引文格式：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. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.012

分区域采样在地下空间三维建模中的应用

刘　宇[1,2]，汪　超[1,2*]，何　川[1]，葛亚建[1]，杨晓龙[1]，吴启松[1]
（1. 浙江省测绘科学技术研究院，浙江 杭州 311100；2. 浙江省国土勘测规划有限公司，浙江 杭州 310012）

摘　要：相较于传统测绘手段的诸多局限，三维激光扫描技术在地下空间具有显著优势，但点云冗余问题同样加重了成果应用的负担。鉴于此，首先研究了地下空间数据的获取方法，并根据曲率对点云进行区域划分，分区域完成采样；然后以某地下室为例，通过多边形建模法完成了地下室的实景模型重建；最后评价了模型精度，验证了方法的可靠性，为地下空间的三维建模提供了案例参考。

关键词：点云；地下空间；数据处理；三维建模
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0053-03

Application of Regional Sampling in Underground Space 3D Modeling

LIU Yu[1,2], WANG Chao[1,2], HE Chuan[1], GE Yajian[1], YANG Xiaolong[1], WU Qisong[1]
(1. Zhejiang Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Hangzhou 311100, China;
2. Zhejiang Land Survey and Planning Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: Compared with the many limitations of traditional surveying and mapping methods, 3D laser scanning technology has more significant advantages in underground space, but the problem of point cloud redundancy also increases the application burden of results. Aiming at this problem, we studied the data acquisition method of underground space, divided the point cloud into regions according to the curvature, and completed the regional sampling at first. Then, taking a basement for example, we used the polygon modeling method to complete the dioramas reconstruction of basement. Finally, we evaluated the model accuracy, and verified the reliability of this method, which could provide a case reference for 3D modeling of underground space.

Key words: point cloud, underground space, data processing, 3D modeling

随着城镇化的快速推进，涌现出愈来愈多的“城市病”，为了保证城市的可持续性发展，城镇规划逐步向地下延伸。大规模建设地下公共设施时，仍存在成果底图不清、现势性较差和调查精度不统一等问题[1-2]，导致我国地下空间信息管理工作良莠不齐，阻碍了城市建设的存量优化。随着《关于加强城市地下市政基础设施建设的指导意见》的印发，浙江省多市均开展了地下市政设施的普查工作，地下建筑物的空间测绘作为基础工作显得尤为重要。传统地下空间测绘方法是利用全站仪等仪器获取特征点信息，耗时耗力，且测量成果形式单一，难以充分表现地下场景的三维信息；而三维激光扫描技术（TLS）具有高精度、高采样率、成果表达直观等特点，逐渐被广泛应用于地下场景测绘[3-4]。由于地下场景复杂程度和仪器设置分辨率不同，利用TLS技术获取的点数可达百万甚至百亿，庞大的点云量造成了严重的数据冗余。为减少数据量，实际生产中通常会利用随机采样或空间采样方法对数据整体进行抽稀，但会丢失点云的细节特征，影响后期建模的精度。基于此，本文详述了站式激光扫描仪获取地下空间数据的工作流程；并基于点云的曲率特征，研究了分区域采样方法；最后通过实例验证了方法的可行性，成功构建了满足规范精度的地下空间实景模型。

1　地下空间数据获取方法

本文主要研究TLS技术在地下空间数据采集、分区域采样和三维模型重建等方面的应用，并在此基础上总结了地下空间数据获取方法。

1.1　数据采集

为减少不必要的错测和漏测，首先需要实地踏

收稿日期：2022-08-06。
项目来源：浙江省自然资源厅科技资助项目（2022-57）。
第一作者简介：刘宇（1997—），硕士，主要从事三维激光扫描等工作，E-mail：lgoody123@163.com。
通信作者：汪超（1989—），硕士，工程师，主要从事LiDAR技术应用等工作，E-mail：805555139@qq.com。

勘，仔细全面地观察现场环境，搜索并记录附近已知控制点的位置和使用情况，若无已知点，可在出入口附近埋设控制点；然后在地面控制点的基础上完成地下导线网测量，并在导线点上布设平面标靶纸以便转换点云坐标；待控制测量结束后启动扫描作业，扫描时应尽可能优化测站数量，在确保数据完整性的同时用最少的测站数覆盖最大的面积；最后还需采集影像数据，包括地面、墙体和其他附属设施等，拍摄时角度应保持正射，相片以清晰完整为佳。

1.2 点云数据预处理

1.2.1 点云配准

配准是点云数据处理的第一步，其精度直接影响后续的建模精度[5]。从数学角度来看，点云配准近似于映射问题，即计算旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移矩阵 $\boldsymbol{T}$，将点集 Q 与点集 P 中的公共区域点重合，使得式（1）取得最小值[6]。

$$f=\sum_{i=1}^{N}\left(\boldsymbol{R}\times P_i+\boldsymbol{T}-Q_i\right) \tag{1}$$

式中，Q_i 为点集 Q 中距离 P_i 最近的点。

1.2.2 点云去噪

点云数据获取时，受多种因素影响不可避免地掺杂部分噪声点，不仅会增加数据量，还会影响对点云局部特征的判断，因此有必要去除噪声点。常见的散乱点云去噪算法包括拉普拉斯算法、均值漂移算法和双边滤波算法等，还可利用点云处理软件，采用人机可视化交互的方式手动删除明显远离主体的噪声点。

1.2.3 点云采样

随机采样法是一种相对简单且快速的方法，通过创建一个包含完整点集的随机函数计算随机数，剔除与随机数对应的数据点，直至剩余点数量符合预先设置的点数，从而压缩数据量，但可控程度低，易错误剔除特征点。曲率作为点云内在的几何属性信息，能较好地反映点云的特征分布，因此本文根据曲率划分区域，进而采用分区域采样的方法精简数据[7]。

首先构建点云的八叉树结构，加快邻近点的搜索速度，然后搜索k邻域，并对任意一点 p_i 和其k邻域内的点构建协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$：

$$\boldsymbol{C}=\frac{\sum_{i=1}^{k}\left(p_i-\bar{p}\right)\left(p_i-\bar{p}\right)^{\mathrm{T}}}{k} \tag{2}$$

式中，$\bar{p}$ 为邻域内点集的三维质心。

矩阵 $\boldsymbol{C}$ 对称正定，因此可将 $\boldsymbol{C}$ 特征值分解为：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}e_1 & e_2 & e_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_1\\ e_2\\ e_3\end{bmatrix} \tag{3}$$

λ_1、λ_2、λ_3 为 $\boldsymbol{C}$ 的3个特征值，表示曲面在各特征向量方向上的变化情况，λ_3 为法向的变化，λ_1、λ_2 为切平面的变化，因此可定义 φ 为点在其邻域内的曲面变分，而该点曲率 cu_i 可通过曲面变分近似得到，即 $cu_i\approx\varphi$。

$$\varphi=\frac{\lambda_3}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3} \tag{4}$$

以平均曲率为临界值划分区域，即曲率变化小的点划分到平缓区域，曲率变化大的点划分到陡峭区域，若陡峭区域的曲率变化较大，还可继续划分等级，并针对不同等级设置不同的采样率。对两块区域的点云分别设置不同的阈值划分网格，计算各网格的重心，将网格中距离重心最近的点作为采样点，以此实现点云数据的简化。

2 实验与结果分析

2.1 实验区概况

本文以绍兴市某小学的地下室（图1）为例进行研究，地下共一层，内部划有车位线，兼具停车功能，面积约为10 600 m²；室内灯光情况良好，便于影像数据采集；建筑结构规则整齐，墙、梁、板、柱等基础结构特征较明显；但车库内停留车辆较多、管线错综复杂、货物堆积严重，若采用传统测量手段费时费力，因此本文采用TLS技术完成数据采集。

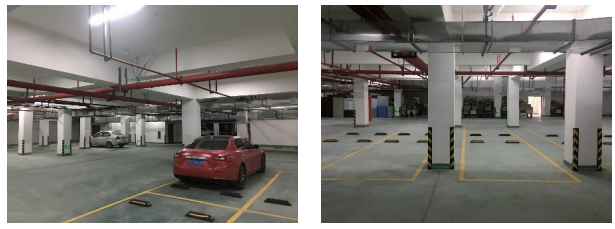


图1 地下室现场图

2.2 地下空间点云获取

根据实地踏勘和现有资料分析，在地下室出入口空旷处布设控制点；再对地下室进行导线测量，获取标靶点坐标；最后采集地下室点云。扫描设备选用Leica RTC360站式激光扫描仪，体积小、重量轻，点位精度可达毫米级，分辨率分为低、中、高3档[8]。扫描时无需整平，单站拍照加扫描不超过3 min，大大提高了作业效率，且可通过内置相机和IMU实时计算站点相对位置，在数据采集过程中完成初步配准。具体扫描站点见图2。扫描结束后，将站点数据导入Cyclone软件，逐站检查数据是否错层，对于拼接错误的

站点，采用目视或人工选取特征点的方式完成点云配准，检查无误后优化整体点云，点云配准精度为1 mm，重叠度为60%，满足后续建模要求；然后利用标靶点将点云坐标转换至CGCS2000坐标系，并通过裁剪盒工具手动去除汽车、货物和偏离主体的噪声点；最后得到完整的地下室点云数据（图3）。



图2　扫描站点图

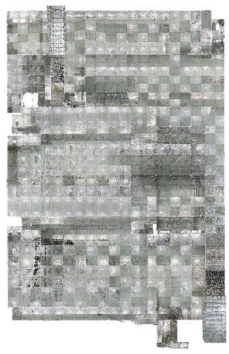
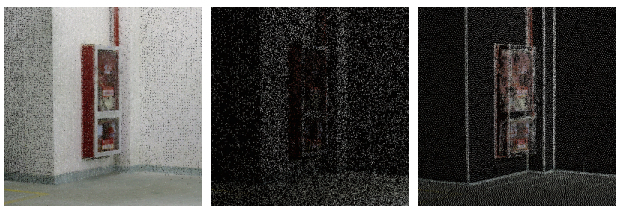


图3　地下室点云

由于点云数据量较大，本文将地下室点云切割为4块，分别对每块点云进行分区域采样，平坦区域的采样阈值为3 cm，陡峭区域的采样阈值为1 cm。为了更好地验证分区域采样的效果，选取一块点云以相同点数进行随机采样，并对二者结果进行比较，点云采样后效果见图4，可以看出，分区域采样能更加均匀地减少点云数量，还能保留更多的细节特征，便于后续基于点云的三维建模。



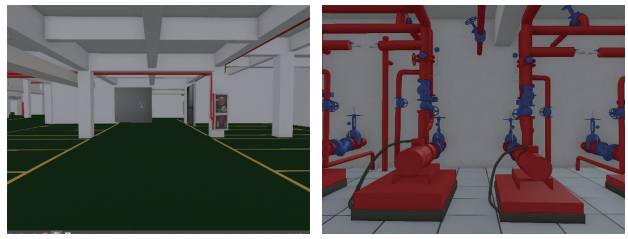
a 原始点云　　b 随机采样　　c 曲率采样

图4　点云采样效果图

2.3　地下空间三维重建

将精简后的点云数据转换成rcp格式导入3ds Max软件，进而利用多边形建模方法完成地下室三维模型的构建[9]。建模时将待建模的各实体单元看作形状类似的标准几何体组合，如柱子和长方体、水泵和圆柱体等，再将标准几何体转换为可编辑多边形，多边形含有点、线、边界、面和元素5种子对象，通过编辑多边形的子对象可改变物体形状，并使其贴合点云，若需构建更细致的造型，还可采用连接、切线等命令新增点和线。除此之外，3ds Max软件还内置了移动、旋转、缩放、阵列等参数化修改命令，因此对于重复的物件，可先镜像或复制多边形，再运用参数化修改命令细节调整对象，总之合理地使用软件内置命令可大大提高建模效率和模型的精细度。

模型构建完成后仍是未贴图的白模，从视觉上难以感受实景三维效果，为增加美观性和真实性，还需将实物照片映射至模型。首先在Photoshop软件中对外业采集的纹理照片进行裁剪，校正因透视造成的影像扭曲；然后修改照片的图像大小，令宽度和高度像素值均为2的n次幂[10]，导出照片利用3ds Max材质编辑器对模型进行纹理映射。地下室三维实景模型见图5。



a 停车场　　b 泵房

图5　地下室三维模型

2.4　精度验证

为检验模型重建的可靠性，本文通过计算特征点精度的方式评价模型的整体精度。利用全站仪在地下室内部均匀测取15个特征点，包含柱子、墙、梁的拐角点以及卷帘门和消火栓箱的角点，并与模型中同名点坐标进行比较，具体结果见表1，计算得到模型的平面中误差为2.8 cm，高程中误差为1.9 cm，符合《城市三维建模技术规范》的要求。

表1　点位偏差表

点号	ΔX /cm	ΔY /cm	ΔZ /cm
1	−0.1	−0.3	0
2	−2.1	−1.2	−0.7
3	−1.7	−3.5	−3.1
4	−1.4	−2.8	−0.3
5	0.2	−2.8	2.1
6	0.2	−0.7	0.9
7	0.3	−1	−5.2
8	4.4	−1.3	−0.4
9	−0.1	−0.1	1.6
10	−0.8	0.4	2.7
11	3.9	−2.8	−1.2
12	−0.6	−2.2	1.5
13	−0.7	−0.3	−0.2
14	−0.6	−0.8	−0.6
15	−3.5	−3.9	0

3　结　语

TLS技术可快速高效获取大量点云坐标数据，本文详细阐述了基于TLS技术的地下空间测量流程，研

（下转第59页）