

基于机载激光雷达的低照度交通事故现场 重建及实证研究^{*}

张泽江 刘晓锋 刘军黎

(天津职业技术师范大学汽车与交通学院 天津 300222)

摘要:在低亮度条件下,传统的事故勘察方法难以获取高质量的勘察数据。提出了基于机载激光雷达的低照度事故现场重建方法。首先,建立机载激光雷达勘察的方法框架。接着,使用高斯分布的统计学滤波算法去除噪点,通过判断空间划分体素的占据状态来滤除现场周围移动物体。然后,利用传感器自身的位姿数据配准点云数据,建立事故现场的三维点云模型。此外,探究了无人机飞行高度和激光旁向重叠率如何影响建模精度。最后,在夜间模拟事故现场进行实证研究,研究发现当无人机飞行高度为15 m,激光旁向重叠率为50%时,建模精度和处理时间能达到较好平衡。与航拍摄影建模、传统人工勘察方法相比,机载激光雷达建模均方根误差(root mean square error, RMSE)为0.046 36,低于航拍摄影建模误差,表明方法能够应用于低照度交通事故现场勘测。

关键词:低亮度;事故勘察;机载激光雷达;三维建模

中图分类号: TN391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Reconstruction of low-brightness traffic accident scene based on UAV-borne LiDAR and empirical research

Zhang Zejiang Liu Xiaofeng Liu Junli

(School of Automotive and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Under low-brightness conditions, it is difficult to obtain high-quality survey data by traditional accident survey methods. This paper proposes a low-brightness accident scene reconstruction method based on UAV-borne LiDAR. First, the methodological framework of UAV-borne LiDAR survey is established. Then the noise is removed using a statistical filtering algorithm with Gaussian distribution, and the moving objects around the scene are filtered out by judging the occupancy status of the spatially divided voxels. Finally, the sensor's position data is used to registration the point cloud data to obtain a 3D point cloud model of the accident scene. This paper also explores how UAV flight altitude and LiDAR side overlap rate affect the modeling accuracy. An empirical study is conducted at a simulated accident scene at night, and it is found that when the UAV flight height is 15 m and the LiDAR side overlap rate is 50%, the accuracy and processing time can reach a better state. Comparison and analysis with aerial photography modeling and traditional manual survey methods, the root mean square error (RMSE) of airborne LiDAR modeling is 0.046 36, which is lower than that of aerial photography modeling, which can be better applied to the survey of traffic accidents at the scene of low illumination.

Keywords: low-brightness; accident investigation; UAV-borne LiDAR; three-dimensional modeling

0 引言

随着汽车保有量的快速增长,各类交通事故时有发生

生。原始事故勘察数据作为交通事故责任认定、保险理赔及事故分析与管理等工作的基础资料,其准确性和有效性十分重要。道路交通事故发生后,原始事故现场包含大量

收稿日期:2023-08-23

^{*} 基金项目:天津市科技计划(XC202028,2022ZD016,22YDTPJC00120)项目资助

信息,如事故车辆类型、碰撞变形量、车辆最终位置、车辆制动轨迹等。勘察成果可用于分析导致事故发生的原因,确定事故责任主体,进行保险理赔等。勘察交通事故现场每延长1 min,会造成该路段的平均延误时间增加4~5 min。Haule等^[1]针对高速公路场景,对事故影响和现场清理时间的重要影响因素进行了分析。

传统交通事故勘察常用卷尺测量和相机拍照的方式勘察交通事故,但人工参与过程中易引入较大误差,导致事故勘测成果差异性较大,并且难以对事故现场进行二次勘测。三维数字模型的空间信息可以更加直观理解,比二维图形更能真实地表现对象,更接近实物,而且可以从多个视角进行观察,可为可视化的动态交互提供基础数据。为便于虚拟现实技术和真实世界数据交互,张成挺等^[2]设计使用了三维可视化平台,帮助运维人员管理机房及内部设备,加强综合化管理水平。雷禧生等^[3]使用(time of flight, TOF)相机获取工件的色彩和深度信息,引入快速视觉里程算法估计位姿,同时使用图像处理单元(graphic processing unit, GPU)加速三维点云重建过程,为随后三维测量提供完整的点云数据。相比于卷尺及图像记录事故现场,通过激光雷达对事故现场进行三维重建,可以相对快速地重建事故现场相关的交通场景。

Stána等^[4]使用地面激光扫描(terrestrial laser scanning, TLS)的事故勘察方法,从地面视角得到扫描的得到点云数据,生成了事故现场三维模型,有效节省了事故勘察时间,准确地记录事故勘察结果。Baier等^[5]在行人与车辆碰撞的场景中,使用3D数字扫描方法,可检测出尸检未识别到的人体细微损伤情况。但TLS在单一靶点无法重建出关于事故现场的全局模型,需要在现场布设多个靶点,拼接不同靶点所采集的点云数据。同时拼接点云数据需要较高技术要求,导致多靶点下点云拼接普遍耗时超过30 min^[6]。且地面激光扫描仪器本身成本较高,因此还存在着较高的技术、价格壁垒。

近年来,随着无人机控制技术的不断发展,带来硬件成本的降低,具有便携灵活的特点,能够支持各项任务,如搜索救援、货物交付、交通监控^[7]、三维测绘等^[8]。在发生道路交通事故后,勘察通常会造成后方路段交通拥堵,执法人员无法即时到达事故的现场,可使用无人机提前到达现场,对事故进行预估,提前制定勘察策略^[9]。采用无人机携带航拍,可通过俯视视角观察事故情况,并且使用图像特征点拼接的方法^[10],将多个有序、互相重叠的图像进行拼接,可形成事故现场的全局影像。陈强等^[11]设置地面控制点(ground control point, GCP),采用改进四点法对无人机采集的图像进行校正,进一步提升了事故现场勘察的精度。

由于无人机在遥感测绘行业的大规模应用,推动了航拍摄影建模技术的大幅进步。摄影建模技术可将二维图像转换为三维模型,Liu等^[12]使用无人机航拍勘察事故现场,将高质量的图像数据通过运动结构算法(structure

from motion, SFM)和多视角立体重建(multi-view stereo, MVS)算法处理生成三维模型,然后进行网格化和纹理化,可得到更加精细、可视化效果更好的交通事故现场三维模型。曹明伟等^[13]使用快速鲁棒的特征跟踪算法对SFM算法的核心部分进行改进,其重建精度均优于现有经典算法。Zulkifli等^[14]探究了不同兴趣点和航路点飞行参数设置,对事故建模精度的影响。

梁其洋等^[15]通过机载激光雷达点云扫描获取高程信息,将矢量道路中心线作为平面线性数据,建立城市道路网络的三维模型。现有研究大多是采用无人机负载摄像头的方式,对事故现场进行勘察或建模。但交通事故发生时间多变,随机性较大,在夜晚或其他低亮度场景下也易发生交通事故。为去除不均匀光照和低亮度场景对图像的影响,王伟江等^[16]采用图像增强算法检测机柜表面缺陷,但在极暗或极亮条件下,缺陷检测的精度较差,难以实现缺陷检测。李玉梅等^[17]使用由粗到细的点云配准算法,三维重建中的配准精度及效率均有所提高。

本文将低亮度条件界定为相机成像受光照影响较大,物体反射光信号较弱,导致图像模糊时的照明状态。比如凌晨快天亮、傍晚黄昏时,或夜晚存在部分照明的情况,此时相机拍照无法满足勘察事故现场的精度要求。因此,本文提出一种无人机负载激光雷达的事故勘察方法,弥补这一场景下的研究不足,主要优势如下。

1)因激光雷达不受光照影响,可以开展夜间场景下的事故勘测。且无人机作为载体,可以快速到达事故现场进行勘测,短时间内可以扫描较大范围的事故现场。

2)分析相关建模参数对三维重建精度的影响,实验将探究无人机飞行高度和激光雷达旁向重叠率两项参数如何影响建模精度。

3)开展实证研究,验证所提方法的可行性和有效性,为实地勘察提供技术支撑。

1 机载激光雷达航测方法框架

本文按照以下步骤使用机载激光雷达勘察事故现场。首先选用勘察事故现场的无人机及激光雷达扫描设备,标定机载激光雷达中内置的高精度惯导。为避免周围障碍物影响无人机飞行,需要根据事故现场实地情况,规划飞行航线,采集事故现场原始点云数据。接着,为避免噪点数据降低模型重建精度,对采集的点云进行预处理,删除数据中存在的噪点及离散点。假设点云中的点都符合高斯分布,使用K维树(K-dimensional tree, KD-Tree)法筛选并去除噪点,通过体素化方法剔除事故现场周围移动物体点。之后,利用全球定位系统(global positioning system, GPS)及高精度惯导提供的位姿数据配准点云,重建出事故现场的三维点云模型。最后,以人工勘察方法得到的事故数据作为真实值进行对比,验证重建模型精度,对比相同航线下的航拍摄影建模方法,衡量不同勘察方法之间的误差水平。机载激光雷达航测方法的整体流程如图1所示。

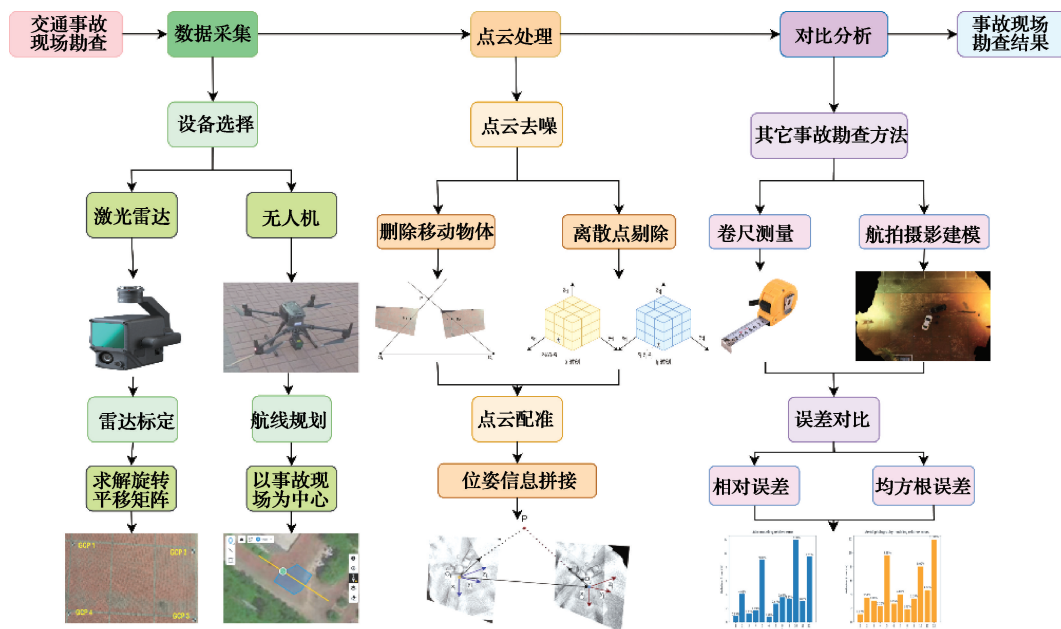


图1 勘查方法整体流程

2 数据采集

2.1 设备选择

在使用无人机开展事故现场勘察时,需要保证无人机及地面人员的安全。选用的无人机需要遵守事故发生地的无人机管理办法,具备飞行许可。为完成制定的航线任务,需要考虑无人机飞行的三大性能约束,包含最大航迹长度约束、最小航迹长度约束和转向角约束。并且在负载高精度激光雷达扫描的情况下,飞行续航时间可以满足扫描对整个事故现场。

激光雷达本质上为一种测距设备,一般性配备全景电耦合器件(charge coupled device, CCD)、相机、GPS 和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU),依据测量原理上不同可分为三角测距和 TOF 法测距。由于激光器和探测器不在同一位置上,依据光学路径,不同距离的物体将会成像在 CCD 上的不同位置,利用三角公式进行计算,便能得出被测物体的距离,三角测距的原理如图 2 所示。但三角法的测量和角度有关,在与物体距离较近时,测量精度较高,随着距离增加,角度变化差异减小,测量精度会逐渐降低。

TOF 雷达是依赖于激光往返的飞行时间测量传感器与物体之间距离,能够在数十米的测量范围内能保持高精度测距,测距原理如图 2 所示。为避免因设备自身限制导致勘察精度下降的情况,应选用 TOF 激光雷达设备对事故现场进行扫描。为获取到足够稠密的点云,应用于重建事故现场,需要评定激光雷达设备采样率,即每秒钟所能采集的点云数量。采样率越高,点云越密集,重建的三维模型结果能够更加准确的反应出事故现场原貌。

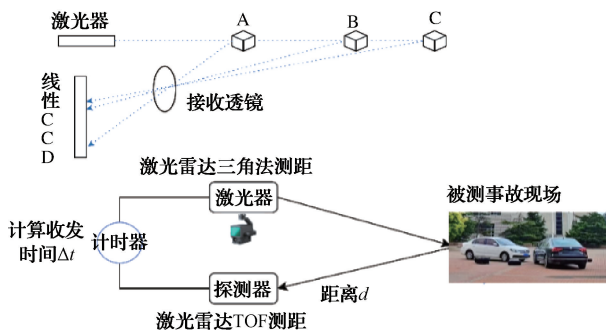


图2 不同激光测距原理

2.2 激光雷达自标定

多数机载激光雷达中都会负载高精度惯导,感知无人机飞行过程中的运动信息。然而惯导具有时飘特性,经过长时间的积分后,误差会不断累积,所以需要惯导进行标定。通过机载激光雷达系统中包含的彩色相机拍摄具有明显特征的图像,利用图像中的特征点信息反解出位姿,实现激光雷达和 IMU 的校准,获取准确的位姿信息。另外为获取精确的定位信息,标定图像中需要包含带有经纬度信息的地面控制点。地面控制点的布设应该均匀分布与地表颜色形成鲜明对比,不被其他物体遮挡。按照选点要求,在本次自标定中设置了 4 个地面控制点,可使用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)得到在 WGS84 坐标系下的位置,分别记录经纬度及海拔高度,结果如表 1 所示。

根据两幅图像重叠部分中所共有的特征点信息,利用对极几何约束关系,可以求解传感器在两帧之间的旋转平移矩阵,恢复出在两帧之间传感器的运动,如图 3 所示。

表1 地面控制点信息

GCP	纬度/(°)	经度/(°)	高度/m
1	39.067 46	117.298 42	3.483
2	39.067 39	117.298 35	3.483
3	39.067 49	117.298 15	3.483
4	39.067 59	117.298 24	3.483

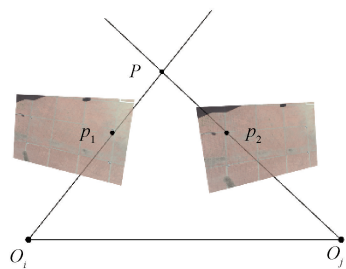


图3 地面控制点和对极几何约束关系

图3中,点 P 表示分别在两张彩色图中所表示的同一个特征点, O_i, O_j 表示两次拍摄时传感器设备的位置中心,利用不同坐标系中同一个点的位置对应关系,可以得到式:

$$p_1 \cong KP, p_2 \cong K(RP + t) \quad (1)$$

式中: p_1, p_2 表示三维空间中的点 P 投影到二维图像上的坐标, $\cong$ 表示投影关系。 K 表示相机内参,因为两幅图片之间使用同一相机拍摄,内参相同。 R, t 分别代表相机的旋转和平移,表示不同时刻拍摄时相机的运动关系。

通过对极几何约束关系,可以计算两个匹配点的空间位置关系,同时包含平移和旋转信息。实验选用大疆禅思L1固态激光雷达,通过标定计算,得到旋转矩阵和平移矩阵,如式(2)、(3)所示,将包含旋转平移矩阵信息的文件加载至激光雷达设备中完成自标定。

$$R = \begin{bmatrix} 0.999\ 916\ 82 & 0.012\ 030\ 35 & -0.004\ 649\ 2 \\ 0.011\ 932\ 78 & -0.999\ 719\ 15 & -0.020\ 475\ 04 \\ -0.004\ 894\ 22 & 0.020\ 417\ 86 & -0.999\ 779\ 55 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$t = [35.080\ 000\ 76, 16.940\ 001\ 40, -46.439\ 997\ 85] \quad (3)$$

2.3 航线规划

在飞行测绘任务中,使用DJI Pilot软件制定无人机飞行航线,可以避免人为干扰机载激光雷达数据采集过程,得到高质量的输入点云数据。在无人机飞行过程中,需要时刻保证无人机飞行安全,确定安全的起降区域和飞行高度。应检查规划的飞行路线,估计航线中最高物

体,确保飞行过程中没有障碍物遮挡。

一般采用平行折返的拍摄方式进行测绘,但在实际事故勘察中,事故现场往往是不规则的多边形。为采集到现场的所有数据,多数情况下需要设定适当航线。

3 点云预处理

激光雷达采集数据时,扫描的原始点云数据中可能会存在噪点,并且包含周围行驶车辆和过往行人等移动物体点云。噪点及移动物体点云对配准精度会造成较大影响,容易导致重建的三维点云模型拼接错误或信息缺失。为保留事故现场原貌,得到高精度的事故勘察结果,本文对采集的原始点云数据进行预处理。点云处理方法通常有两种,一种是直接在原始点云上进行处理,另一种是对三维空间进行切分,在不同网格空间中处理,称为体素化处理。体素大小可根据实际需要进行调整,大体素包含更多的点云,能够更高效地处理点云。但可能导致同一个体素包含不同物体点云,经处理后模型物体之间会边界模糊。当体素较小时,与直接在点云上处理类似,处理结果会更加精细,但计算量将会相应的增加,耗费时间更久。本文结合两种方法特点对点云数据进行预处理,在原始点云上处理滤除噪点,使用体素化去除移动物体,以得到较好的事故勘察结果。

3.1 噪点去除

直接使用高斯分布的统计学滤波算法去除原始点云中的噪点。使用k-d树法,计算出点云中的每个点的k邻域,记录邻域内所有点与该点距离,所有距离值取平均,可得到与点云中所有点的平均距离值。假设符合高斯分布,即可设定阈值范围,对平均距离大于阈值的点进行剔除。

1)设点云数据集为 Q ,任意选取一点 p_i , k 为设定与点 p_i 距离最近点的个数,所有最近点到 p_i 距离的平均值记为 d_i ,其中 d_{ij} 为两点之间的距离,则有:

$$d_i = \frac{\sum_{j=1}^k d_{ij}}{k} \quad (4)$$

2)将各点 d_i 组成集合 D ,则 D 的均值 μ 及标准差 σ (n 是点云集 Q 中点云个数,也是 D 的样本数量)为:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \mu)^2} \quad (6)$$

3)假设处理后的点云集合为 P' ,引入一个权重因子 $\bar{w}$ 的大小与邻域内点的个数有关,则有:

$$P' = \{p_i \in P \mid \epsilon \leq \mu + \bar{w} \cdot \sigma, 1 \leq i \leq n\} \quad (7)$$

其中,阈值 ϵ 由均值 μ 和标准差 σ 及权重因子 $\bar{w}$ 决定。 $\epsilon = \mu \pm \alpha \bar{w}$ (8)

点与其他点的距离大于 ϵ 时,可视为离群点或噪点,对筛选出的噪点进行删除,可完成噪点剔除操作。

3.2 去除周围移动物体

激光雷达在采集数据的同时,会扫描到周围环境,可能包含与事故无关的移动车辆和行人。由于移动物体在不同时刻占据不同的空间位置,会造成点云中出現重影,降低模型配准精度。为进一步提高事故现场的三维模型精度,在进行点云配准之前,使用体素化方法去除移动物体点云,原理如图4所示。

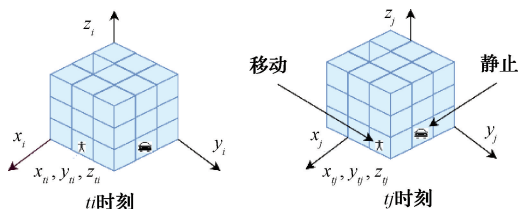


图4 体素占据状态判断

图4中, x_i, y_i, z_i 分别表示不同时刻 t_i 下的空间三维坐标轴,立方体代表事故现场划分的空间体素。 $x_{t_i}, y_{t_i}, z_{t_i}$ 表示当前时刻 t_i 以激光雷达为中心,物体在体素空间中占据的坐标位置。在点云空间中划分体素,记录当前时刻每个体素的占据状态,判断在后续一段时间内相应位置的体素是否处于同一状态,过滤掉发生变化的体素,可实现对移动物体的滤除。对于事故现场勘察这一场景,扫描目标处于静止状态,同一位置体素的占据状态应该唯一确定。如果在不同点云中,表示三维模型的同一位置存在差异,则可视作移动物体所扫描的点云,对其进行删除,可提高点云数据的配准精度。

4 点云配准与误差分析

4.1 点云配准

3D点云模型是通过不断累加在不同地点和不同时刻采集的点云数据建立的。航线飞行任务完成后,采集数据包含RTK基站数据、惯导数据、激光点云原始数据等信息。激光雷达可通过无人机的GPS定位系统得到定位信息,内置的高精度在标定后可提供运动信息,得到扫描时的姿态信息。扫描事故现场得到的每一个点都具有 x, y, z, r 4个参数,前3个参数表示以当前激光雷达位置为中心下的坐标,代表其位置信息。 r 表示反射率,反应物体反射的辐射能量占总辐射能量的百分比。点云配准基于扫描点云的位置、姿态和数据重叠率。配准所有不同时刻下所扫描的点云,重建出事故现场的三维点云模型。

4.2 误差对比分析

1) 航拍摄影建模

摄影测量可以将事故现场拍摄的二维图像转换为三维信息,进而得到三维模型。使用SFM算法处理图像,可生成稀疏三维点。通过多视角立体算法可稠密化点云数据,然后网格化、纹理化可得到图像建模结果。现有多款软件可利用图像数据进行3D建模,如Pix4D、PhotoScan、

Terra等。实验使用PhotoScan软件,依据相同航线下采集的航拍图片,建立事故现场的三维模型。与机载激光雷达重建的点云模型相比,两种建模方法之间存在显著差异。两种方法之间的对比如表2所示。

表2 无人机负载相机或激光雷达建模对比

对比项	雷达建模	摄影建模
采集数据	点云	彩色图像
主被动测量方式	主动测量	被动测量
外部光照	无	需要
成像原理	激光反射	小孔成像
输出	点云模型	三维模型
有无色彩及纹理	无	有
物体三维信息	有	无
分辨率	低	高
噪点	有	无
成本	昂贵	廉价

2) 误差评价指标

本文使用相对误差(relative error, RE)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来评价三维模型精度。

(1) 相对误差为:

$$RE = \frac{Y_{i真} - Y_{i测}}{Y_{i真}} \times 100\% \quad (9)$$

(2) 均方根误差为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{i测} - Y_{i真})^2} \quad (10)$$

式中: $Y_{i测}$ 表示三维模型中物体的测量值, $Y_{i真}$ 表示物体使用卷尺测量的真实值,其中角标 i 表示不同的物体; n 表示测量物体的总个数,并且 $0 \leq i \leq n$ 。

5 事故现场勘测实验

5.1 勘察设备选取

O'driscoll等^[18]使用DJI Mavic Pro无人机,无人机包含相机云台负载共重0.734 kg,并且体积较小,高度便携。Amin等^[19]通过DJI GO 4来设计飞行计划,使用大疆幻影4获取事故现场的航拍图像。上述两种都是使用无人机负载相机的方法对事故现场进行勘察,但未能使用机载激光雷达的对事故现场进行扫描勘察。

现场实验中,使用经纬M300RTK无人机,负载禅思L1激光雷达对事故现场进行扫描。激光雷达扫描同时可以获取传感器自身坐标信息,包含经度、纬度、海拔高度等属性。此设备可在城市120 m限高条件下使用,对地面交通事故进行扫描,实验设备如图5所示。

5.2 航线规划

2023年6月19日晚8点,在天津职业技术师范大学逸夫楼旁空地上,模拟两车相撞的事故现场。图5对模拟夜间事故现场的车辆停放位置、散落物等情况进行可视化



图5 事故勘察设备及模拟事故现场

展示,并反映出现场光线照射情况。为尽可能还原事故现场原貌,对碰撞区域重点扫描,更易观察事故现场的重点数据,便于分析事故成因,进而更准确的划分事故责任。事故发生区域需要根据现场实际情况设定飞行路线,在GPS地图上,以模拟事故现场为中心开始规划航线,使用图像色彩通道的平均值作为热力值,将彩色图像转为热力图,便于重点关注碰撞区域和散落物碎片。使用DJI Pilot编制飞行航线,航线规划结果与扫描范围如图6所示。根据模拟实验中的事故现场,使用机载激光雷达采集数据时间为9 min 32 s,包含无人机组装、航线规划、飞行扫描等阶段。但不同事故现场实际情况可能存在差异,如存在建筑物、信号灯、树木等障碍物遮挡,为保障无人机及周围人员安全,需要对无人机扫描路径进行优化调整,保证尽可能少的遗漏事故现场原始信息,这会导致航线规划时间发生变动,浮动范围一般为2~5 min。

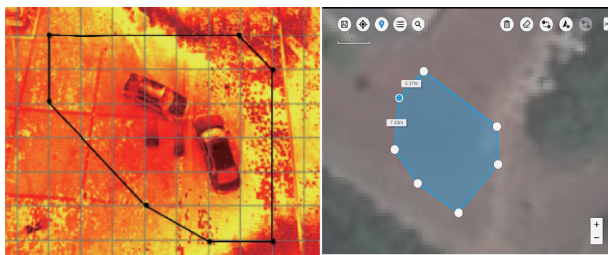


图6 模拟事故现场热力图及规划航线结果

5.3 点云数据处理

假设点云中的点都符合高斯分布,直接在原始点上进行处理,根据统计学滤波算法,识别对原始点云中的噪点及离散点。当设定邻域 $k=10$ 时,计算出共有151个噪点,对噪点进行删除,得到剔除噪点后的点云。

为去除点云扫描数据中的动态点,Lim等^[20]提出基于伪占用的自我中心比率的动态目标移除(egocentric ratio of pseudo occupancy-based dynamic object removal, ERASOR)方法,即对比同一位置的体素变化,识别离散点并剔除。在KITTI语义分割数据集上实验验证,以保留率(preservation rate, PR)和拒绝率(rejection rate, RR)为评价指标,与其他滤除移动点云方法比较,得出ERASOR方法能够快速、鲁棒性的剔除移动物体的动态点云,提高静态地图的建图精度。实验设置体素大小为0.2去除移动物体,随后利用无人机感知系统获取的位置和姿态

信息,配准围绕事故现场所有点云数据,形成事故现场的三维点云模型。本次实验采用的服务器CPU为i9-12900k, GPU为RTX4090,运行内存为64 GB,点云处理时间为93 s。不同硬件设备之间计算性能存在差异,一般而言,随着计算性能提升,数据处理速度加快,耗费时间也会相应缩短。

5.4 激光航向重叠率设置

在配准点云数据时,点云间重叠百分比会直接影响点云之间的配准精度。如果点云之间重复率较大,则提供的信息之间差异较小,导致数据冗余,但建模精度也会有一定提高,增加处理数据所花费的时间。一般航拍摄影建模要求可见光旁向重叠率为75%~100%,可根据不同建模需求及目的,设置不同的重叠率。为得出适用于事故勘察最佳的激光雷达旁向重叠率设置,达到快速、精确建模的要求,实验对比分析了8种旁向重叠率,对比结果如表3所示。

表3 设置8种激光旁向重叠率对比

重叠率 百分比/%	原始数 据量/MB	点云配准 时间/s	有效点 数量/($\times 10^4$)
30	76	49	2 177
35	78	49	2 257
40	87	57	2 348
45	91	64	2 453
50	95	68	2 566
55	99	73	2 617
60	102	76	2 787
65	107	82	2 845

通过表3可知,当设置无人机飞行过程中的激光旁向重叠率为50%时,采集的数据量满足事故现场重建要求,能较好平衡点云配准所耗费的时间与建模精度两者之间的关系。可为下一步勘察事故现场,设置激光雷达建模相关参数提供参考。

5.5 无人机飞行高度设置

为探究机载激光雷达建模高度的适用范围,能有效运用于事故勘察中。考虑到道路环境中存在信号灯和路灯等交通基础设施的影响,因此实验选择最低无人机安全飞行高度为15 m。在激光航向重叠率为50%的情况下,分别在15、20和25 m高度下对事故现场进行扫描。对采集得到的数据进行处理,可知采集数据量基本相同,处理时间也相差较小。将15、20和25 m不同高度下生成的点云模型,进行可视化对比,结果如图7所示。

从图7可知,无人机飞行高度越高,扫描范围越大,周围与事故无关的环境也同样被扫描,使得事故现场勘察无法聚焦于事故中心,针对事故现场的扫描有效点的数量减少。因此需要在保证安全的前提下,尽可能的靠近事故现

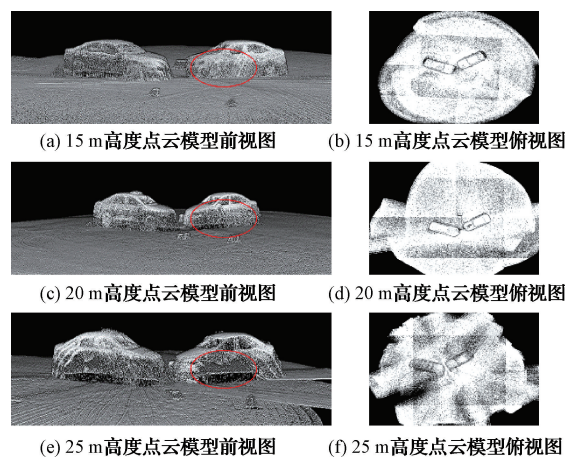


图7 不同高度下点云模型

场,扫描得到高质量的点云数据,产生较好的数字化三维模型,保证事故勘察结果精度。

5.6 对比分析

为分析机载激光雷达扫描得到三维模型的误差水平,使用三维模型测量工具对模型中的物体进行测量,以卷尺测量值为真实值进行对比。为获得航拍摄影建模结果,首先,设定无人机航拍线路,从不同高度、角度对交通事故现场进行拍照,获取事故现场图像。然后,导入高精度位置与姿态测量系统数据(position and orientation system, POS)、开展图像特征提取与匹配。接下来,建立稀疏和稠密点云模型。再次,进行三维模型的网格化和纹理化处理,获得事故现场数字地表模型、数字高程模型,上述交通事故现场重建工作可以在 PhotoScan 软件中进行^[12]。航拍摄影建模和机载激光雷达建模结果可视化对比,如图8所示。

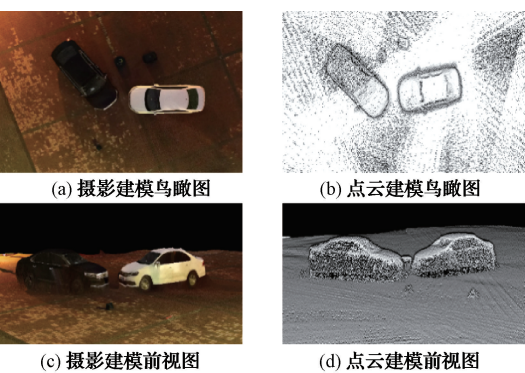


图8 摄影建模与点云建模比较

通过不同事故勘察方法得到勘察结果,对事故现场中的车长、车宽、地面控制点之间距离及周围散落物等12项值进行测量,使用序号1~12依次对测量对象进行表示,如图9所示。选择物体上有特征的两点确定一条直线,测量工具会给出每条线的距离数据,共得到12项测量值,结果如表4所示。



图9 测量对象及对应编号

表4 建模误差分析

测量编号	测量对象	卷尺/m	摄影建模/m	雷达建模/m	图像建模相对误差/%	雷达建模相对误差/%
1	白车长	4.48	4.43	4.52	1.12	0.89
2	白车宽	1.71	1.65	1.78	3.51	4.09
3	黑车长	4.87	4.72	4.93	3.08	1.23
4	黑车宽	1.77	1.73	1.74	2.26	1.69
5	地面控制点长	11.80	12.93	12.87	9.58	9.07
6	地面控制点宽	10.20	9.93	10.12	2.65	0.78
7	无人机箱长	0.75	0.78	0.77	4.00	2.67
8	无人机箱宽	0.55	0.54	0.57	1.82	3.64
9	激光雷达箱长	0.30	0.31	0.29	3.33	3.33
10	激光雷达箱宽	0.25	0.23	0.28	8.00	12.00
11	轮胎直径	0.65	0.62	0.67	4.62	3.08
12	警示三脚架	0.42	0.37	0.46	11.90	9.52

整体来看,对于较大物体,激光雷达建模相比于摄影建模重建模型精度较高。但对于地面上尺寸较小的物体,

如警示三脚架、设备保护箱等,存在较大相对误差。为更好的评估建模误差,计算 RMSE 时会将离群值排除在外,

以避免其对误差测量的影响。离群值是指超出数据集的标准偏差范围的异常数据点,可以通过设立某一阈值或规则识别离群值,剔除辨别出的离群值。实验将超过标准偏差2倍的数据视为离群值。计算可得航拍摄影建模排除离群值的RMSE为0.04696,机载激光雷达建模RMSE为0.04636。均方根误差越小,则勘察结果精度更高。

6 结 论

针对现有研究中,航拍摄影建模和传统人工方法难以勘察低亮度场景下的事故现场,本文提出机载激光雷达勘察事故方法,同时探究了激光雷达旁向重叠率和飞行高度对三维建模精度的影响。依据所提出方法进行实地实验,综合考虑数据处理时间和勘察成果精度,得出当激光雷达旁向重叠率为50%,飞行高度为15 m时,可实现快速准确的勘察事故现场。

整体勘察花费时间需要根据事故现场实际情况具体衡量,受无人机操作熟练程度、事故现场周围环境和计算平台等影响,但耗费时间基本在15 min内。在低亮度场景中,相比传统人工勘察方法,本文所提方法能够显著缩短勘察时间,实现事故现场的快速勘察重建。另外,在无人机飞行航线相同时,机载激光雷达的建模RMSE为0.04636,与低亮度场景下航拍摄影建模的RMSE为0.04696相比,重建精度相对较好。虽然如此,本文方法仍可进一步改进。因点云数据配准依赖于所获取的位姿数据,当障碍物遮挡或RTK基站较少时,会降低模型重建精度。可考虑在地面布设RTK基站,增强GPS定位信号,以得到高精度的定位信息。无人机在大风、雨、雪等极端天气下使用,依赖相机或激光雷达单一传感器建模精度较低,可融合多种传感器采集数据,提高恶劣天气下建模精度及鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] HAULE H J, SANDO T, LENTZ R, et al. Evaluating the impact and clearance duration of freeway incidents [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2019, 8(1): 13-24.
- [2] 张成挺, 钱杰, 王文娟, 等. 基于三维可视化技术的机房建模数据策略研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 57-62.
- [3] 雷禧生, 肖昌炎, 蒋仕龙. 基于TOF相机的喷涂工件在线三维重建[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1991-1998.
- [4] STÁŇA I, TOKAŘ S, BUCSUHÁZY K, et al. Comparison of utilization of conventional and advanced methods for traffic accidents scene documentation in the Czech Republic[J]. Procedia Engineering, 2017, 187: 471-476.
- [5] BAIER W, DONNELLY M J, PAYNE M, et al. A holistic multi-scale approach to using 3D scanning technology in accident reconstruction[J]. Journal of Forensic Sciences, 2020, 65(5): 1774-1778.
- [6] 关闯, 冯浩, 衡威威, 等. 地面三维激光扫描在交通事故勘查及重建中的应用进展[J]. 刑事技术, 2022, 47(1): 76-82.
- [7] 刘军黎, 刘晓锋, 邱洁, 等. YOLOX-IM: 一种无人机航拍视频的轻量化交通参数提取模型[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 159-169.
- [8] GHAMARI M, RANGEL P, MEHRUBEOGLU M, et al. Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: A review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 102492-102531.
- [9] 何树林, 吴昊, 李震. 基于无人机的道路交通事故现场照相与摄像技术研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 88-91.
- [10] CHEN Q, LI D, HUANG B. SUAV image mosaic based on rectification for use in traffic accident scene diagramming [C]. 2020 IEEE 3rd International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI). IEEE, 2020: 430-433.
- [11] 陈强, 许洪国, 谭立东. 基于小型无人机摄影测量的交通事故现场勘查[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1439-1446.
- [12] LIU X, GUAN Z, FAN Q, et al. Remote sensing and scene reconstruction of traffic accident based on unmanned aerial vehicle platform[C]. CICTP 2019, 2019: 3331-3342.
- [13] 曹明伟, 李书杰, 贾伟, 等. 面向大规模SFM的快速鲁棒特征跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 252-260.
- [14] ZULKIFLI M H, TAHAR K N. The influence of UAV altitudes and flight techniques in 3D reconstruction mapping[J]. Drones, 2023, 7(4): 227.
- [15] 梁其洋, 潘瑜春, 吴保国, 等. 基于GIS数据的城市路网快速三维建模[J]. 电子测量技术, 2018, 41(9): 69-74.
- [16] 王伟江, 彭业萍, 曹广忠, 等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 131-139.
- [17] 李玉梅, 万旺根, 王旭智. 三维重建中点云配准算法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(12): 75-79.
- [18] O'DRISCOLL J. Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2018, 22: 32-44.
- [19] AMIN M, ABDULLAH S, ABDUL MUKTI S N, et al. Reconstruction of 3D accident scene from multirotor

UAV platform [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 43: 451-458.

- [20] LIM H, HWANG S, MYUNG H. ERASOR: Egocentric ratio of pseudo occupancy-based dynamic object removal for static 3D point cloud map building[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 2272-2279.

作者简介

张泽江, 硕士研究生, 主要研究方向为交通事故场景重建。

E-mail: zzjkyjy@163.com

刘晓锋(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为交通控制与优化。