

## 弹丸图像的中轴线提取方法研究

彭骏<sup>1</sup> 段菲<sup>2</sup> 孙忠辉<sup>3</sup> 王雷<sup>4</sup> 廖仕军<sup>5</sup> 狄长安<sup>1</sup>

(1.南京理工大学机械工程学院 南京 210094; 2.中国人民解放军63850部队 白城 137001; 3.中国白城兵器试验中心 白城 137001; 4.中国中原对外工程有限公司 北京 100044; 5.重庆长江电工工业集团有限公司 重庆 401336)

**摘要:** 研究弹丸弹目交会姿态参数对武器毁伤效能评估具有重要意义,通常对弹丸姿态参数提取都是基于野外实验图像,因此针对野外实验弹丸图像噪声干扰强度大、成像对比度低并且弹丸中轴线提取精度不易控制等问题,设计了基于侧窗思想的高斯与自适应中值滤波的保边去噪算法、基于Canny边缘检测的填补分割算法以及基于目标边缘轮廓的中轴线提取方法,所得结果为外场噪声以及弹丸表面亮度不均的影响明显减弱,实现了弹丸图像的保边去噪、目标分割提取并自动检测出了弹丸中轴线,结果为图像平面上的中轴线直线方程被有效提取。

**关键词:** 弹丸中轴线;图像处理;高速成像;边缘轮廓

**中图分类号:** TP391.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Research on central axis extraction method of projectile image

Peng Jun<sup>1</sup> Duan Fei<sup>2</sup> Sun Zhonghui<sup>3</sup> Wang Lei<sup>4</sup> Liao Shijun<sup>5</sup> Di Chang'an<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. 63850 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Baicheng 137001, China; 3. China Baicheng Weapon Test Center, Baicheng 137001, China; 4. China Zhongyuan Foreign Engineering Co., Ltd., Beijing 100044, China; 5. Chongqing Changjiang Electrical Industry Group Co., Ltd., Chongqing 401336, China)

**Abstract:** It is of great significance to study the attitude parameters of projectile target intersection for weapon damage effectiveness evaluation. The attitude parameters of projectile are usually extracted based on field experimental images. Therefore, in view of the problems such as high noise interference intensity, low imaging contrast and difficult control of the accuracy of central axis extraction of projectile in field experimental images, etc. The edge preserving and denoising algorithm based on Gaussian and adaptive median filtering, the filling and segmentation algorithm based on Canny edge detection and the central axis extraction method based on the target edge contour are designed. The results show that the influence of the external field noise and the uneven brightness of the projectile surface are significantly reduced. The edge preserving and denoising of the projectile image, target segmentation and extraction are realized, and the central axis of the projectile is detected automatically. The result is that the linear equation of the central axis on the image plane is extracted effectively.

**Keywords:** central axis of the projectile; image processing; high-speed imaging; edge profile

## 0 引言

随着现代武器设计精度的不断提高,对于武器作战效果评估的要求也在逐渐升高,因此目标毁伤效能评估如今也是军工领域的一个重点课题<sup>[1]</sup>。

目前国内外针对弹丸的侵彻姿态的提取常采用高速成像技术<sup>[2]</sup>获取弹丸图像,再对图像进行姿态解算进而获取弹丸姿态参数。由于完场实验环境复杂多变,外部的杂光变化、扬尘的干扰、补光光源的稳定性及均匀性会使成像图像出现噪声严重、对比度低、明暗不均等情况,影响弹丸的

成像质量,对后续的弹丸特征检测与提取产生很大影响。熊发田<sup>[3]</sup>通过同步触发控制对飞行物体进行两次闪光拍照,观察飞行中姿态;张原等<sup>[4]</sup>采用高速摄像机通过斜瞄和平瞄姿态测量方法求解导弹中轴线俯仰角和方位角;李正炜等<sup>[5]</sup>利用Vega Prime加载目标3D模型生成仿真匹配图像,并进行图像预处理获得目标匹配图像,计算两幅图像相关度,获取相关度值输出目标模型姿态。宋平等<sup>[6]</sup>通过鲁棒估计方法获取空间目标直线特征参数,解算空间目标姿态参数;杨成等<sup>[7]</sup>实现了航天器三维姿态的解算。

利用弹丸点特征计算弹丸中轴线主要有两点法、三点

法<sup>[8]</sup>。通常采用 Harris 角点检测法求取特征点的坐标,计算简单且快速,但弹丸姿态角的测量精度容易受到特征点的判读定位误差影响。而对于线特征的方法通常是检测边缘特征信息,主要采用 Hough 变化、最小二乘法直线拟合等方式提取两条对称边缘直线,计算求取两直线的角平分线,即为中轴线。但通常由于图像质量问题会检测出多条边缘直线,影响边缘曲线的选取,使得中轴线计算的精度下降。

### 1 弹丸中轴线提取原理

弹丸图像的处理流程如图 1 所示。

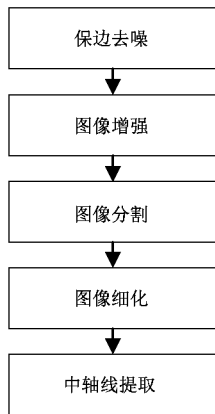


图 1 野外弹丸图像处理流程

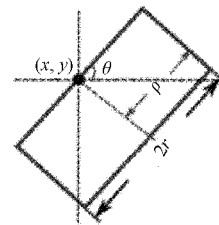
#### 1.1 侧窗滤波技术

侧窗滤波技术<sup>[9]</sup>的核心思想就是考虑改变待处理像素的位置,如果可以处于滤波核的边缘,尽可能地屏蔽跨边界操作,就能够减轻甚至消除滤波窗口跨越边缘带来的影响。定义如图 2(a)所示的侧窗,图中参数  $\theta$  表示窗口与水平线的夹角, $r$  则表示窗口半径, $\rho$  是控制窗口长度的参数,有  $\rho \in [0, r]$ 。对于待处理像素  $(x, y)$ ,可通过改变  $\theta$  值控制窗口的朝向,使窗口尽量处于边缘一侧,当  $r$  固定时,可改变  $\rho$  的大小控制窗口长度。

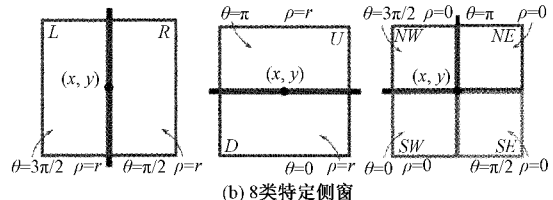
对于待处理像素  $(x, y)$ ,参数  $\theta, r$  以及  $\rho$  的不同组合可使该像素拥有无数个侧窗。为保证实际应用时的运行速度,如图 2(b)所示,定义了东、西、南、北、西南、西北、东北以及东南 8 个不同方向的窗口,而待处理像素  $(x, y)$  处于窗口边缘或者边角处。分别将 8 类窗口对原始图像计算处理,对 8 类窗口的处理效果进行评估,找出待处理像素的最佳侧窗类型,保证最终的侧窗滤波结果能够尽可能地保留原有信息,达到保边的效果。最合适的侧窗算法寻找算法如下。

定义  $I_n$  为待处理像素点  $i$  经侧窗  $n$  处理之后的结果,则有:

$$I_n = \frac{1}{N_n} \sum_{j \in \omega_i^n} \omega_{ij} q_j \quad (1)$$



(a) 侧窗定义



(b) 8类特定侧窗

图 2 侧窗的原理

其中,  $N_n$  为侧窗的权重之和:

$$N_n = \sum_{j \in \omega_i^n} \omega_{ij}, n \in S \quad (2)$$

式中:  $\omega_i^n$  表示像素点  $i$  的侧窗  $n$  的形状与大小;  $S$  表示 8 类窗口的集合。

定义代价函数  $E_i$  如下:

$$E_i = \|q_i - I_n\|^2 \quad (3)$$

则待处理像素点  $i$  的最佳侧窗  $I_m$ :

$$I_m = \underset{n \in S}{\operatorname{argmin}} E_i = \underset{n \in S}{\operatorname{argmin}} \|q_i - I_n\|^2 \quad (4)$$

侧窗滤波的关键点在于改变侧窗尺寸与大小,通过计算滤波结果与原图之间的二范数来寻找最佳侧窗类型。可以看出侧窗滤波没有改变窗口权重  $\omega_{ij}$ ,这种侧窗滤波思想可以用来改造传统线性滤波器,将传统的全窗滤波核改成侧窗滤波核,以达到保边效果。

#### 1.2 图像增强与分割

分段线性灰度变换是常用的图像增强<sup>[10-11]</sup>方法之一,其主要原理是增强图像感兴趣的灰度区间,而对图像不感兴趣的部分进行抑制处理,可有选择的拉伸某段灰度区间以改善输出图像,即可实现图像某区域的特定分析处理。

分段线性灰度变换数学模型为:

$$g(x, y) = \begin{cases} (a/m)f(x, y), & 0 \leq f(x, y) < m \\ [(b-a)/(n-m)][f(x, y) - m] + a, & m \leq f(x, y) < n \\ [(M_g - b)/(M_f - n)][f(x, y) - n] + b, & n \leq f(x, y) < M_f \end{cases} \quad (5)$$

根据上述数学模型可以得出图 3 的分段灰度变换曲线图。

该数学模型表示为对灰度区间  $[m, n]$  的进行了线性拉伸,而灰度区间  $[0, m]$  和  $[n, M_f]$  被压缩。分段线性灰度变换较为灵活,其形式可任意组成,可通过调整分段直线斜率以及拐点位置来调整图像对比度,直到获得满意的效果。

图像阈值分割主要是检测图像中目标与背景的灰度差异,通过选取合适的阈值,划分图像中每一个像素点的所属区域,将图像中的灰度分为两类,生成已区分了目标与背景

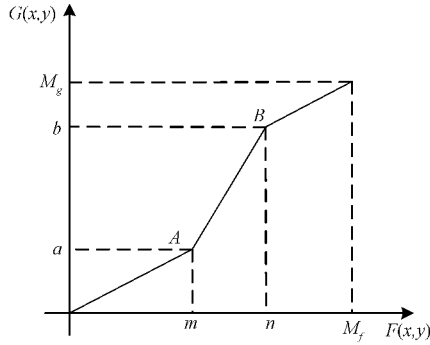


图 3 分段线性灰度变换

的二值图像。Otsu 法(大津法)是一种常用简单、速度快、自动确定阈值的方法,该方法是在判决分析的基础上使类间方差最大,是一种无参数无监督的阈值分割法。Otsu 法的基本思想如下:若有大小为  $M \times N$  图像的灰度级为  $\{1, 2, \dots, L\}$ ,  $f_i$  表示处在灰度级  $i$  的所有像素个数,则有总像素:

$$N = f_1 + f_2 + \dots + f_i = \sum_L f_i \quad (6)$$

定义  $p_i = \frac{f_i}{N}$  表示图像中灰度级为  $i$  出现的概率。

则有:

$$\sum_L p_i = 1, p_i \geq 0 \quad (7)$$

图像中的像素可通过选取合适的阈值  $t$  划分为  $G_0$  和  $G_1$  两类,即:

$$\begin{aligned} G_0 &= \{1, 2, \dots, l\} \\ G_1 &= \{l+1, l+2, \dots, L\} \end{aligned} \quad (8)$$

则该两类像素出现的概率为:

$$\omega_0(t) = p_i(C_0) = \sum_{i=0}^l p_i \quad (9)$$

$$\omega_1(t) = p_i(C_1) = \sum_{i=l+1}^L p_i = 1 - \omega_0(t) \quad (10)$$

边缘分割法是检测图像中灰度发生了空间突变的集合。图像边缘范围处的灰度具有如下特征:边缘法线方向的像素灰度变化大,而与边缘方向一致的像素变化小。因此,边缘分割检测法通常利用一阶和二阶导数来描述并检测边缘。作为高斯函数的一阶导数,Canny 算子<sup>[12 13]</sup>目前使用的最为广泛,该算子可在抑制噪声的同时很好地检测到图像边缘。经典 Canny 边缘检测主要步骤有:

- 1) 对输入图像进行高斯平滑,滤除噪声,降低错误率;
- 2) 计算梯度和方向来估计每个像素点的边缘强度与方向;
- 3) 沿梯度方向对梯度幅值进行非极大值抑制,保留局部梯度最大的点,消除边缘检测带来的杂散响应,得到细化的边缘;
- 4) 最后利用双阈值处理确定边缘,连接边缘,得到检测结果。

### 1.3 基于目标边缘轮廓的中轴线提取

利用所定义的结构元素序列,删除原图像中满足击中变换的像素,顺序循环执行,直到结果不再发生变化,最终得到保持纹线的细节特征的单像素宽中轴线。

定义单个结构元素  $S$  对图像  $T$  的细化处理<sup>[14]</sup>:

$$T \otimes S = T - (T \otimes S) \quad (11)$$

定义  $\{S\} = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$  为结构元素集合序列,其中  $S_i$  是  $S_{i-1}$  旋转后的形式,通常结构元素集合序列如图 4 所示。该结构元素集合序列对图像  $T$  进行迭代细化处理可表示为:

$$T \otimes \{S\} = ((\dots((T \otimes S_1) \otimes S_2) \dots) \otimes S_n) \quad (12)$$

式(12)表示先使用结构元素  $S_1$  对图像  $T$  进行细化处理,再利用  $S_2$  迭代处理,以此类推,直到结构元素序列  $S$  均完成上述操作即表示完成对图像  $T$  的一轮细化,不断循环执行上述过程,并保持  $T \otimes \{S\} \subset T$ ,直到结果不再发生变化。

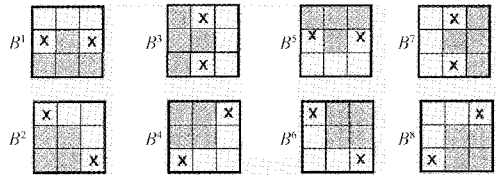


图 4 用于数学形态学细化的结构元素序列

对于具有轴对称特性的弹丸,弹丸外部轮廓不一定具有直线特征,即使存在小段直线特征,但可能因拍摄视角的问题,存在观测到的图像无法找到两条对应直线的现象。从拍摄原理角度上来看,图像边缘轮廓曲线在三维空间中一定具有轴对称性,边缘轮廓曲线之间的中轴线一定会是无畸变的直线,采用骨架提取算法恰好可以满足直接弹丸中轴线的需求。

EDLines 直线检测方法是一种快速直线检测算法<sup>[15]</sup>,其核心思想是利用边缘绘制(ED)进行无参、快速自动检测边缘,产生完美、连续不相交的像素链,而后根据直线度准则提取边缘直线段,采用 Helmholtz 原则来控制虚假检测。与 Hough、LSD 直线检测算法相比<sup>[16]</sup>,EDLines 直线检测运算量小、速度快、准确率高。EDLines 直线检测可以分为如下 3 个步骤。

1) 利用边缘绘制(ED)算法,生成能够反应目标边界的、连续不相交的像素链。

ED 是一种快速的边缘检测器,该算法思想的前两步骤与其他边缘检测如 Sobel、Prewitt 相似,都需要进行高斯平滑,抑制噪声,计算每个像素的梯度与方向的步骤。之后采用非常规的方法,在检测边缘像素前先计算一组具有高概率的边缘像素,并称为锚(anchors),实际上,锚对应于梯度图的峰值,也就是说,根据梯度极值来检测锚,如图 5 所示。根据预定的梯度阈值、锚阈值和扫描间隔,可改变锚的数量,不过这种内部参数都是已定的,对不同图像处理时,

内部参数都是一样的,最后根据 smart routing 连接锚,产生一套干净的,像素相邻的链。

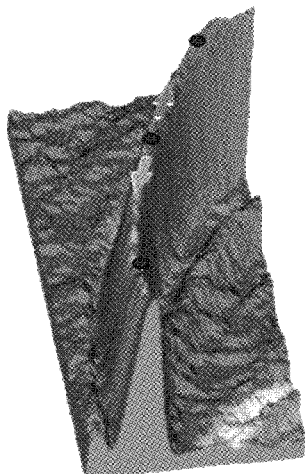


图 5 错的产生

2) 利用直线度准则,递归处理边缘像素链,提取直线段。

为了将连续的边缘像素链分割成多个直线段,采用直线度准则,跟踪潜在像素并进行拟合生成初始直线段,不断计算每个像素点与当前拟合线的距离,增加像素点来扩大线段,设置合适的误差阈值,该值通常为 1 pixel,拟合误差超过阈值即表示直线方向发生了改变,此时可结束像素点的添加,完成当前直线段的检测。循环递归检测剩余像素链上的点,直到处理完所有边缘像素链。

3) 最后进行像素定位,计算特定方向上对齐像素的数量,判断其是否具有结构意义,从而决定是否接受该直线段,可有效消除虚警,控制出错率。该步骤实际上采用 Helmholtz 原则来验证直线段。

当弹丸几何形状中包含支翼,或者是由于图像分割无法完美提取弹体,经过图像细化处理后的结果会出现除中轴线外的多条分支线,利用 EDLines 直线检测会得到多条分支直线,且包含大量短线,无法自动提取到完整的弹丸中轴线。对 EDLines 直线检测方法进行拓展改进,使其能够自动检测提取到回转体弹丸中轴线直线。考虑到本文研究对象的中轴线仅是一条直线,可从如下步骤对 EDLine 直线检测进行改进。

1) 计算所有直线的方向,采用投票算法得出基准方向并设置方向阈值为 1 pixel,再次搜索判断所有直线方向与基准方向的差是否小于方向阈值,通过该步骤可滤去与中轴线不相干的直线段序列。

2) 设定直线段长度阈值,对步骤 1) 的处理结果进行长度排序判断,长度阈值可通过弹丸尺寸按比例计算得到。该步骤可减小不必要的短线段。

3) 对得到的直线点集进行最小二乘法拟合,最终可得到成像面弹丸中轴线的直线方程。

如图 6 所示为弹丸中轴线提取流程。

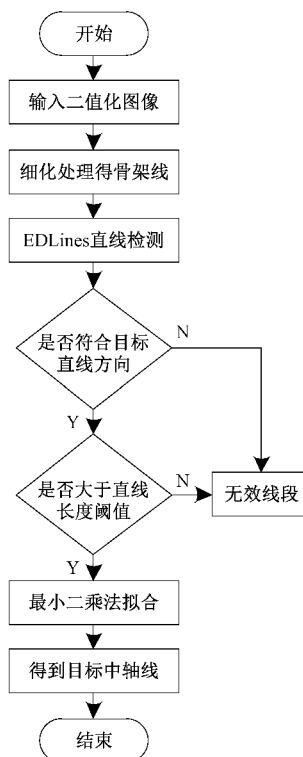
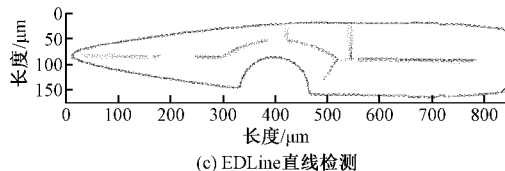
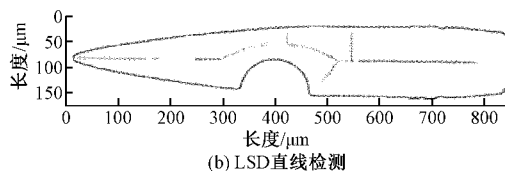
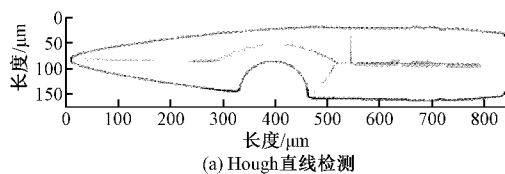


图 6 提取弹丸中轴线流程

## 2 对比实验

本文最终目的是提取弹丸的中轴线即一条直线段,因此直线检测就是本文图像处理的最后一步,常用的直线检测算法有 Hough、LSD、EDLine 等,不同的直线检测算法存在不同程度的差异,为研究不同直线检测算法的差异性对比实验验证与分析,最终实验结果对比如图 7 和 8 所示。对残缺弹丸细化结果以及直尺细化结果进行中轴线直线检





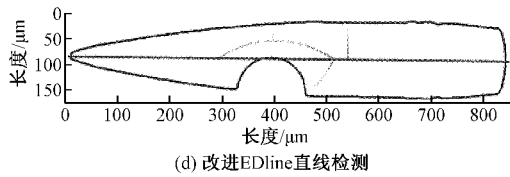


图 7 残缺弹丸轴线的不同直线检测结果

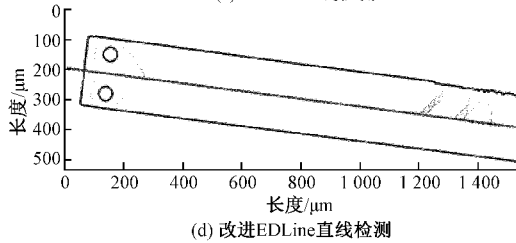
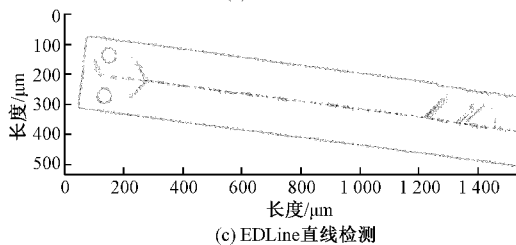
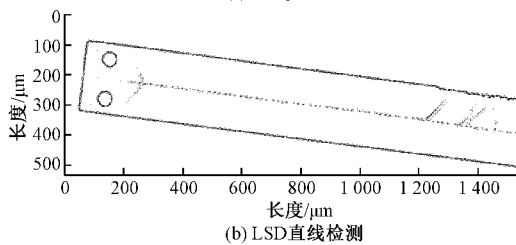
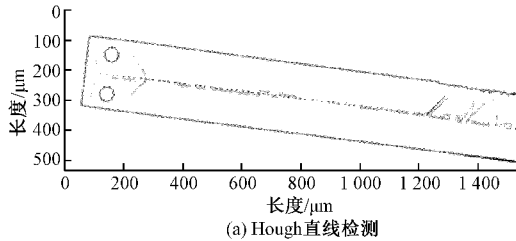


图 8 直尺轴线的不同直线检测结果

测,二者的细化结果均因边缘轮廓的不完整而有细小分支。手动设置合适的 Hough 变换阈值参数,从实验结果来看, Hough 变换后在单像素的骨架线上出现了两条上下 Hough 直线,与实际的骨架线具有一定像素的误差;而 LSD 算法和 EDLines 算法处理的结果中,除了检测到真实骨架轴线以外,也检测出其他分支直线,具有较多的虚警,且相比 Hough 算法,检测出的短线更多,但检测直线更贴近实际骨架线。改进的 EDLine 直线检测结果如图 7(d)和 8(d)所示,检测直线贴合并覆盖真实骨架轴线,无虚警以及大量短线的存在。

由上述分析可知,改进的 EDLines 相对于其他 3 种方式可减小虚警以及无关支线干扰,无需人工干预,可自动检测到弹丸中轴线。

### 3 结 论

本文针对野外弹丸图像,研究了弹丸图像的滤波方法、图像的增强与分割方法以及目标边缘轮廓的中轴线提取方法。通过对目标边缘轮廓线的中轴线提取方法的实验验证发现对残缺弹丸细化与直尺细化结果进行中轴线检测,两者都会因为边缘轮廓不完整而产生细小分支。通过对改进的 EDLine 直线检测结果进行分析可以发现,检测直线贴合并覆盖真实骨架轴线,并且无虚警以及大量断线的存在,因此本文针对弹丸图像中轴线提取具有更优的合理性与实用性。

### 参考文献

- [1] 李争,刘元雪,张裕. 动能弹侵彻机理及其防护研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(3):9-14.
- [2] 孙强飞. 基于高速成像技术的弹丸运动位姿参数测量方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [3] 熊发田. 基于大功率 LED 闪光成像的速度测量研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2008.
- [4] 张原,王志乾,乔彦峰,等. 导弹发射姿态测量方法研究[J]. 中国光学, 2015, 8(6):997-1003.
- [5] 李正炜,王建立,吴元昊,等. 基于单站地基望远镜的空间目标姿态估计方法[J]. 中国光学, 2016, 9(3):371-378.
- [6] 宋平,杨小冈,齐乃新,等. 基于序列图像的空间目标姿态估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11):226-234.
- [7] 杨成,李颀,李志辉,等. 地基光学图像中本体-帆板结构航天器姿态估计方法[J]. 宇航学报, 2020, 41(4):456-463.
- [8] 乔志旺. 基于高速成像技术的外场弹丸运动姿态测量方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2019.
- [9] YIN H, GONG Y, QIU G. Side window filtering[C]. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), IEEE, 2019:8750-8758.
- [10] 张艳,张明路,蒋志宏,等. 基于改进的 LIP 算法低照度图像增强算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11):147-154.
- [11] 王伟江,彭业萍,曹广忠,等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8):131-139.
- [12] 阙禄松,王明泉,张俊生,等. 基于 Canny 算子和形态学滤波的焊缝图像背景去除技术[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1):10-14.
- [13] 张聪聪,牟莉. 基于机器视觉的图像边缘检测算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12):80-85.
- [14] PEDRO B, MANUAL G, SEBASTIA M. Soft color morphology: A fuzzy approach for multivariate images[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2019, 61(3):394-410.
- [15] AKINLAR C, TOPLA C. EDLines: A real-time line segment detector with a false detection control[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(13):1633-1642.
- [16] 丁少闻. 针对目标姿态测量的中轴线测算方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.

### 作者简介

彭骏,工学硕士,主要研究方向为仪器与测试技术、图像处理与识别等。

E-mail:2434595376@qq.com