

# 基于无人机倾斜摄影技术的高速公路边坡三维重建

相诗尧, 徐润, 张常勇, 赵杰, 王甲勇

(山东省交通规划设计院有限公司 全寿命周期 BIM 技术应用研发中心, 山东 济南 250031)

**摘要:**为了更加快速、准确地对高速公路边坡进行三维量测,该文将无人机倾斜摄影技术应用与边坡三维重建的研究中。利用多旋翼无人机倾斜摄影测量系统采集边坡数据,经数据整合和三维建模得到边坡的三维实景模型,并通过精度检测验证模型精度。实际应用结果表明:利用该技术获取的三维实景模型具有真实、纹理清晰、精度高等优势,可进一步节省人力和时间消耗,为高速公路边坡三维重建提供了一种新的方法。

**关键词:**高速公路; 边坡; 无人机倾斜摄影; 三维重建; 实景模型

高速公路作为高等级公路,对线形要求高,常常出现高填深挖路段,边坡在整条高速公路中的作用尤为突出。快速、完整、精确地获取边坡的三维空间信息对于边坡扩建改造、稳定性监测、养护管理等方面都具有重要作用。目前,用于边坡三维空间信息数据获取的全站仪、RTK 人工测量方式需要耗费大量的人力和时间成本,同时由于测量点稀疏,无法实现对整个边坡的全覆盖式测量。利用激光雷达测量技术可以获取高速公路边坡完整的点云数据,并且精度较高,但是无法较好地获取边坡的表面纹理信息。在此基础上,该文将无人机倾斜摄影技术应用与高速公路边坡的三维重建中,以实现快速、完整、精确地获取赋有纹理信息的高速公路边坡三维实景模型。

## 1 边坡三维重建方法与技术流程

### 1.1 多旋翼无人机倾斜摄影测量系统

近年来,随着无人机飞控设备、定位技术、制作工艺的改进和发展,使得多旋翼无人机在各行各业中得到了广泛应用,包括水利、矿业、电力等领域。该文所采用的无人机倾斜摄影测量系统由 6 旋翼工业级无人机飞行平台和倾斜摄影 5 镜头相机组成,如图 1 所示。5 镜头相机由 1 个垂向相机和 4 个倾斜相机组成,垂向相机与水平方向的夹角为  $90^\circ$ ,4 个倾斜相机与水平方向的夹角均为  $45^\circ$ ,并且相机镜头均指向中间位置,

通过在无人机飞行平台上安装增稳云台,可以使相机在空中保持姿态稳定。5 镜头相机实现了每个拍照时刻同步拍摄,可同时获取地物多个角度的纹理、方位信息,同时无人机上的定位装置,可以记录拍照瞬间的空间坐标,获取航片的 GPS 数据。采用专业的倾斜摄影 5 镜头相机较单镜头相机在航测效率、照片质量、获取数据兼容性等方面均有较大提高,更加适合专业级的航测项目。

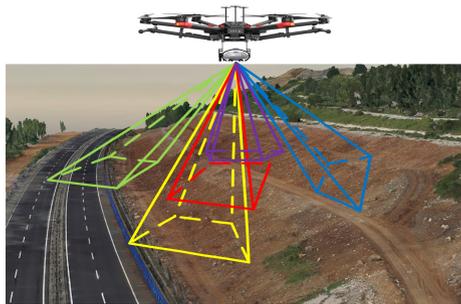


图 1 多旋翼无人机倾斜摄影测量系统

### 1.2 高速公路边坡三维重建技术流程

采用无人机倾斜摄影技术进行高速公路边坡三维重建的技术流程可分为数据采集、数据整合、三维建模和精度检测 4 个环节,如图 2 所示。

数据采集是整个流程中的重要环节,该环节决定了获取的三维实景模型的质量和精度。要进行三维重建的边坡范围并非实际的航测区域,经过多次飞行试验,得出了确定无人机实际航测区域的方法,如图 3 所

收稿日期:2020-02-10(修改稿)

基金项目:齐鲁交通发展集团有限公司 B 类科技计划项目(编号:KJ2017QLJTJT02);山东省交通规划设计院科技创新项目(编号:KJ2018SJY01)

作者简介:相诗尧,男,博士,高级工程师, E-mail:xiangshiyao1989@163.com

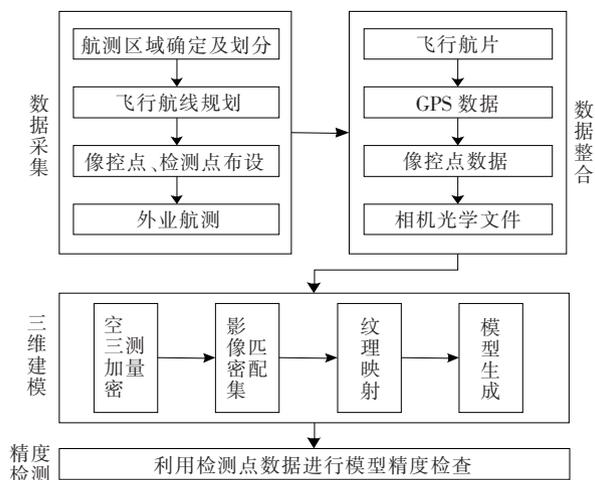


图2 高速公路边坡三维重建技术流程

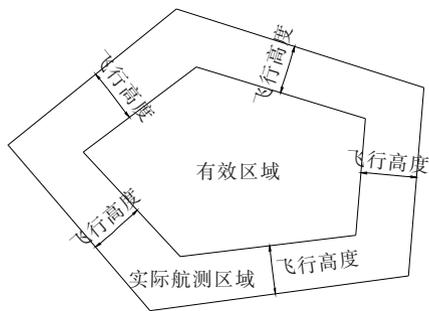


图3 航测区域确定方法

示,由于采用的5镜头相机的倾斜相机与水平方向的夹角为 $45^\circ$ ,在划定航测区域范围时,将需要获得三维实景模型的边坡范围作为有效区域,并以此为边界向四周以飞行高度扩充,将扩充后的区域作为无人机的实际航测区域,这样可以保证有效区域边界处外部的侧面纹理照片的获取。同时,当测区范围较大时,受无人机电池续航时间限制,一组电池无法完成整个测区的航测任务,需要根据测区形状、地势变化、电池续航时间等因素合理划分测区,并完成飞行航线规划,以满足保证数据精度和作业效率的双重要求。

为了使模型获得真实的大地坐标并应用于设计、施工中,需要在整个测区内布设大量的像控点,同时也需要布设检测点以检验三维模型精度,布设时应当选择地势平坦、无树木、电线遮挡的区域。

对获取的飞行航片、GPS数据、像控点数据以及相机光学文件进行数据整合,并作为三维建模的源数据。三维建模需经过空三加密测量、影像密集匹配、纹理映射等关键环节,该流程耗时较长,在空三加密测量中,利用以共线方程为基本数学模型的光束法实现区域网整体平差,并通过影像密集匹配创建立体像对,计

算出每个物方点的三维坐标,以获取边坡三维点云和数字表面模型(DSM),最终通过纹理映射得到具有真实表面和侧面纹理的边坡三维实景模型。

在精度检测环节中,将模型上获取的检测点坐标值与现场实测值进行对比计算,计算模型中误差,以验证所构建的三维实景模型的数据精度。当满足精度要求时,模型可以展开实际应用,当不满足精度要求时,应当分析并查明原因,直到模型满足精度要求时,再展开进一步应用。

### 1.3 无人机倾斜摄影在高速公路边坡三维重建中的优势

利用无人机倾斜摄影手段对高速公路边坡进行三维重建代替了测量人员对野外地形复杂区域的实地测量,提高了作业安全;采用该手段只需两人即可完成外业数据采集及内业数据处理工作,可进一步减少测量人员数量,降低人力成本,通过无人机航测可快速完成对整个边坡的外业航测,降低外业时间成本;利用无人机倾斜摄影手段,将繁重的外业测量工作转换为计算机自动处理,进一步降低测量人员的外业工作强度。

目前,对于高速公路边坡的三维建模主要采用人工测量手段和激光雷达测量手段,利用全站仪、RTK等人工测量方式可获取边坡的三维空间信息数据,但是需要耗费大量的人力和时间成本,同时存在测量点稀疏以及无法对整个边坡实现全覆盖式测量的问题。利用激光雷达测量技术可以获取高速公路边坡完整的点云数据,但是无法较好地获取边坡的纹理信息,不能很好地对边坡进行真实的三维建模。利用无人机倾斜摄影技术,通过高重叠度并完整记录地物表面和侧面纹理的照片,经过空三加密测量、影像密集匹配、纹理映射等关键技术手段可以获得具有真实纹理的高精度公路边坡三维实景模型,并实现对边坡的高密度、全覆盖式测量。

## 2 应用实例

以某高速公路改扩建项目作为实例进行研究,该项目要求对已有道路进行拓宽,由双向四车道变为双向八车道,因此需要对既有道路的高边坡区域开挖重建,在研究中利用无人机倾斜摄影技术对该项目的某处既有边坡进行了三维重建,进行外业数据采集时,该边坡已经完成了清表处理。

### 2.1 数据获取及三维重建

在该项目中,采用文中所述的多旋翼无人机倾斜

摄影测量系统完成项目边坡的外业数据采集,该 5 镜头相机的每个相机均具有 2 400 万像素。根据现场地势环境,将无人机飞行高度设定为 90 m,并由该文所述方法确定出无人机的实际航测区域,经过计算确定整个航测区域面积为 0.15 km<sup>2</sup>,只需飞行一个架次。实际飞行中,将无人机飞行速度设为 8.0 m/s,主航线图像重叠率设为 85%,航线间的图像重叠率设为 75%,共获取 3 350 张航片。整个项目中,共布设像控点 13 个,检测点 13 个。

通过对获取的航片、GPS 数据、像控点数据和相机文件进行联合空三加密测量计算,获得了航片加密点的大地坐标及航片的外方位元素。

通过影像密集匹配,可以计算得到航测区域内每个物方点的三维坐标,进一步获取边坡的三维点云数据和数字表面模型(DSM)。

通过多角度纹理映射使模型获得真实表面和侧面纹理,最终形成高速公路边坡的三维实景模型,并具有真实、纹理清晰的特点,同时,通过该技术手段可达到节约人力、减少时间消耗的目的,边坡的三维实景模型如图 4 所示。

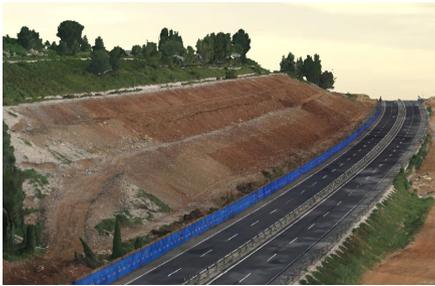


图 4 三维实景模型构建

## 2.2 模型精度分析

为了验证三维实景模型的精度,在获得的模型上根据所做标记量取 13 个检测点的空间三维坐标,并与现场实测坐标值进行对比计算,结果如表 1 所示。

根据表 1 计算得出模型的平面位置中误差为 ±2.34 cm,高程中误差为 ±2.08 cm,可以满足实际应用需求。

## 3 结语

利用无人机倾斜摄影技术,实现了对高速公路边坡的三维重建,所获取的三维实景模型具有真实、精度高、纹理清晰等优点,较传统测量手段保证了作业安

表 1 模型误差对比

检测点	$\Delta x /$ cm	$\Delta y /$ cm	$\Delta h /$ cm	平面位置 误差/cm	高程误 差/cm
JC1	-1.5	0.4	-1.9	1.55	1.90
JC2	0.5	-0.3	2.2	0.58	2.20
JC3	0.5	1.1	-3.0	1.21	3.00
JC4	-1.3	1.5	1.3	1.98	1.30
JC5	0.6	3.1	1.4	3.16	1.40
JC6	-0.9	2.3	-3.2	2.47	3.20
JC7	2.6	2.2	-1.6	3.41	1.60
JC8	-3.2	-0.6	2.8	3.26	2.80
JC9	1.0	0.4	-2.8	1.08	2.80
JC10	0	1.8	0.7	1.80	0.70
JC11	-3.1	0.5	3.7	3.14	3.70
JC12	0.6	-3.0	-1.8	3.06	1.80
JC13	-3.7	0.6	-0.7	3.75	0.70

全,并大大节省了人力成本和时间成本,利用所获取的三维实景模型可以获知边坡各点的空间三维坐标,实现对整个边坡的全覆盖测量。模型所具有的真实纹理信息可以更加清晰地展示边坡的真实状况,并可为后期的土石方量计算、BIM 设计等提供数据支持。

## 参考文献:

- [1] 张大伟,李国春,赵庆远,等.保通条件下的高速公路改扩建岩质边坡开挖技术研究[J].中外公路,2018(4).
- [2] 赵欣桐,何忠明.改扩建高速公路高边坡施工过程稳定性分析[J].公路工程,2015(6).
- [3] 姚永胜,张军辉,李岷,等.江西省昌樟高速公路改扩建工程老路基渗水处理方法研究[J].中外公路,2018(3).
- [4] 李国强.山区高速公路高填方边坡稳定性分析[J].科技通报,2018(9).
- [5] 黄建雄.公路边坡养护管理信息系统的开发与研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2016.
- [6] 严慧敏,王飞.天狼星无人机航测系统在水利工程测绘中的应用[J].测绘通报,2017(7).
- [7] 马国超,王立娟,马松,等.无人机摄影测量在矿山尾矿库建设规划的应用[J].测绘科学,2018(1).
- [8] 彭劲松,许俊,李娟.无人机载激光测量系统在电力上的应用[J].测绘通报,2018(4).
- [9] 余忠迪,李辉,巴芳,等.基于消费者级无人机的城市三维建模[J].国土资源遥感,2018(2).