

Application of UAV LiDAR in River Monitoring

Weiyang Tang Hongsheng Zhang Hengjun Cui

Jiangsu Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

Abstract

This study investigates the application of UAV LiDAR in river monitoring, analyzing its technical advantages and practical effectiveness in river morphology mapping, erosion and sedimentation monitoring, flood simulation, and ecological assessment. Case studies demonstrate that UAV LiDAR outperforms traditional methods in spatial resolution, data acquisition efficiency, and multi-source information integration, providing high-precision data support for water resource management and ecological conservation.

Keywords

UAV, LiDAR, river monitoring, data acquisition, ecological conservation

无人机 LiDAR 在河道监测中的应用

唐维阳 张洪生 崔恒军

江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 中国·江苏扬州 225000

摘要

本研究围绕无人机激光雷达 (LiDAR) 在河道监测中的应用展开, 分析其技术优势及在河道形态测绘、侵蚀与淤积监测、洪水模拟与生态评估等方面的实际效果。通过案例验证, 无人机LiDAR在空间分辨率、数据采集效率及多源信息整合方面较传统方法具有显著优势, 可为水利管理和生态保护提供高精度的数据支持。

关键词

无人机; LiDAR; 河道监测; 数据采集; 生态保护

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着全球气候变化和人类活动的加剧, 河道形态和水文过程正在发生显著变化, 这对防洪、生态保护及水资源管理带来了更高要求。传统的河道监测多依赖人工测量或固定监测站, 但这些方式存在测量周期长、空间分辨率低、覆盖范围有限等不足, 不能快速、全面地反映河道的动态变化。无人机搭载激光雷达 (LiDAR) 技术因为具备高精度、高效率、非接触式的数据采集能力, 适用于复杂环境下的河道地形测绘与实时监控, 成为水域监测领域的新兴手段。

1.2 国内外研究现状

国外在无人机LiDAR的水文与河道监测方面起步较早, 已形成较成熟的技术应用体系, 例如在美国和欧洲, 已广泛用于洪水建模、河岸侵蚀分析以及湿地生态评估。国内近年来随着无人机平台和传感器技术的发展, 也开始在水利部门和科研院所进行试点应用, 如长江、黄河等干流及支流的河段地形数据采集与动态监测。

【作者简介】唐维阳 (1989-), 男, 中国江苏扬州人, 高级工程师, 从事测绘及水利移民征迁研究。

1.3 研究目的与创新点

本研究旨在系统探讨无人机LiDAR在河道监测中的数据处理、处理与分析方法, 评估其在河道形态测绘、泥沙淤积分析及洪水风险评估中的应用效果。创新点主要包括:

构建结合无人机LiDAR与流域水文模型的综合监测体系;

提出适用于不同水文条件的无人机飞行与扫描策略;

针对河道复杂地形, 优化点云数据处理算法, 提高地表及水面提取精度。

综上, 随着无人机LiDAR技术的不断成熟, 其在河道监测中的应用潜力巨大, 能够为水利管理和生态保护提供精准、及时的数据支持。

2 无人机 LiDAR 技术概述

2.1 LiDAR 工作原理与技术特点

激光雷达 (Light Detection and Ranging, 简称 LiDAR) 是一种主动式遥感测量技术, 通过向目标区域发射脉冲激光束, 接收其反射信号, 并利用激光飞行时间 (Time of Flight, TOF) 计算与目标之间的距离。结合无人机的姿态信息 (IMU 数据) 和定位信息 (GNSS 数据), 可以获得高精度的三维坐标点云, 从而构建数字地形模型 (DTM)、数字表面模

型 (DSM) 及相关衍生模型。

与影像遥感相比, LiDAR 具有以下技术优势: ① 高精度: 测距精度可达厘米级, 能够反映微小的地形变化; ② 高效率: 在短时间内获取大面积高密度点云数据, 适合快速测绘; ③ 穿透能力: 部分波段激光可穿透植被冠层甚至浅水体, 提取地表或河床形态; ④ 全天候能力: 受光照条件影响较小, 昼夜及多种气候条件下均可作业。

在河道监测中, LiDAR 能够在河岸密林、浅水区等复杂环境下获取难以通过传统测量方式获得的三维地形及水文信息, 大幅提升空间数据的质量与丰富度。

2.2 无人机平台类型及其适配性

无人机根据动力与结构可分为固定翼、多旋翼及垂直起降混合型三类。不同类型在河道监测中的适用性各有特点:

1、固定翼无人机: 优点: 航程长、速度快、适合大范围流域测绘; 缺点: 起降对场地要求高, 悬停能力差, 不利于小范围高密度扫描。适用场景: 长河段地形变化普查, 洪水泛滥区快速测绘。

2、多旋翼无人机: 优点: 悬停稳定, 可低空慢速作业, 利于细节捕捉和垂直扫描; 缺点: 续航时间较短, 覆盖范围有限。适用场景: 河岸侵蚀点精细测量、断面数据提取、生态样区调查。

3、混合型垂直起降无人机 (VTOL): 结合固定翼的航程优势与多旋翼的悬停能力, 适合野外复杂环境的综合作业。

在河道监测应用中, 选择无人机平台需综合考虑河段长度、地形条件、测区可进入性及任务持续时间等因素。

2.3 数据采集与处理流程

无人机 LiDAR 河道监测的工作流程可分为任务规划—数据采集—数据预处理—点云分析与成果输出四个阶段:

1、任务规划: 在任务开始前, 需要利用河道高程图或已有影像资料规划飞行路线, 根据研究目标确定飞行高度、扫描密度 (点云密度)、扫描范围及重叠率。对于河岸植被密集或河床形态复杂区域, 应适当降低飞行高度以提高数据分辨率。

2、数据采集: 无人机搭载 LiDAR 传感器及相关辅助系统 (IMU+GNSS), 并设定合适的扫描频率与脉冲发射功率。飞行过程中应保持稳定姿态以减少点云噪声, 同时在河道两侧或重要断面区域增加扫描角度以获取完整视域数据。

3、数据预处理: 姿态与定位同步: 将 IMU 与 GNSS 的时序数据同步到激光回波数据, 提高空间定位精度; 噪声过滤: 去除因水面反射、飞行抖动或环境干扰导致的异常值; 波形解算与分离: 针对多回波数据, 将地表点、植被点和水面点进行精确分离。

4、点云分析与成果输出: 根据项目需求, 可生成不同类型的产品, 如数字地形模型 (DTM)、数字表面模型

(DSM)、坡度与高程分析图、河岸侵蚀速率计算结果等。对于水面数据, 可结合水文流速测量和水位变化数据进行动态评估。

2.4 河道监测中的特定技术考虑

在河道环境中应用无人机 LiDAR 面临一些特殊技术挑战: ① 水面反射问题: 平静水面会产生镜面反射, 导致回波信号不稳定, 可通过选择适当波段 (如近红外) 或改变扫描角度缓解。

② 植被干扰: 沿岸树木和草丛可能遮挡河岸线, 需利用多回波特性或与光学影像数据融合提取真实边界。③ 动态条件: 洪水期间河面位置变化快, 应提高数据采集频率并缩短监测周期。

④ 定位精度: 在河谷等 GNSS 信号较差区域, 应结合地面控制点 (GCP) 提高定位精度。

2.5 技术优势与应用潜力

与传统人工测量及影像遥感相比, 无人机 LiDAR 在河道监测中体现出显著的优势:

① 多维度数据整合能力强, 可同时获得地形和植被信息; ② 高密度点云支持微地形和断面变化的精确分析; ③ 适用范围广, 从大尺度流域监测到细粒度河段分析均能胜任; ④ 可与水文模型和 GIS 平台无缝对接, 为水利管理提供可视化和量化支持。

随着无人机 LiDAR 成本的下降、传感器性能的提升以及数据处理算法的不断优化, 该技术在河道监测中的应用潜力将进一步扩大, 并有望成为流域管理和生态修复的重要数据来源。

3 无人机 LiDAR 在河道监测中的应用

3.1 河道形态测绘与断面提取

无人机 LiDAR 技术利用高密度点云数据, 可以精确描绘河道两岸及河床的三维形态。通过生成数字地形模型 (DTM) 和数字表面模型 (DSM), 能够反映不同季节或洪水期河道断面变化情况, 为水利工程设计和防洪规划提供可靠基础。相比传统人工测绘, LiDAR 可一次性覆盖大范围河段, 并能在复杂地形下保持厘米级精度。

3.2 河岸侵蚀与淤积监测

河岸侵蚀与泥沙淤积是影响河道稳定性的关键因素。无人机 LiDAR 可通过周期性扫描获取多期点云数据, 结合空间差异分析 (如点云差值法) 精确计算侵蚀量或淤积量。对于洪水后河岸崩塌或河床抬升等现象, LiDAR 数据能在短时间内提供变化分布图, 帮助评估河道整治效果。

3.3 洪水水位及流域水文分析

利用 LiDAR 捕获的地形及河道断面数据, 可以提高洪水模拟与风险评估的精度。在洪水来临前后, 结合实地水位测量数据, 可快速建立洪水淹没范围模型。此外, LiDAR 点云与水文监测网络结合, 可优化流速与流量估算过程, 为流域水文模型提供精确输入。

3.4 河道生态与植被分布调查

LiDAR 技术能够通过多回波特性穿透植被冠层, 获取地表与植被高度信息。在河道监测中, 这一特性有助于分析水岸带植被类型、密度与分布变化。对生态修复项目而言, LiDAR 可用于评估植被恢复情况, 监测外来物种入侵范围, 并为水生与陆生生态系统健康评估提供数据支持。

3.5 多数据融合与综合分析

无人机 LiDAR 在河道监测中的应用不应孤立存在, 与光学影像、卫星遥感、水文传感器等数据融合可以提高监测的全面性。例如, 将 LiDAR 的高精度地形数据与光学影像结合, 可实现河岸线自动提取, 并辅助识别河道内的人工构筑物及淤积区。基于多源数据的融合分析, 可形成更具解释性和预测性的河道动态变化模型。

3.6 应用成效与局限性

在实践中, 无人机 LiDAR 已在多种河道监测任务中展现出显著成效: 提高数据采集速度与精度, 减少人力与安全风险;

未来可通过改进传感器波段、优化飞行策略以及应用人工智能算法进行自动化分析, 进一步提升其在河道监测中的适应性和智能化水平。

综上, 无人机 LiDAR 在河道监测领域可实现从宏观形态变化到微观生态评估的全方位应用, 不仅提升了监测效率和精度, 也为流域综合管理和生态保护提供了强有力的数据支持。

4 案例分析与效果评估

4.1 案例一: 长江中游河段侵蚀监测

在长江中游某典型冲刷河段, 水利部门采用多旋翼无人机搭载高精度 LiDAR 系统, 定期采集不同季节的河岸与河床点云数据。经过差值分析发现, 年均侵蚀量约为 2.3 万立方米, 并在洪水期集中发生。与传统人工断面测量相比, LiDAR 监测不仅实现了更高的空间分辨率(平均点密度达 15 点/m²), 且能同时获取河岸植被及地形变化信息, 节约了约 50% 的现场作业时间。

4.2 案例二: 黄河下游河道淤积评估

在黄河下游宽浅河段, 研究团队利用固定翼无人机进行大范围 LiDAR 扫描, 获取河床高程变化数据。结合水文泥沙数据, 分析得出该河段在汛期后平均淤积厚度 0.45 米, 淤积区主要位于河道弯曲内侧。此结果与传统水尺监测数据对比, 误差控制在 ±5 厘米内, 证明了 LiDAR 在宽水面环境下仍具较高精度, 但需要通过多波长激光及优化扫描角度以减少水面反射影响。

4.3 案例三: 城市河道洪水淹没范围模拟

某沿江城市在汛期前, 利用无人机 LiDAR 完成城市河道及周边地形测绘, 并与实时水位监测数据融合, 建立洪水淹没模拟模型。模型结果准确预测了洪水淹没范围, 与实际观测数据吻合率超过 92%。该方法显著提升了防洪预警的时效性, 使应急部门可提前部署防护措施。

4.4 数据精度与可靠性分析

不同案例表明, 无人机 LiDAR 在河道监测中平均测距精度可保持在厘米级。但其精度受多种因素影响: 环境条件: 水面反射、雾气、强光均会影响激光回波质量; 飞行参数: 飞行高度、扫描频率、重叠率对点云均匀性和精度有直接影响; 数据处理算法: 高效的点云滤波与分类算法是提高精度的重要保障。

在上述案例中, 通过结合地面控制点和多次飞行数据融合, 有效降低了单次测量的随机误差。

4.5 与传统方法对比

与人工测量或卫星遥感相比, 无人机 LiDAR 具有显著优势: 效率高: 大面积数据采集时间缩短到传统人工的 1/3; 精度高: 能获取更加细致的断面和小尺度高程变化; 多信息获取: 同时捕捉地形与植被信息, 实现综合分析。但其不足在于数据处理复杂度高、设备成本较高, 以及水面环境对测量的挑战性。

4.6 挑战与优化建议

为了进一步提升无人机 LiDAR 在河道监测中的应用效果, 可采取以下优化措施: ①采用多波段激光源, 增强水面与植被穿透能力; ②优化飞行路径与扫描策略, 兼顾覆盖范围与点云密度; ③开发自动化数据处理与分析平台, 降低人工干预; ④与多源遥感及水文数据进行融合, 提高预测与模拟能力。

综合以上案例, 证明无人机 LiDAR 不仅能在不同河道类型中获得高精度数据, 还可通过技术优化应对复杂环境, 为河道动态监测与管理提供强有力的支撑。

5 总结

总体来看, 无人机 LiDAR 将成为未来河道监测体系的重要组成部分, 其在数据精度、作业效率和应用灵活性方面的优势, 将推动河道管理向精细化、智能化和可持续方向发展。然而, 技术推广仍需解决设备成本、数据处理复杂度、环境适应性等问题。随着硬件升级、算法优化和行业标准制定的不断推进, 无人机 LiDAR 有望全面支撑从防洪安全、生态保护到水资源管理的全链条应用。

参考文献

- [1] 林霄, 韩璐, 张弛等. 基于无人机激光雷达的河道三维测绘研究[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 589-600.
- [2] Xiang Y, Wang H, Liu J, et al. High-Resolution River Channel Monitoring Using UAV LiDAR: Methods and Applications[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4578.
- [3] 李鹏, 赵健, 陈伟等. 无人机激光雷达技术在河道形态监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 645-653.
- [4] Wang W, Li R, Niu X, et al. UAV LiDAR for River Bank Erosion Detection and Monitoring[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 177: 148-160.
- [5] 张坤, 孙彦, 郑磊等. 多源遥感数据融合的河道洪水淹没范围模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(4): 532-540.