

基于倾斜测量技术的区域无人机 航空应急测绘系统设计

林双波

(内蒙古赤峰市不动产登记中心, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要: 对灾区实际数据进行精准的获取、处理与传输是应急测绘中迫切需要解决的问题; 为提高区域无人机航空应急测绘精度, 利用倾斜测量技术, 从硬件和软件两个方面, 设计区域无人机航空应急测绘系统; 设计传感器、驱动器和航空控制器, 保证无人机能够按照指定航线飞行, 加装倾斜摄影元件, 为倾斜测量技术提供硬件支持, 调整无人机航空发动机保证飞行动力, 根据应急情况对硬件设备进行特殊处理; 在测绘区域内, 规划无人机的航行轨迹, 利用倾斜测量技术, 获取区域影像数据; 通过匀光匀色、畸变校正两个步骤, 实现初始影像的预处理; 计算区域主体的几何数据, 通过制图与标注, 得出系统的应急测绘结果; 系统测试结果表明, 设计系统的测绘范围更大, 主体面积和位置的测绘误差分别降低约 0.7 km^2 和 1.2 km^2 , 能够有效提高区域无人机航空应急测绘精度。

关键词: 倾斜测量技术; 区域测绘; 无人机; 航空摄影; 应急测绘系统

Design of Regional UAV Aviation Emergency Surveying and Mapping System Based on Tilt Measurement Technology

LIN Shuangbo

(Inner Mongolia Chifeng Real Estate Registration Center, Chifeng 024000, China)

Abstract: It is an urgent issue that needs to be addressed for the accurately obtaining, processing, and transmitting the actual data of the disaster areas in emergency surveying and mapping. In order to improve the regional drone aviation emergency surveying and mapping precision, a regional drone aviation emergency surveying and mapping system is designed using the tilt measurement technology from both hardware and software aspects. The sensors, drivers, and aviation controllers of the system is designed to ensure that the drones can fly according to the designated routes, the tilt camera components are installed to provide the hardware support for the tilt measurement technology, the drone aviation engines are adjusted to ensure the flight power, and perform the special handling of hardware equipment according to emergency situations. The navigation trajectory of the drone is planned within the surveying and mapping area, and the tilt measurement technology is used to obtain the regional image data. The initial image is preprocessed through two steps of the uniform light and color, and distortion correction. The geometric data of regional entity is calculated, and the emergency mapping results of the system are obtained through the mapping and annotation. The testing results show that the designed system has a larger surveying range, the surveying errors of the main area and position are approximately 0.7 km^2 and 1.2 km^2 , respectively, which can effectively improve the regional unmanned aerial vehicle aviation emergency surveying and mapping precision.

Keywords: tilt measurement technology; regional surveying and mapping; UAV; aerial photography; emergency surveying and mapping system

0 引言

测绘是对地面上已经存在的特征点和界线进行选择, 并利用测量手段获得能够反映地面现状的图形和位置信息的方法, 其被用于工程建设、规划设计和行政管理。应急测绘指的是为国家应对突发公共事件有效地提供地图、基础地理信息数据的服务^[1-2]。灾害发生后, 由于现场通讯设备受损、通讯网络中断等原因, 使得现场测量数据不能及时准确地传输, 而利用无人机开展现场测量, 可以突破测绘工作时空尺度的局限, 为现场的抢险救灾和应急管理提

供有价值的技术支持。

文献 [3] 中提出的基于三维激光扫描技术的应急测绘系统, 利用三维激光扫描技术, 获取地质灾害危险区域的三维坐标数据, 为地质灾害应急处置工作提供基础保障。文献 [4] 中提出的基于视频帧与 GIS 系统匹配技术的应急测绘系统, 通过提取视频帧影像与 GNSS/IMU 数据实时同步, 依据 GNSS/IMU 数据类型, 实现帧影像纠正, 具有较好的测绘效果。然而上述系统在实际运行过程中, 存在测绘误差大的问题。

针对上述问题, 设计了基于倾斜测量技术的区域无人

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-06-09。

作者简介: 林双波(1979-), 女, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 林双波. 基于倾斜测量技术的区域无人机航空应急测绘系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 15-21.

机航空应急测绘系统。无人机倾斜摄影技术主要利用无人机平台搭载多个传感器,实现摄影采集。倾斜摄影技术可以实现对地物的多视角精确观测,在实际地形测量中可以得到理想的结果。将倾斜测量技术应用到区域无人机航空应急测绘系统的设计中,以期提升系统的应急测绘精度。

1 区域无人机航空应急测绘硬件系统设计

设计的区域无人机航空应急测绘系统以硬件执行环境作为主要集成结构,并为测绘功能的实现提供硬件支持。

1.1 传感器与驱动器

系统中设计的传感器主要用来监测无人机的实时运动数据,而驱动器为无人机飞行提供动力支持,同时实现对倾斜摄影元件的驱动。在无人机设备上安装 MEMS 传感器,传感器中的核心运行元件是 MPU9250 九轴惯性测量单元,包括了 3 轴陀螺仪、3 轴加速度计、3 轴磁强计和数字运动处理单元,其内部工作电路结构如图 1 所示。

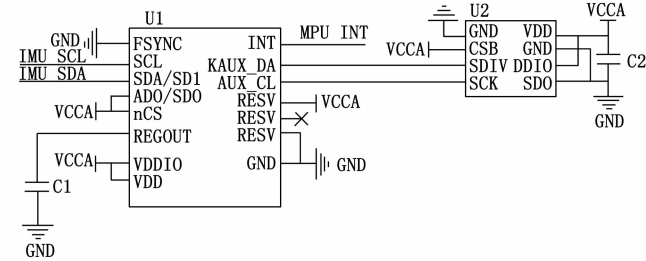


图 1 无人机传感器内部工作电路图

图 1 所示的传感器实现了对三轴的加速度、角速度和三轴的磁场信息的采集。这样就可以确保同时读取 9 个坐标系的坐标,同时读取 9 个坐标系的坐标,从而达到最大程度的一致。MEMS 传感器具有 I2C 和 SPI 两种接口,该 I2C 总线可以对外部的传感器进行读取。图 1 中 SDA、SCL 这两个引脚被用作数据线和时钟线,因为无人机携带的装置较多,同时也要考虑到无人机主板的体积,所以,可以通过 I2C 接口来与内部控制器进行通讯,从而可以降低线路的数量,减小主板的体积,同时还可以降低主控 GPIO 的占用率。除 MEMS 传感器外,还装设了 MS5540C 型号的数字大气压力传感器,该设备能够实现温度补偿和校正功能,对无人机的飞行环境气压进行实时监测,保证无人机的飞行安全。

无人机采用电机驱动方式,相应的驱动器设备由电子调速器和电机两部分组成,其中电机选用的是无刷直流电机,能够满足无人机对电机的基本要求。而电子调速器能够利用主控器输出的 PWM 调制信号来控制电机的转速,从而使电机闭环运行,并对电机施加了一个电子变相,达到了对无刷电机的保护。在设计系统中,在传统驱动电路的基础上加入一个稳压二极管,电机在掉电或者停止运转时,产生的反向电动势会对电机造成冲击,会对电机造成损伤,稳压二极管起到保护电机的作用,消耗掉多余的反向电动势,并通过 MOS 管来完成对驱动电流的放大。

1.2 无人机航空控制器

无人机中航空控制器的工作内容是控制无人机的飞行运动参数,保证无人机能够精准地按照应急测绘路线航行^[5]。设计系统选择的航空控制器型号为 STM32F4,其内部结构如图 2 所示。

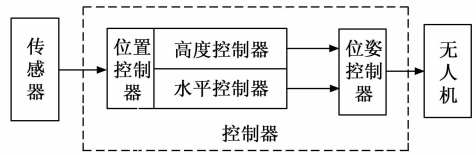


图 2 无人机航空控制器结构图

选择的航空控制器以 Cortex-M4 为内核结构框架,传感器模块是控制器主要连接的外部设备,需要用到 I2C 接口电路和外部终端,利用四路 PWM 波与驱动电机相连,用 ADC 来对实时供电的电池电量进行检测,系统固件 DE-BUG 端口,选用 SWD 接口来进行调试,系统是一款低功耗产品,因此必须对其进行低功耗的考虑和唤醒设计。

1.3 倾斜摄影元件

设计系统中应用了倾斜测量技术,为保证该技术的正常运行,需在硬件系统中安装相应的倾斜摄影元件。在考虑分辨率、辐射特性、电子快门速度等性能的情况下,倾斜仪作为倾斜摄影元件,在实际应用过程中,由于无人机引擎振动可能会导致数据采集质量降低^[6]。所以在倾斜摄影相机元件安装过程中,在无人机与倾斜仪之间加装稳定装置,可以有效地改善无人机与倾斜仪间的振动。

1.4 无人机航空发动机

由于传感器、控制器、倾斜摄影元件的加设,提高了无人机的机体重量,因此普通无人机常用的发动机已无法满足无人机的航空飞行要求,因此需要对航空发动机进行调整。设计应急测绘系统中,采用排量更大的 DLE120CC 发动机^[7],其组成结构如图 3 所示。

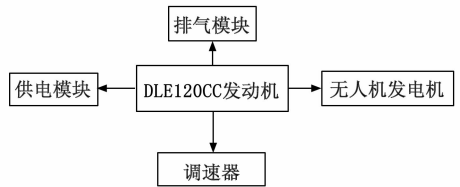


图 3 无人机航空发动机组成结构图

将图 3 所示的航空发电机与无人机传感器与航空控制器相连,保证无人机控制终端能够监测到实际的飞行状态,并在低能量损耗情况下,及时调整发动机参数,避免出现空中熄火事件^[8]。另外,由于无人机航空发动机排量的提升,能够有效提高设备的抗风性,从而适应应急测绘项目的极端环境条件。

1.5 应急测绘项目的特殊设计

根据区域无人机航空应急测绘系统实际测绘区域的自然环境特征,对相关设备进行针对性调整。若测绘区域为

高寒地区，则需要对倾斜摄影相机进行温控处理，通过在倾斜仪外部设置温度调节腔，并在该腔内设置隔热和阻热材料，减少倾斜仪与外部的热交换，促进其内部的导热，实现倾斜仪内部的热均衡，并为倾斜仪的主动温度控制提供有利的条件^[9]。为了保证机载供电电池在较低的温度条件下仍能工作，在电池上安装了电加热薄膜，并且通过温控装置对蓄电池的温度进行控制。系统采用了一台温控器与一台热敏电阻器相结合的温控装置，实现了对电池的实时监控，并按照地面的命令对电池进行加温或停温。而当测绘区域气压过高时，可以在无人机外部添加一个保护套，保护套使用的材料密度需高于无人机本身材料，提高无人机的坚硬度。同理，针对不同的区域环境特征，对相关元件进行相应处理。

2 区域无人机航空应急测绘系统软件功能设计

在硬件设备的支持下，设计系统的区域无人机航空应急测绘功能，测绘系统主要包括测量和绘制两个步骤，具体的执行流程如图 4 所示。

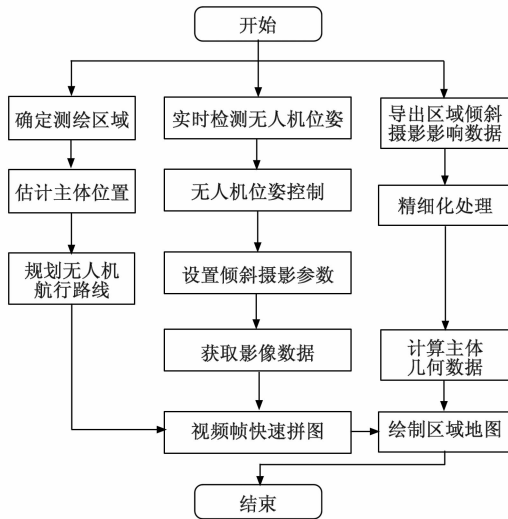


图 4 区域无人机航空应急测绘流程图

在倾斜测量技术的支持下，利用无人机获取测量数据，通过对区域位置信息的测算，得出区域内各个组成主体的数据测量结果，最终将其制成可视化图像，得出区域测绘系统的输出结果。为了满足系统的应急测绘需求，需要尽量提高相关元件的运行速度。

2.1 规划区域无人机航空飞行轨迹

2.1.1 计算无人机航空飞行高度

综合考虑测绘区域空间分布、区域灾害等情况，计算无人机的飞行高度范围。首先利用式 (1) 计算无人机的航空摄像高度：

$$H_{\text{Aerial photography}} = f \cdot A \cdot \sigma \quad (1)$$

其中： f 为无人机航摄的焦距值， A 和 σ 分别为相机像元大小和地面分辨率。由于无人机在空中航摄的过程中受到了气流等因素的影响，导致无人机不能一直维持着一条

直线，从而造成了航向的扭曲，与此同时，航摄区域的地面地形也是凹凸不平的，这些因素都会对航摄相片的实际航向重叠度产生一定的影响^[10]。为了确保后期相片立体量测和拼接的需求，需要计算无人机的飞行高度范围，计算结果如下：

$$\begin{cases} H_{\max} = f \cdot A \cdot \sigma_{\min} \\ H_{\min} = f \cdot A \cdot \sigma_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中， σ_{\min} 和 σ_{\max} 分别为采集航拍影像分辨率的最小值和最大值。

2.1.2 区域无人机航空飞行轨迹生成与更新

在应急测绘区域周围选择无人机的起降场，得出无人机的初始飞行位置，标记为 (x_0, y_0) ，根据起降场与测绘目标区域之间的空间位置，确定无人机的初始飞行方向。假设区域内待测绘的主体数量为 $N_{\text{main body}}$ ，第 i 个主体的位置坐标为 (x_{mi}, y_{mi}) ，则可以利用式 (3) 对无人机起降场和测绘主体之间的距离进行度量。

$$d(m_i) = H_{\max} - H_{\min} \sqrt{(x_{mi} - x_0)^2 + (y_{mi} - y_0)^2} \quad (3)$$

同理可以得出区域内所有主体与起降场之间的距离度量结果，并选择距离最短的主体作为无人机的第一个测点，在已知该主体位置的情况下，生成对应飞行轨迹为：

$$y = \frac{(x_{d_m} - x_0)(y_{d_m} - y_0)}{x_{d_m} - x_0} + y_0 \quad (4)$$

在实际运行过程中，由于测绘主体位置坐标是系统的主要测绘内容，因此在航迹生成过程中输入的主体位置信息均为预估信息。利用传感器设备获取无人机的实时航行位置，搜索与无人机当前位置最近的主体，利用式 (4) 生成相应的飞行轨迹，直到区域内所有主体均被遍历为止^[11]。在无人机的实际航空飞行过程中，需要利用内置的传感器设备检测初始生成的轨迹上是否存在障碍，若存在障碍，则需要重新生成飞行轨迹点，飞行轨迹点的更新结果为：

$$\begin{cases} x_{i\text{-binder}} = y(x_i \pm \Delta\delta_x) \\ y_{i\text{-binder}} = y(y_i \pm \Delta\delta_y) \end{cases} \quad (5)$$

其中： (x_i, y_i) 和 $(x_{i\text{-binder}}, y_{i\text{-binder}})$ 分别为存在障碍的初始轨迹点及其更新结果， δ_x 和 δ_y 对应的是水平和垂直方向上的调整量^[12]。最终将更新轨迹点添加到原飞行轨迹中，与前、后轨迹点相连，得出区域无人机航空飞行轨迹的更新结果。

2.2 利用倾斜测量技术获取区域影像数据

利用无人机及其内置的倾斜仪设备，获取应急测绘区域内的影像数据，倾斜测量影像数据的采集原理如图 5 所示。

在数据采集前，首先需要对无人机上的倾斜仪进行标定处理。将生成的航空飞行轨迹导入到无人机中，利用控制器设备，保证无人机能够在指定的飞行高度上按照规划轨迹飞行^[13]。为了保证获取的倾斜测量影像数据能够满足系统的应急测绘精度需求，需要对相机的曝光频率进行设置，设置结果如下：

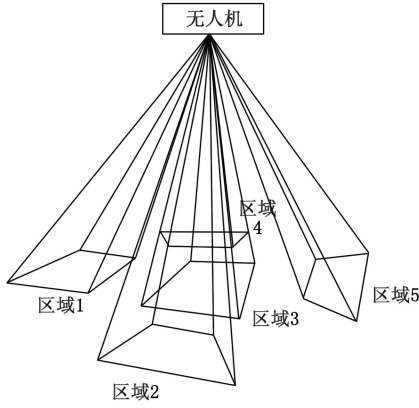


图 5 倾斜测量影像数据采集原理图

$$\omega = \frac{v_{UAV}}{W} \quad (6)$$

其中： v_{UAV} 和 W 分别为无人机的飞行速度和拍摄影像的有效航向幅宽，上述变量的计算公式为：

$$\begin{cases} v_{UAV} = \omega \left(\frac{\zeta_2}{3 \left(\frac{\zeta_1 + \zeta_2}{r_{locus}^2} \right)} \right)^{1/4} \\ W = \kappa_{overlapping} b \frac{H}{f} \end{cases} \quad (7)$$

其中： ζ_1 和 ζ_2 均为常量参数， r_{locus} 为生成飞行轨迹半径， $\kappa_{overlapping}$ 为影像之间的有效重叠系数， b 和 H 分别对应的是相机底片航向幅宽和相对飞行高度^[14]。在无人机倾斜影像获取过程中，采集参数满足如下条件：

$$\begin{cases} L_{horizontal-max} = H \times \tan(\theta + \vartheta) \\ L_{horizontal-min} = H \times \tan(\theta - \vartheta) \end{cases} \quad (8)$$

式中， θ 和 ϑ 分别为无人机机载倾斜仪的倾斜角度和可视角度， $L_{horizontal-max}$ 和 $L_{horizontal-min}$ 对应的是无人机与生成多视倾斜影像中对应地物水平距离的最大值和最小值。同时启动无人机飞行程序和影像采集程序，通过实时区域成像，得出初始影像的获取结果。

2.3 初始区域影像预处理

2.3.1 影像匀光匀色

在无人机航空的影像数据采集过程中，由于拍摄角度不同，导致得到的影像数据可能存在光纤与色度不一致的情况，影像对测绘主体的识别与测量精度，因此需要对初始采集的影像数据进行匀光匀色处理^[15]。影像的匀光匀色处理过程可以描述为：

$$I_{Uniform\ light}(x, y) = I(x, y)\kappa_{multiply} + \kappa_{add} \quad (9)$$

式中， $I(x, y)$ 为初始采集的影像数据， $\kappa_{multiply}$ 和 κ_{add} 分别为乘系数和加系数，参数 $\kappa_{multiply}$ 和 κ_{add} 的求解公式为：

$$\begin{cases} \kappa_{multiply} = \kappa_{brightness} g_{target} + (1 - \kappa_{brightness}) g_{avg} \\ \kappa_{add} = \frac{\kappa_{expand} \hat{\xi}_{target}}{\kappa_{expand} \hat{\xi}_{standard} + (1 - \kappa_{expand}) \hat{\xi}_{target}} \end{cases} \quad (10)$$

其中： $\kappa_{brightness}$ 、 κ_{expand} 分别为图像的亮度系数和扩展系数， g_{target} 和 g_{avg} 分别为灰度目标值和平均值， $\hat{\xi}_{standard}$ 和 $\hat{\xi}_{target}$ 分别为标准偏差和影像局部灰度偏差的目标值。将式 (9)

的计算结果代入式 (8) 中，即可得出区域倾斜测量影像的匀光匀色处理结果。

2.3.2 畸变校正

区域影像中可能存在畸变，可分为径向畸变和切向畸变两个部分，区域影像畸变的处理结果可以表示为：

$$\begin{cases} x_{rectify} = \beta_x x_0 + \beta_y y_0 \\ y_{rectify} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中： β_x 和 β_y 分别为影像畸变校正参数在水平和竖直两个方向上的分量，上述参数的具体取值可根据影像畸变量直接得出。利用式 (10) 对初始区域影像中的所有像素点进行校正，得出畸变校正处理结果。

2.4 计算测绘主体几何数据

区域范围内需要测绘的主体包括：房屋建筑、植被、道路、水体等，并根据不同主体的结构与纹理特征，设置各个测绘主体的标准特征向量，将其标记为 ϕ_i 。那么在测绘主体几何数据计算开始前，首先需要对倾斜影像中的主体进行识别并分割^[16]。利用灰度共生矩阵提取区域倾斜影像的纹理特征，具体包括主对角线惯性矩、局部均匀性、灰度相关等，其中主对角线惯性矩和局部均匀性的提取结果可以表示为：

$$\begin{cases} \psi_{inertia} = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} |i-j|^k P_{ij} \\ \psi_{homogeneity} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{P_{ij}}{1+|i-j|^k} \end{cases} \quad (12)$$

式中， i 和 j 为影像中任意像素点及其相邻节点的灰度值， k 为灰度梯度等级， P_{ij} 为倾斜影像中每种 (i, j) 值出现的频率。同理可以得出初始影像中所有纹理特征向量的提取结果。根据影像纹理之间的差异，对影像进行分割，设置图像分割阈值为 ζ ，则影像分割结果可以表示为：

$$I_{cut\ apart}(x, y) = \begin{cases} 1 & I(x, y) > \zeta \\ 0 & I(x, y) \leq \zeta \end{cases} \quad (13)$$

通过式 (13) 的处理，得到的 $I_{cut\ apart}(x, y)$ 为一幅二值图像，相当于将源图像用空间占有数组来进行表达。将提取的所有影像特征进行融合处理，得出影像的综合特征提取结果，记为 ψ_{draw} 。在此基础上，将当前区域倾斜影像特征与设置的标准特征进行匹配，得出影像主体的识别结果：

$$s(i) = \frac{\psi_{con} \cdot \phi_i}{\|\psi_{con}\| \cdot \|\phi_i\|} \quad (14)$$

将相关数据代入式 (14) 中，即可得出当前影像特征与主体 i 对应标准特征之间的匹配结果。若计算得出 $s(i)$ 的值高于阈值 $s_0(i)$ ，说明当前影像中对应主体为 i ，否则需要替换主体及其标准特征，直到满足匹配要求位置^[17]。以测绘的房屋建筑主体面积为例，该主体的几何数据计算公式如下：

$$A_{house} = \sum_{i=1}^{N_{house}} c_i \times u_i \times s(i) \quad (15)$$

其中： c_i 和 u_i 分别为第 i 个房屋建筑的长度和宽度， N_{house} 为区域影像中包含的房屋建筑数量。而在植被几何数

据计算过程中, 需要根据可见光植被指数, 进一步确定植物类型。不同植物可见光植被指数的计算公式如下:

$$\varphi = \frac{2\lambda_{\text{green}} - \lambda_{\text{red}} - \lambda_{\text{blue}}}{2\lambda_{\text{green}} + \lambda_{\text{red}} + \lambda_{\text{blue}}} A_{\text{house}} \quad (16)$$

式中, λ_{green} 、 λ_{red} 和 λ_{blue} 分别为区域倾斜影像中绿光、红光、蓝光的波段, 基于此可以得出任意植被的几何数据的计算结果。在实际的测绘主体几何数据过程中, 由于使用影像存在一定的拍摄角度, 因此需要对主体几何数据进行倾斜校正, 校正处理过程为:

$$A' = \varphi A \times \tan\theta \quad (17)$$

由此得出系统中所有应急测绘主体几何数据的精准计算结果。

2.5 实现区域无人机航空应急测绘

按照区域无人机航空倾斜测量结果, 结合区域测绘主体几何数据的求解结果, 采用地图制作的方式得出系统的应急测绘结果。在系统内新疆一个测绘工程, 将倾斜测量数据导入索引文件中, 经过实景建模与数据转换后, 在界面对测绘主体地物进行编辑, 实现对测绘主体的准确勾画^[18]。根据系统输出应急测绘图像大小与实际主体地物之间的尺寸关系, 确定目标对象的实际测绘数值, 该数值的求解结果为:

$$w' = w \times \tau \times A' \quad (18)$$

其中: w 和 w' 分别为区域主体地物的真实数据和测绘数据, τ 为设置的比例尺。在完成一个主体地区的测绘后, 计算其周围主体与该主体之间的距离, 通过比例尺的转换确定具体测绘位置, 重复上述操作得出下一主体的测绘结果^[19-20]。最终将各个测绘主体进行组合, 并利用硬件系统中的显示器设备进行可视化输出, 完成系统的区域无人机航空应急测绘工作。

3 系统测试

为验证设计的基于倾斜测量技术的区域无人机航空应急测绘系统的有效性, 进行测试分析。在系统测试过程中, 将系统硬件、软件作为一个整体, 采用白盒测试方式, 在已知目标区域精准主体信息的情况下, 判断系统的测绘结果是否与实际位置信息一致, 从而得出系统测绘精度的测试结果。为验证设计系统在精度方面的优势, 设置文献[3]系统和文献[4]系统作为对比系统, 且与设计系统在同样的实验环境中运行, 从而确保实验的准确性, 通过具体指标的统计与对比, 验证设计系统的效果。

3.1 无人机选型与试飞检查

为满足系统的航空倾斜测量要求, 适应研究区域的气象条件, 选择 Tello 型号的四轴无人机作为飞行平台, 该无人机由云台、图传设备等部分组成, 无人机的外壳选用树脂复合材料, 机身采用镁铝合金, 机臂为碳纤维材质, 有效载荷 1.39 kg, 机身内置了卫星定位模块。从无人机的飞行性能方面来看, 无人机的平飞速度和垂直起降速度分别为 10 m/s 和 4 m/s, 最高飞行高度能够达到 600 m, 最大荷载量为 5 kg, 具有良好的抗风性能, 能够在 5 级风环境下

正常飞行。在正常飞行状态下, 无人机的续航能力能够达到 45 min 左右。为保证选择的无人机能够在目标环境中正常运行, 需要在实验开始前对无人机进行试飞检查。在起飞前, 无人机需要进行俯仰、速度、遥控器等多个方面的测试, 其中俯仰测试是为了确保陀螺仪的零点和俯仰角度都是正确的。在无人机模式中, 当飞机的纵倾发生改变时, 判断纵倾发生改变。在进行空速检测时, 用手将空速表前面的空气挡住, 此时空速表上的数值为 0, 如果不是 0, 应重设 0。用手指将空速管塞紧, 稍微挤压一下, 空速指示器上的数值应该逐步增大, 或维持不变, 否则就会出现漏气或堵塞的情况。接通遥控器, 确认 RC 与 RPV 的控制方式转换正确, 检测远程控制的信道状态。若觉得操纵量过大, 则可由遥控器调整操纵杆的操纵杆行程。远程控制, 最大可达到 20 m。关掉遥控, 进入无人驾驶模式。此外, 还要检测无人驾驶飞机的振动状况, 也就是启动引擎, 观测各种速度下的传感器和操纵杆的振动状况, 尤其是地面上显示的姿态参数。所有的弹跳都要控制在一个较小的幅度内, 否则就需要改善缓冲装置。

3.2 选择应急测绘目标区域

为了保证实验结果的可信度, 系统测试实验以多个研究区域作为测绘目标, 且保证选择的研究区域之间存在明显的地形差异。此次实验选择的测绘目标可以分为林地、城市和山区 3 种类型, 其中, 林地研究区域选择某人工实验林场, 区域面积为 8 652 km², 与城市建筑相比, 林地区域地形较为复杂, 海拔范围达到 200~350 m, 林地森林覆盖率达到 70% 以上, 种植的植被种类包括落叶松、云杉、油松等。城市选择的是某市主城区, 主城区内由公共建筑和居民建筑两部分组成, 城区总面积约为 6 786 km²。而山区选择的是某铁矿矿山, 其地貌特点是具有典型的低山丘陵地形, 研究区域的土壤土层很薄, 主要是裸岩、碎石和砂砾, 以及大量的水体, 区域面积为 9 464 km²。在应急测绘系统运行前, 首先确定测绘主体, 并记录各测绘主体的实际数据信息。其中, 部分测绘主体的实际数据如表 1 所示。

表 1 应急测绘目标区域部分主体真实数据表

区域类型	测绘主体名称	面积/km ²
林地	落叶松种植区	1 579.4
	云杉种植区	968.7
	油松种植区	943.6
城市	市图书馆	374.5
	中心广场	644.2
	市体育馆	853.0
	博物馆	479.3
山区	街心公园	125.8
	1号山体	2 570.1
	2号山体	2 688.2
	水体	2 793.7

除表 1 数据外, 还需要标记各个主体中心点的位置坐

标。由于大部分主体为不规则形状，因此此次实验未记录主体长度和宽度，也未对长度、宽度数据进行效果测试。

3.3 设定倾斜测量技术运行参数

以配置的无人机平台作为背景，设置倾斜测量影像的分辨率为 2.0 ppi，航空比例尺为 1 : 100，航向与旁向重叠指数分别为 80% 和 60%，倾斜仪间距为 20 m，倾斜仪频率为 50 Hz，焦距为 48 mm，倾斜仪测量结果以 16 : 9 的格式输出。

3.4 描述系统测试过程

采用各个研究地区的天地图作为基础底图，使用 GDAL、OSGEarth 等开源软件，实现对设计基于倾斜测量技术的区域无人机航空应急测绘系统的开发。在实验过程中，将设定的倾斜测量技术运行参数输入到无人机中，通过对目标区域的分析生成航行路线，倾斜影像数据的获取结果。林地区域的倾斜影像如图 6 所示。



图 6 林地区域倾斜影像示意图

在此基础上，通过影像分析、几何信息计算、地图绘制等步骤，输出系统的应急测绘结果，如图 7 所示。

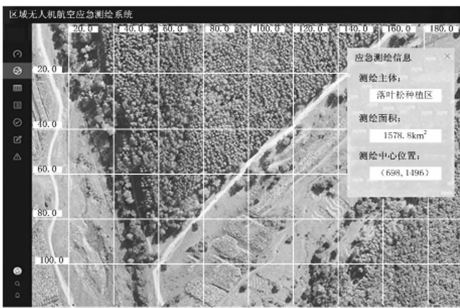


图 7 林地区域无人机航空应急测绘系统输出结果

按照上述方式可以得出城市以及山区研究区域的应急测绘输出结果。将设置的文献 [3] 系统和文献 [4] 系统对比系统分别标记为对比系统一和对比系统二，重复上述操作，实现对比系统的开发与运行，并得出相应的输出结果。

3.5 设置系统测试指标

设置测绘范围占比指标反映系统的应急测绘范围，该指标的计算公式为：

$$\mu_{\text{survey and draw}} = \frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{total}}} \quad (19)$$

式中， A_{out} 和 A_{total} 分别为输出的应急测绘面积和研究区域的总面积。系统测绘精度的测试指标设置为主体面积测绘误差和主体位置测绘误差，其中，主体面积测绘误差的计算公式为：

$$\epsilon_A = A_{\text{out}} - A_{\text{reality}} \quad (20)$$

其中： A_{out} 为系统实际输出的主体测绘面积， A_{reality} 为目标主体的实际面积。另外，主体位置测绘误差的计算公式如下：

$$\epsilon_p = (x_{\text{out}} - x_{\text{reality}}) + (y_{\text{out}} - y_{\text{reality}}) \quad (21)$$

式中， $(x_{\text{out}}, y_{\text{out}})$ 和 $(x_{\text{reality}}, y_{\text{reality}})$ 分别为主体中心点的测绘位置坐标和实际位置坐标。最终计算得出测绘范围占比越大，测绘误差越小，说明系统的测绘功能与精度越优。

3.6 系统测试结果与分析

通过相关数据的统计，得出研究区域场景测绘范围的测试结果，如表 2 所示。

表 2 系统测绘区域范围测试数据表 km^2

测绘区域	对比系统一输出实际测绘面积	对比系统二输出实际测绘面积	设计应急测绘系统输出实际测绘面积
林地	8 351	8 488	8 640
城市	6 473	6 592	6 780
山区	9 124	9 315	9 461

将表 2 中的数据代入式 (19) 中，计算得出 3 个系统的平均测绘范围占比分别为 0.961、0.979 和 0.999。另外，主体面积测绘误差的测试结果如表 3 所示。

表 3 区域主体面积测绘误差测试数据表 km^2

测绘主体	对比系统一输出主体测绘面积	对比系统二输出主体测绘面积	设计应急测绘系统输出主体测绘面积
落叶松种植区	1 577.4	1 577.6	1 578.8
云杉种植区	967.8	968.2	968.5
油松种植区	942.5	942.9	943.4
市图书馆	373.3	374.1	374.5
中心广场	643.2	643.7	644.1
市体育馆	852.0	852.4	852.7
博物馆	478.1	478.6	479.1
街心公园	124.8	125.1	125.4
1 号山体	2 569.2	2 569.6	2 570.0
2 号山体	2 687.1	2 687.5	2 688.0
水体	2 792.5	2 793.2	2 793.6

将表 3 中的数据和表 1 中的数据代入式 (20) 中，得出 3 个系统的平均主体面积测绘误差分别为 1.15、0.69 和 0.22 km^2 。统计测绘主体的位置信息数据，通过式 (21) 的计算得出系统位置测绘误差的测试对比结果，如图 8 所示。

从图 8 中可以直观看出，设计系统的位置测绘误差明显低于两个对比系统，由此证明设计系统具有更高的应急

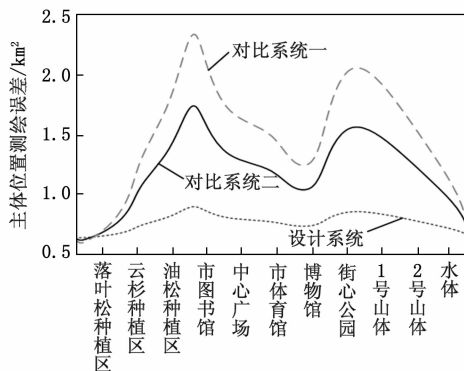


图 8 系统主体位置测绘误差测试对比曲线

测绘精度。

4 结束语

无人机因其体积小、成本低、使用方便等优点，可广泛用于基础测绘、国土空间规划、铁路、公路及水利等諸多领域。在此次研究中，通过倾斜测量技术的应用解决了无人机在数据收集过程中存在的遮挡问题，进一步提高了区域无人机航空应急测绘精度，从而提升了应急测绘系统的应用价值。而在实际应用中，测绘区域场地通常是比较复杂和变化的，通过这种方式可以使作业顺利开展，对数字测绘行业的长期发展具有重要意义。

参考文献：

[1] 毕卫华, 赵星涛, 杨化超, 等. 基于智能手机的无人机低空倾斜摄影测量系统及其应用研究 [J]. 国土资源遥感, 2021, 33 (2): 248-255.

[2] 王越, 何诚, 刘柏良, 等. 基于无人机倾斜摄影技术的单木参数提取及胸径模型构建 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2022, 42 (1): 166-173.

[3] 李洪梁, 施富强, 王立娟, 等. 基于三维激光扫描技术的金沙江“11·03”白格堰塞湖应急测绘研究 [J]. 金属矿山, 2021 (4): 154-159.

[4] 孟静, 王凤, 李玉琳, 等. 应急测绘视频帧与 GIS 系统匹配技术 [J]. 遥感信息, 2022, 37 (2): 91-96.

[5] 张丽军, 李焕喜, 曹志勇. 地形测绘中遥感影像维度估计算法研究 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (10): 235-238.

[22] FAN F, XIONG J, WANG G. Universal approximation with quadratic deep networks [J]. Neural Networks, 2020, 124: 383-392.

[23] 梁启花, 胡现韬, 钟必能, 等. 基于孪生网络的目标跟踪算法研究进展 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2022, 40 (5): 90-103.

[24] 冯珺, 彭梁英, 赵帅, 等. 基于孪生神经网络的小样本目标检测综述 [J]. 河北科技大学学报, 2022, 43 (6): 643-650.

[25] KOCH G, ZEMEL R, SALAKHUTDINOV R. Siamese Neu-

[6] 李忠武, 陈桂华. 基于无人机倾斜航空摄影三维点云测量同震倾滑变形研究——以 2021 年玛多 M_s7.4 地震地表破裂为例 [J]. 震灾防御技术, 2022, 17 (1): 46-55.

[7] 盛辉, 李凌昊, 刘树生, 等. 面向城市复杂区域的无人机倾斜摄影航线规划方法 [J]. 测绘通报, 2021 (1): 47-52.

[8] 向华林, 李秉兴. 单镜头无人机倾斜摄影测量的三维建模及精度评估 [J]. 测绘通报, 2022 (s2): 237-240.

[9] 王琼, 方怒放. 切沟形态特征无人机倾斜摄影测量 [J]. 农业工程学报, 2022, 38 (8): 107-114.

[10] 杨晓雪, 卞化梅, 朱姗姗. 基于无人机倾斜摄影的船舶航行图像重建研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43 (10): 61-63.

[11] 侯方国, 刘欣, 任秀波. 无人机倾斜摄影与 LiDAR 融合监测技术 [J]. 测绘通报, 2022 (11): 128-131.

[12] 丁涛, 付贵, 刘超, 等. 消费级无人机在 1:500 地形图测绘中的应用 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (6): 840-844.

[13] 刘飞, 朱庆, 丁雨淋, 等. 滑坡堰塞湖灾情无人机应急测绘、分析与险情模拟 [J]. 山地学报, 2021, 39 (4): 600-610.

[14] 吴家杰, 刘锬铭, 孙立恒, 等. 加权最小二乘优化倾斜摄影测量模型矢量化精度方法研究 [J]. 测绘通报, 2021 (4): 116-119.

[15] 曾超, 曹振宇, 曾珍, 等. 四川省应急测绘保障体系构建及实践 [J]. 测绘科学, 2021, 46 (11): 187-200.

[16] 郝彤, 王晓峰, 冯甜甜, 等. 地球系统多尺度关键区域与关键过程的智能化测绘 [J]. 测绘学报, 2021, 50 (8): 1084-1095.

[17] 蔡小超, 唐红涛. 运用倾斜摄影测量技术精细提取新疆皮山县地质构造定量参数 [J]. 地震研究, 2022, 45 (3): 468-478.

[18] 刘帅, 陈建华, 王峰, 等. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建 [J]. 地质科学, 2022, 57 (3): 945-957.

[19] 苗作华, 任磊, 王梦婷, 等. 露天矿山无人机倾斜摄影测量数据的准确性探究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (2): 164-168.

[20] 廖章回, 朱伟, 韦敏杰. 倾斜摄影测量的城市战场环境三维建模及可视化 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46 (10): 131-135.

[21] aral Networks for One-shot Image Recognition [C] //2015 32nd International Conference on Machine Learning (ICML 2015) Workshops, International Machine Learning Society, 2015: 125-132.

[26] 张皓云, 王武, 柴琴琴, 等. 滚动轴承轻量级深度故障诊断模型 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (3): 395-401.

[27] 池福临, 杨新宇, 邵思羽, 等. 基于深度收缩残差网络的轴承变工况故障诊断 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (4): 1146-1156.