

doi: 10.6046/gtzyyg.2020238
引用格式: 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. (Bi W H,Zhao X T,Yang H C. Research on smartphone based UAV low-altitude oblique photogrammetry system and its applications[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021,33(2):248-255.)

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

毕卫华^{1,3}, 赵星涛², 杨化超³, 卞和方³, 张秋昭³

(1. 皖北煤电集团有限责任公司,宿州 234002; 2. 北京帝信科技有限公司, 北京 100086; 3. 中国矿业大学环境与测绘学院,徐州 221116)

摘要: 为了促进无人机低空倾斜摄影系统的低成本、轻小型和易用性,通过融合 DJI Phantom 4 四旋翼轻小型无人机低空飞行平台和 Nokia 808 PureView 型智能手机构建了一套基于智能手机的无人机低空倾斜摄影测量系统。对其中的基于智能手机的多相机成像系统进行了相关功能的优化及模块化设计,包括相机成像质量改进措施、基于开源飞控研发的用于自动拍照控制的定位定向及飞行控制模块设计等,并给出了多相机成像系统作为任务载荷与飞行平台的集成模式并归纳了其工作流程。将构建的无人机低空倾斜摄影测量系统分别应用于不动产测量、城市建筑物三维重建、露天矿开采监测领域。经外业实测的检查点和目视评判结果表明,基于该系统获取的实景三维模型具有较好的纹理质量,相关数字测绘产品可达厘米级的定位精度。取得的成果对于无人机低空倾斜摄影系统的实用化发展具有借鉴意义。

关键词: 无人机; 飞行控制系统; 智能手机; 倾斜摄影测量; 三维重建

中图法分类号: P 239 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2021)02-0248-08

0 引言

近年来发展的无人机低空倾斜摄影测量技术通过多镜头、多视角摄影模式来获取被摄目标的高空间分辨率影像,同常规的基于单镜头的竖直摄影测量模式相比,该技术在提高了常规数字测绘产品质量的同时,还可以获得高精度的纹理细节较为丰富的实景三维模型,已被广泛应用于不动产测绘、国土资源监测及智慧城市建设等领域^[1-2]。无人机低空倾斜摄影测量系统的组成部分主要是无人机飞行平台及其所搭载的任务载荷。目前的无人机飞行平台多种多样,但主要包括 3 种,即固定翼、多旋翼以及集成二者优点的复合翼无人机^[3-4]。固定翼和复合翼无人机适合于大面积的航摄任务,而多旋翼无人机适合于小面积高精度的实际应用。无人机低空倾斜摄影测量系统多采用多目(一般为 4 目或 5 目)倾斜相机作

为任务设备,但现有的多目倾斜摄影相机系统由于本身体积和质量较大,其用于搭载的飞行平台多采用小型飞机或动力三角翼飞行器,甚至是大型运输机作为搭载平台。而目前广泛使用的适用于低空无人机搭载的倾斜相机多基于质量相对较轻的消费级数码相机进行改装集成,以适合实际的应用。促进无人机低空摄影测量系统的低成本和小型化对于普通用户而言具有实际意义。为此有研究者基于智能手机开展了相关研究应用。随着微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术的发展,智能手机中已经植入了多种 MEMS 传感器,如互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)相机传感器、加速度传感器(accelerometer)、陀螺仪(gyro-scope)以及我们所熟知的用于定位和导航等用途的全球导航定位系统(global positioning system, GPS)等^[5-9]。文献[10]将智能手机作为固定翼低空无人机的任务载荷来实现摄影测量应用,系统

收稿日期: 2020-07-31; 修订日期: 2020-10-22
基金项目: 国家重点研发计划项目“集成北斗/Galileo/LiDAR/倾斜摄影的智慧城市三维场景重建关键技术研究”(编号: 2017YFE0119600)资助。
第一作者: 毕卫华(1982-),男,硕士,工程师,主要从事矿区遥感监测应用研究。Email: 64860288@qq.com。
通信作者: 杨化超(1977-),男,博士,教授,主要从事数字摄影测量与计算机视觉理论和技术应用研究。Email: huachao-yang@163.com。

通过蓝牙连接的 GPS 及手机中的惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 来提供影像的定位定向系统 (positioning and orientation system, POS) 信息,分析了智能手机相机内方位元素的稳定性及其对空三精度的影响并以地面三维激光扫描获取的数据为基准评价了数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 精度。

综合以上的分析可知,同常规无人机低空倾斜摄影系统相比,基于智能手机构建低成本、轻小型的类似系统对于促进倾斜摄影测量实用化具有重要意义。虽然文献[10]对基于智能手机的摄影测量应用进行了初步研究,但仍然存在如下问题:①选择何种智能相机并进行合理改装构建具有自动连续拍照功能的多相机成像系统;②对于普通消费型智能相机而言,如何面向摄影测量应用对其成像质量和

成像模式进行改进和优化;③对构建的基于智能手机的无人机低空倾斜摄影测量系统需从应用的角度对其获得的数字产品质量进行评价,从而为实际应用提供参考。本研究综合考虑上述问题,构建基于四旋翼轻小型无人机低空飞行平台和智能手机的无人机低空倾斜摄影测量系统并进行应用评价,旨在为无人机低空倾斜摄影测量系统应用提供一种方便、快捷的新方法。

1 系统构建

提出的基于智能手机的无人机低空倾斜摄影测量系统主要由无人机飞行平台子系统和多相机成像子系统组成,其中各子系统又包含有多个功能模块,具体如图 1 所示。

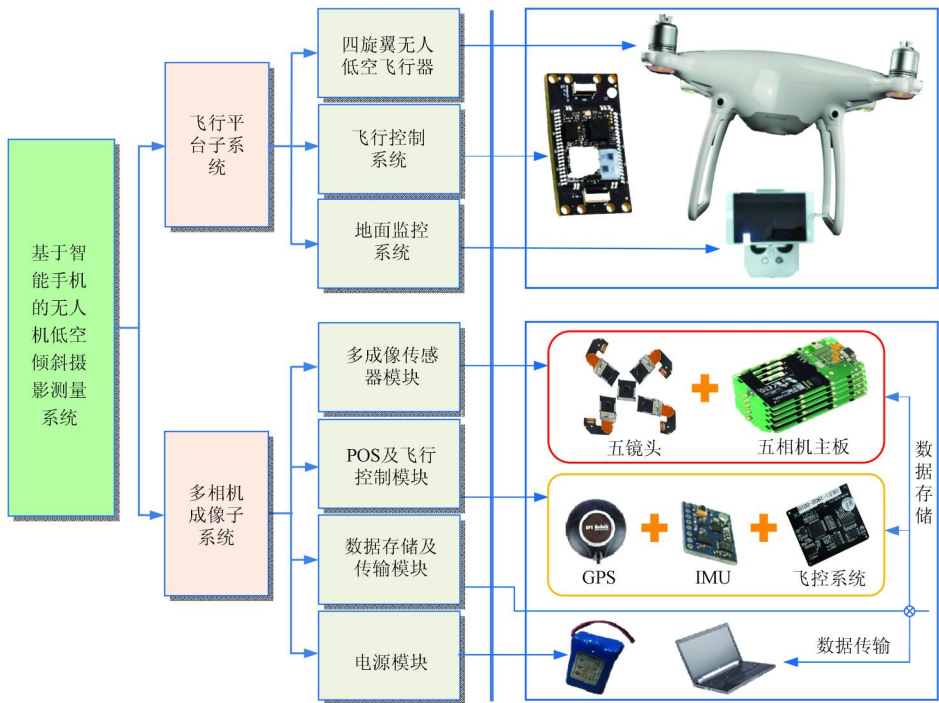


图 1 基于智能手机的无人及低空倾斜摄影测量系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of the UAV based low altitude oblique photogrammetry with smartphones

1.1 低空无人机飞行平台子系统

研究选用精灵 4 系列四旋翼无人机 DJI Phantom 4 (图 1)。该无人机主要由飞行器、云台相机、飞行控制系统及地面监控系统等多个模块组成。飞行平台携带的 10 000 mAh 4S 智能电池使得最大平飞速度为 20 m/s,单块电池最大续航时间约为 28 min; Phantom 4 同时接受 GPS 及 GLONASS 定位卫星信号,可获得 5 m 精度的影像定位信息。图 1 所示的飞控系统模块集成于飞行器内部,可同步记录航拍时对应影像的 POS 信息。地面监控系统与飞控系统通过地面便携式计算机中安装的监控软件

实现双向通讯,地面监控系统可向飞控系统发送飞行任务指令,并可对飞控系统传回的飞行状态参数进行可视化的监控。本研究沿用了 Phantom 4 的飞行器和动力系统及其飞控和地面监控系统,移除了云台相机相关部件,以利于后文阐述的多相机成像系统的加载。

1.2 基于智能手机的多相机成像子系统

本研究构建的基于智能手机的多相机成像子系统需主要考虑如下 3 个方面:①选择传感器尺寸相对较大的智能手机以适合实际的改装;②对智能手机的成像质量和成像模式进行改进和优化以适合摄

影测量的实际应用;③多相机成像系统应具有自动连续拍照及 POS 数据记录与存储功能。如图 1 所示,其主要组成模块包括:多成像传感器模块、POS 及飞行控制模块、数据存储及传输模块和电源模块。

1.2.1 智能手机选择

2012 年,诺基亚公司发布了基于纯景 (Pure View) 技术的 Nokia 808 PureView(以下简称 N808) 智能手机,相对于其他类型的智能手机,N808 搭配

大尺寸 CMOS 图像传感器和卡尔·蔡司镜头以及采用的无损数码变焦技术提高了成像质量,同时,以牺牲手机质量(169 g)来换取更高的成像质量。N808 配置了 1.33 GHz 的 ARM11 微处理器、512 MB 内存、16 GB 内置存储。N808 有两种常用的摄像模式 (详细参数见表 1)。本研究选择该款智能手机来构造用于倾斜摄影测量的多相机成像系统。

表 1 Nokia 808 PureView 内置相机图像传感器和镜头参数

Tab.1 Sensor and lens specifications for built-in camera of Nokia 808 PureView

成像模式	镜头参数		传感器参数		
	焦距/mm	光圈	传感器尺寸/英寸 ^①	像素大小/ μm	图像分辨率/像素
1	8.02(26 mm 等效)	F/2.4	1/1.2(10.54 mm $\times$ 7.91 mm)	1.4	7 728 $\times$ 5 368(4 100 万)
2				2.6	4 000 $\times$ 3 000(1 200 万)

①1 英寸 = 2.54 cm。

1.2.2 面向摄影测量应用的成像质量及成像模式优化

1)固定相机焦距。消费型智能手机为了提高摄影成像质量,多具备自动对焦和防抖功能,在摄像过程中会使焦距产生变化,而摄影测量一般要求相机焦距是一个固定值的已知值。为此在拆解相机镜头前通过手机的操作系统去除相机镜头的自动对焦和防抖功能。

2)防止影像过曝现象。现实中的物体由于材质和光照等因素的影响会产生较高的光反射表面,继而造成所拍影像产生过曝现象,极大地影响了成像质量和后续影像匹配的困难。为此,在相机镜头中添加中灰密度(neutral density,ND)滤镜来消除这一现象。ND 镜通过调整相机的光圈和快门来防止影像的过曝,仅降低光线的强度,不会对摄物体的颜色和反差产生任何的影响,也不会影响到相机的白平衡和自动曝光(图 2 给出了使用 ND 镜前后的成像结果对比)。



图 2 使用 ND 镜前后影像效果对比

Fig.2 Image results before and after adding ND filter

3)成像模式优化选择。CMOS 决定了手机摄像头的图像分辨率和像素大小。一般而言,在传感器尺寸一定时,图像分辨率越高,像素就越小,成像也越清晰。如表 1 所示,在 N808 的两种成像模式中,传感器尺寸均为 1/1.2 英寸,但成像模式 1(分辨率为 4 100 万像素)和成像模式 2(分辨率为 1 200 万像素)对应的像素大小却分别为 1.4 μm 和 2.6 μm 。相应的单张相片所需存储容量也不同,分别约为 12 MB 和 3 MB。图 3 给出了采用两种摄影模式对同一地物的三维重建结果及其相应的局部细节图。由图 3 可以看出,成像模式 1 的三维重建结果在局部细

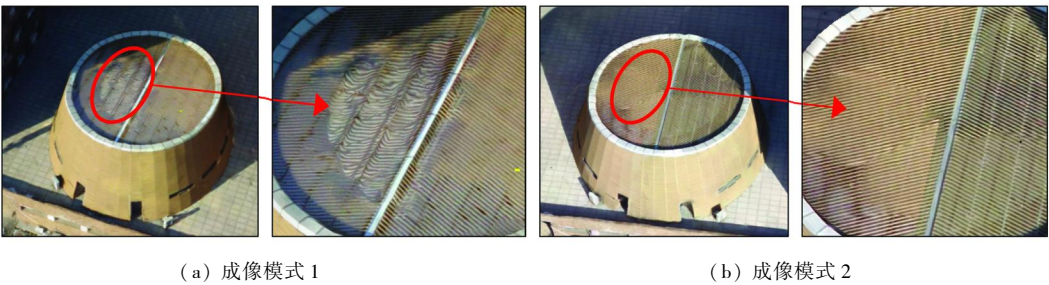


图 3 不同成像模式同一地物的三维模型重建结果

Fig.3 Reconstructed 3D model of the same object by two different imaging modes

节上要好于成像模式 2,但其较小的像素尺寸造成了重建结果中的地物“扭曲”现象(如图 3 中红色圈部分)。综合考虑到重建效果和影像的存储负担,本研究构建的多相机成像系统选用 N808 的第 2 种

成像模式。
1.2.3 多成像传感器模块
为构建基于五相机的轻小型低空倾斜摄影测量系统,需要 N808 手机 5 部,如仅对 5 部相机进行简

单的拼凑将会导致过重的任务载荷。因此需对其进行改装、增配及优化组合并进行模块化设计。考虑到本研究主要利用 N808 手机的摄像和存储功能,因此,为减小任务载重,对 N808 智能手机进行拆解,去除与摄像功能无关的部分(如手机的外壳、金属骨架、SIM 卡插口和 SD 卡卡槽等)。拆解后形成了以手机主板、CMOS 和相机镜头为主体的 5 个独立的摄像功能体。拆解后的各主板通过层叠的方式进行叠加集成以节省空间(如图 1 红色虚线框中右图和图 4(d)中红色框所示)。为了对各相机镜头进行合理布局以构造多目倾斜摄影相机,进一步拆解

并分离各相机镜头(图 1 中红色框中左图)并进行合理布局。如图 4 中绿色框所示,分离后的各相机镜头固定在相机外壳体平行于主板平面的下表面上,为了达到多角度倾斜摄影的目的,5 个镜头的空间布局为:以中间镜头为中心大致对称分布成一边长约为 50 mm 的正方形框,其中中间镜头摄影主光轴铅垂朝下,其余 4 个镜头的主光轴与外壳体下表面呈 30°角。上述相机镜头的布局方式最大限度地保证了在同一个摄影站获得 1 张下视和 4 张侧视共 5 张不同角度的多视角数字影像。各相机镜头和其相应的主板间通过排线相连接。

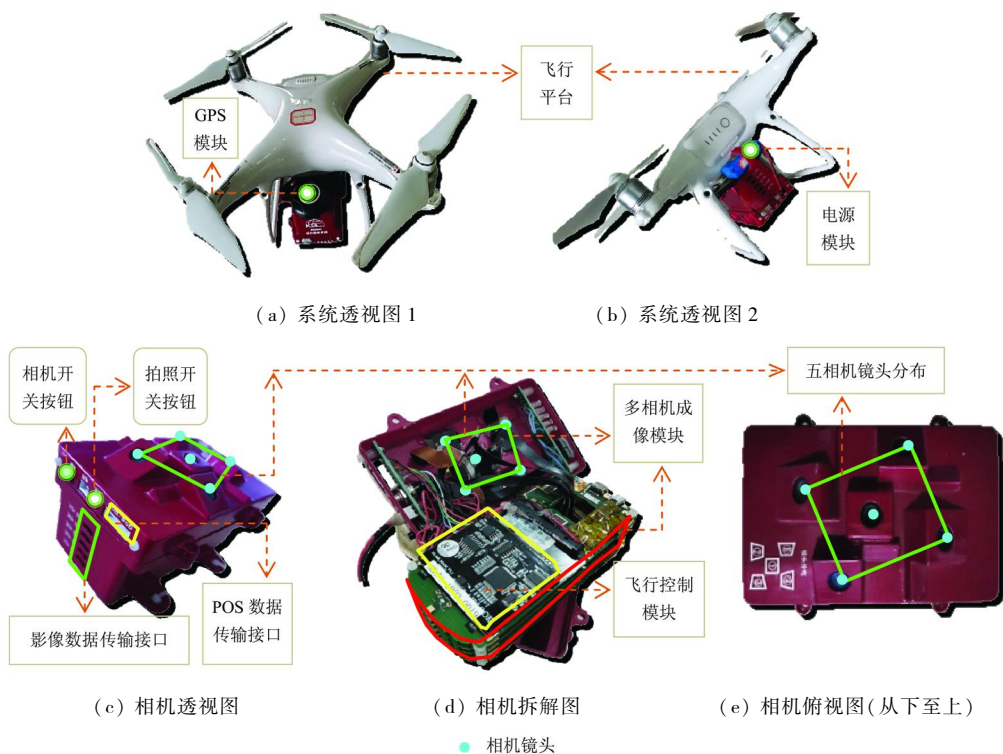


图 4 整个系统及各主要模块的组成结构图

Fig. 4 Structural diagram of the total system and its main modules

1.2.4 POS 及飞行控制模块

通过手机植入的 MEMS 传感器(如陀螺仪和 GPS)可以获得其位置及姿态信息,其与传统无人机航空摄影测量系统中搭载的 POS 系统提供的功能类似。然而,无人机飞行时智能手机的相机搭载在飞行器底部,信号的遮挡会导致 GPS 定位信息的不准确。此外,虽然利用内置的陀螺仪估算姿态可实现基于智能手机的惯性导航系统,但测量噪声会导致姿态无限漂移,使得基于智能手机的惯性导航系统具有很大的局限性^[8-9]。为此,系统在飞行平台上通过增加外置 GPS 传感器(图 4(a))及内置于飞控系统内的 IMU 来获得可靠的 POS 信息(图 1 中橙色虚线框)。

由于 Phantom 4 的飞控系统缺乏多余的接口,

无法通过原有的飞控系统来控制多相机传感器自动拍照,因此本研究基于开源飞控系统 PIXHAWK^[11]研发了一套独立的飞行控制系统以实现相机的自动拍照(如图 1 中橙色框和图 4(d)中黄色框所示)。其主要功能为:①飞控系统中集成了独立的电子同步快门触发器来减小快门触发延时时长,可将多个镜头的曝光间隔误差控制在 μs 级别,以保证同一摄影站 5 个镜头影像的同步获取;②飞控系统向多传感器成像模块发出拍照指令,控制该模块按指定的时间间隔(本研究设置为 4 s)进行定时拍照并同步记录影像的 POS 信息;③飞行系统通过集成在其上的拍照开关按钮来触发(图 4(c))。

1.2.5 数据存储及传输模块

同步记录的影像 POS 数据存储于飞控系统的

内置存储器内,存储容量为 8 GB。多视角影像数据存储在其相应主板的内置存储器内(存储容量均为 16 GB)。如图 1 和图 4(c)所示,飞行任务结束后,用 USB 数据线分别连接各主板接口,将每个主板存储器上存储的照片传输至本地计算机;用串口线连接飞控系统接口,下载位置信息文件至本地计算机。

1.2.6 电源模块

采用可拆卸的外接电池取代原来的手机电池为各个模块提供稳定的工作电压。所选用的电池为锂电池,容量为 3 000 mAh,电压为 3.7 V,电量为 11.1 Wh。

1.3 系统集成及工作流程

多相机成像系统通过减震球与碳板固定安置在无人低空飞行器底部,集成后的系统如图 4(a)和图 4(b)所示。图 5 给出了所提系统的工作流程。结合图 4 和图 5,系统用于外业数字影像采集时一个架次(飞行器一个起落)的主要工作流程如下:

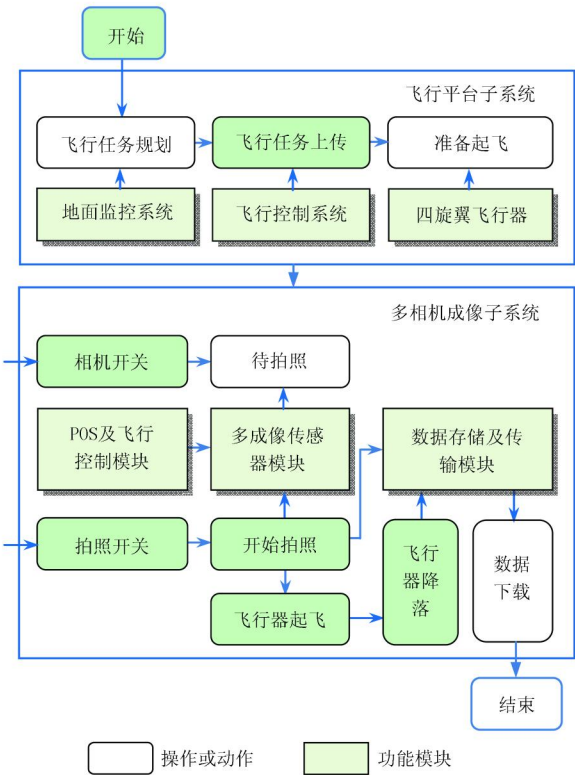


图 5 系统工作流程

Fig. 5 Work flow of the system

1) 飞行任务规划。利用 Phantom 4 的地面监控系统软件进行航线规划和飞行参数设置并上传至飞行控制系统。飞行器处于准备起飞状态。

2) 相机待拍照。通过“相机开机”按钮触发多传感器成像模块,使相机处于待拍照状态。

3) 相机拍照。通过“拍照”按钮触发飞行控制模块并向多传感器成像模块发送定时拍照指令。定时拍照开启。飞行器起飞并按预定规划参数执行航拍任务。获得的影像数据及同步记录的 POS 数据分别存储在手机主板和飞控系统的内置存储器中。

4) 数据下载。飞行任务结束后,关闭相机拍照功能。用 USB 数据连接各手机主板的影像数据传输接口,下载影像数据至本地计算机;采用串口通信线连接飞控系统的 POS 数据传输接口,下载 POS 数据至本地计算机。

如飞行任务需多个架次,则重复上述步骤。

2 应用及分析

2.1 研究区选择与外业数据采集

研究区 1 为一农村居民地,面积约为 0.06 km²,该区域房屋密集,地势平坦,地面高程约为 34.5 m,研究目的是验证并分析所提系统用于农村地籍及不动产测量的可行性。研究区 2 为地形较平坦的校园区域,地面平均高程约为 42.35 m,面积约为 1.89 km²,区域内分布着较为密集的高大建筑物,研究目的是验证系统用于城市建筑物三维重建的可行性。研究区 3 为一露天采矿场(铝土矿),面积约为 0.13 km²。该地区地形起伏较大,地面高程最小为 237.83 m,最大为 333.80 m,最大高差为 95.97 m,研究目的是测试系统对于地形起伏较大地区的适应情况及其用于露天矿开采监测的可行性。

对各区域进行了外业航空摄影、像控点和检查点测量工作。像控点测量采用 GPS RTK(1+1)的方式进行,测量精度约为 2~5 cm。对研究区 1,考虑到其应用目的,除常规的检查点外,还采用全站仪施测了一定数量的房角检查点用于检核碎步特征点的成图精度。采用 GPS 静态测量方法为图根控制测量提供基础控制点,GPS 网平差的平面和高程精度分别约为 5 mm 和 11 mm,随后的全站仪图根导线控制测量的精度约为 1/24 200,碎步测量的平面精度约 10 mm。对研究区 3,还采用 GPS RTK 的方法额外测量了一定数量的高程检查点用于检核地形图的高程精度。各研究区范围、像控点和检查点数量及分布(包括房角平面检查点和地形高程检查点)以及摄影参数(影像重叠度及地面分辨率等)见图 6 和表 2。

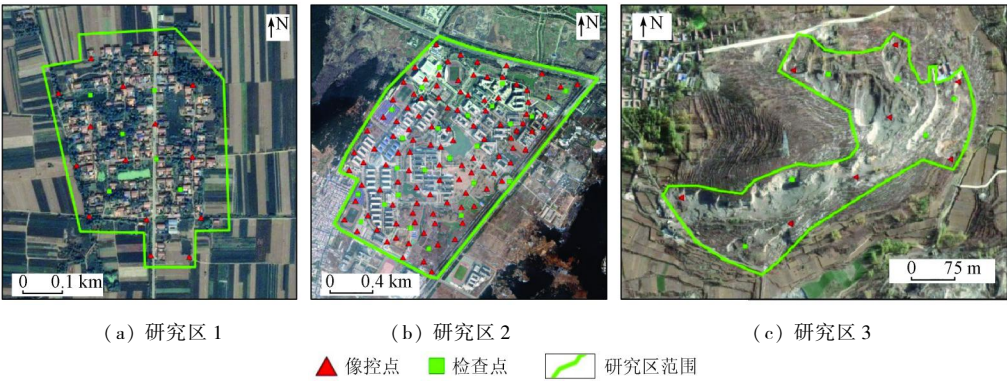


图 6 各研究区范围及像控点和检查点分布

Fig. 6 Boundaries of research regions and the distribution of GCPs and CPs

表 2 各研究区摄影参数及像控点和检查点数量

Tab. 2 Photogrammetric parameters and the amount of GCPs and CPs

项目	研究区 1	研究区 2	研究区 3
飞行航高(相对)/m	42	93	112
航向/旁向重叠度/%	85/80	85/80	85/80
平均地面分辨率/cm	1.2	2.3	3.1
影像数量/张	6 200	53 214	876
像控点和检查点数量/个	15; 6	108; 24	8; 6
房角平面检查点数量/个	48	—	—
地形高程检查点数量/个	—	—	35
拍摄日期	2019 年 6 月	2019 年 9 月	2019 年 12 月

由图 6 和表 2 可以看出,在不同的天气状况、不同的地形条件和不同的飞行参数条件下,系统可以持续、稳定工作,如对研究区 2,系统共在 3 d 内连续飞行 19 个架次,获得研究区共 53 214 张多视影像。说明构建的系统具有较好的稳定性。

2.2 数据处理及结果分析

近年来,源于计算机视觉界的倾斜立体影像匹配及基于多视几何的结构恢复运动(structure from motion, SfM) 算法^[12]得到了快速的发展并形成了一些商业化的适用于倾斜摄影测量数据处理的软件系统。如 Bentley 公司的 Context Capture (CC)、Astrium 公司的 Street Factory 等。相比于传统的摄影测量解析处理软件,这些软件更适合于处理旋偏角大、影像透视畸变较为严重的无人机多视倾斜立体影像。本研究选用 CC 进行影像解析空三处理及实景三维模型构建,采用航天远景公司的 MapMatrix 软件基于实景三维模型进行地籍、地形图的矢量数据采集。

图 7 给出了各研究区的实景三维模型及局部细节图。可以看出,系统获得的倾斜多视立体影像适用于主流软件的数据处理,可以全自动化生成高精

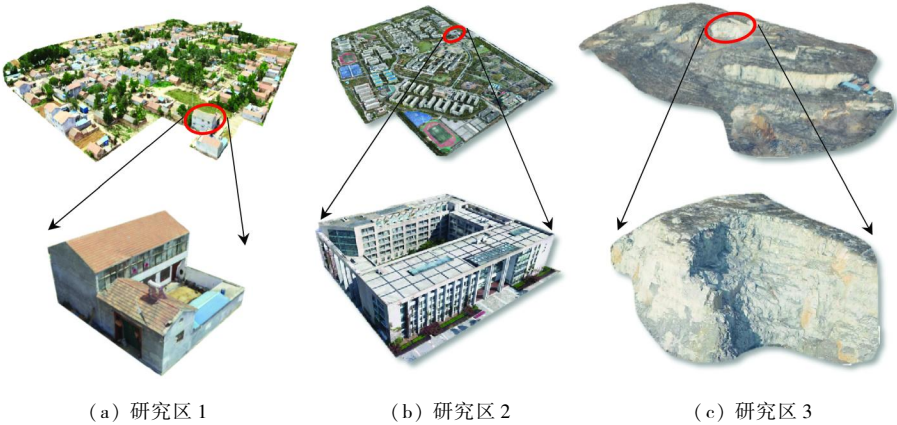


图 7 各研究实景三维模型及其局部细节图

Fig. 7 Real - world 3D model of each research region and its local details

度的实景三维模型,生成的模型场景真实、纹理逼真且整体性较好。

图 8 分别给出了研究区 1 和研究区 3 的地籍、地形图。基于实测的外业检查点,分别从相应的数据模型上进行坐标量测(高程检查点基于地形图等高线通过线性内插的方式得到)并统计其与外业实

测坐标的偏差 ΔX_i , ΔY_i 和 ΔZ_i ,进一步地按式(1)和式(2)统计平面中误差 m_{xy} 和高程中误差 m_z ,并将精度统计结果列于表 3。

$$m_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)/n} \text{ , } \quad (1)$$

$$m_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i^2)/n} \quad , \quad (2)$$

式中： n 为检查点的个数； ΔX_i , ΔY_i 和 ΔZ_i 为检查点的外业实测坐标和内业量测坐标的差值。

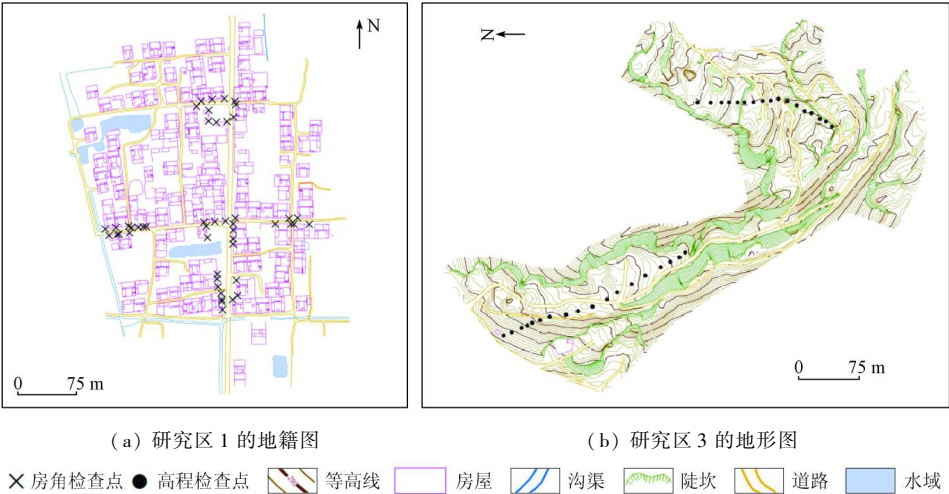


图 8 研究区 1 的地籍图及研究区 3 的地形图

Fig. 8 Real estate map of research region 1 and the topography map of research region 3

表 3 各研究区精度统计

Tab.3 Precision statistics for each research region (cm)

研究区	检查点		房角检查点	高程检查点
	m_{XY}	m_z	m_z	m_{XY}
1	3.2	4.2	3.9	—
2	6.6	7.1	—	—
3	8.1	10.7	—	12.6

由表 3 可知,采用 1.2 cm,2.3 cm 和 3.1 cm 这 3 个不同的地面影像分辨率(表 2)获得的模型平面精度分别为 3.2 cm,6.6 cm 和 8.1 cm,高程精度分别为 4.2 cm,7.1 cm 和 10.7 cm。精度较高。同时,系统获得的矢量数据产品精度满足相应领域的应用要求。如研究区 1 的房角点统计中误差为 3.9 cm,满足地籍和不动产测量中误差小于 5 cm 的精度要求;对于研究区 3,统计得到的地形图的高程中误差为 12.6 cm,基本满足山区地形图 1:500 的高程精度要求,从而为矿区开采监测及后续的治理恢复提供了基础资料。

3 结论

通过融合 DJI Phantom 4 四旋翼轻小型无人机低空飞行平台和 N808 型智能手机构建了一套基于智能手机的低成本、轻小型无人机低空倾斜摄影测量系统并将其成功应用于不动产测量、露天矿开采监测及城市建筑物三维重建等领域。得到的主要结论如下:

1) 基于智能手机改装构建的多相机成像系统各模块间能够持续、稳定的工作并可获得同一目标 5 个视角的高空间分辨率多视影像。

2) 对智能手机相机经过成像质量改进和成像模式优化后,其生成的实景三维模型具有较高的纹理细节质量。

3) 在本研究的试验条件下,基于该系统获得的数字测绘产品(如实景三维模型、地形图及地籍图等)均可达厘米级的定位精度,可以满足相应领域的应用需求。

4) 本研究目前构建的飞控系统独立于原有无人机平台的飞控系统,如何设计并开发合适的接口以实现二者的同步是下一步的研究方向。

参考文献(References):

[1] 余忠迪,李 辉,巴 芳,等.基于消费级无人机的城市三维建模[J]. 国土资源遥感,2018,30(2):67-72. doi:10.6046/gtzyyg.2018.02.09.
Yu Z D,Li H,Ba F,et al.3D city model construction based on a consumer-grade UAV[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(2):67-72. doi:10.6046/gtzyyg.2018.02.09.

[2] 李安福,曾政祥.浅析国内倾斜摄影技术的发展[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(9):57-62.
Li A F,Zeng Z X.The analysis of the development of oblique photography technique in China[J]. Geomatics and Spatial Information Technology,2014,37(9):57-62.

[3] 毕 凯,李英成,丁晓波,等.轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J]. 测绘通报,2015(3):27-31.
Bi K,Li Y C,Ding X B,et al. Aerial photogrammetric technology of light small UAV;Status and trend of development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2015(3):27-31.

[4] Colomina I,Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing:A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2014,92(2):79-97.

[5] Takeuchi K,Kennelly P J. ISeismometer: A geoscientific iPhone

application[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36 (4) : 573 – 575.

[6] Wang T H, Han W T, Zhang M F, et al. Unmanned aerial vehicle – borne sensor system for atmosphere – particulate – matter measurements; Design and experiments[J]. Sensors, 2020, 20 (1) , 57.

[7] Slawomir P, Arkadiusz G, Piotr L, et al. Developing of low – cost air pollution sensor; Measurements with the unmanned aerial vehicles in Poland[J]. Sensors, 2020, 20 (1) , 58.

[8] Zhang Y H, Peng C, Mou D, et al. An adaptive filtering approach based on the dynamic variance model for reducing MEMS gyro – scope random error[J]. Sensors, 2018, 18 (11) : 3943 – 3957.

[9] Chen Z H, Zhu Q C, Soh Y C. Smartphone inertial sensor based in – door localization and tracking with iBeacon corrections [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12 (4) : 1540 – 1549.

[10] Kim J, Lee S K, Ahn H Y, et al. Feasibility of employing a smart – phone as the payload in a photogrammetric UAV system [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2013, 79 (3) : 1 – 18.

[11] Yang K, Yang G Y, Fu H I. Research of control system for plant protection UAV based on Pixhawk [J]. Procedia Computer Science, 2020, 166 : 371 – 375.

[12] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, dense and robust multi – view Stereopsis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32 (8) : 1362 – 1376.

Research on smartphone based UAV low – altitude oblique photogrammetry system and its applications

BI Weihua^{1,3}, ZHAO Xingtao², YANG Huachao³, BIAN Hefang³, ZHANG Qiuzhao³

(1. Wanbei Coal & Electricity Co. Ltd., Suzhou 234002, China; 2. Beijing Dixin Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China; 3. School of Environment & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to facilitate the low – cost, ultra – light weight and easier operation, the authors constructed a smartphone based unmanned aerial vehicle (UAV) low altitude oblique photogrammetric system by integrating DJI Phantom 4 UAV flight platform with good flight traits and Nokia 808 PureView mobile phones with good image – taking functions. In this system, relative functions of multi – camera imaging system with mobile phones were optimized, and the module design method was adopted for the system which includes the measurement of improving image quality, and the design of flight control module used for automatically image – taking control developed by open source flight control system, the design of the POS module and some other means. The integrating mode by the multi – camera system adopted as payload and flight platform was discussed, and then the working flow of the integrated system was concluded. The system was used for different applicable fields, i. e., real estate surveying, open – pit mine monitoring, and 3D reconstruction of urban buildings. The application results assessed by check points measured with field work and manual vision inspect indicate that the real – world 3D model has better texture quality, and the digital survey and mapping products, real – world 3D model and digital linear graph as well as some other means have higher geometric accuracy with centimeter level. The proposed system will be very important for boosting the development of UAV low altitude oblique photogrammetry in terms of practical demands.

Keywords: unmanned aerial vehicle; flight control system; smartphone; oblique photogrammetry; 3D reconstruction

(责任编辑: 张 仙)