

# 基于特征点位置约束的三维激光移动 测量位姿改正方法

王鑫林<sup>1,4</sup>, 辛明真<sup>1,2</sup>, 于孝林<sup>1,2</sup>, 孔锁财<sup>3</sup>, 任国贞<sup>3</sup>, 宿殿鹏<sup>1,2</sup>, 阳凡林<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部 海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590;  
3. 山东瑞智飞控科技有限公司, 山东 青岛 266590; 4. 中国测绘科学研究院 大地测量与导航定位研究所, 北京 100830)

**摘要:**准确的导航定位信息是激光移动测量系统获取高精度点云的基础,但导航定位系统在短时段失效情况下会导致观测点位置信息不准确,从而无法获得准确的点云数据。为此,提出一种基于特征点位置约束的激光移动测量位姿改正方法,利用导航定位系统失效时段前后测量得到的少量特征点位置信息,构建基于不同时刻特征点配准的位姿改正模型,将导航定位系统失效时刻的观测点位置和姿态作为待估参数进行最小二乘解算,实现位姿参数恢复和点云重构。结果表明,采用基于特征点位置约束的位姿改正方法,导航定位系统短时段失效情况下的点云坐标中误差从米级改正到了分米级,对于提升组合导航系统稳定性和点云移动测量精度有重要的参考价值。

**关键词:**三维激光;移动测量;特征点约束;位姿改正;坐标转换;最小二乘

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

## A pose correction method for 3D laser mobile measurement based on feature point position constraints

WANG Xinlin<sup>1,4</sup>, XIN Mingzhen<sup>1,2</sup>, YU Xiaolin<sup>1,2</sup>, KONG Suocai<sup>3</sup>,  
REN Guozhen<sup>3</sup>, SU Dianpeng<sup>1,2</sup>, YANG Fanlin<sup>1,2</sup>

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;  
2. Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources of China, Qingdao 266590, China;  
3. Shandong Ruizhi Flight Control Technology Co. Ltd, Qingdao 266590, China;  
4. Institute of Geodesy and Navigation Positioning, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

**Abstract:** Accurate navigation and positioning information is the basis for the laser mobile measurement system to obtain high-precision point cloud. However, the short-time failure of the navigation and positioning system will lead to inaccurate position information of observation points so that accurate point cloud data cannot be obtained. Therefore, a pose correction method for laser mobile measurement based on the constraint of feature point position was proposed. By using a small amount of feature point position information measured before and after the failure of the navigation and positioning system, a pose correction model based on the registration of feature points at different times was constructed. The position and posture of the observation point at the time of the failure of the navigation and positioning system were used as estimated parameters for least square calculation, to achieve the recovery of pose parameters and the reconstruction of point cloud. The vehicle-mounted laser mobile measurement data were

收稿日期:2023-10-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3907204);国家自然科学基金项目(52101386);山东省高等学校青创科技支持计划项目(2023KJ088);青岛市关键技术攻关及产业化示范类项目(23-1-3-hygg-1-hy)

作者简介:王鑫林(1999—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要从事大陆框架以及地心运动的研究。

辛明真(1990—),男,山东烟台人,讲师,博士,主要从事海洋定位导航方面的研究,本文通信作者。

E-mail: xinmingzhen@yeah.net

used for experimental analysis. The results show that the proposed method can correct the error of point cloud coordinates in the case of short-term failure of the navigation and positioning system from the meter level to the decimeter level and has important reference value for improving the stability of the integrated navigation system and the accuracy of point cloud mobile measurement.

**Key words:** 3D laser; mobile measurement; feature point constraint; pose correction; coordinate transformation; least square method

激光移动测量是一种高精度的三维测量技术,可通过扫描实现物体的三维空间测量和重建。准确的导航定位信息是激光移动测量系统获取高精度点云的基础,目前车载和机载激光移动测量所采用的导航定位系统主要有全球导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)、视觉导航系统及其组合导航系统等<sup>[1]</sup>,如宿殿鹏等<sup>[2]</sup>验证了采用无人机载激光系统结合GNSS\INS组合导航定位系统可以快速获取高精度、全覆盖的海岸带浅水地形数据。尽管移动测量平台的实时导航定位技术已取得了长足发展,能够满足绝大多数实际应用场景的需求,但在即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)领域对导航定位系统的实时性和可靠性提出了更高要求,研究利用有效观测信息提高导航定位系统短期失效情况下的定位准确性有切实意义。

在激光移动测量的实时位姿改正方面,Zhai等<sup>[3]</sup>提出一种基于改进的多普勒波束摆动激光移动测量校正方法,对于适当的信噪比阈值达到了较好的校正效果;Tan等<sup>[4]</sup>实现了基于四元数的滤波器对飞行激光雷达空中机器人进行瞬时姿态校正,校正后的激光雷达机器人用于2.5D下SLAM机器人姿态估计,并通过实验证明其结果优于纯2D下SLAM;魏国忠等<sup>[5]</sup>探究了车载激光点云数据的误差传播规律,论证了利用靶标控制点对车载激光点云数据进行高精度校正的可行性,为其在公路勘测中的应用提供了全新的解决思路;苟永刚等<sup>[6]</sup>提出一种基于网络实时动态载波相位差分技术的精度优化方法,通过将定位定姿数据与网络实时动态差分数据相融合,有效提升了车载三维激光点云数据的精度;胡源<sup>[7]</sup>提出一种由经验判断控制点的点云纠正质量方法,通过对异常控制点筛查、改正、剔除等操作,提高了车载点云的改正精度。

上述研究主要从导航系统优化方面开展了相关工作,对于激光移动测量而言相邻观测历元间的特征点或同名点,既是激光移动测量点云观测结果的一部分,也可作为点云重复精度的检核点。而利用特征点在点云后处理过程中进行点云配准目前得到了广泛应用,其本质是实现不同历元点云坐标系统的统一。如Weinmann等<sup>[8]</sup>提出考虑噪声距离测量、有限的非模糊范围、有限的视场和场景动态约束的点云配准方法,保持了高精度和低计算量的特性;Zováthi等<sup>[9]</sup>提出一种新的多模态点云配准算法,改善了稀疏即时三维测量与密集激光扫描系统数据的对齐,实现了基于马尔科夫随机场的点云变化提取步骤,在城市场景分析领域中使得点位的水平距离中位数降低了1~2个数量级;王郑阳等<sup>[10]</sup>通过制作一套大场景三维点云数据集POWERLINE-ALS,来支撑基于深度学习点云分割、匹配等应用,实现了切实有效的点云匹配。

GNSS、INS以及组合导航定位系统等虽然能够提供绝对定位精度有所保证的定位结果,但在特殊环境下存在失效的可能<sup>[11-12]</sup>。例如车载GNSS在通过隧道、高楼林立区域时由于信号遮挡,会失去定位能力<sup>[13-14]</sup>;INS在某些特定情况下也会存在姿态结果失效的可能,例如受到强光照射、强烈磁场与其他仪器干扰等。但目前针对激光移动测量在导航定位系统短期失效情况下实时位姿改正方法的研究较少,限制了激光移动测量在组合导航领域的快速发展。基于此,本研究提出一种利用三维激光相邻观测的少量特征点间的位置约束信息构建移动测量位姿改正方法,在统一坐标系下将载体位姿作为未知参数进行解算,解决了绝对定位失效情况下,载体位姿信息不准确造成的点云位置存在较大偏差问题。

## 1 三维激光移动测量

一般情况下,三维激光移动测量涉及激光雷达扫描仪坐标系(laser radar system, LRS)、载体坐标系

(vehicle coordinate system, VCS)、当地水平坐标系(local horizontal coordinate system, LHCS)以及地心地固坐标系(earth-centered, earth-fixed coordinate system, ECEF)<sup>[15]</sup>。激光雷达扫描仪坐标系用以描述点云数据对于仪器本身的相对坐标,通过构建激光雷达扫描仪与载体中心的相对关系可以将点云坐标以载体坐标系表达。当地水平坐标系是与特定地理位置相关的坐标系,使点云数据能够以地理位置参考进行描述。若使点云坐标能在全局范围内进行精确描述,需要用地心地固坐标系表述。各坐标系的详细定义见表 1。

表 1 三维激光移动测量坐标定义

Table 1 Definition of 3D laser mobile measurement coordinate axes

坐标系	原点	x 轴	y 轴	z 轴
LRS	激光束发射点	指向设备前方	构成右手笛卡尔坐标系	指向设备垂直向上方向
VCS	载体质心	指向载体横前	指向载体前方	指向载体垂直向上方向
LHCS	载体所在的地球表面	构成右手笛卡尔坐标系	水平指向真北	水平指向东
ECEF	地球质心	指向赤道与本初子午线交点	构成右手笛卡尔坐标系	指向协议地极

在三维激光移动测量数据处理过程中,由于激光雷达传感器与惯性测量单元在载体上的安装位置通常是不一致的,因此需要首先把激光扫描仪坐标系下的点云坐标数据换算至载体坐标系,其转换关系为:

$$\mathbf{P}_V = \mathbf{R}_M \cdot \mathbf{P}_L + \mathbf{W}. \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{P}_V$  为载体坐标系下坐标,  $\mathbf{R}_M$  为旋转矩阵,  $\mathbf{P}_L$  激光雷达坐标系下坐标,  $\mathbf{W}$  为平移向量。

然后将载体坐标系下坐标归算至当地水平坐标系,转换关系为:

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{P}_V. \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{P}_N$  为当地水平坐标系下坐标,  $\mathbf{R}_A$  为方向余弦矩阵,表达式为:

$$\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\psi$  为航偏角,  $\gamma$  为俯仰角,  $\theta$  为侧滚角。

将当地水平坐标系下坐标归算至地心地固坐标系,转换公式为:

$$\mathbf{P}_E = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_N + \mathbf{P}_E^c. \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{P}_E$  为地心地固坐标,  $\mathbf{P}_E^c$  为站心点的地心地固坐标,  $\mathbf{R}$  为基础方向余弦阵,可表示为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\sin \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为经度,  $\varphi$  为纬度。

## 2 激光移动测量位姿改正方法

如图 1 所示,在三维激光移动测量的导航定位系统正常工作状态下,测量得到的点云三维坐标是准确的,但导航定位系统失效状态下,测量得到的点云三维坐标是不准确的,会产生位置漂移。随着导航定位系统质量控制理论不断发展,导航定位系统能够基本实现实时评估,因此可以利用导航定位失效前后观测历元的少量特征点的位置变化作为约束条件,对失效时段的载体观测位置和姿态参数进行估计和改正。

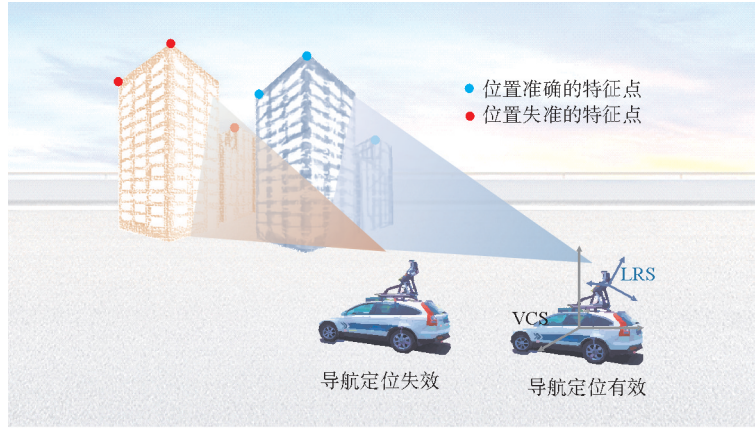


图 1 激光移动测量特征点位置约束示意图

Fig. 1 Position constraint diagram of laser mobile measurement feature points

基于坐标系及其转换,可以构建激光点云载体坐标与地心地固坐标之间的联系方程,即

$$\mathbf{P}_E = \mathbf{R}_M \cdot \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_L + \mathbf{W} + \mathbf{P}_E^r, \quad (6)$$

展开为:

$$X = (-\sin\lambda)[Ax_{imu} + By_{imu} + (\sin\theta)z_{imu}] + J(Cx_{imu} + Dy_{imu} + Ez_{imu}) + K(Fx_{imu} + Gy_{imu} + Hz_{imu}) + IK + hK, \quad (7)$$

$$Y = (\cos\lambda)[Ax_{imu} + By_{imu} + (\sin\theta)z_{imu}] + L(Cx_{imu} + Dy_{imu} + Ez_{imu}) + K(Fx_{imu} + Gy_{imu} + Hz_{imu}) + IM + hM, \quad (8)$$

$$Z = (\cos\phi)[Cx_{imu} + Dy_{imu} + Ez_{imu}] + (\sin\phi)[Fx_{imu} + Gy_{imu} + Hz_{imu}] + \frac{b^2}{a^2} \cdot I \cdot \sin\phi + h \cdot \sin\phi. \quad (9)$$

式中:  $A = \cos\theta\cos\psi$ ,  $B = \cos\theta\sin\psi$ ,  $C = -\sin\gamma\sin\theta\cos\psi - \cos\gamma\sin\psi$ ,  $D = -\sin\gamma\sin\theta\sin\psi - \cos\gamma\cos\psi$ ,  $E = \sin\gamma\cos\theta$ ,  $F = -\cos\gamma\sin\theta\cos\psi + \sin\gamma\sin\psi$ ,  $G = -\cos\gamma\sin\theta\sin\psi - \sin\gamma\cos\psi$ ,  $H = \cos\gamma\cos\theta$ ,  $I = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\phi}}$ ,  $J = -\sin\phi\cos\lambda$ ,  $K = \cos\phi\cos\lambda$ ,  $L = -\sin\phi\sin\lambda$ ,  $M = \cos\phi\sin\lambda$ ,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为地心地固坐标系

下坐标,  $x_{imu}$ 、 $y_{imu}$ 、 $z_{imu}$  为载体坐标系下坐标,  $X_r$ 、 $Y_r$ 、 $Z_r$  为站心点的地心地固坐标系下坐标。  $e^2$  为椭球的第二偏心率,  $a$  为椭球的长半径,  $b$  为椭球的短半径。

由于式(7)~(9)是典型的非线性方程,非线性函数  $f(x;\theta)$  通常很难直接求解最小化误差平方和的参数  $\theta$ , 可以利用泰勒级数对  $f(x;\theta)$  进行线性近似。泰勒级数的展开式如下:

$$f(x;\theta) \approx f(x;\theta_0) + \left. \frac{\partial f(x;\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} (\theta - \theta_0), \quad (10)$$

式中,  $\theta_0$  是一个给定的初始参数向量。将泰勒级数的展开式代入目标函数,得到:

$$\min \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i;\theta_0) - \left. \frac{\partial f(x_i;\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} (\theta - \theta_0))^2. \quad (11)$$

将目标函数化为关于  $\theta$  的二次函数,可以使用最小二乘法求解最优参数值。通过对目标函数取偏导数,得到最优参数向量的闭式解,在相邻观测历元存在部分特征点的情况下,利用导航定位系统失效前后的特征点位置信息,构建位置和姿态的改正模型,即在式(6)中统一将  $\varphi$ 、 $\lambda$ 、 $h$ 、 $\gamma$ 、 $\psi$ 、 $\theta$  ( $h$  为高程)作为未知参数进行求解。因此对式(7)~(9)进行泰勒级数展开取一次项得到间接平差模型:

$$\theta^* = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L}. \quad (12)$$

式中:  $\theta^*$  是参数最优值;  $\mathbf{B}$  是雅可比矩阵,表示  $f(x;\theta)$  关于  $\theta$  的一阶导数;  $\mathbf{L}$  是残差向量,表示每个数据点的残差,即  $y_i - f(x_i;\theta_0)$ 。  $\mathbf{B}$  矩阵的具体形式为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{x1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{x1}}{\partial \lambda} & \frac{\partial f_{x1}}{\partial h} & \frac{\partial f_{x1}}{\partial \gamma} & \frac{\partial f_{x1}}{\partial \psi} & \frac{\partial f_{x1}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_{y1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{y1}}{\partial \lambda} & \frac{\partial f_{y1}}{\partial h} & \frac{\partial f_{y1}}{\partial \gamma} & \frac{\partial f_{y1}}{\partial \psi} & \frac{\partial f_{y1}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_{z1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{z1}}{\partial \lambda} & \frac{\partial f_{z1}}{\partial h} & \frac{\partial f_{z1}}{\partial \gamma} & \frac{\partial f_{z1}}{\partial \psi} & \frac{\partial f_{z1}}{\partial \theta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 3 实验与分析

为验证基于特征点位置约束的激光移动测量位姿改正方法,采用车载激光移动测量数据进行实验分析。对于连续测量得到  $i$  ( $i=1,2,\dots,9$ )个观测历元,假设激光移动测量系统位姿测量失效,在每个历元下通过目视解译的方法选取稀疏分布的 8 个特征点,如图 2 所示。以位姿测量失效前一观测历元的特征点位置信息为约束,对各观测历元的观测点位姿进行估计和改正,位姿参数的收敛曲线如图 3 所示, LON、LAT 分别代表经度、纬度,改正前后特征点坐标中误差统计结果如表 2 所示,  $\sigma_{xo}$ 、 $\sigma_{xc}$  分别表示  $x$  方向改正前后的点位中误差,

$\sigma_{yo}$ 、 $\sigma_{yc}$  分别表示  $y$  方向改正前后的点位中误差,  $\sigma_{zo}$ 、 $\sigma_{zc}$  分别表示  $z$  方向改正前后的点位中误差,  $\sigma_{po}$ 、 $\sigma_{pc}$  分别表示各历元点位改正前后总体的坐标中误差。将改正后的观测点位姿用于对应观测历元的点云归算,改正前后的检核点坐标中误差统计结果如表 3 所示,改正前后的点云分布如图 4 所示。中误差的定义为  $\sigma = \sqrt{\Delta^2/n}$ , 其中  $\Delta$  为误差,  $n$  为观测数。

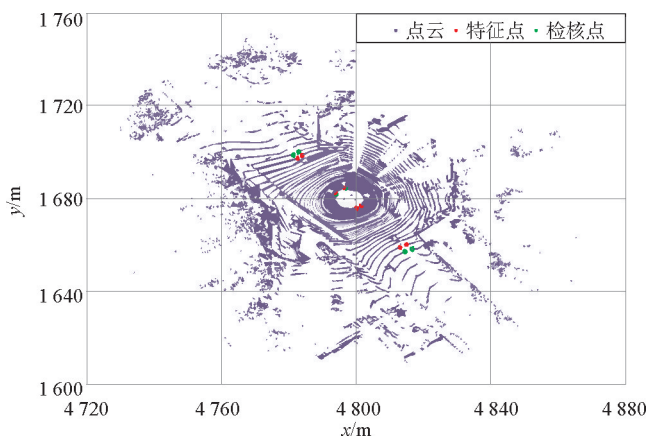


图 2 位姿测量失效前一观测历元点云及特征点

Fig. 2 Observation epoch point cloud and feature point before pose measurement failure

表 2 位姿改正前后特征点坐标中误差

Table 2 Error in coordinates of feature points before and after pose correction

观测历元	$\sigma_{xo}$	$\sigma_{xc}$	$\sigma_{yo}$	$\sigma_{yc}$	$\sigma_{zo}$	$\sigma_{zc}$	$\sigma_{po}$	$\sigma_{pc}$
1	1.033 3	0.036 8	0.280 1	0.277 1	0.873 4	0.021 4	1.381 6	0.280 4
2	1.944 5	0.040 3	0.537 7	0.320 5	1.684 0	0.018 4	2.628 4	0.323 5
3	2.830 6	0.037 3	0.966 3	0.310 3	2.496 7	0.016 6	3.896 1	0.313 0
4	3.802 7	0.046 7	1.614 5	0.453 7	3.395 8	0.021 5	5.347 8	0.456 6
5	4.707 5	0.043 5	1.780 0	0.325 4	4.208 7	0.029 7	6.560 6	0.329 7
6	5.751 8	0.028 0	1.890 3	0.230 8	5.113 1	0.019 7	7.924 7	0.233 3
7	6.658 4	0.031 7	2.204 5	0.253 3	5.927 7	0.017 6	9.183 2	0.255 8
8	7.647 9	0.056 6	2.732 2	0.412 7	6.823 0	0.033 1	10.607 0	0.417 8
9	8.553 2	0.078 9	3.250 7	0.582 1	7.650 9	0.037 8	11.927 3	0.588 6

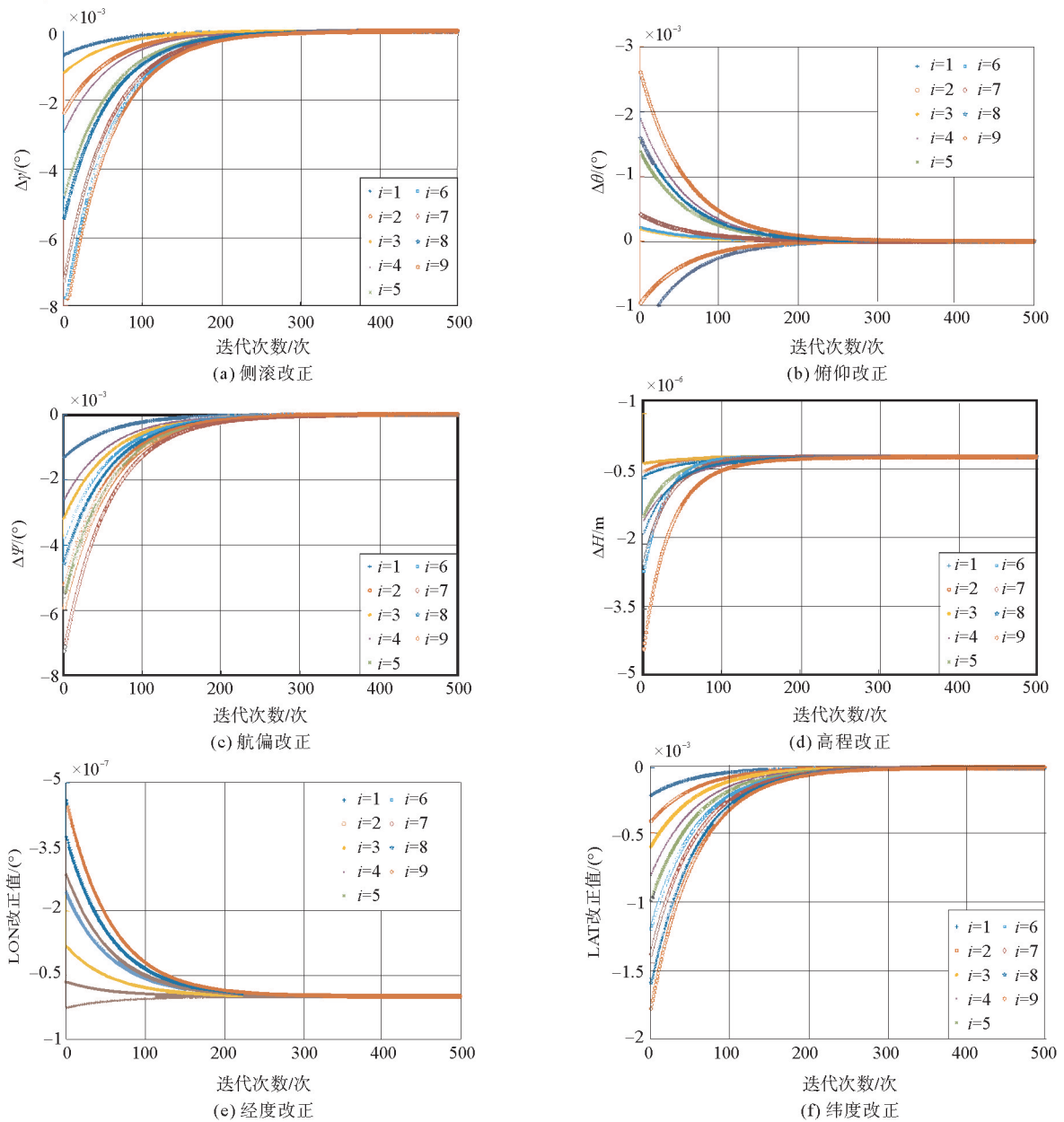


图3 位姿参数估计的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of pose parameter estimation

表3 位姿改正前后检核点坐标中误差

Table 3 Error in coordinates of check points before and after pose correction

m

观测历元	$\sigma_{xo}$	$\sigma_{xc}$	$\sigma_{yo}$	$\sigma_{yc}$	$\sigma_{zo}$	$\sigma_{zc}$	$\sigma_{po}$	$\sigma_{pc}$
1	1.056 6	0.052 2	0.260 5	0.265 8	0.887 3	0.032 6	1.404 1	0.272 8
2	1.945 9	0.046 5	0.522 0	0.286 8	1.687 9	0.021 6	2.628 3	0.291 4
3	2.831 9	0.032 0	1.030 1	0.320 3	2.505 8	0.017 9	3.919 2	0.322 4
4	3.777 2	0.057 8	1.860 4	0.557 3	3.406 0	0.024 6	5.415 7	0.560 8
5	4.675 7	0.068 1	2.021 2	0.466 1	4.209 2	0.023 0	6.607 9	0.471 6
6	5.708 4	0.055 7	2.092 6	0.344 0	5.104 6	0.021 8	7.938 6	0.349 2
7	6.614 5	0.067 4	2.411 5	0.364 2	5.916 8	0.030 6	9.196 5	0.371 7
8	7.600 7	0.095 6	3.054 1	0.608 5	6.815 9	0.033 7	10.656 2	0.616 9
9	8.481 2	0.129 9	3.684 0	0.830 2	7.636 8	0.036 4	11.992 7	0.841 1

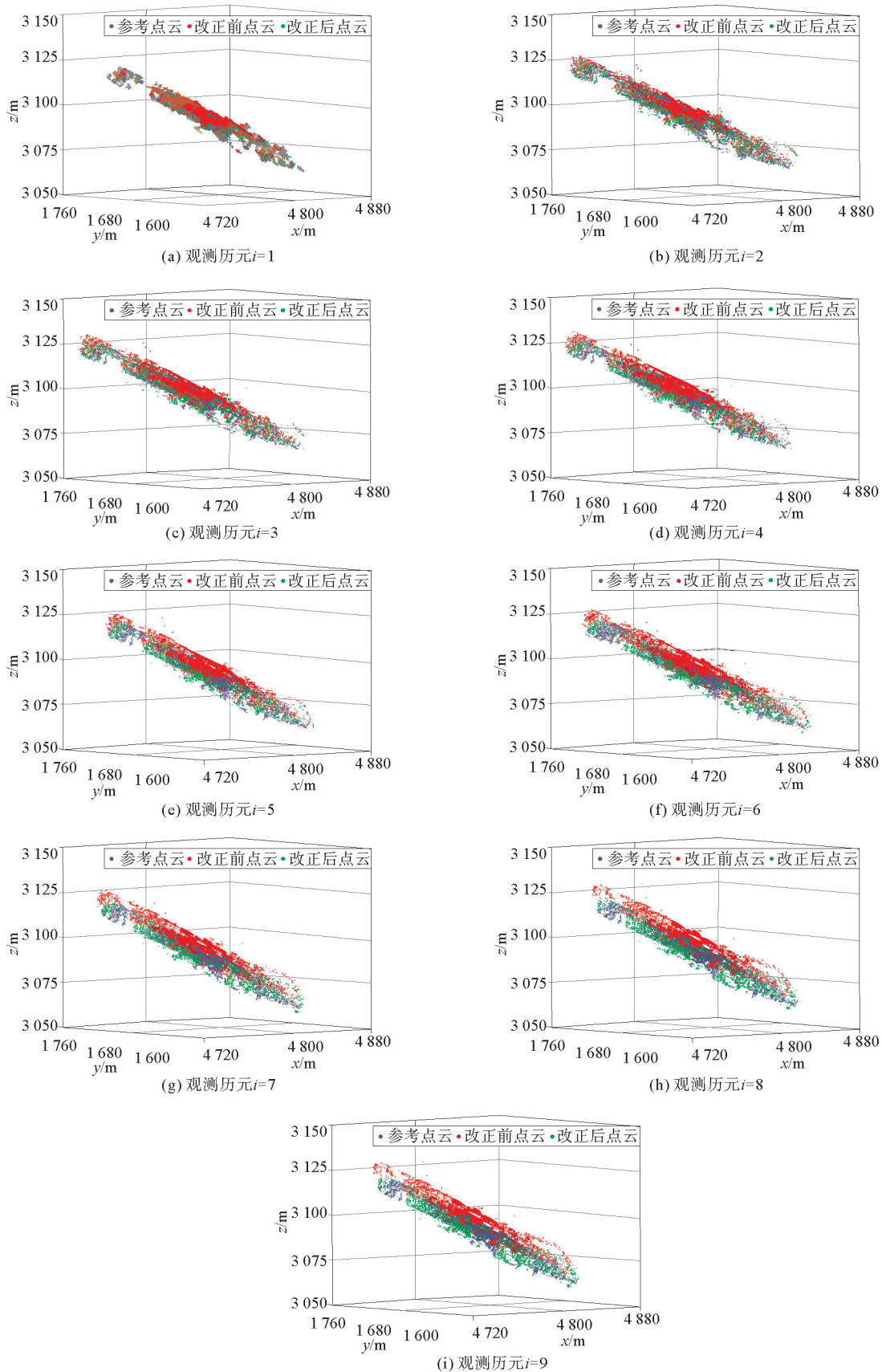


图 4 位姿改正前后点云分布图

Fig. 4 Point cloud distribution before and after pose correction

实验结果分析如下。

1) 根据原始观测数据,8个特征点相对于初始历元在1~9历元的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的平均偏差分别为0.721 3、1.372 0、2.080 6、2.915 7、3.555 2、4.247 0、4.925 2、5.723 8、6.467 2 m,可见在定位失效后随着时间的累积,误差逐渐增大,且偏差达到了米级,必须进行约束改正。

2) 如图3所示,基于最小二乘的非线性参数优化算法,将各个矩阵及参数输入程序进行迭代运算,位置和姿态的改正数均逐渐收敛到0,并且收敛的过程非常平滑,没有出现振荡现象,迭代次数均未超过1 000次,说明程序的运行效率较高,改正效果较好。

3) 为了进一步验证程序的改正效果,对特征点的点位误差进行分析。由于采用非线性参数优化算法,以上一历元特征点的位置为约束,使得下一历元的特征点位置不断地向上历元的特征点位置逼近,直到满足阈值条件,从而达到期望的约束效果。如表2所示,特征点坐标中误差从米级改正到了分米级,且绝大多数点位可以改正到0.4 m以内,最大误差不超过0.6 m。9个历元下特征点的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向整体坐标中误差分别下降了79.70%、87.69%、91.97%、91.46%、94.97%、97.06%、97.21%、96.06%、95.07%,同时如图4所示,改正后的点云相较于改正前的点云明显与参考0历元重合率更高,更直观地反映了对于站心点的位姿校正效果较为明显,结果较好。

4) 由于本算法是以特征点作为初始约束进行的整体位姿改正,为进一步说明改正效果的全局性以及普适性,在点云上另外随机选取了6个验证点(如图2所示)进行点位误差分析。如表3所示,验证点 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的中误差均显著改善,9个历元下验证点点位整体中误差分别下降了80.57%、88.91%、91.77%、89.64%、92.86%、95.60%、95.96%、94.21%、92.99%。尤其是随着历元增加,改正前的点位中误差增大,但是改正后的点位中误差依然能够达到比较理想的水平,同时由上文可知,随着历元的增加,程序的迭代次数并没有明显增加,说明本实验方法具有长历元、长时间改正效果,其改正精度在一定历元范围内不会出现明显下降。

#### 4 结束语

针对激光移动测量系统在导航定位短期失效情况下的观测点位置和姿态信息不准确,造成该段时间内测量的点云位置不准确问题,提出一种基于特征点位置约束的激光移动测量位姿改正方法。当提供绝对定位精度的导航传感器短暂失效或精度无法得到保证时,通过激光雷达观测同名点云来降低INS长时间观测下位姿参数的误差累积,为组合导航提升精度及稳定性提供了一种新的解决思路。相比于传统的激光点云配准方法,本方法具有两点不同:一是目的不同,点云配准是在不同测量基准下对激光点云进行配准,而位姿改正是实现对导航定位数据的改正;二是方法不同,位姿改正本质是实现对位姿改正数的解算,必须构建起一个跨越多个坐标系统的观测模型,从而解算点云的绝对坐标。综上所述,本研究提出的基于特征点位置约束的三维激光移动测量位姿改正方法,只需要依靠稀疏分布的少数特征点、较小的数据处理成本就可达到十分显著的改正效果,而且该方法具有对任一相对导航定位单传感器进行时间累积误差校正的可能性,验证了该方法在三维激光移动测量实时位姿改正方面的有效性及先进性。

#### 参考文献:

- [1] 方文轩,丛佃伟. 卫星/惯性/视觉组合导航多源融合技术现状及发展[J]. 无线电工程,2022,52(10):1813-1820.  
FANG Wenxuan, CONG Dianwei. Status and development of multi-source information fusion technology for satellite/inertial/visual integrated navigation[J]. Radio Engineering, 2022, 52(10): 1813-1820.
- [2] 宿殿鹏,阳凡林,陈亮,等. 无人机载LiDAR测深系统进行海岸带测绘的可行性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(5):11-20.  
SU Dianpeng, YANG Fanlin, CHEN Liang, et al. Feasibility analysis of UAV-airborne LiDAR bathymetry system for coastal zone mapping[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5): 11-20.
- [3] ZHAI X C, WU S H, LIU B Y, et al. Shipborne wind measurement and motion-induced error correction of a coherent doppler lidar over the Yellow Sea in 2014[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(3): 1313-1331.



- [4] TAN C H, SHAI FUL D S B, TANG E, et al. Flydar: A passive scanning flying lidar sensing system for SLAM using a single laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(2): 1746-1755.
- [5] 魏国忠, 侯飞, 张衡, 等. 高速公路勘测中车载激光点云高精度校正可行性分析[J]. *测绘通报*, 2016, 6(8): 20-24.  
WEI Guozhong, HOU Fei, ZHANG Heng, et al. Analysis of high-accuracy calibration feasibility for laser point cloud scanned by vehicle-borne mobile mapping system in freeway surveying[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016, 6(8): 20-24.
- [6] 苟永刚, 龙川, 胡小林. 一种车载三维激光点云数据精度提升方法[J]. *北京测绘*, 2023, 37(5): 666-670.  
GOU Yonggang, LONG Chuan, HU Xiaolin. A method to improve the accuracy of vehicle borne 3D laser point cloud data [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2023, 37(5): 666-670.
- [7] 胡源. 车载三维激光扫描数据纠正与质量控制方法研究[J]. *测绘通报*, 2021(增2): 70-73.  
HU Yuan. Research on data correction and quality control methods of vehicle-mounted 3D laser scanning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(S2): 70-73.
- [8] WEINMANN M, DITTRICH A, HINZ S, et al. Automatic feature-based point cloud registration for a moving sensor platform[C/OL]//*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, May 22-25, 2013. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-1-W1-373-2013.
- [9] ZOVÁTHI Ö, NAGY B, BENEDEK C. Point cloud registration and change detection in urban environment using an on-board Lidar sensor and MLS reference data[J/OL]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 110. DOI:10.1016/j.jag.2022.102767.
- [10] 王郑阳, 俞昊, 孟昊, 等. POWERLINE-ALS: 一种用于输电线路场景深度学习语义分割的机载 LiDAR 点云数据集[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(2): 33-43.  
WANG Zhengyang, YU Hao, MENG Hao, et al. POWERLINE-ALS: An airborne LiDAR point cloud dataset for transmission line scene semantic segmentation with deep learning methods[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2023, 42(2): 33-43.
- [11] 吴俊伟, 曾启明, 聂莉娟. 惯性导航系统的误差估计[J]. *中国惯性技术学报*, 2002, 10(6): 2-6.  
WU Junwei, ZENG Qiming, NIE Lijuan. Estimation of the INS's Errors[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2002, 10(6): 2-6.
- [12] 阮利锋, 王赓, 盛焕焯. 基于标志点识别的三维位姿测量方法[J]. *计算机应用*, 2008, 28(11): 2856-2858  
RUAN Lifeng, WANG Geng, SHENG Huanye. 3D position and attitude measurement based on marking-points recognition[J]. *Computer Applications*, 2009, 28(11): 2856-2858.
- [13] 徐振凯. 基于车载的 GPS/INS 组合导航定位系统的关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
XU Zhenkai. Research on key technologies of integration of GPS/INS for land vehicle applications[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] ZHANG K, LI Y, ZHAO J H, et al. Underwater navigation based on real-time simultaneous sound speed profile correction [J]. *Marine Geodesy*, 2016, 39(1): 98-111.
- [15] 马陈飞. AUV 多源组合导航数据融合方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.  
MA Chenfei. Research on AUV Multi-source Integrated Navigation data fusion method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.

(责任编辑:高丽华)