

提高“猫眼”探测系统自动对焦性能的方法研究

王超 陈赫 李泳涛 吴烁 梁兆宪

北京航天飞行控制中心, 北京 100094

摘要 为提高自研“猫眼”探测系统的自动对焦性能,对主动激光图像散斑噪声、自动对焦窗口和视场变化三个对焦性能影响因素进行分析,分别提出了自动对焦改进算法及策略。实验证明,改进后,探测系统自动对焦性能明显提升,为探测系统后续预警提供了清晰准确的威胁目标激光图像。

关键词 图像处理;猫眼探测;激光图像;自动对焦;形态学滤波;对焦窗口

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.071001

Study on Methods of Improving Auto-Focus Performance of “Cat’s Eye” Detection System

Wang Chao Chen He Li Yongtao Wu Shuo Liang Zhaoxian

Beijing Aerospace Control Centre, Beijing 100094, China

Abstract In order to improve auto-focus performance of self developed “cat’s eye” detection system, three auto-focus performance influence factors are analyzed, which are speckle noise in active laser images, auto-focus windows and field of view. According to the three factors, modified auto-focus algorithm and strategy are proposed. The experimental results show that the modified methods indeed improve auto-focus performance. Furthermore, it provides vivid and precise active laser images of thread targets in order for subsequent early warning of the detection system.

Key words image processing; cat’s eye detection; laser image; auto-focus; morphology filter; focus window

OCIS codes 100.2960; 100.3008; 110.2970; 110.4280

1 引言

基于“猫眼”效应^[1-2]的威胁目标探测系统利用激光主动式成像,可以拍摄全天候影像,通过对图像的处理识别,能快速准确地发现狙击瞄准镜、夜视仪、望远镜等隐蔽武器的光学窗口,进而定位敌方目标,达到早期预警的目的。法国的SDL系列和俄罗斯的PAPV便携式激光对抗系统集“猫眼”探测、干扰、致盲为一体,已取得很好的实战效果。我国在此领域还处于研究摸索阶段,尚未形成有效的军事应用^[3-4]。

自研的威胁目标探测预警系统^[5]使用915 nm的近红外激光进行主动成像^[1],加装近红外滤光片的黑白CCD对激光回波进行采集,在高速数字信号处理器(DSP)上进行图像处理识别和发出预警信号。系统具有自动对焦功能,当镜头焦距发生改变时,自动对焦装置会带动对焦镜片组随动,根据设计的搜索算法在DSP中对图像进行清晰度判别,找到图像最清晰位置。目前市面上应用的自动对焦装置不具备针对近红外激光主动成像的功能,为增强系统的探测识别能力,提升预警效率,本文针对自研系统的成像特点,分析影响其自动对焦性能的几个因素,分别设计提高系统自动对焦性能的方法,并通过实验进行验证。

2 激光图像预处理

2.1 激光图像散斑噪声分析

自动对焦系统运用对焦函数^[6]对图像清晰度进行判定,而后位置伺服机构据此带动聚焦镜片组到达指定位置,使图像达到最清晰状态。可见,对焦函数是自动对焦系统能否准确对焦的关键,而函数的单峰性和灵敏度又是评判对焦函数好坏的重要指标。因此,提高这两项指标,可以提高自动对焦系统的性能。图像

收稿日期: 2014-02-13; 收到修改稿日期: 2014-02-24; 网络出版日期: 2014-06-18

作者简介: 王超(1987—),男,硕士,工程师,主要从事图像识别与光电检测等方面的研究。

E-mail: wangchao418800@163.com

的噪声干扰会使对焦函数曲线产生局部峰,使曲线灵敏度变差,影响自动对焦性能,甚至产生误对焦^[6]。因此,在计算对焦函数值之前,针对图像噪声进行预处理十分必要。

激光主动成像系统的成像原理如图1所示,激光器产生的近红外激光(915 nm)经扩束镜在物体表面反射,进入成像装置,光线经镜头和滤光片会聚成像于CCD光敏面上。由于物体表面粗糙尺度远大于激光波长,根据激光的干涉性,用波动光学和统计学的相关知识可推导出,激光图像的噪声服从负指数分布,被称为散斑噪声^[7-10]。散斑噪声是一种乘性噪声^[11-12],因此常用的中值滤波等去噪方法对其作用效果并不明显^[13]。

2.2 多方向线性结构形态学滤波法去噪

针对激光图像的特点,提出了多方向线性结构形态学滤波法进行图像去噪。形态学滤波有利于保持图像基本的形状特征,并除去不相干的结构。形态学基于逻辑“与”、“或”的基本操作还易于超大规模集成电路的实现,利于图像的实时处理^[6]。本探测预警系统要求在DSP上快速实时处理图像数据,进行高效准确的识别预警,因此适合运用此方法进行图像预处理。

为使用形态滤波去噪,首先要构造合适的结构元素作为掩膜。由上所述,激光图像的散斑噪声是乘性的,在某些点处会产生像素值的剧烈变化。为了尽量避免结构元素在进行掩膜运算时与尖锐的散斑噪声点相乘,舍去传统的 $N \times N$ 结构,选用线性结构元素作为掩膜。鉴于单一线性结构不利于图像其他方向几何结构信息的保持,构造如图2所示的多方向结构元素,进行并行掩膜计算。

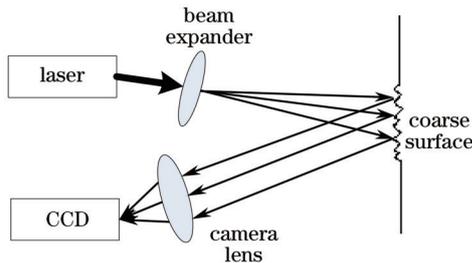


图1 激光主动成像原理图

Fig.1 Active laser imaging principle

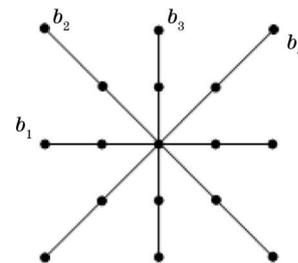


图2 多方向线性结构元素

Fig.2 Multidirectional line-type structure element

首先使用图2中4个方向的结构元素并行地对图像进行形态学开-闭和闭-开操作^[14],即

$$g_k(s, t) = \{ [f(s, t) \circ b_k] \cdot b_k \} (s, t), \quad (1)$$

$$g'_k(s, t) = \{ [f(s, t) \cdot b_k] \circ b_k \} (s, t), \quad (2)$$

式中 $f(s, t)$ 为原图像, b_k 为结构元素, $k=1,2,3,4$ 。

对4个方向的形态滤波结果相加求平均,即得到最终的去噪结果为

$$F(s, t) = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^4 [g_k(s, t) + g'_k(s, t)]. \quad (3)$$

2.3 实验结果分析比较

图3为系统激光器关闭和开启状态下成像系统捕获的相同场景图像。图3(a)和图3(b)相同区域放大后可以看到,激光开启后图像内出现了明显的散斑噪声。

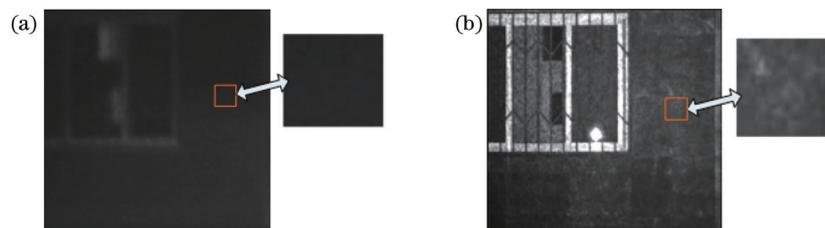


图3 成像系统捕获的相同场景图像。(a) 激光关闭;(b) 激光开启

Fig.3 Same image caught by imaging system. (a) Laser close; (b) laser open

对图3场景不同离焦程度的图像进行预处理,将去噪前后的图像序列进行清晰度评价运算,所得对焦函数曲线如图4所示。

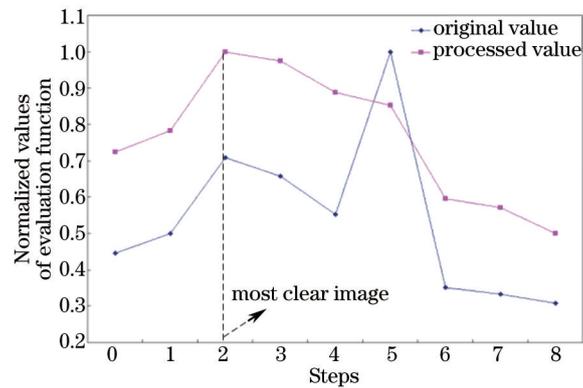


图4 激光图像去噪前后对焦曲线

Fig.4 Focus curves of origin laser image and denoising image

由图4可以看到,原图像经过噪声抑制后,对焦函数曲线明显变得更为平滑。尤其值得注意的是,预处理后的对焦曲线与原始曲线相比,消除了横坐标为5的一个局部峰(此局部峰值足以影响全局最大值判断,从而造成误对焦),此时的最大峰值就是最清晰图像的对焦函数值。由此验证,经本文方法预处理后,确实改善了对焦函数曲线的性能。

3 对焦窗口选取

前期探测能快速、清晰地捕获威胁目标,是系统后续预警可靠性的重要保证。因此,需要尽可能提高成像系统自动对焦模块的实时性和准确性。

对图像运用对焦函数的运算量基本上和参与运算的像素数成正比^[6],参加运算的像素越多实时性越差;另外,对整幅图像进行运算时,目标以外的背景和激光反射的亮斑不均匀,会对图像清晰度的判断产生负面影响,使对焦准确性下降。基于以上考虑,需要选取合适的对焦窗口,仅对窗口内感兴趣的图像(威胁目标)进行清晰度评价运算。

3.1 常用对焦窗口分析

中心区域法是常用的对焦窗口选取办法,其选取几何中心与整幅图像重合的矩形区域为自动对焦的窗口。此方法适用于感兴趣的目标物体处于图像中心区域的情况,当拍摄的目标物体不在中心区域,且与窗口中其他景物的距离大于成像系统的景深时,自动对焦系统常常不能清晰对焦于目标物体上。

为了克服中心区域法的缺陷,人们设计了多区域选择法。这种方法通常是在对整体图像进行统计的基础上,选取某些有意义的区域放置窗口。但是,感兴趣的成像目标一般只被多区域窗口中的一到两个窗口包含,其他窗口引入的非对焦区仍然需要进行对焦函数值计算,不仅增加了运算量,而且还会对对焦函数曲线的灵敏度和单峰性产生一定的负面影响,降低自动对焦系统的性能。

3.2 图像二值边缘一阶矩选取法

为了避免非对焦区域的干扰,在更小运算量的条件下准确对焦,提出图像二值边缘一阶矩对焦窗口选择办法,该方法可以使窗口自适应对准目标物。

矩函数^[15]在模式识别、目标分类、方位估计、图像编码与重构等图像分析中有着广泛的应用。一个从一幅数字图像中计算出来的矩集,通常描述了该图像形状的全局特征。计算灰度图像一阶矩,可以得到图像质心^[11]为

$$G_1 = (G_x, G_y) = \left(\frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N (i - \frac{1}{2}m) \cdot f(x, y)}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(x, y)} + \frac{1}{2}m, \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N (j - \frac{1}{2}n) \cdot f(x, y)}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(x, y)} + \frac{1}{2}n \right), \quad (4)$$

以此点为中心来选取对焦窗口可以使窗口偏向质量大的区域,即图像中包含明亮(灰度值大)物体多的区域。

激光主动探测成像基于“猫眼”效应,通过探测具有此效应的光学窗口来发现威胁目标。具有“猫眼”效应的光学窗口在激光图像上显示为非常明显的亮斑。因此,以图像一阶矩为中心来构造对焦窗口,窗口会自动

趋向于感兴趣的对焦目标。

实际情况中,激光回波强度从中心向周围会逐渐减弱,由此造成图像亮度的不均匀分布会影响图像质心的位置^[16],使其偏向对焦目标物的程度减弱。

为了避免激光光斑的影响,在求取一阶矩前先对图像进行边缘提取,再设置合适的阈值,进行二值分割。处理后的图像中,边缘细节部分成为亮度高的成分。这样,就成功地将图像质量的衡量指标,从光强分布转化为图像边缘细节分布。因此,对图像进行二值边缘处理后,可以认为图像的质心趋向于边缘细节成分丰富的区域。

在300 m距离上,用激光主动成像系统摄取目标物体偏离中心区域的图像[如图5(a)所示],并进行二值边缘一阶矩计算[如图5(b)、(c)所示],图中实线方框为所选90 pixel×72 pixel的对焦窗口,十字叉心所指为图像一阶矩。

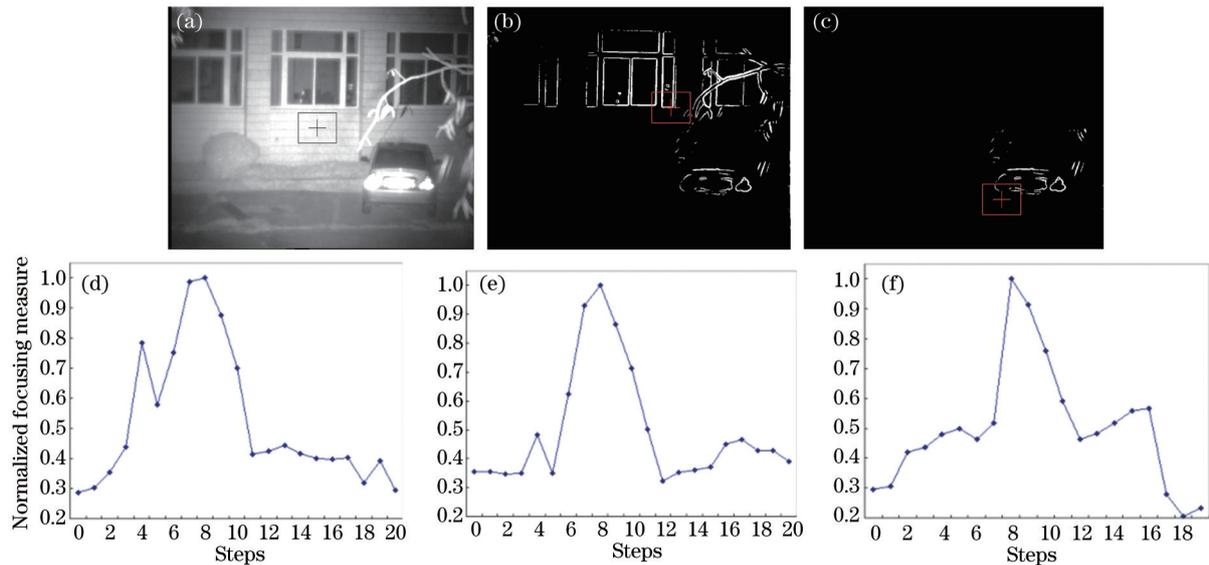


图5 (a) 原图像一阶矩窗口;(b) 图像二值边缘一阶矩窗口;(c) 1/2 图像二值边缘一阶矩窗口;(d) 图(a)对焦曲线;(e) 图(b)对焦曲线;(f) 图(c)对焦曲线

Fig.5 (a) First order window of origin image; (b) binary marginal first order window; (c) 1/2 binary marginal first order window; (d) focus of (a); (e) focus of (b); (f) focus of (c)

图5(a)显示对原图求取一阶矩,得到的图像质心在中央附近,窗口中内容为墙面;图5(b)显示对原图进行二值边缘提取后再进行一阶矩计算,图像质心会偏向右上方,由于背景边缘细节清晰且丰富,因此对焦窗口中并未包含目标物(汽车);仅对下1/2的图像进行二值边缘一阶矩计算,所得结果如图5(c)所示,由于此范围内图像只包含目标物和平缓的地面、墙面,因此二值边缘一阶矩窗口自动置于边缘细节丰富的目标物上。

对20幅不同离焦程度的图像,运用上述3种不同位置的窗口进行清晰度评价,所得对焦曲线如图5(d)~(f)所示。图5(d)中曲线最大值峰邻域内呈现高原形状,横坐标为4的位置出现干扰较大的局部峰;图5(e)中曲线的峰值更加尖锐,单峰性较好,横坐标为4的局部峰值大幅减小;图5(f)中曲线的最大值峰最尖锐,局部峰已经消除,在此条件下,对焦函数灵敏度和单峰性相比最优。

综上所述,激光图像清晰度评价过程中,二值边缘一阶矩窗口可以消除激光回波光强分布不均对焦函数带来的干扰,使对焦窗口自适应偏向图像边缘细节更丰富的区域,提高了对焦精度。与常用的几种窗口选取法相比,该方法不仅参与运算的像素数少,而且具有自适应特性,扩展了系统的应用范围。

4 误对焦情况下的自动监测与校正

自动对焦以对焦函数值作为图像是否清晰的判断依据,当所拍摄的外部场景或系统焦距有较大改变时,对焦函数值也会发生较大变化,使对焦函数曲线的形状和位置发生改变(如图6所示),导致系统出现误对焦情况。

为避免误对焦的发生,自动对焦系统需要有一种监测机制,在对焦搜索过程中,可以自动发现由于场景

或焦距改变所引起的误对焦,并且及时予以校正。

本文研究的自动对焦系统采用遍历搜索策略^[5],如图6所示,位置伺服机构搜索完毕,会回到对焦函数曲线1的最大值 $F(a)$ 所对应的横坐标 a 点位置(即图像最清晰位置),此时引入监测机制:位置伺服机构回到 a 点时,重新计算当前图像的对焦函数值 $F'(a)$,设置合适的阈值 T [T 为 $F(a)$ 与上一位置图像对焦函数值差值的1/5]:

1) 当 $|F(a) - F'(a)| \leq T$ 时,仍可以认为 a 点位置是遍历搜索中图像最清晰的位置;

2) 当 $|F(a) - F'(a)| > T$ 时,认为在搜索过程中外部场景或系统焦距发生了较大改变,图像最清晰位置已经不在 a 点,而在曲线2的 b 点,这时需要系统控制位置伺服机构重新进行此段的遍历搜索,找到最大值 $F'(b)$ 所对应的横坐标 b 点位置(场景改变后图像最清晰的位置)。

至此,系统完成了误对焦情况下的自动监测与校正。

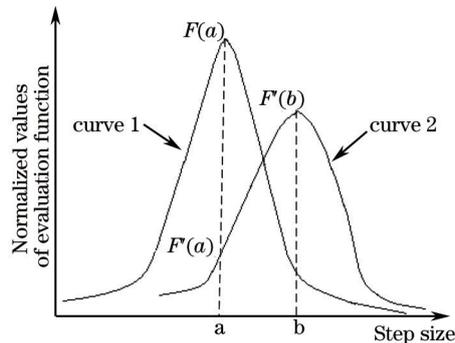


图6 误对自动焦判别与校正示意图

Fig.6 Automatic identification and correction of focus mistakes

5 结 论

对影响“猫眼”探测系统自动对焦性能的因素进行了分析研究。用多方向线性结构形态学滤波对激光图像进行预处理,实验证明,此方法可明显改善对焦函数曲线的形状;利用图像二值边缘一阶矩算法,自适应地选取对焦窗口,减少了系统中数字处理器的运算量;构造了一种自动监测与校正机制,避免了自动对焦过程中出现的误对焦情况。该方法通过控制自动对焦性能影响因素,达到了改善自动对焦性能、提高系统对焦精度的目的。

参 考 文 献

- 1 Shi Guang, Zhang Haiyang, Geng Zhongfu, *et al.*. Experiment of large field laser active detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 890-894.
时光,张海洋,耿仲博,等.大视场激光主动探测系统试验[J].*红外与激光工程*, 2013, 42(4): 890-894.
- 2 Tong Lanjuan, Jiang Xiaoyu, Song Xiaoshan, *et al.*. Target detection based on laser imaging with “cat eye effect” [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 982-985.
同兰娟,蒋晓瑜,宋小衫,等.基于“猫眼效应”激光成像的目标探测[J].*激光与红外*, 2009, 39(9): 982-985.
- 3 Novichikon N. Portable automatic device for optical and electronic countermeasures[J]. *Arms Show News*, 2005, 13(1): 27.
- 4 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, *et al.*. Reserch and prospect of cat-eye effect used for active laser detection technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 102802.
赵延仲,孙华燕,宋丰华,等.猫眼效应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势[J].*激光与光电子学进展*, 2010, 47(10): 102802.
- 5 Jiang Xiaoyu, Wang Chao, Wang Xi. Research on auto-focus system for multispectral common aperture imaging platfrom[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2011, 25(3): 44-48.
蒋晓瑜,王超,汪熙.多光谱共孔径成像自动聚焦系统研究[J].*装甲兵工程学院学报*, 2011, 25(3): 44-48.
- 6 Liu Xingbao. Research on Outo-Focus Technique Based on Image Processing[D]. Mianyang: China Academy Engineering and Physics, 2007.

- 刘兴宝. 基于数字图像处理的自动对焦技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.
- 7 Jiang Lihui, Wang Chunhui. A speckle imaging model for impulse coherent laser radar and suppressing its speckle noise [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(12): 1623-1628.
蒋立辉, 王春晖. 脉冲相干激光雷达的散斑成像模型及其散斑噪声压缩[J]. *光学学报*, 2000, 20(12): 1623-1628.
- 8 Cheng Chuanfu, Qi Dongping, Liu Deli, *et al.*. The computational simulations of the Gaussian correlation random surface and its light-scattering speckle field and the analysis of the intensity probability density[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 48(9): 1635-1643.
程传福, 亓东平, 刘德利, 等. 高斯相关随机表面及其光散射散斑场的模拟产生和光强概率分析[J]. *物理学报*, 1999, 48(9): 1635-1643.
- 9 Guo Guanjun, Shao Yun. Rough surfaces induced speckle effects on detection performance of pulsed laser radar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7): 2089-2093.
郭冠军, 邵芸. 激光散斑效应对激光雷达探测性能的影响[J]. *物理学报*, 2004, 53(7): 2089-2093.
- 10 Wen Donghai, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo, *et al.*. Speckle characteristics of laser radar polarization imaging and despeckling algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311003.
闻东海, 江月松, 张绪国, 等. 激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311003.
- 11 Zhang Yujin. *Image Engineering*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
章毓晋. *图像工程*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- 12 Song Ningfang, Yang Dezhao, Sun Mingjie, *et al.*. Impact of speckle noise to the property of coherent lidar system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1005001.
宋凝芳, 杨德钊, 孙鸣捷, 等. 散斑噪声对相干激光雷达系统性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1005001.
- 13 Zhang Xianling, Gao Wanrong, Bian Haiyi, *et al.*. Study of de-noising based on empirical mode decomposition method in optical coherence tomography[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(3): 602-608.
张仙玲, 高万荣, 卞海溢, 等. 基于经验模式分解法的光学相干层析成像去噪研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(3): 602-608.
- 14 Zhao Mingbo, He Jun, Tian Junsheng, *et al.*. Ladar data filtering method based on improved progressive multi-scale mathematic morphology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0328001.
赵明波, 何峻, 田军生. 基于改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达数据滤波方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0328001.
- 15 Ma Junguo, Huang Mengjun. Target recognition algorithm based on combination moments for laser imaging radar[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0609003.
马君国, 黄孟俊. 基于组合矩的激光成像雷达目标识别算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0609003.
- 16 Zhang Shaodi, Sun Honghai. High precision method of long-ranged laser spot position measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0708003.
张少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0708003.