引文格式：罗保林,张伯树,陈壮,等. 移动三维激光扫描点云的整体配准方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 62-65. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.013

# 移动三维激光扫描点云的整体配准方法

罗保林，张伯树，陈　壮，王继斌，曾　聪
（成都市勘察测绘研究院，四川 成都 610031）

**摘　要：**针对移动三维激光扫描中分段点云数据闭合时首尾测段重叠区域存在闭合差的问题，分析了点云数据配准方法与原理，以点云拼接的转换参数为切入点，在粗略配准结果的基础上，顾及点云数据的整体性和关联性，提出了以测段间转换关系为参数的整体平差方法，实现了闭合差在各测段中的分配和改正。将改正数应用于转换参数中，对点云进行纠正，纠正结果与实测校核点的点位较差均在 10 cm 以内，数据质量得到了极大改善，证明了方法的可行性，具有较高的实用价值。

**关键词：**三维激光扫描；点云配准；ICP 配准；整体配准
**中图分类号：**P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0062-04

## Global Registration Method for Mobile 3D Laser Scanning Point Clouds

LUO Baolin, ZHANG Boshu, CHEN Zhuang, WANG Jibin, ZENG Cong
(Chengdu Institute of Survey and Investigation, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Addressing the issue of closure errors in the overlapping areas of initial and final survey segments during the closure of segmented point cloud data in mobile 3D laser scanning, we analyzed the methods and principle of point cloud data registration. Focusing on the transformation parameters for point cloud stitching, based on the preliminary registration results, considering the integrity and correlation of point cloud data, we put forward a global registration method taking the transformation relationship between survey segments as parameters, enabling the distribution and correction of closure errors across various survey segments. We applied the correction values into the transformation parameters to adjust the point cloud. The point position discrepancies of corrected results and actual verification points were all within 10 cm, significantly improving data quality, which could demonstrate the feasibility of method and its high practical value.

**Key words:** 3D laser scanning, point cloud registration, ICP registration, global registration

移动三维激光扫描技术凭借其数据的直观性和开放性，在测绘领域得到了广泛应用，如地形图测量、细部专题测量和地下空间测量等。国内外对架站式移动三维激光扫描的应用进行了较多研究[1-2]，当测站较多时其拼接工作耗时较多，且易引入人工误差，因此部分仪器推出了视觉跟踪技术[3]，但对现场条件要求较高，内业需对测站的对齐进行检查和调整，工作量仍然较大。近年来融合 SLAM 和惯导等定位技术的便携式移动三维激光扫描技术逐步成熟，实现了持续性的移动扫描。随着 GNSS 的加入，甚至可以做到单项目的一站式整体扫描，无需进行拼接。然而，在城镇 GNSS 信号较弱区域、室内以及地下空间等环境下，数据精度完全依赖于 SLAM 和惯导，惯导具有时序间的强相关性，导致定位误差随时间不断累积，长时间扫描使得点云数据与真实值的偏差越来越大，因此通常采用分段扫描并控制每测段扫描时间来降低测段内的误差累积。针对移动三维扫描测段间的拼接，大部分软件采用迭代最近点算法[4]（ICP）。该方法适用于线形连接的测段拼接，对于测段构环或构网时存在的闭合差分配问题还没有较好的解决方法。盛业华等[5]采用简易平差分别对平移和旋转参数的闭合差进行分配：对于旋转角闭合差，按测站顺序依次递增地分配到各测站，各测站采用均摊的方式分配；对于坐标平移量闭合差，则以各测站相对于第一测站的累积距离与测站闭合长度之比作为权值进行加权平均分配。然而，转换参数之间往往不独立，因此简易平差方法不严密。本文将架站式扫描的测站平差思想引入移动式扫描的测段平差中，采用一种闭合条件约束的整体配准方法[6]，基于粗配准的点云数据，以测段点云为单位，推导多测段配准的闭合差分配方式。

## 1　移动三维激光扫描点云配准流程

点云的测段间配准是指通过一定的变换将各测段的点云数据整合到统一的坐标系下，并形成完整目标

项目来源：四川省测绘地理信息学会科技开放基金资助项目（CCX202409）。
第一作者简介：罗保林（1993—），硕士，高级工程师，主要从事城市规划测绘和工程测量相关工作，E-mail：923853136@qq.com。

点云的过程。其关键是坐标变换参数旋转矩阵和平移矢量的求解。国内外的拼接配准技术通常包括粗配准和精确配准，粗配准是将不同坐标系下的点云，通过手动平移和旋转的方式对准到同一坐标系下，精度完全依赖于人工，耗时长且容易超限；精确配准是在粗配准的基础上，利用迭代算法将两段点云重叠区域的拼接误差降至最小。

### 1.1　粗配准

原始点云中每测段均为独立坐标系，各测段点云错位严重，测段之间无法进行自动拼接，需进行人工目视定位拼接。粗配准效果直接决定了精确配准的收敛性。因此，粗配准需要使两个点云特征尽可能的靠近。其基本原理为七参数坐标转换，即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{1}$$

式中，$\lambda$ 为待配准点云转换为基准点云的缩放比例，通常扫描是等比例的，因此 $\lambda=1$；$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 为转换平移向量；$\boldsymbol{R}$ 为旋转矩阵；$\alpha$、$\beta$、$\gamma$ 为绕3个轴的旋转角。

为便于计算，在其他领域中往往采用简化七参数

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ -\cos\alpha\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \cos\alpha\cos\gamma+\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha\sin\gamma+\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma & -\sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \tag{2}$$

进行替代计算。简化七参数是建立在旋转角为小角度的前提下的，但粗配准的旋转角通常较大，因此，本文采用基于12参数旋转矩阵的表达方式[7]，即将 $\boldsymbol{R}$ 中的9个矩阵元素和 $\boldsymbol{T}$ 中的3个平移元素均作为变量，组合为一个完整的旋转矩阵：

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

粗配准的旋转矩阵通常包括基于控制点的配准和手动配准两种求解方式。基于控制点的配准从两个点云中选择并提取相同的公共点坐标，采用间接平差的方式直接求取 $\boldsymbol{X}$ 中的12参数，并形成完整旋转矩阵。

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{B}x - \boldsymbol{L} \tag{4}$$

然而，$\boldsymbol{R}$ 中的9个参数不完全独立，由正交矩阵的性质可知，三维旋转矩阵的9个方向余弦之间存在6条非线性关系，即

$$\sum_{i=1}^{3} a_{ij}^2 = 1 \qquad j=1,2,3 \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{3} a_{ij} \times a_{ik} = 0 \quad j=1,2;k=2,3;j\neq k \tag{6}$$

因此，可形成必要约束条件：

$$\boldsymbol{C} \times x - W_x = 0 \tag{7}$$

由式（4）和（7）组成附有约束条件的间接平差，并以平差精度作为配准精度的评价指标。手动配准是指手动对待配准点云进行目视旋转、平移，再直接将旋转角度和平移参数代入 $\boldsymbol{X}$ 形成完整旋转矩阵。

### 1.2　精确配准

精确配准主要采用ICP配准方法。ICP旋转转换参数采用四元素[8-11]，其优点是可减少参数量。四元素表现形式为点 $P(x,y,z)$ 绕空间向量 $\boldsymbol{V}(u,v,w)$ 的旋转，即由一个标量和一个向量组成：

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\dfrac{\theta}{2} & \sin\dfrac{\theta}{2}(u & v & w) \end{bmatrix} \tag{8}$$

首先定义待配准点 $P$ 到基准点云 $S$ 的距离为：

$$d(P,S) = \min_{s\in S} \|s-P\| \tag{9}$$

$P$ 到 $S$ 中的最近点 $s$ 产生的距离即为 $P$ 到 $S$ 的距离。转换七参数定义为：

$$\boldsymbol{X} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad t_x \quad t_y \quad t_z]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \tag{11}$$

ICP点云配准的总体流程为：①对于点集 $P$ 中的点，在曲面 $S$ 上计算其最近点点集，组成平差方程；②通过平差计算得到参数向量 $\boldsymbol{X}$；③根据 $\boldsymbol{X}$ 计算新点集 $P_{k+1}$，以此迭代计算；④当 $P_{k+1}$ 到基准点云 $S$ 的距离平方和的变化小于预设阈值时停止迭代，得到最终参数 $\boldsymbol{X}$。四元素与旋转矩阵的转换公式为：

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2-q_0q_3) & 2(q_1q_3+q_0q_2) \\ 2(q_1q_2+q_0q_3) & q_0^2-q_1^2+q_2^2-q_3^2 & 2(q_2q_3-q_0q_1) \\ 2(q_1q_3-q_0q_2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) & q_0^2-q_1^2-q_2^2+q_3^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

由ICP算法的初值可知，ICP算法要求待配准的两个点云具有较接近的关系，否则会造成迭代时间过长或迭代发散得不到理想结果[12-15]。因此，在ICP中也体现出粗配准的重要性。

### 1.3　整体配准

在测量中为方便数据拼接和验证数据精度，通常将测段路线进行闭合。此时可能会出现每一测段相对于上一测段均进行了完整拼接，但始末测段的闭合处却出现了错层现象，即点云闭合差（图1）。

点云闭合差大多是由点云偏差或同名点的选取误差带来的，无法完全消除。通常偏差在不影响地形图测量时，可不作修正；而过大时则需对误差进行分配（图2）。从理论上来说，$\boldsymbol{X}_{M+1,1}=\boldsymbol{I}$，而实际往往不相等，但也不会偏差特别大。基于粗配准的点云数据，

以单测段点云为单元，严密推导多站配准的闭合差分配方式。

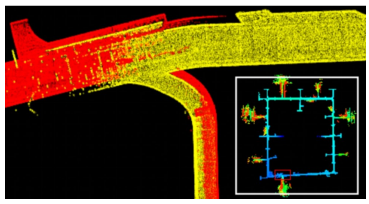


图1 点云闭合差

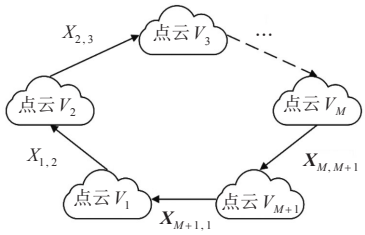



图2 点云闭合环

在式（4）的计算过程中已通过公共点的选取对点云 $V_M$ 和 $V_{M+1}$ 进行了粗配准，各测段点云已接近准确位置，因此将闭合差分配至各测段也是一个微小值，可将式（2）以欧拉角替代，即

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1 & \gamma & -\beta\\ -\gamma & 1 & \alpha\\ \beta & -\alpha & 1\end{bmatrix} \tag{13}$$

七参数方程为：

$$V_j=(\prod_{k=j-1}^{i}X_{k,k+1})V_i \quad j>i \tag{14}$$

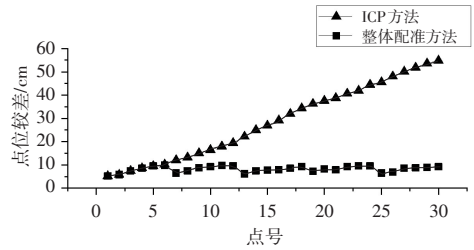
$$\begin{cases}V_M=(\prod_{k=1}^{M-1}X_{k,k+1})V_1\\ V_1=X_{M,1}V_M\end{cases} \tag{15}$$

由式（15）得到闭合差的条件方程 $\prod_{k=1}^{M}X_{k,k+1}=\boldsymbol{I}$，进而按泰勒级数展开，取至一阶项，形成线性条件方程。条件方程中总观测值数量为 $7M$，其中必要观测数为 $7(M-1)$。可采用条件平差计算得到所有 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 的修正值，从而完成闭合差的整体分配。

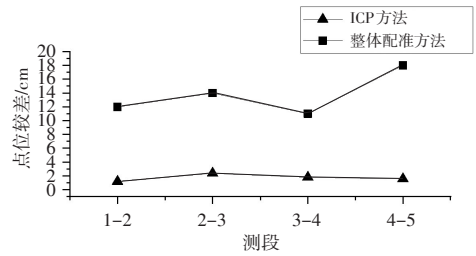
## 2 实验分析

为验证整体配准方法的准确性，本文选取地下环形空间（图1）进行扫描实验。该环形空间车道长度约为3 km，整体呈长方形，内部存在较多分支，连通了周边各小区地下室和地下商场等。由于地下空间无GNSS信号，单测段时间不宜过长，踏勘决定将测区分为5段进行扫描，中间各地面出入口均进行扫描，以保证接收到GNSS信号，获得绝对位置坐标。采用全站仪和RTK采集了30个校核点，校核点首选地面斑马线，车道箭头等在点云上易于识别，且能同时校核平面和高程的点。

以第1测段为基准，其余各测段采用手动拼接粗略配准到上一测段，再采用ICP进行优化并精确配准到上一测段。第5测段配准到第4测段后发现，第5测段与第1测段闭合重叠区域的点云闭合差达到0.53 m，重叠区域已无法准确判定真实的地下室轮廓，因此采用整体配准的方式重新计算各测段之间对齐的坐标变换参数，并按平差后的参数对各测段点云进行坐标转换，以达到误差分配的目的。两种方法测段间重叠区域错层误差和校核点较差见图3，可以看出，采用ICP方法虽然区段间重叠区域错层误差较小、拼合度较高，但误差累积导致与校核点较差越来越大；而整体配准方法对闭合差进行了分摊，表现为区段间重叠区域错层误差增大，但整体与校核点较差保持稳定，均在10 cm以内，能满足生产需求。




a 错层误差




b 与校核点矢量距离较差

图3 两种方法测段间重叠区域错层误差和与校核点较差

## 3 结 语

移动三维激光扫描作为一种全新的测量手段，应用优势明显，效率高、性能可靠，投入产出比高。点云数据包含信息全面，作为基础数据，除应用于地形图测量、立面测量等常规测量外，还可作为实景三维城市建设的重要基础数据，实现一次测量多样化使用。本文对移动三维激光扫描的配准方法进行了分析和研究，采用整体配准方法对分段扫描中的环形闭合差或网闭合差进行了平差分配；并通过实验论证了其可行性和正确性。本文方法对GNSS信号不佳的室内测量、地下空间测量等具有较好的适用性和应用价值。目前仪器配套解算软件均为测段独立解算，本文方法也可为整体融合解算提供一种解决思路。

## 参考文献

[1] 许艳博. 结合全站式三维扫描与建筑设计坐标的复杂曲面检测[J]. 测绘通报,2022(2):16-19

[2] 安志山,张克存,谭立海,等. 三维激光扫描仪在风沙观测中的应用[J]. 测绘科学,2017,42(10):196-200

[3] 董景利. 徕卡RTC360三维激光扫描仪在建筑立面改造中的应用[J]. 测绘通报,2020(2):163-166

[4] 李峰,王健,刘小阳. 三维激光扫描原理与应用[M]. 北京:地震出版社,2021

[5] 盛业华,张卡,张凯,等. 地面三维激光扫描点云的多站数据无缝拼接[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(2):233-237

[6] 闫利,谭骏祥,杨容浩,等. 一种闭合条件约束的全局最优多视点云配准方法[J]. 测绘学报,2016,45(4):418-424

[7] 林鹏. 任意旋转角下三维基准转换的整体最小二乘法[D]. 淮南:安徽理工大学,2015

[8] 赵夫群,黄鹤,耿国华. 基于主成分特征向量的点云配准方法[J]. 应用科学学报,2024,42(6):962-976

[9] 许书影,何伟,童彤. 三维实景技术在数字地铁建设中的应用[J]. 测绘通报,2024(8):141-144

[10] 付超,夏佳毅,解琨,等. 复杂场景下多模态点云数据配准技术[J]. 测绘通报,2024(6):146-150

[11] 许哲,董林啸,吴家跃. 改进ICP算法的激光雷达点云配准[J]. 测绘通报,2024(4):1-5

[12] 赵文峰. 一种快速点特征直方图及重叠区计算的点云配准方法[J]. 测绘工程,2024,33(4):68-75

[13] 苏秀永,金雨奇,王磊,等. 融合多源激光点云数据的亚运场馆建模研究[J]. 地理空间信息,2024,22(6):101-104

[14] 唐菲菲,王巨晖,王章朋,等. 一种顾及主方向的点云配准施工检测方法[J]. 地理空间信息,2023,21(12):43-46

[15] 刘宇,汪超,何川,等. 分区域采样在地下空间三维建模中的应用[J]. 地理空间信息,2024,22(1):53-55


(上接第20页)

## 3 结　语

本文成功构建了基于渔网分割的城市低空空域三维场景模型，并采用缓冲区设置来确保空域的安全性，克服了传统三维栅格化方法在复杂城市环境中表达可用空域存在的局限性。通过结合建筑物矢量数据、三维实体构造以及不可用点筛选方法，精确表达了南京市江宁区百家湖一带的低空可用空域。研究结果展示了渔网点划分方法在低空域场景建模中的应用潜力，为无人机路径规划和空域管理提供了实践支持。未来工作可进一步优化模型精度，丰富渔网点属性，考虑人口密度等因素绘制风险地图，并结合实际应用场景开展更多空域模拟与分析。


## 参考文献

[1] Federal Aviation Administration. Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM)[EB/OL]. (2024-10-15)[2024-10-17]. https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_ management/

[2] European Commission. Drones: Commission Adopts New Rules and Conditions for Safe,Secure and Green Drone Operations [EB/OL]. (2021-04-22) [2024-10-17]. https://transport. ec. europa. eu/news-events/news/drones-commission-adopts-new-rules-and-conditions-safe-secure-and-green-drone-operations-2021-04-22_en

[3] Bauranov A, Rakas J. Designing Airspace for Urban Air Mobility: A Review of Concepts and Approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences,2021,125:100 726

[4] 谢华,尹嘉男,朱永文,等. 数字低空空域栅格化的表征度量与最优标定[J]. 数据采集与处理,2024,39(1):31-43

[5] 谢华,苏方正,尹嘉男,等. 复杂低空无人机飞行冲突网络建模与精细管理[J]. 航空学报,2023,44(18):221-241

[6] 刘月宁,操海璐. ArcGIS在无人机领域的应用研究[J]. 中国宽带,2023,19(5):138-140

[7] 牛利斌,刘涛,香玫元. 基于ArcScene的3维数字校园开发[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(5):41-44

[8] 冯德鸿,雷奥林,池晓霞. 基于ArcScene与SketchUp交互建模技术的生态景观开发:以当阳市庙前镇关雎河畔为例[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(8):57-59

[9] 瞿菁菁,朱新平,徐川. 面向森林火灾的通航抢险飞行空域栅格化建模[J]. 科学技术与工程,2023,23(14):6 271-6 277

[10] 徐鑫宇,万路军,陈平,等. 基于GeoSOT网格的空域栅格化表征方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(2):15-22

[11] Cho J, Yoon Y. How to Assess the Capacity of Urban Airspace: A Topological Approach Using Keep-in and Keep-out Geofence[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2018,92:137-149

[12] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 民用轻小型无人机系统安全性通用要求: GB/T 38931-2020[S].

[13] 国务院,中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例:国发[2023]15号[R].

[14] 倪祺,丁建. 电力行业无人机应用典型案例[M]. 北京:中国电力出版社,2023:31

[15] 纪颖波. 无人机技术智能测绘[M]. 北京:机械工业出版社,2024:41

[16] 徐军,何燕君. 无人机测绘技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2023:169

[17] 自然资源部. 公开地图内容表示规范:自然资规[2023]2号[S].