

文章编号 1004-924X(2012)01-0157-08

火炮稳定精度图像测试系统

孙泽林^{1,2*}, 王 昭¹, 李 明²

(1. 西安交通大学 制造系统与质量工程研究所, 陕西 西安 710049;

2. 中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 为了高精度测试火炮稳定精度, 建立了基于 CCD 与标准靶板的图像测试系统。介绍了测试系统的组成结构与工作原理, 研究了系统采用的图像预处理、模板匹配、靶标十字中心定位和系统标定等关键算法。为消除分划板十字线对靶板十字识别的干扰, 采用了开关中值滤波算法; 在选取灰度变换算法提高图像对比度的基础上, 分析选取了模板制作与匹配算法; 然后, 介绍了靶板十字中心的像素级和亚像素级定位; 最后, 引入基于主动视觉的标定方法确定了系统的像素角分辨率。试验结果表明: 提出的系统测试精度优于 0.07 mil, 满足实际测试需要, 实现了带有稳炮功能的现代火炮系统的稳定精度靶场测量。

关键词: 图像测试系统; 火炮; 稳定精度; CCD; 主动视觉

中图分类号: TH745.2; TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0157

Image test system for gun stabilization accuracy

SUN Ze-lin^{1,2*}, WANG Zhao¹, LI Ming²

(1. *Institute of Manufacturing System and Quality Engineering,*
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. *The 63870 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Huayin 714200, China)*

** Corresponding author, E-mail: sunzelin73@126.com*

Abstract: An image test system using a CCD and a standard target was established to measure the stabilization accuracy of a gun control system. The principle and structures of the system were introduced, and its key algorithms such as image pretreatment, template matching, the orientation of target cross center and system calibration were investigated. In order to remove the disturbance of the reticle of graduation board on the target cross, the algorithm of the switching median filter was presented. After choosing the grayscale transformation to improve the image contrast, the algorithms for fabricating and matching the template were analyzed and chosen. Then, the orientation algorithms of pixel and subpixel for target cross center were presented. Finally, the angle resolution of the system pixel was confirmed using a calibration method based on active vision. The result indicates that the test accuracy has been better than 0.07 mil, which meets the practical test requirement and implements the stabilization accuracy measurement of modern fire-control systems with stabilized guns in firing ranges.

Key words: image test system; gun; stabilization accuracy; CCD; active vision

收稿日期: 2011-07-07; 修订日期: 2011-09-06.

基金项目: "十一五"国防科研专项基金资助项目 (No. AL-CGJ-CG-0980)

1 引言

火炮稳定精度是指坦克、装甲突击炮等直瞄武器在运动过程中对固定目标保持自动瞄准的能力,直接影响到武器系统行进间的射击精度和射击反应时间^[1],因此,该项指标是评价直瞄武器炮控系统稳定性能的关键指标,也是靶场考核直瞄武器炮控系统性能时的必测和常测项目。而且随着大量高新技术在火控系统上的应用,炮控系统性能也得到了大幅度的提升,相应地对测试技术和测试设备提出了更高要求。

近年来,国内科研院所提出的火炮稳定精度测试方法主要有 PSD+激光器法、双轴陀螺仪法、CCD+网格坐标靶+DV 法、透明坐标靶板+激光器+DV 法以及标准靶板+CCD+DV 法^[2-6]。其中 PSD+激光器法因为位置传感器(PSD)是光电器件,易受背景光影响,各部件间的相互位置精度要求相当高,测试的不确定误差较大,不适合靶场的野外试验环境。双轴陀螺仪法结构简单,但存在时漂,整个测试过程必须在很短的时间内完成,而且火炮身管高低和方位角位移之间存在耦合效应,双轴陀螺无法精确表征身管空间姿态的变化,因此该方法无法满足靶场试验需求。CCD+网格坐标靶+DV 法与透明坐标靶板+激光器+DV 法也只适合实验室使用。标准靶板+CCD+DV 法类似于现行 GJB 给定的测试方法,但还处于理论分析和实验验证阶段,没有设计研制专用的光机结构和数据采集处理系统,图像质量受场地和天气等因素的影响较大,测试效率也不高,还无法完全满足靶场试验的需求。

为了提高火炮稳定精度的测试精度与效率,本文采用 CCD 数字图像处理技术,建立了一套新型高精度火炮稳定精度图像测试系统,并讨论了系统图像预处理、模板匹配、靶标十字中心定位和系统标定等关键算法。

2 测试系统的构成与工作原理

2.1 测试系统的硬件构成

该测试系统主要由基准线获取装置、车载图像记录控制单元和便携式监视器等组成,如图 1 所示。其中基准线获取装置主要由 CCD 接收系

统、目视系统和机械安装夹具等部分组成,图 2、图 3 分别为其光学系统和光机结构示意图,CCD 接收系统和目视系统共用一块位于望远物镜焦平面处的分划板,其中目视系统用于试验前观察分划板十字与靶板十字的重合情况。车载图像记录控制单元用于完成视频实时采集与存储,并同时

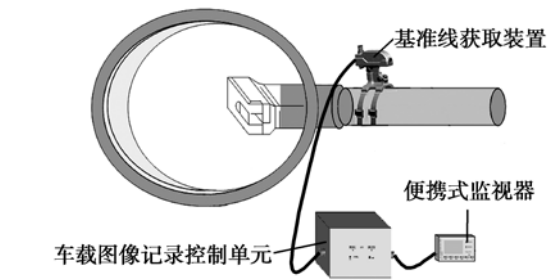


图 1 系统硬件构成及安装示意图
Fig. 1 Composing and setting of test system

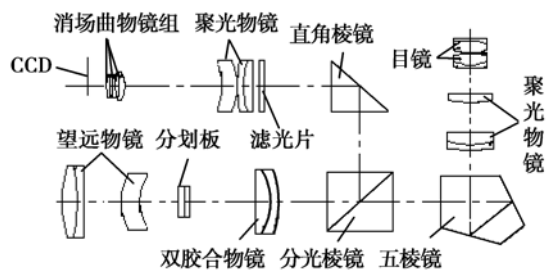


图 2 基准线获取装置光学系统结构示意图
Fig. 2 Framework of optical system of the device for obtaining datum line

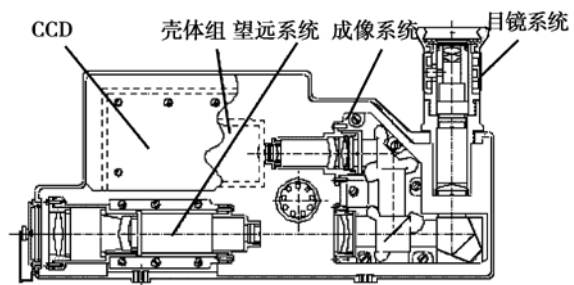


图 3 基准线获取装置光机结构示意图
Fig. 3 Optical and machine framework of the device for obtaining datum line

2.2 测试系统的工作原理

试验时,基准线获取装置安装于火炮身管根部,正对前方靶板,其光轴与炮膛轴线基本一致。火炮按规定速度正对靶板行驶,车载图像记录控

制单元实时记录靶板十字相对 CCD 中心的抖动轨迹,测试完毕,由测试系统软件对每帧图像进行处理,精确定位靶板的十字中心,并根据现行 GJB 相关规定计算靶板十字中心与 CCD 中心的偏差,从而得到火炮稳定精度。

3 测试系统软件的关键算法

测试系统软件处理图像数据的过程如图 4 所示。

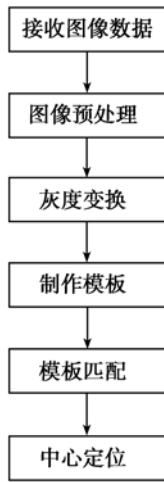


图 4 系统软件图像处理流程图

Fig. 4 Flowchart of image processing using system software

3.1 图像预处理

在图像产生、传输和变换的过程中,由于各种因素的影响,往往会使图像与被测物体或原始图像之间产生差异,这给从图像中提取各种信息造成了困难和不便^[7]。同时由于火炮稳定精度图像测试系统的 CCD 接收系统与目视系统共用一块分划板,该分划板上有带刻度的十字分划线,便于目视观察调整安装设备,但在测试过程中,CCD 接收的图像中也同样会含有十字分划线,这就给测试系统软件进行图像处理带来不利影响。尤其当靶板十字线与该十字分划线混在一起时,更难以把靶板十字分离和识别出来,极大地影响识别精度。因此需要在检测前对图像进行滤波降噪处理,并剔除分划板十字分划线。

滤波器分为线性滤波器和非线性滤波器两大类。线性滤波器对高斯噪声有较好的平滑作用,但其在去噪的同时往往使图像轮廓变模糊,造成

图像质量严重下降。非线性滤波器中的中值滤波器在过滤噪声的同时,还能很好的保护边缘轮廓信息。它对消除孤立点和线段的干扰十分有用,特别是对于二进制噪声尤为有效。同时为防止将趋近于水平或垂直的图像细节误判为分划线而除掉,本系统中引入了线形窗口的开关中值滤波器对图像进行滤波降噪和剔除分划板十字分划线^[8]。其结构如图 5 所示。

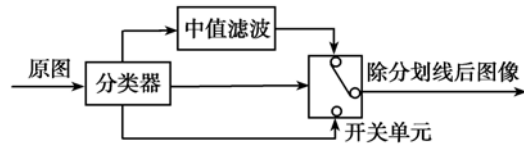


图 5 线形窗口的开关中值滤波器结构示意图

Fig. 5 Structure of switching median filter of linear window

测试系统先拍摄采集一帧白屏的图像作为基准,利用边缘检测算法将基准图像中的分划线提取出来;再将提取的图像在垂直和水平方向上投影,得到的投影图像中的峰值区域就是受十字分划线影响的图像区域。然后利用分类器对图像区域进行分类处理,对于未受分划线影响的区域直接保留原图像信息,对受影响区域进行开关中值滤波,先将 $W_n[x_{ij}]$ 中像素点进行排序,得到 $x_{ij}^{(1)}, \dots, x_{ij}^{(2N+1)}$, 其中:

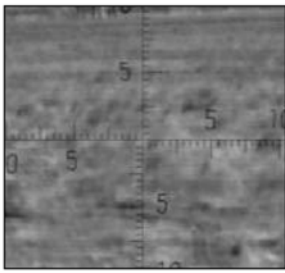
$$\begin{cases} x_{ij}^{(1)} = \min(W_n[x_{ij}]) \\ x_{ij}^{(2N+1)} = \max(W_n[x_{ij}]) \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $W_n[x_{ij}]$ 为某一线形窗口内像素点 x_{ij} 的序列集, $x_{ij}^{(k)}$ 为排序后相应位置的像素点灰度值。再通过式(2)判断十字分划线,并对相应像素点作处理。

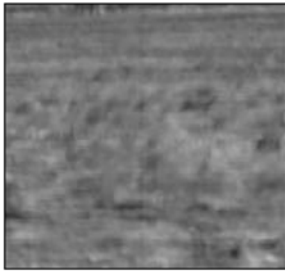
$$g_{ij} = \begin{cases} med(W_n[x_{ij}]) & \text{when } x_{ij} = x_{ij}^{(1)}, x_{ij}^{(2N+1)} \text{ or} \\ & |x_{ij} - W_n[x_{ij}]| > T \\ x_{ij} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, g_{ij} 为滤波后对应像素点灰度值, $med()$ 表示取序列中值, T 表示限定的阈值,可根据实际图像的不同进行相应的调整。

利用开关中值滤波器将该测试系统拍摄的一幅图像进行了滤波处理,如图 6 所示。从图中可以看出,在消除原图像中分划十字线的同时很好地保留了原图像细节。



(a) 原始图像
(a) Origin image



(b) 滤波后图像
(b) Image of (a) after filtering

图 6 滤波效果图

Fig. 6 Effect of switching median filter



(a) 原始图像
(a) Origin image



(b) 灰度变换后图像
(b) Image of (a) after grayscale transformation

图 7 灰度变换效果图

Fig. 7 Effect of grayscale transformation

3.2 图像灰度变换

在火炮稳定精度测试过程中,由于测试设备与靶板间距离远、靶板小以及 CCD 拍摄的图像中靶板与背景的对比较低,以至靶板十字中心很难分辨清楚。因此,在定位靶板十字中心前,先对图像进行灰度变换,以增强图像对比度,并使图像变得更加清晰、细腻,容易识别^[9]。灰度变换可表示为:

$$g(x, y) = T(f(x, y)), \quad (3)$$

其中, $g(x, y)$ 为经处理后图像像素的灰度值, $f(x, y)$ 为原图像像素的灰度值, T 为灰度变换函数。式(3)也可表示为:

$$D' = T(D), \quad (4)$$

其中, $D = f(x, y)$, $D' = g(x, y)$, D 和 D' 都要求在像素的灰度范围内,函数 $T(D)$ 一旦确定,就确定了一个具体的输入灰度值与输出灰度值之间的转换关系。常用的灰度变换方法有图像灰度求反、灰度拉伸、直方图均衡化等等,本文采用直方图均衡化方法对测试系统拍摄的图像进行灰度变换后,对比度明显增强,靶板十字更加清晰,如图 7 所示。

3.3 模板匹配

模板匹配就是在一幅待识别大图像中搜寻与已知模板图像具有相同尺寸、方向和图像的目标。即事先制作一个欲匹配的靶板模板图像,随后进行全局匹配,寻找匹配精度最高的那块区域,是实现目标识别的关键步骤之一^[9-10]。制作模板有两种方式:一种是用鼠标点击图像中靶心位置,通过软件提示,自动将靶心周围的小范围区域设置成模板;另一种是通过鼠标拖拽选取区域,再将所选

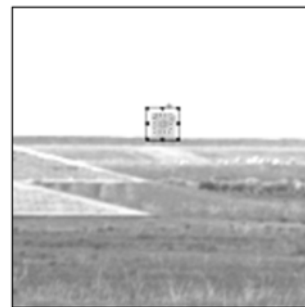


图 8 模板制作示意图

Fig. 8 Sketch map of fabrication template

区域制作成模板。第一种方法的模板制作精度没有第二种高,因此本文使用鼠标拖拽模板框的方法来制作模板,如图 8 所示,模板框分内框和外框,其大小可通过鼠标拖拽来更改,先拖拽外部模板框将图像中靶板全部包含在内,再拖拽内部模板框直到模板框中的十字与靶板图像中的靶板十字对准。

目前模板匹配的算法相当多,其中归一化互相关匹配算法是一种公认的经典匹配算法,通常称 NC(Normalized Correlation)算法。其通过计算模板图像和待匹配图像的互相关值来确定匹配的程度,互相关值最大时的搜索窗口位置就是待匹配的目标位置。互相关定义一般如下:

$$NC(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(m, n) F(m+i, n+j)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T^2(m, n) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F^2(m+i, n+j)}} \quad (5)$$

其中,NC 为互相关值,T 为模板图像中某像素点的灰度值,F 为待匹配图像中某像素点的灰度值。

NC 算法具有很高的准确性和适应性,对图像灰度值的线性变换具有“免疫性”,即所求的 NC 值不受灰度值的线性变换的影响,缺点是计算量庞大。但本文设计的火炮稳定精度测试系统的特点是“实时采集试验图像,事后高精度处理”,注重的是数据采集与处理的准确性,对后续数据处理速度要求不高,因此本文采用 NC 算法进行模板匹配。

3.4 靶板十字中心定位

3.4.1 像素级定位

在定位目标靶板区域后,采用重心法^[11-12]定位靶板十字中心位置,计算公式如式(6)所示。

$$\begin{cases} X_c = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M x \cdot R(x, y)}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M R(x, y)} \\ Y_c = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M y \cdot R(x, y)}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M R(x, y)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, X_c 、 Y_c 分别为靶板十字的水平、垂直向中心位置, $R(x, y)$ 是图像在 (x, y) 点的像元灰度值,

M 、 N 分别为跟踪窗口内的水平、垂直向的像元数。由于计算出的重心不是个别的最亮点位置,而是图像中各个像元灰度加权平均的位置,因此其定位的随机误差小,抗干扰能力强,稳定性好,定位精度可达到像素级。

3.4.2 亚像素级定位

本文设计的图像测试系统要求测试精度(1σ) ≤ 0.07 mil。在整个系统测试误差中 CCD 判读误差是最主要的误差源,该 CCD 接收系统的组合焦距 f_c 为 137.48 mm,像元尺寸 ϕ 为 7.4 μm ,则 CCD 判读误差为:

$$\sigma_1 = \frac{\phi}{f_c} = \frac{7.4 \times 10^{-3}}{137.48} = 0.05 \text{ mil.}$$

如果再考虑系统光学和机械误差,则很难达到到系统的测试精度指标要求,因此必须对 CCD 像元进行亚像素细分。假设对其进行了 2 细分,则其判读误差为:

$$\sigma_2 = \frac{\phi/2}{f_c} = \frac{3.7 \times 10^{-3}}{137.48} = 0.025 \text{ mil.}$$

一般的亚像素细分算法精度为 0.1~0.5 pixel,理想情况下可达到 0.05 pixel^[12]。很显然,经过亚像素细分后,系统测试精度能得到大幅度提高。本文引入五点投影质心法^[12]进行亚像素细分。

首先对待处理的图像 $I(x, y)$,在靶板所在长方形区域 $(x_1, x_2) \times (y_1, y_2)$ 分别进行垂直和水平投影,并分别定义如下:

$$V(x) = \sum_{y=y_1}^{y_2} I(x, y), \quad H(y) = \sum_{x=x_1}^{x_2} I(x, y), \quad (7)$$

其中, $V(x)$ 为垂直投影, $H(y)$ 为水平投影。对二值图像而言,投影就是统计出图像中每列及每行在某区域中非零像素点的数目。

在像素级中心位置 (X_c, Y_c) 确定的基础上,利用投影的信息进行曲线拟合,设拟合的曲线形式为 $y = Ax^2 + Bx + c$,则根据方形孔径采样定理,每个像素的灰度输出值为:

$$y_n = \int_{n-1/2}^{n+1/2} (Ax^2 + Bx + c) dx, \quad (8)$$

其中, y_n 为像素点的灰度输出值, A 、 B 、 C 为待定系数。

在利用相邻 3 个点的灰度值根据式(8)确定系数 A 、 B 、 C 后,取 X_c 及其左右两边 4 个相邻的

值记为 X_{-2} 、 X_{-1} 、 X_0 、 X_1 、 X_2 ,将这 5 个值分别代入式(8)计算出对应的函数值 V_{-2} 、 V_{-1} 、 V_0 、 V_1 、 V_2 。再利用质心公式计算出亚像素级中心坐标:

$$X_{\text{center}} = \frac{\sum_{i=-2}^2 V_i \times X_i}{\sum_{i=-2}^2 V_i}, \quad (9)$$

其中, X_{center} 为水平向亚像素级中心坐标。同理可得:

$$Y_{\text{center}} = \frac{\sum_{i=-2}^2 H_i \times Y_i}{\sum_{i=-2}^2 H_i}, \quad (10)$$

其中, Y_{center} 为水平向亚像素级中心坐标。 Y_i 为 Y_c 及其左右两边 4 个相邻的值, H_i 为将 Y_i 代入式(8)计算出的对应函数值。

4 测试系统静态标定与测试精度验证

4.1 测试系统静态标定

CCD 内部参数标定可分为传统标定方法、自标定方法和基于主动视觉的标定方法 3 种不同的形式^[13]。本文引入基于主动视觉的标定方法对图像测试系统的像素角分辨率进行了标定。将带电十字的电子经纬仪 TDJ2Z(精度:2.1")置于基准线获取装置前,调整经纬仪姿态,使经纬仪与基准线获取装置在同一轴线上,在 CCD 视场内调动经纬仪电十字,同时记录经纬仪方位、俯仰旋转角度与电十字在 CCD 上移动的像素个数如表 1 所示。则某一方向上的 CCD 像素角分辨率可表示为:

$$K = \frac{\Delta\omega}{\Delta n}, \quad (11)$$

其中, K 为某一方向上的 CCD 像素角分辨率, $\Delta\omega$ 为经纬仪在该方向上旋转角度, Δn 为电十字在 CCD 上移动的像素个数。

表 1 经纬仪旋转角度与对应的像素个数

Tab. 1 Circumrotated angle of theodolite and corresponding number of pixels

序号	方位		俯仰	
	旋转角度/(°)	像素数/个	旋转角度/(°)	像素数/个
1	6 260	545	7 297	637
2	6 789	592	6 388	558
3	6 425	561	6 050	528

则根据式(11)和表 1 中的数据进行计算,可得 CCD 的水平向、垂直向像素角分辨率均为 0.053 mil。

4.2 系统测试精度验证

将 CCD 像元角分辨率内置于系统专用测试软件,同系统静态标定方法一样,将电子经纬仪旋转不同的角度,车载图像记录控制单元采集存储相应的图像后,导入信息处理计算机,由测试软件进行分析计算,得到相应的测试结果,并与经纬仪自身读数进行比较,得到经纬仪旋转角度值与相应测试结果的差值,具体检测结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 经纬仪方位旋转角度与系统测试结果

Tab. 2 Contrast between system test result and circumrotated azimuth angle of theodolite

序号	旋转角度/(°)	测试结果/mil	差值/mil
1	5 302	24.492	0.054
2	4 250	19.625	0.051
3	3 600	16.719	0.052
4	2 250	10.465	0.048
5	1 700	7.823	0.047
6	830	3.889	0.046
7	454	2.146	0.044
8	242	1.079	0.041

表 3 经纬仪俯仰旋转角度与系统测试结果

Tab. 3 Contrast between system test result and circumrotated pitching angle of theodolite

序号	旋转角度/(°)	测试结果/mil	差值/mil
1	5 254	24.268	0.056
2	4 386	20.253	0.053
3	3 536	16.421	0.051
4	2 258	10.408	0.046
5	1 685	7.849	0.048
6	840	3.844	0.045
7	450	2.126	0.043
8	235	1.046	0.042

根据测试误差处理理论^[14],测试系统的测试精度计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta\theta_i^2}{n-1}}, \quad (12)$$

其中, σ 为系统测试精度, $\Delta\theta_i$ 为第 i 次经纬仪旋转

角度与系统测试结果的差值, n 为检测次数。

由表2和表3中的检测结果,利用式(12)即可计算得该测试系统的方位向、高低向测试精度均为0.052 mil,满足测试精度(1σ) \leq 0.07 mil的指标要求。

5 结 论

本文根据现代火炮稳定精度测试精度高、动态实时测试的特点,建立了基于CCD成像的图像

测试系统,并介绍了该测试系统的组成结构与工作原理。然后研究了测试系统数据处理过程中的图像预处理、模板匹配、靶标十字中心定位和系统标定等关键算法。试验结果表明,该系统的测试精度优于0.07 mil,满足实际测试需求,解决了带有稳炮功能的现代火控系统稳定精度的靶场测试问题,为我国自行武器装备生产试验提供了技术支撑。该测试系统还可完成火炮静态漂移速度、装定角精度等火控参数的测量,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 周启煌,常天庆,邱晓波. 战车火控系统与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2003:174-177.
ZHOU Q H, CHANG T Q, QIU X B. *Fire Control System and Command Control System of Combat Vehicle*[M]. Beijing: The National Defence Industry Publishing Company, 2003: 174-177. (in Chinese)
- [2] 汤霞清,陈杰勋,陈玉强. PSD在坦克火控系统性能测量中的应用[J]. 火力与指挥控制,2001,26(1):45-46.
TANG X Q, CHEN J X, CHEN Y Q. Application of PSD in characteristic measurement of the tank fire control system [J]. *Fire Control and Command Control*, 2001, 26(1): 45-46. (in Chinese)
- [3] 赫赤,赵克定,许宏光,等. 炮控系统性能试验中角位移量的几种测量方法[J]. 火力与指挥控制,2004,29(6):103-106.
HE CH, ZHAO K D, XU H G, *et al.*. Several measurement methods of angle displacement in characteristics test of gun control system [J]. *Fire Control and Command Control*, 2004, 29(6): 103-106. (in Chinese)
- [4] 赫赤,赵克定,冯三任,等. 炮控系统静态参数测试及其关键技术研究[J]. 南京理工大学学报,2004,28(1):14-18.
HE CH, ZHAO K D, FENG S R, *et al.*. Test system for the static parameters of gun control system and its techniques [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 28(1): 14-18. (in Chinese)
- [5] 王春忠,杨忠国,荣明,等. 基于陀螺仪的坦克炮控稳定精度检测仪设计[J]. 传感器与微系统,2009,28(1):85-87.
WANG CH ZH, YANG ZH G, RONG M, *et al.*. Design of test instrument for stabilization accuracy of tank gun control system using gyroscope [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(1): 85-87. (in Chinese)
- [6] 秦嘉,卢志刚,李勇,等. 坦克火控系统稳定精度图像测试分析方法[J]. 火力与指挥控制,2009,34(10):175-179.
QIN J, LU ZH G, LI Y, *et al.*. Method of testing and analyzing the dynamic stabilization precision in tank fire control system based on image processing [J]. *Fire Control and Command Control*, 2009, 34(10): 175-179. (in Chinese)
- [7] 张舞杰,杨义禄,李迪,等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程,2007,15(2):295-301.
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 295-301. (in Chinese)
- [8] 单冬冬,段锦,阴贵郁. 去除图像分划线的线形窗开关中值滤波算法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2009,32(3):454-456.
SHAN D D, DUAN J, YIN G Y. A switching median filter of linear window for removing the scale score in the image [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2009, 32(3): 454-456. (in Chinese)
- [9] 王晓曼,顾玲嘉,任瑞治. 基于改进模板匹配算法的靶标图像检测[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2007,25(1):25-29.
WANG X X, GU L J, REN R ZH. Target detec-

- tion based on improved template matching algorithm [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2007, 25(1): 25-29. (in Chinese)
- [10] 杨晓敏, 吴炜, 卿粼波, 等. 图像特征点提取及匹配技术[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(9): 2276-2282. YANG X M, WU W, QING L B, *et al.*. Image feature extraction and matching technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2276-2282. (in Chinese)
- [11] 李莉, 段锦, 顾玲嘉. 一种动态目标检测与跟踪的方法研究[J]. *长春理工大学学报*, 2005, 28(3): 1-3. LI L, DUAN J, GU L J. A method for detection and tracking of dynamic target [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2005, 28(3): 1-3. (in Chinese)
- [12] 刘永泽. 目标定位中亚像素细分算法的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006: 17-29. LIU Y Z. *Study on subpixel detecting algorithm for target localization*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006: 17-29. (in Chinese)
- [13] 张丹, 段锦, 顾玲嘉. 基于图像的模拟相机标定方法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增): 293-297. ZHANG D, DUAN J, GU L J. Method of camera calibration based on image processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (Supp.): 293-297. (in Chinese)
- [14] 钱政. 测试误差分析与数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008. QIAN ZH. *The Testing Error Analysis and Data Processing* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008. (in Chinese)

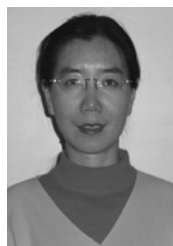
作者简介:



孙泽林(1973—),男,湖南娄底人,博士研究生,高级工程师,1997年于湘潭大学获得学士学位,2005年于军械工程学院获得硕士学位,主要从事火炮测试技术及仪器设备等方面的研究。E-mail: sunzelin73@126.com



李明(1978—),男,陕西汉中,人,硕士,工程师,2002年于西安交通大学获得学士学位,2010年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事火炮测试技术及仪器设备等方面的研究。E-mail: liming7832@126.com



王昭(1964—),女,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,1998年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光电测量、光学信息处理、光学精密仪器等方面的研究。E-mail: wangzhao@mail. xjtu. edu. cn