

基于 GICP 点云匹配的机载激光雷达航带平差

金勤耕¹, 张菊^{2,3}, 胡庆武¹, 艾明耀¹

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079;

2. 自然资源部 地理国情监测重点实验室, 武汉 430072;

3. 武汉城市职业学院, 武汉 430064

摘要: 机载激光雷达是快速获取大范围地面情况的有效手段,但在该多传感器集成系统中存在一系列系统误差和随机误差,其中以系统安置误差和轨迹波动误差为典型。本文针对该两种误差,提出了基于 GICP 点云匹配的机载激光雷达航带平差方法。基于机载激光雷达系统观测模型,构造系统安置参数的最小二乘修正,引入地面控制点对其进行标定;利用时间信息对航带重叠区进行空间分割,基于 GICP 对机载点云进行匹配并求解变换关系,使用插值优化策略对机载点云与 POS 轨迹进行改正。实验表明,本文提出的系统标定方法可以提高多航带点云的融合精度,且具有快速和便捷的优势;航带平差方法表现出良好性能,能够明显降低匹配误差,且具有较好的兼容性和泛化能力。

关键词: 机载激光雷达系统,航带平差,点云匹配,GICP,安置误差,轨迹波动误差

引用格式: 金勤耕,张菊,胡庆武,艾明耀. 2023. 基于 GICP 点云匹配的机载激光雷达航带平差. 第七届全国激光雷达大会论文集, P7051.

1 引言

光探测与测距技术 (Light Detection and Ranging, LiDAR), 是一种利用激光脉冲来测量距离以描述环境的远程感知技术。LiDAR 具有高精度、大视角、光照适应性等优势, 可以实现对场景、物体表面的快速而精细的扫描, 在自然资源监测 (刘鹤 等, 2021)、地理测绘制图 (单杰 等, 2022)、基础设施检查 (Arastounia 等, 2015)、交通规划 (Anand 等, 2019) 与车辆辅助驾驶 (曹明玮, 2018) 等领域都具有良好的应用前景。其中, 将激光雷达搭载于机载平台上, 辅以定位定姿系统 (Position Orientation System, POS), 组成机载激光雷达系统 (Airborne LiDAR/Laser System, ALS), 可以实现快速的对地观测, 获取大范围地面环境的点云模型, 为遥感测绘的地理数据采集提供了一种新的思路与解决方案。

然而, 机载激光雷达系统是一个多传感器结合的软硬件集成系统, 难以避免地存在一系列系统误差和随机误差。其中, 系统安置误差和轨迹波动误差, 分别是机载激光雷达系统中典型的系统误差和随机误差。

系统安置误差, 是受硬件安装限制, 导致激光雷达扫描原点与 POS 中心无法精确重合, 引入的一种系统误差。安置误差会显著影响点云融合精度, 较大的安置误差会导致点云融合后的结果点云呈现

效果不佳, 导致点云“分层”问题。

轨迹波动误差, 是机载激光雷达系统在数据采集的过程中, 受到各种外部影响而产生的一种随机误差, 其表现为机载系统轨迹存在波动, 本质上是一些时刻下 POS 定位结果与实际值存在偏差。由于机载激光雷达数据融合是基于机载系统运动轨迹的, 不准确的位姿信息会将其对应时刻的点云还原到错误的空间位置上, 使不同航带扫描得到的点云之间存在较明显的偏移情况。

随着点云处理技术的发展, 研究学者提出了各种方法来处理机载激光雷达系统中存在的误差。其中, 系统检校和航带平差是两种常用的机载激光雷达系统误差消除手段。

系统检校, 又称系统标定 (Calibration), 主要处理机载激光雷达系统中的系统误差。通过求解系统各部件的空间关系, 确定所有系统误差并对所求原始点数据进行改正, 使其只剩下随机误差。王致华 (2014) 用三个平移量和一个旋转角来模拟表达安置参数, 对机载激光雷达系统进行了检校; Tian 等 (2022) 实现了自动安置误差校准方法, 其提出了基于近似对应点的匹配方法, 对机载激光雷达系统进行了检校。

航带平差 (Strip adjustment, SA), 可以分为模型驱动和数据驱动两种。模型驱动的航带平差, 基于机载激光雷达观测模型求解各航带的变形参数并改正, 以降低系统误差的影响; 数据驱动的航带平差, 在提取多航带重叠区的基础上, 通过最小化航

基金项目: 自然资源部地理国情监测重点实验室开放基金项目(编号: 2023NGCM08)

第一作者简介: 金勤耕(1999—),男,硕士,研究方向为摄影测量与遥感、激光点云处理、激光 SLAM。E-mail: jin_qg@whu.edu.cn

通信作者简介: 胡庆武(1975—),男,博士,教授,从事集成移动测量、激光视觉融合导航建图等的教学、科研和产业化工作。E-mail: huqw@whu.edu.cn

带间差异的方式提升点云融合效果。杨书娟等(2017)基于面特征计算安置角,获取初始点云,然后基于ICP方法对扫描角误差进行了非线性改正;Chen等(2021)提出了一种DEM-ICP匹配方法实现航带平差,在人工地物较少的山区展现了较好的鲁棒性。

为了削减机载激光雷达系统的安置误差和轨迹波动误差,本文提出基于GICP点云匹配的机载激光雷达航带平差方法,基于机载激光雷达观测模型,引入地面控制点,通过最小二乘来标定系统安置参数,然后利用机载扫描点云的时间信息,提取多航带重叠区并分割,使用GICP方法进行匹配,并使用插值优化策略实现对融合点云及POS轨迹的改正。

2 方法原理

2.1 机载激光雷达系统观测模型

典型的机载激光雷达系统一般由激光测距、扫描、POS、控制和存储等模块组成(马浩,2011)。

从瞬时发射激光束到激光扫描坐标系,再到惯性平台坐标系,再到当地水平参考坐标系、空间直角坐标系,最后到投影坐标系,中间存在着一系列转换关系。本文关注的系统安置误差出现在激光扫描坐标系到惯性平台坐标系的转换中。

由于机载系统一般以POS解算所使用的惯性平台坐标系为参考位姿依据,而激光扫描坐标系的坐标原点在激光发射中心,两者在位置上不重合且存在偏移角,因此还需要从激光扫描坐标系转换到惯性平台坐标系,其下点坐标 $P_{inertial}$ 如下:

$$P_{inertial} = R_{s \rightarrow i} P_{scan} + t_{s \rightarrow i} \quad (1)$$

其中, $t_{s \rightarrow i}$ 包括三个平移参数, $R_{s \rightarrow i}$ 使用欧拉角表示,包括 γ 、 β 、 α 三个旋转参数,如下:

$$R_{s \rightarrow i} = R(\gamma) \times R(\beta) \times R(\alpha) \quad (2)$$

其中, $R(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$, $R(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$ 。

上述六个参数构成系统安置参数,又称杆臂参数。

基于POS测得的三个机载平台姿态角 Yaw 、 $Pitch$ 、 $Roll$,使用类似式(3)的方式将惯性平台坐标系转换到当地水平参考系,转换关系如下:

$$R_{i \rightarrow local} = R(Yaw) \times R(Pitch) \times R(Roll) \quad (3)$$

基于POS测得的经度(L)和纬度(B)值,将当地水平参考坐标系转换到空间直角坐标系,转换关系如下:

$$R_{l \rightarrow world} = \begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L & -\cos L \sin B \\ -\sin L \sin B & \cos L & -\sin L \cos B \\ \cos B & 0 & -\sin B \end{bmatrix} \quad (4)$$

综上所述,再引入POS测得GNSS天线相位中心在空间直角坐标系下坐标 P_{GNSS} ,得到激光点在空间直角坐标系下坐标 P_{world} ,如下:

$$P_{world} = P_{GNSS} + R_{l \rightarrow w} R_{i \rightarrow l} (R_{s \rightarrow i} R_{b \rightarrow s} l_b + t_{s \rightarrow i}) \quad (5)$$

2.2 引入地面控制点的系统安置参数标定

为了描述激光扫描基准到POS基准的实际偏移差异,一般需要三个系统安置旋转参数(Yaw 、 $Pitch$ 、 $Roll$)以及三个平移参数(X 、 Y 、 Z)共计六个参数。然而,实际上测距精度远高于测角精度,认为机载激光雷达系统的安置平移出厂值已较为准确,因此本文主要对三个安置旋转值进行标定。

本文采用最小二乘法进行系统安置参数的标定。以地面点三维坐标为真值,机载激光雷达扫描获取该点对应的扫描点坐标为观测值,构建误差方程,待求未知数 $\hat{x} = [\hat{\gamma} \ \hat{\beta} \ \hat{\alpha}]^T$ 即所要标定的三个安置角,使用最小二乘法可以对其进行求解,如下:

$$\hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P l \quad (6)$$

其中, B 为 X 、 Y 、 Z 坐标对未知数的一阶偏导数矩阵, P 为权阵(认为安置角参数相互独立,因此为单位阵),残差矩阵 l 基于式(6)计算得到。

使用最小二乘法对安置参数进行标定,其流程如图1所示,详细如下:1)选择三个安置角作为最小二乘所要迭代估计的参数;2)基于式(6)的坐标转换关系构造观测方程;3)引入地面控制点,输入其三维空间坐标(作为真值)及其对应扫描点三维坐标(作为观测值),构造残差矩阵;4)每个控制点及其对应扫描点形成一组观测方程,每组观测对应三个维度的空间坐标残差,全部有效观测构成一个最小二乘问题;5)最后,对最小二乘问题进行迭代计算,求解出安置参数的最优估计值。

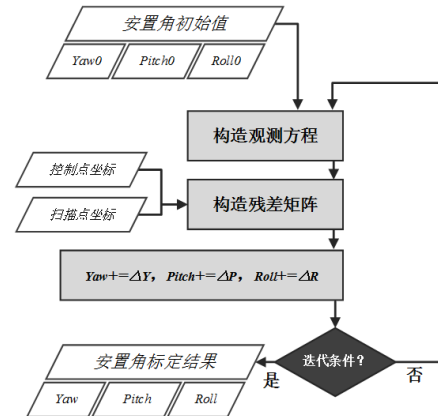


图1 安置参数的最小二乘修正流程

Fig.1 Workflow of least squares correction for mounting parameters

2.3 利用时间信息的航带重叠区点云空间分割

通过在多航带重叠区中提取对应关系来实现航带平差，是一种可行的思路。且得益于 POS 与 机载激光雷达系统的结合，可以利用各扫描点所具有的时间信息，辅助航带重叠区点云的空间分割，流程如图 2 所示，详细如下：1) 导入多航带点云，并选取基准航带；2) 使用一种快速搜索策略确定航带点云包围盒，借助扫描线索引和时间戳信息，将线头尾两条扫描线的投影距离近似视为航带长度，扫描线长度近似视为航带宽度，进而提取出相邻航带重叠区点云；3) 设置点云分块参数，按一定时间间隔对重叠区点云进行分块处理；4) 采取点云预处理，使用半径滤波移除噪点以减少干扰，使用体素滤波进行降采样以减少参与点云匹配的点的数量，进而降低匹配的运算量。

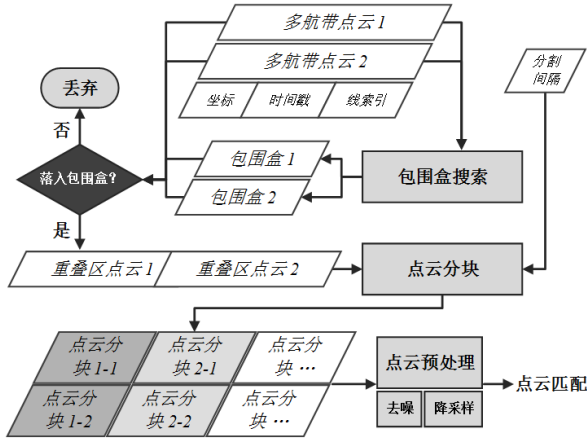


图 2 航带重叠区点云分割流程

Fig.2 Workflow of point cloud segmentation in overlapping area between air strips

2.4 基于 GICP 的机载点云匹配

多航带点云的偏移，本质上可以使用一个变换关系来描述。因此，本文基于点云匹配方法来求解不同航带点云的变换关系。点云匹配，指输入两个激光雷达扫描点云，输出一个变换使得两者重合程度尽量高。在点云匹配方法中，迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 是最为经典的点云匹配算法 (Si 等, 2022)。统一 ICP (Generalized ICP, GICP) 方法 (Segal 等, 2009)，提供了一个 ICP 的统一框架，用以描述和实现点到点、点到面和面到面的点云 ICP 匹配，可以在机载激光雷达系统点云匹配和航带平差中发挥作用。

GICP 中，定义目标函数求解最优变换 T 。首先定义第 i 个点对的有向距离 $d_i^{(T)} = b_i - T a_i$ 。使用最大似然估计 (Maximum Likelihood Estimation, MLS) 迭代计算 T 。

对于点到点 ICP，则：

$$T = \operatorname{argmin}_T \sum_i \|d_i^{(T)}\|^2 \quad (7)$$

对于点到面 ICP，则：

$$T = \operatorname{argmin}_T \left\{ \sum_i \|P_i \cdot d_i\|^2 \right\} \quad (8)$$

其中， P_i 为一个正交投影矩阵，它将向量投影到 b_i 法向量的局部平面上。

以重叠区点云分块作为点云匹配的输入点云，使用 GICP 方法求解对应分块的变换矩阵，作为 POS 轨迹改正的依据。

2.5 基于时间戳的插值优化策略与轨迹改正

点云分块的策略有利于提高匹配算法效率，但也造成了一些问题：1) 点云匹配可能不收敛、匹配失效；2) 点云分块处出现“断层”。

对此，本文采用基于时间戳的插值优化策略，以解决上述问题并实现对轨迹波动误差的消减。首先为每对点云分块对应一个时间戳和一个变换矩阵，取该分块空间中心点时间戳作为该分块对应的时间戳，使用点云匹配结果点云为对应的变换矩阵。

对于变换矩阵有效性问题，对每个点云分块的变换矩阵结果进行超限判断，平移和旋转值大于阈值的，认为该变换矩阵无效，则将该分块对应变换矩阵设为单位阵，或利用其前后相邻分块插值得到变换矩阵。

对于分块边缘处连续性问题，使用线性插值策略，利用各点的时间戳属性，以其前后两个点云分块对应时间戳为区间，以对应变换矩阵为已知量，求解各点的变换矩阵。

最后，对 POS 轨迹进行修正。由于其同样对应有时间戳，因此同样适用于线性插值方法，实现对 POS 的修正且保证轨迹的连续性。修正完成的 POS 即可用于融合生成新的多航带点云。

3 实验结果

3.1 实验环境、数据与评价指标

本文开展安置参数标定和点云匹配航带平差的实验配置见表 1。

表 1 实验配置

Table 1 Experiment PC configuration

硬件	规格
CPU	Intel Core i5-12500, 3.0 GHz
核数, 线程数	6 核, 12 线程
内存	16.0 G
GPU	未使用

本文使用了三组机载激光雷达系统采集的机载点云数据进行实验，数据集说明见表 2。

表 2 实验数据集

Table 2 Experiment dataset

名称	航高	航带数	备注
BD150	150 m	4	标定场, 用于系统安置检校。
DL200	200 m	2	电力巡线, 往返长航带。
BZ400	400 m	8	标准作业, 某区域多条平行航带。

为了便于结果对比与分析, 对各数据集也使用手动调参的标定方法得到系统安置参数并融合点云, 其结果作为对照。使用点云剖面检查的方式查看并评估多航带点云的融合效果, 同时引入均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 进行定量评估。对修正后的点云分块以及匹配点分别计算 RMSE, 计算方式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i d_i^2} \quad (9)$$

其中, n 为点数, d_i 为第 i 组对应点的欧式距离。

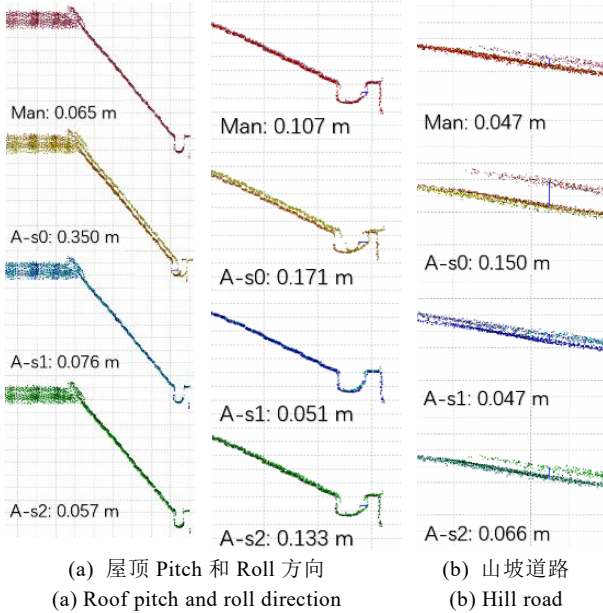


图 3 安置参数标定结果点云剖面分析

Fig.3 Point cloud profile analysis on calibration results of mounting parameters

在各安置参数下, 查看不同地物特征的多航带点云剖面距离, 如图 3(a)和(b)所示。可以看出, “Auto-s0”的点云分层距离较大, “Auto-s1”融合效果较好几乎不存在分层, 而 “Auto-s2”介于两者之间。

使用点云偏差较小的参数 “Auto-s1” 和 “Auto-s2” 对照 “Man”, 在更多的地物特征上查看与对比融合点云结果, 如图 3(c)至(f)所示。可以看出, “Auto” 结果与 “Man” 结果接近甚至更好, 反映出本文提出的系统安置参数标定方法的有效性。

总结而言, 系统安置参数的标定不可忽视标定航带选取问题, 亦即地面控制点的分布问题, 其在

3.2 安置参数标定结果分析

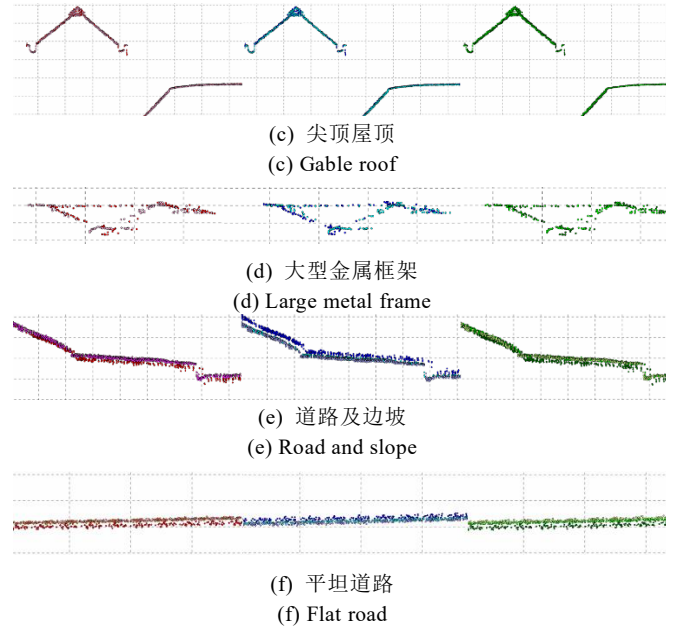
在 BD150 数据集下, 选取控制点分布情况不同的航带 (“Auto-s0” 至 “Auto-s2”) 进行安置参数标定, 并与手动参数 (“Man”) 对照, 结果见表 3。

表 3 安置参数标定结果

Table 3 Calibration results of mounting parameters

名称	控制点	Yaw	Pitch	Roll
Man	无需	0.009078	0.115774	-1.126422
Auto-s0	分布较差	-0.055524	0.128989	-1.056501
Auto-s1	分布较好	0.036662	0.135054	-1.126159
Auto-s2	分布一般	0.080663	0.134395	-1.074192

从表中可以看出, “Auto-s1” 与 “Man” 在参数上差异最小, “Auto-s0” 差异最大, “Auto-s2” 介于两者之间。为了验证各个标定参数结果与手动标定结果的差异程度是否影响最终点云融合效果, 使用上述四个参数分别得到融合点云, 使用剖面检查的方式考察融合效果, 如图 3 所示。



一定程度上也决定了后续点云融合效果。本质上, 这是因为标定过程依赖最小二乘问题的构造与求解, 而在本实验中控制点及其对应扫描点的选取就决定了观测方程与残差矩阵的构造。因此, 理想的标定条件是: 1) 默认机载 POS 是准确的; 2) 每个控制点都在点云中存在对应空间位置几乎相同的同名扫描点; 3) 点云中可视的控制点的三维空间分布较为合理, 平面位置上均匀覆盖该航带, 高程上也存在较大的变化。在这样的条件下, 更有可能标定得到理想的系统安置参数。

3.3 航带平差结果分析

基于上述安置参数标定结果, 设置点云分块时间分割参数为默认的 10 秒, 即对重叠区点云按每 10 秒时间间隔对其进行分块。在此基础上, 在 DL200 和 BZ400 数据集下开展点云匹配航带平差实验, 前后 RMSE 及其与手动融合参数结果对照见表 4 和表 5。其中, 对照组均使用“Man”安置参数, DL200 数据集使用标定得到较好的“Auto-s1”安置参数, BZ400 数据集有意使用稍差的“Auto-s0”安置参数, 以实验航带平差对偏移较大的多航带点云的修正效果。

表 4 DL200 数据集下航带平差前后 RMSE

Table 4 DL200 dataset: RMSE before and after SA

航带	对照	平差前	平差后	平差后/平差前(%)
1			基准航带	
2	0.1801	0.1791	0.1319	73.6%

表 5 BZ400 数据集下航带平差前后 RMSE

Table 5 BZ400 dataset: RMSE before and after SA

航带	对照	平差前	平差后	平差后/平差前(%)
1	0.7449	0.5344	0.3023	56.6%
2	0.4724	0.3599	0.2300	63.9%
3	0.3659	0.3705	0.2453	66.2%
4			基准航带	
5	0.3060	0.3068	0.2128	69.4%
6	0.3897	0.4147	0.2825	68.1%
7	0.4096	0.3936	0.2500	63.5%
8	0.5758	0.5524	0.3509	63.5%

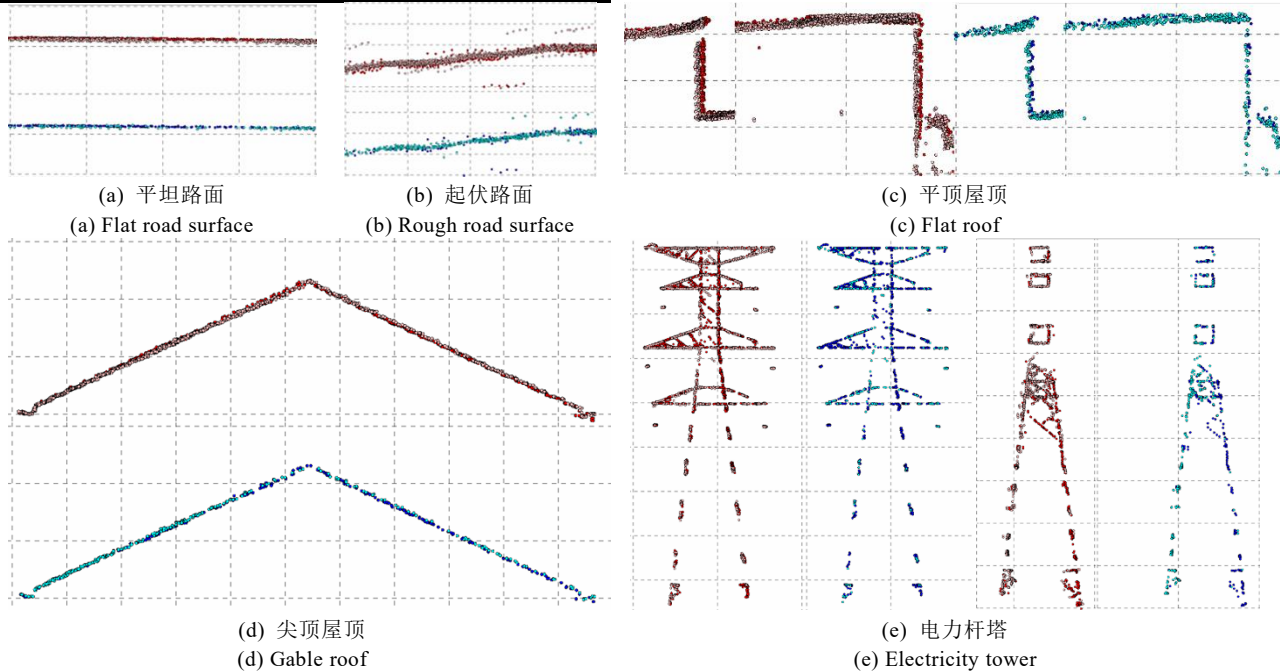


图 4 DL200 数据集下航带平差结果点云剖面分析

Fig.4 DL200 dataset: Point cloud profile analysis on strip adjustment results

在 BZ400 数据集下, 如图 5 所示, 部分典型地物有: 1) 起伏山坡, 如图 5(a)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效果接近; 2) 平坦道路, 如图 5(b)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效果接近; 3) 围墙与

从表中可以看出, 本文提出的系统安置参数标定方法有效提高了点云融合的初始精度, 因为即使有意使用效果较差的安置参数, 其平均 RMSE 也比对照组手动安置参数更低。在此基础上, 本文提出的航带平差方法也对提高多航带点云匹配精度、消减点云“分层”问题有明显作用, 根据平差前后 RMSE 比值, 误差减小了 1/4 至 1/3 左右。

在两个数据集下使用剖面分析工具, 查看典型地物点云剖面, 将系统标定后进行航带平差的结果“Auto”与手动安置参数融合结果“Man”进行对比, 评估多航带融合点云的匹配情况。

在 DL200 数据集下, 如图 4 所示, 部分典型地物有: 1) 平坦路面, 如图 4(a)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效果都较好, “Auto”的偏移比“Man”要小; 2) 起伏路面, 如图 4(b)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效果接近; 3) 建筑物平顶屋顶, 如图 4(c)所示, “Auto”和“Man”在水平上都存在轻微偏移, 匹配效果都较好, “Auto”总体上偏移比“Man”要小; 4) 建筑物尖顶屋顶, 如图 4(d)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效果接近; 5) 电力杆塔, 如图 4(e)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效果接近。

小结而言, 在 DL200 数据集下, 航带平差有效提高了多航带点云匹配精度, 其结果总体要优于手动对照方法。

土堆, 如图 5(c)所示, 高程上, “Auto”和“Man”点云匹配效果接近, 水平上, “Auto”和“Man”存在一定的偏移, “Auto”较“Man”更大; 4) 房屋建筑, 如图 5(d)所示, “Auto”和“Man”点云匹配效

果接近, 尖顶屋顶点云都存在一定的偏移。

小结而言, 在 BZ400 数据集下, 虽然航线高度有所提高, 但本文提出的航带平差方法依然有效, 其在大部分情况下不会比手动对照方法误差更大, 达到了较高的可用性。

综合航带平差前后 RMSE 指标和融合点云剖面检查结果, 本文提出的系统标定方法可以提高多航

带点云的初步融合精度, 且相较于手动调参的传统作业流程大大节省了操作时间; 本文提出的基于点云匹配的航带平差方法, 对于不同质量的系统安置参数都具有较好的兼容性, 且在不同条件的数据集都表现出了较好性能, 在定量上也明显降低了匹配误差, 具有较好的泛化能力。

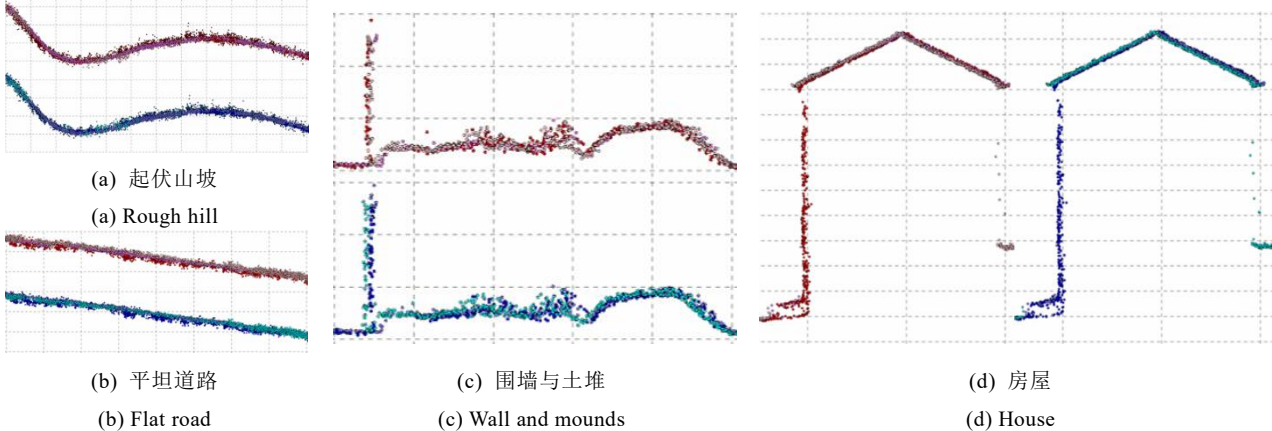


图 5 BZ400 数据集下航带平差结果点云剖面分析

Fig.5 BZ400 dataset: Point cloud profile analysis on strip adjustment results

4 结 论

本文提出了基于 GICP 点云匹配的机载激光雷达航带平差方法, 分别针对机载激光雷达系统中的安置系统误差和轨迹波动随机误差, 优化了多航带点云匹配效果, 提高了机载点云数据融合质量。

机载激光雷达系统安置参数标定, 基于严密的机载激光雷达观测模型, 引入了地面控制点并利用其绝对坐标值和激光雷达扫描坐标值构建残差方程, 通过非线性优化求解系统安置参数。该方法减小了安置误差对点云融合结果的影响, 相较于传统的手动调参方法, 该方法在优化点云融合效果的同时大大节省了操作时间。

基于 GICP 机载点云匹配的航带平差, 首先利用机载激光雷达系统扫描提供的时间信息, 对多航带点云提取重叠区并分割, 然后基于 GICP 方法对分块点云进行匹配, 最后使用插值优化策略对融合点云以及 POS 轨迹进行修正。该方法缓解了因轨迹波动而造成的多航带融合点云偏移问题, 且由于其为数据驱动的航带平差方法, 因此理论上还可以应用于修正其它因素造成的点云不匹配问题, 具有较好的拓展性。

参考文献(References)

Anand B, Barsaiyan V, Senapati M and Rajalakshmi P. 2019. Real time LiDAR point cloud compression and transmission for

- intelligent transportation system. 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), 2019: 1-5 [DOI: 10.1109/VTCSpring.2019.8746417]
- Arastounia M. 2015. Automated recognition of railroad infrastructure in rural areas from LiDAR data. Remote Sensing, 7(11): 14916-14938 [DOI: 10.3390/rs71114916]
- Cao M W. 2018. Research on high precision semantic point cloud mapping for autonomous driving. Shanghai Jiao Tong University (曹明玮. 2018. 面向无人驾驶的高精度语义点云建图方法研究. 上海交通大学) [DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2018.002412]
- Chen Z Q, Li J P and Yang B S. 2021. A strip adjustment method of UAV-borne lidar point cloud based on DEM features for mountainous area. Sensors, 21(8): 2782 [DOI: 10.3390/s21082782]
- Liu H, Gu L J and Ren R Z. 2021. Research progress of forest parameter acquisition based on UAV remote sensing technology. Remote Sensing Technology and Application, 36(3): 489-501 (刘鹤, 顾玲嘉, 任瑞治. 2021. 基于无人机遥感技术的森林参数获取研究进展. 遥感技术与应用, 36(03): 489-501) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.3.0489]
- Ma H. 2011. Research on error calibration methods of airborne LiDAR system. Shandong University of Science and Technology (马浩. 机载激光雷达测量系统误差检校方法研究. 2011. 山东科技大学)
- Segal A, Haehnel D and Thrun S. 2009. Generalized-icp. Robotics: Science and Systems. 2(4): 435
- Shan J, Tian X X, Li S and Li R F. 2022. Advances of spaceborne laser altimetry technology. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 51(6): 964-982 (单杰, 田祥希, 李爽, 李韧菲. 2022. 星载激光测高技术进展. 测绘学报, 51(06):964-982) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.3.0489]

- 10.11947/j.AGCS.2022.20220174]
- Si H Q, Qiu J X and Li Y. 2022. A review of point cloud registration algorithms for laser scanners: applications in large-scale aircraft measurement. *Applied Sciences*, 12(20): 10247 [DOI: 10.3390/app122010247]
- Tian Y, Zhao Y B, Lei S G, Ji C N, Duan L and Sedlák V. 2022. Automatic calibration method for airborne LiDAR systems based on approximate corresponding points model. *Journal of Sensors*, 2022: 4853419 [DOI: 10.1155/2022/4853419]
- Wang Z H. 2014. Research on calibration method of airborne lidar. Capital Normal University (王致华. 2014. 机载激光雷达定标方法研究. 首都师范大学)
- Yang S J, Zhang K S and Shao Y S. 2017. Strip adjustment method for airborne LiDAR system. *Chinese Journal of Lasers*, 44(12): 1210003 (杨书娟, 张珂殊, 邵永社. 2017. 机载激光雷达系统的航带平差法. 中国激光, 44(12): 1210003 [DOI: 10.3788/cj1201744.1210003])

Airborne LiDAR strip adjustment based on GICP

JIN Qingeng¹, ZHANG Ju^{2,3}, HU Qingwu¹, AI Mingyao¹

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of National Geographic Census and Monitoring, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430072, China;

3. Wuhan City Polytechnic, Wuhan 430064, China

Abstract: Airborne LiDAR is an effective approach of rapidly acquiring ground information over a wide area. However, in this multi-sensor integrated system, a series of systematic errors and random errors exist, with system mounting errors and trajectory errors being typical among them. In this paper, we propose a method of airborne LiDAR strip adjustment based on GICP point cloud matching to address these two types of errors. We constructed a least-squares correction for system mounting parameters based on the observation model of the airborne LiDAR system, and introduced ground control points to calibrate the system mounting parameters. We used temporal information to achieve spatial segmentation of the overlapping areas of the flight strips, matched their point clouds based on GICP which solved for transformation relationships, and employed an interpolation optimization strategy to correct the airborne point clouds and also POS trajectory. Experiments demonstrated that the proposed calibration method can enhance the fusion accuracy of multiple flight strip point clouds and offer the advantages of rapidity and convenience. The strip adjustment method showed good performance in reducing matching errors while maintaining compatibility and generalization capabilities.

Objective

The objective of this study is to address the challenges posed by systematic errors and random errors in airborne LiDAR system, particularly focusing on mounting errors and trajectory errors. Airborne LiDAR technology has emerged as a powerful tool for rapidly acquiring detailed topographic information over large geographic areas. However, the accuracy of LiDAR-derived data can be compromised by various errors inherent in the system. System mounting errors refer to inaccuracies in the positioning and orientation of the LiDAR sensor onboard the aircraft, while trajectory errors encompass deviations in the aircraft's flight path. These errors can lead to misalignments in the collected point clouds, affecting the quality and accuracy of the final data products. Therefore, the primary goal of this research is to develop methods for mitigating these errors and improving the overall accuracy of airborne LiDAR data.

Method

In this paper, we propose a method of airborne strip adjustment based on GICP point cloud matching. We begin by formulating a least-squares correction approach based on the observation model of the airborne LiDAR system. This enables us to refine the system's mounting parameters, effectively aligning the LiDAR sensor with the aircraft's position and orientation. We then introduce ground control points to further enhance the calibration process. By accurately calibrating the system mounting parameters, we address systematic errors and improve the precision of point cloud data acquisition. Furthermore, we leverage time and spatial information to segment the overlapping areas of flight strips. Employing the Generalized Iterative Closest Point (GICP) algorithm, we perform point cloud matching to establish transformation relationships between overlapping strips. This facilitates the correction of deviations introduced by trajectory fluctuations. Finally, we implement an interpolation optimization strategy to refine the alignment between the airborne point clouds and the Position and Orientation System (POS) trajectory. These steps collectively contribute to the reduction of errors within the LiDAR data, resulting in more accurate and reliable geospatial information.

Result

The experimental results of our study are highly promising. We calculate RMSE before and after strip adjustment process, and use profile tools to check the point cloud fusion results. Results show that the calibration method can improve the initial fusion accuracy of point clouds from multiple flight strips, and greatly save the operation time compared with the traditional manual adjustment process; the strip adjustment method has good compatibility with the system mounting parameters of different qualities and demonstrates good performance in datasets with different conditions, and also significantly reduces the matching error in quantity with good generalization ability and solves misalignments caused by trajectory fluctuations.

Conclusion

In conclusion, this research presents effective solutions to mitigate systematic errors and random errors in airborne LiDAR data collection. By addressing system mounting errors and trajectory errors, we have demonstrated significant enhancements in data accuracy and quality. The proposed calibration method offers a quick and convenient means of improving the alignment of the LiDAR sensor with the aircraft, thereby reducing systematic errors. The strip adjustment method based on GICP point cloud matching, excels at rectifying errors associated with trajectory fluctuations. These methods, when applied in tandem, hold great promise for the geospatial industry, providing more reliable and precise topographic information for a wide range of applications, including urban planning, environmental monitoring, and infrastructure development. The research findings underscore the importance of error mitigation strategies in advancing the capabilities of airborne LiDAR technology and its contribution to geospatial data accuracy.

Key words: airborne LiDAR system, strip adjustment, point cloud matching, GICP, mounting error, trajectory error