

针对散射激光的全向激光告警系统激光威胁源定位技术研究

张维安¹ 王 龙¹ 任建国²

(¹ 军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

(² 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对目前散射激光告警中只能定位到散射激光光斑,而不能追溯到敌方来袭激光源的现状,构建了战场环境下包括敌方威胁激光源、照射于某平台上的散射激光光斑以及全向激光告警系统在内的空间三维几何模型,推导了平台上散射激光光斑轮廓解析表达式,以及轮廓上任意一点相对鱼眼镜头的物方半视场角表达式。将成像于探测器上的光斑进行鱼眼成像畸变校正并取光斑边缘点,计算得到三维几何模型诸参数。再将模型参数与传感器阵列信息相结合,可最终获取敌方威胁激光源相对系统的方位和距离信息。最后对以上方法进行了实验验证并对产生误差的原因进行了分析。

关键词 机器视觉;全向激光告警;威胁源定位;散射激光光斑;三维模型;畸变校正

中图分类号 TN977; TP751.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0115004

Research on Laser Threat Source Localization of Omni-Directional Laser Warning System Based on Scattering Laser Detection

Zhang Weian¹ Wang Long¹ Ren Jianguo²

¹ Department of Optics and Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

² College of Opto-Electric Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In order to resolve the problem that scattering laser warning can only localize the scattering laser spot, but cannot trace back to the enemy laser source at the present time, A three-dimensional (3D) model in war field circumstances including the enemy laser source, the scattering laser spot on some flat and omni-directional laser warning systems is established. The analytic expressions of the scattering laser spot contour on flat and the object space half-field angle of any point on the contour relative to fish eye lens were obtained. Then the spot imaged on sensor was fish eye distortion corrected. And the points on spot edge were selected, accordingly the parameters of 3D model were acquired. Whereafter the parameters were combined with information of sensor array, thus azimuth and distance of the enemy laser source relative to the system could be attained finally. In the end the experimental results validated the method, the cause of errors was analyzed.

Key words machine vision; omni-directional laser warning; threat source localization; scattering laser spot; three-dimensional model; distortion correction

OCIS codes 120.1880; 150.0155; 100.2000

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-09-01

作者简介: 张维安(1979—),男,博士研究生,主要从事光电对抗及信息处理方面的研究。

E-mail: annz4678@yahoo.com.cn

导师简介: 王永仲(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗及信息处理等方面的研究。

E-mail: zhb_optics@yahoo.com.cn

1 引言

在现代战场上,激光制导武器对桥梁、大坝、机场跑道、电站和指挥中心等大型目标进行打击时,激光目标指示器形成的光斑通常只能覆盖目标上很小的一部分区域,此时如果采用直接截获式激光告警器保护大型目标,将使告警器布设量非常大,在工程上不现实。另外,当激光制导武器攻击较小的目标如坦克时,为了避免坦克上安装的激光告警设备提前发现,往往采取激光首先照射坦克附近物体的战术方法,当导弹接近目标时,才将照射方向转向目标,这样可以缩短激光告警设备做出反应的时间,使其不能有效地实施规避或干扰。在这种情况下,如果采用单纯的直接截获式激光告警器,将不能对目标起到有效地保护作用。针对以上两种情况,可以采用包括广角远心鱼眼透镜、窄带滤光片、面阵成像器件以及半球形传感器阵列在内的复合相关全向激光告警设备^[1,2],对半球空域^[3,4]内照射于目标或目标平台附近物体上散射激光光斑进行凝视探测和成像。此时如果仍沿用直接截获式激光威胁源定位的方法将只能定位到散射激光光斑上^[5~7],而不能确

定敌方激光照射源的方位,影响了干扰任务的实施。本文采用构建战场环境下包括敌方威胁激光源、照射于某平台上的散射激光光斑以及全向激光告警系统在内的空间三维几何模型的方法,并结合传感器阵列信息,试图解决此类问题。

2 基于散射探测的全向激光告警系统三维几何模型的建立

2.1 两套激光告警系统与激光光斑几何模型

如图 1 所示, o, o' 分别为两套鱼眼探测光学系统光心所在位置,两套系统位于同一水平面上,光轴指向相同,光心间距离为 l 。与两套鱼眼探测系统光心几乎重合的半球形传感器阵列中心,其中心指向与鱼镜头光轴平行,警戒范围同样为半球空域。两套鱼眼探测系统对共同视场中同一激光光斑(图 1 中位置 a 处,与两套系统不在同一水平面上)响应,分别成像于各自系统探测器像面上。传感器阵列也能够响应目标上激光光斑散射信号以及其散射截获半径以内的大气散射激光信号。

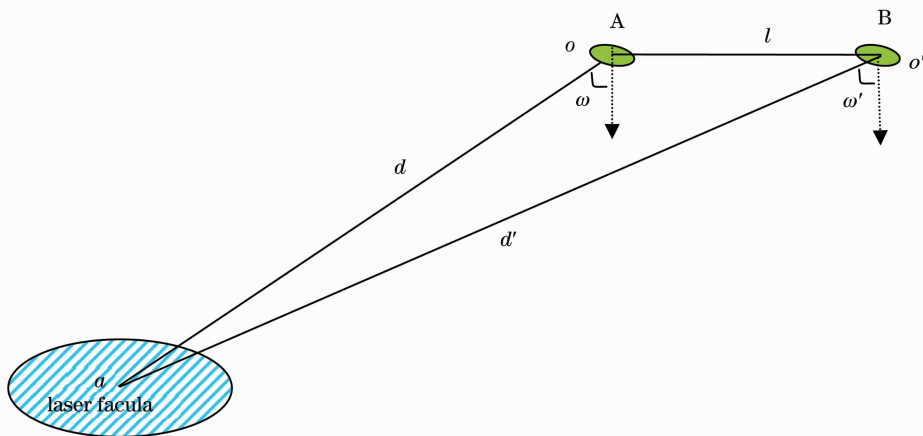


图 1 两套全向激光告警系统几何模型示意图

Fig. 1 Geometrical model of two sets of omni-directional laser warning systems

下面为探测系统 A 定位光斑中心的过程:首先对激光光斑采用 Canny 算子法做边缘检测^[8,9],提取出光斑边缘后,再应用鱼镜头的正交投影畸变校正模型^[10,11],对像面上的激光成像光斑进行畸变校正,得到非畸变的椭圆形状的校正后光斑。由校正后椭圆光斑即可以得到其严格意义上的光斑中心位置,然后再次应用正交投影畸变校正模型,将椭圆光斑中心点反演为畸变校正前像面上的对应点,此点即认为是畸变校正前光斑的中心。系统 B 也做相同处理,分别得到光斑中心相对于两个鱼镜头

的俯仰角,即图 1 中 ω, ω' ,于是可确定 d :

$$d = \frac{lc \cos \omega'}{\sin(\omega - \omega')} \quad (1)$$

2.2 单套激光告警系统与激光源、激光光斑几何模型

2.2.1 照射于平台上激光光斑的轮廓解析表达式

如图 2(a)所示,威胁激光源由 o_1 点发射激光,束散角为 2α ,传输距离为 R ,照射于某目标平面上,威胁激光光束与目标平台夹角 β 。过 o 点的平面 $x_1 o y_1$ 与光束中心线垂直并交于 o_2 点,则 $x_1 o y_1$ 光束截面上光斑为圆形光斑,在光斑边缘任取一点 a ,该点在坐标系 $x_1 y_1 z_1$ (图中 z_1 坐标轴未画出) 中的坐

标为 $(x_1, y_1, 0)$, 则该光斑轮廓在坐标系 $x_1y_1z_1$ 中的表达式为: $(x_1 - R \tan \alpha)^2 + y_1^2 = R^2 \tan^2 \alpha$ 目标平台为 $x_2o_3y_2, \overline{o_1a}$ 延长线交 $x_2o_3y_2$ 平面于 b , 该点在坐标系 $x_2y_2z_2$ (图中 z_2 坐标轴未画出) 中的坐标为 $(x_2, y_2, 0)$, 其中坐标系 $x_2y_2z_2$ 的原点在 o_3 点。再由 a 点和 b 点分别向平面 o_1ox_2 作垂线交于 a_1 点和 b_1 点, 则 $\triangle o_1o_3b_1$ 示意图见图 2(b), 其中 $\overline{o_1a_1} = x_1, \overline{o_3b_1} = x_2$ 。于是有

$$\overline{o_1a_1} = \sqrt{o_1o_2^2 + o_2a_1^2} = \sqrt{R^2 + (x_1 - R \tan \alpha)^2}, \quad (2)$$

$$\tan \gamma = \frac{\overline{o_2a_1}}{o_1o_2} = \frac{x_1 - R \tan \alpha}{R}. \quad (3)$$

又有

$$\frac{\overline{o_3b_1}}{\sin \gamma} = \frac{\overline{o_1o_3}}{\sin(\beta - \gamma)} = \frac{\overline{o_1b_1}}{\sin \beta}, \quad (4)$$

即

$$\frac{x_2}{\sin \gamma} = \frac{R + R \tan \alpha \cot \beta}{\sin(\beta - \gamma)} = \frac{\overline{o_1b_1}}{\sin \beta}. \quad (5)$$

因此,

$$x_2 = \frac{\sin \gamma}{\sin(\beta - \gamma)} (R + R \tan \alpha \cot \beta), \quad (6)$$

$$\overline{o_1b_1} = \frac{\sin \beta}{\sin(\beta - \gamma)} (R + R \tan \alpha \cot \beta). \quad (7)$$

在 $\triangle o_1bb_1$ 中, 有

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\overline{bb_1}}{a_1a_1} = \frac{\overline{o_1b_1}}{o_1a_1}, \quad (8)$$

即

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\sin \beta (R + R \tan \alpha \cot \beta)}{\sin(\beta - \gamma) \sqrt{R^2 + (x_1 - R \tan \alpha)^2}}. \quad (9)$$

综合以上, 可得到 $x_2o_3y_2$ 平面上光斑轮廓的解析表达式:

$$y_2^2 = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan^2 \beta} [(\tan \alpha - \tan \beta) x_2^2 \sin^2 \beta + 2R x_2 \tan^2 \alpha \sin \beta + R^2 \tan^2 \alpha (\tan \alpha + \tan \beta)], \quad (10)$$

即

$$\left[\frac{x_2 - \frac{R \tan^2 \alpha}{(\tan \beta - \tan \alpha) \sin \beta}}{\frac{R^2 \tan^2 \alpha \tan^2 \beta}{\sin^2 \beta (\tan \beta - \tan \alpha)^2}} \right]^2 + \frac{y_2^2}{\frac{R^2 \tan^2 \alpha (\tan \alpha + \tan \beta)}{\tan \beta - \tan \alpha}} = 1. \quad (11)$$

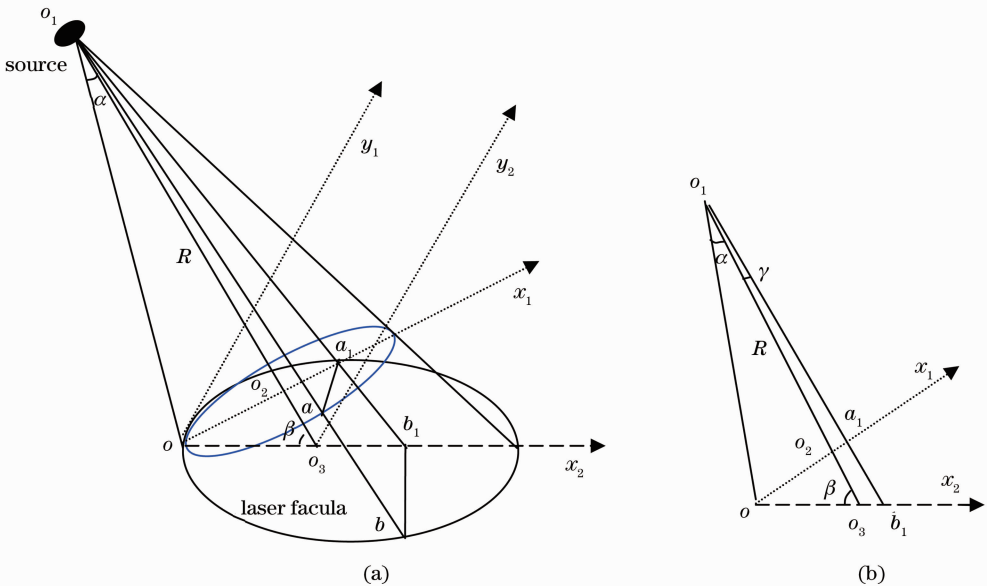


图 2 激光光束与目标平台上光斑关系示意图

Fig. 2 Relation between laser beam and the spot on target flat

2.2.2 平台上光斑边缘任意一点 b 相对鱼镜头头的物方半视场角

如图 3 所示, 探测器中心 o_4 与 o_3 距离为 d , o_4 相对于 o_3 的俯仰角为 θ , 方位角为 φ 。以探测器法线方向为坐标系 $x_3y_3z_3$ 中 z_3 方向, 由 o_4 向平面 $x_2o_3y_2$ 作

垂线交于 m 点, z_3 交平面 $x_2o_3y_2$ 于 n 点, $\angle mo_4n = \phi$, mn 延长线交 x_2 轴于 p 点, 则 $\angle mpq = \delta$ 。 o_4 点在坐标系 $x_2y_2z_2$ 中坐标为 $(d \sin \theta \cos \varphi, d \sin \theta \sin \varphi, d \cos \theta)$ 。设 n 点在坐标系 $x_2y_2z_2$ 中坐标为 $(x_n, y_n, 0)$, 在 $\triangle o_4mm$ 中满足

$$\left(\frac{d\cos\theta}{\cos\psi}\right)^2 = (d\sin\theta\cos\varphi - x_n)^2 + (d\sin\theta\sin\varphi - y_n)^2 + d^2\cos^2\theta. \quad (12)$$

在 $\triangle mpq$ 中满足 $\frac{d\sin\theta\sin\varphi - y_n}{d\sin\theta\cos\varphi - x_n} = \tan\delta$, 且有 $d\sin\theta\cos\varphi - x_n > 0$.

综合上面两式, 可得

$$\begin{cases} x_n = d\sin\theta\cos\varphi - d\cos\theta\tan\psi\cos\delta \\ y_n = d\sin\theta\sin\varphi - d\cos\theta\tan\psi\sin\delta \end{cases}. \quad (13)$$

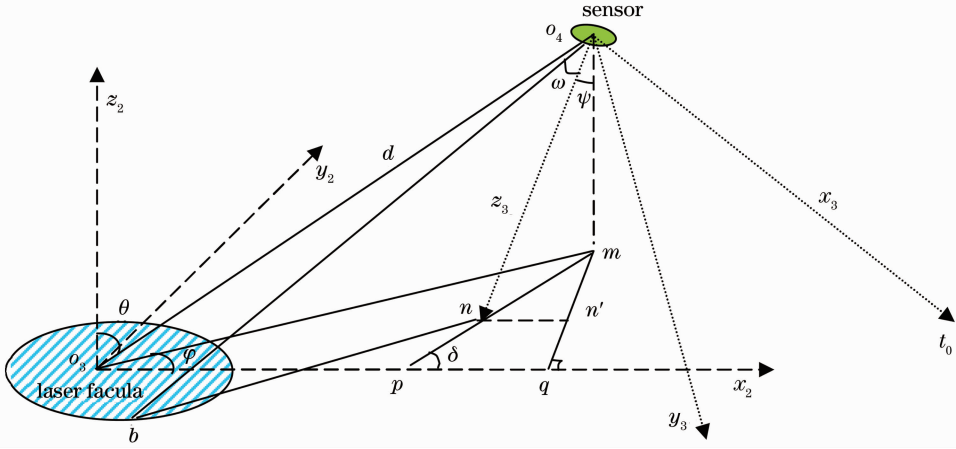


图 3 光斑与探测器平面位置关系示意图

Fig. 3 Relation between the spot and detector surface

在光斑边缘任取一点 $b(x_2, y_2, 0)$, 在 $\triangle bo_4n$ 中满足

$$\cos\omega = \frac{\overline{o_4b}^2 + \overline{o_4n}^2 - \overline{bn}^2}{2o_4bo_4n}, \quad (14)$$

其中 ω 为平台上光斑边缘任意一点 b 相对探测器(鱼镜头)的物方半视场角。(14)式即

$$\cos\omega = \frac{(2x_n - 2d\sin\theta\cos\varphi)x_2 + (2y_n - 2d\sin\theta\sin\varphi)y_2 + d^2 + \frac{d^2\cos^2\theta}{\cos^2\psi} - x_n^2 - y_n^2}{\frac{2d\cos\theta}{\cos\psi}\sqrt{x_2^2 - 2dx_2\sin\theta\cos\varphi + y_2^2 - 2dy_2\sin\theta\sin\varphi + d^2}}. \quad (15)$$

令 $p = 2x_n - 2d\sin\theta\cos\varphi, q = 2y_n - 2d\sin\theta\sin\varphi, r = d^2 + \frac{d^2\cos^2\theta}{\cos^2\psi} - x_n^2 - y_n^2, s = \frac{4d^2\cos^2\theta}{\cos^2\psi}, t = 2d\sin\theta\cos\varphi, u = 2d\sin\theta\sin\varphi, v = d^2$, 得到

$$\cos^2\omega = \frac{(px_2 + qy_2 + r)^2}{s(x_2^2 - tx_2 + y_2^2 - uy_2 + v)}. \quad (16)$$

3 由像面上光斑信息计算得到三维模型诸参数并与传感器阵列信息融合对激光光斑采用 Canny 算子法做边缘检测^[8,9], 提取出光斑边缘后, 在光斑边缘任意选取 10 个点, 这些点在像面平面坐标系 $x_3o_3y_3$ 中的坐标记为 (x_3, y_3) 。然后计算得到光斑边缘每个点对应的俯仰角, 每个俯仰角与光斑边缘的点一一对应, 计算公式如下:

$$\sin\omega = \frac{y_3'}{f} = \frac{\sqrt{x_3'^2 + y_3'^2}}{f}. \quad (17)$$

接下来应用鱼镜头的正交投影畸变校正模

型^[10,11], 对像面上的激光成像光斑进行畸变校正, 得到椭圆形状的校正后光斑。校正后光斑与平台上椭圆光斑形状相同, 大小不同。原光斑边缘点坐标 (x_3, y_3) 经校正变成坐标 (x_3', y_3') , 且 (x_3', y_3') 与 (x_3, y_3) 一一对应。

将像面坐标系原点平移至校正后椭圆光斑的中心, 并对此椭圆做基于最小二乘法的椭圆拟合^[12,13], 得到亚像素的椭圆上点的坐标, 因此 (x_3', y_3') 坐标变为 (x_3'', y_3'') 。则 (x_3'', y_3'') 满足方程 $\frac{x_3''^2}{a^2} + \frac{y_3''^2}{b^2} = k^2$, 其中 k 为 (x_2, y_2) 与 (x_3'', y_3'') 坐标的比例

大小,即 $x_2 = \frac{x_3''}{k}, y_2 = \frac{y_3''}{k}$ 。代入(16)式,得到

$$\cos^2 \omega = \frac{\left(p \frac{x_3''}{k} + q \frac{y_3''}{k} + r\right)^2}{s \left[\left(\frac{x_3''}{k}\right)^2 + \left(\frac{y_3''}{k}\right)^2 - t \frac{x_3''}{k} - u \frac{y_3''}{k} + v \right]} = \frac{(px_3'' + qy_3'' + kr)^2}{s(x_3''^2 + y_3''^2 - kt x_3'' - ku y_3'' + k^2 v)}. \quad (18)$$

将 10 组 (x_3'', y_3'') 以及每组 (x_3'', y_3'') 经由 (x_3', y_3') , (x_3, y_3) 对应的 $\cos \omega$ 代入(18)式,可求得 $p, q, kr, s, kt, ku, k^2 v$ 。其中已知 $k^2 v$, 又由(1)式得到 d , 因而得到 k 。于是可得到 p, q, r, s, t, u, v 。进一步可反推得到 $d, \theta, \varphi, \psi, \delta$ 。

再将任意三组与 (x_3'', y_3'') 对应的 (x_2, y_2) 坐标代入(11)式,可反推得到 $R, \alpha, \pm |\beta|$ 。此时,结合传感器阵列给出大气散射激光信号的方位信息,显然

容易判定 $|\beta|$ 的正负号,即在目标上椭圆光束的两个可能入射方向中判定其真实的入射方向。

4 由得到的几何模型诸参数确定敌方激光威胁源相对告警系统的位置信息

鱼镜头光心所在 o_1 点在坐标系 $x_2 y_2 z_2$ 中坐标为 $(d \sin \theta \cos \varphi, d \sin \theta \sin \varphi, d \cos \theta)$, 敌方激光威胁源所在 o_1 点在坐标系 $x_2 y_2 z_2$ 中坐标为 $(-R \cos \beta, 0, R \sin \beta)$ 。坐标系 $x_3 y_3 z_3$ 中 x_3 轴与地平面水平,但与 x_2 轴不平行,两轴夹角为 $\pi/2 - \delta$ 。 z_3 轴与 z_2 轴夹角为 $\pi - \psi$ 。

因此,坐标系 $x_2 y_2 z_2$ 要想达到与坐标系 $x_3 y_3 z_3$ 相同的位置和姿态,需要:首先将坐标系原点平移至 o_1 点,然后绕 x_2 轴转动 $\pi - \psi$,再绕 z_2 轴转动 $\delta - \pi/2$ 。设 o_1 点在坐标系 $x_3 y_3 z_3$ 中的坐标为 (x, y, z) , 则

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ -\sin\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi - \psi) & \sin(\pi - \psi) \\ 0 & -\sin(\pi - \psi) & \cos(\pi - \psi) \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} -R \cos \beta \\ 0 \\ R \sin \beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d \sin \theta \cos \varphi \\ d \sin \theta \sin \varphi \\ d \cos \theta \end{bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} -R \cos \beta \sin \delta - R \sin \beta \cos \delta \sin \psi - d \sin \theta \cos \varphi \sin \delta - d \sin \theta \sin \varphi \cos \delta \cos \psi + d \cos \theta \cos \delta \sin \psi \\ -R \cos \beta \cos \delta + R \sin \beta \sin \delta \sin \psi - d \sin \theta \cos \varphi \cos \delta + d \sin \theta \sin \varphi \sin \delta \cos \psi - d \cos \theta \sin \delta \sin \psi \\ -R \sin \beta \cos \psi + d \sin \theta \sin \varphi \sin \psi + d \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (19)$$

由 (x, y, z) 可得到 o_1 点相对鱼镜头光心的距离 $D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 以及俯仰角 $\Omega = \arccos \frac{z}{D}$,

方位角 $\Sigma = \arccos \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, (y \geq 0)$ 或 $\Sigma = 2\pi - \arccos \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, (y < 0)$ 。

综上所述,通过以上运算最终可得到敌方威胁激光源相对全向激光告警系统镜头光心的俯仰角、方位角以及距离信息。

5 实验验证

由于实验场地的限制,采用固定激光源位置,并照射固定配试目标,而变换探测系统位置的方法来完成实验。其中实验采用 A, B 两套相同的鱼眼成像探测系统,每套系统包括鱼镜头、窄带滤光片、互补型金属氧化物半导体 (CMOS) 高帧频面阵探测器系统、传感器阵列、图像处理卡和计算机平台等。其中鱼眼

镜头焦距 2.4 mm, 相对孔径 1/2, 视场角 180° ; 窄带滤光片中心波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 透过光谱宽度 $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$; 成像型面阵探测器为某型高速 CMOS 相机, 像元大小 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, 像元感光面积大小 $10.5 \mu\text{m} \times 6.0 \mu\text{m}$; 传感器阵列覆盖半球空域, 角分辨率 22.5° 。实验选用某型激光目标指示器作为脉冲激光源, 照射一面水泥墙体上的固定位置。实验中各项设备相对位置关系如前文图 1、图 3 所示, 实验检测系统结构及工作流程如图 4 所示。

实验中具体位置参数包括: $R = 1025 \text{ m}, 2\alpha = 0.44 \text{ mrad}, \beta = 32.45^\circ, \psi = 30^\circ, \delta = 60^\circ$ 。保持探测系统高度不变, 在相对水泥墙上固定照射点的俯仰角为 5° 的方向上, 依次选择距离水泥墙上固定照射点 5, 10, 15, 20, 25, 30 m 的位置摆放鱼眼探测系统 A, 不同的摆放点相对照射点具有不同的方位角。接下来依次进行俯仰角为 $7.5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 的方向上 5, 10, 15, 20, 25, 30 m 等不同距离点位置上的实

验,共计 32 个点位(由于探测系统高度的原因,部分位置点上无法摆放)。并在每个点位的右侧 10 m 处放置探测系统 B。探测系统在每个点位上采集 5 幅光斑图像,按照前文的方法进行图像处理和计算。

图 5(a)为探测系统相对水泥墙上固定照射点俯仰角 30°、方位角 7.66°、距离 15 m 时采集的一次激光光斑原始像,图 5(b)为相应光斑经过畸变校正与旋转后的像。

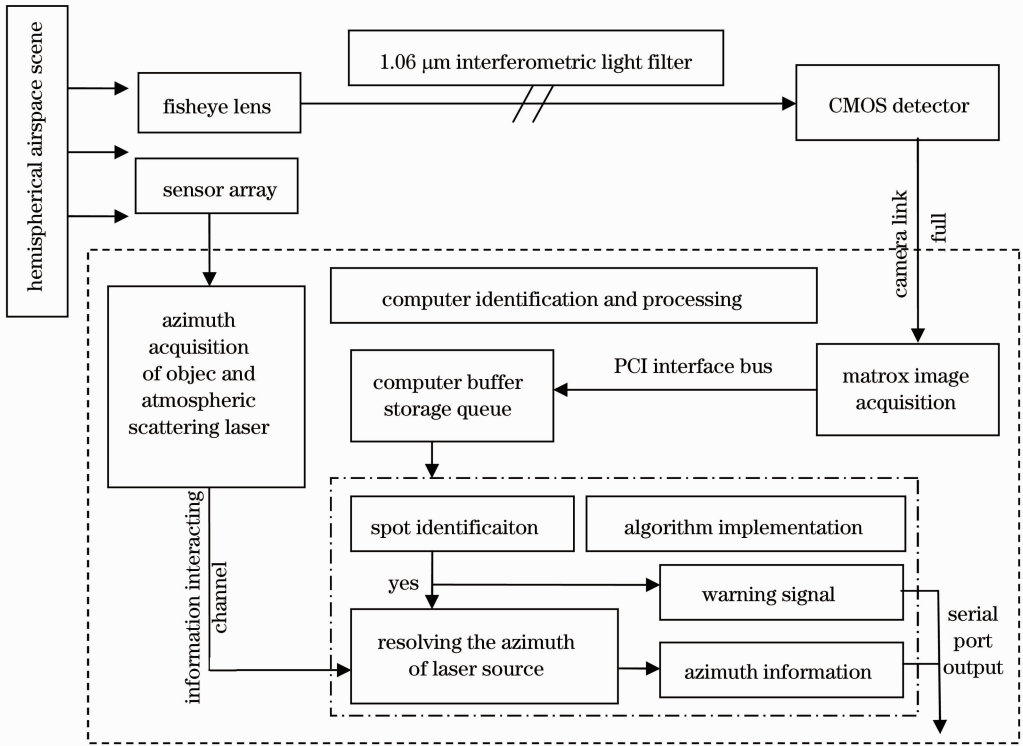


图 4 实验系统结构及工作流程图

Fig. 4 Structure and flow chart of testing system

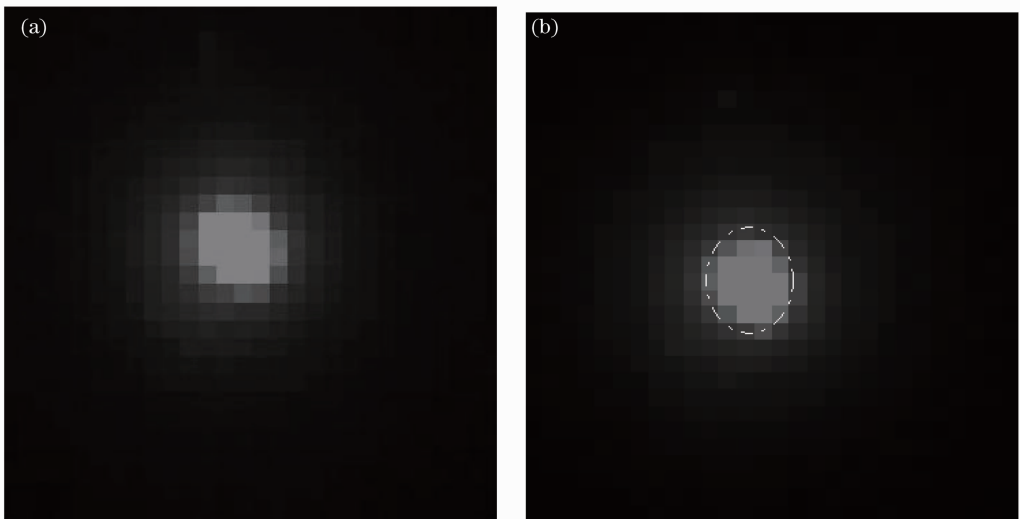


图 5 图像处理过程中激光光斑的图像

Fig. 5 Image of laser spot during image processing

图 6 为按照本文方法计算得到的 32 个点位上 D , Ω 和 Σ 的实验值与相应真实值的比较示意图,图中横坐标为实验顺序进行的 1~32 点位序号,纵坐标分别为 D , Ω 和 Σ ,点划线为各个点位上的真实

值,实线对应相应点位上的实验值。

如图 6 所示, D , Ω 和 Σ 的实验值基本围绕相应的真实值上下波动,但随着 θ 角度的增加和实验的进行,实验误差逐渐增大,尤其是距离 D ,到后期实

验值与真实值的差异有时甚至达到 1 倍以上。结合实验数据并分析实验过程可以得到,实验误差的来源主要包括三部分:1)由于探测器各像元响应差异以及探测器填充率等造成的误差;2)由边缘检测、畸变校正、椭圆拟合等算法引入的误差;3)由于大气湍流引起的光斑抖动、光斑漂移和光斑扩展造成的误差。实验前期的误差基本上由器件和算法原因引起。但在野外实验中,随着时间的推移气温逐渐升

高,因而大气湍流现象加剧,大气湍流对激光光束传输的影响也逐渐加大。大气湍流对实验结果的影响主要体现在光斑扩展上,而光斑抖动、光斑漂移对实验结果的影响总体来说与边缘检测、畸变校正和椭圆拟合等算法带来的误差相当。并且光斑扩展造成的误差主要体现在距离 D 上,对 Ω 和 Σ 则相对影响较小(事实上,对于激光告警而言,俯仰和方位角信息远比距离信息更重要)。

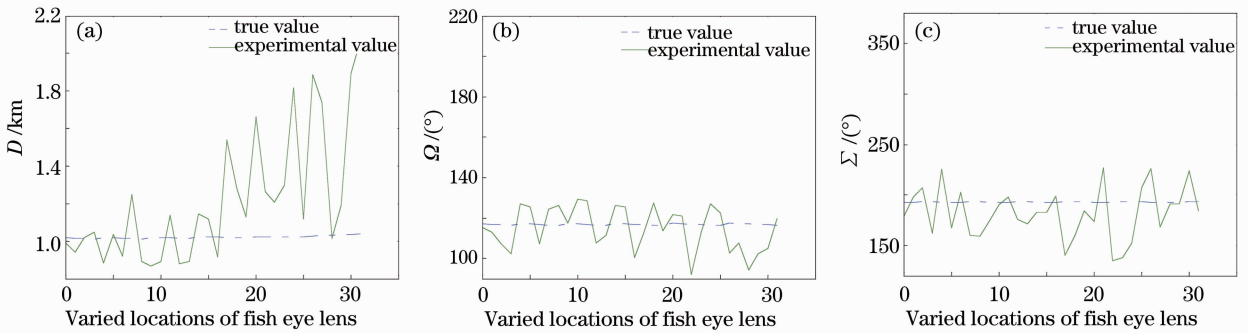


图 6 D 、 Ω 和 Σ 的实验值与相应真实值的比较示意图

Fig. 6 Comparison between experimental data and true data of D , Ω and Σ

另外,由于实验场地的限制,此次实验中激光光斑多成像于探测器成像区域上介于中心和边缘之间的位置,而探测误差与光斑的成像区域密切相关。一般来说,对于边缘检测、畸变校正、光斑抖动和漂移等引起的误差,成像中心区域小于边缘边缘;而对于光斑扩展带来的误差,中心则远远大于边缘。不管成像于何种区域,像面上光斑成像越大,占据像素个数越多,相应引起的误差越小。

6 结 论

采用构建战场环境下复合相关全向激光告警系统空间几何模型,由像面上光斑坐标反推几何参数的方法,并结合传感器阵列信息,得到了敌方威胁激光源相对告警系统的方位和距离。在对散射激光告警过程中对威胁激光的定向及信息获取是一种有益的尝试。但由于鱼镜头焦距短、探测器灵敏度和分辨率相对较低、探测器各像元响应有差别以及大气湍流等因素的存在,对定位模型带来了一定的误差。可以预见,随着器件水平的发展、边缘检测等算法的提高以及针对大气湍流对光束传输影响研究的深入,应用此方法可以取得更好的效果。

参 考 文 献

1 Wu Xinyu, Chen Yongjun, Zhang Huada *et al.*. Large field laser detection and warning technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(7): 5~7

吴新宇, 陈拥军, 张华达 等. 大视场激光探测与告警技术[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7): 5~7

2 Lang Wenjie. Research on two-dimensional overlapping coding for detection of laser direction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1374~1378

郎文杰. 基于二维交叠掩膜编码的全方向激光方向探测应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1374~1378

3 He Wuguang, Wu Jian, Wang Shifan. Design of laser detection and warning optical system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 48~51

何武光, 吴健, 王仕璠. 激光探测告警光学系统设计[J]. *光电工程*, 2006, **33**(7): 48~51

4 Wang Yongzhong. Fish-Eye Lens Optics[M]. Beijing: Science Press, 2006. 42~46, 61~64

王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 42~46, 61~64

5 Sun Aixian, Wang Jing, He Hengxiang *et al.*. Testing precision analysis of centrobaric of laser facula [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(6): 667~672

孙爱鲜, 王晶, 何衡湘 等. 激光光斑重心测试精度理论分析[J]. *激光技术*, 2004, **28**(6): 667~672

6 Zhang Xiuhua, Yang Kuntao. An improved 2D Hough transform method for extracting laser spot parameter [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(10): 995~997

章秀华, 杨坤涛. 一种改进的二维 Hough 变换提取激光光斑参数方法[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(10): 995~997

7 Lian Ming, Fu Hongya, Fu Sen. Study on precollimation based on Hough transforms and color character[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2385~2389

廉明, 富宏亚, 付森. 基于 Hough 变换和颜色特征的预瞄准技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2385~2389

8 Liu Chao, Zhou Jiliu, He Kun. Adaptive edge-detection method based on Canny algorithm [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, **31**(18): 4036~4039

刘超, 周激流, 何坤. 基于 Canny 算法的自适应边缘检测方法[J]. *计算机工程与设计*, 2010, **31**(18): 4036~4039

9 Ding Weili, Wang Wenfeng, Zhang Xuguang *et al.*. Extracting

- straight lines from building image based on edge orientation image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2904~2911
- 丁伟利, 王文锋, 张旭光等. 基于边缘方向图的建筑物直线特征提取[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2904~2911
- 10 Zhou Hui, Luo Fei, Li Huijuan *et al.*. Study on fisheye image correction based on cylinder model [J]. *Computer Applications*, 2008, **28**(10): 2664~2666
- 周 辉, 罗 飞, 李慧娟等. 基于柱面模型的鱼眼影像校正方法的研究[J]. *计算机应用*, 2008, **28**(10): 2664~2666
- 11 Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan *et al.*. Spot distortion calibration in measurement of laser intensity distribution based on imaging by scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 451~455
- 庞 森, 袁学文, 高学燕等. 散射成像法测量激光强度分布中的光斑畸变校正[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 451~455
- 12 Yan Bei, Wang Bin, Li Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, **34**(3): 295~298
- 闫 蓓, 王 斌, 李 媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, **34**(3): 295~298
- 13 Li Fei, Rao Changhui. Least square phase retrieval algorithm based on defocusing grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2813~2820
- 李 斐, 饶长辉. 基于离焦光栅的最小二乘波前复原算法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2813~2820

栏目编辑: 李文喆