

# Laser SLAM Mapping Precision Assessment

Deqi Yu<sup>1</sup>, Guangyun Li<sup>1</sup>, Li Wang<sup>1</sup>, Fengzhuo Xiang<sup>1</sup>, Youyi Gu<sup>1</sup>

1. Information Engineering University, 450000, Zhengzhou, China

yudeqi\_maybe@163.com

**Abstract:** Based on analyzing error factors of laser SLAM mapping, in variety of contrastive experiments are designed used of Total Station, 3D Laser Scanner and Mobile Scanning System. Analysis of experimental results, the mapping precision of Laser SLAM is assessed based on the central coordinates of spherical targets, precision of the natural characteristic dimensions and precision of the point cloud model, which take the root mean square error of point, root mean square error of dimension and error of point cloud alignment as index. Thus a concrete method for assessing the mapping precision of Laser SLAM is presented in order to provide a useful reference for the engineering practice.

**Keywords:** laser SLAM; precision assessment; Mobile Scanning System; error of mean square; point cloud alignment

## 激光 SLAM 测图精度评定

俞德崎<sup>1</sup>, 李广云<sup>1</sup>, 王力<sup>1</sup>, 向奉卓<sup>1</sup>, 谷友艺<sup>1</sup>

1. 信息工程大学, 河南郑州, 中国, 450000

yudeqi\_maybe@163.com

**【摘要】**在分析激光SLAM测图误差影响因素的基础上, 利用全站仪、三维扫描仪和移动扫描系统设计了多种对比实验。分析实验结果, 将点位中误差, 尺寸中误差和点云配准误差作为靶标球中心坐标精度, 自然特征尺寸精度和点云模型精度的指标。从这三个方面对激光SLAM的测图精度进行评定, 直观反映多种因素对激光SLAM测图精度影响的综合尺度。由此给出了激光SLAM测图精度评定的具体方法, 为工程实践提供参考。

**【关键词】**激光SLAM; 精度评定; 移动扫描系统; 中误差; 点云配准

## 1 引言

随着城市规划、建筑景观设计、三维导航以及城市旅游等应用对城市真三维景观的需要, 建立镶嵌有纹理的真三维城市模型(3DCM)已凸现出较高的经济价值和应用前景。目前在三维几何数据的获取方面, 出现了利用激光测距原理快速建立物体三维影像模型的三维激光扫描仪和用于摄影测量技术处理大范围场景的数字摄影测量技术<sup>[1]</sup>。当前数字摄影测量技术主要应用于涉及到范围较广的城市及街道模型的建立。而三维激光扫描技术与传统的测量手段相比具有无需接触被测物体, 测量速度快、精度高, 通过高速激光扫描测量的方法, 大面积高分辨率地快速获取被测对象表面的三维坐标数据, 广泛应用于模型重建、古建筑保护, 并逐渐成为三维城市数据模型获取的一种重要方法<sup>[2]</sup>。因此, 三维激光扫描仪的出现大大加快了工程实施进度, 缩短了外业时间, 节省了人力物力, 提高了内业数据处理的效率。

目前大多数的便携式激光扫描仪采集完被测物体的点云数据后, 需要用扫描仪配套的后处理软件对点

云数据进行处理, 后期点云拼接效率不高。机载型扫描仪体积大, 使用时受到环境因素限制。背包式三维激光扫描系统, 可在移动过程中快速获取高精度定位姿态数据、高密度三维点云和高清连续全景影像数据<sup>[3]</sup>。该系统无需稳定的载体平台, 但由于需要GPS提供高精度定位数据, 因此无法在室内及地下使用。

当前, 实时定位与测图(SLAM)技术是国内外研究热点。SLAM是一种自主导航的重要方法, 可以实现运动载体在未知环境的自主定位、导航并完成对室内环境的建模。SLAM根据其所选择的传感器不同主要分为激光SLAM和视觉SLAM两大类<sup>[4]</sup>, 激光SLAM具有制图精准实时性强的特点。近期推出的基于激光SLAM技术的移动扫描系统, 体积较小, 无需GPS提供定位数据, 可在室内外连续采集点云数据, 同时具备自动化的数据后处理过程, 很好的解决了传统三维激光扫描系统所存在的不足。但目前还缺乏对激光SLAM测图精度进行评定的有效方法, 本文设计了多种对比实验, 利用基于激光SLAM技术的移动扫描系统采集了我校地下车库的点云数据, 作为评价对象, 从靶标球中心坐标精度, 自然特征尺寸精度和点

基金项目: 国家自然科学基金(4134Z327G)项目资助

云模型精度对激光 SLAM 测图精度进行评定,为相关从业人员的工程实践提供有效参考,弥补该领域的研究空白。

## 2 实验方案设计及数据采集

### 2.1 实验方案设计

移动扫描系统具有扫描速度快,能快速完成对室内外场景的三维结构、WiFi、地磁等信息的采集;移动扫描系统现场采集数据完成后可以自动化的对扫描数据进行处理完成点云数据拼接;从点云模型中可直接获得室内外场景的二维平面图和三维结构信息。移动扫描系统使用方便,但也存在多种因素影响激光 SLAM 的测图精度,比如:仪器自身误差、点云拼接误差、外界环境影响等。这些因素都会对移动扫描系统的测图精度造成影响,本文在分析多种因素对激光 SLAM 测图精度造成的综合影响尺度的基础上,提出了从实验设计到精度评价的具体方法。

对激光 SLAM 的测图精度进行评定,使用的方法是将移动扫描系统采集的数据与高精度的测量仪器采集的数据进行比较。作为传统测量仪器,全站仪的点坐标测量精度可以达到毫米级,可将全站仪测量靶标球中心坐标测量值作为真值,将移动扫描系统采集的坐标值与其进行对比,以此衡量激光 SLAM 测图的点位精度;用钢尺测量车库自然特征物体的长宽高尺寸数据作为真值,再在激光 SLAM 点云中量取相应物体扫描长度,将二者对比以衡量激光 SLAM 测图点云中自然特征尺寸精度;点云配准是寻找一种三维空间刚体变换使在不同视角下的三维坐标点云共同部分能够正确地匹配和搭接<sup>[5]</sup>, Rigel VZ400 三维激光扫描仪具有 5mm 测量精度和 3mm 的重复测量精度,以 VZ400 采集的点云模型为基准模型,将移动扫描系统扫描的点云模型与其进行配准,将配准精度作为衡量激光 SLAM 测图点云模型精度的指标。

### 2.2 数据采集

本文的数据采集主要包括四部分。第一,控制网测量获取靶标球中心高精度空间坐标;第二, Rigel VZ400 扫描仪采集地下车库高精度点云数据;第三,移动扫描系统采集地下车库点云数据作为评价对象。第四,利用钢尺量取地下车库自然特征物体尺寸。

#### 2.2.1 控制网测量

控制网测量目的是用于将室外的高精度空间基准传递到地下车库,获取车库内靶标球中心的高精度空间坐标。本次测量按照四等控制网测量技术要求施测,水平角和垂直角各观测四个测回,距离观测两个测回,

共有 4 个已知点,入口和出口各两个,共架设 9 个测站。全站仪选用索佳 NET05AX 全站仪,全站仪测角精度为 0.5 秒。按控制网测量步骤,完成水平角、垂直角及站间距离的测量后,由已知点通过平差计算可以确定未知控制点在目标坐标系下的空间坐标。利用全站仪的坐标测量功能,在控制点架设全站仪,输入站点坐标和仪器高,照准后视方向棱镜完成后视定向,照准前视方向棱镜检核全站仪坐标测量精度,发现坐标测量精度达到毫米级满足实验需要。根据文献<sup>[6]</sup>提出的靶标球中心坐标测量方法,利用全站仪测量各靶标球中心在目标坐标系下的空间坐标。靶标球中心坐标如表 1 所示。

Table 1. Central Coordinates of Spherical Targets

序号	N	E	U
1	3854610.230	460467.645	106.713
2	3854621.905	460467.689	104.817
3	3854627.835	460467.601	106.725
4	3854616.268	460481.760	106.706
5	3854621.841	460487.950	104.710
6	3854616.429	460490.562	104.680

表 1. 靶标球中心坐标

#### 2.2.2 Rigel 扫描仪采集数据

利用 Rigel VZ400 三维激光扫描仪采集地下车库的高精度点云数据,作为点云模型基准。VZ400 激光扫描仪可以很好的识别反射片,因此本次点云数据采集以反射片作为标志,反射片摆放时要注意高低分明,在不影响扫描的情况下尽量分散摆放,以提高点云拼接精度。反射片可以作为扫描仪点云多站拼接的公共点,两站间拼接需要 3 个以上的公共点。同时,在扫描仪第一站用全站仪测量 6 个反射片在目标坐标系下的空间坐标。点云数据采集完成后,利用 Riscan Pro 提取反射片中心在工程坐标系下的坐标,将点云数据从工程坐标系转换到全站仪目标坐标系下,同时以反射片中心为公共点对点云进行多站拼接,可以得到地下车库高精度点云模型数据。图 1 为地下车库点云数据。



Figure 1. Point Cloud Data Collected by Rigel

图 1. Rigel 采集点云数据

### 2.2.3 移动扫描系统采集数据

移动扫描系统是基于激光SLAM技术，一般包括高分辨率全景相机（获得720°全景数据）、大空间激光扫描仪（获得高密度空间点云数据），另有蓝牙、地磁等传感器获取现场多种信息。移动扫描系统数据采集时推动移动扫描系统沿着地下车库道路采集车库点云数据，扫描过程分为两站，车库东西部分各测一站。同时要保证对地面控制点上的反射片进行有效扫描，以便后处理时将点云数据由工程坐标系转换到全站仪的目标坐标系下。移动扫描系统采集数据如图2所示。

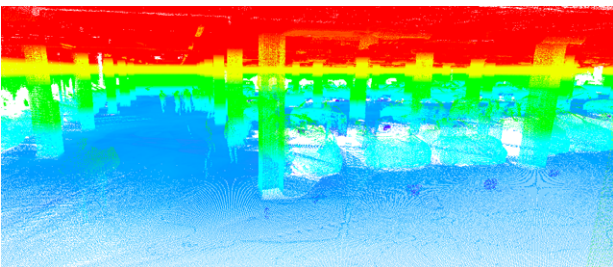


Figure 2. Point Cloud Data Collected by Mobile Scanning System

图 2. 移动扫描系统采集点云数据

### 2.2.4 自然特征尺寸量取

为了方便在点云中量取相应的自然特征，所以自然特征选取应当选择轮廓显著、便于测量的自然特征。本文选取地下车库的柱子、消防栓、窗户、配电箱等作为特征物体，利用钢尺量取它们的长宽高尺寸，如图3所示。为了排除偶然误差的影响，取多次测量的平均值作为特征物尺寸的真实值，用于与特征物扫描长度做比对。



Figure 3. Characteristic Object Measuring Diagram

图 3. 特征物量取示意图

## 3 精度评定

### 3.1 靶标球中心坐标精度

#### 3.1.1 坐标误差分析

通过控制网测量，得到了地下车库靶标球中心高精度空间坐标。在坐标测量时，人眼对准靶标球时可能存在对准偏差，从而导致坐标测量不准确。因此我们对同一靶标球进行多次测量，取坐标平均值作为靶标球中心的真实坐标。将激光SLAM点云数据导入Geomagic Studio，利用软件拟合出激光SLAM点云中的靶标球中心，求出中心空间坐标，注意在拟合时尽量除去球体周围的噪声点，以提高拟合精度。

靶标球中心坐标在三个轴向的误差为<sup>[7]</sup>：

$$\begin{aligned}\Delta x &= X - x' \\ \Delta y &= Y - y' \\ \Delta z &= Z - z'\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中， $(x', y', z')$ 表示移动扫描系统测量坐标， $(X, Y, Z)$ 表示全站仪测量坐标。

若测量 $n$ 个点，则点位中误差为：

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}}, \sigma_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{n}} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}{n}} \quad (3)$$
$$\sigma_p^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2$$

据此可以对移动扫描系统的坐标精度进行分析。表3为6个靶标球中心在三个轴向的误差以及点位中误差。

Table 2. Point Root Mean Square Errors(m)

序号	N轴向误差	E轴向误差	U轴向误差
1	-0.017	0.020	-0.015
2	0.019	-0.022	-0.021
3	-0.022	-0.027	0.017
4	-0.015	0.019	0.016
5	0.014	-0.024	-0.020
6	-0.016	-0.022	-0.019
轴向中误差	0.017	0.022	0.018
点位中误差	0.033		

表 2. 点位中误差

#### 3.1.2 坐标精度评定

从表中可以看出移动扫描系统的点云数据的点位的三个轴向中误差保持2cm左右，在实验中我们发现

移动测量系统的点云数据相比Rigel扫描仪采集的点云数据更稀疏,靶标球球面特征不够明显,在球拟合时效果不够理想,导致拟合的靶标球中心相对于真实中心有一定的偏移,会对点位精度造成一定影响。最终,得到点位中误差为3.3cm。

### 3.2 自然特征尺寸精度

#### 3.2.1 特征尺寸误差分析

使用钢尺量取地下车库的柱子,消防栓等自然特征物的尺寸作为真实值。在Geomagic Studio软件中,选取相应特征物,在点云中量取其扫描长度。由于在点云中量取特征物尺寸数据时软件无法自行选点,需要人工的选点,因此存在选点误差。故我们多次选点,取平均值作为特征物扫描长度测量值。将扫描长度测量值与物体的真实值进行比对,可以得出自然特征物体的尺寸误差:

$$\Delta = L - D \quad (4)$$

式(4)中, $L$ 为特征尺寸的扫描长度, $D$ 为特征尺寸的真实值。

$$m = \pm \sqrt{[\Delta\Delta]/n} \quad (5)$$

根据公式(5)计算得到尺寸中误差并以中误差为评价特征尺寸精度的指标。据此对将特征物尺寸进行对比。

Table 3.Comparison of Characteristic Objects' Dimensions(m)

序号	特征物	扫描长度	真实长度	差值
1	柱子	0.507	0.501	0.006
2	消防栓(长)	1.784	1.795	-0.011
3	消防栓(宽)	0.687	0.701	-0.014
4	大门(宽)	1.157	1.177	-0.020
5	大门(高)	2.074	2.097	-0.023
6	配电柜(长)	0.818	0.801	0.017
7	配电柜(宽)	0.610	0.594	0.016
8	窗户(长)	1.441	1.453	-0.012
9	窗户(宽)	1.442	1.453	-0.011
10	反射桩	0.774	0.788	-0.014
	最大值			-0.023
	最小值			0.006
	中误差			0.015

表 3.特征物尺寸对比

#### 3.2.2 特征尺寸精度评定

从上表可以看出特征物尺寸的差值大部分为在

1cm至2cm之间,其中差值最大值为大门高0.023m。主要原因可能是大门扫描距离较远,点云稀疏,外围轮廓表达不够清晰,导致差值偏大;在选点对特征物扫描长度进行测量时,选点误差也会对差值造成影响;差值最小值为0.006m,误差较小原因可能是柱子在地下车库数量较多,在量取扫描长度时,采用了量取多根柱子尺寸取均值的方法,有效降低了偶然误差。最终可得自然特征尺寸中误差为0.015m。

### 3.3 点云模型精度

#### 3.3.1 点云模型精度误差分析

以VZ400扫描的点云模型作为参考点云,移动扫描系统扫描的点云模型作为待配准点云,将两组点云导入到配准软件中自动配准,得到点云配准结果如下图4,5所示。在对采集的点云数据后处理时,由于使用后处理软件自动拼接,存在点云拼接误差,导致点云模型不够准确,会对点云的模型精度产生影响。

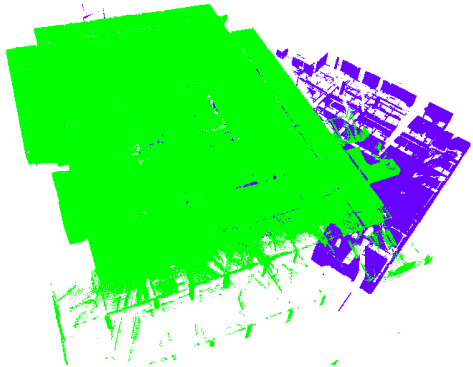


Figure 4: Pre Registration of Point Clouds

图 4.点云配准前

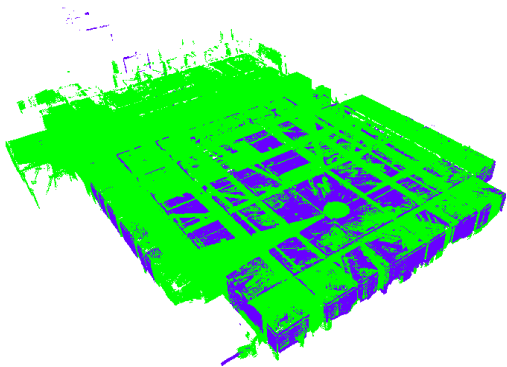


Figure 5: After Registration of Point Clouds

图 5.点云配准后

#### 3.3.2 点云模型精度评定

在数据处理过程中发现,使用基于迭代最近点算法(Iterative Closest Point, ICP)编写的软件配准两组点云时,点云的密度以及点云整体的质量都会对点云的配准精度造成影响。因此配准时应使用完整的点云模型,不能使用稀释后的点云模型,以保证配准精度。最终,软件配准结果显示两组点云的配准误差,即点云模型精度为4cm。

#### 4 总结

本文利用全站仪,三维扫描仪采集和钢尺采集的数据与移动扫描系统采集的数据进行多组对比实验。从靶标球中心坐标精度,自然特征尺寸精度和点云模型精度三个方面对激光SLAM的测图精度进行评定。分析了对准偏差,选点误差和拼接误差等对实验结果的影响,通过点位中误差,尺寸中误差和点云配准误差等指标直观的反映了多种因素对激光SLAM测图精度影响的综合尺度,实现了对激光SLAM测图精度的评定,为移动扫描系统的工程应用提供了有益的参考。

基于激光SLAM技术的移动扫描系统,可在室内外连续采集数据,自动拼接点云,弥补了传统测量仪器的不足,具有很大的发展潜力和应用前景。随着人们对室内外高精度导航定位技术需求的不断提高,对室内外的建筑目标快速建模的需求巨大,任务繁重,因此分析激光SLAM测图精度对提高移动扫描系统的模型精度以及数据利用效率等方面具有重要的实际意义和研究价值。

#### References (参考文献)

- [1] Zhang Chunsen, Zhang Weilong, Guo Bingxuan et al, Rapidly 3D Texture Reconstruction Based on Oblique Photography, [J], Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(7):782-790.张春森, 张卫龙, 郭丙轩,等. 倾斜影像的三维纹理快速重建[J]. 测绘学报, 2015, 44(7):782-790.
- [2] Wang Yanmin & Hu Chunmei, A Robust Registration Method for Terrestrial LiDAR Point Clouds and Texture Image, [J], Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2):266-272.王晏民, 胡春梅. 一种地面激光雷达点云与纹理影像稳健配准方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(2):266-272.
- [3] Yu Jianwei, Zhang Panpan, Weng Guokang et al, General Introduction to Hi-Target iScan-P Portable Mobile 3D Laser Surveying System, [J], Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(3):000140-141.余建伟, 张攀攀, 翁国康,等. 中海达iScan-P便携式移动三维激光测量系统概述[J]. 测绘通报, 2015(3):000140-141.
- [4] Liang Xiao, Indoor SLAM for Robots Based on Laser and Mono-vision Fusion, [D], Harbin Institute of Technology, Harbin, 2015.梁潇. 基于激光与单目视觉融合的机器人室内定位与制图研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [5] Yang Xianhui & Wang Huinan, Application Research of ICP Algorithm in 3D Point Cloud Alignment, Computer Simulation, [J], 2010, 27(8):235-238.杨现辉, 王惠南. ICP算法在3D点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8):235-238.
- [6] Jia Dongfeng, Cheng Xiaojun, Liu Yanping, Research on the application of target balls in registration of point clouds, [J], Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(9):64-68.贾东峰, 程效军, 刘燕萍. 球标靶在点云数据配准中的应用分析[J]. 工程勘察, 2011, 39(9):64-68.
- [7] Xu Gong & Cheng Xiaojun, Mobile Surveying System Point Clouds Precision Assessment and Application Analysis, [J], Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(9):42-46.徐工, 程效军. 移动测量系统点云精度评定及应用分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(9):42-46.