

中文引用格式:胡焱松,王长君,郑金子,等. 面向交通事故现场三维实景建模的无人机航拍参数[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(7):194-201

英文引用格式:HU Yansong, WANG Changjun, ZHENG Jinzi, et al. Key parameters of UAV photography for 3D real scene reconstruction of traffic accident site[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 194-201.

面向交通事故现场三维实景建模的无人机航拍参数*

胡焱松^{1,2}, 王长君^{**3}研究员, 郑金子³副研究员, 褚宇航¹

(1 中国人民公安大学 交通管理学院, 北京 100038; 2 广东警官学院 治安与交通管理学院, 广东 广州 510230; 3 公安部道路交通安全研究中心, 北京 100062)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.07.2080

资助项目: 公安部科技计划项目(2022JSYJC20)。

【摘要】 在交通事故现场三维实景建模的图像采集过程中, 针对无人机(UAV)航拍参数主要依靠人工经验设置, 导致模型测量误差大、精度低的问题, 提出一种无人机航拍关键参数自动计算方法。首先, 确认单镜头无人机环绕事故现场航拍的关键参数为航拍高度、云台角度和拍摄间隔角, 并分析其与成像范围、成像精度以及重叠度的数值关系; 然后, 构建无人机航拍关键参数计算模型, 以给定事故现场场景、无人机技术参数、图像长宽比以及重叠度要求为输入, 在事故现场处于有效成像范围且无成像盲区的前提下, 以提高图像利用率保障模型精度和呈现效果为目标, 自动计算得到航拍参数; 最后, 结合实例, 应用该方法计算无人机航拍参数完成事故现场的图像采集, 经测算, 构建的事故现场三维实景模型的平均测量误差为 1.72%, 测量精度为 3.54 cm, 相较于人工经验法平均误差降低 47.56%, 精度提高 48.40%。研究表明: 该方法能实现交通事故现场三维实景建模的航拍参数自动计算, 构建厘米级误差的三维实景模型, 可提升无人机航拍的参数化和自动化水平。

【关键词】 交通事故现场; 三维实景建模; 无人机(UAV); 航拍参数; 倾斜摄影

Key parameters of UAV photography for 3D real scene reconstruction of traffic accident site

HU Yansong^{1,2}, WANG Changjun³, ZHENG Jinzi³, CHU Yuhang¹

(1 School of Traffic Management, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China; 2 School of Public Security and Traffic Management, Guangdong Police College, Guangzhou Guangdong 510230, China; 3 Research Institute for Road Safety of MPS, Beijing 100062, China)

Abstract: Aiming at the problem of UAV aerial photography parameters relying on manual experience when collecting image of 3D real scene reconstruction at traffic accident sites, which led to large model measurement errors and low precision, an automatic calculation method of key parameters of UAV aerial photography was proposed. First, the key parameters of aerial photography used by single-lens UAV for images acquisition of traffic accident site were altitude, gimbal angle and shooting interval angle. The numerical relationships of the key parameters with the imaging range, imaging accuracy and overlap rate were analyzed. Then, the aerial photography key parameters computation model was constructed. The key input parameters were the given accident site, UAV technical parameters, image aspect ratio and overlap

* 文章编号: 1003-3033(2024)07-0194-08; 收稿日期: 2024-01-17; 修稿日期: 2024-04-23

** 通信作者: 王长君(1965—), 男, 江苏扬州人, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事道路交通安全方面的研究。E-mail: wcj121@sina.com。

requirements. On the premise that the accident site was in the effective imaging range and there was no imaging blind zone, the UAV photography parameters were automatically calculated with the goal of improving the accuracy and presentation effect of the image utilization rate model. Finally, combined with case application, the UAV aerial photography parameters calculated by this method were applied to complete the image acquisition at the accident sites, and the constructed 3D real scene model could clearly and completely present the overview of the accident site, with an average measurement error of 1.72%, and a measurement accuracy of 3.54 cm. Compared with the manual empirical method, the average error of the method was reduced by 47.56%, and the accuracy was improved by 48.40%. The study shows that this method can realize the automatic quantitative calculation of aerial photography parameters for 3D real scene reconstruction of traffic accident sites, construct the model with centimeter-level error, and improve the parameterization and automation of UAV aerial photography.

Keywords: traffic accident site; 3D real scene reconstruction; unmanned aerial vehicle (UAV); aerial photography parameters; tilt photography

0 引言

近几年,我国每年约发生25万起道路交通事故,平均每4起事故中就有1人死亡,交通安全形势依然严峻^[1]。全面、细致的勘查交通事故现场,是深入分析事故致因与影响因素,进而针对性防范事故的重要手段。应用无人机倾斜摄影技术对交通事故现场进行三维实景建模,是提升事故现场勘查质量和效率的新途径^[2],基于三维实景模型可以精确、高效开展勘查测量,避免人工测量误差,实现现场清撤后的复勘复查^[3]。当前,交通事故现场三维实景建模图像采集时无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)航拍参数主要依靠人工经验和主观视觉来设置和调整^[4],要求勘查人员既能够熟练操作无人机,又要具备丰富的事故现场勘查经验,这制约了其在事故现场勘查中的应用。综上,无人机航拍参数的自动化计算是三维实景建模技术在交通事故现场勘查中深度应用的重要前提。

基于无人机倾斜摄影技术的三维实景建模具有个性化图像采集、精度高、细节信息全等特点^[5-6],能满足交通事故现场所需的场景建模和细物精细化建模的需求^[7]。近几年,国内外一些专家学者将其应用于交通事故现场三维实景建模并开展相关研究,KIM等^[8]应用无人机倾斜摄影建模技术构建交通事故现场的三维实景模型,并通过高精度激光扫描仪建模结果验证了该模型的有效性;向怀坤等^[9]介绍了无人机倾斜摄影建模的关键技术,并设计了交通事故现场三维建模勘测系统;AMIN等^[10]研究表明:应用无人机环绕兴趣点(Point Of Interest, POI)航拍事故现场采集图像比单航线效率更高;MOHAMAD等^[11]验证了无人机环绕交通事故现场

航拍构建的模型精度要优于单航线和双航线2种方式,且像控点的布置对于事故现场的实景建模效果影响不大。这一技术在交通事故现场三维实景建模中的研究不多,且主要集中在关键技术介绍、航线规划、像控点布置、模型构建等方面,针对无人机航拍参数的研究相对较少。郑金子等^[12]基于人工操作经验根据不同范围的交通事故场景给出了无人机倾斜摄影的航拍参数经验值;但会因为拍摄外形结构复杂以及彼此之间的相互遮挡等问题,导致出现较大的成像盲区和细节信息缺失等情况^[13],因此,需要多次航拍采集图像,效率不高且对无人机的续航能力是较大的挑战。

鉴于此,笔者拟结合倾斜摄影成像特点及三维实景建模的要求,提出无人机航拍参数计算方法,并通过具体实例验证该方法的有效性,以期降低对人工操作经验的依赖,助力基于无人机倾斜摄影技术的三维实景建模在交通事故现场勘查中的应用。

1 无人机倾斜摄影航拍参数计算方法

基于无人机倾斜摄影技术的交通事故现场三维实景建模主要包括图像采集和模型构建^[14],利用无人机全面获取交通事故现场图像,根据获取的航拍图像应用建模软件构建三维实景模型。航拍图像作为建模的基础,航拍参数会直接决定航拍效率和获取图像的质量^[15],影响最终的三维实景模型的呈现效果和精度。

1.1 交通事故现场无人机航拍参数

道路交通事故现场是指交通事故发生的地点及相关的空间范围,一般具有空间范围小、信息集中、安全风险大等特点,交通事故现场核心区域的痕迹物证是勘查重点也是三维实景建模的主要目标区

域。基于包络体和包络球的思想,交通事故现场核心空间范围可视作 $l \times w \times h$ (长×宽×高,m)的包络体,并以事故中心点为球心,构建半径为 r (m)的包络半球。为提高航拍图像对事故现场核心区域的覆盖率和航拍效率,需使成像范围覆盖事故现场核心区域,即包络半球要在无人机航拍成像范围内。利用单镜头无人机环绕 POI 飞行功能,以事故中心点为 POI,无人机环绕中心轴以绕飞半径 R (m) 沿着飞行路径,按照一定的拍摄间隔角 δ (°) 对事故现场进行航拍,即可快速完成事故现场图像采集,具体航拍方案如图 1 所示。

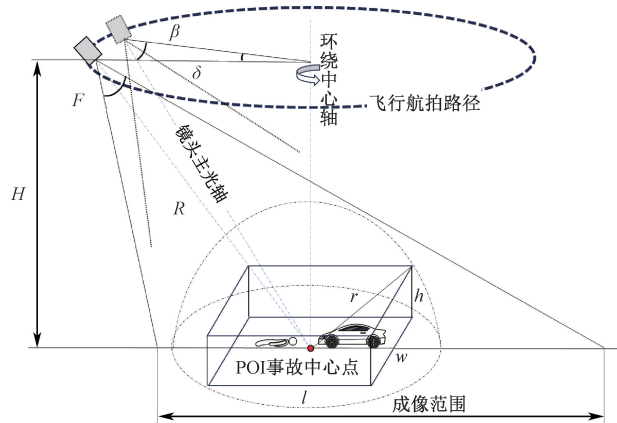


图 1 无人机航拍方案

Fig. 1 Scheme of UAV aerial photography

由图 1 可知: R 可以通过 H 和 β 计算得到,因此,对于给定的交通事故现场和无人机, F 为定值,环绕交通事故现场进行图像采集,需要计算无人机航拍关键参数为 H 、 β 和 δ 。

$$R = \frac{H}{\sin\beta} \quad (1)$$

1.1.1 航拍高度

航拍高度是指无人机距离事故现场所在路面(即起飞点)的相对高度。倾斜摄影成像简化示意图如图 2 所示,结合图 2 和相机成像原理可知:在无人机镜头参数确定时航拍高度越大,成像范围越大,则图像中所能容纳的事故现场元素越多,航拍效率越高。

基于《低空数字航空摄影规范》^[16]中航拍高度的计算公式,得到倾斜摄影中心点、远端点和近端点的地面分辨率计算方法,如下式:

$$G_c = \frac{\alpha \cdot H}{f \cdot \sin\beta} \quad (2)$$

$$G_f = \frac{\alpha \cdot H \cdot \cos(F/2)}{f \cdot \sin(\beta - F/2)} \quad (3)$$

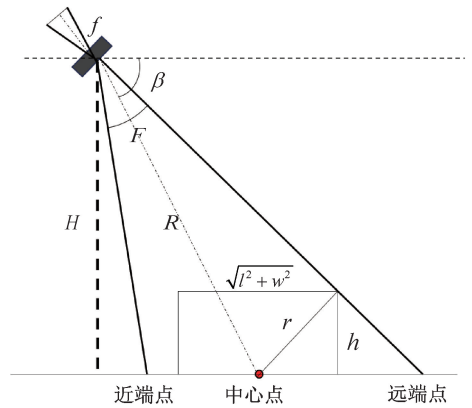


图 2 倾斜摄影成像

Fig. 2 Simplified schematic diagram of tilt photography imaging

$$G_n = \frac{\alpha \cdot H \cos(F/2)}{f \cdot \sin(\beta + F/2)} \quad (4)$$

式中: G_c 、 G_f 、 G_n 分别为图像的中心点、远端点、近端点的地面分辨率,cm; α 为像元尺寸, μm ; f 为焦距,mm。对于单镜头无人机,其像元尺寸、焦距和镜头视角一般为定值,由式(2)和图 2 可知:航拍高度越高则地面分辨率值越大,单位像素中记录的拍摄物体尺寸越大,能分辨的细节程度越低,纹理细节信息丢失越多,成像精度越低,致使构建的三维实景模型精度降低^[17]。因此,在保障成像范围的前提下,应尽量降低航拍高度。

1.1.2 云台角度

云台角度是指无人机搭载的相机镜头主光轴与水平方向之间形成的夹角。由式(2)一式(4)可知:云台角度越小,图像地面分辨率值越大,尤其是图像远端位置的地面分辨率会急剧增大造成成像精度锐减,导致远端位置的成像失效,严重影响图像利用率和模型精度。

为保障三维实景模型的精度,不仅要求不同航拍点所获取的图像分辨率保持一致,而且对于单张图像远端点和近端点的分辨率之差 G_Δ 不宜过大^[18], G_Δ 的表达式如下式,可知云台角度减小会导致 G_Δ 增大。综合图像利用率和模型精度 2 个方面的要求,云台角度不宜过小。

$$G_\Delta = G_f - G_n \quad (5)$$

对交通事故现场进行倾斜摄影航拍,云台角度不仅影响事故现场水平方向上的成像范围,也影响竖直方向上的成像效果,甚至造成成像盲区,在其他参数不变的情况下,随着云台角度逐渐增大,其成像情况如图 3 所示。

由图 3 可知:随着云台角度从 β_1 增大至 β_3 的过

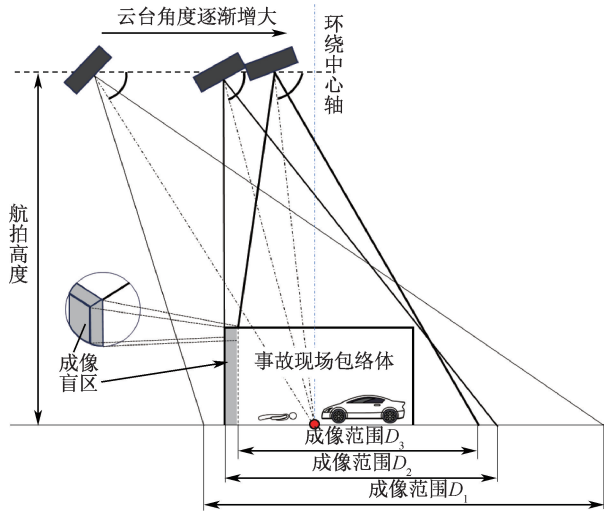


图 3 不同云台角度下的成像情况

Fig. 3 Imaging with different gimbal angles

程中,成像范围从 D_1 减小至 D_3 ,水平面上的成像范围逐渐缩小。伴随着云台角度的增大,航拍图像在事故现场包络体垂直方向上的信息获取也会逐渐减少,甚至会出现图 3 中云台角度为 β_3 时的成像盲区,无法有效全面获取事故现场信息,最终影响三维实景模型的呈现效果。因此,在保障成像精度的前提下,为加强事故现场垂直方向上信息的有效获取,应尽量减小云台角度。

1.1.3 拍摄间隔角

拍摄间隔角是指无人机环绕事故现场航拍时相邻航拍点位之间的间隔角度。为保证构建三维实景模型的精度,要求重叠度不小于 80%^[19],对于环绕 POI 航拍,相邻点位的 2 张图像的重合面积与图像面积比值的大小直接体现为倾斜摄影的重叠度,即灰色区域面积与图像面积之比,如图 4 所示。

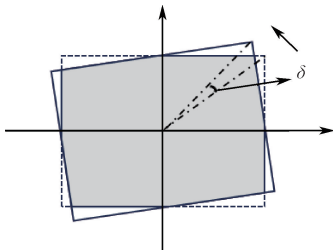


图 4 相邻点位 2 张图像的重叠

Fig. 4 Overlap of adjacent images

由图 4 可知:重叠度的大小与图像的长宽比以及 δ 密切相关。基于图像中心位置构造坐标系,各顶点转过角度 δ 之后的坐标可通过旋转矩阵 M 得到,进而可计算得到图像重叠度为:

$$M = \begin{pmatrix} \cos\delta & -\sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\psi = \begin{cases} 1 - \frac{\sin\delta(l_1^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \sin\delta)}{2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot (1 + \cos\delta) \cdot \cos\delta} \dots \\ \dots & 0 \leq \delta \leq 2\arctan\left(\frac{l_2}{l_1}\right) \\ \frac{l_2}{l_1 \cdot \sin\delta} & 2\arctan\left(\frac{l_2}{l_1}\right) < \delta \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ψ 为图像重叠度,%; l_1 为图像长边; l_2 为图像短边。基于式(7)计算得到在几种常见的图像长宽比下拍摄间隔角与图像重叠度的关系,如图 5 所示。

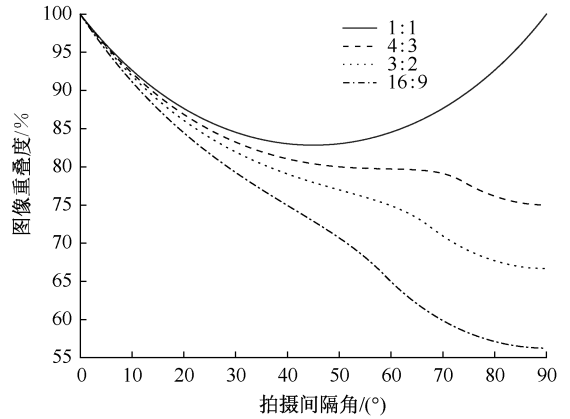


图 5 不同图像长宽比下图像重叠度与拍摄间隔角的关系

Fig. 5 Relationship between image overlap and shooting interval angle at different aspect ratios

由图 5 可知:相邻点位图像重叠度随着拍摄间隔角的增大而降低,且图像的长宽比越接近于 1 相邻点位图像的重叠度越大,基于以上计算结果,根据选定的图像长宽比计算满足重叠度要求的拍摄间隔角。

1.2 航拍参数计算方法

无人航拍参数计算求解流程和步骤如图 6 所示。

步骤 1:确认航拍成像范围。基于给定的交通事故现场,输入事故现场核心空间包络体的长、宽、高,根据下式计算得到无人机航拍成像范围要覆盖的事故现场包络半球的半径 r 。

$$r = \sqrt{h^2 + \frac{l^2 + w^2}{4}} \quad (8)$$

步骤 2:计算最小航拍高度。根据选用的无人

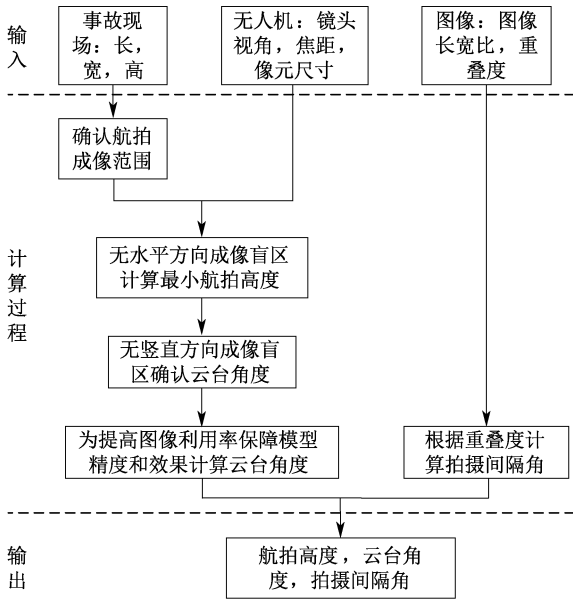


图6 无人机航拍参数计算流程

Fig. 6 Calculation process of aerial photography parameters of UAV

机,结合其视场角度、焦距和像元尺寸等技术参数,为使航拍图像能够覆盖到事故现场顶端平面,无水平方向上的成像盲区,如图2所示,即无人机远端成像边线与包络体的上端面的顶点相切,计算得到无人机距离事故现场中心点绕飞半径的最小值 R_{\min} ,并根据几何关系确认得到最小航拍高度 H_{\min} ,如下式:

$$R_{\min} = r / \sin(F/2) \quad (9)$$

$$H_{\min} = R_{\min} \cdot \sin\beta \quad (10)$$

步骤3:确认云台角度。为避免无人机航拍时事故现场顶端平面对其竖直方向的遮挡,造成竖直方向上的成像盲区,根据图3以及事故现场空间尺寸,计算得到云台角度的取值上边界 β_{\max} 。结合云台角度对成像精度的影响,为避免远端位置的成像失效,根据式(3)得到其取值下边界 β_{\min} 。

$$\beta_{\max} = \arccos(\sqrt{l^2 + w^2} / 2R) \quad (11)$$

$$\beta_{\min} = F/2 \quad (12)$$

步骤4:计算最优云台角度。根据步骤2中计算的最小航拍高度时无人机的绕飞半径为 R_{\min} ,基于步骤3中计算的云台角度取值范围,为提高航拍图像的利用率,控制远端点地面分辨率不超过中心点的5倍,寻找满足以上条件的最小云台角度,以加强事故现场竖直方向上信息的有效获取,根据式(2)、式(3)、式(8)一式(12),可以得到 β 的优化模型,如下式:

$$\begin{aligned} &\min\beta \\ &\text{s. t.} \begin{cases} F/2 < \beta < \arccos\left(\frac{\sqrt{l^2 + w^2} \cdot \sin(F/2)}{2 \cdot \sqrt{h^2 + \frac{l^2 + w^2}{4}}}\right) \\ \beta \geq \arctan(5/4 \cdot \tan(F/2)) \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, l, w, h, F 均为给定参数,分别将其代入式(13),即可从云台角度的取值范围中计算得到 β 的最小值,以实现交通事故现场核心空间上的信息全面获取,保障最终三维实景模型的精度和呈现效果。

步骤5:计算拍摄间隔角。基于选定的无人机图像长宽比和重叠度要求,根据式(7),计算得到最大拍摄 δ ,并设定向下取整。为确保事故现场三维实景建模的精度,需要获取足够数量的航拍图像,预设 δ 以 5° 为阈值,如果计算值大于阈值,则输出阈值作为拍摄间隔角。

2 事故现场航拍图像采集及建模

为验证航拍参数计算方法的有效性,基于相同事故现场,应用同款无人机和建模软件,分别采用参数计算方法得到航拍方案和人工成熟经验操作下的航拍方案,采集图像并构建三维实景模型,对比分析2个模型的效果和精度。

2.1 事故现场场景及无人机参数

小型客车自南向北出路口后左转与直行电动自行车在双向两车道无信号灯控制的十字路口上发生碰撞,事故现场如图7所示。根据事故现场概况及车辆尺寸,交通事故现场核心空间范围可视作 $10\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的包络体。



图7 事故现场

Fig. 7 Overview of traffic accident site

单镜头多旋翼无人机具有灵活性强、易于操作、携带方便等特点^[20],与交通事故现场特征适配性

高。因此,选取无人机搭载有 4 800 万像素的相机,航拍图像能够自动获取全球定位系统定位信息,其搭载的三轴稳定云台还可以用于抵消无人机姿态修正时的抖动,稳定画面,并且云台俯仰角度控制幅度范围超过 90° ,精度为 $\pm 0.01^\circ$,基本参数见表 1。

表 1 无人机及其搭载相机参数

Table 1 Parameters of UAV and its camera

参数类型	具体参数
飞行高度/m	500
飞行时间/min	34
影像传感器	1/2 英寸
照片最大分辨率	8 000×6 000
镜头视角/ $(^\circ)$	84
光圈	f/2.8

2.2 航拍参数计算及图像采集

基于给定的事故现场和选用的无人机技术参数,选定图像长宽比为 4 : 3,重叠度 95%,即无人机航拍参数计算模型的输入为: $(l, w, h, F, f, \alpha, l_1; l_2, \psi) = (10 \text{ m}, 5 \text{ m}, 3 \text{ m}, 84^\circ, 4 \text{ mm}, 1.6 \mu\text{m}, 4 : 3, 95\%)$ 。根据无人机航拍参数计算方法,利用 Matlab 计算得到本案例的无人机航拍参数:最优 β 为 48.38° ,最小 H 为 7.09 m,最大 δ 为 5° 。

无人机从图 7 中事故现场中心位置起飞,计算得到的无人机航拍参数并进行设置,设定事故中心位置为 POI 进行环绕航拍采集图像,补充拍摄正射图像以及由于周围绿化树木对航线影响未获取的图像,航拍过程历时约 10 min,共计得到图像 210 张。

选择从事道路交通事故处理工作且熟练掌握无人机操作的人员,根据个人经验对同一事故现场应用同一无人机进行环绕航拍,历时约 15 min,得到相同数量的图像。航拍过程操作人员根据成像情况实时调整无人机姿态,拍摄间隔角动态变化,其他航拍参数调整范围: $\beta \in (30^\circ, 70^\circ)$, $H \in (5 \text{ m}, 16 \text{ m})$ 。

2.3 三维实景建模效果分析

分别将自动计算参数和人工经验航拍得到的 2 组图像导入“云端地球”建模软件创建场景模型,得到事故现场的三维实景模型如图 8 和图 9 所示。

通过 2 种方式得到事故现场三维实景模型,均能够从多个视角全面展示事故现场的概况,包括车辆、散落物、标志标线以及其他现场元素的位置和外观特征等,同时,车身结构、车牌号码等现场元素的细节也能得到较好呈现。对模型进行旋转缩放观察对比呈现效果,可知:基于自动计算参数



图 8 自动计算参数下事故现场三维实景模型

Fig. 8 3D real scene model of traffic accident with parameters automatic calculated



图 9 人工经验操作下事故现场三维实景模型

Fig. 9 3D real scene model of traffic accident with manual operation experience

得到的事故现场三维模型相较于人工经验操作得到的三维模型,在事故现场核心区域以外的上部空间呈现信息要少,但事故现场核心区域的细节呈现更为清晰。

为进一步验证建模效果和精度,基于三维实景模型定位测量交通事故现场元素,选取电动自行车及散落物为测量元素,如图 10 和图 11 所示,并将其与实际现场测量数据进行对比,具体结果见表 2。通过计算均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来评价模型的综合测量精度, RMSE 计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (l_i - \hat{l}_i)^2} \quad (14)$$

式中: n 为测量点的个数; l_i 和 \hat{l}_i 分别为第 i 个测量点的实测值和模型测量值。

由表 2 可知:基于倾斜摄影技术构建的交通事故现场实景模型的测量误差均可控制在厘米级。基于航拍参数自动计算方法得到的事故现场三维实景模型的平均误差为 1.72%,测量精度为 3.54 cm,相

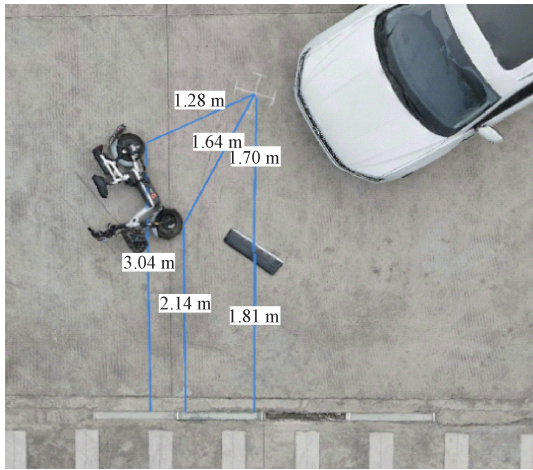


图 10 自动计算参数下模型测量结果

Fig. 10 Measurement results of model with parameters automatic calculated

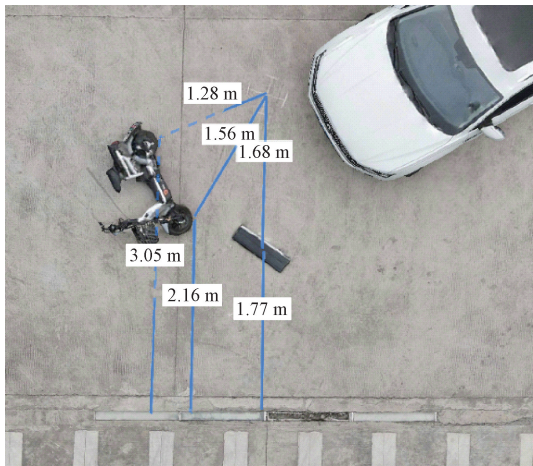


图 11 人工经验操作的模型测量结果

Fig. 11 Measurement results of model with manual operation experience

较于人工经验法平均误差降低 47.56%，测量精度提高 48.40%。

表 2 模型测量距离与实际测量距离对比

Table 2 Comparison between model measured distance and actual measured distance

实际	自动参数计算下模型			人工经验操作下模型		
实测值/cm	测量值/cm	误差量/cm	误差/%	测量值/cm	误差量/cm	误差/%
125	128	3	2.40	128	3	2.4
299	304	5	1.67	305	6	2.01
168	164	4	2.38	156	12	7.14
214	214	0	0	216	2	0.93
173	170	3	1.73	168	5	2.89
185	181	4	2.16	177	8	4.32
平均误差 = 1.72%				平均误差 = 3.28%		
RMSE = 3.54				RMSE = 6.86		

3 结论

1) 交通事故现场的三维实景建模的无人机航拍关键参数主要有云台角度、飞行高度和拍摄间隔角。通过分析关键参数与成像范围、成像精度以及与图像重叠度的数值关系,构建一种无人机航拍关键参数的计算方法。

2) 实例验证结果证明:应用该方法计算无人机航拍关键参数得到的航拍方案能够有效完成事故现场的图像采集,构建的三维实景模型可全面、清晰地呈现事故现场信息。与人工经验操作法相比,该模型精度更高,平均误差降低 47.56%,测量精度提高 48.40%。

3) 该方法可以降低无人机环绕交通事故现场航拍对人工经验的依赖,但由于试验场地以及可用无人机类型的限制,不同型号的无人机在不同场景范围的交通事故现场倾斜摄影的航拍参数计算及优化有待进一步深入研究。

参考文献

[1] 李杰, 曾叙枫, 孙领, 等. 全国道路交通安全水平的时空布局演化研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(12): 136-143.
LI Jie, ZENG Xufeng, SUN Ling, et al. Research on temporal and spatial evolution of road safety in China[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(12): 136-143.

[2] PADUA L, SOUSA J, VANKO J, et al. Digital reconstitution of road traffic accidents: a flexible methodology relying on UAV surveying and complementary strategies to support multiple scenarios[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(6): DOI:10.3390/ijerph17061868.

[3] FATMA O, HANAN A M, MUHAMMAD A. Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: recent advances and challenges[J]. Transportation Research Part A, 2020, 141: 116-129.

[4] CERRETA J S, BURGESS S S, COLEMAN J. UAS for public safety operations: a comparison of UAS point clouds to terrestrial lidar point cloud data using a FARO scanner[J]. International Journal of Aviation Aeronautics and Aerospace, 2020, 7(1): DOI: 10.15394/ijaaa.2020.1432.

[5] RAFAEL R C, CLAUDE T A, MARCELO M D, et al. Laser scanner and drone photogrammetry: a statistical comparison

- between 3-dimensional models and its impacts on outdoor crime scene registration[J]. *Forensic Science International*, 2022, 330: DOI: 10.1016/j.foresciint.2021.111100.
- [6] 李亚飞, 刘明欢, 王莉莉. 建筑物影响下的无人机城区运行风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(7): 136-142.
LI Yafei, LIU Minghuan, WANG Lili. Risk assessment of urban UAV operation under influence of buildings[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(7): 136-142.
- [7] ROK K, MATJAZ N P, DARJA T. Using the scanners and drone for comparison of point cloud accuracy at traffic accident analysis[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 135: DOI: 10.1016/j.aap.2019.105391.
- [8] KIM J, KIM S, CHOI J, et al. 3D reconstruction of traffic accident scene using drone & Pix4D[J]. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 2019, 27(12): 941-947.
- [9] 向怀坤, 陈淑仪. 超低空无人机交通事故现场三维建模勘测系统设计[J]. *深圳职业技术学院学报*, 2020, 19(1): 29-33.
XIANG Huaikun, CHEN Shuyi. Design of traffic accident scene 3D modeling and survey system based on ultra low altitude UAV[J]. *Journal of Shenzhen Polytechnic*, 2020, 19(1): 29-33.
- [10] AMIN M A M, ABDULLAH S, MUKTI S N A, 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(B2): 451-458.
- [11] MOHAMAD N I N, KHAIRUL N T, GYANU R. M, et al. Reconstructing 3D model of accident scene using drone image processing[J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2023, 13(4): 4 087-4 100.
- [12] 郑金子, 杨奇, 刘君, 等. 道路交通事故现场实景三维建模技术研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(增1): 138-144.
ZHENG Jinzi, YANG Qi, LIU Jun, et al. Research on 3D real scene reconstruction for road traffic accidents[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(S1): 138-144.
- [13] 刘春, 曾劲涛, 张书航, 等. 面向单体异形建筑的无人机单相机实景三维建模[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2018, 46(4): 550-556.
LIU Chun, ZENG Jintao, ZHANG Shuhang, et al. True 3D modelling towards a special-shaped building unit by unmanned aerial vehicle with a single camera[J]. *Journal of Tongji University: Nature Science*, 2018, 46(4): 550-556.
- [14] JUAN A P, GIL R G, JUAN R M B, et al. Low-cost tools for virtual reconstruction of traffic accident scenarios[J]. *Heliyon*, 2024, 10(9): DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29709.
- [15] 余加勇, 薛现凯, 陈昌富, 等. 基于无人机倾斜摄影的公路边坡三维重建与灾害识别方法[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 77-86.
YU Jiayong, XUE Xiankai, CHEN Changfu, et al. Three-dimensional reconstruction and disaster identification of highway slope using unmanned aerial vehicle-based oblique photography technique[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 77-86.
- [16] CH/Z 3005—2010, 低空数字航空摄影规范[S].
CH/Z 3005—2010, Specifications for low-altitude digital aerial photography[S].
- [17] ABDULLAH M A, MOHAMMAD R A, ABDULLAH K A. Accuracy assessment of small unmanned aerial vehicle for traffic accident photogrammetry in the extreme operating conditions of Kuwait[J]. *Information*, 2020, 11(9): DOI: 10.3390/info11090442.
- [18] 孙保燕, 韦龙华, 周鑫, 等. 基于消费级无人机的突兀大高差场地三维建模[J]. *测绘通报*, 2021(7): 111-116.
SUN Baoyan, WEI Longhua, ZHOU Xin, et al. 3D modeling of abrupt large elevation difference field based on consumer UAV[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(7): 111-116.
- [19] GIANFRANCO F, ELISA D, FABRIZIO D, et al. Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with On-Board RTK positioning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): DOI: 10.3390/rs10020311.
- [20] 刘聪, 魏志强, 韩红蓉, 等. 侧风作用下无人机旋翼悬停状态气动响应分析[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(9): 106-112.
LIU Cong, WEI Zhiqiang, HAN Hongrong, et al. Aerodynamic response analysis of unmanned aerial vehicle rotor hovering under crosswind influence[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(9): 106-112.

作者简介: 胡焱松 (1992—),男,湖北黄冈人,博士研究生,研究方向为道路交通安全及交通事故预防。E-mail: huyansong12369@163.com。

