



轻小型低成本无人机激光扫描系统研制与实践

杨必胜^{1,2} 李健平^{1,2}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:无人机激光扫描系统受制于激光扫描仪、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)等传感器的重量、成本以及无人机平台有效载荷、续航能力等因素的制约,不得不在保证数据质量的前提下在上述制约因素间取得平衡。高精度IMU的昂贵价格极大地限制了无人机激光扫描系统的易用性,因此轻小型低成本无人机激光扫描系统成为学术界和工业界共同关注的热点。重点阐述了小型低成本无人机激光扫描系统的两个关键点,即视觉-低成本IMU耦合的高精度定姿方法和IMU-激光扫描仪-相机的自标定方法;并阐述了基于大疆无人机飞行平台的激光扫描系统——珞珈麒麟云的研制和性能。实践表明,该激光扫描系统有高度的稳定性和可靠性,在无地面控制的情况下获取点云的精度在20 cm以内,在灾害应急、智慧城市等领域具有广泛的应用价值。

关键词:广义点云;低成本;无人机激光扫描;三维测量;点云处理

中图分类号:P231

文献标志码:A

随着航空摄影测量、机载激光扫描技术的飞速发展,利用这些技术获取的数据已被广泛用于对地观测,如数字高程模型生产^[1]、特征提取^[2-3]、三维重建^[4]、变化检测^[5]、太阳能效用分析^[6]以及森林生物量调查^[7]等。其中,激光扫描三维成像受天气因素影响较小,可直接获取地物表面具有准确坐标的三维密集点云,具有独特的优势。然而,受制于传感器的重量、成本等诸多因素的限制,现有的机载激光扫描系统多限于大型商用有人机激光扫描系统,存在费用昂贵、不易使用等缺陷。近年来,随着消费级小型无人机飞行平台(有效载荷小于5 kg)的逐步成熟,研制轻小型低成本的无人机激光扫描系统成为工业界和学术界共同关注的热点^[8-10]。Jaakkola等^[8]以及杨必胜等^[10]以无人直升机为平台,研制了集成机载激光扫描仪、相机、惯性传感器、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机的小型机载激光扫描系统。但NovAtel SPAN-CPT紧组合定位定向系统(positioning and orientation system, POS)价格昂贵,且上述传感器的总重量已超出轻小型无人机的有效载荷,如大疆M600

的多旋翼的有效载荷是5 kg。昂贵的传感器价格及较重的起飞重量极大地限制了无人机激光扫描系统的工程化运用。受制于轻小型无人机平台的有效载荷、航时等实际限制,轻小型低成本无人机激光扫描系统必须在传感器的重量、价格、精度等之间取得平衡。如何在低精度惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的基础上实现激光扫描数据的高质量获取成为亟待解决的难题^[11-16]。

针对上述关键问题,本文提出了视觉与低成本IMU耦合的高精度定姿方法和IMU、激光扫描仪与视频相机的自标定方法,解决了无地面控制下低成本、低精度IMU的高精度定姿和激光扫描点云高质量生成的难题,以大疆旋翼无人机为飞行平台,成功研制了一套集微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)、IMU、消费级视频相机、Velodyne 16线激光扫描仪、差分GNSS(可选)为一体的低成本、轻小型无人机激光扫描系统——珞珈麒麟云(LuoJia Kylin Cloud-I),并在实际工程运用中进行了数据质量检验。结果表明,在无地面控制的情况下,珞珈麒麟云可获取精度20 cm以内的高质量激光点云,为三维地理信息的快速获取提供了一套切实可用的装备。

1 珞珈麒麟云系统设计

1.1 激光扫描仪、IMU 和相机的时间同步与集成控制

珞珈麒麟云系统的飞行平台为大疆 M600, 其最大起飞重量约 15.0 kg, 有效载荷约 6 kg。为此, 选择价格低廉且重量较轻的传感器, 其中

IMU、全局快门相机和激光扫描仪的参数描述见表 1。上述传感器间时间同步与集成控制如图 1 所示, 其中黑色线表示电源地线, 红色线表示电源正极, 黄色箭头表示同步信号方向, 绿色箭头表示数据流方向。在时间同步控制方面, 基于硬件同步, 以秒脉冲信号为时间基准对激光扫描仪和 IMU 进行时间同步, 同时控制相机的曝光时间, 为激光扫描点云的高质量获取奠定基础。

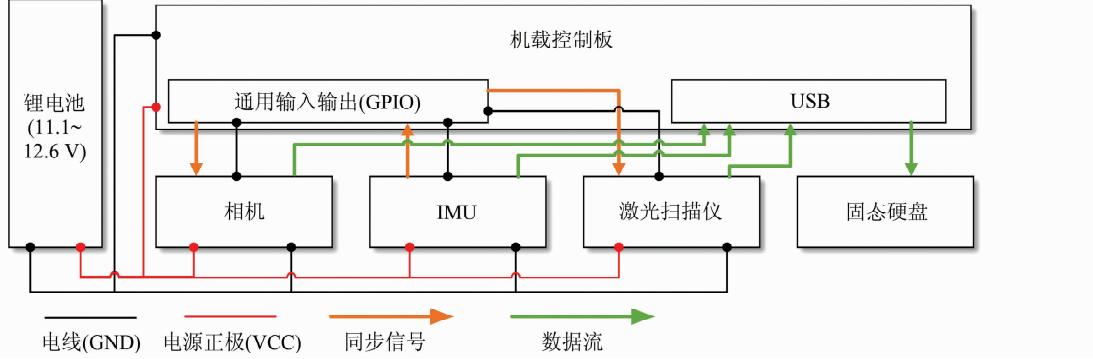


图 1 珞珈麒麟云系统硬件与时间同步

Fig. 1 Hardware and Time Synchronization of Luojia Kylin Cloud-I

表 1 珞珈麒麟云硬件参数描述

Tab. 1 Sensors Specifications of Luojia Kylin Cloud-I

传感器	制造商	部件	噪声	零偏稳定性
IMU	Xsens MTI-300	陀螺仪	0.01 °/(s · Hz ^{1/2})	10 °/h
		加速度计	60 μg / √Hz	15 μg
全局快门相机	Pointgrey Flea3		1 280 × 1 024 像素	
镜头	Kowa wide-angle lens		3.5 mm/f1.4	
机载控制板	Cortex-A9			
激光扫描仪	Velodyne VLP16			

1.2 珞珈麒麟云系统多传感器数据联合解算

由于低成本 IMU 的惯性测量值精度较低, 零偏存在较大的不稳定性, 直接利用其输出的姿态参数进行激光点云数据解算无法获取高质量的激光点云。为此, 本文提出基于视觉辅助的 IMU、点云数据联合解算与自标定方法。如图 2 所示, 首先利用增量式运动结构恢复(structure from motion, SfM)算法^[17]恢复影像在自由网中的外方位元素;其次, 基于 IMU 辅助光束法平差精化姿态参数;最后, 基于多视匹配点云深度一致性修正激光扫描仪的安置参数。

1.2.1 IMU 辅助光束法平差

珞珈麒麟云系统的空间参考坐标系统如图 3 所示, F_W 表示世界坐标系, F_S 表示载体坐标系, F_C 表示相机坐标系, F_L 表示激光扫描坐标系。坐标系 F_A 中一点 P 的坐标写作向量 r_A^{PA} 。坐标系 F_A 与坐标系 F_B 的相对旋转表示为 C_{AB} 。其中待估计

参数包括第 k 张影像曝光时刻机体状态参数 $\{x_S^k | k=1,2 \dots N\}$, 以及所有的特征点三维坐标 $\{x_f^j | j=1,2 \dots M\}$, S 表示载体坐标系, f 表示特征。第 k 个机体状态如下:

$$\mathbf{x}_S^k = [\mathbf{r}_W^{S_k W T} \quad \mathbf{v}_W^k T \quad \mathbf{q}_{WS_k}^T \quad \mathbf{b}_a^k T \quad \mathbf{b}_g^k T]^T \in \mathbf{R}^6 \times SO^3 \times \mathbf{R}^6 \quad (1)$$

式中, SO^3 表示特殊正交群; $\mathbf{r}_W^{S_k W}$ 和 \mathbf{q}_{WS_k} 是位置和姿态; \mathbf{v}_W^k 是机体的速度; 位置、姿态和速度均处于世界坐标系中; \mathbf{b}_a^k 和 \mathbf{b}_g^k 是加速度计和陀螺仪的零偏。根据图 3, 相机坐标系 F_C 或激光扫描坐标系 F_L 和世界坐标系的转换如下:

$$\mathbf{r}_W^{PW} = \mathbf{C}_{WS_k} (\mathbf{C}_{SC} \mathbf{r}_{C_k}^{PC_k} + \mathbf{r}_S^{CS}) + \mathbf{r}_W^{S_k W} \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_S^{PW} = \mathbf{C}_{WS_k} (\mathbf{C}_{SL} \mathbf{r}_{L_k}^{PL_k} + \mathbf{r}_S^{LS}) + \mathbf{r}_W^{S_k W} \quad (3)$$

式中, \mathbf{r}_S^{CS} 和 \mathbf{r}_S^{LS} 为相机与激光扫描仪安装的杆臂值。

为了估计机体状态与特征点坐标, 将二者同时列入同一个优化函数 $J(x)$ 中, $J(x)$ 包含重投影误差 e_r 项与 IMU 误差 e_g 项两部分:

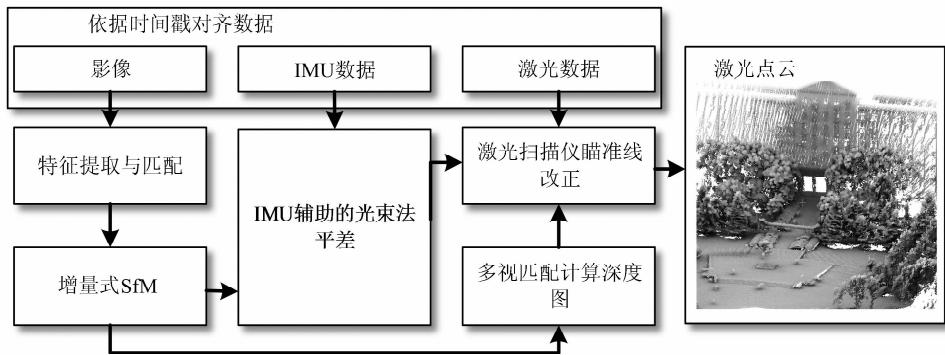


图2 激光点云解算关键步骤流程图

Fig. 2 Flowchart of Laser Point Clouds Generation

$$\mathbf{J}(x) : \sum_{k=1}^N \sum_{j \in J(k)} \mathbf{e}_r^{k,j \top} \mathbf{P}_r^{k,j-1} \mathbf{e}_r^{k,j} + \sum_{k=1}^{N-1} \mathbf{e}_s^{k \top} \mathbf{P}_s^{k-1} \mathbf{e}_s^k \quad (4)$$

式中, $\mathbf{J}(k)$ 表示第 k 张影像中可观测到的特征点集合; $\mathbf{P}_r^{k,j}$ 和 \mathbf{P}_s^k 是协方差矩阵; $\mathbf{e}_r^{k,j}$ 为重投影误差。

$$\mathbf{P}_r^{k,j} = \begin{bmatrix} \delta x^2 & 0 \\ 0 & \delta y^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, δx 和 δy 是像平面上特征点在水平与垂直方向上的观测误差。根据经验设置为 2 个像素。

本文采用 Shin 等^[18] 提出的简化版 IMU 运动学模型如下:

$$\dot{\mathbf{r}}_w^{ws} = \mathbf{v}_w \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_w = \mathbf{C}_{ws}(\mathbf{a}_m - \mathbf{b}_a - \mathbf{a}_n) + \mathbf{g} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{ws} = \frac{1}{2} \mathbf{q}_{ws} \otimes (\boldsymbol{\omega}_m - \mathbf{b}_g - \boldsymbol{\omega}_n) \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{b}}_a = \mathbf{b}_a^n \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{b}}_g = \mathbf{b}_g^n \quad (11)$$

式中, \mathbf{a}_m 和 $\boldsymbol{\omega}_m$ 是加速度计和陀螺的观测值, 而二者的高斯白噪声分别为 \mathbf{a}_n 和 $\boldsymbol{\omega}_n$; \mathbf{g} 是重力加速度向量; 加速度计和陀螺的观测值可以描述为带有高斯白噪声 \mathbf{b}_a^n 和 \mathbf{b}_g^n 的随机游走。

因此, 定义两个机体状态之间的所有 IMU 观测值 \mathbf{z}_s^k 构成的误差项为:

$$\mathbf{e}_s^k(\hat{\mathbf{x}}_s^k, \mathbf{x}_s^{k+1}, \mathbf{z}_s^k) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{r}}_w^{ws_{k+1}} - \mathbf{r}_w^{ws_{k+1}} \\ 2[\hat{\mathbf{q}}_{ws_{k+1}} \otimes \mathbf{q}_{ws_{k+1}}^{-1}]_{1:3} \\ \hat{\mathbf{b}}_a^{k+1} - \mathbf{b}_a^{k+1} \\ \hat{\mathbf{b}}_g^{k+1} - \mathbf{b}_g^{k+1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其误差状态为:

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{F}_s(\hat{\mathbf{x}}_s) \delta \mathbf{x}_s + \mathbf{F}_n(\hat{\mathbf{x}}_s) n \quad (13)$$

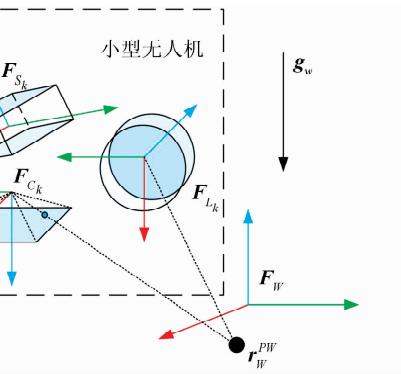


图3 无人机激光扫描坐标系统

Fig. 3 Coordinate Frames Involved in the System

重投影误差定义如下:

$$\mathbf{e}_r^{k,j} = \mathbf{z}_r^k - \lambda \mathbf{K} [\mathbf{C}_{cs} (\mathbf{C}_{ws_k}^T \mathbf{x}_f^j - \mathbf{C}_{ws_k}^T \mathbf{r}_w^{ws_k}) + \mathbf{r}_c^{cs}] \quad (5)$$

式中, \mathbf{z}_r^k 是特征点在影像上的观测值, 并假设相机的畸变已消除; \mathbf{K} 是相机标定后的投影矩阵; \mathbf{C}_{cs} 是相机的瞄准线。

重投影误差的协方差矩阵计算如下:

$$\mathbf{F}_s(\hat{\mathbf{x}}_s) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \delta \mathbf{v}_w & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\hat{\mathbf{C}}_{ws} [\mathbf{a}_m - \hat{\mathbf{b}}_a] \times & -\hat{\mathbf{C}}_{ws} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -[\boldsymbol{\omega}_m - \hat{\mathbf{b}}_g] \times \delta \theta & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$n := [\mathbf{a}_n^T \quad \boldsymbol{\omega}_n^T \quad \mathbf{b}_a^{nT} \quad \mathbf{b}_g^{nT}]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_n(\hat{\mathbf{x}}_S) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -\hat{\mathbf{C}}_{WS} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

据此,IMU 误差的协方差矩阵为:

$$\mathbf{P}_S^{S_k t_{i+1}} = \Phi_x^T \mathbf{P}_S^{S_k t_i} \Phi_x^{t, T} + (\mathbf{F}_n \delta t) \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{a_n}^2 \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_{\omega_n}^2 \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \sigma_{b_a^n}^2 \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \sigma_{b_g^n}^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} (\mathbf{F}_n \delta t)^T \quad (17)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} u_{\text{Laser}} \\ v_{\text{Laser}} \\ \text{depth}_{\text{Laser}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & c_x \\ 0 & f_y & 0 & c_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} H(\mathbf{C}_{CS}(\tilde{\mathbf{c}}_{SL} \mathbf{r}_{L_t}^{PL_t} + \mathbf{r}_S^L - \mathbf{r}_S^C)), H([x \ y \ z]^T) = \left[\frac{x}{z} \ \frac{y}{z} \ z \ 1 \right]^T \quad (19)$$

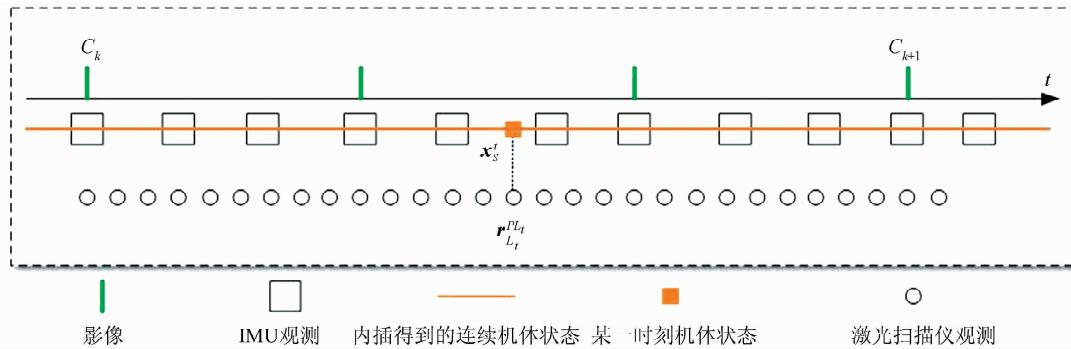


图 4 数据采集时间轴

Fig. 4 The Timestamp of Collected Data

式中, $\tilde{\mathbf{c}}_{SL}$ 为待估计激光扫描仪安置角准确值, 其初始值由机械设计图纸获得。为了简化计算过程, 首先将图像去除畸变, 如图 5(a) 和 5(b) 所示, 之后直接使用 4 个内参数 f_x 、 f_y 、 c_x 和 c_y 的小孔相机模型进行投影, 得到深度图如图 5(d) 所示, 写作 $D_{\text{map}}(\tilde{\mathbf{c}}_{SL})$, 而与其对应的多视匹配深度图为图 5(c), 写作 $D_{\text{map}}(C_k)$ 。以二者差异为优化目标, $\tilde{\mathbf{c}}_{SL}$ 为优化项, 得到以下误差方程并进行求解:

$$J(\tilde{\mathbf{c}}_{SL}) := \sum_{v=0}^{\text{height}} \sum_{u=0}^{\text{width}} (D_{\text{map}}(C_k)_{u,v} - D_{\text{map}}(\tilde{\mathbf{c}}_{SL})_{u,v})^2 \quad (20)$$

从而对扫描仪的安置角进行自动修正。

2 实验分析

为检验珞珈麒麟云系统获取激光扫描点云的数据质量, 在武汉大学信息学部采集了以操场为

$$\Phi_x = \mathbf{I} + \mathbf{F}_S \delta t + \frac{1}{2} \mathbf{F}_S^2 \delta t^2 + \frac{1}{6} \mathbf{F}_S^3 \delta t^3 \quad (18)$$

Φ_x 是三阶转移矩阵; δt 是 IMU 采样间隔; t_i 和 t_{i+1} 是相邻的两个采样时间; $\sigma_{a_n}^2$ 、 $\sigma_{\omega_n}^2$ 、 $\sigma_{b_a^n}^2$ 、 $\sigma_{b_g^n}^2$ 是 IMU 的标定参数。

1.2.2 激光扫描仪安置角修正

为自动修正激光点云的安置角, 本文通过优化多视匹配^[19]得到单张影像的深度图与激光点云投影得到的深度图的差异, 进行激光扫描仪安置角的自动改正。首先根据时间同步参数获取位于两个关键影像 C_k 和 C_{k+1} 之间的点云数据, 如图 4 所示。同时, 内插获取任意一个激光点云获取时刻的机体姿态参数。假设 $\mathbf{r}_{L_t}^{PL_t}$ 为时刻 t 激光扫描仪在其坐标系 L_t 中的观测, 根据式(2)和(3)将其投影到 C_k 的相机平面上:

中心及附近范围内的点云数据, 无人机航速为 5 m/s, 飞行时间为 13 min, 航高为 60 m, 影像数量为 18 042 帧, 点云数量为 2 358 万个, 测区范围为 0.3 km²。该区域内包含教学楼、操场、图书馆、宿舍、植被等地物。

使用本文提出的视觉、IMU 和激光点云的联合解算与自标定方法解算出的点云如图 6 所示。根据解算点云的高程渲染可视化结果, 可轻易判别出地物清晰的轮廓, 显示出了较好的视觉可视化效果, 一定程度上表明珞珈麒麟云系统数据采集的稳定性和可靠性。

为了进一步评估珞珈麒麟云系统获取点云的质量, 在实验区域利用实时动态测量(real time kinematic, RTK)采集了 13 个控制点, 其中 3 个用作转换, 其余 10 个用作检查。如图 7 所示, 其中 2、6、8 号点为转换点, 其余为检查点, 计算点位在 x 、 y 、 z 方向上的误差。根据图 8 可知, 检查

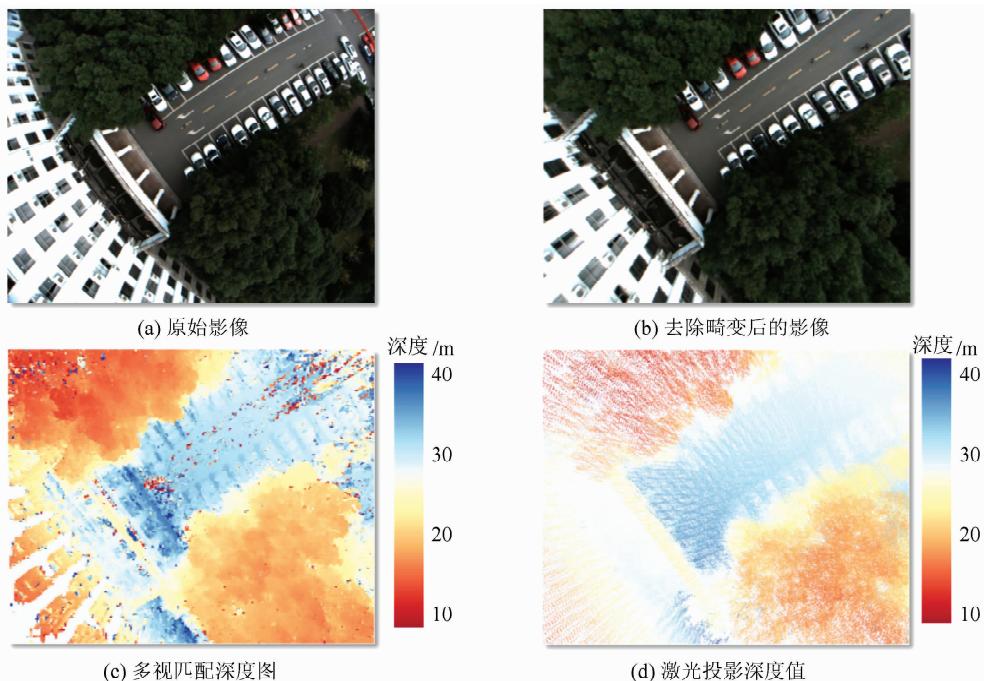


图 5 激光扫描仪安置角自动修正

Fig. 5 Laser Scanning Boresight Optimization

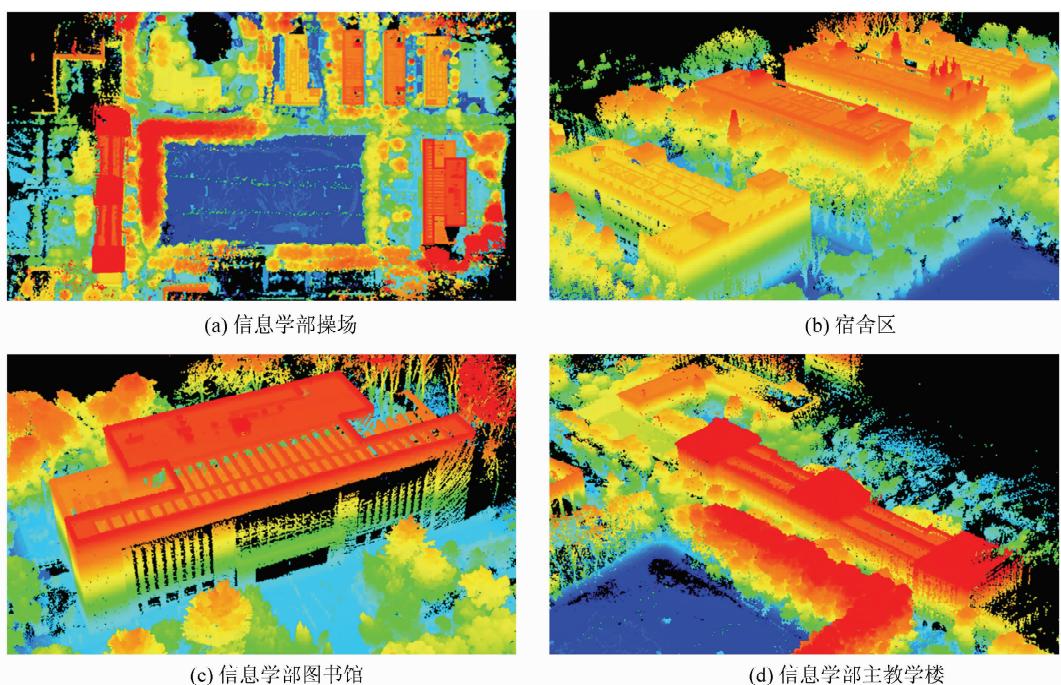


图 6 珞珈麒麟云获取的点云数据

Fig. 6 Point Clouds Generation by Luojia Kylin Cloud

点的平均点位精度为 17.8 cm, 其中, x 方向平均误差为 10.1 cm, 最小值为 7.9 cm, 最大值为 14.9 cm; y 方向平均误差为 9.8 cm, 最小值为 8.1 cm, 最大值为 15.0 cm; z 方向平均误差为 15.2 cm, 最小值为 9.5 cm, 最大值为 18.3 cm。检测结果表明, 珞珈麒麟云系统可在无地面控制下获取具有较高精度的激光点云数据, 证实了基于低成本

硬件设备获取高质量激光点云的有效性。

3 结论与展望

低成本轻小型无人机激光扫描系统具有低成本、易于使用等独特优势, 吸引了学术界和工业界的广泛关注。如何提高低成本 IMU 的姿态参

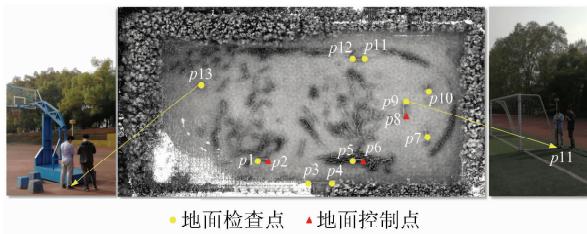


图7 实验区域数据检查点分布

Fig. 7 Distributions of Ground Check Points in the Study Area

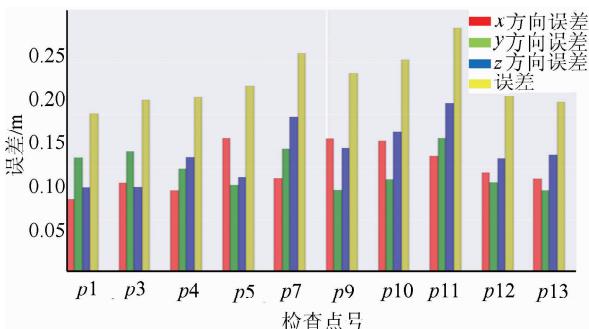


图8 检查点误差直方图

Fig. 8 Error of Checkpoints Collected by RTK in x, y, z Directions

数,保障激光点云的生成质量是其中的关键难题。针对这一难题,本文提出了一套行之有效的点云、IMU和影像联合解算与自标定方法,实现了视觉和IMU联合的姿态参数精细化和上述传感器间的精确自标定,从而有效地提高了激光点云的生成质量,并以大疆无人机平台为依托对珞珈麒麟云系统在武汉大学进行了飞行验证。检验结果表明,珞珈麒麟云系统可在无地面控制下获取到精度20 cm以内的高质量激光点云,为基础测绘、电力巡检、森林资源调查等专业、行业应用提供了一套便携式低成本的激光点云数据采集装备。进一步的研究将加强点云数据的智能处理,建立从数据采集到数据处理的一体化解决方案,并在多个行业应用中进行实践检验,进一步提高珞珈麒麟云系统的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Yang B, Huang R, Dong Z, et al. Two-Step Adaptive Extraction Method for Ground Points and Breaklines from LiDAR Point Clouds [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 119: 373-389.
- [2] Yang B, Huang R, Li J, et al. Automated Reconstruction of Building LoDs from Airborne LiDAR Point Clouds Using an Improved Morphological Scale Space [J]. *Remote Sensing*, 2016, 9(14): 10.3390/rs9010014.
- [3] Dong Z, Yang B, Hu P, et al. An Efficient Global Energy Optimization Approach for Robust 3D Plane Segmentation of Point Cloud [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 137: 122-133.
- [4] Li J, Yang B, Chen C, et al. Automatic Registration of Panoramic Image Sequence and Mobile Laser Scanning Data Using Semantic Features [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 136: 41-57.
- [5] Chen C, Yang B. Dynamic Occlusion Detection and Inpainting of InSitu Captured Terrestrial Laser Scanning Point Clouds Sequence [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 119: 90-107.
- [6] Liang Fuxun, Yang Bisheng, Huang Ronggang, et al. Facade Solar Potential Analysis Using Multisource Point Cloud [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(2): 225-233 (梁福逊, 杨必胜, 黄荣刚, 等. 基于多源点云的建筑物立面太阳能潜力估计[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 225-233).
- [7] Yang B, Dai W, Dong Z, et al. Automatic Forest Mapping at Individual Tree Levels from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds with a Hierarchical Minimum Cut Method [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 372.
- [8] Jaakkola A, Hyppä J, Kukko A, et al. A Low-Cost Multi-sensoral Mobile Mapping System and Its Feasibility for Tree Measurements [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65: 514-522.
- [9] Wallace L, Lucieer A, Watson C, et al. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4: 1 519-1 543.
- [10] Yang B, Chen C. Automatic Registration of UAV-Borne Sequent Images and LiDAR Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101: 262-274.
- [11] Skaloud J, Lichten D. Rigorous Approach to Bore-Sight Self-Calibration in Airborne Laser Scanning [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61: 47-59.
- [12] Filin S. Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(1): 235-1 242.
- [13] Glennie C. Calibration and Kinematic Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 LiDAR Sensor [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2015, 81(1): 1 235-1 242.

- ogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, 78:339-347
- [14] Chan T O, Lichten D D, Glennie C L. Multi-feature Based Boresight Self-Calibration of a Terrestrial Mobile Mapping System [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82: 112-124
- [15] Nagai M, Chen T, Shibasaki R, et al. UAV-Borne 3-D Mapping System by Multisensor Integration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47:701-708
- [16] Choi K, Lee I, Hong J, et al. Developing a UAV-Based Rapid Mapping System for Emergency Re-
- sponse [J]. *Unmanned Systems Technology XI*, 2009, 733 209
- [17] Wu C. Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion [OL]. <http://ccwu.me/vsfm/vsfm.pdf>, 2013
- [18] Shin E H, El-Sheimy N. An Unscented Kalman Filter for In-motion Alignment of Low-Cost IMUs [J]. *Position Location and Navigation Symposium*, 2004, doi:10.1109/PLANS.2004.1309005
- [19] Shen S. Accurate Multiple View 3D Reconstruction Using Patch-Based Stereo for Large-Scale Scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22:1 901-1 914

Implementation of a Low-Cost Mini-UAV Laser Scanning System

YANG Bisheng^{1,2} LI Jianping^{1,2}

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,
Wuhan 430079, China

2 Engineering Research Center for Spatio-Temporal Data Smart Acquisition and Application, Ministry of Education,
Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Mini-UAV laser scanning system can be applied to the high precision earth observation, which is an active area in the field of mobile mapping. However, due to the limitation of payload and battery consumption of a mini-UAV (maximum payload is less than 5 kg), and the high cost of the sensors, a tradeoff must be made between cost, weight, and accuracy when designing of the mini-UAV laser scanning system. To realize the high precision and low-cost mobile mapping, this paper designs a low-cost mini-UAV laser scanning system: Luojia Kylin Cloud. This system contains several low-cost sensors, including MEMS (micro electro mechanical system) based IMU (inertial measurement unit), global shutter camera, wide angle lens and 16-line laser scanner. Firstly, this paper proposes an IMU aided bundle adjustment to improve the accuracy of the low-cost MEMS based IMU. Secondly, this paper proposes a boresight self-calibration algorithm for the laser scanner based on the consistence of the depth map generated by MVS(multi-view stereo) and projection of the laser measurement. At last, the laser point clouds are generated by using the estimated states a boresight parameters. To evaluate the accuracy of Luojia Kylin Cloud laser scanning system, study area in Wuhan University is selected for point cloud collection, and a lot of ground check points are measured. The result shows that the average error of the check points is 17.8 cm, which demonstrates the high accuracy and robustness of the proposed system.

Key words: ubiquitous point cloud; low-cost; UAV laser scanning; 3D mapping; point cloud processing

First author: YANG Bisheng, PhD, professor, National Distinguished Young Scholars, Distinguished Professor of Changjiang Scholar Program, specializes in UAV photogrammetry and 3D reconstruction, point cloud processing, and GIS applications. E-mail: bshyang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars, No. 41725005; the National Natural Science Foundation of China, No. 41531177; the Project of Yangtze River Scholar Distinguished Professor.