

# 基于机器视觉的红外瞄具零位走动量检测系统

李延凤<sup>1</sup> 安志勇<sup>1</sup> 王劲松<sup>1</sup> 何小璇<sup>1</sup> 张继明<sup>1</sup>

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 为满足红外瞄具零位走动量数字化、高精度的检测需求,设计了基于电荷耦合器件(CCD)机器视觉技术的红外瞄具零位走动量检测系统。提出一种新的零位走动量检测模型,依据检测系统的技术指标及要求,设计了离轴抛物面反射式准直光学系统及针孔靶。为减小由相机倾斜引入的测量误差,建立了相机姿态自适应校正模型,并首次将其应用于零位走动量测量中。设计了图像判读软件,采用重心法对靶标中的圆斑中心进行定位,利用泽尼克矩的旋转不变性,对边缘像素点进行细分。成功研制了一台样机,加工装调后进行了测试实验,结果表明,系统的不确定度优于0.02 mil,能有效避免由相机倾斜引入的测量误差,满足红外瞄具零位走动量数字化、高精度测试要求。

**关键词** 测量;红外瞄具;零位走动量;机器视觉;相机姿态校正;图像判读;离轴抛物面反射镜;亚像素细分  
**中图分类号** TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1112003

## Measuring System of Infrared Sight Zero Variable Quantity based on Machine Vision

Li Yanfeng<sup>1</sup> An Zhiyong<sup>1</sup> Wang Jinsong<sup>1</sup> He Xiaoxuan<sup>1</sup> Zhang Jiming<sup>1</sup>

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

**Abstract** In order to meet digital, high-accuracy detection requirements, a measuring system of infrared sight zero variable quantity based on charge coupled device (CCD) machine vision is designed. A new zero variable quantity measuring model is established. According to measuring system technical indicators and requirements, the off-axis parabolic collimator and pinhole target are designed. To reduce infrared sight zero variable quantity measuring error caused by camera tilting, a camera pose adaptive correction model is established, which is firstly applied to infrared sight zero variable quantity measuring. An image interpretation software is designed based on visual studio software development platform, using Gravity method to locate spot center of target image, and using Zernike orthogonal invariant moments to classify pixel on the edge. A functional prototype is successfully developed, processing equipment is tested after adjustment. The results show that its detection uncertainty is better than 0.02 mil, which can avoid measuring error caused by camera tilting and satisfy digital, high-accuracy test requirements on infrared sight zero variable quantity.

**Key words** measurement; infrared sight; zero variable quantity; machine vision; camera pose correction; image interpretation; off-axis parabolic reflector; sub-pixel subdivision

**OCIS codes** 120.3930; 120.4630; 100.2000; 110.3080; 140.1488

## 1 引言

红外瞄具作为夜间作战的主流瞄准具,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。瞄具的零位走动量,是指瞄具在经历环境试验、射击冲击后,瞄准基线偏离原来位置的变化量。这一偏差值必须保证在一定范围内,否则

**收稿日期**: 2014-05-15; **收到修改稿日期**: 2014-06-13

**基金项目**: 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)、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)

**作者简介**: 李延凤(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

会影响枪械的射击精度。因此,需对其进行零位走动量检测。近年来,随着国防科技的发展,我国的红外夜视技术有了大幅提高,多种夜视产品机理相继问世<sup>[1-4]</sup>。据不完全统计,仅单兵红外夜视产品生产的兵工企业就有二十余家。相比于红外夜视产品的井喷式发展,对于红外夜视产品参数及检测设备发展相对滞后,仅对红外瞄具的零位走动量参数的检测设备而言,国内仅有少数几家科研院所在进行研究,如北方红外系统公司设计的焦距 0.5~2.5 m 不等的红外平行光管,但无检测零位走动量功能,长春理工大学温彬等<sup>[5]</sup>设计的一种便携式红外瞄具瞄准基线检测系统、长春理工大学李光等<sup>[6]</sup>设计的利用二维转台实现读数的大量程红外瞄具走动量测量系统等,这些方法要么不能实现定量检测,要么精度不高,无法适应当前红外瞄具的发展。因此,研制一种能高精度、高效率定量数字化零位走动量的检测系统具有十分重要的现实意义。

针对当前主流红外夜视产品的性能要求,考虑在未来一定时期内保证技术不过时,检测系统的工作波长需满足 8~14 μm,测量视场不小于 ±1.5°,测量精度优于 0.02 mil。本文基于机器视觉技术,采用图像判读方式对瞄具零位走动量进行检测。依据检测系统的技术指标及要求,对反射式准直光学系统及针孔靶进行设计。由面阵电荷耦合器件 (CCD) 相机获取针孔靶及瞄准分划图像,基于泽尼克矩不变性质,对圆斑边缘像素进行亚像素细分,采用重心法定位圆斑中心及瞄准分划中心,设计相机姿态自适应校正算法并将其应用于零位走动量测量中。通过实验验证,结果表明测量不确定度优于 0.02 mil,并能有效避免相机倾斜引入的误差,对红外夜视产品的零位走动量高精度测量具有指导意义和实用价值。

## 2 红外瞄具零位走动量检测系统

### 2.1 系统组成及工作原理

如图 1 所示为系统组成图。系统主要由反射式准直仪、靶标、黑体及图像判读分系统构成,其中反射式准直仪由离轴抛物面反射镜、平面镜及平行光管构成,为系统提供近似无限远平行光束,黑体作为红外光源,和靶标共同为系统提供红外目标,CCD 相机、计算机及测量软件构成图像判读分系统,用于识别靶标及分划图像并计算零位走动量。

红外瞄具两次装卡后,图像判读分系统利用采集到的图像,分别判读红外瞄具瞄准分划在针孔靶

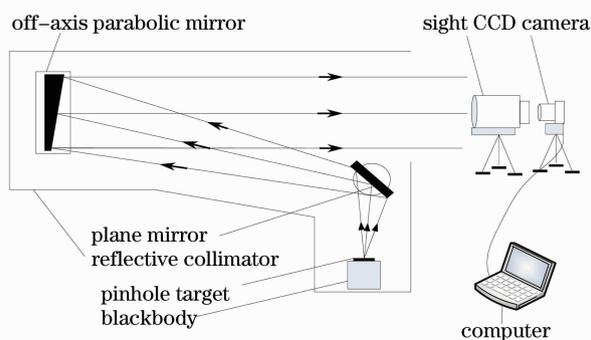


图 1 系统组成图

Fig. 1 System composition diagram

构成的测量参照系中的坐标  $S(x_s, y_s), T(x_t, y_t)$ , 图 2 为瞄具的零位走动量测量示意图。

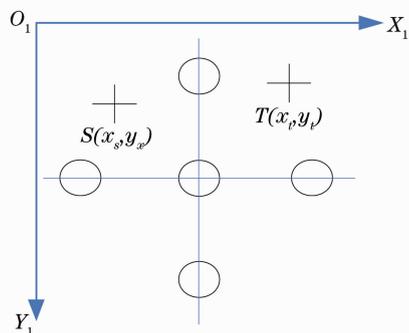


图 2 瞄具的零位走动量示意图

Fig. 2 Sight zero variable quantity schematic diagram

将其代入(1)、(2)式,将长度变化量转化成角度变化量,经化简后分别得出 X 方向、Y 方向的走动量。

$$\theta_x = 2 \times \arctan\left(\frac{|x_s - x_t| \times 5.2}{2 \times f_p \times 1000}\right) \times \frac{1000 \times 216}{206} = \frac{|x_s - x_t|}{f_p} \times 5.45, \quad (1)$$

$$\theta_y = 2 \times \arctan\left(\frac{|y_s - y_t| \times 5.2}{2 \times f_p \times 1000}\right) \times \frac{1000 \times 216}{206} = \frac{|y_s - y_t|}{f_p} \times 5.45, \quad (2)$$

式中  $\theta_x, \theta_y$  为 X、Y 方向的零位走动量,  $f_p$  为平行光管焦距。

### 2.2 系统设计

#### 2.2.1 光学系统设计

采用加拿大 lumenera 公司 Lu175 型灰度 CCD 相机及镜头,有效像素为 1280 pixel × 1024 pixel,像元大小为 5.2 μm。由视场角定义及尼奎斯特定律知,

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{d'_c \times 3}{f_p}, \quad (3)$$

式中 CCD 像元大小  $d'_c = 5.2 \mu\text{m}$ ,  $\theta$  为红外平行光管

的视场角,  $f_p$  为平行光管焦距。

欲使系统测量精度优于 0.02 mil, 则分辨率可取为 0.01 mil, 即  $1.04666 \times 10^{-5}$  rad, 则将其代入(3)式得

$$f_p = \frac{5.2 \times 3 \times 10^{-3}}{1.04667 \times 10^{-5}} = 1490.5. \quad (4)$$

因此, 系统取焦距  $f$  为 1500 mm, 口径  $\Phi 200$  mm, 视场  $\pm 0.4^\circ$ , 波长为  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ , 离轴抛物面反射系统, 欲满足系统总体长度  $\leq 1200$  mm, 减小准直系统的轴向尺寸, 采用镀有反射率优于 95% 特殊膜层的平面镜。经光学追迹计算可知, 离轴量大于 223 mm 时, 平面镜不会对主镜产生遮拦。取离轴量为 230 mm。为保证出射光的主光线与入射光的主光线垂直, 此时平面镜应旋转  $40.61^\circ$ 。

### 2.2.2 靶标组件设计

由于平行光管焦距  $f_p$  为 1500 mm, CCD 相机镜头物镜的焦距  $f'_c$  为 78 mm, CCD 相机像元大小  $d'$  为  $5.2 \mu\text{m}$ , 为使 CCD 相机上能呈现清晰的靶标像, 需满足

$$\frac{d}{f_p} = \frac{d' \times 3}{f'_c}, \quad (5)$$

式中  $d$  为针孔靶中针孔直径应满足的最小尺寸, 代入数据知  $d = 0.3$  mm, 另为防止针孔孔径过小, 引起衍射现象, 因此, 针孔靶的针孔设计成 1 mm, 针孔靶实物图如图 3 所示。

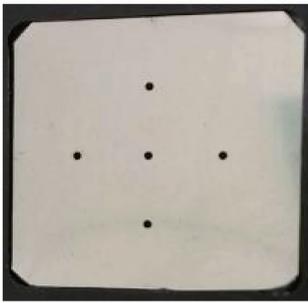


图 3 针孔靶实物图

Fig.3 Object diagram of pinhole target

## 2.3 测量软件

### 2.3.1 针孔靶图像识别

黑体发出红外辐射透过针孔靶, 经红外瞄具图像转换器转化成可见图像, 由 CCD 相机接收, 形成 5 个圆形光斑。利用这 5 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。

采用重心法对针孔靶中的 5 个圆形光斑进行识

别<sup>[7-10]</sup>。为提高检测效率, 由操作者框选目标区域, 将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

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j] \times i}{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j]}, \quad (6)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j] \times j}{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y G[i, j]}. \quad (7)$$

为进一步提高圆斑中心定位精度, 在粗定位基础上, 利用泽尼克矩的旋转不变性, 实现边缘像素点的亚像素细分<sup>[11-14]</sup>。泽尼克矩通过 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, 得出边缘的方向角度  $j$  和边缘距离模板中心的距离  $l$  等参数。由于选用的 CCD 相机的像元是正方形, 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  $j$  和  $l$  对圆斑的边缘点坐标进行校正, 得出亚像素级的圆斑边缘, 进而提高了圆斑中心定位精度。

### 2.3.2 相机姿态自适应校正

在实际测量中, 很难保证红外瞄具装夹时, CCD 相机不受干扰。测试环境中的微小震动, 极易导致其姿态发生变化, 因此, 需对相机姿态进行校正。若相机倾斜, 则图像中的瞄准分划线及圆斑中心坐标也随之发生变化, 图 4 所示为 CCD 相机倾斜小角度时的相机姿态图。

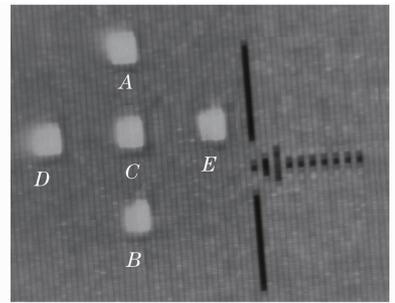


图 4 倾斜相机姿态图

Fig.4 Tilting camera pose graph

由图像识别算法计算出 A、B、C、D 及 E 点的坐标, 以 DE 为横轴, AB 为纵轴, 建立直角坐标系。利用 D、E 点坐标计算得出新坐标系横轴  $D'E'$  斜率  $k_{D'E'}$ , 将横轴旋转  $90^\circ$ , 得  $A'B'$  斜率  $k_{A'B'}$ 。

又因为

$$\Delta = \Delta_{AY}^2 + \Delta_{BY}^2 + \Delta_{BX}^2 + \Delta_{EX}^2, \quad (8)$$

式中  $\Delta_{AY}^2$  和  $\Delta_{BY}^2$  是点 A、B 到纵轴 AB 的距离的平方,  $\Delta_{DX}^2$  和  $\Delta_{EX}^2$  是点 D、E 到横轴 DE 的距离的平方,  $\Delta$  是总和, 用于记录每搜索一次的距离值。可以得出最佳斜率  $K$ ,

$$K = \{K_i \mid \min\{\Delta_i\}, i = 1, 2, \dots, 400\}, \quad (9)$$

式中  $i=1, 2, \dots, 400$  限定了搜索范围, 是一经验值, 满足小角度倾斜范围。当搜索至  $\Delta_i$  最小, 得出此时的新坐标系的横、纵轴斜率  $k_{DE}$  和  $k_{AB}$ , 从而建立参考坐标系, 求得的瞄具分划线坐标, 将其代入 (1)、(2) 式, 计算出瞄具的零位走动量。图 5 所示为相机姿态自适应校正算法流程图。

将两次红外瞄具装卡后测得的数值代入 (1)、(2) 式即可求得瞄具的零位走动量。

### 3 精度分析及验证实验

#### 3.1 系统精度分析

假设  $l_b$  为 CCD 像面上 4 个针孔距中心的平均距离,  $\theta_b$  为  $l_b$  对平行光管物镜所成的张角,  $l_c$  为 CCD 像面上瞄具瞄准分划线距针孔靶中心的平均距离,  $\theta_c$  为  $l_c$  对红外瞄具物镜所成的张角, 由测量原理易知

$$\frac{\theta_b}{l_b} = \frac{\theta_c}{l_c}, \quad (10)$$

又因为

$$l_b = N_b \times d, \quad (11)$$

$$l_c = N_c \times d, \quad (12)$$

式中  $N_b$ 、 $N_c$  分别为  $l_b$  和  $l_c$  对应的像素个数, 由软件计算得出  $l_b$  和  $l_c$ ,  $d$  为单个像素尺寸。

联立 (10)~(12) 式得

$$\theta_c = \frac{N_c}{N_b} \times \theta_b, \quad (13)$$

又因为

$$\theta_b = \frac{l_b}{f_p}, \quad (14)$$

联立 (13) 和 (14) 式得

$$\theta_c = \frac{N_c}{N_b} \times \frac{l_b}{f_p}, \quad (15)$$

则合成标准不确定为

$$u_{\theta_c} = \sqrt{\left(\frac{l_b}{N_b \times f_p}\right)^2 \times u_{N_c}^2 + \left(\frac{N_c}{N_b \times f_p}\right)^2 \times u_{l_b}^2 + \left(\frac{N_c \times l_b}{N_b^2 \times f_p}\right)^2 \times u_{N_b}^2 + \left(\frac{N_c \times l_b}{N_b \times f_p^2}\right)^2 \times u_{f_p}^2}. \quad (16)$$

不确定度来源主要有以下三方面: 针孔标定不确定度  $u_{l_b}$ 、平行光管焦距标定不确定度  $u_{f_p}$  和软件计数不确定度  $u_{N_b}$  和  $u_{N_c}$ , 且  $u_{N_b} = u_{N_c}$ 。

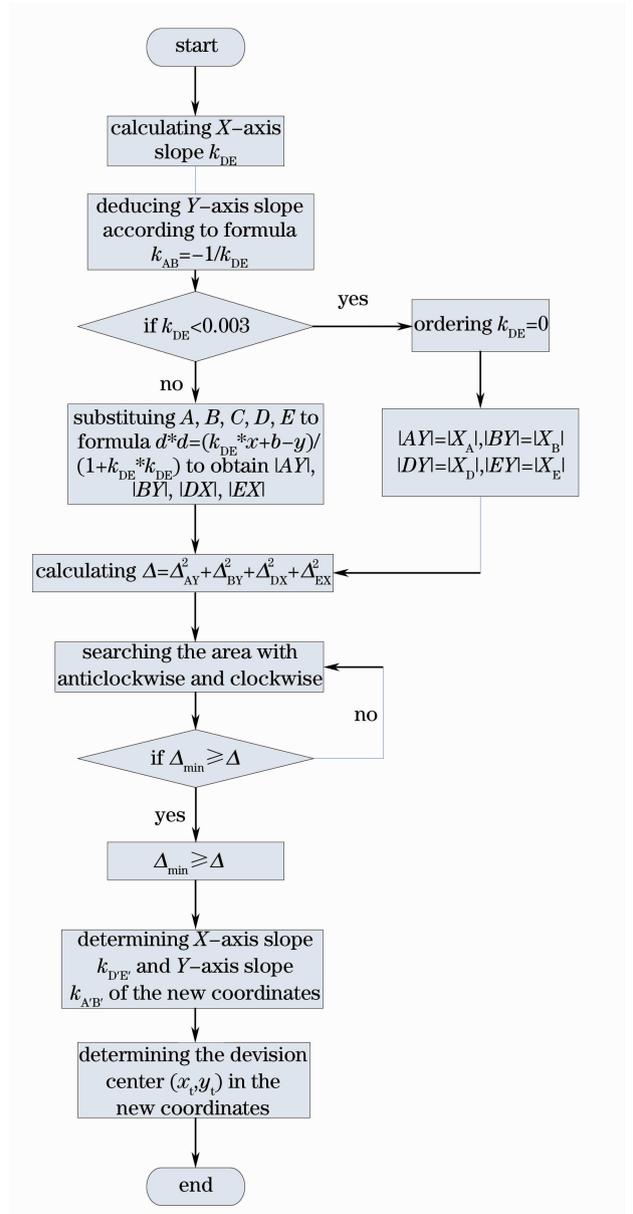


图 5 相机姿态自适应校正算法流程图

Fig. 5 Camera pose adaptive correction algorithm flow chart

1) 针孔标定不确定度  $u_{l_b}$   
针孔靶加工后经检测标定, 扩展不确定度  $U_{l_b}$  为 0.02 mm。假设它服从正态分布, 则其标准不确

定度为  $u_{l_b} = \frac{U_{l_b}}{3} = 0.0067$ 。

### 2) 平行光管焦距标定不确定度 $u_{f_p}$

反射式平行光管的焦距经 0.5" 精度莱卡经纬仪标定后,其焦距为 1500 mm,扩展不确定度  $U_{f_p}$  为 1 mm。假设它服从正态分布,则其标准不确定度为

$$u_{f_p} = \frac{U_{f_p}}{3} = 0.333。$$

### 3) 软件计数标定不确定度 $u_N$

由于

$$\frac{N \times d}{f_c} = \tan \theta = \frac{l_m}{f_m}, \quad (17)$$

式中  $l_m$  为有机发光二极管(OLED)屏上的像高, $f_m$  为瞄具的目镜焦距, $\theta$  为 CCD 像面上像高对相机镜头目镜所成的张角。不妨假设像转换器的放大系数为 1,则

$$l_m = l_w, \quad (18)$$

式中  $l_w$  为待测瞄具中红外焦平面阵列上的像高,又因为

$$\frac{l_w}{f_w} = \frac{l_o}{f_p}, \quad (19)$$

式中  $l_o$  为靶标物高。联立(17)~(19)式有

$$N = \frac{l_o}{d} \times \frac{f_w \times f_c}{f_m \times f_p}, \quad (20)$$

由(20)式知,计数值  $N$  的误差比较复杂,与  $l_m$ 、 $d$ 、 $f_w$ 、 $f_c$ 、 $f_m$ 、 $f_p$  均有关,这些误差因素在光管加工中可控制在波长量级,影响可忽略不计。因此, $U_N$  可视为一常数,即灰阶分辨率,采用 8 位亚像素细分,其扩展不确定度  $U_N = 1/(2^8) = 0.0039$ ,假设它服从正态分布,则其标准不确定度为  $u_N = \frac{U_N}{3} = 0.0013$ 。

将  $f_p=1500$  mm, $l_b=0.0014$  mm, $d=0.0052$  mm, $u_N=0.0013$ , $u_b=0.0067$  mm, $u_{f_p}=0.33$  mm 代入(16)式,得  $\theta_c$  的标准不确定度  $u_{\theta_c} = 0.00466$ ,扩展不确定度  $U_{\theta_c} = 3 \times u_{\theta_c} = 0.0139$  mil。所以  $U_{\theta_c} < 0.02$  mil,满足设计要求。

## 3.2 实验验证

根据设计,研制并装调一台红外瞄具零位走动量测试系统样机,如图 6(a)所示,软件界面如图 6(b)所示。

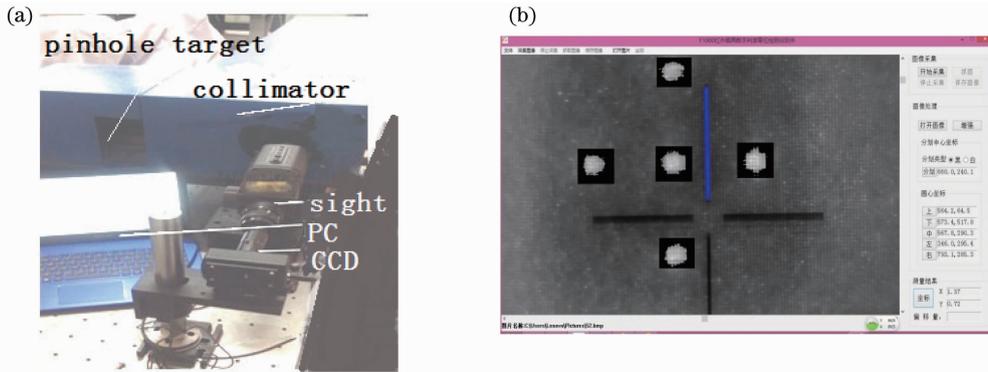


图 6 (a)测量仪器实物图;(b)软件测量界面

Fig. 6 (a) Measuring system prototype; (b) measuring software interface

将被测红外瞄具与 CCD 相机分别安置在安装座上,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,直至采集到清晰的针孔靶及红外瞄具瞄准分划图像。由图像判读软件进行判读,红外瞄具装夹后,采集针孔靶及瞄准分划图像,框选分划线,测得其中心坐标。框选上、下、中、左、右五个可用圆斑,测得其圆斑中心坐标,经相机姿态自适应算法校正后,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。将瞄具两次装夹后测得的坐标,代入(1)式和(2)式即得出  $X$  方向、 $Y$  方向的走动量。进行 6 次等精度测量,其测量

结果如表 1 所示。

表 1 瞄具零位走动量测量数据表

Table 1 Infrared sight zerovariable quantity measuring data table

Order number	Actual /mil	
	$\Delta X$	$\Delta Y$
1	2.535	-1.131
2	2.523	-1.121
3	2.512	-1.119
4	2.539	-1.129
5	2.511	-1.134
6	2.519	-1.111
$\sigma$	0.0116	0.0087

测量结果的标准不确定度为

$$u_c = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.0116}{\sqrt{6}} = 0.00473. \quad (21)$$

扩展不确定度为

$$U_c = 3u_c = 0.0142. \quad (22)$$

因为  $U_c < 0.02$ , 故从实验结果来看, 也符合系统设计的要求。

## 4 结 论

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。测量过程中, 既不需通过移动针孔靶, 也不需旋转平面反射镜实现零位走动量的测量, 测试系统中没有参与测量的运动组件, 而是基于机器视觉技术, 建立了零位走动量测量新模型, 通过相机姿态自适应校正, 以图像判读代替运动组件移动, 避免因位移量移动引入误差, 从而实现零位走动量测量。

不论从精度分析的角度, 还是从实验结果的分析来看, 该系统的不确定度都优于  $0.02 \text{ mil}$ , 满足设计的精度要求, 且高于同类检测设备的精度。该设备已应用于某基地及多家兵工企业, 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

- 1 Wang Jinsong, An Zhiyong, Li Hailan. Infrared reflective collimator sight zero variable quantity 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.
- 2 Xie Bin. Infrared Sights Zero Variable Quantity 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.
- 3 Li Guokuan, Peng Jiaxiong. Infrared imaging dim target detection based on wavelet transform [J]. J Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(5): 69-71.  
李国宽, 彭嘉雄. 基于小波变换的红外成像弱小目标检测方法[J]. 华中科技大学学报, 2000, 28(5): 69-71.

- 4 Fang Yiqiang, Zhu Bin, Fan Xiang, *et al.*. Air infrared target detecting based on partial graying [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0404001.  
方义强, 朱 斌, 樊 祥, 等. 局部灰度化的空中红外目标探测方法[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0404001.
- 5 Wen Bin, Li Yongliang, Zeng Youhong. Portable infrared target detection system based on baseline sigh [J]. Laser and Infrared, 2010, 40(12): 1330-1332.  
温 彬, 李永亮, 曾佑洪. 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.
- 6 Chang Songtao, Zhang Yaoyu, Sun Zhiyuan, *et al.*. Radiation measurement method for infrared small target [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0504001.  
常松涛, 张尧禹, 孙志远, 等. 红外小目标辐射测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0504001.
- 7 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.
- 8 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, 2013, 39(11): 1109001.  
王卫华, 李志军, 何 艳, 等. 一种基于感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.
- 9 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.
- 10 Xue Yonghong, An Wei, Zhang Tao, *et al.*. Real-time line of sight calibration algorithm for high earth orbit infrared scanning sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0628003.  
薛永宏, 安 玮, 张 涛, 等. 高轨红外扫描相机视轴指向实时校正算法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0628003.
- 11 Wei Benzhen, Zhao Zhimin, Hua Jin. Sub pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2010, (4): 838-844.  
魏本征, 赵志敏, 华 晋. 基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, (4): 838-844.
- 12 Wen Sheng, Bin Deng, Jian Liu. Multi-resolution distance map based small target detection in infrared image [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(1): 42-45.
- 13 Yang Wang, Qinbo Zhen, Junping Zhang. Real-time detection of small target in irgrey image based on mathematical morphology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 28-31.
- 14 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.

栏目编辑: 张浩佳