$  可调; 两探测器的鱼镜头一致, 视场角为  $180^\circ$ , 焦距为  $2.4 \text{ mm}$ , 相对孔径  $1/2$ ; 两探测器的 CMOS 成像传感器填充率和像元格式不同, CMOS1 面阵格式  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 像元大小为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ , 光敏区域大小为  $10.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ , 填充率约  $50\%$ ; CMOS2 面阵格式  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ , 像元大小为  $30 \mu\text{m} \times$

30  $\mu\text{m}$ ,光敏区域大小为 24  $\mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ ,填充率约 65%。在光路传输中根据需要,酌情添加中性衰减片。通过扩束准直系统对入射激光进行扩束。将探测器置于二维转台上,可在水平和垂直两个方向上以一定角精度旋转,根据 CMOS 的像元尺寸选取合适的步长,确保光斑中心经历从一个像元到相邻像元的移动过程。具体实验步骤如下:调整光路使转台的水平和垂直轴向与传感器像面坐标系的  $x$ 、 $y$  方向平行,调整 CMOS 的像面与鱼镜头焦平面的位置达到合适的微离焦状态;分别在水平和垂直方向上转动转台调整激光相对于探测器的水平入射角和垂直入射角来改变光斑位置,对于 CMOS1,步长为 1 mil(1 mil=25.4  $\mu\text{m}$ ),总转动量 10 步,总共采集 100 幅光斑图像,对记录得到的光斑分别用质心法、平方加权质心法、高斯曲面拟合法和本方法计算光斑中心,然后以  $60^\circ$  入射角为起始位置以 2 mil 步长重复上述实验步骤。CMOS2 分别以步长 2、4 mil 在近轴区域和  $60^\circ$  入射角区域进行同样实验。表 1

和表 2 分别为 CMOS1 和 CMOS2 的实验结果,每个传感器取 10 个光斑数据,序号 1~5 对应近轴区域光斑,6~10 为  $60^\circ$  入射角区域的光斑。

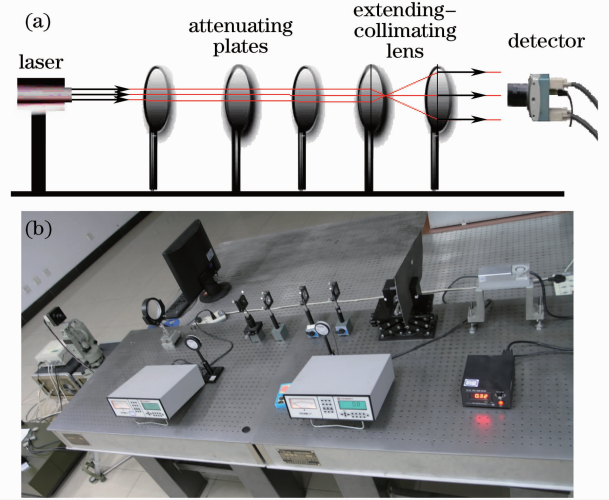


图 4 光斑中心定位实验平台框图(a)和实物图(a)  
Fig. 4 Schematic diagram (a) and photo (b) of laser spot location experimental platform

表 1 CMOS1 光斑定位实验结果

Table 1 Experimental data of each algorithm for CMOS1

Number	Actual coordinate		Simple centroid		Square-weighted centroid		Gaussian fitting		This paper	
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	3.157	5.402	3.113	5.453	3.125	5.443	3.135	5.416	3.137	5.413
2	3.498	5.826	3.455	5.891	3.465	5.872	3.489	5.849	3.491	5.845
3	3.839	6.258	3.932	6.303	3.896	6.289	3.854	6.267	3.856	6.268
4	4.182	7.211	4.241	7.296	4.231	7.271	4.168	7.233	4.197	7.226
5	4.521	7.959	4.493	7.842	4.497	7.894	4.530	7.984	4.532	7.981
6	691.384	993.615	691.325	993.659	691.343	993.643	691.397	993.628	691.394	993.626
7	691.726	994.129	691.656	994.214	691.687	994.193	691.741	994.151	691.712	994.149
8	692.069	994.643	692.242	994.697	692.145	994.697	692.097	994.625	692.095	994.628
9	692.410	995.167	692.464	995.253	692.448	995.215	692.419	995.188	692.411	995.187
10	692.757	996.201	692.681	996.290	692.624	996.275	692.739	996.219	692.743	996.220

表 2 CMOS2 光斑定位实验结果

Table 2 Experimental data of each algorithm for CMOS2

Number	Actual coordinate		Simple centroid		Square-weighted centroid		Gaussian fitting		This paper	
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	9.232	1.115	9.288	1.206	9.271	1.194	9.245	1.142	9.221	1.119
2	9.402	1.433	9.443	1.392	9.429	1.401	9.412	1.421	9.412	1.414
3	9.657	1.539	9.612	1.575	9.628	1.552	9.671	1.531	9.664	1.535
4	9.912	2.858	9.834	2.768	9.837	2.783	9.896	2.837	9.927	2.871
5	10.253	2.067	10.371	2.174	10.338	2.172	10.264	2.105	10.245	2.086
6	86.176	128.615	86.286	128.691	86.265	128.657	86.203	128.606	86.194	128.603
7	86.263	128.795	86.347	128.701	86.318	128.731	86.279	128.784	86.279	128.782
8	86.524	128.890	86.559	128.782	86.548	128.815	86.516	128.912	86.513	128.901
9	86.871	129.246	86.792	129.169	86.811	129.174	86.858	129.259	86.861	129.261
10	87.051	129.339	87.218	129.263	87.252	129.297	87.079	129.323	87.070	129.325

对比表中同种方法对不同位置光斑定位的数据可以发现,光斑中心落在像元中心位置附近时误差较小,随着光斑向非感光区域移动,误差不断增大,落在两像元中间时误差最大。分析可知,光斑在 CMOS 传感器表面移动过程中,每个受到光斑覆盖的像元光敏区域面积会发生非线性变化,导致定位结果随着光斑中心在像元内的位置变化而误差不同。比较而言,对 CMOS2 的定位误差普遍小于 CMOS1,这是由二者的填充率决定的。大入射角区域光斑的定位精度比近轴区域差,这归结于镜头像差对光斑形状和能量分布的影响。

定位在  $x$ 、 $y$  两坐标轴方向的处理是等价的,以 CMOS1 光斑的  $x$  坐标实验数据为对象,分别计算 4 种方法对近轴区域和大入射角区域各 100 个光斑的定位误差,结果如图 5 所示。由图可以看出,光斑从一个像元移动到相邻的像元,定位误差经历极小到

极大再到极小的重复过程。定位误差的周期性变化是由像元填充结构的周期性造成的。对比而言,质心法和平方加权质心法的定位误差较大,随光斑中心与像元中心相对位置的变化波动明显。在光斑中心靠近像元中心时,本文方法和高斯曲面拟合方法的定位精度相当,但随着光斑中心向非填充区域移动,本文方法误差略小于高斯曲面方法。在光斑对称性较差的大入射角区域,质心法和平方加权质心法的误差明显变大,最大误差近  $1/3$  pixel,本文方法和高斯曲面拟合方法的误差保持在  $1/40$  pixel 以下。计算近轴区域及大入射角区域本文方法和高斯拟合方法定位误差的标准差,本文方法比高斯拟合方法要小得多,这说明本文方法能够较好地克服像元填充率和像差对定位的影响,受光斑成像位置和能量分布变化的影响较小,性能更稳定。

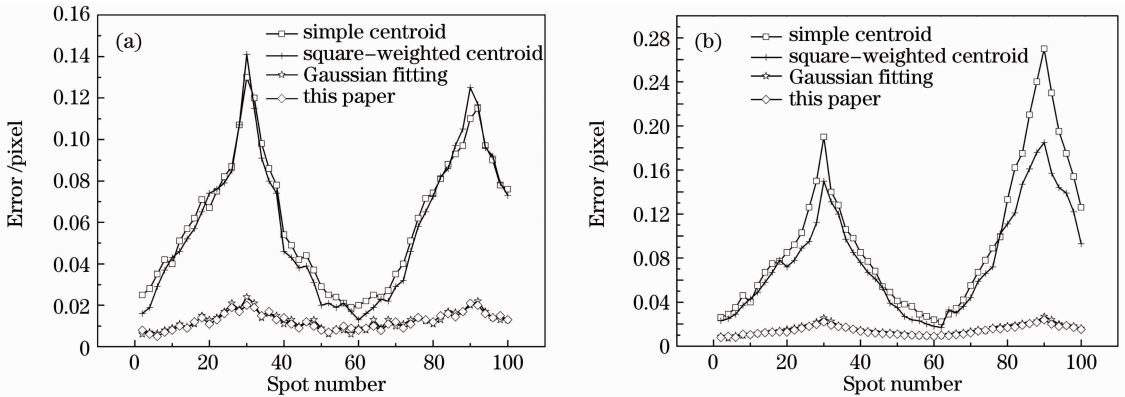


图 5 (a)近轴区域定位误差;(b)大入射角区域定位误差

Fig. 5 (a) Location error in paraxial region; (b) location error in big incident angle region

对  $x$ 、 $y$  轴方向坐标定位误差合成

$$\delta = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2}, \quad (14)$$

统计得到本文方法在近轴区域和大入射角区域光斑中心定位误差的最大值、最小值和误差均值如表 3、表 4 所示。

表 3 CMOS1 光斑定位误差统计结果

Table 3 Statistical data of error for CMOS1

CMOS1	Maximum	Minimum	Mean
Paraxial region	0.031	0.009	0.0127
Big incident angle region	0.034	0.0102	0.0146

表 4 CMOS2 光斑定位误差统计结果

Table 4 Statistical data of error for CMOS2

CMOS2	Maximum	Minimum	Mean
Paraxial region	0.0206	0.005	0.0112
Big incident angle region	0.025	0.008	0.0134

由表中数据可见,本文方法对两个传感器都表

现出良好的定位性能,在近轴区域定位精度约  $1/80$  pixel,大入射角区域的精度约  $1/70$  pixel,最大误差  $1/30$  pixel。

在基于 Pentium 3.2 G 的 Windows XP 的硬件平台上,算法对  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  面阵成像光斑定位的平均耗时在 10 ms 以下,满足典型告警系统反应时间小于 100 ms 的指标。

## 5 结 论

快速而准确的光斑中心定位是激光告警系统对威胁激光定向并采取有效对抗措施的前提。在采用 CMOS 传感器的成像型鱼眼激光告警系统中,鱼眼镜头的像差和 CMOS 传感器的非完全填充结构造成光斑点扩展函数畸变,使得传统亚像元细分方法性能变差,定位精度受光斑位置变化影响大。本文基于激光成像光斑能量高斯分布特征,研究了一种

用光斑中心响应最大和次大像元灰度比来求解质心位置的亚像元光斑定位方法。该方法定位精度高于传统质心法和平方加权质心法,对光斑中心在像元上的位置和镜头像差不敏感,在取得与高斯曲面拟合方法相当精度的同时大大减小了计算量,能够满足激光告警装备不同应用场合的定向精度和时效要求。此光斑中心定位方法还可用于成像型光电设备的校准。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yongzhong. Advanced Military Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003, 355~380  
王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 355~380
- 2 Wang Long, Wang Yongzhong, Shen Xueju *et al.*. Design of staring laser threat detection system based on Michelson interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0312003  
王 龙, 王永仲, 沈学举 等. 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0312003
- 3 Ying Jiaju. Research on Key Technology of Fish-Eye Imaging Laser Warning System[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009. 43~47  
应家驹. 鱼眼成像型激光告警关键技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2009. 43~47
- 4 Xie Lunzhi, Bian Honglin, Wang Zhenhua. Study of the subpixel interpolation of image spots with matrix detectors[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2003, **1**(2): 52~56  
谢伦治, 卞洪林, 王振华. 面阵探测器的像点亚像素定位研究[J]. *光学与光电技术*, 2003, **1**(2): 52~56
- 5 Li Yufeng, Hao Zhihang. Research of hyper accuracy subpixel subdivision location algorithm for star image [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 666~669  
李玉峰, 郝志航. 星点图像超精度亚像元细分定位算法的研究[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 666~669
- 6 Liu Danping, Zhang Lei, Guo Xiaoliang *et al.*. Novel approach for tracking accuracy enhancement in infrared spot image[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 186~189  
刘丹平, 张 磊, 郭晓亮 等. 提高红外光斑图像跟踪定位精度的新方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 186~189
- 7 Lu Quan, Liu Shangqian, Wang Huifeng. Precise location of laser spot center based on residual pruning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2311~2315  
卢 泉, 刘上乾, 王会峰. 基于残差修剪的激光光斑高精度定位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2311~2315
- 8 Li Ji, Tang Jianbo. High precision subdivided locating method of star image[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(2): 75~77  
李 季, 唐建博. 天文导航中星体高精度细分定位方法研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(2): 75~77
- 9 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Hu Hongzhan *et al.*. Iteration algorithm of surface fitting in the detection of light-spot position [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 33~35  
李为民, 俞巧云, 胡红专 等. 光点定位中的曲面拟合迭代算法[J]. *光学技术*, 2004, **30**(1): 33~35
- 10 Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Optical Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1672~1677  
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1672~1677
- 11 Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **20**(9): 812~815  
魏新国, 张广军, 江 洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **20**(9): 812~815
- 12 Wang Yongzhong. Fish-Eye Lens Optics[M]. Beijing: Science Press, 2006. 42~46, 61~64  
王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 42~46, 61~64
- 13 Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang *et al.*. Location error analysis of laser spot in imaging laser warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3): 431~436  
应家驹, 王永仲, 何永强 等. 成像激光告警的光斑定位误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(3): 431~436
- 14 Li Jie. Study the Key Technology of APS Star Tracher[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 93~104  
李 杰. APS星敏感器关键技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005. 93~104
- 15 Wang Hongtao, Luo Changzhou, Wang Yu *et al.*. An improved centroid algorithm for star point [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 55~59  
王洪涛, 罗长洲, 王 渝 等. 一种改进的星点质心算法[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 55~59
- 16 Liu Zhi, Zhai Linpei, Hao Zhihang. Sub-pixel measurement accuracy experiment of complementary metal oxide semiconductor imager[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 116~122  
刘 智, 翟林培, 郝志航. 互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元细分精度实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 116~122
- 17 Chen Yunjin, Feng Ying, Wei Li'an *et al.*. Experiment research on subpixel location error of the facula centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(2): 80~84  
陈运锦, 冯 莹, 魏立安 等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究[J]. *光电工程*, 2010, **37**(2): 80~84
- 18 Giancarlo Rufino, Domenico Accardo. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, **53**(2): 135~147
- 19 Li Chunyan, Xie Hua, Li Huaifeng *et al.*. Centroiding algorithm for high-accuracy star tracker[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(2): 41~44  
李春艳, 谢 华, 李怀锋 等. 高精度星敏感器星点光斑质心算法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(2): 41~44
- 20 Wang Bonian, Wang Hongguang. Study on the methods for computing error function erf  $x$  [J]. *J. University of Shanghai for Science and Technology*, 2004, **26**(6): 529~532  
王伯年, 王宏光. 误差函数计算方法的研究[J]. *上海理工大学学报*, 2004, **26**(6): 529~532