

相机姿态校正模型的红外瞄具零位走动量测量

李延风 安志勇 李丹妮 王劲松

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 根据红外瞄具零位走动量高精度测试需求,提出了一种基于相机姿态自适应数学模型的红外瞄具零位走动量测量方法。设计了一种相机姿态自适应修正新算法,建立了相机姿态修正模型,并将其应用于零位走动量测量,克服了由于 CCD 相机倾斜引起零位走动量测量误差的难题。基于图像判读技术,采用重心法对针孔靶及瞄准分划图像进行定位,利用 Zernike 矩不变性质实现边缘点的亚像素细分。构建了实验系统,经实验验证,测量精度优于 0.02 mil(1 mil=0.254 cm),满足红外瞄具零位走动量的高精度测试需求。

关键词 测量; 机器视觉; 图像处理; 零位走动量; 姿态校正; 图像判读

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0908003

Infrared Sight Zero Detection Based on Camera Pose Correction Model

Li Yanfeng An Zhiyong Li Danni Wang Jinsong

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract According to the high precision testing requirements on aiming at the baseline variation of infrared sight, a measuring method of infrared sight zero momentum based on camera pose adaptive mathematical model is proposed. A new adaptive algorithm of camera pose is designed. A camera pose correction model is established, which is applied to zero momentum measuring system, solving a problem of zero momentum measuring error caused by camera tilting. The pinhole targets and sighting divide image are located by gravity method, and sub-pixel subdivision of edge points is achieved by Zernike orthogonal moments. An experimental system is constructed. The measurement accuracy is superior to 0.02 mil (1 mil=0.254 cm) which is verified by experiment. The result meets the high precision testing requirement of infrared sight baseline variation.

Key words measurement; machine vision; image processing; zero momentum; pose correction; image interpretation

OCIS codes 100.2000; 150.0155; 120.1880; 110.3080

1 引言

随着光电技术及红外热成像技术的飞速发展,红外产品越来越受到人们关注。红外瞄具作为夜间作战的主流瞄具,具有隐蔽性好,能有效识别伪装等优点,是目前瞄具系列的热门发展方向。红外瞄具能赋予武器正确的射向,使士兵在预期的位置毁伤敌方目标,因此,瞄具的瞄准基线的稳定性是红外

瞄具实现其基本使命的根本保障,但由于射击震动、温差变化等因素,易导致红外瞄具的瞄准基线发生变化,影响命中精度^[1-2]。因此,为充分发挥红外瞄具的瞄准性能,需对其零位走动量进行检测。

国内常见的检测手段有投影靶板法、激光光轴仪法、五棱镜法等,这些方法要么不能实现定量检测,要么结构复杂、成本高,不易在工厂和检修单位

收稿日期: 2014-03-19; **收到修改稿日期**: 2014-04-17

基金项目: 吉林省重大专项科技发展计划项目新型光电子器件及应用技术项目(20100610)、科技型中小企业技术创新基金数字式宽光谱零位测量仪项目(11c26212200565)

作者简介: 李延风(1985—),女,博士研究生,主要从事精密仪器检测技术方面的研究。E-mail: yannianyishou@126.com

导师简介: 安志勇(1943—),男,教授,博士生导师,主要从事精密仪器检测方面的研究。E-mail: an_zhiyong@126.com

普及推广,无法满足当前红外瞄具的检测需求。国外主要以美国 Optikos 及以色列 CI 公司生产的红外检测设备为主,可检测最小可分辨温差(MRTD)、最小可探测温左(MDTD)及调制传递函数(MTF)等红外技术指标^[3-5],但有关瞄具瞄准基线变化量的检测鲜有报道。本文设计的红外瞄具零位走动量测量方法,采用反射式准直仪及图像判读技术进行检测,由面阵 CCD 相机获取针孔靶及瞄准分划图像,基于 Zernike 矩不变性质,对圆斑边缘像素进行亚像素细分,采用重心法识别圆斑中心及瞄

准分划中心,设计了相机姿态修正算法,能有效提高红外零位走动量的检测效率和精度。

2 零位走动量测量原理

瞄具的零位走动量是指瞄具在环境试验、射击冲击后,瞄准基线偏离原来位置的数值。这一偏差值必须保证在一定范围内,否则会影响枪械的射击精度,甚至间接制约轻武器的发展。图 1 所示为零位走动量测量原理图。

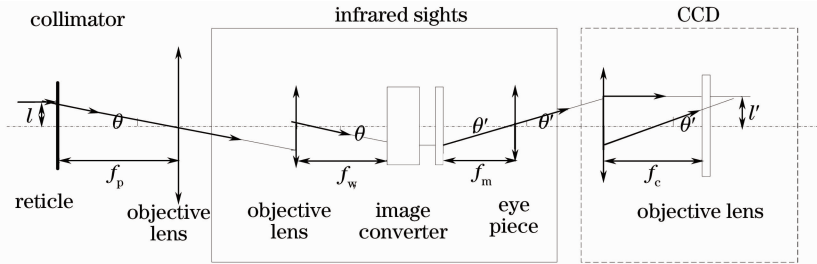


图 1 零位走动量测量原理图

Fig. 1 Zero momentum measuring principle diagram

设平行光管焦距为 f_p ,被试瞄具的物镜焦距为 f_w ,目镜焦距为 f_m ,CCD 相机镜头的物镜焦距为 f_c ,由视场角定义知平行光管及 CCD 相机的视场角分别为

$$\tan \theta' = \frac{l'}{f_c} = \frac{l_b}{f_m}, \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{l}{f_p} = \frac{l_b}{f_w}, \quad (2)$$

式中 l' 为 CCD 相机中的靶标像高, l 为靶标高, l_b 是红外瞄具焦平面阵列上的像高。放大倍率为

$$\tau = \frac{f_w}{f_m}, \quad (3)$$

式中 τ 为被试红外瞄具的放大倍率。联合(1)~(3)式得

$$\frac{l'}{f_c} = \tau \frac{l}{f_p}, \quad (4)$$

即

$$\tau f_c = \frac{l' f_p}{l}. \quad (5)$$

当测量红外瞄具试样时,设 l'_c 是其瞄准分划中心到靶标中心的像高, l_c 是其物高,同理可得

$$\tau f_c = \frac{l'_c f_p}{l_c}. \quad (6)$$

联合(5)、(6)式得

$$\frac{l}{l' f_p} = \frac{l_c}{l'_c f_p}. \quad (7)$$

令

$$\alpha_c = \frac{l'_c}{f_p}, \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{l'}{f_p}. \quad (9)$$

联合(7)~(9)式得

$$\alpha_c = \alpha \frac{l'_c}{l'}, \quad (10)$$

式中 α 为靶标对平行光管物镜所成的张角,经由 0.5"精度的徕卡经纬仪标定后为 3.179 mil(1 mil = 0.254 cm), l'_c 和 l' 都可由数据处理软件测得。由(10)式求得红外瞄具的零位走动量。

3 测量方法实现

3.1 系统组成及工作原理

该系统由红外平行光管、CCD 相机、镜头和数据处理软件组成,其中红外平行光管包括离轴抛物面反射镜、平面反射镜、黑体及针孔靶标。图 2 所示为其系统工作原理图。

分别将被测红外瞄具及 CCD 相机安置在各自安装座上,CCD 相机物镜保持在被测瞄具的出瞳位置,对准红外平行光管的主光轴。适当调节 CCD 相机镜头的光圈及焦距,可观察到清晰的针孔靶及其瞄准分划。图像判读分系统根据采集到的图像,判读红外瞄具瞄准分划在针孔靶构成的测量参照系中的坐标 $S(x_s, y_s)$,代入(11)、(12)式分别得出 X 方向、Y 方向的角度值。

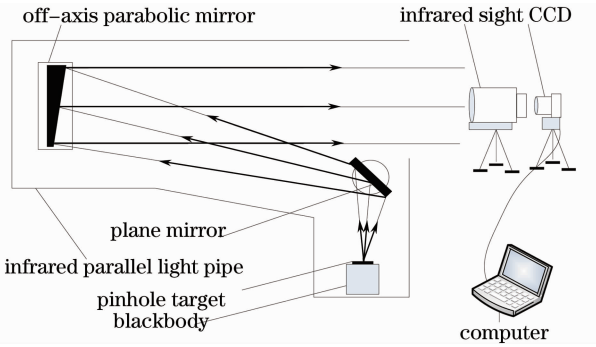


图2 系统工作原理图

Fig. 2 System working principle diagram

$$X_s = \alpha \cdot \frac{x_s}{l}, \quad (11)$$

$$Y_s = \alpha \cdot \frac{y_s}{l}. \quad (12)$$

取下瞄具,经射击冲击、高低温等一系列试验后再次装夹,测量分划坐标 $T(x_t, y_t)$, 同上,求得 X_t 和 Y_t , 两次位置之差 ΔX 和 ΔY 即为该瞄具的零位走动量:

$$\Delta X = X_t - X_s, \quad (13)$$

$$\Delta Y = Y_t - Y_s. \quad (14)$$

3.2 红外图像成像原理

黑体作为红外辐射源,透过针孔靶,经平行光管反射到红外瞄具中,由红外瞄具图像转换器件将针孔靶红外辐射图像转化成可见图像,并与红外瞄具中的分划线一起通过目镜,由 CCD 相机接收,然后经数据线将采集到的图像传输到计算机中,由图像处理软件进行识别与检测,成像示意图如图 3 所示。

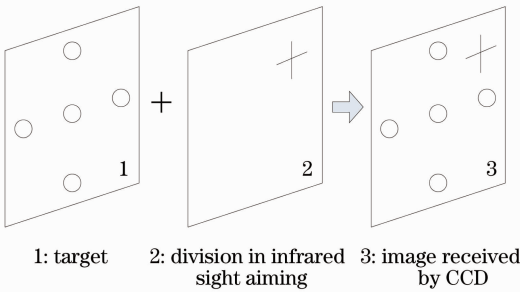


图3 CCD 成像示意图

Fig. 3 CCD imaging schematic diagram

针孔靶实物图如图 4(a) 所示,经红外瞄具图像转换器件转化成可见图像,由 CCD 相机接收,形成五个圆形光斑,如图 4(b) 所示。

3.3 针孔靶红外图像识别

利用五个圆斑建立直角坐标系,每次红外瞄具装夹后,检测分划线在该参考坐标系下的坐标。由于准直系统中反射镜的畸变、红外辐射源的辐射不

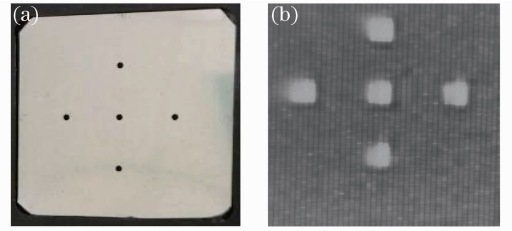


图4 针孔靶图。(a) 针孔靶实物图; (b) CCD 相机采集到的针孔靶图像

Fig. 4 Pinhole target diagram. (a) Object diagram of pinhole target; (b) pinhole target image acquired by CCD

均匀等因素,造成圆形光斑的形状和大小发生变化,影响坐标系的建立。因此,能否准确地获取针孔靶中五个圆形光斑的圆心坐标,是影响坐标系重建的关键因素之一,定位算法精度高才能保证坐标系的重建精度。

采用重心法对针孔靶中的五个圆形光斑进行识别及圆心坐标定位。

首先对整个针孔靶图像进行中值滤波,去除噪声^[6-9]。为提高检测效率,由人工辅助选定目标区域,框选每个圆斑作为识别区。假设选定的圆斑的像素有 i 行 j 列, $G[i, j]$ 为第 i 行 j 列的像素灰度值,那么圆孔图像中心 $P(x_0, y_0)$ 的计算公式为

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j] \times i}{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j]}, \quad (15)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j] \times j}{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j]}. \quad (16)$$

重心法通俗易懂,识别精度高,尤其适用于对称分布的图像,但这种定位方法只能达到整像素级精度。为进一步提高圆斑中心定位精度,在粗定位的基础上采用正交矩实现边缘点的亚像素细分^[10-14]。Zernike 矩通过 1 个复数模板和 2 个实数模板对边缘点的小邻域进行加权,计算其空间矩,利用矩不变性质,得出边缘的方向角度 φ 和边缘距离模板中心的距离 l 等参数。由于本文选用的 CCD 相机的像是正方形,若 $|l| \geq 1/\sqrt{2}$, 则认为当前像素点不属于圆斑边缘点,否则将其判定为边缘点。利用 φ 和 l 对圆斑的边缘点坐标进行修正,得出亚像素级的圆斑边缘,进而提高了圆斑中心定位精度。

3.4 相机姿态自适应校正模型建立

实际测量中,很难保证在红外瞄具装夹时,CCD 相机不受干扰,或测试环境中的微小震动,都易导致

其姿态发生变化。本文设计并实现了相机姿态自适应修正,这是测试系统的独创性技术之一。

若相机倾斜,以 CCD 相机作为参照物,相机未动,而是图像中的分划线及圆斑的位置发生了变化,图 5 所示为 CCD 相机无倾斜和倾斜小角度时的相机姿态对比图。

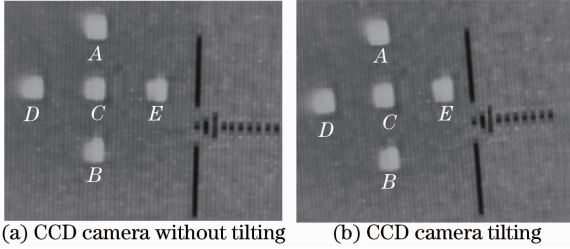


图 5 相机姿态对比图

Fig. 5 Camera pose comparison diagram

由图像识别算法得出 A、B、C、D 及 E 点的坐标,图 5 所示为圆斑图像示意图,以 DE 为横轴,AB 为纵轴,建立直角坐标系。

将 $D(x_D, y_D)$ 、 $E(x_E, y_E)$ 两点坐标,代入下式:

$$k_1 = \frac{y_E - y_D}{x_E - x_D}, \quad (17)$$

得到横轴 DE 所在直线的斜率 k_1 ,即新坐标系的横轴斜率 k_1 。将横轴旋转 90° ,得到纵轴斜率

$$k_2 = -\frac{1}{k_1}. \quad (18)$$

分别将 A、B、C、D 和 E 五个针孔靶点的横、纵坐标代入下式:

$$x_0 = (x_A + x_B + x_C + x_D + x_E)/5, \quad (19)$$

$$y_0 = (y_A + y_B + y_C + y_D + y_E)/5, \quad (20)$$

得到 5 个针孔靶点的中心点坐标 $P(x_0, y_0)$ 。

利用点 $D(x, y)$ 到直线方程 $y = kx + b$ 的距离

$$\Delta = \frac{|kx_0 + b - y_0|}{\sqrt{1 + k^2}} \quad (21)$$

及针孔靶点坐标 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $D(x_D, y_D)$ 、 $E(x_E, y_E)$,分别得出 A、B 到纵轴距离的平方 Δ_{AY}^2 和 Δ_{BY}^2 、C、D 到横轴距离的平方 Δ_{DX}^2 和 Δ_{EX}^2 :

$$\Delta_{AY}^2 = \frac{[x_A k_2 - (1024 - y_A) + y_0 - k_2 x_0]^2}{1 + k_2^2}, \quad (22)$$

$$\Delta_{BY}^2 = \frac{[x_B k_2 - (1024 - y_B) + y_0 - k_2 x_0]^2}{1 + k_2^2}, \quad (23)$$

$$\Delta_{DX}^2 = \frac{[x_D k_1 - (1024 - y_D) + y_0 - k_1 x_0]^2}{1 + k_1^2}, \quad (24)$$

$$\Delta_{EX}^2 = \frac{[x_E k_1 - (1024 - y_E) + y_0 - k_1 x_0]^2}{1 + k_1^2}. \quad (25)$$

联合(22)~(25)式得到

$$\Delta_{\text{total}} = \Delta_{AY}^2 + \Delta_{BY}^2 + \Delta_{DX}^2 + \Delta_{EX}^2. \quad (26)$$

分别顺时针和逆时针旋转拟建立的坐标系,如图 6 所示。

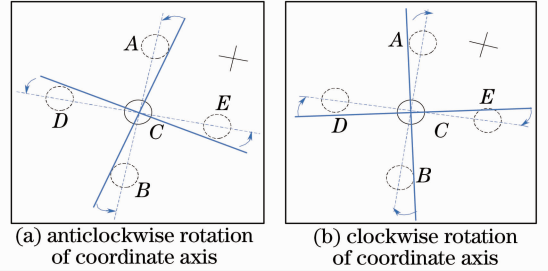


图 6 相机姿态校正示意图

Fig. 6 Correction of camera pose schematic diagram

依次遍历搜索区,分别计算出逆时针和顺时针搜索时的距离平方和最小值 $\Delta_{\text{total min}}$ 和 $\Delta'_{\text{total min}}$,由(27)式得出最佳斜率

$$K = K_i \mid \min(\Delta_{\text{total min}}, \Delta'_{\text{total min}}), i = 1, 2, \dots, 400, \quad (27)$$

K 即新坐标系横轴斜率,由(18)式推算出纵轴斜率 $-1/k$,进而得出新坐标系的横纵坐标轴,利用(13)、(14)式即可推算出瞄具零位走动量。

4 实验及结果分析

根据方案设计,研制并装调一台红外瞄具零位走动量测试系统样机,如图 7(a)所示,图 7(b)为其测量软件。

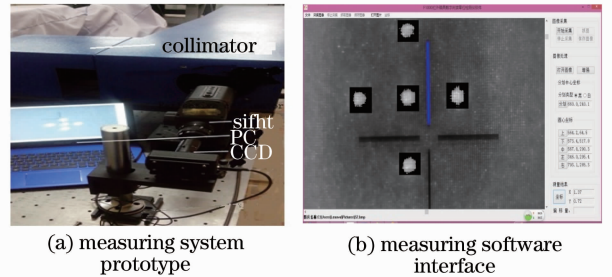


图 7 系统样机及测量界面

Fig. 7 System prototype and measuring software interface

系统采用口径 $\Phi 200 \text{ mm}$,焦距为 1500 mm 的离轴抛物面反射镜为主镜,平面反射镜为次镜组合而成的反射式准直仪,直径 $\Phi 1 \text{ mm}$ 的针孔靶以及波段为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的黑体一起为测试系统提供无限远的红外目标。由 CCD 相机接收十字分划线及针孔靶图像,将光信号转化成图像信号,传递给数据处理

系统进行处理。

红外瞄具每次装夹后,采集针孔靶及瞄准分划图像,框选分划线,测得其中心坐标。分别框选上、下、中、左、右五个圆斑,测得其圆斑中心坐标,经相机姿态自适应算法修正后,重建参考坐标系。单击

“坐标”按钮,测得瞄准分划在参考坐标系中的坐标。测量全程不超过 20 s,检测效率高。瞄具两次装夹后测得的偏差即为瞄具的零位走动量。相机姿态校正后的测量结果如表 1 所示。

表 1 相机姿态校正实验数据

Table 1 Camera pose correction experimental data

Order Number	ΔX and ΔY ranged from division to X and Y axis When CCD camera is tilted angle of α /mil			
	$\alpha \approx 0^\circ$		$\alpha \approx 9^\circ$	
	X_2	Y_2	X_1	Y_1
1	4.903	-2.122	4.900	-2.119
2	4.902	-2.119	4.896	-2.117
3	4.902	-2.119	4.897	-2.116
4	4.904	-2.122	4.901	-2.122
5	4.902	-2.120	4.903	-2.119
6	4.904	-2.125	4.902	-2.121
Average value	4.902	-2.121	4.899	-2.119
σ	0.0009	0.0021	0.0025	0.00208

由表 1 可知,当 CCD 相机无倾斜和倾斜 9° 时,瞄准分划在测量坐标系下的横、纵坐标的偏差分别为 0.003 mil 和 0.002 mil,且由标准差 σ 知算法重复性良好,结果表明,本文提出的相机姿态自适应修正算法,能有效避免测量过程中由于相机倾斜带来的零位走动量测量误差。

基于测量系统样机,将 0.5" 精度的徕卡经纬仪代替 CCD 相机,对准红外平行光管主光轴,瞄准红外瞄具的瞄准分划,读取瞄准分划在装夹前后两个位置的坐标,计算出 X 、 Y 方向的零位走动量 ΔX_1 、 ΔY_1 将其视为标准值,与由 CCD 相机测得的这两个位置的零位走动量 ΔX_2 、 ΔY_2 进行对比实验,测量结果如表 2 所示。

表 2 零位走动量实验数据

Table 2 Zero momentum experimental data

Value	Actual /mil		Calibration /mil	
	ΔX_1	ΔY_1	ΔX_2	ΔY_2
	2.5156	-1.1326	2.5045	-1.1228

由表 2 可知,系统在水平和垂直方向的检测精度分别为 0.0111 mil 和 0.0098 mil。结果表明,零位走动量精度优于 0.02 mil。

5 结 论

本文采用集机器视觉技术、图像判读技术及光学准直技术于一体的检测技术,对红外瞄具零位走动量测量系统进行深入研究。测试系统中没有参与测量的运动组件,既不需移动针孔靶,也不需旋转平

面反射镜实现零位走动量的测量,可避免移动参量带来的误差。采用相机姿态自适应修正新算法,能避免相机倾斜对红外瞄具零位走动量测量带来的误差,优于同类设备的检测精度,对提高红外瞄具零位走动量测量精度具有重要的理论意义和实用价值。

参 考 文 献

- Wang Jinsong, An Zhiyong, Li Hailan. Infrared reflective collimator sight zero momentum measurement method[J]. Acta Armamentar, 2010, 31(11): 1422-1425.
王劲松, 安志勇, 李海兰. 反射式平行光管的红外瞄具零位走动量测量方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1422-1425.
- Li Guang, Wang Jinsong, An Zhiyong. The infrared collimator design for infrared sights testing [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2011, 33(4): 71-73.
李 光, 王劲松, 安志勇. 用于红外瞄具测试的红外平行光管系统设计[J]. 长春理工大学学报, 2011, 33(4): 71-73.
- Xie Bin. Infrared Sight Zero Momentum Testing System[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
谢 斌. 红外瞄具零位走动量测试系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- Wen Bin, Li Yongliang, Zeng Youhong, et al.. Research on the portable infrared sight baseline target detection system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1330-1332.
温 彬, 李永亮, 曾佑洪, 等. 便携式红外瞄准镜瞄准基线检测系统研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1330-1332.
- Chen Cong, Lu Qipeng, Peng Zhongqi. Near infrared spectroscopy denoising method based on NLMS adaptive filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0530001.
陈 丛, 卢启鹏, 彭忠琦. 基于 NLMS 自适应滤波的近红外光谱去噪处理方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0530001.
- Wang Weihua, Li Zhijun, He Yan, et al.. A real-time target detection algorithm for infrared search and track system based on region of interest extraction [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (11): 1109001.
王卫华, 李志军, 何 艳, 等. 一种基于兴趣区提取的红外搜索

- 系统目标实时检测算法[J]. 中国激光, 2013, 39(11): 1109001.
- 7 Yang Xiukun, Zhong Mingliang, Jing Xiaojun, *et al.*. Near-infrared microscopic image segmentation based on W2DPCA-FCM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0811002.
- 杨秀坤, 钟明亮, 景晓军, 等. 基于 W2DPCA-FCM 的近红外显微图像分割[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811002.
- 8 Liu Yunlong, Xue Yuli, Yuan Suzhen, *et al.*. Small infrared target detection algorithm based on local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 814-822.
- 刘运龙, 薛雨丽, 袁素真, 等. 基于局部均值的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 814-822.
- 9 Su Xinzhu, Ji Hongbing, Gao Xinbo. A kind of infrared dim small target detection method based on mathematical morphology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 307-310.
- 苏新主, 姬红兵, 高新波. 一种基于数学形态学的红外弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 307-310.
- 10 Qi Yongliang, Wang Yanjie, Liu Yanying, *et al.*. Pre-detection method for small infrared target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 171-178.
- 靳永亮, 王延杰, 刘艳滢, 等. 红外弱小目标的分割预检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 171-178.
- 11 Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40(10): 2196-2212.
- 12 Sheng Wen, Deng bin, Liu Jian. Multiresolution distance map based small target detection in infrared image [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(1): 42-45.
- 13 Liu Guodong, Liu Bingguo, Chen Fengdong, *et al.*. Research on evaluation method of sub-pixel positioning accuracy algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3446-3451.
- 刘国栋, 刘炳国, 陈凤东, 等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3446-3451.
- 14 Li Xinzhong, Liu Huihui, Zhen Zhiqiang, *et al.*. Investigation of curved surface fitting method in sub-pixel displacement digital speckle correlation measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8): 72-75.
- 李新忠, 刘汇慧, 甄志强, 等. 亚像素数字散斑相关测量的曲面拟合法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8): 72-75.

栏目编辑:何卓铭