

doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.04.019

# 地下矿山激光 SLAM 技术定量精度评定方法

庞帆<sup>1,2</sup>,何玉龙<sup>3</sup>,张达<sup>1,2</sup>,陈凯<sup>1,2</sup>,余乐文<sup>1</sup>,李翰臣<sup>1</sup>,张驰<sup>1</sup>

(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;

2. 中国—南非矿产资源开发利用联合研究中心,北京 102628;

3. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿,山东莱州 261442)

**摘要:**针对目前地下矿山领域缺少激光 SLAM 技术定量精度评定方法的现状,从激光 SLAM 技术的定位和建图两个方面进行误差分析,提出三种定量精度评定方案,将端到端定位误差、相对距离误差和绝对点位误差作为精度评测指标。结合自研井下无人机载三维激光扫描测量系统和典型测试场景,对精度评价方案进行实测。测试结果表明,该激光 SLAM 系统具有厘米级的建图精度,激光 SLAM 技术定量精度评定方案可为学术研究和工程实践提供参考。

**关键词:**地下矿山;激光 SLAM;无人机载三维激光扫描系统;定量精度评定;定位误差;绝对点位误差

**中图分类号:**TP391.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-4172(2022)04-0119-09

## Quantitative accuracy evaluation method of laser SLAM technology in underground mines

PANG Fan<sup>1,2</sup>, HE Yulong<sup>3</sup>, ZHANG Da<sup>1,2</sup>, CHEN Kai<sup>1,2</sup>, YU Lewen<sup>1</sup>, LI Hanchen<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. China—South Africa Joint Research Center for Mineral Resources Development and Utilization, Beijing 102628, China;

3. Shandong Gold Group Co., Ltd., Sanshandao Gold Mine, Laizhou Shandong 261442, China)

**Abstract:** Due to the present situation that the lack of quantitative accuracy evaluation method of laser SLAM technology in the field of underground mines. This paper analyzes the error from two aspects of positioning and mapping of laser SLAM technology, three quantitative accuracy evaluation methods are proposed, which select end-to-end positioning error, relative distance error, and absolute point position error as accuracy evaluation indexes. Combined the self-developed underground UAV 3D laser scanning system and typical test scenarios to test the accuracy of evaluation methods. The test results show that this laser SLAM system has centimeter-level mapping accuracy. Therefore, the quantitative accuracy evaluation methods of laser SLAM technology in the field of underground mines are given, which can provide references for academic research and engineering practice.

**Key words:** underground mines; laser SLAM; UAV 3D laser scanning system; quantitative accuracy evaluation; positioning error; absolute point position error

近年来,随着地下矿山智能化、信息化发展,基于井巷结构三维高精度测绘、采空区安全风险精细化评估、地下矿山无人驾驶及井下无人机应急救援

等需求,基于激光雷达的同步定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)作为核心技术起到至关重要的作用,它能够实现移动载体在无 GNSS 定位信号下的自我运动估计即定位,包括空间位置和空间姿态,同时增量式地构建周围环境的三维激光点云地图<sup>[1]</sup>。激光 SLAM 技术构建的高精度三维激光点云地图能够在采矿生产过程中优化回采设计、提高生产效率和保障安全生产作业。但激光 SLAM 技术由于内部激光点云连

收稿日期:2022-03-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1909602);矿冶科技集团有限公司青年科技创新基金项目(04-2203);中国-南非矿产资源开发利用联合研究中心项目(2018YFE0121000)。

作者简介:庞帆(1994—),男,助理工程师,硕士,研究方向为 3D 激光 SLAM 技术。

续匹配算法的误差,会导致最终构建的激光点云地图存在一定偏差,因此,必须对激光 SLAM 技术进行定量的精度评定。

目前国内外相关研究人员针对激光 SLAM 定量精度评定问题提出了相应的解决方案。ZHANG 等<sup>[2]</sup>在评测激光 SLAM 精度时利用 GNSS 定位结果作为激光 SLAM 定位结果的真实值,将激光 SLAM 估计的定位结果视为估计值,利用二者差异计算激光 SLAM 的定位误差,用相对位置误差率表述每百米的位置偏差量,评测数据集为 KITTI 数据集<sup>[3]</sup>。YE 等<sup>[4]</sup>在无 GNSS 定位信号的室内环境中评测激光 SLAM 精度时首先在被测环境中搭建动作捕捉系统,同时在激光雷达传感器上方安置反射标靶球,利用动态捕捉系统识别反射标靶球实时获取激光 SLAM 的定位结果,将该定位结果视为真实值,将激光 SLAM 输出的定位结果视为估计值,利用二者差异,计算平移误差和旋转误差。SHAN 等<sup>[5]</sup>利用搭载激光 SLAM 技术的移动载体运行一段时间后返回起始位置,实际操作中将移动载体的起始位置与结束位置严格重合,将起始位置处的位姿视为 $[0,0,0,0,0,0]$ ,在激光 SLAM 输出的位姿序列中查看结束位置处的位姿,与起始位置处的位姿进行比较,计算累计平移误差和累计旋转误差。利用 GNSS 定位结果作为激光 SLAM 定位结果的真实值评价激光 SLAM 定位误差的方案还有很多<sup>[6-13]</sup>,这些做法是目前主流评价激光 SLAM 精度的方法,更多从激光 SLAM 技术的定位角度评测精度,没有从激光点云地图角度评测激光 SLAM 精度。

虽然激光 SLAM 过程中定位和建图相辅相成,互相促进,定位越准确,建图精度越高,但在地下矿山领域多数用户更加关心最终构建激光点云地图的精度及质量。俞德崎等<sup>[14]</sup>在评测激光 SLAM 建图精度时借助钢尺量取自然特征尺寸,视为尺寸真实值,在激光 SLAM 构建的激光点云地图中提取自然特征尺寸,视为尺寸估计值,利用二者差异计算尺寸误差,自然特征例如配电箱、消防栓等,由于量取自然特征的尺寸过小,无法说明激光点云地图的整体一致性和准确性,另外在地下矿山现场环境中不能保证存在自然特征。檀继猛等<sup>[15]</sup>利用全站仪和移动式三维激光扫描仪对标靶球进行测量,分别拟合出标靶球中心的真实坐标和估计坐标,计算点位误差,该方法需要借助标靶球工具,在地下矿山现场环境不易布设,计算标靶球中心坐标存在较大的拟合

误差。

由于地下矿山环境无 GNSS 定位信号,因此无法利用 GNSS 作为定位真值信息评价激光 SLAM 技术精度;动作捕捉系统在工作时需要良好的光线条件,地下矿山环境光线条件不佳,无法利用动作捕捉系统实时获取反射标靶的位姿,从而不能获取定位真值信息进行精度评定;另外在地下矿山环境中地面凹凸不平,泥泞含水,搭载激光 SLAM 技术的移动载体运行一段时间后严格返回至起始位置处,该过程操作难度较大,操作不当会影响精度评测效果。

综上所述,为定量评价激光 SLAM 技术精度,本文从激光 SLAM 的定位和建图两个方面进行误差分析,提出切实可行的精度验证方案,并结合自研井下无人机载三维激光扫描测量系统及相应的实验环境,完成地下矿山激光 SLAM 技术的定量精度评测。

## 1 精度评价方法

由于激光 SLAM 过程定位精度越高,建图越准确,因此第一个方案侧重评价激光 SLAM 定位精度,将激光 SLAM 起始和结束时刻的定位结果与高精度全站仪观测的首尾定位结果进行比较;第二个和第三个方案侧重评价激光点云地图精度,将激光 SLAM 输出的激光点云数据和高精度全站仪采集的数据进行比较。

### 1.1 端到端定位误差评价方法

该精度评价方法的基本原理是利用搭载激光 SLAM 技术的移动载体运行一段时间后返回至起始位置处附近,不必严格返回至起始位置处,仅需在激光雷达上方粘贴反射标靶,在起始时刻和结束时刻分别利用高精度全站仪观测反射标靶的空间坐标,保证两个空间坐标处于同一坐标系下,计算起始和结束时刻的位置差,将该位置差视为位置变化量的真实值。

由于激光 SLAM 估计的位姿序列均以起始时刻激光雷达坐标系为原点,因此,在激光 SLAM 定位数据中寻找起始时刻和结束时刻的位姿,计算起始和结束时刻的位置差,将该位置差视为位置变化量的估计值。将位置变化量的真实值和估计值差异视为端到端定位累计漂移量  $\Delta T$ ,见公式(1),该过程的示意图如图 1 所示,结合激光 SLAM 过程的定位轨迹长度  $L$ ,计算端到端定位累计漂移率  $P_T$ ,见公式(2)。

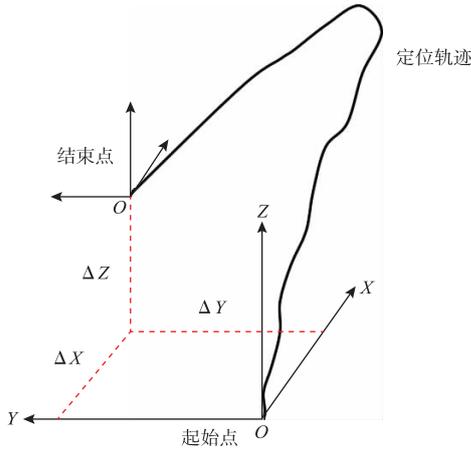


图1 端到端定位误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of end-to-end positioning error

$$\Delta T = \sqrt{(X_T - X_S)^2 + (Y_T - Y_S)^2 + (Z_T - Z_S)^2} \quad (1)$$

$$P_T = \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

式中:  $X_T, Y_T, Z_T$  表示起始和结束时刻位置变化量的真实值, 由全站仪观测首尾坐标计算;  $X_S, Y_S, Z_S$  表示起始和结束时刻位置变化量的估计值, 由激光 SLAM 估计首尾位姿坐标计算。

### 1.2 相对距离误差评价方法

该精度评价方法的基本原理是在激光 SLAM 技术构建的激光点云地图中提取标靶点空间坐标, 标靶点事先在测区范围内均匀布置, 根据提取标靶点坐标计算相邻两标靶点间的欧式距离, 视该距离为距离估计值  $D_e$ , 然后利用高精度全站仪观测各个标靶点, 根据观测标靶点坐标计算相应两标靶点间的欧式距离, 视该距离为距离真实值  $D_i$ , 计算距离真实值与估计值的误差, 得到相对距离误差  $\Delta_D$ , 见公式(3), 结合距离真实值  $D_i$  得到相对距离偏差率  $P_D$ , 见公式(4), 将  $n$  对相对距离误差进行统计计算得到相对距离误差的均方根  $RMSE(\Delta_{D(1,n)})$ , 见公式(5), 将  $n$  对相对距离误差偏差率进行统计计算得到相对距离误差偏差率的均方根  $RMSE(P_{D(i,n)})$ , 见公式(6)。

$$\Delta_{D(i)} = D_{i(i)} - D_{e(i)} \quad (3)$$

$$P_{D(i)} = \frac{D_{i(i)} - D_{e(i)}}{D_{i(i)}} \quad (4)$$

$$RMSE(\Delta_{D(1,n)}) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{D(i)}^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$RMSE(P_{D(i,n)}) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{D(i)}^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

在该评价方法中全站仪观测不必借助矿山控制点, 只需保证各个标靶点在同一坐标系下即可。该精度评价方式无需将激光点云地图转换坐标系, 侧重评价激光点云地图的相对精度。

### 1.3 绝对点位误差评价方法

该精度评价方法的基本原理是在激光 SLAM 技术构建的激光点云地图中提取标靶点空间坐标, 标靶点事先在测区范围内均匀布置, 然后利用高精度全站仪观测各个标靶点。由于激光点云地图中提取的标靶点坐标与全站仪坐标系下观测的标靶点坐标不在同一个坐标系, 需要利用 3~4 对同名标靶点进行坐标变换, 将激光点云地图提取的标靶点转换到全站仪坐标系中, 坐标变换原理是利用同名标靶点进行迭代最邻近点匹配<sup>[16]</sup> (Iterative Closest Point, ICP), 坐标变换可利用点云处理软件实现, 例如 Cloud Compare 或 3D Reshaper。将坐标转换后的标靶点坐标视为坐标估计值, 将全站仪坐标系下的标靶点坐标视为坐标真实值, 计算估计值与真实值的误差, 得到绝对点位误差, 见公式(7)。

$$\Delta_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2} \quad (7)$$

式中:  $x$  表示标靶点真值坐标,  $\hat{x}$  表示坐标变换后的标靶点坐标, 将  $n$  对绝对点位误差进行统计计算得到绝对点位误差的均方根  $RMSE(\Delta_{1:n})$ , 见公式(8)。

$$RMSE(\Delta_{1:n}) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

在该评价方法中全站仪观测不必借助矿山控制点, 只需保证各个标靶点在同一坐标系下即可。该精度评价方式需要将激光点云地图转换到全站仪坐标系下, 侧重评价激光点云地图的绝对精度。

## 2 数据采集

### 2.1 激光 SLAM 测量平台

井下无人机载三维激光扫描测量系统是矿冶科技集团有限公司自研的一款飞行式三维激光扫描测量系统(见图2), 该系统采用 3D 激光 SLAM 技术, 可在无 GNSS 定位信号环境下实时获取被测目标的精细化点云数据。该系统主要由无人机平台、移动扫描主机、平板电脑构成, 平板端通过控制及可视化软件远程操控井下无人机载三维激光扫描测量系统。



图2 井下无人机载三维激光扫描测量系统

Fig. 2 3D Laser scanning measurement system of underground UAV

## 2.2 测试场景

第一个测试场景为云南省昭通市彝良毛坪铅锌矿河东片区某中段的巷道,长度约为150 m,宽度约为3.8 m,高度约为3.9 m,如图3(a)所示。第二个测试场景为山东省莱州市三山岛金矿西山矿区某中段的采空区,长度约为62 m,宽度约为4.4 m,高度约为4.6 m,如图3(b)所示。第三个测试场景为北京市某模拟巷道,长度约为67 m,宽度约为4.9 m,高度约为4.5 m,如图3(c)所示。



图3 典型矿山测试环境

Fig. 3 Typical mine test environment

## 2.3 数据采集流程

井下无人机载三维激光扫描测量系统的数据采集过程,具体流程如下:

首先将移动扫描主机通过快速释放装置连接到无人机平台,连通无人机和移动扫描主机间电源,打开移动扫描主机电源;然后通过平板电脑远程无线连接并启动移动扫描主机,遥控无人机起飞,边飞行

边对感兴趣区域进行扫描;接下来遥控无人机器使无人机返回到起始位置处附近;最后通过平板电脑远程关闭移动扫描主机,扫描结束。

高精度全站仪数据采集时事先在测区范围内均匀布置标靶点,标靶点采取黑白棋盘格中心点、现场金属标志牌角点及自制标靶物角点相结合,如图4所示,然后利用准确度等级1级的全站仪观测各个标靶点。



图4 标靶点

Fig. 4 Target point

### 3 精度评价

#### 3.1 端到端定位误差

##### 3.1.1 测试场景一

井下无人机载三维激光扫描测量系统获取的激

光 SLAM 定位数据如表 1 所示,每行包括 3 个数据,分别为时间戳、空间位置和空间姿态,系统输出的定位结果默认以起始时刻激光雷达位置为坐标原点,空间姿态用四元数表达。

表 1 激光 SLAM 定位数据  
Table 1 Laser slam positioning data

位姿序列	时间戳	空间位置			空间姿态			
	T	X	Y	Z	X	Y	Z	W
1	1 631 239 909.2	0	0	0	0.012	-0.066	0.114	0.991
2	1 631 239 909.3	-0.008	-0.008	0	0.012	-0.065	0.115	0.991
3	1 631 239 909.4	-0.018	-0.009	0.006	0.010	-0.065	0.114	0.991
...	...	...	...	...	...	...	...	...
3065	1 631 240 217.9	3.020	0.191	-0.30	-0.341	-0.094	0.082	0.932

将激光 SLAM 定位数据文件导入 SLAM 评测工具 EVO<sup>[17]</sup>中,利用 EVO 定位轨迹分析功能获取起始位置坐标、结束位置坐标、定位轨迹长度、起始位置时间、结束位置时间、累计扫描时间等,如表 2 所示。

表 2 激光 SLAM 定位数据分析

Table 2 Analysis of laser slam positioning data

定位数据项	内容
起始扫描时间/s	1 631 239 909.2
起始位置/m	(0,0,0)
结束扫描时间/s	1 631 240 217.9
结束位置/m	(3.020,0.191,-0.300)
累计扫描时间/s	308.8
定位轨迹长度/m	299.6
全站仪观测首尾坐标差/m	(2.802,0.250,-0.061)

根据表 2 中起始、结束位置坐标及全站仪观测首尾坐标差,计算端到端定位累计漂移量  $\Delta T$  为 0.329 m,结合定位轨迹长度  $L$ ,计算端到端定位累计漂移率  $P_T$  为 0.11%。

##### 3.1.2 测试场景二

与 3.1.1 处理流程一致,测试场景二的激光 SLAM 定位数据分析如表 3 所示。

表 3 激光 SLAM 定位数据分析

Table 3 Analysis of laser SLAM positioning data

定位轨迹数据项	内容
起始扫描时间/s	1 646 720 980.3
起始位置/m	(0,0,0)
结束扫描时间/s	1 646 721 160.4
结束位置/m	(6.616,0.606,0.143)
累计扫描时间/s	180.1
定位轨迹长度/m	101.9
全站仪观测首尾坐标差/m	(6.538,0.564,0.052)

根据表 3 中起始、结束位置坐标及全站仪观测

首尾坐标差,计算端到端定位累计漂移量  $\Delta T$  为 0.127 m,结合定位轨迹长度  $L$ ,计算端到端定位累计漂移率  $P_T$  为 0.12%。

##### 3.1.3 测试场景三

与 3.1.1 处理流程一致,测试场景三的激光 SLAM 定位数据分析如表 4 所示:

表 4 激光 SLAM 定位数据分析

Table 4 Analysis of laser slam positioning data

定位轨迹数据项	内容
起始扫描时间/s	1 646 828 515.9
起始位置/m	(0,0,0)
结束扫描时间/s	1 646 828 632.8
结束位置/m	(5.494,-2.558,0.145)
累计扫描时间/s	116.9
定位轨迹长度/m	114.9
全站仪观测首尾坐标差/m	(5.409,-2.500,0.059)

根据表 4 中起始、结束位置坐标及全站仪观测首尾坐标差,计算端到端定位累计漂移量  $\Delta T$  为 0.134 m,结合定位轨迹长度  $L$ ,计算端到端定位累计漂移率  $P_T$  为 0.12%。

### 3.2 相对距离误差

#### 3.2.1 测试场景一

井下无人机载三维激光扫描测量系统构建的巷道激光点云地图如图 5 所示,局部激光点云地图如图 6 所示。

在测试场景一中均匀布置 5 个标靶点,利用高精度全站仪观测 5 个标靶点坐标,视为真实坐标,在激光点云地图中提取相应标靶点坐标,视为估计坐标,真实坐标与估计坐标不在同一坐标系下,如表 5 所示。

根据表 5 计算相邻标靶点间欧式距离的真实值和估计值,计算相对距离误差和相对距离偏差率,误差分析结果如表 6 所示。



图 5 巷道整体激光点云地图

Fig. 5 Overall laser point cloud map of tunnel

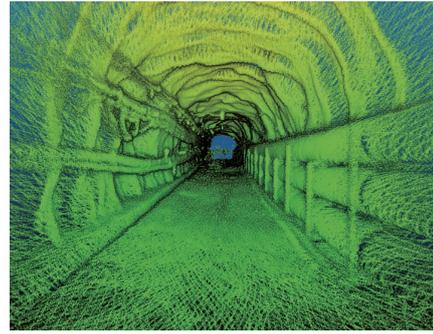


图 6 巷道局部激光点云地图

Fig. 6 Local laser point cloud map of tunnel

表 5 标靶点真实坐标与估计坐标

Table 5 Real coordinates and estimated coordinates of target points

标靶点	真实坐标			估计坐标		
	X/m	Y/m	Z/m	X/m	Y/m	Z/m
#1	33.826	31.729	904.113	3.742	-1.365	0.736
#2	44.292	37.572	904.641	13.52	5.444	1.394
#3	56.967	35.505	904.844	26.292	4.504	1.789
#4	84.197	43.925	905.531	52.681	15.525	2.928
#5	152.213	50.639	908.269	119.753 39	28.516	6.620

表 6 相对距离误差分析

Table 6 Relative distance error analysis

距离	距离真值/m	距离估值/m	相对距离误差/m	相对距离偏差率/%
#1-#2	11.998	11.933	0.065	0.542
#2-#3	12.844	12.813	0.031	0.245
#3-#4	28.511	28.621	-0.110	0.386
#4-#5	68.401	68.419	-0.017	0.025
均方根误差			0.066	0.355

由表 6 可知,基于本次测试场景,激光 SLAM 相对距离误差为 6.6 cm,相对距离误差偏差率为 0.355%。

### 3.2.2 测试场景二

井下无人机电载三维激光扫描测量系统构建的采空区整体激光点云地图如图 7 所示。

在测试场景二中均匀布置 8 个标靶点,利用高精度全站仪观测 8 个标靶点坐标,视为真实坐标,在激光点云地图中提取相应的标靶点坐标,视为估计

坐标,如表 7 所示。

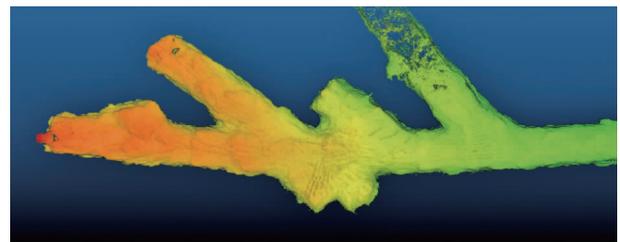


图 7 采空区整体激光点云地图

Fig. 7 Overall laser point cloud map of goaf

表 7 标靶点真实坐标与估计坐标

Table 7 Real coordinates and estimated coordinates of target points

标靶点	真实坐标			估计坐标		
	X/m	Y/m	Z/m	X/m	Y/m	Z/m
#1	164.467	158.870	102.320	1.865	-5.951	2.099
#2	160.332	166.990	101.242	10.949	-5.312	1.014
#3	151.240	183.716	100.852	29.924	-3.450	0.690
#4	141.986	186.390	101.286	35.956	4.102	1.083
#5	134.199	188.518	103.075	40.928	10.353	2.887
#6	134.602	167.228	101.688	21.176	18.228	1.298
#7	164.430	147.988	107.195	-8.270	-1.671	6.871
#8	150.862	142.125	103.074	-8.319	13.059	2.693

根据表 7 计算相邻标靶点间欧式距离的真实值和估计值,计算相对距离误差和相对距离偏差率,误差分析结果如表 8 所示。

由表 8 可知,基于本次测试场景,激光 SLAM 相对距离误差为 4.2 cm,相对距离误差偏差率为 0.403%。

表 8 相对距离误差分析

Table 8 Relative distance error analysis

距离	距离真值/m	距离估值/m	相对距离误差/m	相对距离偏差率/%
#1-#2	9.175	9.170	0.005	0.054
#2-#3	19.041	19.068	-0.027	0.144
#3-#4	9.642	9.673	-0.031	0.321
#4-#5	8.268	8.188	0.080	0.967
#5-#6	21.338	21.323	0.015	0.073
#6-#7	35.919	35.973	-0.054	0.150
#7-#8	15.344	15.311	0.033	0.216
均方根误差			0.042	0.403

### 3.2.3 测试场景三

井下无人机载三维激光扫描测量系统构建的模拟巷道整体激光点云地图如图 8 所示。

在测试场景三中均匀布置 7 个标靶点,利用高精度全站仪观测 7 个标靶点坐标,视为真实值,在激光点云地图中提取相应的标靶点坐标,视为估计值,如表 9 所示。

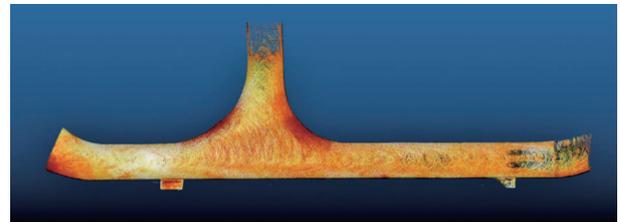


图 8 模拟巷道整体激光点云地图

Fig. 8 Laser point cloud map of simulated tunnel

表 9 标靶点真实坐标与估计坐标

Table 9 Real coordinates and estimated coordinates of target points

标靶点	真实坐标			估计坐标		
	X/m	Y/m	Z/m	X/m	Y/m	Z/m
#1	106.498	99.421	51.776	-28.375	-68.867	1.140
#2	112.480	90.960	51.843	-24.792	-59.244	1.062
#3	124.580	90.614	51.811	-31.324	-49.191	1.016
#4	139.359	83.432	51.829	-33.792	-32.918	0.845
#5	144.789	75.279	52.216	-30.214	-23.832	1.093
#6	158.574	72.484	52.274	-35.906	-10.904	0.962
#7	158.463	57.807	52.270	-23.765	-2.721	0.904

根据表 9 计算相邻标靶点间欧式距离的真实值和估计值,计算相对距离误差和相对距离偏差率,误差分析结果如表 10 所示。

由表 10 可知,基于本次测试场景,激光 SLAM 相对距离误差为 6.9 cm,相对距离误差偏差率为 0.562%。

表 10 相对距离误差分析

Table 10 Relative distance error analysis

距离	距离真值/m	距离估值/m	相对距离误差/m	相对距离偏差率/%
#1-#2	10.362	10.269	0.094	0.903
#2-#3	12.105	11.989	0.116	0.960
#3-#4	16.432	16.460	-0.028	0.172
#4-#5	9.803	9.768	0.035	0.358
#5-#6	14.066	14.126	-0.061	0.431
#6-#7	14.677	14.641	0.036	0.246
均方根误差			0.069	0.562

### 3.3 绝对点位误差

#### 3.3.1 测试场景一

根据 1.3 评价方法,从场景一激光点云地图中提取 #2、#3、#4 标靶点空间坐标,根据表 5 对应

的标靶点真实坐标,将激光点云地图转换到全站仪坐标系下,将坐标变换后的标靶点坐标视为估计值,结合标靶点真实坐标,计算每个标靶点的绝对点位误差,误差分析结果如表 11 所示。

表 11 绝对点位误差分析

Table 11 Absolute point error analysis

标靶点	坐标变换后标靶点坐标			坐标差值			绝对点位误差/m
	X/m	Y/m	Z/m	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	
#1	33.865	31.739	904.132	-0.039	-0.009	-0.018	0.044
#2	44.270	37.596	904.633	0.022	-0.023	0.009	0.033
#3	56.921	35.477	904.826	0.046	0.029	0.019	0.057
#4	84.226	43.943	905.542	-0.028	-0.018	-0.011	0.035
#5	152.218	50.590	908.159	-0.005	0.049	0.110	0.121
均方根误差							0.067

由表 11 可知,基于本次测试场景,激光 SLAM 的绝对点位误差为 6.7 cm。

### 3.3.2 测试场景二

从场景二激光点云地图中提取 #1、#3、#6、#8 标靶点空间坐标,根据表 7 对应的标靶点真实坐标,将激光点云地图转换到全站仪坐标系下,将坐标变换后的标靶点坐标视为估计值,结合标靶点真实坐标,计算每个标靶点的绝对点位误差,误差分析结果如表 12 所示。

由表 12 可知,基于本次测试场景,激光 SLAM 的绝对点位误差为 6.9 cm。

### 3.3.3 测试场景三

从场景三激光点云地图中提取 #1、#3、#4、#7 标靶点空间坐标,根据表 9 对应的标靶点真实坐标,将激光点云地图转换到全站仪坐标系下,将坐标变换后的标靶点坐标视为估计值,结合标靶点真实坐标,计算每个标靶点的绝对点位误差,误差分析结果如表 13 所示。

表 12 绝对点位误差分析

Table 12 Absolute point error analysis

标靶点	坐标变换后标靶点坐标			坐标差值			绝对点位误差/m
	X/m	Y/m	Z/m	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	
#1	164.433	158.859	102.307	0.034	0.011	0.013	0.038
#2	160.306	166.975	101.209	0.026	0.015	0.033	0.044
#3	151.215	183.734	100.862	0.025	-0.018	-0.010	0.032
#4	141.915	186.360	101.308	0.071	0.030	-0.022	0.080
#5	134.237	188.521	103.156	-0.038	-0.003	-0.081	0.089
#6	134.645	167.253	101.676	-0.043	-0.025	0.012	0.051
#7	164.462	147.883	107.138	-0.032	0.105	0.057	0.123
#8	150.879	142.092	103.088	-0.017	0.033	-0.014	0.039
均方根误差							0.069

表 13 绝对点位误差分析

Table 13 Absolute point error analysis

标靶点	坐标变换后标靶点坐标			坐标差值			绝对点位误差/m
	X/m	Y/m	Z/m	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	
#1	106.571	99.371	51.767	-0.073	0.050	0.009	0.088
#2	112.530	90.946	51.817	-0.050	0.014	0.026	0.058
#3	124.539	90.591	51.836	0.041	0.023	-0.025	0.053
#4	139.302	83.383	51.824	0.057	0.049	0.005	0.075
#5	144.732	75.241	52.194	0.057	0.038	0.022	0.071
#6	158.601	72.501	52.188	-0.027	-0.017	0.086	0.091
#7	158.415	57.837	52.277	0.048	-0.030	-0.007	0.057
均方根误差							0.072

由表 13 可知,基于本次测试场景,激光 SLAM 的绝对点位误差为 7.2 cm。

## 3.4 误差分析

不同测试场景由于现场周围环境不同导致激光

SLAM 内部激光点云连续匹配误差不同,因此最终建立的激光点云地图会存在不同程度的偏差,周围环境例如粉尘、水面、动态物体及玻璃等均会影响激光 SLAM 精度。基于 3.2 节测试的点云地图相对

精度和3.3节测试的点云地图绝对精度,自研激光SLAM测量平台具有厘米级的建图精度。

## 4 结论

1)针对地下矿山环境无GNSS定位信号、无法利用常规手段评测激光SLAM技术精度的问题,提出三种激光SLAM定量精度验证方案,将端到端定位误差、相对距离误差、绝对点位误差作为精度评测指标,并结合自研激光SLAM测量平台对典型实验场景进行实测,验证精度评测方案的可行性。

2)自研井下无人机载三维激光扫描测量系统具有厘米级的建图精度。

### 参 考 文 献

- [1] 危双丰,庞帆,刘振彬,等.基于激光雷达的同时定位与地图构建方法综述[J].计算机应用研究,2020,37(2):327-332.  
WEI Shuangfeng,PANG Fan,LIU Zhenbin,et al. A survey of lidar-based SLAM algorithms [J]. Application Research of Computers,2020,37(2):327-332.
- [2] ZHANG J,SINGH S. Low-drift and real-time lidar odometry and mapping[J]. Autonomous Robots,2017,41(2):401-416.
- [3] GEIGER A,LENZ P,URTASUN R. Are we ready for autonomous driving • The Kitti Vision Benchmark Suite[C]//Piscataway,NJ:IEEE,2012:3354-3361.
- [4] YE H Y,CHEN Y Y,LIU M. Tightly coupled 3d lidar inertial odometry and mapping [C]//Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 3144-3150.
- [5] SHAN T X,ENGLLOT B. Lego-loam:Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain[C]//Piscataway,NJ:IEEE,2018:4758-4765.
- [6] DESCHAUD J E. Imls-SLAM: Scan-to-model matching based on 3D data[C]//Piscataway,NJ:IEEE,2018:2480-2485.
- [7] ZHAO S B,FANG Z,LI H L, et al. A robust laser-inertial odometry and mapping method for large-scale highway environments[C]//Piscataway, NJ:IEEE,2019:1285-1292.
- [8] SHAN T X,ENGLLOT B,MEYERS D, et al. Lio-sam:Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping[C]//Piscataway,NJ:IEEE,2020:5135-5142.
- [9] QIN C, YE H Y, PRANATA C E, et al. Lins: A lidar-inertial state estimator for robust and efficient navigation [C]//Piscataway,NJ:IEEE,2020:8899-8906.
- [10] LI K L, LI M, HANEBECK U D. Towards high-performance solid-state-lidar-inertial odometry and mapping [J]. IEEE Robotics and Automation Letters,2021,6(3):5167-5174.
- [11] YOKOZUKA M,KOIDE K,OISHI S J, et al. Litamin 2: Ultra light lidar-based SLAM using geometric approximation applied with kl-divergence[C]//Piscataway,NJ:IEEE,2021:11619-11625.
- [12] PAN Y,XIAO P C,HE Y J, et al. Mulls: Versatile lidar SLAM via multi-metric linear least square [C]//Piscataway, NJ: IEEE,2021:11633-11640.
- [13] XU W,CAI Y X,HE D J, et al. Fast-lid2: Fast direct lidar-inertial odometry[J]. IEEE Transactions on Robotics (Early Access),2022:1-21. DOI:10.1109/TRO.2022.3141876.
- [14] 俞德崎,李广云,王力,等.激光SLAM测图精度评定[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集,2018:1-5.  
YU Deqi,LI Guangyun,WANG Li, et al. Accuracy evaluation of laser SLAM mapping[C]//Proceedings of the 9th China satellite navigation Academic Annual Conference,2018:1-5.
- [15] 檀继猛,张鹏飞,邵士成,等.移动式三维激光扫描仪在地下管廊测量中的应用[J].测绘通报,2019(12):156-158.  
TAN Jimeng,ZHANG Pengfei,SHAO Shicheng, et al. Application of dynamic 3d laser scanner in underground pipe gallery measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(12):156-158.
- [16] CHEN Y,MEDIONI G G. Object modelling by registration of multiple range images[J]. Image & Vision Computing,1992,10(3):145-155.
- [17] MICHAEL G. Evo: Python package for the evaluation of odometry and SLAM[EB/OL]. (2017-09-14)[2022-02-09]. <https://github.com/MichaelGrupp/evo>.

(编辑:周叶)