引文格式：武永彩,翦立. 顾及相似点匹配模型的安置角自动修正方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 133-135. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.029

顾及相似点匹配模型的安置角自动修正方法

武永彩[1]，翦　立[2]
（1. 西安思源学院，陕西 西安 710038；2. 西安新生代智能科技有限公司，陕西 西安 710004）

摘　要：扫描仪安置角系统误差对机载雷达扫描系统地表三维点云质量具有严重影响，地表布设控制点的修正方法不能满足范围广、地形复杂的观测条件。根据相邻航带重叠区域内地表同名特征点的相似特征进行迭代匹配，当样本整体距离均方差达到最小时终止迭代，可获取安置角参数最优修正解。该方法在很大程度上简化了安置角参数标定的工作流程，适用于大范围、地形复杂的观测区域，可为类似机载激光雷达扫描仪的安置角标定工作提供参考。

关键词：相似点；匹配；安置角；迭代运算；LiDAR
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0133-03

Automatic Correction Method for Placement Angle Considering Similarity Point Matching Model

WU Yongcai[1], JIAN Li[2]
(1. Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China;
2. Xi'an New Generation Intelligent Technology Co., Ltd., Xi'an 710004, China)

Abstract: The placement angle system error of scanner has a serious impact on the quality of surface 3D point cloud of airborne radar scanning system. The correction method for surface control points cannot meet the observation conditions of wide range and complex terrain. We carried out iterative matching based on the similar features of surface feature points with the same name in the overlapping area of adjacent navigation bands. When the overall distance mean square error of samples reaches its minimum, the iteration is terminated, and the optimal correction solution of placement angle parameter can be obtained. This method greatly simplifies the workflow of placement angle parameter calibration, and is suitable for large scale, complex terrain observation areas, which can provide a reference for placement angle calibration work of similar airborne LiDAR scanners.

Key words: similar point, matching, placement angle, iterative calculation, LiDAR

无人机与机载LiDAR技术的结合，大大提高了外业数据采集效率，再配合室内自动化、批量化数据处理程序，使测绘工作提升到了前所未有的高度[1-5]。机载LiDAR虽然提高了工作效率，但若要保证其后期地形数字成果的质量，数据处理环节是关键。由于飞行器同时搭载了INS、激光扫描仪、GNSS[6-7]，不同设备之间的安置集成误差不可避免，将严重影响点云数据相邻点云航带间的套合精度。针对机载雷达扫描系统安置角的检校问题，目前较成熟的方法是利用地表布设控制点的方式对测量数据进行安置角修正，也有不少学者[8-10]从其他方向提供了相关的安置角修正方法，虽在一定程度上实现了安置角的标定，但工作程序繁杂、效率低下，且对标定场地要求过高，不适用于地形复杂、大范围的测量区域（如地形起伏大、植被茂密的大面积山区）。因此，针对GNSS、INS与激光扫描仪间安置集成不严密导致的后期点云分层问题，本文提出了一种顾及特征相似点的匹配模型，对原始点云内部相似特征点进行样本对比、更新迭代，以最小二乘配置法求解，实现自动化解算、检校以及评估雷达扫描仪偏移与安置角误差，达到控制点云数据精度的目的。

1　机载LiDAR系统误差来源

1.1　系统坐标传递原理

机载LiDAR系统由GNSS、INS和激光扫描仪组成，地表任意一点 P 的最终空间坐标是经扫描仪采集后的S坐标系转换为IMU\GNSS的I坐标系，再转换为成果所需的WGS84坐标。在坐标系统传递过程

项目来源：陕西省教育科学“十四五”规划2022年度课题资助项目（SGH22Y1866）。
第一作者简介：武永彩（1982—），硕士，副教授，研究方向为测绘与结构工程，E-mail：921231003@qq.com。

中，正是由于激光扫描仪S坐标系与惯导系统I坐标系存在设备间的安置集成系统误差，最终导致 P 点坐标产生差异[11]。

设定 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}}$ 分别为S坐标系至I坐标系、I坐标系至WGS84坐标系的转换关系，原安置关系为 $(\Delta X_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}}, \Delta Y_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}}, \Delta Z_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}})$，以 P 点的空间直角坐标 $(X_P^{\mathrm{S}}, Y_P^{\mathrm{S}}, Z_P^{\mathrm{S}})$ 为例，P 点在WGS84坐标系的最终坐标为：

$$X_P^{\mathrm{W}} = X_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}} \Delta X_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{I}} X_{\mathrm{P}}^{\mathrm{S}} \tag{1}$$

1.2 系统安置角误差分析

由于各仪器自有独立坐标系均为空间直角坐标系，因此扫描仪安置角误差产生于S坐标系3个坐标轴与I坐标系3个坐标轴之间的角度差。由图1可知，系统误差由俯仰角 φ、横滚角 ω 和航向角 κ 的定位误差构成，随着飞行器航高的不断增加，安置角带来的系统误差不断增大。此外，由于安置角在3个坐标方向上存在偏转角[12-14]，航带间往返重叠观测时，将导致两次数据间存在2倍于偏转角的夹角，目标点数据伴随一定程度的变形，导致相邻航带无法完好重合，严重影响观测质量，也是系统误差的主要组成部分。

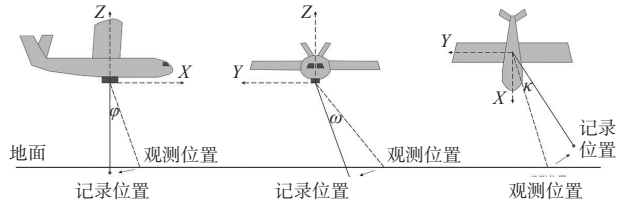


图1 安置角误差来源

2 相似特征点匹配修正方法

由于在机载LiDAR系统数据采集前无法有效鉴定、获取扫描仪安置角详细参数，且传统地表布设控制点方法的成本高、效率低，本文从点云数据采集后期入手，通过相邻航带重叠点云数据中相似特征点进行迭代匹配运算，具体过程是在 X、Y、Z 三个方向上进行偏置平移与旋转，借助最小二乘配置，获取相似特征点匹配最优解状况下的安置角参数，以修正各航带间原始点云数据，整个数据迭代过程采用程序自动识别完成，实现高效标定安置角参数和控制成果质量的目标。S坐标系到I坐标系的转换关系为[11,15-20]：

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{I}} = \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}} = \begin{bmatrix} \cos r\cos y - \sin r\sin y\sin p & -\cos p\sin y & \cos y\sin r + \cos r\sin p\sin y \\ \cos r\sin y + \sin r\cos y\sin p & \cos y\cos p & \sin r\sin y - \cos r\sin p\cos y \\ -\cos p\sin r & \sin p & \cos r\cos p \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'}$ 为S坐标系到I坐标系的旋转矩阵；$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}}$ 为3个安置角参数的转移矩阵；r、y、p 为横滚角、俯仰角、航向角。

将式（2）代入式（1）获得 P 点在W坐标系下的空间直角坐标模型，再将相邻点云航带的两个同名特征点数据带入模型，则有：

$$X_P^{\mathrm{W}} = X_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}} \Delta X_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{W}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} X_P^{\mathrm{S}} \tag{4}$$

$$X_P^{\mathrm{W}} = X_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} \Delta X_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} X_{P1}^{S} \tag{5}$$

$$X_P^{\mathrm{W}} = X_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} \Delta X_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} X_{P2}^{\mathrm{S}} \tag{6}$$

$$X_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} - X_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} + (\boldsymbol{R}_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} b_1 - \boldsymbol{R}_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} b_2) = \left[\left(\boldsymbol{R}_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} \right) \left(-\boldsymbol{R}_{\mathrm{I2}}^{\mathrm{W}} \boldsymbol{B}_2 + \boldsymbol{R}_{\mathrm{I1}}^{\mathrm{W}} \boldsymbol{B}_1 \right) \right] \begin{bmatrix} \Delta X_{\mathrm{S-I}}^{\mathrm{I}} \\ e \end{bmatrix} \tag{7}$$

将式（5）与式（6）作一阶差分后，赋值初始安置角参数（Pitch=0、Roll=0、Heading=0），同时令 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I0}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} X_P^{\mathrm{S}}$ 的反对称矩阵为 $\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I0}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} X_{P1}^{\mathrm{S}} = b_1$，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I0}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{S}'} X_{P2}^{\mathrm{S}} = b_2$，可获得顾及相似同名特征点的扫描仪安置角参数的标定模型。

在顾及相似同名特征点的整个迭代过程中，通过初始赋值，n 个同名点可获取 $3n$ 个计算方程，当首次迭代运算结束后，可获取一组安置角旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{S}'}^{\mathrm{I}}$，将其作为第二次迭代运算的初始值，进行第三次迭代，重复上述迭代过程，每次迭代后可获得一组同名点偏移均值 ΔX、ΔY、ΔZ，当样本距离整体均方差小于给定阈值时停止迭代，获得安置角修正值最优解。

3 实例验证与分析

为验证本文方法的可靠性，通过一处实测案例进行全流程测试。实验场面积约为2.0 km²，采用DJIM600pro无人机搭载RIEGL激光雷达扫描仪，航飞高度为300 m，航飞6条航带（图2），共采集182 965 852个点云数据。实验区地形起伏较大，整体流程分为飞前设备检查、航线规划、点云数据采集和内业点云数据的安置角标定4个步骤。由于存在安置角参数系统误差，相邻航带重叠区域点云数据并不完整套合，因此选取L5、L6两条相交航线的观测数据进行测试，其点云叠加情况见图3。

借助最小二乘和迭代计算，实验共匹配4 760个同名点，只有顾及足够的样本数量，迭代计算得到的安置角修正参数才具有可靠性。在复迭过程中，单一

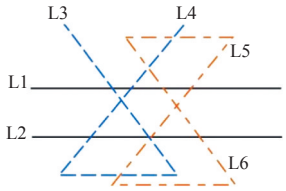


图2　航测线路示意图

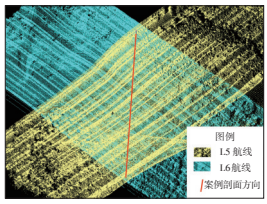
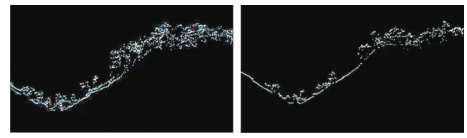


图3　相邻航带的叠加

特征样本较上次迭代结果的匹配距离均值达到最小时，并不能视为整个迭代过程的终止条件，只有在全样本距离整体均方差达到最小、最优时，才能视为迭代运算最优解。实验共进行4次迭代计算，限于篇幅，仅给出相似点匹配首次和末次迭代结果（表1、2）。初始赋值安置角（0.000 0°、0.000 0°、0.000 0°）进行首次迭代，将安置角在3个方向的旋转角迭代结果作为下次运算的初值，反复循环，当样本距离整体均方差达到最小时停止迭代。随着相似点匹配迭代过程的深入，参与计算的样本可能发生轻微变动。通过相似点匹配的迭代运算获得该套激光雷达扫描仪的安置角系统误差修正结果：横滚角−0.030 6°、俯仰角0.051 0°、航向角0.000 0°。样本数据在3个方向的最优匹配距离：*X* 修正为0.140 635 m、*Y* 修正为0.156 903 m、*Z* 修正为−0.037 416 m。由图4可知，安置角修正后L5、L6两条航带点云实现了较好的套合，在很大程度上减弱或消除了激光扫描仪的安置角系统误差，达到了实验的目的。



a 安置角校正前　　b 安置角校正后

图4　顾及相似特征点匹配前后点云剖面效果

通常，初始安置角设置为0.000 0°，表示未对原始两条相交航带点云进行修正处理，通过后期特征点的匹配与迭代，初始值均会发生变动，直到偏置、旋转后特征匹配达到迭代终止条件，即可获取最优安置角参数修订值。

表1　首次迭代计算前相似特征点匹配结果

指标	横滚角/(°)	俯仰角/(°)	航向角/(°)	*X* 偏移/m	*Y* 偏移/m	*Z* 偏移/m	样本距离/m
最小值	−1.032	−29.982	−1.282	−5.446	−4.990	−5.884	0.028
最大值	1.558	24.278	1.268	5.205	5.710	6.261	7.995
平均值	0.031	0.053	0.008	0.053	0.045	0.021	1.758
STD	0.237	1.408	0.181	0.721	0.795	0.797	2.606
CNT	–	3 752	–	–	–	6 635	4 759

注：横滚角为0.000 0°，俯仰角为0.000 0°，航向角为0.000 0°。

表2　末次迭代计算后相似特征点匹配结果

指标	横滚角/(°)	俯仰角/(°)	航向角/(°)	*X* 偏移/m	*Y* 偏移/m	*Z* 偏移/m	样本距离/m
最小值	−1.047	−31.778	−1.292	−5.533	−5.027	−5.591	0.040
最大值	1.540	22.430	1.261	5.295	5.731	6.158	7.998
平均值	0.031	0.045	0.009	0.054	0.023	0.015	1.791
STD	0.237	1.515	0.185	0.722	0.796	0.798	2.603
CNT	–	3 766	–	–	6 643	–	4 760

注：横滚角为−0.030 6°，俯仰角为0.051 0°，航向角为0.000 0°。

4　结　论

顾及相似点特征匹配的安置角标定方法，摆脱了目前机载LiDAR安置角标定对基于地面布设控制点方法的依赖，以原始点云数据为对象，通过相邻航带点云重叠区域相似同名特征点在三维空间进行旋转、平移完成多次迭代匹配，获得安置角参数最优解，该过程精确、成本低、效率高。本文方法在很大程度上简化了安置角参数标定的工作流程，无需布设地面控制点，完全由内业相似点匹配模型进行修正。同时，本文方法更适用于大范围、地形复杂的区域，可为类似机载激光雷达扫描仪安置角标定工作提供参考。

参考文献

[1] 白斌. 机载LiDAR在大比例尺地形图测绘中的应用分析[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(4):186-188

[2] 姜丙波,柳忠伟,彭云,等. 无人机机载激光雷达在抽水蓄能电站大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 测绘通报,2021(增刊1):248-251

[3] 郭春海,张英明,丁忠明. 无人机机载LIDAR在沿海滩涂大比例尺地形测绘中的应用[J]. 测绘通报,2019(9):155-158

[4] 张志友. 免像控机载LIDAR技术在大比例尺地形测量中的应用[J]. 地矿测绘,2021,37(2):12-15

[5] 黄妙华. 机载LIDAR在大比例尺地形图制作中的应用[J].

（下转第140页）