

室内空间 SLAM 点云建图精度评定及分析研究

陈伯顺

中移智行网络科技有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v3i1.558

[摘要] SLAM是近年发展起来的重要技术,在机器人定位导航、自动驾驶、移动测量、高精度地图等方面具有广阔应用前景。基于SLAM技术的移动采集设备在移动测量及高精度地图数据采集过程中优势明显。笔者在某基于SLAM的车载高精度地图数据采集设备研制过程中,对所生成的室内点云数据进行了精度评估与误差分析,为该设备及数据处理软件的研发与优化提供了有效的意见和建议。

[关键词] SLAM; 激光点云; 移动测量; 室内建图; 室内定位; 精度评定

引言

随着技术的进步,Lidar及SLAM技术在移动测量、高精度地图测绘、自动驾驶等领域的使用越来越多,以推车、背包、车载扫描平台为代表的SLAM扫描建图设备已成为热门研究与应用方向;SLAM技术基于视觉或lidar点云相邻帧特征匹配,实现轨迹推算与姿态优化,生成区域连续点云或影像,通过回环检测实现点云或视觉建图的误差配赋与整体优化;相较于早期单线激光集成高精度IMU的移动测绘扫描设备,基于SLAM的扫描设备在地下空间、室内、城市峡谷、隧道等场景具有很强的优势,由于对IMU设备精度的需求降低而可显著降低设备成本,具有广阔的发展应用空间。

1 Lidar SLAM 建图原理

1.1 SLAM原理及应用

SLAM(simultaneous localization and mapping),即时定位与地图构建,又称CML(Concurrent Mapping and Localization),该技术早期主要是为了解决机器人在未知环境中的定位问题。机器人通过Lidar扫描获取周围环境信息,并通过点云相邻帧匹配、局部优化实现地图扩展,通过回环检测实现地图优化;在建图的同时,通过实时扫描的点云与已有地图的匹配可实现自身位置的确定。

随着技术的进步,SLAM被引入到移动测量领域,尤其在解决室内、隐蔽场景的扫描测量应用中具有极大的优势;通过视觉与Lidar SLAM技术扫描生成的点云与视觉数据被用于三维场景重建,高精度地图生产等领域。

1.2 设备构成

常见的基于SLAM的数据采集设备主要包括数据采集传感器(lidar、摄像头等)、IMU(Inertial Measurement Unit)、GNSS、时间同步装置、工控机等。以某车载移动数据采集设备为例,采集设备以工控机为处理单元,集成多线束Lidar、高清摄像头、IMU、GNSS等传感器,经时间同步机制实现点云、影像、姿态数据的同步采集,采集后的数据经数据处理平台实现点云数据、正射影像等数据生产,进而加工为高精度地图数据。

1.3 常见slam扫描设备

目前SLAM扫描设备的外观形态比较多样,但总体上可划分为背包、推车、车载三种形式,一般同时配备多线束Lidar与高清摄像头或全景相机,不同形态的设备适用于不同的场景,各具优缺点。

背包以作业人员背负的方式作业,灵活、机动性强,可以适用于大多数场景,缺点是劳动强度大,作业效率较低,因依靠电池供电而作业时长受到限制;推车则在一定程度上降低了人的劳动强度,可适应大多数平地应用场景,效率要高于背包;车载采集设备则主要用于道路或停车场场景的高精度地图的测绘,效率高,但应用场景相对受限。图1中展示了三种采集设备的形态。

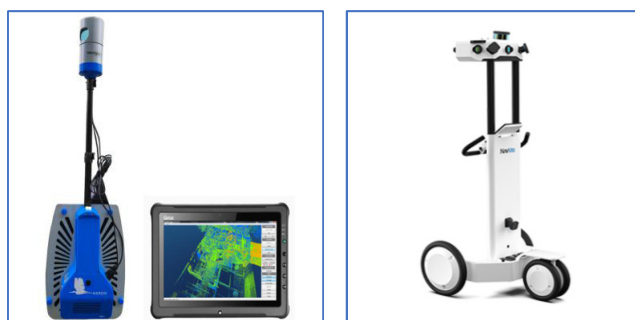


图1 常见SLAM扫描设备(背包、推车、车载)

笔者有幸参与某车载SLAM高精度地图采集设备的研发,设备包含一32线束Lidar,两个高清摄像头,实现了从地下车库到道路场景数据的连续采集,获取的原始数据包含Lidar点云及高清影像,通过数据处理平台SLAM算法处理,实现点云和正射影像等数据成果的输出来用于高精度地图的标注生产。点云及影像成果的质量决定了高精度地图生产所能达到的精度水平,故而对设备所生产的点云及影像成果进行质量评估是设备研发和数据生产过程中极其重要的环节。本文所采用点云数据为该设备研发过程中的某次测试所生产的点云数据成果。

2 点云精度评定

2.1 评定方法

目前对于SLAM点云成果质量的评价多以点云疏密程度、细节特征辨识情况、是否分层、点云厚度等指标进行描述,系统性的严密质量评定并不多。在设备研发过程中,为了评价设备性能以指导设备及数据处理软件性能优化,对设备采集生产的点云质量进行了多期次质量评定,包括地面开阔场景、地下车库场景的点云数据。地面点云的质量评定通过GNSS RTK采集特征点坐标与点云中提取的对应点坐标进行比对以实现;地下车库场景点云的质量评定则在布设导线测量控制网的基础上测量特征点坐标,同时在点云成果中提取对应特征点坐标,以测量点为真值,通过坐

标比对, 计算点位中误差作为精度评定指标。

点云精度评定的基本思路是选取点云中的特征点样本, 提取其坐标值, 通过可靠的测量方法获取所提取的样本特征点的坐标值, 将后者作为真值, 计算点位中误差以评定点云精度。该过程中主要涉及控制测量、样本点坐标测量, 点云特征点坐标提取、坐标系统一、点位误差计算等步骤。

本次评定所用数据为某地下车库场景测试数据, 测试区域呈长方形, 长约110m, 宽约40m。

2.2控制测量

在待测区域大致均匀的布设a1~a8共8个测量控制点, 采用带有十字丝的测量反射片贴于地面作为测量标志或选择地面已有的清晰角点作为点标志, 如地面车道导向箭头的角点。选点过程中注意相邻点位的通视, 仪器架设及特征点采集的便利性。

控制点布设完成后采用全站仪进行控制测量施测。本次测量2"级全站仪(棱镜精测测距精度±(2+2ppm*D), 无合作目标精测测距精度±(3+2ppm*D)), 按照一级导线测量的技术要求进行观测, 即每测站按测回法进行两测回角度及距离观测, 观测数据满足各项限差要求。

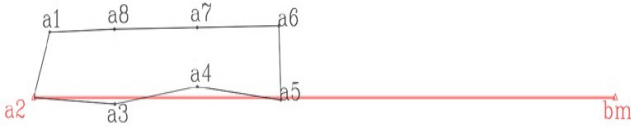


图2 控制网网图示意图

本次点云精度评定工作采用假设坐标系, 仅考虑内部相对精度评定, 假设a2及bm为已知点, 坐标分别为(10, 0, 0)、(10, 500, 0), 连接角∠a1a2bm为70°。控制网网型如图2所示。

表1 控制网误差统计

Table with 5 columns: 最大, 最小, 平均, 最大点间误差, 最大边长比例误差, 验后单位权中误差, 高程中误差. Includes summary statistics for the control network.

表2 控制点成果及点位误差表

Table with 8 columns: 点名, X(m), Y(m), H(m), 长轴(mm), 短轴(mm), 长轴方位(dms), 点位中误差(mm), 备注. Lists coordinates and errors for control points a1 through a8.

2.3特征点坐标测量

在控制测量的基础上, 以控制点作为测站点和后视镜点, 分别架设全站仪和棱镜, 严格对中、整平、置盘后进行特征点坐标的采集。地面点使用三角支架架设棱镜并调整至圆气泡居中, 全站仪照准棱镜中心进行数据采集; 墙角点及悬空点则使用全站仪无合作目标模式进行点位坐标采集。为了让采集的特征点与点云中的特征点能严格对应起来, 对于采集的每个点均进行记录并拍照, 如下图所示。

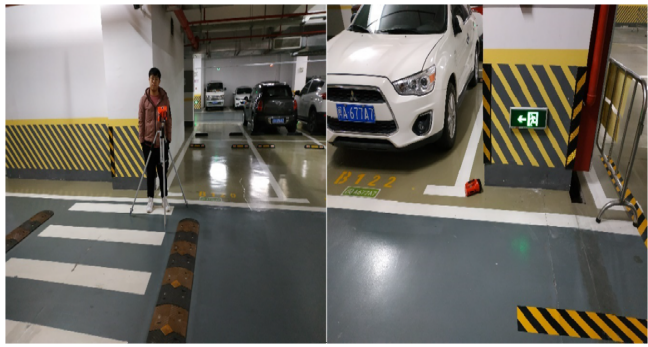


图3 采集点位现场照片

(注: 对中杆位置及电筒指示的角点为采集特征点)

外业共采集特征点217点, 主要包括车位线角点、墙角线与地面交点, 悬空标牌角点等具有明显特征的点位坐标。

2.4点云特征点坐标提取

在CloudCompare点云处理软件中, 使用现场记录及拍摄的照片与点云数据进行比对, 拾取与测量采集特征点最吻合的点云点进行坐标的提取, 从点云中较均匀的提取了共40个特征点, 点位较均匀地覆盖了整个数据采集区域。

2.4.1统一坐标系

因点云生成坐标系与特征点测量过程中坐标系不一致, 为了进行比较, 需要将坐标系归一化。坐标归一化的过程中, 平面和高程分别进行。

为了使点云与测量坐标系的匹配达到最优化, 对于平面坐标转换, 筛选40对特征点(测量坐标与点云坐标)中转换残差小于10cm的点对进行2D坐标转换参数(平移、旋转、尺度)的计算。

表4 坐标转换参数计算及残差表

Table with 5 columns: 特征点号, Y坐标残差(m), X坐标残差(m), 平面残差(m), 备注. Lists 40 feature points and their coordinate conversion residuals.

转换参数计算完成后, 使用该参数对提取的40个点云特征点坐标进行平面坐标转换, 计算28对点高差均值作为点云提取点的高程改正数, 使用

该改正数对点云点高程进行转换,转换后的点坐标如下表5所示。

表5 测量点及转换完成后的点云点坐标

点号	测量坐标			点云坐标			备注
	X	Y	h	X	Y	h	
2	28.914	1.707	0.019	28.935	1.651	0.054	
3	26.639	0.650	0.016	26.587	0.422	0.058	
4	23.585	4.083	0.009	23.603	4.075	0.069	
5	23.613	5.563	0.012	23.553	5.498	0.067	
6	23.623	6.411	0.014	23.638	6.361	0.046	
26	30.287	31.006	0.025	30.300	30.998	-0.041	
27	30.446	33.498	0.036	30.472	33.511	-0.095	
28	30.371	36.179	0.013	30.411	36.065	-0.028	
29	30.380	38.040	0.014	30.431	38.126	-0.036	
30	30.414	41.096	0.005	30.373	41.103	-0.045	
55	30.733	67.379	-0.015	30.708	67.361	0.021	
56	29.824	81.720	0.030	29.774	81.588	0.105	
57	29.852	83.724	0.020	29.733	83.626	0.142	
58	25.333	83.780	0.040	25.184	83.686	0.167	
63	24.494	70.516	0.023	24.456	70.589	0.116	
87	24.776	90.552	0.045	24.697	90.457	0.173	
88	24.813	92.968	0.040	24.661	92.824	0.184	
93	27.768	104.333	0.024	27.810	104.202	0.136	
94	31.131	103.330	0.019	31.139	103.160	0.174	
95	31.067	98.470	0.014	31.089	98.445	0.125	
116	9.288	111.570	0.019	9.306	111.623	0.098	
117	9.240	108.823	0.013	9.315	108.871	0.052	
118	9.177	103.696	0.009	9.191	103.732	0.034	
119	9.107	98.299	0.016	9.185	98.258	0.004	
120	8.323	95.195	0.012	8.284	95.252	0.000	
136	8.135	81.965	-0.011	8.139	81.905	-0.087	
137	8.624	81.155	-0.009	8.532	81.134	-0.090	
138	8.614	79.150	-0.009	8.564	79.105	-0.095	
139	13.714	79.166	0.016	13.687	79.142	-0.068	
140	13.733	81.175	0.007	13.649	81.210	-0.113	
176	6.707	29.815	0.006	6.739	29.751	0.028	
177	6.680	27.385	-0.001	6.782	27.496	0.005	
178	6.646	23.716	0.004	6.681	23.767	0.061	
179	6.597	18.821	0.014	6.604	18.896	0.092	
180	6.555	15.228	0.010	6.601	15.296	0.065	
209	28.835	6.855	0.158	28.831	6.723	0.045	
210	13.815	8.002	0.005	13.842	7.959	0.038	
211	13.632	3.339	0.006	13.636	3.432	0.045	
212	6.433	3.803	-0.017	6.431	3.847	-0.016	
213	6.460	5.853	-0.011	6.443	5.895	-0.011	

2.4.2中误差计算

本次中误差的计算以特征点测量坐标为真值,经坐标转换的点云提取坐标为待评定值,中误差计算公式如下:

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}, \quad n \text{ 为观测值个数。}$$

计算结果及相关统计值如下表所示:

表6 误差评定成果

Max ΔX	15.2cm	Max ΔY	22.7 cm	Max Δh	15.9 cm
Min ΔX	0.3cm	Min ΔY	0.8 cm	Min Δh	0.1 cm
X方向	Y方向	高程h	平面	平面+高程	
58.1mm	83.7mm	78.9mm	101.9mm	128.9mm	

通过上述平差计算,可以得出如下结论:

(1) 该点云数据平面精度10.2cm,高程精度7.9cm,三维精度优于12.9cm;(2)在坐标转换过程中存在约1/1000的尺度因子,需要进一步明确该尺度因子的存在是否正常,如何能找出并消除。(3)本次提取的点云特征点坐标值为直接拾取的点云点坐标,在点云密度较低的地方可能存在拾取的点坐标与特征点匹配度较低的情况,一定程度上可能影响精度评定结果。

3 误差来源分析

经对SLAM扫描设备进行分析,其点云成果主要误差源自以下几个方面:

(1) Lidar扫描精度:该精度主要为Lidar工艺和系统标定决定,具体表现为角度和测距误差,距离越远,激光光斑也越大,扫描点精度在不同扫描距离的情况下存在差异;目前大多数Lidar设备精度在2~3cm;(2)环境条件引起的误差:与众多光电测量设备一样,在测量过程中会受到所处环境条件的影响,如温度、气压的不同都会在一定程度上影响扫描精度;同时被测量环境中不同的材质表面也在一定程度上存在反射特性不一致的问题。(3)系统集成误差:SLAM点云扫描设备一般集成了Lidar、IMU、GNSS、相机等传感器;多传感器的集成与坐标系统标定会引入一定的误差;(4)时间同步误差:系统各传感器之间需要进行高精度的时间同步以实现数据的联合解算处理,时间同步精度在一定程度上会影响成果数据的精度;(5)点云密度与边缘效应:不同的点云扫描密度(或设备的分辨率)在一定程度上影响了点云对场景的重建,过低的点云密度无法达到理想的建图精度;由于激光光斑大小与分辨率的原因会造成扫描所获取的点云无法完全真实的反应被扫描物体的边缘,这在一定程度上会影响到场景重建的精度。(6)数据处理误差:SLAM建图技术需要进行大量点云帧间数据的匹配,局部优化、全局优化流程,处理算法的优劣,细节的处理将在很大程度上决定最终生成点云的精度。

4 结论及建议

为了评定所研发的数据采集设备及数据处理软件所生成的室内空间点云数据的精度特进行本次点云精度验证,通过本次评定掌握了数据采集系统目前所生成的室内点云数据精度水平,并进一步分析了数据成果可能的误差来源,为设备及软件的优化和改进提供了参考依据。

[参考文献]

- [1]徐进军.工业测量技术与数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2014:152-153.
- [2]武汉大学测绘学院测量平差学科组.误差理论与测量平差基础[M].武汉:武汉大学出版社,2003:43-44.
- [3]王工,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(9):42-46.
- [4]刘梅余.移动测量系统精度分析及提高研究[D].上海:同济大学,2009.