

超大视场红外凝视成像技术及其应用浅析

张 帅,刘秉琦,黄富瑜,张冬晓,余 皓
(军械工程学院电子与光学工程系,河北 石家庄 050003)

摘 要:超大视场红外凝视成像技术具有视场大、实时探测、系统体积小等突出优势,广泛应用在空间探测、视频监控、大气环境监测、军事目标预警等重要领域。文章首先主要介绍了大视场红外凝视成像技术的突出优势及研究现状,然后阐述了相关的关键技术及研究方法,并评价和分析了这些方法在实际应用中的效果和不足。针对这些不足,提出了一些改进方法,最后分析了大视场红外凝视成像技术的潜在应用,展望了这项技术的改进和发展方向。

关键词:红外成像;超大视场;凝视;应用

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.002

Super wide field of view staring infrared imaging technology and its application

ZHANG Shuai, LIU Bing-qi, HUANG Fu-yu, ZHANG Dong-xiao, YU Hao

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

Abstract: Super wide-field staring infrared imaging technology has many characteristics such as wide-field, real-time detection and compactness. The technology plays an important role in space detection, video monitoring, atmospheric environment monitoring and early warning of military targets. Firstly, remarkable advantages and research status of super wide-field staring infrared imaging technology are introduced. Secondly, relevant key technologies and research approaches are elaborated. The effect and weakness of these approaches in engineering practice are evaluated and analyzed. And some improved methods are proposed to overcome its weakness. Finally, the potential applications of super wide-field staring infrared imaging technology are analyzed. Meanwhile, the enhancement and development direction of this technology are outlooked.

Key words: infrared imaging; super wide-field; staring; application

1 引 言

随着光电侦察技术在军事应用方面的不断深入,提升“全空域包容、全时域实时”^[1]的战场感知能力已成为世界各国追求的共同目标。为解决现代战争闪电式立体攻击与光电侦测视角小之间的矛盾,各国都争相研究能够“实时探测战场全方位目标”的感知技术,为此,小视场旋转/扫描、多传感器拼接、折反射全景成像、超大视场红外凝视成像等技术相继产生,以弥补现有光电侦察装备视场小的不

足。其中,超大视场红外凝视系统因其体积小、质量轻、功耗低、实时性好、单机空时域覆盖率高等优点,在机器视觉^[2]、自主导航^[3]、激光告警^[4]、目标跟踪和识别^[5]等领域具有广阔的应用前景。

超大视场红外凝视成像技术利用特殊的光学镜头来获取大于普通视场的红外凝视场景。本文通过对比四种大视场成像技术,介绍了超大视场红外凝视成像技术的突出优势和相关关键技术,并且分析了这些技术中存在的问题,提出了一些改进的方法。

最后,展望了超大视场红外凝视成像技术的潜在应用。

2 研究现状

2.1 超大视场红外凝视成像技术优势

人眼凝视视角一般为 46° ,人眼在转动时,水平和竖直方向上的平均值大约是 145° ,这也是工程上定义的人眼总视角^[6]。在工程上,镜头按照视场角大小主要分为四类,如表 1 所示。

表 1 镜头分类

Tab. 1 The classification of lens

视场角 2ω	镜头类型
$45^\circ \leq 2\omega < 60^\circ$	标准镜头
$60^\circ \leq 2\omega < 80^\circ$	广角镜头
$80^\circ \leq 2\omega < 120^\circ$	超广角镜头
$2\omega \geq 120^\circ$	鱼镜头

超大视场红外凝视成像技术就是基于超广角镜头或者鱼镜头来获取凝视超大视场。当前,除了超大视场红外凝视成像技术外,在红外波段获取大视场红外图像的方式主要还有三种,分别是:1)小视场扫描技术;2)多镜头拼接技术;3)折反射全景立体成像技术。图 1 中(a),(b),(c),(d)分别为小视场云台镜头、多镜头拼接及图像、折反射镜头及图像、鱼镜头及图像。



(a) 云台镜头



(b) 多镜头拼接及图像



(c) 折反射镜头及图像



(d) 鱼镜头及图像

图 1 四种大视场成像方式

Fig. 1 Four imaging modes of wide-field

图 2 为小视场旋转扫描技术,这种方法的实时性较差,可靠性低;多镜头拼接系统体积庞大,结构复杂,实用性不强;折反射全景立体成像技术的成像中心存在“盲区”,而且系统体积庞大,尤其在军事上的使用比较受限。

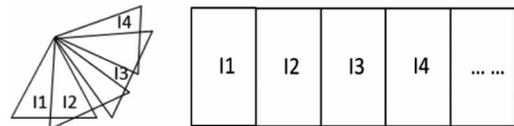


图 2 旋转扫描成像模型

Fig. 2 The imaging model of rotary scanning

相比之下,超大视场红外凝视成像技术具有以下特点:

(1) 空域覆盖率大

超大视场红外凝视成像在单幅图像中的视场角就可以达到 80° 以上,可以大范围覆盖侦测区域,基本可实现对来自各个方向威胁的侦察、感知。

(2) 时域漏警率低

超大视场能在大空域中包容威胁目标的运动轨迹,可以准确、实时地捕捉威胁目标,确保了跟踪目标在时域运动中不容易丢失,降低了侦测漏警率。

(3) 结构简单,实时性强

超大视场红外凝视系统一般只包括镜头、大面阵探测器和信号处理单元,而且系统单元瞬时视场大,无需转动镜头即可实现多目标跟踪,因此系统结构紧凑、轻便。

2.2 超大视场红外凝视成像技术研究动态

美国从 20 世纪 90 年代开始研究超大视场红外

凝视技术,2001年,将长波红外鱼眼(LWIR)和自适应红外传感器(AIRS)组合研制出微小红外成像应用开发系统(MIRIADS)样机^[7],能够凝视 $2\pi\text{sr}$ 的范围。图3是美军在2002年对MIRIADS的地基实验和预警功能试验。2007年,Immer Visio公司提出一种具有多重分辨率的鱼镜头设计方案,镜头能够将所成像的视场分为三个不同分辨率的视场^[8-9]。此外,美国在F-35战斗机上配备了六片单视场为 90° 的红外传感器,提升了飞机全方位侦察的水平。



图3 地基演示系统及 LWIR 和 AIRS 的组合

Fig. 3 Terrestrial system and conjunction with LWIR, AIRS

德国在2003年研究的PIMAWS视场角达到了 105° ,配合步进扫描视场角可达到 $\pm 105^\circ$ 。

2011年,法国MBDA公司为“阵风”战机研制配备了新的导弹探测系统,系统主要利用了双红外鱼眼反向对称部署方式,战机可以利用这套系统实现对导弹来袭的全向预警,图4是战机及机载鱼眼成像。同年,在美国举办的SPIE防御、安全和传感器展览会上,法国Sofradir和Onera实验室联合展示了采用集成鱼眼光学部件的新型红外探测器,这有利于减小导弹告警系统的相关光学传感器的尺寸,并且变得更加坚固。

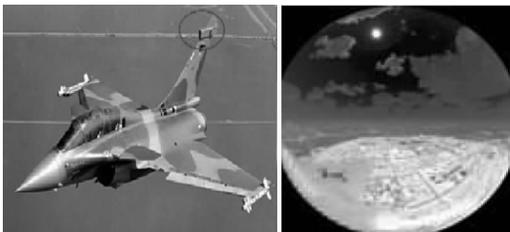


图4 法国战机及机载鱼眼成像

Fig. 4 France fighter and image of airborne fish-eye

国内在超大视场红外凝视成像方面的研究也较为成熟,许多学者专家利用该技术设计出了大视场红外凝视系统或镜头,并且广泛应用在各个领域。王永仲^[10]从1988年开展红外鱼眼光学研究,在1997-2001年研制出了中波红外和长波红外鱼眼序列,并将之用于全向凝视图像的仿生视觉技术,克服了鱼眼成像的光线“溢出”等困难,图5是其研究

的中波红外鱼眼序列(MWIR)。2003年,研究的LWIR和MWIR鱼镜头、仿生式红外鱼眼侦测系统获得了国家发明专利。从2006年至今,该研究作为国家专项技术创新计划的一部分,大大提升了功能仿生设备方面的研制水平。姜洋^[11]等在其研究中,在导弹上完成了新型红外凝视成像导引头系统设计,扩大了导引视场,获得了 $\pm 90^\circ$ 的无渐晕视场,增加了导弹导引系统的稳定性。张继艳^[12]设计的宽光谱日夜两用的鱼眼监控镜头,可以实现在白天和晚上对近红外波段的监控,成像质量也得到了提高。

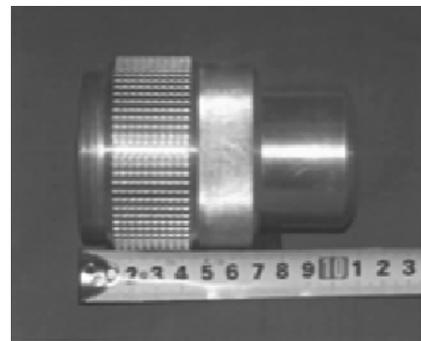


图5 中波红外鱼镜头

Fig. 5 The lens of MWIR

3 超大视场红外凝视成像相关关键技术

3.1 投影成像原理

超大视场红外凝视成像技术主要采用“非相似”成像原理,其观察面到像平面之间存在着如下的映射关系:

$$y = F(\omega) \quad (1)$$

其中, w 表示光线与光轴之间的夹角; y 表示投影点到相面中心的距离。

在超大视场红外凝视成像中,主要有四种投影模型:等距投影、等立体角投影、体视投影、正交投影。其中,等距模型实时性强,广泛应用于工程实践中,等距投影模型为:

$$y = f\omega \quad (2)$$

其成像原理如图6所示,三维物体经过超大视场红外镜头后在径向和切向发生不同倍率的变化,在像面上形成二维的像,并且发生了畸变。

入射角 ω 的越大,形变越严重,而当物光在光轴附近入射时,物与像的相似度最高。超大视场镜头可通过人为调控畸变量来达到预期的图像压缩效果。在经过压缩的图像中,物像之间一一对映的关

系没有改变,保证了“非相似”成像的正确性和可行性。

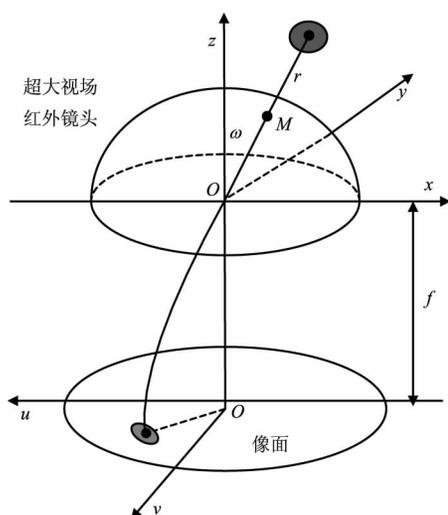


图6 超大视场红外成像光路图

Fig. 6 Optical path of super wide-field staring infrared imaging

3.2 系统标定技术

超大视场红外凝视成像系统标定一般包括系统畸变中心标定和镜头参数标定,系统畸变中心标定是镜头参数标定的前提。

3.2.1 畸变中心标定

由于存在光学畸变^[13]及机械安装误差等因素,系统光轴与探测器感光面的交点不一定与图像的中心完全重合。而且系统标定是畸变校正的前提,因此需要对镜头畸变中心进行有效标定。在超大视场成像中,所有与光轴平行的射线经过超大视场成像后,其成像延长线汇集于图像中心点,基于这个原理,径向自动中心标定法中设计了一种新型圆筒状靶标,在圆筒内壁设置几条等间距的直线,然后将该圆筒竖直放入超大视场红外凝视成像系统中,图像中的直线两两交于一点,最后取这些点的坐标平均值作为畸变中心位置。张宝峰^[14]采用最小二乘法实现了畸变中心标定,该方法主要通过在拍摄的大视场图像边缘随机取点,利用最小二乘法拟合圆再求取圆心,圆心即为畸变中心。这两种方法精度不高,存在较大误差,采用组圆成像畸变对称性的方法取得了较好效果,还需进一步研究。

3.2.2 镜头参数标定

镜头参数标定包括镜面到虚拟成像面的距离标定和径向畸变系数标定。依据等距投影成像原理,空间相同入射角的两个物点径向距离相同,根据这

两个空间物点入射光线与光轴的几何关系可求得镜面到成像面的距离。径向畸变可分解到横轴和纵轴上,可利用等距投影的几何关系分别求解出了横轴和纵轴的畸变系数^[15]。

以上标定方法均采用了物理参数进行标定,在标定过程中,选用参数不同容易引入标定误差,而且由于存在人为因素,增加了误差引入环节,因此,物理参数标定方法精度不高。ShahShishir^[16]提出了一种利用低功率激光束标定方法,方法原理简单、标定精度较高。

3.3 畸变校正技术

图像的畸变程度随着视场的增大逐渐加深,为了使图像更加适合人眼观测,提高图像检测的准确性,消除畸变带来的不利因素,需要进行畸变校正。镜头的畸变一般主要包括径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变^[17]。常用畸变校正方法有:基于成像投影模型的畸变校正、从二维角度进行畸变校正和从三维角度进行畸变校正。

畸变校正的成像模型包括球面投影模型和抛物面投影模型,基于球面投影模型的校正方法主要利用空间直线的球面投影为直线这一约束条件来实现畸变校正。基于抛物面投影模型的校正方法将成像面看成抛物面,该方法在恢复图像深度信息方面效果较好,但模型较为复杂,应用受限。

从二维角度进行图像畸变校正不涉及空间的像素因素,主要是对畸变图像坐标变换后再进行像素插值,一般包括球面坐标定位法、射影不变性法^[18-19]。基于DSP嵌入式系统采用经纬映射法对超大视场图像进行畸变校正,这种方法提高了校正过程的实时性,图像校正效果良好^[20]。

从三维角度进行图像畸变校正主要运用二维图像和三维实物的坐标关系进行校正。在投影转换法^[21]中,将二维图像像点映射到三维空间中,重新投影为二维图像,根据像点和对应的三维光线之间的向量关系实现校正。

3.4 目标检测技术

在红外目标检测中,主要存在背景复杂、干扰多、信号微弱等影响,目标检测较为困难,容易出现“虚警”现象。红外目标小视场检测方法主要有两类:基于单帧图像的空域检测和基于序列图像的时域检测。

表2中介绍比较了四种常用的目标检测方法,这些方法都有各自的局限和优势。在超大视场的红外目标检测中,常常需要结合空域检测方法和时域检测方法才能达到预期检测效果。

表2 四种运动目标检测方法比较

Tab.2 The comparison of four methods for moving target detection

	光流法	帧间差分法	背景差分法	管道滤波
光照适应性	一般	好	差	好
实时性	不适合	适合	适合	适用
低信噪比检测性能	一般	一般	差	好
使用要求	硬件要求高	目标和背景不能同时运动	背景变化不大	管道大小合适

3.5 基于威胁度排序的重点目标提取与定位技术

超大视场内存在许多的“伪目标”,可对图像中的目标进行威胁度排序来提取实际目标。该方法主要综合利用目标的运动信息,并根据实际情况对不同信息设置不同的权重来求取目标的威胁度。红外探测器的探测范围一般小于10 km,探测信息有限,只能探测到飞行目标的方位角和灰度值^[22]。但目标在这个范围内机动性强,信息不稳定,需要选择一些更多可靠的目标信息作为目标威胁度排序的数据来源^[23],比如目标距离、飞行速度、飞行高度和来袭角度等。在目标威胁度排序研究方法中,层次分析法选取有效的指标参数,降低了在目标判断中主观因素的影响,较好地用于红外多目标的重点目标识别。基于多属性决策模型的改进层次分析法^[24]对空中检测到的目标威胁度排序有良好的效果。图7所示为对目标威胁度的排序过程。

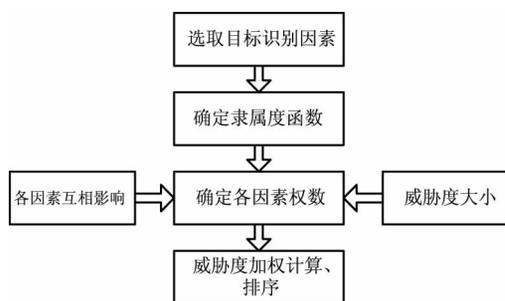


图7 威胁度排序过程

Fig. 7 The flow of threat sequencing

4 潜在应用探讨

4.1 全天候智能监控

在一些涉及重大安全的场所,如银行、机场、军事基地等,需要设置全景监控来观察周边不安全因素。目前市场上较多的是多镜头拼接或者云台旋转扫描方法,但这两种方法实时性差、存在盲区或者引入了干扰,可靠性普遍不高。超大视场红外凝视成像技术可以做到大范围实时监控重点安全区域,在单个视场内直接进行图像处理,识别危险人员和目标,减少了工作运算量,使系统更加智能化。同时,系统简单紧凑,不需要太多的其他辅助监控设备,降低了成本,可适用于多种安全场所。而这项技术在红外波段的应用也保证了监控不受昼夜光线的影响,做到了真正的全天候无死角监控。

4.2 全向侦察与告警

为适应现代战争快速化、多点化打击的要求,需改进红外侦察告警技术,全方位侦察告警很好地解决了这一问题。首先,超大视场可始终包含目标在时域的运动轨迹,不易丢失。其次,单个超大视场即可做到对多目标的实时检测跟踪,一定程度上释放了武器装备的空间,特别是可减小空中飞行器的体积,如无人机的小型化等等。最后,军事侦察告警对图像要求较高,红外凝视超大视场保证了图像的整体连续性,降低了系统本身的干扰。

4.3 靶场目标光学引导

目前,靶场通过光测设备摄影、测量来采集试验目标飞行轨迹等信息。但靶场试验目标从发射到捕捉定位容易造成丢失,而且丢失后小视场光测设备很难找回目标。红外凝视超大视场系统无需转动设备,在单幅大视场内监测和捕捉试验对象,通过结合光测设备的光轴角度,解算出目标的坐标方位信息,之后将目标方位信息传送给小视场来跟踪,如果目标丢失还可以用超大视场进行寻回,鱼眼PTZ的主从监控就是基于这个原理提出的^[25]。基于超大视场红外凝视成像技术在靶场的应用,提高了靶场对目标的捕捉跟踪能力,降低了试验目标的丢失率。

5 结论与展望

目前,超大视场红外凝视成像技术发展迅速,应用领域广泛,尤其在军事上的预警和侦察方面。为提高这项技术的应用价值,需要进一步完善其研究,

可以主要从以下几个方面拓展:(1)继续开展超大视场的图像处理研究,进一步降低畸变在目标检测和跟踪中的影响;(2)开展低成本超大视场红外凝视系统的研究,简化镜片个数,寻找更合适的红外材料;(3)改善这项技术在分辨率、灵敏度、探测距离等方面的现状,使该系统适用于多种天候条件,更好地应用在军民两个领域。同时,随着大面积红外探测阵列的发展,超大视场红外凝视成像技术的应用范围和深度会进一步得到提升。

参考文献:

- [1] ZHOU Bing. Study on signal processing technique of infrared fish-eye type warning system[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2007. (in Chinese)
周冰. 红外鱼眼式告警系统中的信号处理研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2007.
- [2] L Wang, H H Ju. Extrinsic calibration of a fisheye camera and inertial measurement unit[C]//Proceedings of IEEE Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2009, 444:2427-2432.
- [3] J Courbon, Y Mezouar, N Guénard, et al. Visionbased navigation of unmanned aerial vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18:789.
- [4] WANG Long, WANG Yongzhong, SHEN Xueju, et al. Analysis of detective sensitivity for super wide-angle laser warning system based on grating diffraction[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(3):293-297. (in Chinese)
王龙, 王永仲, 沈学举, 等. 光栅衍射型超广角激光告警系统的灵敏度分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(3):293-297.
- [5] Y Z Wang. Biomimetic staring infrared imaging omnidirectional detection technology[J]. Chinese Sci. Bull., 2010, 55:3073.
- [6] WANG Yongzhong. The optic of fish-eye[M]. Beijing: Science press, 2006. (in Chinese)
王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] Christopher R B, Mark A M, Thomas J B. Operational testing and applications of the AIRS FPA with infrared fish-eye optics[J]. SPIE, 2003, 4820:515-524.
- [8] Pal Greguss. A new device for panoramic infrared photography[J]. Proc. of SPIE, 1983:0380.
- [9] Simon Thibault. New generation of high resolution panoramic lenses[J]. Proc. of SPIE, 2007, 6667:666703.
- [10] WANG Yong zhong. Biomimetic staring infrared imaging omnidirectional detection technology[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(19):1859-1965. (in Chinese)
王永仲. 模仿生物视觉的凝视红外全向感知技术[J]. 科学通报, 2010, 55(19):1859-1965.
- [11] JIANG Yang, SUN Qiang, SUN Jinxia, et al. Design of infrared staring conformal optical system with widefield of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6):1575-1580. (in Chinese)
姜洋, 孙强, 孙金霞, 等. 大视场凝视型红外共型光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6):1575-1580.
- [12] ZHANG Jiyang, HUANG Yuanqing, XIONG Feibing, et al. Design of a wide spectrum day and night fisheye CCTV lens[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12):1389-1392. (in Chinese)
张继艳, 黄元庆, 熊飞兵, 等. 宽光谱日夜两用鱼眼监控镜头的设计[J]. 激光与红外, 2013, 43(12):1389-1392.
- [13] Schneider D, Schwalbe E, Maas H G. Validation of geometric models for fisheye lenses[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(3):259-266.
- [14] ZHANG Baofeng, LIU Na, ZHU Junchao, et al. The parameter calibration method based on panoramic and stereo vision[J]. Journal of Tianjin University Technology, 2013, 29(2):6-10. (in Chinese)
张宝峰, 刘娜, 朱均超, 等. 全景立体球视觉下的鱼眼镜头参数标定方法[J]. 天津理工大学学报, 2013, 29(2):6-10.
- [15] CAO Liye. Research on the parameters calibration methods of omnidirectional vision system based on fish-eye lens[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012. (in Chinese)
曹丽业. 基于鱼眼镜头的全方位视觉系统参数标定方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
- [16] Shah S, Aggarwal J K. Intrinsic Parameter Calibration Procedure for a (High Distortion) Fish-eye Lens Camera with Distortion Model and Accuracy Estimation[J]. Pattern Recognition, 1996, 29(11):1775-1788.
- [17] Jianhua Wang, Fanhuai Shi, Yuncai Liu. A new calibration model of camera lens distortion[J]. Pattern recognition, 2008, 41(2):607-615.
- [18] ZHU H J, YIN X P, ZHOU J L. A Cubic Polynomial Model for Fisheye Camera[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6761(1):684-693.

- [19] ZHU H J, YANG P, LI S G. Estimating Fisheye Camera Parameters from Homography[J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(9): 2119 – 2127.
- [20] ZHANG Baofeng, MA Zhijun, ZHU Junchao, et al. Implementation of fisheye image real-time correction based on DSP[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 181 – 184. (in Chinese)
张宝峰, 马志军, 朱均超, 等. 基于 DSP 的鱼眼图像实时校正系统的实现[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 181 – 184.
- [21] Juho K, Sami S B. A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-Angle, and Fish-Eye Lenses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335 – 1340.
- [22] YAN Shihua, LIU Hua, TU Tongfei. A Threat Sequencing Method for Aerial Infrared Multi – Target[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(6): 23. (in Chinese)
严世华, 刘华, 涂同飞. 一种空中红外多目标威胁度排序方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(6): 23.
- [23] LUO Huan, YU Lei, LIAO Jun, et al. Threat Sequencing Method for Multiple Aerial Infrared Targets[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(10): 91 – 93. (in Chinese)
罗寰, 于雷, 廖俊, 等. 空中多红外目标威胁程度排序方法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 91 – 93.
- [24] YAN Chongchong, HAO Yongsheng. Threat Assessment of Aerial Target Based on AHP[J]. Computing Technology and Automation, 2011, 30(2): 118 – 121. (in Chinese)
闫冲冲, 郝永生. 基于层次分析法(AHP)的空中目标威胁度估计[J]. 计算技术与自动化, 2011, 30(2): 118 – 121.
- [25] SHI Hao, LAI Shiming, LIU Yu, et al. Calibration method based on master-slave surveillance system composed by fish-eye camera and PTZ dome camera [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(10): 2412 – 2417. (in Chinese)
石皓, 赖世铭, 刘煜, 等. 一种用于鱼眼 PTZ 主从监控系统的标定方法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(10): 2412 – 2417.