

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108200

基于改进亚像素边缘检测的弹丸特征点判读*

李璐¹ 罗红斌¹ 刘亚军² 孔筱芳¹ 顾金良¹ 夏言¹

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210094; 2. 内蒙古北方重工业集团有限公司 包头 014033)

摘要: 针对传统弹丸图像判读效率低的问题,提出了一种基于改进边缘检测的图像自动判读方法,获得弹丸特征点坐标。在亚像素级别上利用 Roberts 模板求取图像梯度,寻找邻域内梯度最大值绘制锚点,通过智能路线寻迹获得弹丸单像素边缘,采用矩理论求弹丸质心坐标。利用分辨率板检验改进边缘检测方法,并求取阴影图像中弹丸质心。实验结果表明,与传统方法相比,改进算法在边缘的连续性、定位精度上有较好的效果,将弹丸质心坐标的误差由 6.7% 降低到 2.8%。

关键词: 弹丸特征点识别;亚像素;边缘检测;矩理论

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Projectile feature point interpretation based on improved subpixel edge detection

Li Lu¹ Luo Hong¹ Liu Yajun² Kong Xiaofang¹ Gu Jinliang¹ Xia Yan¹

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Inner Mongolia Northern Heavy Industry Group Company Limited, Baotou 014033, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of traditional projectile image interpretation, an image automatic interpretation method based on improved edge detection has been proposed to obtain the coordinates of projectile feature points. Roberts template is used to calculate the image gradient at the sub-pixel level, and the maximum gradient in the neighborhood is found as the anchor point. The single pixel edge of the projectile is obtained by the smart routing method and the centroid coordinates of the projectile are obtained by moment theory. Using the resolution plate to test the improved edge detection method, and the projectile centroid in shadow image is obtained. Experimental results show that, compared with the traditional method, the improved algorithm has better effect on edge continuity and positioning accuracy, and the error of the projectile centroid's abscissa is reduced from 6.7% to 2.8%.

Keywords: identification of projectile feature points; Sub-pixel; edge detection; moment theory

0 引言

弹道靶道是进行炮弹、导弹、火箭等自由飞行试验,研究气动力和弹道性能的封闭式射击靶道^[1]。通过靶道试验,能够精确地记录弹丸自由飞行中的参数和瞬态流场,对于兵器研制和弹道理论的研究有重要意义。国内外研究所都建立了弹道靶道来开展实验:田纳西大学航天学院(UTSI)^[2]使用专用 LED 和 12.5 kHz 的高速阴影图像系统来研究常规枪支的近枪口弹道。跨音速实验室^[3]在高速物体飞行沿途放置 15 个数据站拍摄阴影图像,以确定模型的速度和姿态历史。南京理工大学瞬态物理国家重点实验室拥有一套完整的 240 m 的综合弹道靶道测量系统^[4],沿

靶道布置有几十个阴影照相站。试验获得弹丸阴影图像后,结合空间基准系统进行判读,以获得弹丸飞行姿态、质心坐标和速度信息。

阴影照相站初期由高压火花光源和胶片式相机构成,靶道试验后需要人工对成像胶片进行标定坐标^[5],图像判读过程非常繁琐且精度不高。随着高分辨率 CCD 相机在阴影照相测试技术中的应用发展,每个站内两台高分辨率 CCD 相机正交分布在靶道两侧,配合红外触发靶、脉冲激光光源、时序控制器来获得弹丸阴影图像^[6],数字化图像使坐标的提取向系统化发展。但现有系统在判读时仍基于人工手动选择特征点标定,在处理大量站点图像时存在人为误差大和效率低的缺点。

收稿日期:2021-10-27

* 基金项目:国防基础科研计划项目(JCKYS2020606005)资助

目前在特征点自动判读研究中,徐志刚等^[7]利用自适应阈值法对图像进行分割,人工圈定初始帧目标,通过智能外推算法预测出下一帧图像中目标的大概位置。杨宗伟等^[8]利用小波变换滤波和边缘检测,通过弹丸边缘外接矩形,计算特征点。周慧^[9]和乔志旺^[10]结合目标几何特性,提取中轴线方程,采用最小二乘法拟合弹尾椭圆曲线求特征点。这些方法有效避免了人工干预的不确定性带来的大误差,提高了系统效率,但提取的弹丸边缘不是单像素,特征点定位精度仍有待提高。针对靶道试验中获得的弹丸阴影图像,本文提出了一种基于改进边缘检测的弹丸特征点自动判读方法,实现了弹丸质心坐标的自动判读,避免了手动选取特征点时间长和操作繁琐的缺点。本文开展了 4 部分工作:1)结合现有靶道测量试验中特征点判读的研究,提出了一种高精度的弹丸特征点自动判读方法。2)提出了一种改进边缘检测算法,经过像元分割得到亚像素级别的图像,再通过智能路线寻迹获得弹丸单像素边缘。3)通过分辨率板检验改进边缘检测方法的精度,分析了改进方法相比传统边缘检测方法在连续性、定位精度上的优势。4)利用改进边缘检测方法和矩理论实现了弹丸质心坐标的自动提取,对传统边缘检测和改进方法在弹丸特征点的定位精度上进行了比较分析。

1 弹丸特征点自动判读

图像判读的方式分为自动判读和半自动判读两种,半自动判读通过手工划定目标区域或鼠标选取特征点,在处理大量图像时存在人为误差大和效率低的缺点。

本文提出了一种高精度的弹丸特征点自动判读方法,将阴影图像导入,经过一系列处理直接显示并存储弹丸的特征点坐标,自动判读方法运行流程如图 1 所示。

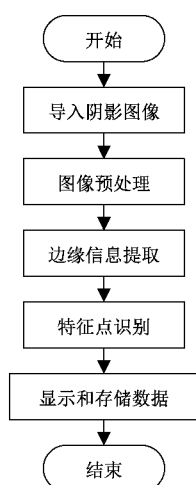


图 1 自动判读流程

靶道试验后,各站阴影图像由高速网线传输至计算机,保存在各站文件夹下。运用 MATLAB 读取指定路径下图信息,以站为单位依次对各站内两幅阴影图像进行处理。

经过自动裁剪、灰度转换、滤波等预处理操作,锁定目标图像区域,去除阴影图像中的噪声干扰,为后续的处理减少不必要的数量量和噪声干扰。

在弹丸边缘信息提取阶段,提取出目标与背景间的交界线,获得弹丸的轮廓信息。传统的边缘检测方法有 Canny、Roberts 和 Sobel 等,但在处理弹丸阴影图像时均有一定弊端,本文中提出一种改进边缘检测方法来获得高精度弹丸边缘,提高后续特征点识别的准确度。首先通过像元分割技术实现图像分辨率的提高,细化弹丸边缘处细节,再经过非边缘抑制、锚点选取和智能边缘连接得到单像素宽弹丸边缘轮廓,具体算法在第 3 章中详细介绍。

特征点识别阶段,选取质心作为特征点。在得到弹丸边缘信息的基础上,通过图像矩理论获得质心坐标,实现弹丸特征点像素坐标的自动提取。其中矩是数学概率统计中用以描述随机变量特征的一个概念,应用在图像中描述图像的特征。靶道试验后得到的弹丸阴影图像是一个三通道的二维数组,经过灰度化后得到一个二维数组。数组内的各元素称为像素,每个值表示图像上该点位置像素的灰度值。在图像矩理论中,将一幅图像中像素的坐标看作是一个二维随机变量 (x, y) , 每个像素点的值是该处的密度,用 $f(x, y)$ 表示二维密度分布^[11]。则图像的 $(p+q)$ 阶中心矩函数定义为:

$$M_{pq} = \sum_x \sum_y f(x, y) (x - x_0)^p (y - y_0)^q \quad (1)$$

式(2)中零阶矩 M_{00} 表示灰度图像的质量,一阶矩 (M_{01}, M_{10}) 表示质心的位置。

$$M_{00} = \sum_x \sum_y f(x, y) \quad (2)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y y f(x, y) \quad (3)$$

$$M_{10} = \sum_x \sum_y x f(x, y) \quad (4)$$

利用零阶矩和一阶矩可以求出目标图像的重心。对于形状规则、质量分布均匀的物体来说,物体的质心和重心位置重合。即弹丸的质心可通过矩理论获得,质心的坐标表示为:

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (5)$$

经过各站阴影图像处理 and 特征点识别后,将各站弹丸的质心像素坐标进行显示和存储,实现了弹丸特征点坐标的自动提取,减小了人工读取坐标的随机误差和判读时间。

2 传统边缘检测算法

图像的边缘处灰度值剧烈变化,通过微分求梯度可以得到图像的明显边缘。传统边缘检测算法主要是通过一阶或二阶导数求取梯度获取图像中目标和背景的边缘,通常一般步骤为滤波、图像增强、阈值检测。常见的传统边缘检测方法有 Canny、Roberts 和 Sobel 等。

Roberts 算子通过一阶微分求取图像梯度,又称为交

叉梯度算子。他的模板是一个大小为 2×2 的卷积核,利用模板对每个像素进行卷积运算,在 x 和 y 轴方向的卷积核如图 2 所示。

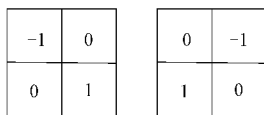


图 2 Roberts 卷积模板

Sobel 算子是一种一阶离散微分求梯度的边缘检测算法,通过高斯滤波平滑,使用 3×3 模板求灰度图的近似梯度矢量值。

Canny 边缘检测算子是一种多级检测,步骤为滤波去噪、计算梯度幅值和方向、非极大值抑制和双阈值检测。首先使用高斯滤波器去噪,用 Sobel 模板计算梯度幅值和方向,遍历梯度图像进行非边缘抑制。Canny 边缘检测的特点在于设定了双阈值 T_1 、 T_2 。当幅值大于阈值 T_2 时一定是边缘,小于阈值 T_1 的点是而非边缘点,介于 T_1 、 T_2 中间时通过 8 邻域进行判断。

传统的边缘检测算子中 Canny 算子边缘检测效果较好,但易出现边缘间断和引入伪边缘的问题。Roberts 算子的定位精度高,对水平和垂直方向的检测效果好,但对噪声敏感。Sobel 算子对噪声有平滑作用,但定位精度不高^[12-14]。

3 改进的边缘检测算法

弹丸阴影图像的边缘轮廓简单但存在噪声和激波的干扰,且定位精度要求高。针对这一特性,提出一种改进的边缘检测方法,在图像预处理后用于实现弹丸特征点识别前的边缘提取。弹丸边缘检测算法的流程如图 3 所示。

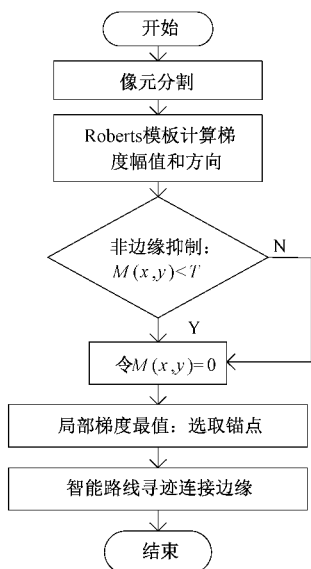


图 3 弹丸边缘检测算法流程

步骤如下:

- 1) 像元分割获得亚像素级的图像,细化图像边缘处细节。
- 2) 选用定位精度高的 Roberts 算子求图像梯度幅值和方向。
- 3) 设定阈值限制,排除梯度图中的非边缘点,得到图像边缘范围。
- 4) 邻域内局部梯度最值法在边缘范围的梯度图中找到锚点。
- 5) 用智能路线寻迹方法沿着预计边缘方向(与梯度方向垂直)寻找梯度值最大的点进行连接,直到形成闭路,完成边缘连接,得到弹丸的单像素宽轮廓边缘。

3.1 像元分割

根据阴影成像的原理,弹丸体内部完全挡住了光线,弹丸阴影图像中这部分像素值为 0 呈现黑色状态。而弹丸的边缘部分,会出现所占的像元只有部分被遮挡的情况,即在阴影图像边缘出现灰度值的渐变过程。观察边缘的局部图像,会发现边缘处的轮廓出现边界模糊、细节不清晰的问题。因此为了定位精度的提高,图像的分辨率需要进一步提高。通过将图像中的最小单位像元进一步分割,提高图像特征点边缘的提取精度。

像元分割通过图像插值实现,常见插值分为线性插值和非线性插值。线性插值是采用同一个插值内核对图像进行处理,而非线性插值则根据图像不同部位而选用不同的插值策略。非线性插值中的双三次插值法虽然计算量大,但相对能保留更多的细节。针对判读系统的需求,采用与边缘方向一致的一维双三次插值^[15]。双三次插值算法中,采样点邻近的 16 个像素点的灰度值和灰度值变化率都会对采样点产生影响。

在像元分割中设图像放大 k 倍(即单个像元的每边被分割为 k 份),源图像 A 大小为 $M \times N$,放大后得到目标图像 B ,大小为 $kM \times kN$ 。则图像 B 中某像素点 $p(x, y)$ 对应于 A 中的坐标 $(i + u, j + v)$,其中 u, v 都是不大于 1 的正浮点数。

取内插函数 $s(\omega)$ 进行插值,其表达式如式(6)所示。

$$s(\omega) = \begin{cases} 1 - 2|\omega|^2 + |\omega|^3, & |\omega| < 1 \\ 4 - 8|\omega| + 5|\omega|^2 - |\omega|^3, & 1 \leq |\omega| < 2 \\ 0, & |\omega| \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

代入周围已知的 16 个像素点的灰度值进行计算,则 p 点像素灰度值计算式如式(7)所示。

$$f(x, y) = f(i + u, j + v) = A \cdot B \cdot C \quad (7)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} s(1+v) \\ s(v) \\ s(1-v) \\ s(2-v) \end{bmatrix}^T, C = \begin{bmatrix} s(1+u) \\ s(u) \\ s(1-u) \\ s(2-u) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} f(i-1,j-1) & f(i-1,j) & f(i-1,j+1) & f(i-1,j+2) \\ f(i,j-1) & f(i,j) & f(i,j+1) & f(i,j+2) \\ f(i+1,j-1) & f(i+1,j) & f(i+1,j+1) & f(i+1,j+2) \\ f(i+2,j-1) & f(i+2,j) & f(i+2,j+1) & f(i+2,j+2) \end{bmatrix}^T$$

等价于:

$$f(i+u,j+v) = \sum_{r=-1}^3 \sum_{c=-1}^2 f(i+r,j+c) \cdot s(r-u) \cdot s(c-v) \quad (8)$$

遍历图像进行插值操作得到图像 B 中每点像素值,将源图像中的每个最小像元分割为 $k \times k$ 个。实现对原图像的分辨率的提高,满足后续图像处理的精度要求。

3.2 非边缘抑制

图像边缘处的灰度值变化剧烈,弹丸阴影图像的边缘呈现阶跃状,通过求取一阶导数可以表示边缘变化。令 $f(x,y)$ 表示图像中 (x,y) 位置处的灰度值, ∇f 表示一阶梯度向量:

$$\nabla f(x,y) = \text{grad}(f) = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: g_x 表示 x 轴方向的梯度值, g_y 表示 y 轴方向的梯度值,则梯度幅值 $M(x,y)$ 和方向 $\varphi(x,y)$ 为:

$$M(x,y) = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (10)$$

$$\varphi(x,y) = \arctan \left[\frac{g_y}{g_x} \right] \quad (11)$$

选用定位精度高的 Roberts 算子求图像梯度幅值和方向,偏导数计算可转换为区域模板的卷积,对每个像素点对角线相邻像素进行差分处理。 g_x 和 g_y 进而表示为:

$$g_x = f(x+1,y+1) - f(x,y) \quad (12)$$

$$g_y = f(x+1,y) - f(x,y+1) \quad (13)$$

通过卷积模板得到图像的梯度幅值 $M(x,y)$ 和方向 $\varphi(x,y)$ 后,设置阈值 T ,若 $M(x,y) < T$ 则为非边缘区域,令该点梯度值为 0。通过非边缘抑制后,得到像素宽为 2~3 的边缘轮廓梯度图。

3.3 锚点的选取与连接

在获得多像素宽的边缘轮廓梯度图后,从中选取绝对边缘点作为锚点,再通过锚点连线得到单像素边缘。

锚点选取时,选择 3×3 的邻域模板移动,当邻域内大多数梯度值不为 0 时,选择领域内梯度最大值作为锚点。当锚点不唯一时,结合梯度方向剔除重复锚点。对于水平的边缘,当多个最大值在同一行时,均取为锚点,否则取最上层点为锚点;对于垂直边缘,当多个最大值在同一列时,均取为锚点,否则取最左列的点为锚点。遍历图像后获得锚点,为边缘连接提供基础点。锚点选取的流程如图 4 所示。

边缘连接时以锚点为起点,通过智能路线寻迹(smart routing,SR)的方法^[16-17]进行边缘连接。SR 连接边缘的过程需要先对边缘进行方向判断,分为水平移动和垂直移动

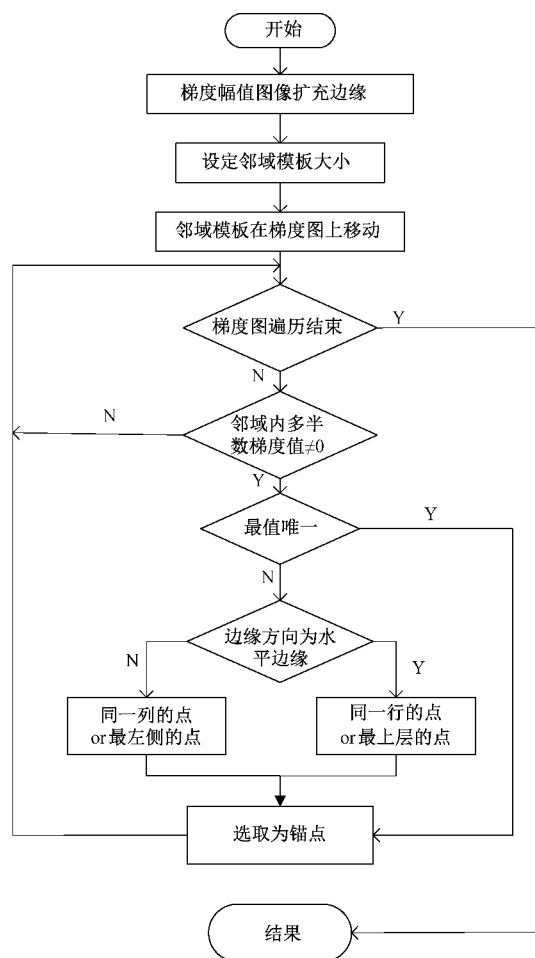


图 4 锚点选取流程

两个方向。以水平边缘上向左移动的 SR 算法为例介绍 SR 方法思路。任选一个锚点 $p(x,y)$ 开始判断,当点未被连接且处于水平边缘时,判断锚点左侧 3 个邻近像素梯度值 $p(x-1,y+1)$ 、 $p(x-1,y)$ 和 $p(x-1,y-1)$ 梯度幅值的大小,向梯度值最大的点连接移动并记为边缘点。得到新的边缘点后重复连线过程,直到当前点移出边缘区域或者遇到检测过的点则停止连接。

4 实验验证

4.1 分辨率板检验边缘检测精度

在对弹丸阴影图像进行特征点识别前,先对改进的边缘检测算法进行评估。利用分辨率板线段间距固定、线段多等级划分的特点,来验证算法的可行性与精确度。

以 UASF1951 分辨率测试卡正片进行测试,测试板中每组有标号为 1~6 的 6 个元素组成。每个元素由等间距的线条组成:三横三竖,空格等于线宽。通过检查边缘连续性、边缘等间距情况、最多清晰分辨边缘的元素等级来评判边缘检测精度。

对比了传统 Canny 边缘检测、Roberts 边缘检测和改进边缘检测方法提取分辨率板边缘的效果,如图 5 所示。

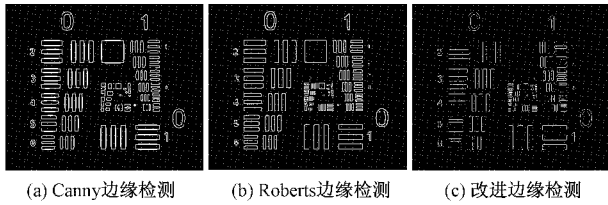


图 5 分辨率板边缘检测对比图

观察分析图 5 结果,对 3 种方法检测得到的分辨率板边缘连续性、等间距情况和清晰分辨边缘的元素等级进行了对比评判,详细数据如表 1 所示。

表 1 边缘检测对比

评判标准	Canny	Roberts	改进边缘检测
元素等级	1 组 5 号	1 组 6 号	2 组 1 号
边缘连续性	连续但加粗	连续	连续
等间距情况	较差	较差	较好

对比检测的结果发现,改进方法相对传统 Canny 和 Roberts 边缘检测方法可以清晰分辨出更多的元素;Roberts 和改进方法相对 Canny 的边缘清晰,定位更精确;Canny 方法得到的边缘会出现多像素的加粗;等间距情况改进方法相对传统边缘检测较好;综合比较,改进的图像边缘检测方法在定位精度和检测效果上有了一定的提高。

4.2 弹丸特征点识别对比

某次靶道试验中选用某型号车载 155 mm 口径,长 900 mm 的榴弹炮进行发射试验,经过阴影照相站拍摄得到各站的弹丸阴影图像。各阴影照相站中 CCD 相机的型号为 IMPERX 的 B6620,最大分辨率为 6 600×4 400,通过图像处理提取各站弹丸质心像素坐标,经过裁剪后的弹丸阴影图像如图 6 所示。

为了检验改进边缘检测方法下矩理论自动提取的弹丸特征点定位精度是否满足试验要求,通过多组试验数据对比无边检测、传统 Canny 边缘检测、Roberts 边缘检测和

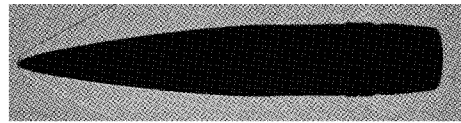


图 6 某型 155 mm 口径榴弹炮弹丸阴影图像

改进边缘检测后求质心坐标与实际测量值的误差。质心识别结果如图 7 所示。

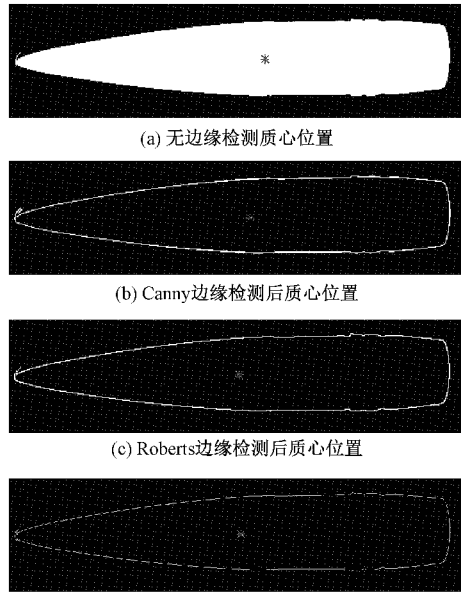


图 7 弹丸质心提取对比图

如图 7(b)~(d)所示,在对弹丸的边缘轮廓提取中,改进算法经过像元分割后得到的边缘相对传统方法线条轮廓更细,定位精确到了单个像素内,且不存在加粗边缘点,体现了改进算法在弹丸边缘提取方面的优势。

各组试验数据在不同情况处理下得到的弹丸质心位置的像素坐标和实际测量坐标如表 2 所示。并以实际测量值为标准,计算了不同边缘检测下质心位置在 x 轴、 y 轴和质心坐标的误差,结果如表 3 所示。

表 2 弹丸质心位置

组号	1	2	3	pixel
实际坐标	(252.0,58.0)	(254.5,59.0)	(255.0,59.0)	
无边检测	(288.0,58.1)	(289.0,59.1)	(290.0,59.1)	
Canny 边缘检测	(270.3,59.2)	(271.3,60.2)	(272.3,60.2)	
Roberts 边缘检测	(258.6,57.7)	(259.6,58.7)	(261.7,58.7)	
改进边缘检测	(260.2,58.2)	(261.2,59.2)	(262.2,59.2)	

通过对表 2、3 数据分析可得,不进行边缘检测直接矩理论求取得到的质心坐标误差最大,平均质心误差达到了 13.2%,经过边缘检测后误差整体降低在 7%以内。改进的边缘检测算法相对传统 Canny 算法定位精度更高,平均

质心误差由 6.7%降为 2.8%。相比于 Roberts 算法,改进算法在 y 轴的定位准确度上有所提高,且平均质心误差由 3.0%降低到了 2.8%,体现了改进算法在弹丸质心位置提取的优越性。

表3 弹丸质心位置相对误差 %

组号	误差	无边缘检测	Canny边缘检测	Roberts边缘检测	改进边缘检测
1	x轴	14.3	7.3	2.6	3.3
	y轴	0.2	2.1	0.5	0.3
	质心	13.6	7.0	2.5	3.1
2	x轴	13.6	6.6	2.0	2.6
	y轴	0.2	2.0	0.5	0.3
	质心	12.9	6.4	2.9	2.5
3	x轴	13.7	6.8	2.6	2.8
	y轴	0.2	2.0	0.5	0.3
	质心	13.1	6.6	3.7	2.7
平均质心误差		13.2	6.7	3.0	2.8

5 结 论

针对弹道试验中手动选取特征点效率和准确性低的问题,提出了一种基于改进边缘检测的图像自动判读方法,利用 Roberts 模板求取图像梯度,寻找邻域内梯度最大值绘制锚点,通过智能路线寻迹获得弹丸单像素边缘,再采用矩理论求弹丸质心坐标。改进的边缘检测算法能在亚像素级别上获得弹丸单像素边缘,经分辨率板检验可以检测到 2 组 1 号元素等级,边缘连续性相比 Canny 和 Roberts 较好。经过弹丸实际质心与图像检测质心数据分析,边缘检测后的质心坐标比直接矩理论求质心的准确度更高。相比于 Canny 和 Roberts 算法,改进后的算法将弹丸的平均质心误差由 6.7% 和 3.0% 减小到了 2.8%,体现了改进算法在弹丸质心位置提取的优越性。本文列出了单站弹丸质心坐标检测的方法,后续可推广到弹道靶道内多站点图像序列的检测。

参考文献

- [1] 任国民. 弹道靶道技术及其发展[J]. 弹道学报, 1994(1): 90-96.
- [2] 刘世平, 易文俊, 顾金良, 等. 弹道靶道数据判读与处理方法研究[J]. 兵工学报, 2000(3): 201-204.
- [3] SCHWARTZ M J, SCHMISSEUR J D. Characterization of near-muzzle ballistic flow fields using high-speed shadowgraphy [C]. AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.

- [4] SCHOENENBERGER M, BROWN T G, YATES L. Surface pressure ballistic range test of mars 2020 capsule in support of MEDLI2 [C]. 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2017.
- [5] 宋炜. 高精度弹道靶道空间基准系统及其校准方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [6] 罗红娥, 陈平, 顾金良, 等. CCD 正交阴影照相系统的研究与应用[J]. 电子测量技术, 2008, 31(12): 1-3.
- [7] 徐志刚, 马健康, 罗秀娟, 等. 新型高速视频图像记录判读系统[J]. 光子学报, 2004(10): 1265-1268.
- [8] 杨宗伟, 孔德仁, 贾云飞. 高速弹体阴影图像特征点判读技术研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(1): 9-13.
- [9] 周慧. 空中目标红外测量图像自动判读方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(1): 183-187.
- [10] 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.
- [11] 阳洋, 陈熠昕, 陵园, 等. 基于统计矩理论的模型修正损伤识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 217-226.
- [12] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005(3): 415-419.
- [13] 张月圆, 曾庆化, 刘建业, 等. 基于 Canny 的改进图像边缘检测算法[J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 84-90.
- [14] 王方超, 张旻, 宫丽美. 改进的 Roberts 图像边缘检测算法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(2): 88-92.
- [15] 杨云峰, 苏志勋, 胡金燕. 一种保持边缘特征的图像插值方法[J]. 中国图象图形学报, 2005(10): 1248-1251.
- [16] CIHAN, TOPAL, CUNEY T, et al. Edge drawing: A combined real-time edge and segment detector[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2012.
- [17] AKINLAR C, CHOME E. CannySR: Using smart routing of edge drawing to convert Canny binary edge maps to edge segments[C]. International Symposium on Innovations in Intelligent Systems & Applications, IEEE, 2015: 1-6.

作者简介

李璐, 工学硕士, 主要研究方向为兵器与测试技术、弹丸图像处理与识别。

E-mail: lilu13776620127@163.com