

## 拟合标定模型的火炮稳像标定方法研究

岳鑫<sup>1</sup>, 李亮亮<sup>2</sup>, 王红军<sup>1\*</sup>, 吕志刚<sup>2,3</sup>, 刘丙才<sup>1</sup><sup>1</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>3</sup>西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 火炮武器瞄准镜标定的性能指标好坏直接影响首发命中概率,为了提高火炮稳像标定精度,建立了一种拟合标定模型。构建融合频域滤波的阈值分割模型消除成像灰度级不均匀的影响,构建长直线拟合模型实现火炮稳像靶心的标定,构建标定定位轴模型实现稳像精准标定检测。所提方法可有效地消除成像灰度级不均匀现象,具备较好的分割去噪效果,横纵向标定长直线的拟合相关系数分别为 0.995646 和 0.993913,横纵向坐标标定误差分别为小于等于 0.15% 和小于等于 0.005%。实验结果表明,所提标定方法可精准地实现火炮瞄准镜的标定检测。

**关键词** 图像处理; 火炮稳像标定; 阈值分割; 拟合模型; 标定轴模型

中图分类号 TP391.7; TH745

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1510001

## Gun Image Stabilization Calibration Method Based on Fitting Calibration Model

Yue Xin<sup>1</sup>, Li Liangliang<sup>2</sup>, Wang Hongjun<sup>1\*</sup>, Lü Zhigang<sup>2,3</sup>, Liu Bingcai<sup>1</sup><sup>1</sup> School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;<sup>3</sup> School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** To improve the accuracy of gun image stabilization calibration, a fitting calibration model was designed to improve the calibration property of a gun's collimator, which is expected to increase the shell's hitting probability. A threshold segmentation model fused via frequency-domain filtering was constructed to eliminate the influence of uneven imaging gray levels. A long line-fitting model and calibration-positioning axis model were constructed to calibrate the target center and realize accurate detection of the image's stabilization calibration, respectively. The results demonstrate that the proposed method exhibits good segmentation and denoising effect and can effectively eliminate the uneven phenomenon of imaging gray levels. The fitting correlation coefficient of the horizontal and vertical demarcated long lines is 0.995646 and 0.993913, respectively, and the calibration error of horizontal and vertical coordinates is less than or equal to 0.15% and 0.005%, respectively. Overall, the experimental results demonstrate that the designed calibration method can accurately achieve calibration detection of gun sight.

**Key words** image processing; gun image stabilization calibration; threshold segmentation; fitting model; calibration shaft model

**OCIS codes** 100.1160; 120.4800; 150.1488

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-12-20; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 陕西省科技厅项目(2019JM-373)

通信作者: \*whj0253@sina.com

## 1 引言

在现代常规兵器对抗作战中,火力系统的反应速度和射击精度是武器系统的首要性能指标,它们主要取决于火控系统的性能<sup>[1]</sup>。瞄准镜标定的性能指标好坏直接影响首发命中概率,为了提高火炮武器系统的作战效能,将其安装在瞄准镜的目镜后部,摄取一定距离处靶标的图像,进行火炮瞄准镜精度的检测标定<sup>[2]</sup>。本文采用电荷耦合器件(CCD)摄取瞄准镜视场中心部分图像,通过传输部件将图像传输至电脑端并进行图像处理,进而得到火炮稳像的标定参数。常采用图像处理的方式实现数字化的火炮稳像标定,其中最为关键的是摄取的灰度级范围较宽的图像阈值分割和后续的标定定位<sup>[3]</sup>。

针对灰度级动态范围较大的图像,处理方法主要有如下几种。1)根据光照分布对图像进行局部阈值分块,其灰度边界存在伪影。文献[4]通过改进最大类间方差(OTSU)法,判别像素所属灰度级,确定分割阈值;文献[5]通过设计自适应区域判定优化模型,计算分割阈值;文献[6]设计了一种基于融合多种预处理的迭代二值化(IST)算法;文献[7]设计了一种基于形态学 Sauvola 并行的优化算法。2)采用 Bernsen、Niblack、Sauvola 等局部阈值算法,这些算法均可以逐像素计量且容易引入附加噪声。文献[8]提出了一种基于自适应邻域窗口和修正系数的 Niblack 算法;文献[9]提出了一种基于群体优化算法的多级阈值分割方法。3)采用对图像进行背景估计和对比度补偿的算法,这算法存在背景难以估计等问题。文献[10-13]设计了背景消除及图像校正方法;文献[14]提出了一种结合背景估计与能量函数的低质量文档图像二值化算法,为墨迹浸润文档处理提供一种可行性方案。4)采用改进的融合多模式二值化阈值分割算法,目前该算法为当下研究的热点,采用多种方法的耦合性融合,以适应多种场合。文献[15-17]均提出阈值分割研究新方法。

现有算法对宽灰度级标定图像进行阈值分割时效果不佳,不能较好地处理火炮稳像。为了更好地实现标定,本文首先构建了一种融合频域滤波的阈值分割模型,利用小空间的离散余弦变换(DCT)和同态滤波(HF)消除标定图像中亮度分布不均匀的现象,并通过滑窗积分图二值化实现阈值分割;其次,采用基于感兴趣区域(ROI)的长

直线拟合,对 ROI 图像进行 Hough 直线提取聚类,使用最小二乘法(LSM)对线段端点进行长直线拟合并求解标定中心坐标;最后,构建标定轴模型,采用直线检测(LSD)算法对拟合的横向直线方程和 ROI 轮廓掩模进行细小短线的检测和聚类处理,通过交点提取、排序、阈值聚类、均值处理等进行标定分析。相较于现有阈值分割算法,所提算法能够较好地实现宽灰度级范围的图像阈值分割,经实验证明,构建的标定轴模型能精准地实现稳像标定。

## 2 基本原理

### 2.1 标定装置参数

图 1 为所研究的标定装置示意图。带刻度的十字丝内置在瞄准镜中,且一个刻度为一密位。相机通过该十字丝对瞄准镜进行标定,并通过计算一个刻度中像素的个数,得到瞄准镜中十字丝刻度与图像之间的关系,即可得到像素与角度的关系。表 1 为标定装置的相关参数。

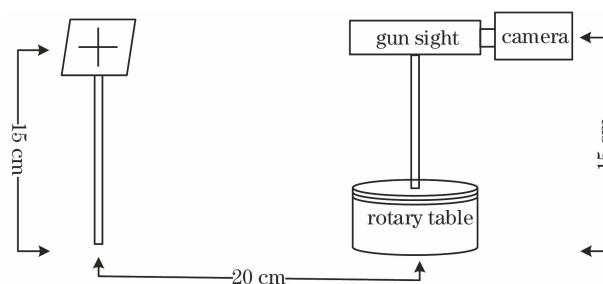


图 1 标定装置示意图

Fig. 1 Diagram of calibration device

### 2.2 整体框架

针对现有算法对宽灰度级局部处理效果不佳,对火炮标定稳像中局部区域细小短线无法准确定位的问题,提出了一种基于拟合标定模型的火炮瞄准镜标定方法。构建融合频域滤波的阈值分割模型消除非均匀光照的影响,构建长直线拟合模型定位标定十字中心的区域,构建标定轴模型保证火炮瞄准镜进行准确无误的标定。图 2 为所提算法流程。

图 3 为所提算法流程展示图。输入未标定图像,输出为标定端点坐标,其中 HF 中疏虚线框表示在积分二值化图像基础上得到的最小外接矩形,  $\min \text{ex-rect}$  中实线框表示基于最小外接矩形的区域分块情况,密虚线框表示 ROI mask 区域,基于 ROI mask 区域的处理,能够较大程度地提高系统标定精度。

表 1 标定装置的相关参数  
Table 1 Related parameters of calibration device

Device	Parameter	Content
Camera	Resolution	$4 \times 10^3$ dpi/ $8 \times 10^6$ pixel
	Horizontal viewing angle /( $^\circ$ )	63
	Pixel size / $\mu\text{m}$	1.4
	Pixel	$3264 \times 2448$
	Focal length /mm	3.6
Reticle	Cross line width / $\mu\text{m}$	22
	Diameter /mm	14
	Thickness /mm	2.38
Gun sight	Divider in the sight, a lattice is a mil and a mil is 1/6000 degrees	
	Magnification /times	3.7
	Field of view	$10^\circ 25'$
	Exit pupil diameter /mm	4
	Exit pupil distance /mm	20
Calibration parameter	Camera and gun sight height /cm	15
	Reticle height /cm	15
	Calibration distance /cm	20
Target	Demarcate the relationship between pixels and mil	

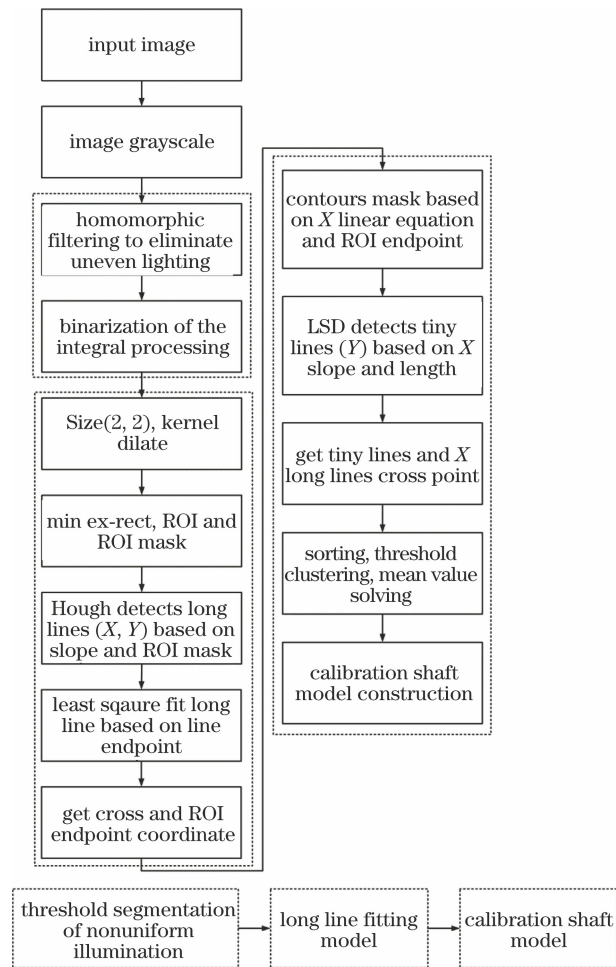


图 2 所提算法流程

Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

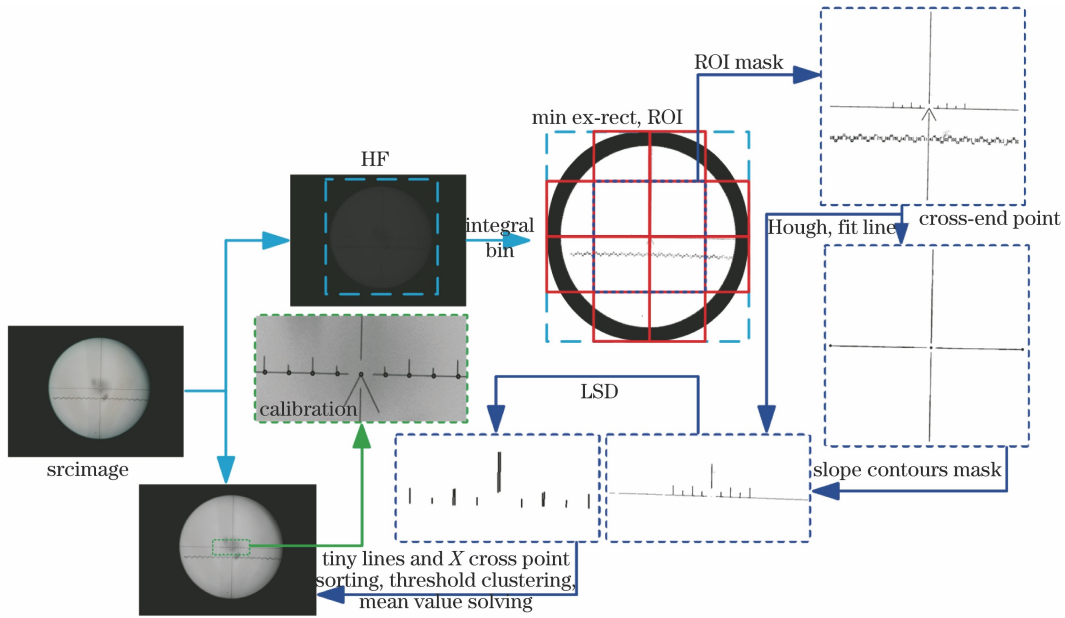


图 3 所提算法可视化流程

Fig. 3 Visualization process of the proposed algorithm

### 2.3 融合频域滤波的阈值分割

需要标定的稳像图灰度范围较大,标定区域灰度级范围较小,采用普通的灰度级线性变换无法较好地实现图像增强,因此选用 HF 处理灰度级动态范围较大的标定图像。HF 是一种把频率过滤和灰度变换结合起来的图像处理方法,以图像的照度/反射率模型作为频域处理的基础,通过调整图像灰度范围和增强对比度来改善图像的质量。采用 HF 可有效消除标定图像光照不均匀的问题,增强暗区的图像细节,不损失标定亮区域的图像细节的同时可滤除一定的噪声<sup>[18]</sup>。

将灰度图像  $f(x, y)$  建模成照射强度  $i(x, y)$  和反射强度  $r(x, y)$  的乘积:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y). \quad (1)$$

对(1)式进行取对数运算,将入射分量与反射分量分开,便于后续处理。采用 DCT 将图像信号由空间域变换到频域,DCT 的结果是实数,更节省空间,低频分量集中在左上角,高频分量集中在右下角,提高了标定的执行效率。

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y), \quad (2)$$

$$F_f[\ln f(x, y)] = F_i[\ln i(x, y)] + F_r[\ln r(x, y)]. \quad (3)$$

高斯高通滤波器表示的同态滤波器为

$$H(u, v) = (\gamma_H - \gamma_L) \cdot \{1 - \exp\{-c[D^2(u, v)/D_0^2]\}\} + \gamma_L, \quad (4)$$

式中:  $\gamma_H$  和  $\gamma_L$  用来控制滤波强度;  $c$  用于控制滤波

器斜面的锐化程度;  $D^2(u, v)$  为频谱一点  $(u, v)$  到频谱中心的距离;  $D_0^2$  为截止半径。通过对(4)式进行离散余弦逆变换(IDCT)并进行指数运算,可得到 HF 的结果  $g(x, y)$ 。  $g(x, y)$  表示为

$$g(x, y) = \exp\{\mathcal{F}^{-1}[F_f(u, v)H(u, v)]\}. \quad (5)$$

对  $g(x, y)$  进行积分图处理<sup>[19]</sup>, 表达式为

$$g(x, y) = z(x, y) + g(x - 1, y) + g(x, y - 1) - g(x - 1, y - 1), \quad (6)$$

式中:  $g(x, y)$  表示所求取的求和面积在  $y \times w + x$  处的值,  $w$  为待处理图像的宽度;  $z(x, y)$  为图像中第  $x$  行第  $y$  列的像素值。

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} z(x, y) =$$

$$g(x_2, y_2) - g(x_2, y_1 - 1) - g(x_1 - 1, y_2) + g(x_1 - 1, y_1 - 1). \quad (7)$$

通过(7)式可快速求取  $m \times m$  矩阵的像素值之和,相比逐像素的累加求和方式,减少了一定的处理时间,降低了算法复杂度,提高了运行效率。

$$B(n) = \begin{cases} 0, & p_n < \frac{z_{m \times m}(n)}{m \times m} \cdot B_{\text{thresh}} \\ 255, & p_n \geq \frac{z_{m \times m}(n)}{m \times m} \cdot B_{\text{thresh}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $p_n$  为点  $n$  处的灰度值,为  $[0, 255]$ ;  $B(n)$  为二值化图像对应点  $n$  处的灰度值;  $B_{\text{thresh}}$  为动态阈值,取值范围为  $0 \sim 1$ 。通过大量实验验证,设置  $m = 3$ 、 $B_{\text{thresh}} = 0.85$  时,满足实际处理效果。

### 2.4 建立长直线拟合模型

1) 以  $S = \text{Size}(2, 2)$  对(8)式输出的结果  $B$  进行膨胀处理,表达式为

$$B_S = B \oplus S. \quad (9)$$

2) 最小外接矩形的 ROI mask 处理

记录最小外接矩形的 4 个顶点坐标顺次为  $A(a_1, a_2), B(b_1, b_2), C(c_1, c_2), D(d_1, d_2)$ , 则确定的  $B_{\text{ROI}}$  区域的 4 个顶点坐标顺次为  $A_1[a_1 + (b_1 - a_1)/4, a_2 + (c_2 - a_2)/4], B_1[a_1 + (b_1 - a_1) \times 3/4, a_2 + (c_2 - a_2)/4], C_1[a_1 + (b_1 - a_1) \times 3/4, a_2 + (c_2 - a_2) \times 3/4], D_1[a_1 + (b_1 - a_1)/4, a_2 + (c_2 - a_2) \times 3/4]$ 。得到  $B_{\text{ROI}}$  区域的表达式为

$$B_{\text{ROI}} = B_S \{ \text{Rect}[A_1(x, \cdot), A_1(\cdot, y)],$$

$$B_1(x, \cdot) - A_1(x, \cdot), D_1(\cdot, y) - A_1(\cdot, y) \}, \quad (10)$$

式中:  $A_1(x, \cdot)$  为点  $A_1$  的  $x$  坐标,  $A_1(\cdot, y)$  为点  $A_1$  的  $y$  坐标。

纯白色背景仅含有  $B_{\text{ROI}}$  区域的掩模图像。获得纯白色背景的公式为

$$B_{\text{mask}} = (B_{\text{ROI}} \cap B_S) \cup B_{\text{zero}}^-, \quad (11)$$

式中:  $B_{\text{zero}}^-$  为纯白 255 集合。

3) 基于 Hough 检测的 LSM 长直线拟合

在  $B_{\text{mask}}$  基础上采用概率 Hough 进行直线预提取<sup>[20]</sup>, 根据斜率  $K$  进行直线聚类, 并记录端点坐标, 公式为

$$L_i = \begin{cases} L_{X,i} = \{P_{X,si}, P_{X,ei}\}, & |K_i = (P_{X,ei} \cdot y - P_{X,si} \cdot y) / (P_{X,ei} \cdot x - P_{X,si} \cdot x)| \leq 1 \\ L_{Y,i} = \{P_{Y,si}, P_{Y,ei}\}, & |K_i = (P_{X,ei} \cdot y - P_{X,si} \cdot y) / (P_{X,ei} \cdot x - P_{X,si} \cdot x)| > 1 \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $L$  为满足条件的端点坐标集合;  $P$  为直线端点坐标点集合;  $P_{X,si}$  和  $P_{X,ei}$  为横向方向上第  $i$  条直线起点和终止坐标;  $P_{Y,si}$  和  $P_{Y,ei}$  为纵向方向上第  $i$  条直线起点和终止坐标。设拟合的直线方程为  $y = kx + b$ ,  $b$  和  $k$  的表达式<sup>[21-23]</sup> 为

$$b = \frac{\sum x_j^2 \sum y_j - \sum x_j \sum x_j y_j}{N(\sum x_j^2) - (\sum x_j)^2}, \quad (13)$$

$$k = \frac{N(\sum x_j y_j) - \sum x_j \sum y_j}{N(\sum x_j^2) - (\sum x_j)^2}, \quad (14)$$

式中:  $N$  为  $L_{X,i}$  或  $L_{Y,i}$  的集合数。根据斜率  $K$ , 聚类直线点集合为  $L_{X,i}$  和  $L_{Y,i}$ , 根据 LSM 得到拟合直线,  $y_X = k_X x + b_X$  和  $y_Y = k_Y x + b_Y$ , 其中  $y_X$  和  $y_Y$  分别表示拟合得到的横向和纵向直线方程。

得中心十字坐标  $P_{\text{cross}}(x_{\text{cross}}, y_{\text{cross}})$  的表达式为

$$x_{\text{cross}} = \frac{b_x - b_y}{k_y - k_x}, \quad (15)$$

$$y_{\text{cross}} = \frac{k_y b_x - k_x b_y}{k_y - k_x}. \quad (16)$$

### 2.5 建立标定轴模型

1) 基于轮廓的掩模

首先确定掩模区域, 求线段  $A_1 C_1, B_1 D_1$  与  $y_X = k_X x + b_X$  的交点坐标, 记为  $P_{\text{cm1}}(x_{\text{cm1}}, y_{\text{cm1}})$  和  $P_{\text{cm2}}(x_{\text{cm2}}, y_{\text{cm2}})$ , 图 4 为轮廓掩模区域定位示意图, 根据倾斜虚线框确定的轮廓区域, 提取有效掩模区域, 设置倾斜直线向上平移阈值  $h_{\text{thresh}} = 100$ 。参考(10)、(11)式, 得到仅含有效掩模区域的图像  $B_{\text{Cmask}}$ 。

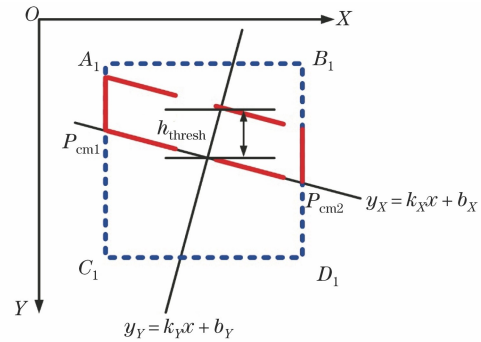


图 4 轮廓掩模区域定位示意图

Fig. 4 Schematic of contour mask area positioning

2) LSD 局部短线标定定位

在  $B_{\text{Cmask}}$  基础上采用 LSD 进行细小短线提取<sup>[24]</sup>, 根据斜率进行直线聚类, 设置表示直线聚类阈值  $L_{\text{thresh}} = 10$ , 并记录端点坐标, 表达式为

$$L_j = \begin{cases} L_{Y,j} = \{P_{Y,si}, P_{Y,ei}\}, \\ \text{NULL}, \end{cases}. \quad (17)$$

根据(15)、(16)式及  $L_{Y,j}$ , 求得各小短线与  $y_X = k_X x + b_X$  的交点坐标集合, 记为  $P_{\text{TinyC}} = \{(x_{\text{TinyC}}, y_{\text{TinyC}})\}$ , 以  $x_{\text{TinyC}}$  对  $P_{\text{TinyC}}$  执行升序排列, 实现阈值聚类及坐标的均值求解, 设置  $C_{\text{thresh}} = 10$ , 即为将  $x_{\text{TinyC}}$  差值为 10 的聚为一类。实现阈值聚类的表达式为

$$P_{\text{TinyR}} = \left\{ \left[ \sum_i^{N_{\text{count}}} x_{\text{TinyC}}(i) / N_{\text{count}}, \sum_i^{N_{\text{count}}} y_{\text{TinyC}}(i) / N_{\text{count}} \right], x_{\text{TinyC}}(i+1) - x_{\text{TinyC}}(i) < C_{\text{thresh}}, \right\}, \quad (18)$$

式中:  $N_{\text{count}}$  为聚类点数量。根据集合  $P_{\text{TinyR}}$  和十字

中心点坐标  $P_{cross}$  的位置关系构建标定定位模型轴。

### 3 实验结果与分析

所提算法在 Window 10 操作系统、Intel(R) Core(TM) CPU i7-8700HQ 3.20 GHz 8 G 内存电脑平台上开发测试。CCD 设备采集图像。使用

QT5.9.8、MSVC2015 编译器，并配置 Opencv3.1 C++ 编程实现所提算法。

#### 3.1 阈值分割模型测试

通过图像采集设备采集标定图像，像素分辨率为  $3264 \times 2448$ ，在不同角度下对拍摄的多种图像进行阈值分割测试。图 5 为同一条件下不同方法的处理效果对比图。

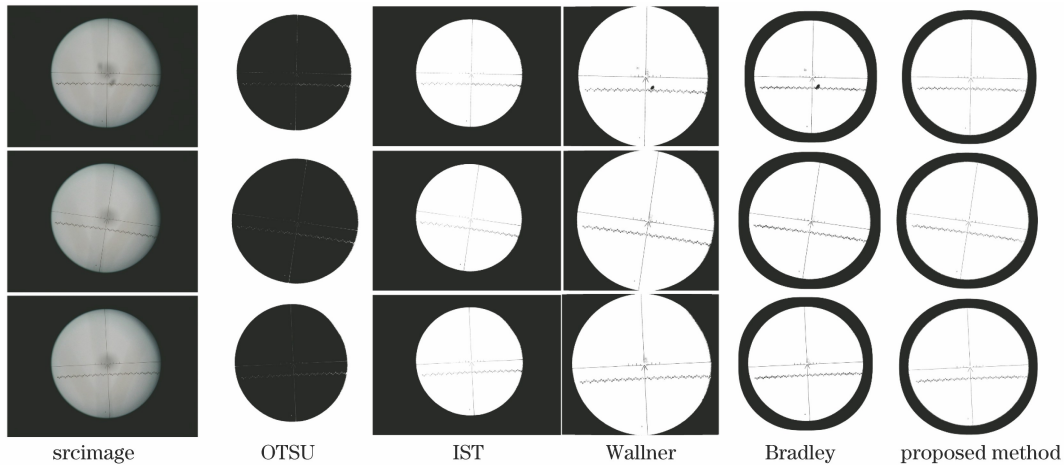


图 5 不同方法的阈值分割结果

Fig. 5 Threshold segmentation results of the different methods

从图 5 可以看出：OTSU<sup>[4]</sup>对灰度级较暗的标定区域处理效果不佳；IST<sup>[6]</sup>相对 OTSU 有更好的处理效果，但是标定区域的细小短线丢失；Bradley<sup>[19]</sup>相对 Wallner<sup>[25]</sup>处理时间较长，处理效果相对较好，但标定区域均有一定的噪声干扰；所提基

于 HF 的积分图算法融合了 HF 较好的去噪效果的同时尽可能多地保留了标定区域的细节信息，相对 Bradley，增加了额外的时间消耗。表 2 为阈值分割耗时测试结果。

表 2 阈值分割耗时测试

Table 2 Time consuming test of threshold segmentation

unit: s

Serial No.	OTSU	IST	Wallner	Bradley	Proposed method
1	0.624	0.652	0.609	0.812	1.802
2	0.643	0.640	0.657	0.824	1.887
3	0.647	0.630	0.668	0.808	1.854

#### 3.2 长直线拟合模型测试

图 6 为基于 Hough 检测的 LSM 长直线拟合测试示意图，通过在二值化的图像中叠加拟合直线，可以明显看出，所设计的基于斜率聚类的 LSM 能够精准地拟合长直线，为后续标定提供基础。

#### 3.3 标定轴模型测试

图 7 为所设计的基于拟合长直线的 LSD 局部短线标定定位测试示意图，通过在原始图像中叠加均值求解后的定位坐标，经过人为的主观上的定性描述，所求解的标定坐标基本准确。

#### 3.4 定量指标描述

1) 直线拟合模型的相关性描述

拟合直线的相关性评价公式<sup>[26]</sup>为

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \mu_x}{\delta_x} \cdot \frac{y_i - \mu_y}{\delta_y} \right), \quad (19)$$

式中： $\mu_x$ 、 $\delta_x$  分别为  $x$  的平均值和标准差； $\mu_y$ 、 $\delta_y$  分别为  $y$  的平均值和标准差。相关系数  $R$  的范围为  $[-1, 1]$ ，当  $R=0$  时，表示数据相关系数为 0(不相关)；当  $R=\pm 1$  时，表示数据负相关，此时  $(x, y)$  点数据都在拟合直线上。 $R$  越接近  $\pm 1$ ，说明  $(x, y)$  越靠拢拟合直线，数据相关性越强，表明模型对数据进行拟合的效果也越好； $R$  越接近 0，说明点  $(x, y)$  到直线的散度越大，数据相关性越小。

在现有数据集中，随机抽取 6 张图像进行测试。表 3 为长直线拟合定量分析，6 张不同样本的相关

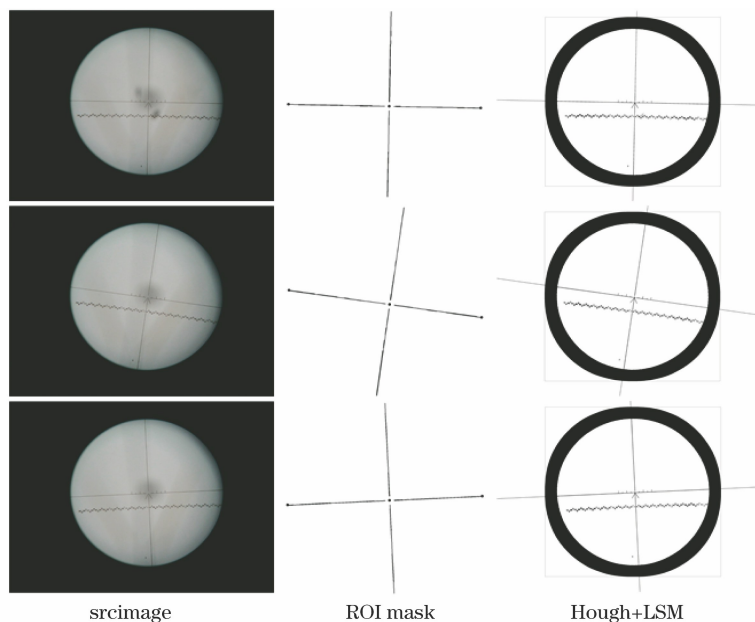


图 6 长直线拟合结果

Fig. 6 Long line fitting results

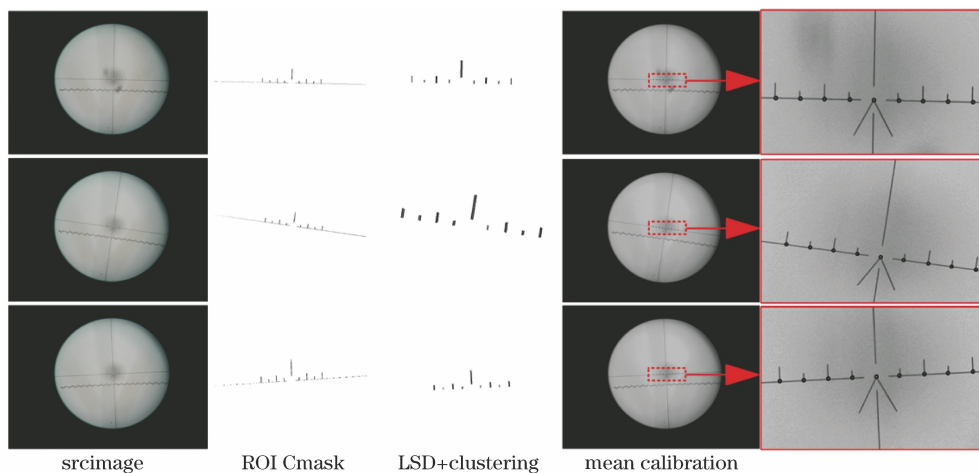


图 7 LSD 局部短线标定定位结果

Fig. 7 LSD local short line calibration and positioning results

系数绝对值均值 ( $R_X$  和  $R_Y$ ) 分别为 0.995646 和 0.993913,  $N_X$  和  $N_Y$  分别表示横向和纵向上用于计算相关系数的点数量, 与 1 的差值分别为 0.004354 和 0.006087, 表明所设计的直线拟合模型能准确无误地拟合长直线, 对数据的拟合效果较好, 误差率不超过 1.0%。

表 3 长直线拟合定量分析

Table 2 Quantitative analysis of long line fitting

ID	$N_X$	$R_X$	$N_Y$	$R_Y$
1	30	0.985814	16	-0.987986
2	26	0.999770	14	-0.999841
3	26	-0.998681	14	0.998974
4	16	-0.998672	22	0.998774
5	16	0.997956	10	-0.997369
6	32	0.992983	30	-0.980534
Mean value		0.995646		0.993913

## 2) 局部短线标定定位的相关性描述

基于 1) 直线拟合模型的相关性描述的结论, 构建标定定位模型轴, 图 8 为所设计的局部短线标定定位模型。根据 1) 的结论可知, 拟合的直线是精准的, 因此标定中心  $P_{cross}$  是准确的, 其中  $(a_1, b_1, c_1,$

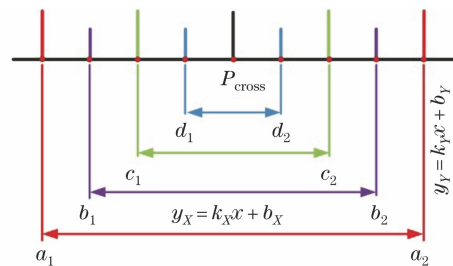


图 8 局部短线标定定位模型

Fig. 8 Local short line calibration and positioning model

$d_1, P_{\text{cross}}, d_2, c_2, b_2, a_2$ ) 均为标定点集。

进行散落排布 ( $a_1, b_1, c_1, d_1, P_{\text{cross}}, d_2, c_2, b_2, a_2$ )。

以  $P_{\text{cross}}$  为中心点, 集合  $P_{\text{TinyR}}$  在标定模型轴上

理论上存在的关系为

$$\begin{cases} P_a = \{[a_1(x, \cdot) + a_2(x, \cdot)] \cdot 0.5, [a_1(\cdot, y) + a_2(\cdot, y)] \cdot 0.5\} = P_{\text{cross}} \\ P_b = \{[b_1(x, \cdot) + b_2(x, \cdot)] \cdot 0.5, [b_1(\cdot, y) + b_2(\cdot, y)] \cdot 0.5\} = P_{\text{cross}} \\ P_c = \{[c_1(x, \cdot) + c_2(x, \cdot)] \cdot 0.5, [c_1(\cdot, y) + c_2(\cdot, y)] \cdot 0.5\} = P_{\text{cross}} \\ P_d = \{[d_1(x, \cdot) + d_2(x, \cdot)] \cdot 0.5, [d_1(\cdot, y) + d_2(\cdot, y)] \cdot 0.5\} = P_{\text{cross}} \end{cases}, \quad (20)$$

式中:  $a_1(x, \cdot)$  为  $a_1$  的  $x$  坐标;  $a_1(\cdot, y)$  为  $a_1$  的  $y$  坐标。

错误。

误差值的计算公式为

因此, 根据散落的集合  $P_{\text{TinyR}}$ , 求解以  $P_{\text{cross}}$  为中心的对称区域点对的中点坐标, 并计算与  $P_{\text{cross}}$  之间的误差值  $E$ 。  $E$  越小, 表示标定的坐标越精确, 越接近实际真实点的位置信息, 反之, 标定坐标求解

$$E = \frac{P_a - P_{\text{cross}}}{P_{\text{cross}}} \times 100\%, \quad (21)$$

式中:  $P_{\text{cross}}$  为真实坐标值;  $P_a$  为预测坐标值。表 4 为标定误差的定量分析。

表 4 标定误差定量分析

Table 4 Quantitative analysis of calibration error

ID	1	2	3	4	5	6
$P_a$	1714.40, 1177.67	1705.53, 1180.11	1712.92, 1175.76	1713.55, 1175.2	1712.31, 1178.90	1709.04, 1177.56
$P_b$	1713.55, 1177.65	1705.50, 1180.11	1711.90, 1175.80	1712.92, 1175.23	1713.02, 1178.93	1709.73, 1177.57
$P_c$	1712.55, 1177.63	1705.85, 1180.16	1713.25, 1175.74	1713.32, 1175.21	1711.99, 1178.89	1710.03, 1177.58
$P_d$	1714.10, 1177.66	1704.30, 1179.93	1711.74, 1175.81	1713.48, 1175.21	1712.38, 1178.91	1708.05, 1177.57
$P_{\text{cross}}$	1711.95, 1177.62	1704.30, 1179.93	1712.20, 1175.59	1712.73, 1175.24	1710.73, 1178.85	1707.91, 1177.53
$E_a$	0.1434, 0.0042	0.0721, 0.0150	0.0424, -0.0029	0.0477, -0.0032	0.0921, 0.0048	0.0663, 0.0019
$E_b$	0.0934, 0.0027	0.0701, 0.0146	-0.0175, 0.0012	0.0111, -0.0008	0.1335, 0.0070	0.1067, 0.0031
$E_c$	0.0350, 0.0010	0.0909, 0.0190	0.0614, -0.0041	0.0343, -0.0023	0.0737, 0.0039	0.1239, 0.0036
$E_d$	0.1260, 0.0037	0.0000, 0.0000	-0.0269, 0.0018	0.0438, -0.0030	0.0962, 0.0050	0.0082, 0.0025

表 4 误差值的结果表明, 小短线的坐标定位还是有一定的误差, 坐标  $X$  的误差值在 0.15% 以内, 坐标  $Y$  的误差值在 0.005% 以内。图 9 为坐标  $X$  的标定误差曲线, 图 10 为坐标  $Y$  的标定误差曲线。

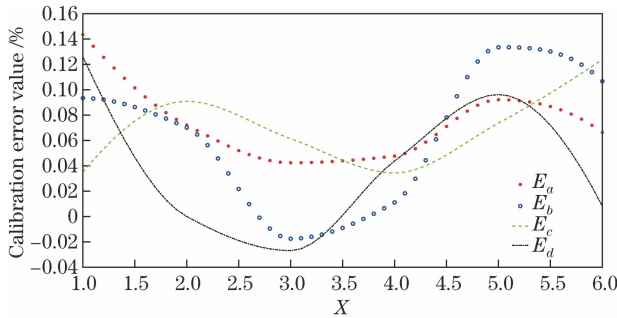


图 9 坐标  $X$  的标定误差曲线

Fig. 9 Calibration error curve of coordinate  $X$

误差曲线展示的是  $E_a, E_b, E_c, E_d$  随着样本量的变化趋势。相对而言, 纵向坐标的标定误差小于横向坐标的标定误差, 主要原因在于局部小短线的横向坐标提取的差异, 误差主要来源于小短线的像素宽度。

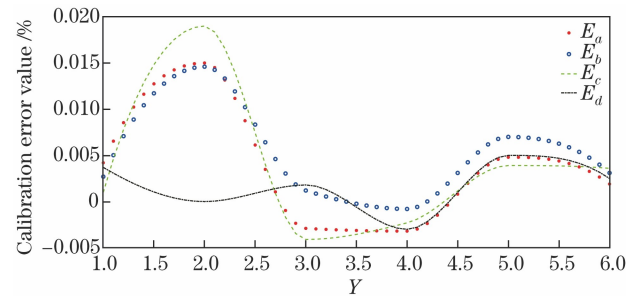


图 10 坐标  $Y$  的标定误差曲线

Fig. 10 Calibration error curve of coordinate  $Y$

### 3) 标定系数的相关性描述

由实验 1) 和 2) 可知, 所提标定方法能够较为精准地实现系统的矫正标定。标定的目的是得到像素与角度密位之间的关系, 实验 2) 求得的 9 点坐标是较为精确的, 对 9 点坐标进行前后作差并累加, 求其间隔均值, 即可得到一个密位所代表的像素个数。表 5 为标定系数, 即像素与角度密位之间的量化系数的均值。

根据表 5 可知, 一个密位所代表的像素约为



50.6,即相当于转台步长一个密位,图像中像素移位约 50.6 个像素。

表 5 标定系数定量分析

Table 5 Quantitative analysis of calibration coefficient

ID	Pixel /mil
1	51.18125
2	50.15126
3	51.08740
4	50.11254
5	50.04953
6	51.28648
Mean value	50.644743

#### 4) 装置标定的相关性描述

为了验证标定的实际可行性,搭建如图 1 所示

表 6 装置标定定量分析

Table 6 Quantitative analysis of calibration

Rotation angle /mil	Test 1		Test 2		Test 3	
	X position in image	Calibration angle /mil	X position in image	Calibration angle /mil	X position in image	Calibration angle /mil
4	1509.49	4.00970	1509.54	3.99015	1509.08	4.00417
3	1560.08	3.01078	1561.43	2.96556	1560.19	2.99498
2	1610.42	2.01679	1611.78	1.97138	1610.36	2.00435
1	1663.04	0.97779	1662.02	0.97937	1664.48	0.93583
0	1712.56	0	1711.62	0	1711.87	0
-1	1765.17	1.03880	1762.45	1.00366	1765.56	1.06013
-2	1814.67	2.01620	1815.19	2.04503	1814.74	2.03121
-3	1867.01	3.04967	1868.47	3.09706	1867.90	3.08087
-4	1919.32	4.08256	1918.03	4.07565	1920.15	4.11257

表 6 为装置标定的定量分析实验数据,通过数据可知,装置标定的误差在 0.01 以内,具有一定的实际可行性。

## 4 结 论

主要介绍了一种安装在火炮瞄准镜目镜后部的 CCD 的成像标定算法,通过摄取一定距离处靶标图像,实现火炮瞄准镜准确标定。设计相对更节省空间的 DCT 同态滤波,消除成像灰度级不均匀的影响;同时设计了执行效率较高的滑窗积分图实现阈值分割;构建长直线拟合模型,精准实现靶心的定位,进而构建标定定位轴模型,实现精准标定。实验结果表明,所提标定算法能够稳定精准有效地标定火炮瞄准镜,能准确地得到像素与角度之间的关系,为火炮武器在行进过程中对目标的准确瞄准和跟踪提供指导性监测数据和理论依据。

### 参 考 文 献

[1] Chen H L, Huang J Z, Wang C Y. Research of

的标定装置,将带刻度的十字丝内置在瞄准镜中,且一个刻度为一密位,与瞄准镜相连的相机通过该十字丝对瞄准镜进行标定,并通过计算一个刻度中像素的个数,得到瞄准镜中十字丝刻度与图像之间的关系,进而得到像素与角度的关系。标定系数采用实验 3)的结果,即 50.6,相机通过瞄准镜观察远处的目标十字,经过转台旋转固定角度,观察目标十字的运动变化。首先将基准线调整至水平位置,保证纵向上的偏移近似于 0,不转动角度时将标定角度定义为 0,转台左转动一个密位,理论上目标所在实际位置增加一个密位,实验结果如表 6 所示。根据标定系数、未转动前的中心坐标、转动后的目标位置坐标,即可计量出转动后的目标在图像中的运动情况。

weaponry dynamic tracking precision measurement system[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2004, 27(1): 100-102, 105.

陈化良,黄建中,王春燕. 武器装备动态跟踪精度测量系统的研究[J]. 长春理工大学学报, 2004, 27(1): 100-102, 105.

[2] Zhu Y Z, Zhou Q H, Tang X Q, et al. Measure & analysis of tank gun dynamic attitude data [J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 1997, 11(3): 42-47.

朱响昭,周启煌,汤霞清,等. 坦克火炮动态姿态数据的测量与分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 1997, 11(3): 42-47.

[3] Liu G C, Bai T Z. The design of the new intelligentized photoelectricity fire control system of the light weapon[J]. Infrared Technology, 2005, 27(3): 207-209.

刘光灿,白廷柱. 轻武器新型智能光电火控系统设计[J]. 红外技术, 2005, 27(3): 207-209.

[4] Liu M X, Liu Z P, Li B, et al. Research on the improved algorithm of processing uneven illumination

- image based on OTSU [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2020, 35(3): 27-32.
- 刘明兴, 刘泽平, 李斌, 等. 基于 OTSU 处理不均匀光照图像改进算法研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2020, 35(3): 27-32.
- [5] Wang X D, Yang Y L, Kong J Y, et al. Image binarization method of equal-thickness butt welds based on regional optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(14): 1756-1763.
- 王兴东, 杨雅伦, 孔建益, 等. 基于区域优化的等厚对接焊缝图像二值化方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(14): 1756-1763.
- [6] Lu X P, Zhang H, Zhang D M, et al. An iterative binary road crack detection method based on UAV image[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2019, 38(6): 55-59.
- 卢小平, 张航, 张冬梅, 等. 一种基于无人机影像的迭代二值化道路裂缝检测方法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 55-59.
- [7] Cong F, Zhang Q J. Binarization parallel method for non-uniform illumination image based on morphology [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(8): 191-196.
- 从飞, 张秋菊. 基于形态学的非均匀光照图像二值化并行方法[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(8): 191-196.
- [8] Li J, Shen L W, Hu Y T, et al. Research on illumination uneven QR code recognition based on improved Niblack algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 191-196.
- 李健, 申利未, 胡雅婷, 等. 改进 Niblack 算法的光照不均匀 QR 码识别研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 191-196.
- [9] Xu Y T, Guo J, Li X Y, et al. Multi-level image thresholding technology based on swarm intelligent algorithm[J]. Machinery & Electronics, 2020, 38(7): 7-13.
- 许韞韬, 郭锦, 李晓艳, 等. 基于群体智能算法的多级图像阈值分割技术的研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(7): 7-13.
- [10] Huang C, Liu Z, Luo Y G, et al. Parking space detection based on background illumination removal and connected regions[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 47-51, 73.
- 黄晨, 刘泽, 罗禹贡, 等. 基于背景光照去除和连通区域的车位检测[J]. 汽车工程, 2020, 42(1): 47-51, 73.
- [11] He Z M. Binarization of document image captured under uneven illumination [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(2): 163-166.
- 贺志明. 不均匀光照文本图像的二值化[J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(2): 163-166.
- [12] Liu J B, Li P. Method for correcting uneven illumination of fabric weft detection image [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2020, 41(3): 388-393.
- 刘建宝, 李平. 织物纬斜检测图像光照不均匀的校正方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 388-393.
- [13] Sauvola J, Pietikäinen M. Adaptive document image binarization[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(2): 225-236.
- [14] Xiong W, Wang X R, Wang J, et al. Image binarization algorithm based on background estimation and energy function [J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(7): 1984-1989, 2058.
- 熊炜, 王鑫睿, 王娟, 等. 结合背景估计与能量函数的图像二值化算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(7): 1984-1989, 2058.
- [15] Xu W M, Liu Z, Wu S Q, et al. Non-uniform illumination image enhancement method based on virtual multi-exposure fusion [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(8): 79-84, 90.
- 徐望明, 刘召, 伍世虔, 等. 基于虚拟多曝光融合的不均匀光照图像增强方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 79-84, 90.
- [16] Chen S X, Han X, Lin X Y, et al. MSER and CNN-based method for character detection in ancient Yi books [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 123-133.
- 陈善雄, 韩旭, 林小渝, 等. 基于 MSER 和 CNN 的彝文古籍文献的字符检测方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 123-133.
- [17] Han Z, Su B, Li Y G, et al. An enhanced image binarization method incorporating with Monte-Carlo simulation[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(6): 1661-1671.
- 韩征, 粟滨, 李艳鸽, 等. 基于蒙特卡洛模拟的图像二值化增强算法(英文)[J]. 中南大学学报, 2019, 26(6): 1661-1671.
- [18] Fan Y C, Zhang L X, Guo H C, et al. Image processing for laser imaging using adaptive homomorphic filtering and total variation [J]. Photonics, 2020, 7(2): 30.
- [19] Bradley D, Roth G. Adaptive thresholding using the integral image[J]. Journal of Graphics Tools, 2007,

- 12(2): 13-21.
- [20] Cui Y, Zhou X C, Liu Y F, et al. Solar meridian extraction method based on Hough transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1701002.  
崔岩, 周鑫昌, 刘亚飞, 等. 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1701002.
- [21] Liang Y Z, Liu L, Peng L, et al. Research on weighted Bayesian inversion algorithm with non-negative least squares constraint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 1029001.  
梁一卓, 刘玲, 彭力, 等. 非负最小二乘约束的加权贝叶斯反演算法研究 [J]. *光子学报*, 2020, 49(10): 1029001.
- [22] Qiao X Y, Chen X, Ding G Q, et al. Scheme for position self-calibration based on least square method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1212001.  
乔潇悦, 陈欣, 丁国清, 等. 基于最小二乘法的自校准位姿方案 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1212001.
- [23] Jiang M, Wang J, Du B J, et al. Measurement method of gun's jump angle based on improved least-squares [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030701.  
姜曼, 王军, 杜博军, 等. 基于改进最小二乘法的火炮跳角测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030701.
- [24] Wang Y M, Li Z R, Zhai R Q, et al. Based on LSD lateral plate offset detection algorithm of chain grate machine car [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0815001.  
王月明, 李真如, 翟容清, 等. 基于 LSD 算法的链篦机台车侧板偏移检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0815001.
- [25] Wellner B P. Adaptive thresholding for the DigitalDesk, EuroPARC [J]. Xerox, 1993.
- [26] Yang Y R, Dai Y. Evaluation of the effect on eye aberration on retinal imaging quality based on the root mean square error and correlation coefficient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0333001.  
杨彦荣, 戴云. 基于均方根误差和相关系数评价人眼像差对视网模像质的影响 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0333001.