

高边坡塌滑应急抢险空地一体化无人协同技术研究进展

赵飞飞¹ 赫子皓¹ 李世成² 杨福星¹ 庄会瑞² 段 涛²

1. 深圳先河水利水电工程有限公司 广东 深圳 518000

2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003

摘 要:我国地形地貌多样、地质条件复杂,滑坡地质灾害广泛发育、危害严重。其中,高边坡塌滑的应急抢险工作存在处置时效紧迫、安全风险突出、作业环境受限的难点。传统的抢险作业采用的近距离人工和机械作业模式,已不能满足高边坡应急抢险对快速处置和施工安全的要求。无人化技术具有可以避免人与危险区域的直接接触,为高边坡应急抢险提供了新的方向。本文通过探究无人装备在高边坡塌滑应急抢险中的研究与应用现状,揭示传统抢险模式的局限,梳理当前主流无人抢险技术,并论述空地协同技术的优势和进展,为地质灾害无人化应急抢险技术体系构建与工程推广提供理论参考和实践依据。

关键词:高边坡塌滑; 应急抢险; 无人装备; 空地协同; 无人化技术

引言

我国地形地质条件复杂,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害类型多、分布广、突发性强,受自然因素与工程建设等人为活动叠加影响,边坡失稳塌滑频发,对重大工程运行与区域公共安全构成严重威胁^[1]。高边坡塌滑应急抢险时效性强、现场风险高、作业环境受限;灾害发生后边坡岩体多处于持续变形或局部失稳状态,次生风险易快速加剧,现场基础设施损毁严重,传统勘察设备与大型施工机械难以安全进入核心区域,灾情识别、风险判定、施工组织与过程反馈的效率直接决定应急处置最终效果。

当前边坡应急处置仍依赖人工踏勘、点式测量与有人驾驶机械施工。全站仪、GNSS 结合人工踏勘仅能满足常规工况局部高精度测量需求,难以快速采集塌滑体整体形态、裂缝、危石及土石方量等灾后关键数据,且勘察与作业人员需近距离接触不稳定边坡,直接面临二次塌滑与滚石冲击的安全风险。有人驾驶施工机械虽技术成熟可靠,但存在人员高危环境暴露、夜间作业能力不足、作业视线受限及多机协同效率偏低等问题,传统抢险模式难以满足重大地质灾害快速、安全、连续处置的要求。

无人化施工技术凭借人机分离、远程操控、智能感知、协同作业的核心特性,为上述问题提供了新的解决方向。通过无人机快速现场感知与三维重建、无人地面装备远程/自主作业及多系统协同调度,可将作业人员转移至安全指挥端开展工作。目前无人机三维重建技术已广泛应用于滑坡调查、监测与灾后评估,具备分辨率高、机动性强、可抵达危险区域的优势;无人土方作

业装备、自动挖掘系统与车队协同管理技术也在土方、矿山等高危施工场景逐步发展成熟。但现有研究仍存在系统化不足:无人机遥感研究多聚焦灾害识别、三维建模与变形监测,成果向实际施工参数转化的相关研究较少;无人施工装备研究多集中于单机控制、远程操控或自主挖掘,复杂塌滑体条件下的风险感知、任务调度及空地协同闭环作业研究仍不充分。

本文针对高边坡塌滑应急抢险场景的无人化技术展开探讨,系统总结快速勘察、无人施工装备、空地协同作业、闭环管控等关键技术的发展现状,深入分析其工程应用瓶颈并提出研究展望,以期推动地质灾害应急处置向无人化、智能化方向发展。

1 传统滑坡监测与抢险的局限性

传统的应急调查主要为人工踏勘、全站仪和 GNSS 的方式已不满足现在高边坡塌滑场景的应用。传统的应急调查方式满足长期监测与局部高精度测量,但点式测量覆盖有限、数据离散,难以支撑边界判定与方量估算。在高边坡塌滑中,传统的人工踏勘安全风险高,且成果转化与施工无实时的数据链路,无法满足应急响应需求。传统的施工端采用“人机同舱”的作业模式,主要是操作人员身处作业现场,直接面临着危石和边坡滑移等风险。由于高边坡塌滑面临着风险高和工况动态变化快的特点,因此需要人机分离的方式来避免人员受到危险。在传统施工现场中,多机协同作业仍需要依靠人工现场调度,容易出现工序衔接脱节的问题,整体处置效率难以保障^[1]。

2 滑坡应急处置的空地无人化技术体系

2.1 无人机遥感技术滑坡应急监测体系

在滑坡应急调查中，无人机遥感可快速抵达现场获取高清影像，且无需人员进入危险场区，是高效的数据获取方式。多旋翼无人机适合开展小区域精细化调查，固定翼与混合翼无人机则可满足大范围灾害普查的需求。

无人机可搭载可见光相机、倾斜摄影系统或 LiDAR 传感器，滑塌地区进行快速采集影像与点云数据。获得的滑塌地区的相关数据通过 SfM-MVS 等技术流程处理后可以重建出滑坡的整体形态与空间结构。无人机遥感监测技术和传统的点式调查方式相比，它可以深入危险区域作业，获取的空间信息也更丰富，目前已经广泛应用在滑坡调查、监测与评估工作中^[2]。

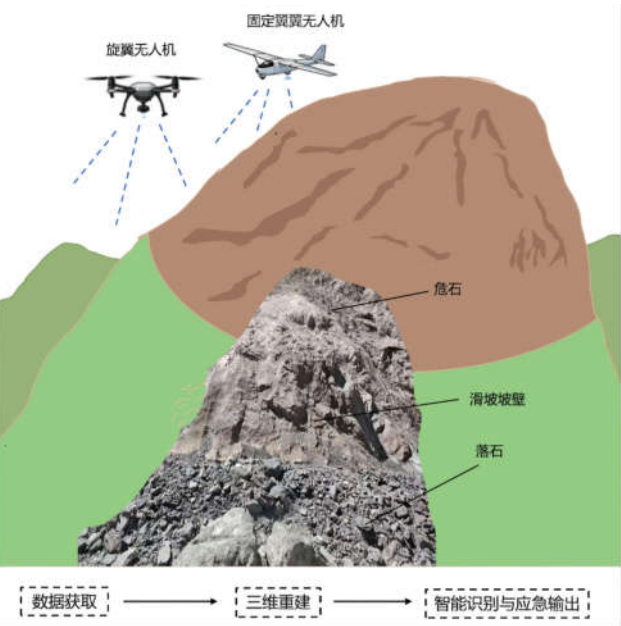


图 1 无人机三维重建机制图

倾斜摄影搭配 SfM-MVS 可以将现场的滑塌纹理细节原度并且能快速生成正射影像与实景模型。现场可借助生成的模型识别边坡裂缝、滑坡边界等地表变形，并且各类边坡场景基本都适用^[4]。遇到现场植被覆盖或者峡谷遮盖等场景，通过无人机机载 LiDAR 采集高密度点云，可以有减少弱植被遮挡的影响，还原坡面形态、定位危石和测算堆积体方量。

目前业内重点研究光学影像与 LiDAR 点云的融合方案，两类数据各有优势、互为补充，能有效提升灾害边界划定与土石方计量的结果稳定性，多源数据融合结合 AI 辅助三维重建，也是该领域技术发展的主流方向。

深度学习可实现滑坡灾害要素的自动化提取，相关研究已产出不少成果。有团队搭建的识别体系对裂缝识别精度达 93%，对滑坡、崩塌的识别准确率可达 100%；

也有研究验证了开源卷积神经网络能应用在块体运动识别中；经过改进优化的 Mask R-CNN 模型，滑坡检测召回率 91.4%、准确率 92.6%，识别效果优于传统方法^[3]。

无人机三维重建扩大了应急勘察的覆盖范围，也提升了作业效率，但这项技术在工程实际落地中仍有不少短板。施工现场遇到阴雨大雾、植被遮挡严重等复杂工况下，数据质量容易波动，稳定性不足。重建模型与无人施工设备的控制平台缺少通用对接标准，识别成果还需要人工转换为施工参数。后续仍需进一步优化识别精度、数据传输效率，以及设备协同控制的稳定性。

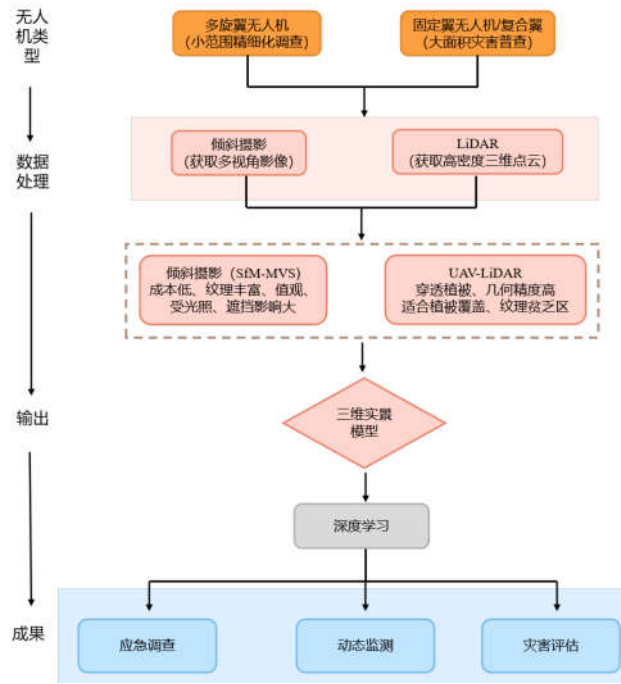


图 2 无人机边坡应急流程图

2.2 无人施工装备的应急抢险技术体系

无人施工装备核心是实现人机物理隔离，将操作人员转移至安全区域开展应急抢险。远程操控技术依托 5G 专网、无线宽带等多链路冗余通信网络，可实时传输视频、设备位姿与控制指令，低时延条件下能支撑挖掘、破碎、装载、转运等作业。

无人装备通过 LiDAR、毫米波雷达、RTK/GNSS 等多传感器融合实现环境感知，可识别塌滑堆积体、危石等风险要素，完成地形建模与作业路径规划；针对边坡修整、危石清理等精细作业，自动引导与轨迹控制技术可提升作业一致性，降低对操作人员经验的依赖。

多机协同是无人化抢险的核心发展方向，区别于单机远程操控。挖掘机、装载机、运输车与无人机可共享位置、任务与风险信息，构建连续作业链条。远程操

作、自主控制、先进感知与车队互操作是降低人员风险、提升作业效率的核心技术路径，空地协同作业也已成为智能施工的重要发展方向。

2.3 空地一体化协同抢险作业技术体系

空地一体化协同作业是高边坡塌滑应急抢险的重要发展方向，可实现全过程无人化作业；系统融合空中感知、智能数据分析与地面施工执行三大环节，能根据现场工况动态优化施工方案。

无人机承担现场快速勘测与动态监测，采集的数据上传至云端或边缘计算平台处理^[3]。地面无人装备执行危石清理、塌滑体开挖、通道疏通及土石方转运等实操，监测与施工数据全程实时回传，支撑方案动态调整。边缘计算可快速解析无人机影像与点云数据，重建现场三维模型与正射影像，输出坡面裂缝分布、危石识别及工程量估算结果^[4]。成果经统一坐标转换与安全审核后，可转化为开挖边界、分层厚度、作业路径、危险禁区等标准化参数，直接作为地面无人装备的可执行作业指令。

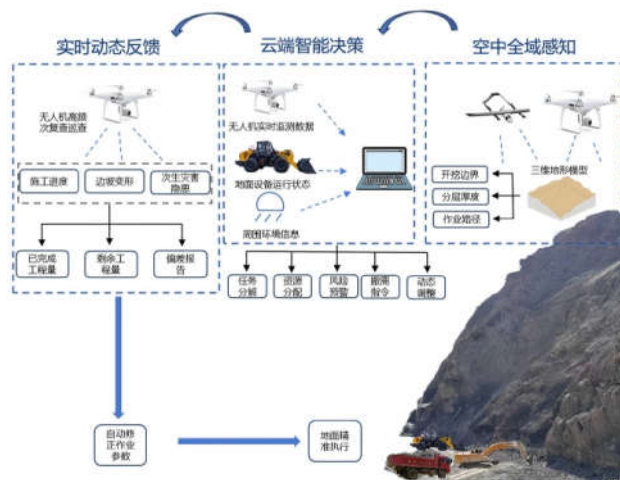


图3 空地一体化协同抢险作业技术体系机制图

数字孪生平台可汇总无人机监测、设备运行、道路通行、地形及气象等多元现场信息，生成动态抢险场景，实现工况实时可视化管控。任务拆解与设备匹配需结合塌滑体范围、危石位置、通道条件及装备性能综合确定；针对边坡变形加剧、裂缝扩张、滚石风险上升等动态险情，无人机系统可自动预警，协同平台随即暂停作业、调度装备撤离，并结合最新风险重规划任务方案，保障抢险作业安全规范^[5]。

施工闭环管控环节，无人机高频巡航跟进施工进度，同步监测边坡变形与次生隐患；系统通过多时相三维模型对比，统计工程量、排查超欠挖，将关键工序的

实时模型与设计模型比对获取施工偏差，反馈至装备端调整作业参数，最终形成空中感知、智能决策、地面执行、动态反馈的完整作业闭环。

3 空地一体化协同抢险作业现存技术短板

空地一体化无人协同作业虽在滑坡应急抢险中优势突出，但落地应用仍难以满足现场实际需求。一是复杂环境下感知稳定性不足，暴雨、大雾、扬尘、光照不足及山体遮挡会劣化无人机成像、造成 LiDAR 点云残缺，高植被覆盖还会降低三维重建精度与灾害识别准确率。二是设备兼容性与标准体系缺失，接口规范不统一导致多装备协同困难，通用数据模型标准缺位使得三维重建成果无法直接转化为无人装备控制参数。三是系统智能决策能力不足，多依赖预设程序或人工调度，面对新生裂缝、局部塌滑、道路中断、设备故障等突发状况无法自主重规划作业方案，应急响应能力有限^[4]。

4 结语

高边坡塌滑突发性强、破坏力大、次生风险复杂，传统应急处置模式短板突出，难以满足重大地质灾害处置需求。研究表明：

(1) 以倾斜摄影、SfM-MVS、机载 LiDAR 及深度学习识别为核心的无人机遥感体系，可快速完成三维建模、边界圈定、危石解译与土石方量估算，提升应急处置效能。

(2) 无人施工装备依托远程操控、多传感器融合感知与多机协同，已初步实现人机物理隔离。

(3) 空地一体化协同体系串联空中感知、智能决策与地面执行，形成“感知-建模-调度-施工-反馈”动态闭环，具备施工参数转化、风险预警与工序优化的技术雏形。

参考文献

- [1] 唐辉明, 葛云峰, 张抒, 等. 滑坡预测预报研究进展与挑战 [J]. 中国科学基金, 2025, 39(6): 993-1005.
- [2] Sestras P, Badea G, Badea A C, et al. A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regards to terrain feature[J]. Engineering Geology, 2025, 346: 107890.
- [3] 黄发明, 杨阳, 蒋水华, 等. 滑坡易发性关键问题综述及其基于半监督非对称理论的解决方案 [J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(12): 3139-3169.
- [4] Chen Y, Liu X, Zhu B, et al. UAV image-based 3D reconstruction technology in landslide disasters: a review[J]. Remote Sensing, 2025, 17: 3117.