

中文引用格式:陆鹏,王占宝,余枚姣,等.改进型Harris角点算法的边坡滑动智能监控[J].中国安全科学学报,2024,34(增刊1):165-171.

英文引用格式:LU Peng, WANG Zhanbao, YU Meijiao, et al. Intelligent monitoring of slope sliding with improved Harris corner point algorithm[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1):165-171.

## 改进型 Harris 角点算法的边坡滑动智能监控\*

陆鹏<sup>1</sup>工程师,王占宝<sup>2</sup>工程师,余枚姣<sup>3</sup>讲师,张仁永<sup>3</sup>副教授,吴燕清<sup>1</sup>教授  
(1 重庆大学资源与安全学院,重庆 400044; 2 国家能源投资集团有限公司安全环保监察部,北京 100011; 3 重庆工程学院电子信息学院,重庆 400056)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0028

资助项目:重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202101910)。

**【摘要】**为减少边坡滑坡及其引发的地质灾害对财产安全的严重威胁,基于改进的Harris角点检测技术的匹配算法,提出一种新型边坡滑动监测方法。首先,通过优化Harris角点检测构建预测边坡滑动位移的图像处理模型;然后,基于校准的模板,监测角点位置的变化,从而精确估计滑动位移并追踪其轨迹,进而有效监控边坡的移动情况;最后,搭建快速的模块化试验环境,开展边坡滑动情况监测。结果表明:该方法降低了边坡监测识别中的伪角点生成,提高了角点检测的准确性和效率,能有效记录目标物体在水平、垂直和倾斜方向上的微小滑动,形成滑动轨迹追踪结果。

**【关键词】**角点检测; 边坡滑动监测; 特征点; 图像处理; 滑动轨迹

### Intelligent monitoring of slope sliding with improved Harris corner point algorithm

LU Peng<sup>1</sup>, WANG Zhanbao<sup>2</sup>, YU Meijiao<sup>3</sup>, ZHANG Renyong<sup>3</sup>, WU Yanqing<sup>1</sup>

(1 School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2 Safety and Environmental Protection Supervision Department, CHN Energy Investment Group,

Beijing 100011, China; 3 School of Electronic Information, Chongqing Institute of Engineering,

Chongqing 400056, China)

**Abstract:** In order to reduce the serious threat of slope sliding and the geologic disasters they cause to property safety, a novel slope sliding monitoring method was proposed by using a matching algorithm based on the improved Harris corner point detection technique. First, an image processing model for predicting slope sliding displacement was constructed by optimizing the Harris corner point detection; then, based on the calibrated template, the changes in the location of the corner points were monitored to accurately estimate the sliding displacement and track its trajectory, so as to effectively monitor the movement of the slope; finally, a modularized test environment was constructed to monitor slope sliding conditions. The results show that the method reduces the generation of pseudo-corner points in slope monitoring and identification, improves the accuracy and efficiency of corner point detection, and effectively records the tiny sliding of the target in the horizontal, vertical, and inclined directions to form trajectory tracking results.

**Keywords:** corner detection; slope sliding monitoring; feature points; image processing; sliding trajectory

# 0 引言

我国的自然环境复杂,地质动态活跃,特别是在偏远和人迹罕至的区域,常常面临诸如泥石流、山体滑坡等自然灾害的威胁,导致财产损失严重<sup>[1-3]</sup>。因此,开展边坡滑动监控技术研究具有重要意义。

面对由边坡滑动造成的灾害,众多国内外研究者深入探讨了监测技术。宋修广等<sup>[4]</sup>提出了一种依赖人工选择监测目标和测点的路堑高边坡动态方法,但该方法受到环境和测量人员技能的限制。李增林等<sup>[5]</sup>通过全球定位系统(Global Positioning System, GPS)技术监测边坡位移,成功预测了滑坡风险。闫国斌等<sup>[6]</sup>使用地质边坡雷达图像分析边坡风险,虽准确但成本高昂限制了其应用范围。OHNISHI等<sup>[7]</sup>展示了使用数字图像处理进行边坡测量的有效性。袁成海等<sup>[8]</sup>通过图像处理技术,开发了边坡变形监测系统,但亚像素圆心检测法存在一些误差。上述研究表明:一方面使用人工、GPS或者雷达等非图像处理方法,维护成本过高,无法大面积部署,另一方面,使用图像处理方法缺少高精度、低复杂度的边坡滑动图像尤其是角点检测的运算方法。

鉴于此,笔者拟通过改进边坡滑动图像特征检测技术中的 Harris 角点检测算法,结合 3 种不同算子的优势,按照图像分割的方法和边界阈值的对比,开发了一种基于融合模板的改进 Harris 角点检测算法,以期提升边坡滑动监测系统的预警识别精度和安全性。

## 1 边坡滑动图像特征点检测分类

在当前的图像处理研究中,基于图像的局部特征如角点、边缘进行的检测与匹配方法尤为重要,因其局部特征具备唯一性、稳定性和可重复性等优点。其中,点特征<sup>[9]</sup>,包括角点、圆点和边缘点等,由于其在二维空间中的灰度信息存在显著差异而受到重视。特征点的准确识别对于图像匹配的精确度起着决定性作用,特别是角点作为图像中的重要局部特征,因其突出和稳定的特性而成为研究焦点。

### 1.1 Harris 角点检测算法

Harris 角点检测通过设置一个预定义的矩形窗口,在图像中沿各个方向轻微移动,并依据窗口内部图像灰度变化来识别角点<sup>[10-11]</sup>。Harris 角点检测如图 1 所示,如当窗口在平滑区域移动时,内部灰度保持不变或仅轻微变化;窗口沿边缘移动时,灰度变化

不明显;但是,如果区域内存在明显变化的边缘角点,那么无论这些角点沿着任何探测方向移动,其对应像素的灰度值都会由于计算窗口的影响而发生明显的变化。

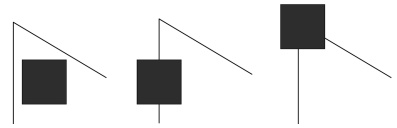


图 1 Harris 角点检测

Fig.1 Harris corner point detection

Harris 角点检测方法的核心计算相对直接且效率高,具备较低的复杂度和良好的实时性能。该算法主要依赖一阶导数进行计算,使得其识别的角点对灰度波动和噪声的敏感度较低,并且在面对光照变化时显示出一定程度的稳健性。

### 1.2 SUSAN 角点检测算法

SUSAN 角点检测采用一个近圆形模板,将模板中心点设为核心点<sup>[12]</sup>,根据模板覆盖区域内像素与核心点灰度差异寻找角点,如图 2 所示。核心点周围根据灰度相似度分为 2 个区域:一个是灰度值与核心点相近的统一值段同化区(Univalve Segment Assimilating Nucleus, USAN)区域;另一个是灰度值有显著差异的区域。当该算子模板在整个像素区域内移动时,使用 SUSAN 算子计算得到的面积会随之改变。核心像素位于一个均匀平滑的区域时,由 SUSAN 算子计算出的面积较大,如图 3a、图 3b 所示;当核心像素位于图像中灰度变化显著的边缘时,计算得到的面积会减少到模板面积的大约 1/2,如图 3c 所示;而当核心像素处于角点时,SUSAN 算子计算的面积会进一步减少,只有模板面积的 1/4,如图 3d 所示。因此,SUSAN 算子计算得到的面积与核心像素点是否为角点的可能性成反比。

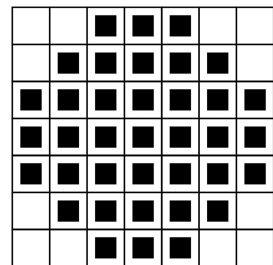


图 2 SUSAN 算法的算子像素点位置

Fig.2 Position of operator pixel points for SUSAN algorithm

SUSAN 角点检测方法,避免了对图像的导数计算,通过积分的方式确定 USAN 区域的大小,加快了

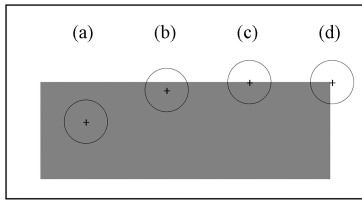


图 3 SUSAN 算子圆形模板

Fig.3 Circular template of SUSAN operator

角点检测的计算速度,并降低了噪声的影响。

### 1.3 FAST 角点检测算法

通过定义一个像素点及其周边足够数量的不同区域像素为 FAST 角点<sup>[13]</sup>,利用统计方法判断目标像素点周围的不相似像素数量来识别角点。算子圆形模板如图 4 所示。

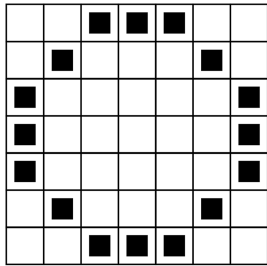


图 4 FAST 角点检测模板

Fig.4 Detection template of FAST corner points

FAST 角点检测算法的主要优势是速度快,能检测出更多的角点。然而,FAST 角点算法产生的特征点缺乏方向和尺度信息,使其对图像的旋转和缩放变换变的敏感,且对噪声的敏感度更高,容易产生误判角点,因此,需后续处理以提高角点的检测精度。

在使用 OpenCV 实施的 3 种角点检测算法,对同一组边坡图像的处理结果展示如图 5 所示。这 3 种算法各自采取不同的技术路径以识别图像中的角点,展现了各自算法在实际应用中的特性和效能差异。

通过计算,获得了文中提到的 3 种角点检测算子的性能数据见表 1。

表 1 3 种算子角点检测数据

Table 1 Detection data of three types of operator corner points

算子名称		Harris	SUSAN	FAST
性能数据	运行时间/s	0.041	1.389	0.015
	发现角点个数	2 088	11 262	3 712

Harris 算法依赖于图像灰度变化的局部自相关性,该算法需要通过计算图像窗口内像素点的灰度

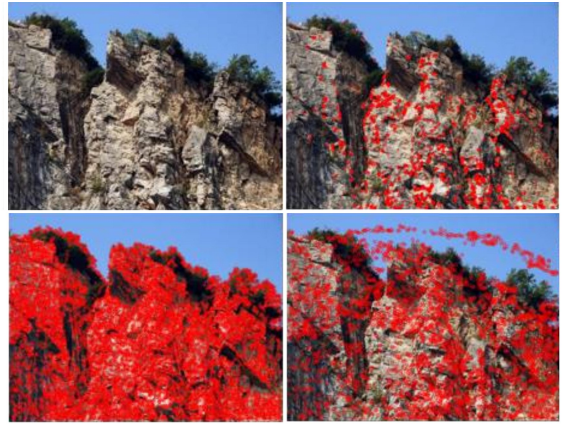


图 5 3 种算子角点检测结果

Fig.5 Detection results of three types of operator corner points

变化程度来识别角点,适用于需要高度精确角点位置的场景。SUSAN 算法通过非线性的局部亮度比较来确定角点,避免了复杂的数学运算,因此,对噪声具有较好的抵抗力。FAST 算法则通过直接在像素邻域内进行灰度比较来快速识别角点,尽管速度快,但可能会检测到更多非角点,需后处理以筛选真正的角点。

## 2 改进型 Harris 角点检测算法

为解决传统的 Harris 角点检测算法在运算处理过程中出现的计算量大、易产生伪角点的问题,一种改进的方法是引入融合模板初步筛选非角点。这个步骤通过滤除绝大部分非角点,从而有效降低后续检测中伪角点的生成。在筛选过程完成之后,对挑选出的候选角点采用 Harris 算子进行响应计算。特别是在处理不同场景下图片像素的关系时,文中取消了固定阈值的设置,转而引入了一种自适应阈值方法。该方法能根据图像的特定条件自动调整阈值,从而更准确地识别角点。

### 2.1 算法改进

优化伪角点出现的方法是将判决阈值设定为角点响应函数计算面积最大值的  $q$  倍来实现,其中,  $q$  作为品质因子,根据经验  $q$  取  $[0.007, 0.017]$  以排除掉那些在最大响应  $q$  倍以下的伪角点,提高角点检测的灵活性和适用性。为应对使用单一阈值导致的角点分布不均的问题,对采集的照片采用图像分块的策略,即将图像分为 9 个区域,每个分块通过独立的阈值  $q$  来运算判决,图像分块如图 6 所示,有效避免了角点过于集中的问题。

采取非极大值抑制的策略,即在每个候选角点



图6 图像分块

Fig.6 Image blocks

的邻域内,只保留响应值最大的角点作为该区域的代表,从而确定最终的角点集合。具体方法是先计算候选像素点的响应值,再记录响应值最大的角点。文中采用的改进后融合算子模板如图7所示。

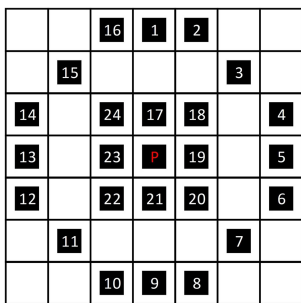


图7 改进后融合算子

Fig.7 Improved fusion operator

基于 FAST 角点检测算法的原理,可有效地初步筛选非角点。该方法的核心是评估给定像素点  $P$  及其特定周围位置上的像素与  $P$  的相似性。具体操作为:首先,检查像素 1 和像素 9 的点与目标像素点  $P$  之间的灰度值差异,该差值需取绝对值;然后,评估该差值是否低于融合算法设定的相似性阈值,即判断这些位置的像素是否与目标像素足够相似,从而决定是否将它们与目标像素点  $P$  合并。如果这 2 个像素点与目标像素  $P$  的灰度值存在显著差异,就进一步考察像素 5 和像素 13 是否与  $P$  存在差异。

如果在像素 1、9、5、13,这 4 个特定位置上的像素中至少有 2.5 个与目标像素  $P$  不相似,则初步认为  $P$  点是一个符合融合算法处理得到的角点,值得更进一步判断;反之,如果不满足这个条件,则  $P$  点被认为是非角点,可被直接排除。这样的筛选策略旨在减少对后续处理阶段的计算需求,通过简化的初步判断快速减少潜在的角点候选数量,提高角点检测的效率<sup>[14]</sup>。然后,对目标像素  $P(x,y)$  处的

17~24 像素所在区域的等边长邻域范围进行融合算法处理,得到的像素点个数  $n(x,y)$ ,  $n(x,y)$  计算式如下:

$$n(x,y) = \sum_{i,j} K(x+i,y+j) \quad (1)$$

其中,

$$K(x+i,y+j) = \begin{cases} 1, & |I_p - I_k| \leq t \\ 0, & |I_p - I_k| > t \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $i,j \in \{1,-1\}$ ;  $I_p$  为目标像素灰度值;  $I_k$  为位置  $k \in \{17,18,\dots,24\}$  处的像素灰度值。因此,得到改进 Harris 角点检测算法流程如图 8 所示。

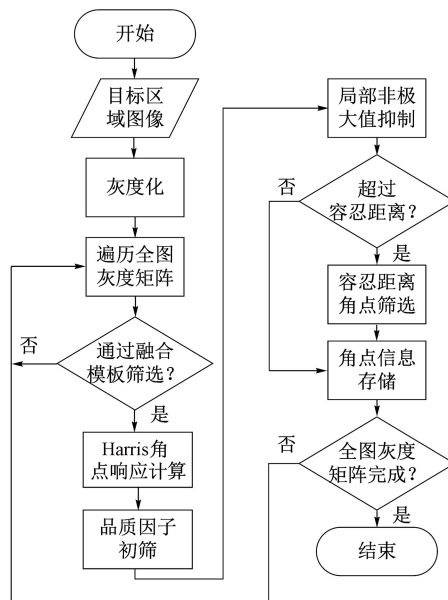


图8 改进的 Harris 算法角点检测计算流程

Fig.8 Corner point detection calculation flow of improved Harris algorithm

计算流程中各步骤的概括和解析如下:

1) 灰度化处理。首先,通过加权平均法将彩色图像转换成灰度图像。这个转换过程利用了人眼对不同颜色灵敏度的差异,通过组合三原色通道的值计算出每个像素的灰度值。计算过程如下:

$$\text{Gray}(i,j) = 0.27 \cdot R(i,j) + 0.57 \cdot G(i,j) + 0.13 \cdot B(i,j) \quad (3)$$

式中:像素点  $(i,j)$  处的灰度值为  $\text{Gray}(i,j)$ ;  $R(i,j)$ 、 $G(i,j)$ 、 $B(i,j)$  分别为像素点  $(i,j)$  处红色、绿色、蓝色的分量亮度值。

2) 非角点排除。遍历灰度图像的每个像素点,应用改进的角点融合计算模板计算响应值,以快速筛选那些明显不是角点的像素。

3) Harris 角点响应计算。基于改进的 Harris 交点检测算法,计算经过初步筛选并记录下来的像素

点的角点响应值,以确定其是否为真正的角点。

4) 图像分块与阈值筛选。将图像分块,并使用基于品质因子的阈值筛选每个分块的角点,以排除响应值较小的点。

5) 局部非极大值抑制。在这一步骤中,抑制筛选后的角点在局部的最小值,以确保每个等边长邻域内只保留 1 个响应值最大的角点。

6) 最小容忍距离判定。设定一个最小容忍距离,并以此距离为半径创建一个检测区域。在此区域内实行最小值抑制操作,以确保角点之间的平均分布密度,从而优化角点的布局。

7) 遍历判断与结束。检查是否已遍历所有像素点。如果完成,则结束特征点检测;否则,回到 2) 非角点筛选步骤继续处理。

### 2.2 算法测试

改进后的 Harris 角点检测算法能够更加高效和准确地检测出图像中的特征角点,特别是在复杂的自然环境图像中,通过设定合适的相似像素判断阈值、角点品质因子和最小容忍距离,能够有效地提升角点检测的准确性和实用性。试验结果展示了这种方法在处理自然场景图像时的有效性,显示了改进算法在特征点检测方面的优势。改进的 Harris 角点品质因子为 0.077,角点检测算法设置相似像素判断阈值为 26,最小容忍距离为 17 个像素。试验结果如图 9 所示。



图 9 原方法与改进后的角点检测结果对比  
Fig.9 Comparison of results of original method and improved corner point detection

经过实际应用测试,文中所提改进的边坡角点检测算法的具体表现数据见表 2。

表 2 传统 Harris 和改进 Harris 角点检测数据  
Table 2 Traditional Harris and improved Harris corner detection data

算子名称		传统 Harris	改进 Harris
性能数据	运行时间/s	0.041	0.051
	发现角点个数	2 088	661

由表 2 可知:改进后的 Harris 角点检测算法相

较于原始版本,在确保更短运行时间的同时,能够更快速地识别出更多合格的角点。此外,尽管总体检测时间与传统 Harris 算法持平,改进版通过算法优化,详细对比和记录初筛后的角点,有效剔除了伪角点。这种方法不仅减少了角点的过度聚集现象,还实现了角点的均匀分布,优化了角点检测的整体效果。

这种改进策略的核心在于其优先进行了初步筛选和局部非极大值抑制,以及利用最小容忍距离的概念优化角点的识别和分布。初步筛选快速减少了候选角点的数量,从而降低了计算机对整幅边坡滑动轨迹的计算量,提高了输出角点坐标的处理速度。随后的筛选和非极大值抑制步骤进一步确保了角点的质量和分布的均匀性,有效避免了角点过密集的问题。

### 2.3 集成算法到监控系统

基于改进 Harris 角点检测与匹配的边坡滑动监测算法实现步骤如图 10 所示。

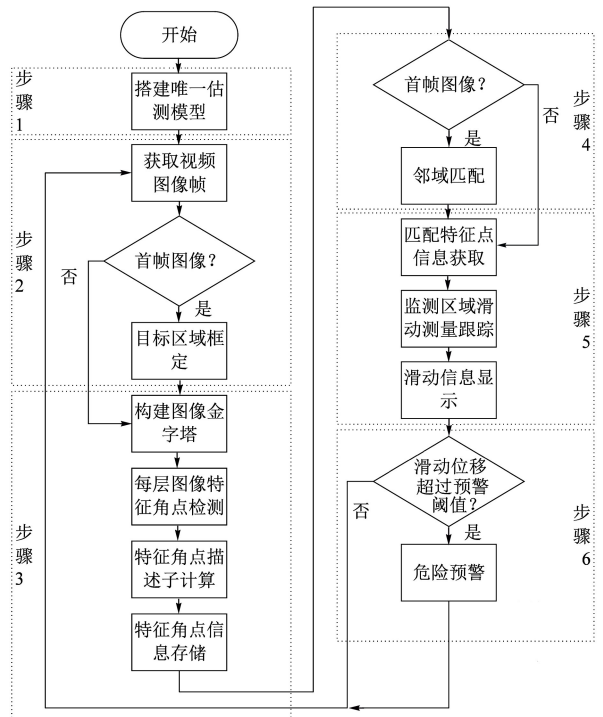


图 10 基于改进 Harris 算法的边坡滑动图像监控算法流程  
Fig.10 Algorithm flow of slope sliding image monitoring based on improved Harris algorithm

步骤 1:建立位移估测模型。创建一个用于估算图像特征点位移量的模型,这是监测滑动轨迹并评估其严重性的基础。

步骤 2:读取视频图像帧数据。读取连续的视频帧,如果是视频的首帧,则框定特定区域,以便集中监测目标区域的滑动。如果不是首帧,则直接进入下一步处理。

步骤3:特征角点检测与描述子计算。在设定的监测区域内检测特征角点,并计算它们的描述子,这些信息将用于后续的特征点匹配。首帧图像处理完毕后,系统继续读取后续帧进行处理。

步骤4:特征角点匹配。匹配当前帧的特征角点与首帧及前一帧图像的特征角点,找出匹配的特征点对。这一步是计算位移和绘制滑动轨迹的关键。

步骤5:位移偏移的计算及滑动轨迹的绘制。通过分析匹配成功的特征点对,计算图像中所有特征点的平均像素位移量及其移动方向。基于预设的标定模板,估算出真实的滑动位移值。为直观展示滑动动态,使用图形绘制工具在连续2帧图像间描绘出滑动轨迹,从而实现滑动过程的可视化。

步骤6:危险预警与更新。根据计算出的滑动偏移量,判断是否超过预设的安全阈值。如果超出阈值,则发出危险预警并更新预警阈值;如果没有,则继续监测。

### 3 系统验证

为构建一个快速的模块化边坡滑动监测系统,该系统被划分为3个硬件部分:数据显示单元、算法处理单元以及图像采集单元。全部采用便携式设计,这种设计旨在任何场景下快速搭建对边坡稳定性的监控与即时预警。系统总体结构如图11所示。



图11 系统硬件架构

Fig.11 System hardware architecture

1) 通过摄像头记录了目标物体在水平、垂直和倾斜3个不同方向上的微小滑动,具体地:

在水平滑动试验中,选取了第70、125、185、236帧作为关键分析帧;在垂直滑动试验中,关键分析帧为第68、110、147、188帧;对于倾斜滑动试验,关键分析帧为第101、170、242、308帧。

2) 通过分析首帧与选定帧的图像,使用经过优化的Harris角点检测算法进行特征点的识别和匹

配,以确定物体的位移量。每次滑动试验中,前后帧进行特征角点检测与匹配结果如图12所示,不同时间点的特征点匹配结果展示了物体移动的细节。



图12 前后帧进行特征角点检测与匹配结果

Fig.12 Results of feature corner point detection and matching in front and rear frames

3) 以视频的首帧为背景参考,匹配分析连续帧之间的特征点,从而绘制出物体的运动轨迹如图13所示,为每个滑动试验提供了运动物体在不同时间点的轨迹图。

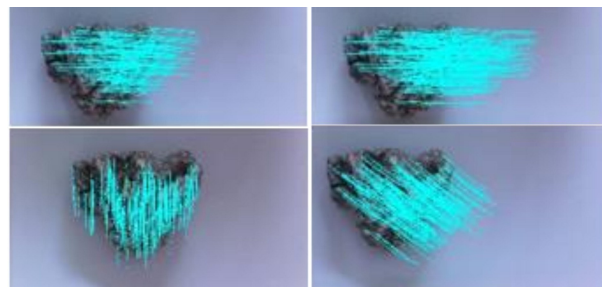


图13 测试模拟边坡物体的移动轨迹

Fig.13 Trajectory testing of simulated objects on slopes

4) 通过测量目标物体在垂直方向与水平方向上的像素位移,并应用位移估算来确定物体的移动距离,进一步分析了实际位移与计算位移之间的误差。相关的试验数据整理见表3和表4。

表3 运动物体水平滑动位移数据

Table 3 Horizontal sliding displacement data of moving objects

测试数据	移动像素个数	估算水平位移/cm	实际水平位移/cm	水平位移误差/cm
数据1	534	7.526	7.5	-0.026
数据2	2	0.028	0	-0.028
数据3	509	6.983	7	0.017

表4 运动物体垂直滑动位移数据

Table 4 Vertical sliding displacement data of moving objects

测试数据	移动像素个数	估算垂直位移/cm	实际垂直位移/cm	垂直位移误差/cm
数据1	10	0.141	0	-0.141
数据2	290	3.982	4	0.018
数据3	248	3.201	3.3	0.099

## 4 结 论

1) 不同角点检测算法在边坡图像处理中表现出各自的优缺点:Harris 算法虽然计算成本较高,但能准确识别关键角点;SUSAN 算法在保持角点识别质量的同时,对噪声有良好的抵抗力;FAST 算法具有高速性能,适合实时处理,但需进一步处理以减少误检。

2) 改进后的 Harris 角点检测算法显著降低了伪角点的生成,提高了角点检测的准确性和效率,且改

进后的算法能够更灵活地适应不同场景下的图像处理需求,有效减少了计算量,准确识别出真实的角点。

3) 试验监测系统通过集成数据显示单元、算法处理单元和图像采集单元,实现了对边坡稳定性的监测。结果表明:系统能够有效记录目标物体在水平、垂直和倾斜方向上的微小滑动,并通过改进的 Harris 角点检测算法识别和匹配特征点,准确计算物体的位移量和轨迹,提供可靠的滑动监测数据和预警信息。

## 参 考 文 献

- [1] 王槐英. 工程地质勘察与地质灾害风险评估的一体化研究[J].冶金与材料,2024,44(4):178-180.  
WANG Huaiying. Integrated research on engineering geological survey and geological hazard risk assessment [J]. Metallurgy and Materials, 2024, 44(4): 178-180.
- [2] 周恒. 实例分析地质灾害边坡稳定性的影响因素及防治措施[J].城市建设理论研究,2024,1(15):133-135.  
ZHOU Heng. Case analysis of factors affecting slope stability in geological hazards and mitigation measures[J]. Urban Construction Theory Research, 2024, 1(15): 133-135.
- [3] 卢志. 地质灾害综合管理与应急响应策略研究[J].中国减灾,2024,1(11):54-55.  
LU Zhi. Research on comprehensive management and emergency response strategies for geological disasters [J]. China Disaster Reduction, 2024, 1(11): 54-55.
- [4] 宋修广,张思峰,李英勇. 路堑高边坡动态监测与分析[J].岩土力学,2005,26(7):1153-1156.  
SONG Xiuguang, ZHANG Sifeng, LI Yingyong. Dynamic monitoring and analysis of high roadside slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1153-1156.
- [5] 李增林,王孝亮,韩猛. GPS 监测技术在露天煤矿边坡监测中的应用[J].露天采矿技术,2016,31(10):52-54.  
LI Zenglin, WANG Xiaoliang, HAN Meng. Application of GPS monitoring technology in slope monitoring of open-pit coal mines [J]. Open-pit Mining Technology, 2016, 31(10): 52-54.
- [6] 闫国斌,陶志刚,孙光林,等. 边坡雷达在矿区边坡监测区域的应用分析[J].工业安全与环保,2015(10):57-60.  
YAN Guobin, TAO Zhigang, SUN Guanglin, et al. Application analysis of slope radar in mine slope monitoring areas [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015(10): 57-60.
- [7] OHNISHI Y, NISHIYAMA S, YANO T, et al. A study of the application of digital photogrammetry to slope monitoring systems [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(5): 756-766.
- [8] 袁成海,桑运龙,杨流家. 基于亚像素圆心检测法的边坡变形监测预警系统[J].公路交通科技,2011,28(12):50-56.  
YUAN Chenghai, SANG Yunlong, YANG Liujia. Slope deformation monitoring and early warning system based on sub-pixel circle center detection method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(12): 50-56.
- [9] 孙向阳. 数字图像特征点的检测及匹配算法研究[D].太原:太原理工大学,2012.  
SUN Xiangyang. Research on detection and matching algorithms of digital image feature points [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [10] 尚硕,曹建荣,汪明,等. 机器视觉中角点检测算法研究[J].计算机测量与控制,2024,32(1):217-225.  
SHANG Shuo, CAO Jianrong, WANG Ming, et al. Research on corner detection algorithms in machine vision [J]. Computer Measurement and Control, 2024, 32(1): 217-225.
- [11] 相阳. 基于点特征的图像配准技术研究[D].沈阳:东北大学,2010.  
XIANG Yang. Research on image registration technology based on point features [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [12] 林鹏岳,李玲玲,李翠华. 一种改进的快速 SUSAN 角点检测算法[J].计算机与现代化,2010,1(2):66-68.  
LIN Pengyue, LI Lingling, LI Cuihua. An improved fast SUSAN corner detection algorithm [J]. Computer and Modernization, 2010, 1(2): 66-68.
- [13] 丁尤蓉,王敬东,邱玉娇,等. 基于自适应阈值的 FAST 特征点提取算法[J].指挥控制与仿真,2013,35(2):47-53.  
DING Yourong, WANG Jingdong, QIU Yujiao, et al. FAST feature point extraction algorithm based on adaptive threshold [J]. Command and Control & Simulation, 2013, 35(2): 47-53.
- [14] 王巍,唐一平,任娟莉,等. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J].光学精密工程,2008,16(10):1995-2001.  
WANG Wei, TANG Yiping, REN Juanli, et al. An improved harris corner extraction algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 1995-2001.

作者简介: 陆鹏 (1987—),男,四川武胜人,博士研究生,工程师,主要研究方向为物探相关数据采集、虚拟仪器技术、图像处理等。E-mail:552437915@qq.com。

