

基于改进直线检测的箱体跌落姿态角解算方法

骆爱炜¹ 张永建¹ 王正国² 狄长安¹

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094; 2. 中国人民解放军 93119 部队 酒泉 735000)

摘 要:弹药跌落环境模拟系统主要用于对各种弹药(箱装或裸弹)、引信、仪器设备等进行跌落试验。针对野外复杂背景下高速相机采集的目标跌落图像噪声大、边缘复杂不易提取且图像数据量大等问题,设计了融合高斯核函数和边窗思想的滤波算法、基于感兴趣区域(region of interest, ROI)的改进 Hough 直线检测算法以及基于序列图像 ROI 动态更新的边缘直线自动提取算法,解决了去噪过程中目标边缘扩散和序列图像姿态角解算耗时长的问题。实验表明,所提出的改进算法保护了高噪声图像的边缘特征,直线检测耗时低于标准 Hough 变换耗时的 1/10,实现了多帧图像运动目标姿态角的快速自动提取,姿态角解算平均绝对误差为 0.36%。

关键词:高斯边窗滤波;直线检测;自动提取;跌落姿态角

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6

Box drop attitude angle solving method based on improved line detection

Luo Aiwei¹ Zhang Yongjian¹ Wang Zhengguo² Di Chang'an¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Unit 93119 of PLA, Jiuquan 735000, China)

Abstract: The ammunition drop environment simulation system is mainly used for drop test of various ammunition, fuses, equipment etc. Aiming at the problems of high noise, complex edges and large amount of image data in the target drop image collected by high-speed camera in the field with complex background, a filtering algorithm integrating Gaussian kernel function and side window idea, an improved Hough line detection algorithm based on ROI and an automatic edge line extraction algorithm based on dynamic ROI update of image sequence are designed. It solves the problem of target edge diffusion in the process of denoising and time-consuming attitude angle calculation of image sequence. The experimental results show that the improved algorithm protects the edge features of high noise images, and the line detection time is less than 1/10 of the standard Hough transform time. It realizes the fast automatic extraction of the attitude angle of moving objects in multiple images, and the average absolute error of attitude angle calculation is 0.36%.

Keywords: Gaussian side window filtering; line detection; automatic extraction; drop attitude angle

0 引言

大型试品自由跌落试验是考核弹药箱体在装卸、作战搬运过程中偶然跌落时承受冲击的能力以及对箱内危险弹药保护能力的重要手段。根据国军标要求^[1],试验主要模拟装船海运包装的自由跌落试验(模拟高度 12 m)。弹药跌落环境模拟系统通常建立在环境恶劣的野外,主体部分主要为复杂钢架结构体。因真实箱装弹药跌落试验的

危险性,系统采用焊接钢架来近似模拟装弹箱体的外形及质量。根据被试品解卸前后的物体姿态角的变化量,评估弹药跌落环境模拟试验系统的跌落角度准确性。

测量动态目标姿态参数的方法主要分为直接测量和非接触测量两大类。直接测量法需要在被试品上安装陀螺、地磁等传感器,通过传感器的输出值解算目标的三维姿态,但是该类方法不能获得姿态角的实时值,每次试验前都需对传感器进行固定与测验,并且对传感器的性能要

求高。随着图像处理技术的发展,光学非接触式测量方法在工程测试中的应用非常广泛^[2]。高速相机能提供动态目标运动与姿态的大量细节信息,广泛地应用于运动目标高精度测量领域,通过分析拍摄的图像序列可以获得目标的动态运动参数^[3]。系统固定两台高速相机,从不同的角度采集目标跌落的全过程二维图像^[4],应用数字图像处理技术对跌落图像进行特征提取,通过视觉三维重建方法解算被试品的姿态参数。

本文系统类箱体跌落目标的图像特征为外轮廓直线,针对物体轮廓直线的提取方法大多基于 Canny 边缘检测算法和 Hough 直线提取算法。余波等^[5]针对标准 Canny 算子对椒盐噪声处理效果差等问题,提出了一种融合新颖滤波和均值滤波的混合滤波器代替 Canny 的高斯滤波器。吕泽卿等^[6]采用自适应中值滤波而不是高斯滤波对裂缝图像进行平滑处理,提高自适应性。刘丽霞等^[7]用具有保边特性的引导滤波器替换高斯滤波器进行图像平滑,减少了目标边缘特征的扩散。针对 Hough 直线提取的优化,Chutatape 等^[8]则将二维 Hough 空间转换为一维空间进行计算,大大减少计算复杂度。唐震等^[9]采用概率 Hough 直线检测算法,只考虑边缘点的一个随机子集,减少了计算边缘点的数量。吕侃徽等^[10]引入具有密度空间聚类方法,提高了 Hough 算法对小线段的检测速率和精度。刁燕等^[11]将边缘点分类为有序点和无序点分别进行计算,优化了 Hough 算法的直线端点查找。

然而,上述多数针对 Canny 的改进方法仅仅考虑了对噪声抑制的优化,忽略了对边缘特征的保护。文献[7]对 Canny 中滤波器的改进考虑了对边缘的保护,但是对外场高噪声的滤除效果并不理想。现有的改进 Hough 算法在计算量和内存使用上已有良好的改善,但对于系统高速相机采集的多帧图像,在目标有效边缘线的提取速度上仍有不足之处。本文针对这两种情况,提出一种野外跌落目标姿态角的高精度、快速解算方法。

1 跌落姿态角解算方法

本文提出的姿态角高精度、快速解算方法的流程如图1所示。首先输入图像序列的第1帧图像,通过高斯边窗滤波器去除背景噪声,并结合 Canny 边缘检测算子检测模拟跌落箱体的边缘,进而利用改进 Hough 直线检测算法,实现目标边缘直线的提取。其次,利用两相机的内外参标定数据对提取的同一条边缘线进行三维重构^[12],解算出边缘线世界坐标系下的方向向量即为姿态角。接着,输入下一帧图像进行滤波去噪与边缘检测,移植先序的兴趣区域(ROD)进行小范围直线提取并自动更新 ROI 区域和提取有效边缘点集完成本帧图像的精确直线提取,随后三维重构直线并解算姿态角。最后,不断地往下迭代处理后序图像,实现姿态角的自动解算。

1.1 基于高斯边窗滤波技术的保边去噪

本文系统采用高速相机进行图像采集且相机长时间

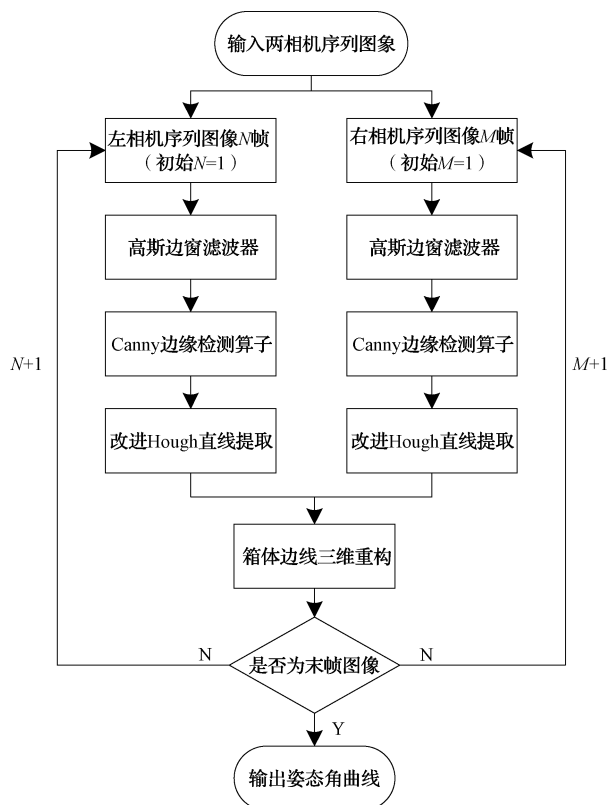


图1 本文姿态角解算方法流程

处于预采样阶段,由于高速相机功耗较大,采集系统工作期间会产生大量的热量造成器件温度上升。温度会极大影响电路系统的器件参数并引入图像读出噪声,该噪声满足高斯分布特性^[13]。为提高目标成像对比度、精确提取边缘特征,图像预处理阶段需要加大降噪幅度。

野外弹药跌落模拟试验系统中,为保证图像采集仪的安全,高速相机通常离塔架中心较远,则模拟跌落目标的边缘线宽将占据较少的像素宽度。采用 Canny 算法中的全窗口回归滤波法,像素值会沿着边缘的法线方向进行扩散并平滑边缘,不利于后续边缘特征的提取。本文将采用同时具备保边和降噪效果的滤波器代替 Canny 算法中的高斯滤波器。

全窗口回归滤波算法的滤波核中心放置在计算像素上,在跨越边界时会引入边缘两边像素的加权计算,这种计算方法会弱化边缘像素的梯度差值。使用边窗滤波技术可以将待计算像素放置在滤波核的边界并使滤波窗口处于边缘像素变化不大的一侧。本文结合高斯核函数和边窗滤波器,在原边窗滤波器8类窗口的基础上增加4组窗口,朝向定义为 L、R、U、D、NW、NE、SW、SE、LNW、RNE、LSW、LSE 如图2所示。新增的4组窗口提升了45°和135°方向上的权重,适应于跌落试验中常用的45°俯仰角跌落测试工况。

假设像素 i 为待处理像素,则像素 j 为包括像素 i 在内和其8邻域内的像素点集合。边窗集合可表示为 $S =$

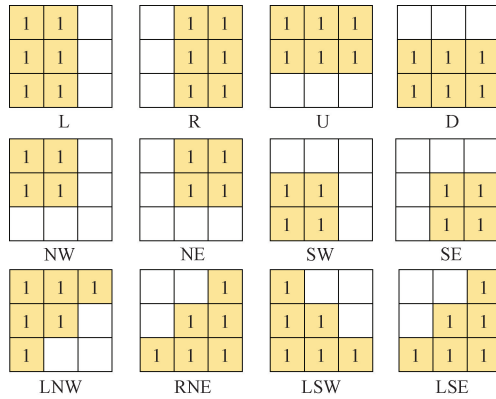


图2 边窗滤波器类型

$\{L, R, U, D, NW, NE, SW, SE, LNW, RNE, LSW, LSE\}$, 设定 w_{ij} 为像素 j 基于高斯核函数且滤波核锚点权重为 1 的对应权重, 则二维高斯核函数构建如下:

$$w_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: σ 为高斯滤波的标准差^[14], σ 的值越大, 滤波效果更加平滑; x 和 y 分别为像素 j 到锚点的像素横纵方向距离。

q_j 为点 j 的灰度值, 定义 I_n 为待处理像素点 i 经不同边窗 n 滤波处理后的结果, 则有:

$$I_n = \frac{1}{N_n} \sum_{j \in \omega_i^n} w_{ij} q_j, \quad n \in S \quad (2)$$

式中: N_n 为不同边窗 n 的权重之和。

$$N_n = \sum_{j \in \omega_i^n} w_{ij}, \quad n \in S \quad (3)$$

依据待处理像素点 i 的不同边窗滤波输出, 定义 I_m 为最小重构误差:

$$I_m = \operatorname{argmin}_{n \in S} E_i = \operatorname{argmin}_{n \in S} \|q_i - I_n\|_2^2 \quad (4)$$

式中: E_i 为代价函数。

$$E_i = \|q_i - I_n\|_2^2 \quad (5)$$

本文保边滤波算法通过寻找不同边窗 n 滤波处理的输出值与原像素值之间的最小二范数, 获得最佳边窗滤波核类型并对原像素进行滤波处理。

1.2 改进直线提取算法

1) 基于改进 Hough 直线检测的目标边线提取

Hough 变换将边缘图像中的参数点离散化成 Hough 空间参数, 同时建立对应于原始像素点空间位置信息的累加器^[15]。野外恶劣环境下采集的图像背景复杂, 经边窗滤波和 Canny 边缘检测后仍存在大量非目标边缘点。从边缘点映射计算的情况来看, 当一张完整的箱体跌落图像中存在边界点数量为 m , 参数 θ 的细分值为 $\Delta\theta$ 时, 则每个边缘点参数 ρ 的计算次数为 $\pi/\Delta\theta$ 。外场图像的干扰边缘点众多, 为减小计算量, 需在 Hough 直线检测前过滤无效边缘点, 集中算力于目标有效特征边缘点。对于上述问

题, 本文提出基于 ROI 区域的 Hough 直线检测算法, 实际对跌落箱体图像的操作示意如图 3 所示, 实现步骤如下。

(1) 输入经高斯边窗滤波去噪和 Canny 边缘检测后的二值图像, 从箱体的目标边缘上提取一点 r_i 建立边长为 R 的正方形 ROI 区域, 提取所有 ROI 范围内的二值化边缘点。

(2) 以 R 范围建立 Hough 空间累加器 A_R , 设定 $\Delta\theta = \pi/180, \Delta\rho = 1$, 该累加器主要用于 R 范围内得票数最高的直线的提取, 该 ROI 区域的直线预示了箱体的目标外轮廓边线的直线方向。

(3) 对 R 范围内所有像素值为 255 的边缘点进行 Hough 变换, 并在累加器 A_R 中进行投票, 获得得票率最高的参数值 (θ_R, ρ_R) 。

(4) 检查 θ_R 的值, 如果 $\theta \in (-\frac{\pi}{2}, 0)$, 则分别以 ROI 的左下角和右上角点为基点, $\tan(\pi - \theta)$ 为方向作两条直线; 若 $\theta \in (0, \frac{\pi}{2})$, 则分别以 ROI 的左上角和右下角点为基点, $\tan\theta$ 为方向作两条直线。

(5) 以步骤(4)中两直线之间的边缘像素点为元素建立有效边缘点集合, 排除无效边缘点。

(6) 基于步骤(5)的边缘点集合建立新的 Hough 空间累加器 A_H , 设定 $\Delta\theta = \pi/360, \Delta\rho = 0.5$ 。

(7) 遍历边缘点集合中所有像素值为 255 的边缘点, 在 A_H 中计算投票, 获得得票率最高的参数值 (θ_H, ρ_H) , 该参数值代表的直线为箱体目标的有效边缘线。

以上步骤无需对 Canny 边缘检测后的所有边缘点进行 Hough 变换的计算投票, 通过对有效边缘点的采样, 减少了检索空间和计算量, 且采集的外场图像中干扰直线众多, 该算法避免了提取的最高得票率直线不是所需边缘直线的情况。

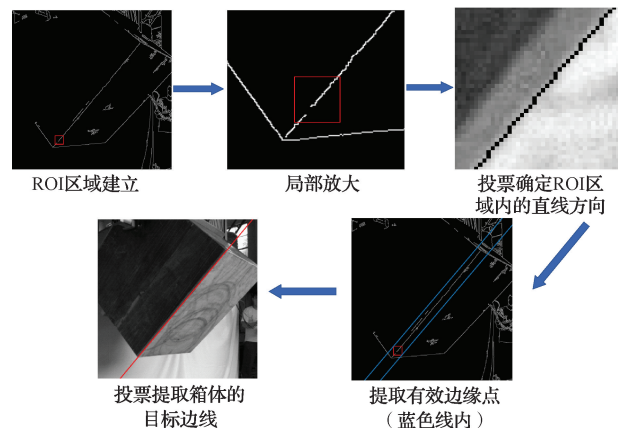


图3 改进 Hough 直线算法

2) 基于序列图像 ROI 动态更新的目标边线自动提取

本文系统高速相机采集的数据为高帧率序列图像, 则箱体跌落目标的特征直线在序列图像的相邻帧之间变化

不大。本文算法利用前帧图像 Hough 直线检测阶段建立的 ROI 区域对后一帧图像的相同区域进行直线检测并动态更新 ROI 区域和有效边缘点集,实现跌落箱体序列图像的特征直线自动提取,实现步骤如下。

(1)读入后一帧图像进行滤波和 Canny 边缘检测并将上帧图像的 ROI 区域移植于待处理图像的相同位置。

(2)清空累加器 A_R 并将待处理图像 ROI 区域内的边缘点在 A_R 中进行投票,获得得票率最高的参数值 (θ_R, ρ_R) 。

(3)将 A_R 和 A_H 中的参数值进行比较。若 $\theta_R - \theta_H < T_\theta$ 且 $\rho_R - \rho_H < T_\rho$ (T_θ 和 T_ρ 分别为相邻图像目标边缘直线参数差的容许阈值),则 A_R 预测的边缘直线方向的参数为有效参数。否则目标特征边缘不在该 ROI 区域内或在该区域内的特征点较少,将 ROI 区域竖直向下每次移动 $\frac{R}{2}$,并在 A_R 进行投票,直到得票参数与 A_H 中参数的差值在阈值范围内,则停止该帧图像边线所在 ROI 区域的搜索。

(4)比较 ROI 中所有边缘点与 (θ_R, ρ_R) 代表的直线的距离,取距离最小的点为最优边缘点。

(5)以最优边缘点为中心建立边长为 R 的正方形 ROI 区域,实现 ROI 区域的动态更新。采用改进 Hough 直线检测算法中步骤(4)~(7)提取箱体的目标边缘直线,完成该帧图像的处理。

(6)跳至步骤(1)循环处理序列图像

基于序列图像感兴趣区域动态更新的目标边线自动提取算法如图 4 所示,算法总流程如图 5 所示。

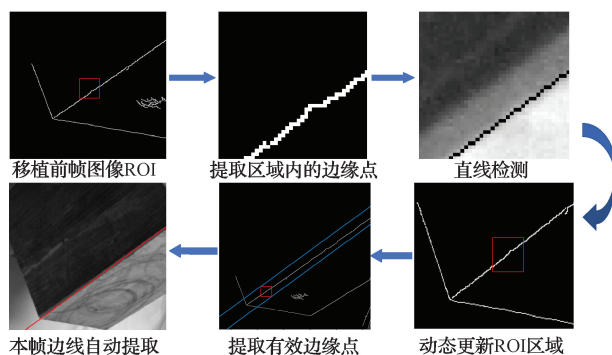


图4 边线自动提取流程示意图

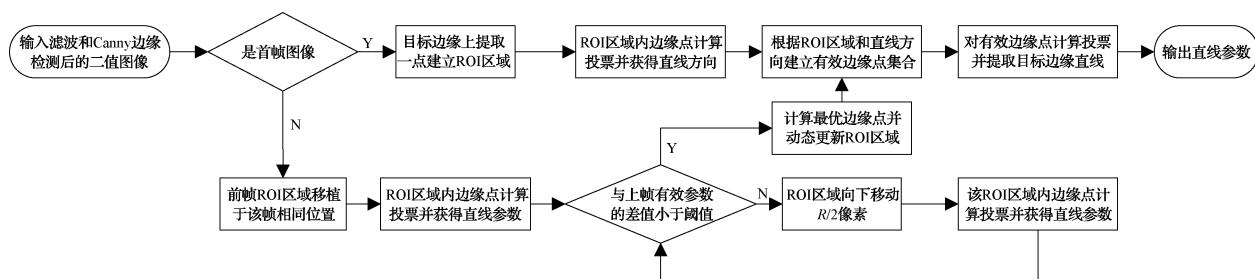


图5 改进直线提取算法总流程

1.3 跌落目标姿态角三维重建原理

跌落目标姿态角三维重建是基于双目视觉原理,利用两台高速相机在不同的方位同时对箱体跌落过程进行采集,获取目标的两组序列图像,利用同时刻左右图像上箱体的相同边缘直线解算姿态角的方法。经改进直线检测算法提取边线直线方程后,利用双目结构的空间位姿关系^[16],通过面面交汇法重构三维空间目标边线的直线方向向量,求取原理示意图如图6所示。

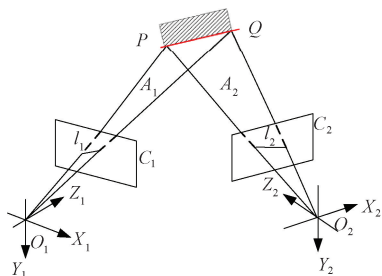


图6 面面交汇法示意图

通过两相机标定所得的内外参数和目标边线在成像面上的直线方程,可计算得到两投影平面在世界坐标系下

的平面方程。获取到左右投影平面后,即可利用两平面的法线向量 $\vec{n}_1(A_1, B_1, C_1)$ 和 $\vec{n}_2(A_2, B_2, C_2)$ 的叉积求得平面交线的方向向量 (m, n, p) :

$$m = \begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix}, n = \begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix}, p = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix} \quad (6)$$

具有对称结构的箱体目标,主要由跌落过程的边缘线俯仰角来表征其姿态变化。若已知箱体长度方向边线在世界坐标系下的方向向量 (m, n, p) ,由空间几何知识可知俯仰角 φ :

$$\varphi = \arctan \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2}} \quad (7)$$

2 实验与分析

本文采用相机光轴正交的双目系统,在实验室标定内参后,利用跌落塔架标记点进行野外大视场外参标定,使用高速相机进行序列图像同步采集,实验现场如图7所示。实验时,以10 m跌落高度和45°目标跌落角度为试验基准,将三轴姿态测量传感器 WT31N 和小型采集存储设备固定在模拟箱体目标上,提升箱体至目标高度后控制夹

持解卸装置释放模拟箱体,同时由控制设备发送 TTL 信号同步后触发高速相机进行图像采集。数据处理使用 Windows10 系统,使用 Pycharm 集成开发环境,处理器 AMD R7-5800H。实验分为图像效果验证和算法速度测试。

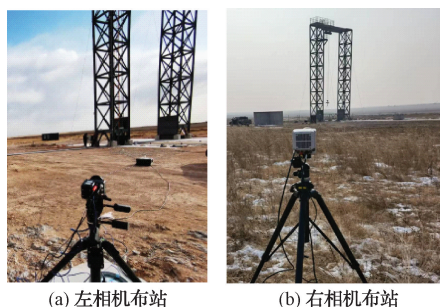


图7 弹药模拟跌落现场

2.1 高斯边窗滤波算法效果验证

外场图像存在严重的高斯噪声,为了验证融合高斯核

函数和边窗思想的滤波算法的保边去噪效果,选取野外模拟箱体跌落试验现场图像。依次采用 Canny 的高斯滤波算法、本文滤波算法和具有保边性的引导滤波算法分别对野外高噪声原图像进行处理,窗口大小均为 3×3 ,对 3 种算法进行迭代计算,迭代次数为 1 次、4 次、7 次。选取模拟箱体的边缘线图像对比实验效果,如图 8 所示,其边缘线图像的横纵坐标为像素点在高噪声原图像中的像素。对比边缘线原图像和 3 组实验结果可以发现,原图像的边缘线区域高斯噪声明显;迭代 1 次的情况下,3 种算法的保边效果相差不大,但图像中仍存在大量的高斯噪声点;迭代 4 次时,3 种算法皆有效减少了高斯噪声,然而高斯滤波算法出现了明显的边缘扩散现象,且图像平滑被增强,边缘对比度被削弱,而引导滤波算法和本文算法在去噪的基础上仍保留了明显的边缘特征,但是引导滤波下的边线开始出现特征点的弱化;迭代 7 次时,高斯滤波算法下的图像平滑加剧,引导滤波后的边线也出现了边缘法向扩散现象,只有本文算法既保留了明显的边线特征,又避免了多次去噪时的边缘扩散。

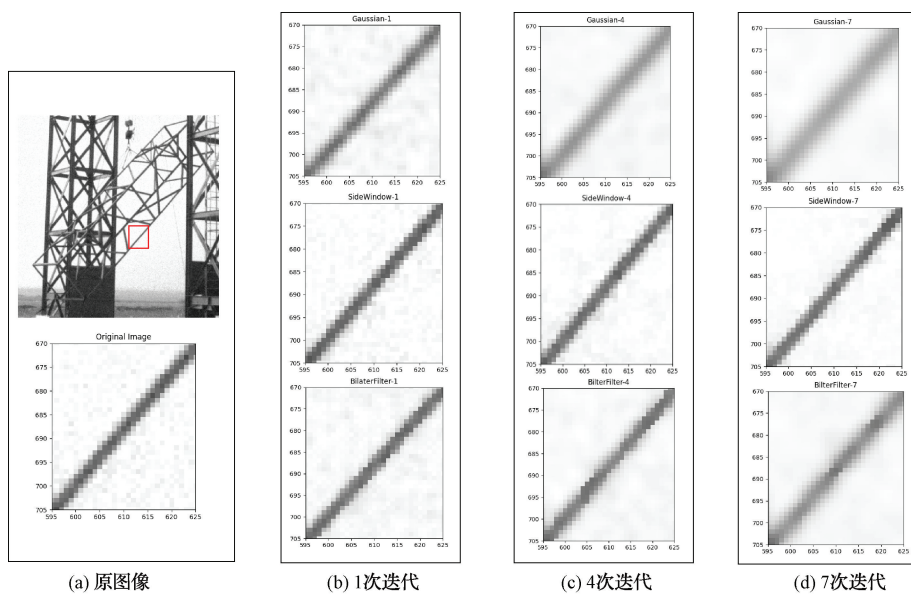


图8 两种滤波算法效果对比

2.2 基于 ROI 区域的 Hough 提取算法实验

改进 Hough 直线检测算法实验采用左右相机采集的两张原始图像,对原始图像进行改进滤波去噪和 Canny 边缘检测后。分别采用标准 Hough 直线检测算法、文献[11]改进概率 Hough 直线检测算法和本文改进算法进行箱体目标边线提取,实验效果如图 9 所示。对比 3 种直线检测算法可以看出,标准 Hough 和本文算法都能将模拟箱体的目标边线提取出来,但是标准 Hough 易受图像中无效边界点影响,会将其他投票值高的无效直线提取出来,而文献[11]算法由于采用边缘点抽样计算的方式,在目标边缘点占比不高时很难提取所需直线。针对不同图

像背景,使用标准 Hough 算法和文献[11]算法需要对直线参数得票率的阈值进行优化设置,否则会出现直线过多或者直线提取失败等情况,浪费了大量的人工判读时间。本文改进的 Hough 直线提取算法自动提取所需的目标边界线,排除干扰点的影响,提取准确且无需对多根直线进行人为判定。

标准 Hough 直线检测算法会将二值图像的所有边缘点进行参数计算并在累加器中投票,文献[11]算法随机抽取采样点进行计算并结合相邻边缘点进行直线搜索,减少了计算时间,而本文算法先建立有效边缘点集再进行直线检测,排除大量无效点。以图 9(a)采集的图像为例,对 3 种

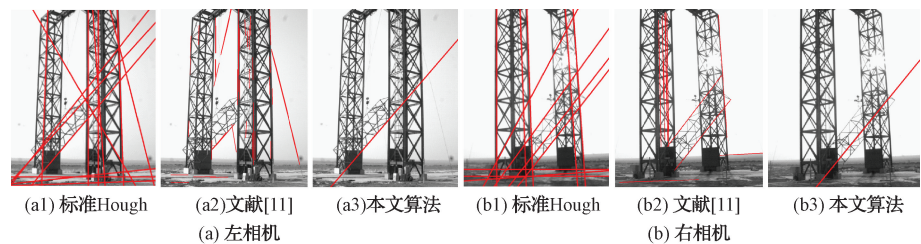


图9 两视角图像算法效果对比

算法的运行时间比较如表1所示。由表1数据可以看出，Hough 算法所需时间较短，而本文算法在参数精度提高1倍的情况下，运行时间相比其他两种算法大幅减少。

表1 算法运行结果对比

算法	图像大小	$\Delta\rho/\text{pixel}$	$\Delta\theta/\text{rad}$	Lines	时间/ms
标准 Hough	1 280×1 024	1	$\pi/180$	10	51.024
文献[11]	1 280×1 024	1	$\pi/180$	23	29.444
本文	1 280×1 024	0.5	$\pi/360$	1	4.108

2.3 边线自动提取及姿态角求解

本文采用基于 ROI 动态更新的直线自动提取算法处理序列图像，根据双目位姿关系和左右图像目标边线的参数值三维重构动态目标的姿态角值。将传感器 WT31N 的输出值和本文姿态角三维重构数据值对箱体目标跌落过程中同时刻的俯仰角度值进行多次实验比对，取其中误差最大的实验结果如图10所示。根据平均绝对误差(MAE)计算公式为：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| = 0.36\% \tag{8}$$

式中： $\hat{y}_i$ 为本文三维重构的姿态角数据值； y_i 为三轴姿态测量传感器 WT31 N 的输出值； n 为对比的数据量个数。经计算，本文算法的平均绝对误差值为 0.36%。试验表明本文算法满足姿态角高精度解算要求。

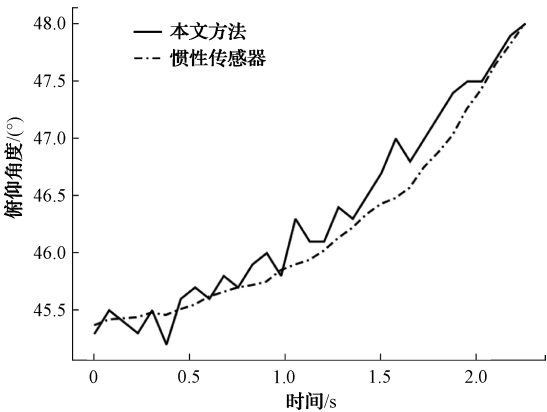


图10 俯仰角解算值对比

3 结 论

针对野外复杂背景下高速相机采集的箱体跌落过程

图像噪声大、边缘复杂不易提取且图像数据量大等问题，提出了一种箱体跌落姿态角快速准确的解算方法。首先，优化了 Canny 算法中的滤波器，引入融合高斯核函数和边窗滤波器的去噪算法，不仅有效去除了外场图像严重的高斯噪声，同时抑制了目标边线的扩散。接着，使用改进的 Hough 直线检测算法排除了非目标边界点的影响，降低了直线检测过程的算法运行时间并准确提取了所需直线。最后，对多帧序列图像提出了基于感兴趣区域动态更新的目标边线自动提取算法，实现了后续帧图的目标边缘线的自动检测和姿态角的快速解算。本文姿态角解算过程中的高斯边窗滤波算法和边缘直线检测算法均优于其他算法，既保护了边缘特征又减少了直线检测时的资源消耗，同时提出的目标边线自动提取算法避免了使用近似步骤处理序列图像的人工消耗。不过，在目标跌落路径上的背景较为复杂的情况下，本文算法对序列图像的目标边线自动提取的精度会大大下降，影响最终的姿态角解算结果。在未来的研究中，改进的重心将放在提高序列图像目标边线的识别准确度、降低对目标跌落方向上的图像采集环境要求等方面。

参 考 文 献

[1] GJB 3857—1999, 弹药安全性试验规程—跌落安全试验[S].
[2] 张荣, 黄海莹, 卫剑峰, 等. 复杂背景下跌落试验件的图像测试技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(10): 2380-2382, 2400.
[3] 周剑, 胡建, 任德新, 等. 高动态运动目标参数摄像测量方法与系统[J]. 战术导弹技术, 2011(1): 99-104.
[4] 汤寒宇. 大型试品跌落姿态自动调整与测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
[5] 余波, 吴静, 周琦宾. 一种基于改进 Canny 算子的边缘

- 检测算法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(8): 24-26, 43.
- [6] 吕泽卿, 付兴建. 基于改进 Canny 算法的绝缘子裂缝识别[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(6): 25-30.
- [7] 刘丽霞, 李宝文, 王阳萍, 等. 改进 Canny 边缘检测的遥感影像分割[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 54-58, 180.
- [8] CHUTATAPE O, GUO L. A modified Hough transform for line detection and its performance[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(2): 181-192.
- [9] 唐震, 彭业萍, 王伟江, 等. 融合 Hough 直线检测和 Grab-cut 的风机叶片自适应分割方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 161-168.
- [10] 吕侃微, 张大兴. 基于改进 Hough 变换耦合密度空间聚类的车道线检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 172-180.
- [11] 刁燕, 吴晨柯, 罗华, 等. 基于改进的概率 Hough 变换的直线检测优化算法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 170-178.
- [12] 张秀夫. 显微三维重构系统的标定技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] 崔兆春. CMOS 图像传感器读出电路的噪声分析及设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [14] 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.
- [15] 罗胜, 赵丽, 王慕抽. 基于道路特征信息的车道结构化解析[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(9): 1643-1649.
- [16] 李建荣. 基于高速成像技术的弹目交会姿态测量方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

作者简介

骆爱炜, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与视觉检测技术。

E-mail: 947929136@qq.com

张永建, 博士研究生, 主要研究方向为测试技术、传感器技术和信号处理。

E-mail: 649144600@qq.com

王正国, 工程师, 主要研究方向为测试技术、传感器技术和信号处理。

E-mail: 80868731@qq.com

狄长安, 博士, 教授, 兵器发射技术博士后, 主要研究方向为动态测试及计量技术、无损检测技术等。

E-mail: dichangan@njust.edu.cn