

# 基于三维激光点云特征线提取的溶洞多分辨率 三维重建方法研究

柏宏强<sup>1,2</sup>, 夏永华<sup>1,2\*</sup>, 杨明龙<sup>1,2\*\*</sup>, 李照永<sup>3</sup>, 黄德<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

<sup>2</sup>云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093;

<sup>3</sup>昆明市城市地下空间规划管理办公室, 云南 昆明 650011

**摘要** 溶洞表面具有复杂、不规则性, 现有的诸多的建模方法都是按照统一分辨率来进行三维重建, 但是在三维重建过程中效率很低, 且模型文件过大, 对后续专业应用造成了很大困难, 因此提出了一种基于三维激光点云特征线提取的技术, 并针对溶洞进行了多分辨率三维重建。首先, 采用改进邻近点几何特征提取溶洞特征值, 增加法向量角作为检测特征点的参数; 其次, 用社会粒子群 (SPSO) 算法与模糊 C-均值 (FCM) 聚类算法实现点云分类; 再次, 采用折线生长方法将特征点连接成特征线, 并将其投影到三维点云上; 最后, 利用分类后的点云按照不同分辨率建模, 实现高精度、高质量、高效率溶洞三维重建。实验结果表明, 该方法可以按照不同分辨率进行建模, 减少了三维重建后模型的数据量, 提高了三维重建效率, 在溶洞三维重建方面具有较高的实用价值。

**关键词** 遥感; 岩溶洞穴; 精度分类; 点云分类; 特征线提取; 模型构建

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.202802

## Multi-Resolution 3D Reconstruction of Karst Caves Based on the Feature Line Extraction of 3D Laser Point Cloud

Bai Hongqiang<sup>1,2</sup>, Xia Yonghua<sup>1,2\*</sup>, Yang Minglong<sup>1,2\*\*</sup>, Li Zhaoyong<sup>3</sup>, Huang De<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;

<sup>2</sup> Surveying & Mapping Technology and Application Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher Education, Kunming, Yunnan 650093, China;

<sup>3</sup> Kunming Urban Underground Space Planning and Management Office, Kunming, Yunnan 650011, China

**Abstract** The surfaces of caves are complex and irregular. Many existing modeling methods are based on an overall-resolution 3D reconstruction. Although the overall model resolution is guaranteed, the efficiency of 3D reconstruction is substantially low, and the model file is too large, which makes it considerably difficult for the follow-up professional application. Therefore, a multi-resolution 3D reconstruction technology based on 3D laser point cloud feature line extraction was proposed for the karst cave. First, the enhanced geometric features of neighboring points were used to extract the eigenvalues and increased the normal vector angle as a basis for detecting the feature points. Second, the standard particle swarm optimization (SPSO) and fuzzy C-means clustering algorithms were used to realize the point cloud classification. Third, the broken line growth method was used to connect the feature points into the feature lines and project them onto 3D point cloud; finally, the classified point cloud was used for modeling as per different resolutions. The 3D reconstruction of the karst cave was realized with high precision, high quality, and high efficiency. The experimental results show that this method can improve the efficiency of the 3D reconstruction of karst caves, realize modeling according to different resolutions, reduce the

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(41861054)、宜良九乡风景区三角洞洞内三维建模测绘(KKF0201856026)、三维激光扫描和室内定位技术在地下空间信息化中的应用研究(KKF0201956004)

\* E-mail: 617073761@qq.com; \*\* E-mail: yangml3000@qq.com

amount of data after the 3D reconstruction, improve the efficiency of 3D reconstruction, and has high practical value.

**Key words** remote sensing; karst cave; precision classification; point cloud classification; feature line extraction; model construction

**OCIS codes** 280.4750; 120.0280; 010.0280

## 1 引言

三维数字采集技术已经逐渐成熟,激光扫描地面建筑物案例已随处可见。前期项目组,完成了宜良九乡三角洞三维建模测绘与广南县桃源洞、汤那洞三维立体测绘的试验项目,对溶洞点云数据的常规采集方法、预处理、三维建模打下了较好的基础。研究发现统一分辨率建模时钟乳石会出现部分点没有参与构建三角网的情况。然而,钟乳石及溶洞大厅往往是设计灯光效果的重点区域,需要高分辨率的三维表面,而地面相对平缓,通常不需要很高分辨率的三维网格也能将地面特征表达清楚。在项目实施中发现,按照统一分辨率精细建模虽然可以保证整体的高分辨率,但是建模效率低,钟乳石等形状奇异的部位难以准确表达,因此提出对溶洞进行特征线提取、点云分类后再进行多分辨率三维重建。针对复杂表面三维重建技术,目前诸多研究者对特征线提取这类问题已有相关研究。

Zhang 等<sup>[1]</sup>基于泊松分布的方法按照不同的局部特征值计算不同的阈值来进行区域信息分析,识别边界、边缘点、角点,获取连接信息的特征线。若模型上的特征不一致或表面不完全光滑,不同局部特征的阈值则必须不同,这种情况不能采用全局固定阈值的方法。如果提取对象纹理很清晰,需要提取的精度很高,例如古董或者雕像这一类的,Altantsetseg 等<sup>[2]</sup>提出了从无组织噪声点云中提取特征线傅里叶级数截断的方法,计算了该点的曲率,通过点云生长提取潜在的特征点,对提取的特征点进行平滑处理后构造特征线,最后再投影到原来点云上,该方法的优点在于提取的精度很高,适用于古建筑特征线提取,然而溶洞提取精度可以略微降低,因此,特征线定义也有一定的差异。Fu 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于点空间几何结构的特征线提取方法。首先,设计一种空间网格动态划分方法来定位模型的特征区域。根据点的几何信息,提出了一种基于线性截距比的特征点检测算子,然后利用拉普拉斯算子对特征点进行细化,接着,用改进的折线生长方法将细化后的特征点连接到特征曲线中,最后采用基于表面变化(MSSV)或法向量角(SM-PD)的特征点

检测方法进行检测。该方法的优点在于具有良好的抗噪性能,但针对模糊大场景点云特征线,提取工作量太大。Zhou 等<sup>[4]</sup>提出了一种直接从地形点云中提取三维矢量地形图特征线的自动地形图特征线检测方法。首先,引入符号曲面变异(SSV)提取潜在特征点。其次,结合区域增长分割和条件欧氏聚类,将潜在特征点分割为不同的聚类。为了提取特征点,利用带 SSV 加权的 HC-Laplacian 平滑方法对每个聚类中的潜在特征点进行迭代细化。此外,还增加了基于 SSV 和基于高度的简单规则来加速细化过程。最后,通过构造提取特征点的最小生成树得到特征线。该方法在地形图中很实用,但是在下溶洞中提取识别精度达不到应用要求。贺彤等<sup>[5-6]</sup>采用基于协方差矩阵与投影映射的提取算法实现了对点云特征的提取,结果表明这两方法具有较强的抗噪性能,然而,该方法只适用于小场景,适用于精细构建,并不适用溶洞大场景,处理大量的点云数据能力较弱。董伟<sup>[7-8]</sup>采用邻近点几何特征实现了点云建筑物的特征提取,该方法主要是在基准面上探测,根据邻近点的法向量夹角的特性来判断特征点,利用最小二乘原理和加权主元分析法进行改进,这种方法虽然可以提取效率高,数据冗余少,但是受噪点干扰大,用于溶洞特征线提取时效果不佳。

本文在分析以上算法的基础上,针对岩溶洞穴工程需求,提出一种改进的特征线提取与分类方法,首先采用改进邻近点几何特征提取特征值,其次增加法向量角作为检测特征点的一项检测参数,采用社会粒子群(SPSO)算法与模糊 C-均值(FCM)聚类算法实现点云分类,再用折线生长方法将细化后的特征点连接成特征线,并将其投影到三维点云上,最后按照不同分辨率进行三维重建,实现了不同分辨率三维重建。

## 2 溶洞特征线提取

溶洞特征线与建筑物特征线相比轮廓不明显,与古董相比,其精度要求可以低一些。在大场景中,因其具有庞大的数据量,特征线提取尤为重要。基于前人研究的各种方法,总结出了适合溶洞特征线提取的方法,提取过程分为三部分:一是聚类出提取

要素的特征点,目的是将具有相似点特征的点云分成多个独立的点带状,并使其各自集合成一类,以避免孤立点影响提取的正确性;二是实现点云分类,目的是将点云依照分辨率分开,便于按需求进行建模,减少数据的冗余,提高建模效率;最后是针对特征点进行分析连线,将提取到的特征点通过折线生长方法拟合成曲线。

### 2.1 溶洞特征线定义及精度分类

目前三维激光扫描主要应用于古董文物、工业测绘、基础测绘、精细零部件、雕塑艺术品、影视特效、三维实景建模、正逆向设计、三维展示与 Web3D

领域。本文最终成果将用于三维设计,作为设计基础底图。在室外场景中通常以地图比例尺来描述地物的详细程度,供设计者在底图上设计便于后期准确施工,然而地下设计如今没有相关规定应该满足什么要求,结合设计需求,本研究根据地面与立面交角和顶部交角来划分,交会位置用线段连接起来,该线段称为溶洞特征线。参考大比例尺地形图的绘图标准,按照不同需求建立不同精度的三维模型,文中所提及的多分辨率就是指将精度等级划分为 A、B、C、D 级,其中 A 级精度最高,D 级精度最低,具体分类的详细说明如表 1 所示,分类如图 1 所示。

表 1 溶洞精度分类详细说明表

Table 1 Detailed description of cave accuracy classification

Accuracy grade	Detailed description	Abbreviation	Grid sampling interval /m
D	Inner bottom of cave	Ground in cave	1.00
C	No special part in the cave facade	Inner wall of karst cave	0.50
B	No special part on the top of the tunnel	Top of karst cave	0.50
A	Suspended or raised singular part on the top of the tunnel	Stalactite and exotic lava	0.25

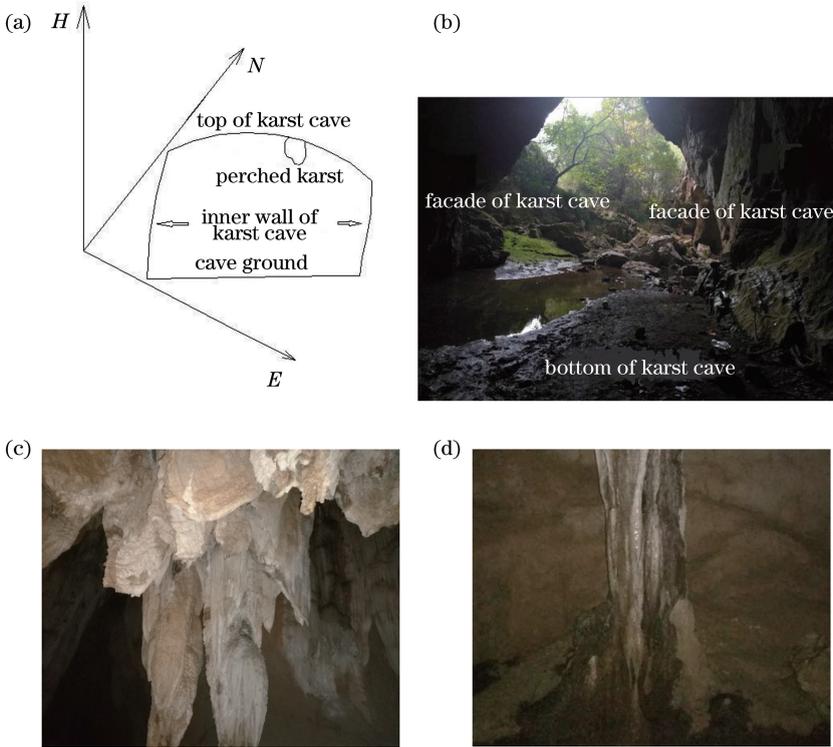


图 1 溶洞精度分类示意图。(a)溶洞精度划分示意图;(b)立面与地溶洞地面现场照片;  
(c)顶部悬挂钟乳石现场照片;(d)地面凸起钟乳石现场照片

Fig. 1 Schematic diagram of cave accuracy classification. (a) Schematic diagram of karst cave precision division; (b) site photos of facade and ground karst cave; (c) top hanging stalactite site photo; (d) site photo of stalactite raised on the ground

## 2.2 基于点云区域聚类

点云聚类是将具有较高相似度的特征数据进行统计分类分析的过程,其采用优化后的社会粒子群(PSO)算法与模糊C-均值(FCM)算法来实现<sup>[9]</sup>。

SPSO-FCM 聚类实现过程如下:1)首先针对点云数据进行初始化,并设置不同的跟踪阈值,让所有点云带有一定的属性值;2)设置点云中的每个最优位置和初始化最优位置;3)采用C-均值聚类算法进行求解,更新已有数据的属性,并判断点云的位置优越性,得到准确的聚类中心,实现了对数据区域的划分。因为SPSO算法具有很强的搜索能力,故可避免聚类时导致的局部收敛性问题,具有较强的抗噪性,利于边界点的提取<sup>[10]</sup>。

模糊C-均值聚类实现过程如下:通过最小目标函数对散乱数据进行分类,因此每个数据集属于 $[0,1]$ ,已知 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k, \dots, \mathbf{x}_n\} \subset \mathbf{R}^3$ 是一个三维的样本数据,样本 $\mathbf{x}_k$ 特征向量 $\mathbf{x}_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3})^T \in \mathbf{R}^3$ ,聚类得到的中心为 $\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \dots, \mathbf{p}_c\}$ ,其中 $n$ 为样本数据个数, $c$ 为聚类中心个数。最优的聚类效果是最大限度地减少目标函数,基于隶属度函数的聚类损失函数一般可表示为

$$J_m(\mathbf{U}, \mathbf{P}) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m (d_{ik})^2, m \in [1, \infty), \quad (1)$$

式中: $\mu_{ik}$ 为样本 $i$ 属于 $k$ 类的隶属度; $\mu_{ik} = \mu_{\mathbf{x}_i}(\mathbf{x}_k)$ ,为样本 $\mathbf{x}_k$ 与 $\mathbf{x}_i (1 \leq i \leq c)$ 的隶属关系, $\mu$ 为隶属系数; $\mathbf{U} = [\mu_{ik}]_{c \times n}$ ;对 $\forall i, k$ 有 $\mu_{ik} \in [0, 1]$ ,

对 $\forall k$ 有 $\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1$ ,对 $\forall i$ 有 $0 < \sum_{i=1}^n \mu_{ik} < n$ ;  $m$ 为加权指数,目的是调节模糊程度; $d_{ik}$ 为欧氏距离的平方,其表达式为

$$(d_{ik})^2 = \|\mathbf{x}_k - \mathbf{p}_i\|^2, \quad (2)$$

目的是使得 $J_m(\mathbf{U}, \mathbf{P})$ 取到极小值。因为 $\mathbf{U}$ 矩阵都是独立的,所以有

$$\min\{J_m(\mathbf{U}, \mathbf{P})\} = \min \left[ \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m (d_{ik})^2 \right] = \sum_{k=1}^n \left[ \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m (d_{ik})^2 \right], \quad (3)$$

从(3)式中可以看到目标函数的极小值的限制

条件为 $\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1$ 。隶属度的计算公式为

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}}\right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (4)$$

聚类中心的计算公式为

$$\mathbf{p}_i = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m}. \quad (5)$$

求解隶属度和聚类中心,直至满足收敛条件时为最优解。

## 2.3 特征值搜索

### 2.3.1 表面法向量估算

邻域搜索结束后,每个点的邻域点集用于计算各自的局部特征,而法向则是描述平面几何特征的关键。法向估计算法很多,如最小二乘拟合(LS)、移动最小二乘拟合(MLS)等。本研究采用邻近点集构建协方差矩阵来分析求解单点表面法向<sup>[11]</sup>,首先查询点邻域点集中心点 $\mathbf{p}_x$ ,其表示式为

$$\mathbf{p}_x = \bar{\mathbf{p}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i, \quad (6)$$

其中 $n$ 代表邻域点个数。

法向可通过协方差矩阵 $\mathbf{C}$ 求出,查询点与邻域点构成的协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})(\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T, \mathbf{C}\mathbf{V}_j = \lambda_j \mathbf{V}_j, j \in \{0, 1, 2\}, \quad (7)$$

式中: $\kappa_i$ 为邻域点的权重值,权重以邻域点与重心点的距离作为标准来设定,因此距离越远权重越小,此方法可以避免噪声点的影响,对应的特征向量属于实数范畴; $\mathbf{V}_j$ 为特征向量。

### 2.3.2 曲率估计

曲率估计是点云重要的几何特征描述,也是几何表面变化程度的度量值,能够很好地反映点云表面特征的变化情况。如今曲率估计的方法有很多,高斯曲率估算和平均曲率估算是两种经典的方法,都需要对查询点邻域点集进行局部曲面拟合,因此计算复杂,需要消耗大量时间。由于前期采用协方差矩阵求解法向,因此可以从 $\mathbf{p}$ 点沿着表面法线法向曲率值进行计算,其中 $0 \leq \lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ , $\sigma_p$ 为查询点的邻域点构成的局部表面弯曲变化度,值越小,表面弯曲程度越小,反之,值越大,表面弯曲程度越大。其表达式为

$$\sigma_p = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2}. \quad (8)$$

综上所述方法实现步骤如下:

步骤一:首先采用SPSO-FCM聚类出边缘点并用绿色标识出边界点,将分类后点云分别输出

为.pcd格式的数据;

步骤二:设置邻域搜索半径,按照法向估算法更新特征值 $\mathbf{V}_j$ ,更新后的特征值统一用绿色标识;

步骤三:增设 $\sigma_p$ 弯曲变化度条件更新已有特征值,更新完成后将特征值以.pcd格式输出。

## 2.4 特征点的连接

通过以上方法提取的特征值实际是杂乱无序的,不包含任何拓扑信息,因此还需要作连线和平滑处理,形成光滑的、连续的特征线,通常利用折线生长算法<sup>[12]</sup>实现。文献[13]采用改进的折线生长方法,定义了新的特征折线生长方向,使用Bezier曲线拟合各生长点,从而得到光滑的生长曲线。本文结合两者优势,实现特征线的拟合连接。首先细化特征点集,采用拉普拉斯变换算法迭代细化特征点集<sup>[3]</sup>,特征线越靠近特征点越合理,若偏离较远则采用加权平均值来代替,表达式为

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{p}_i + \Delta \mathbf{p}_i, \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{p}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n H(\mathbf{p}_j)^2} \sum_{j=1}^n H(\mathbf{p}_j)^2 (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i), \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|}{n}, \quad (11)$$

其中 $H(\mathbf{p}_n)$ 代表平均曲率和相邻点之间的距离。

生长折线是由每个点用不同的权重实现,而不

是由一个生长点决定,故能确保折线的生长方向接近于特征值,折线延伸的方向可表示为

$$\mathbf{v}_G = \sum_{i=1}^n g(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}\|) \frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{v}_i\|}, \quad (12)$$

式中 $g(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}\|)$ 是高斯函数,用于调整各特征向量之间权重 $\mathbf{v}_i$ ,如果 $\mathbf{p}_i$ 与 $\mathbf{p}$ 之间的距离越小则权重越大,表示这条生长线精度越高。结合两种方法可以提高特征线拟合精度。

## 3 实验结果与分析

实验数据来自云南某溶洞地面三维激光扫描项目,该溶洞钟乳石资源丰富,是滇东南地区典型的地下溶洞地貌之一<sup>[14]</sup>,实验数据具有很强的代表性。数据测试在VS2015和PCL开发平台上实现点云分类、特征线提取及三角网格构建,在Intel(R)Core(TM)i7-7700 CPU @ 3.60 GHz处理器,运行内存为16.0 GB的windows 7操作系统上运行。

### 3.1 点云数据预处理

扫描点云数据首先通过精细配准,完成所有数据的拼接,使所有拼接误差在测站间均匀分布,以提高点云数据的绝对精度<sup>[15]</sup>,最后进行简单的去噪处理,以保障实验数据质量的可靠性。最后从中选取较为典型的部分进行实验。由于数据涉密,首先将选取数据进行坐标转换,格式转换为.pcd文件,选取的原始数据如图2所示。

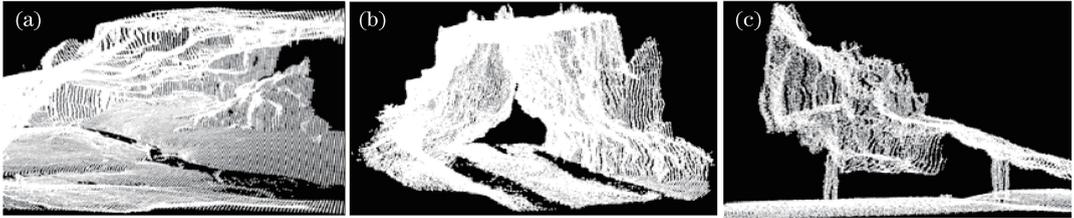


图2 选取的模型。(a)溶洞入口原始点云(模型1);(b)纹理较为丰富区点云(模型2);(c)钟乳石丰富区点云(模型3)  
Fig. 2 Selected model. (a) Original point cloud at the entrance of the cave (model 1); (b) point cloud in the area with rich texture (model 2); (c) point cloud in the area with rich stalactite (model 3)

模型1是大场景的代表,选取该模型是为了测试本文算法对于大场景地下溶洞特征线提取是否准确,测试结果表明点云质量相对较好,扫描完整;模型2中溶洞内部纹理相对复杂,有少量噪点,点云质量相对较差,选取该模型是为了测试本文算法的抗噪能力,及测试本文算法针对纹理复杂区域能否达到预期效果;模型3中溶洞内部纹理最为复杂,上下空间距离变化度较大,伴随有一定量的钟乳石,选取该模型是为了测试本文算法的稳定性,以及特征线提取的准确性。钟乳石在溶洞的三维构建场景中是

最为关键的一部分。

### 3.2 特征线提取结果分析

图3给出模型1特征线的提取过程,对具有极其不规则形状的岩溶洞,按照算法设定规则,提取特征线,点云聚类分析后将不同类别的点云数据赋予不同颜色,便于区分,图3(a)中绿色标识的点代表已被识别的特征点,图3(b)给出聚类分类后的结果,将点云分类为两类,并随机赋予不同的颜色,图3(c)中通过折线生长法将图3(a)中的特征值拟合成绿色曲线标识。



图3 模型1特征线提取。(a)边界特征值提取结果;(b)点云分类结果;(c)特征线绘制结果  
Fig. 3 Feature line extraction for model 1. (a) Boundary feature value extraction results;  
(b) point cloud classification results; (c) feature line drawing results

图4给出模型2特征线的提取过程,模型2中点云数据质量相对较差。从图4(a)中可以看出绿色特征点分布较为散乱,部分区域的特征值表达不清晰,受少量噪点的影响;图4(b)为点云聚类分类结果,根据2.1小节中的精度分类,将点云分类为溶

洞地面、溶洞侧壁(包含两侧)、溶洞顶部,从图中可以明显看出4类,考虑到实际运用,分类数量很少的点合并到相邻点集;图4(c)为特征线提取结果,图中可以看到部分区域间有一定的差值,在进行算法拟合时可取算术平均值代替。

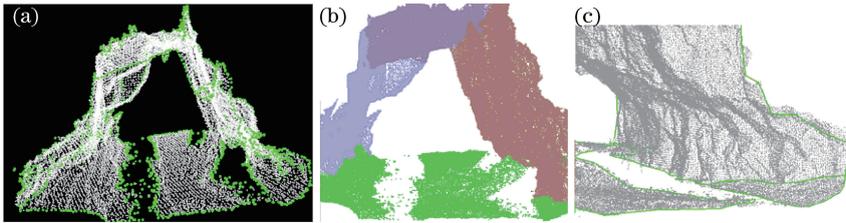


图4 模型2特征线提取。(a)边界特征值提取结果;(b)点云分类结果;(c)特征线绘制结果

Fig. 4 Feature line extraction for model 1. (a) Boundary feature value extraction results; (b) point cloud classification results; (c) feature line drawing results

图5给出典型钟乳石区域特征线的提取过程。特征点提取、点云聚类目的是为了保留关键点,其余部位可以适当降低精度。图5(a)为特征值提取结果,从图中可以明显看到特征点未受空间变化度的

影响,由此说明该算法较为稳定,钟乳石位置已被标定出来;图5(b)为点云分类结果,从图中可以看出钟乳石部分已经分开,分别用不同颜色标出;图5(c)为边界特征点自动曲线连接结果。

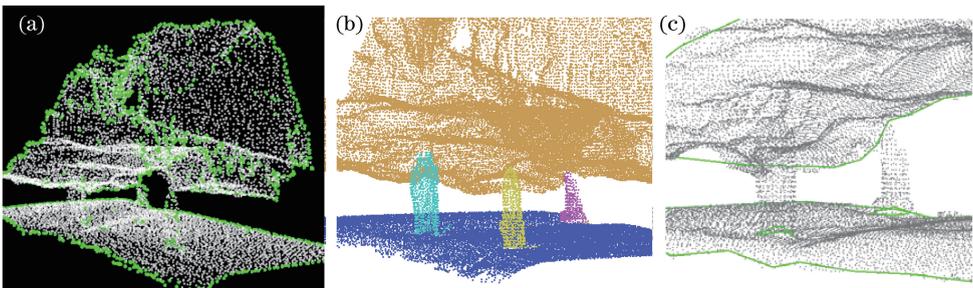


图5 模型3特征线提取。(a)边界特征值提取结果;(b)点云分类结果;(c)特征线绘制结果

Fig. 5 feature line extraction for model 3. (a) Boundary feature value extraction results; (b) point cloud classification results; (c) feature line drawing results

## 4 复杂表面三维重建

本文提出的点云分类、特征线提取,目的是为了降低实际生产中的工作量,提高溶洞的三维建模效率,让溶洞在三维建模时可以按需控制建模的分辨

率,简化次要位置模型的分辨率,避免后续专业应用时数据量过大造成的困扰,建模方法参照文献<sup>[14]</sup>。

### 4.1 三维重建效果对比分析

本文方法与普通建模方法从视觉效果上进行对比分析,图6(a)给出分类后的三维重建效果,

图 6(b)给出普通三维重建效果,即统一按照 D 级重建。对比两图可以看出,图 6(a)黄色部分纹理表达

更详细,按照精度分类,红色部分属于 D 级,黄色部分属于 C 级。

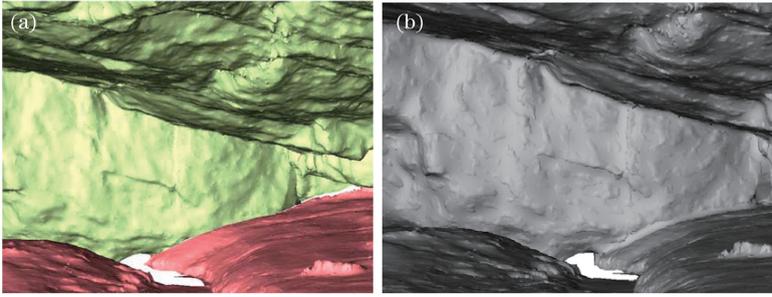


图 6 模型 1 点云分类后模型。(a)点云分类后三角化结果;(b)点云未分类三角化结果

Fig. 6 Model 1 after point cloud classification. (a) Triangulation result after point cloud classification; (b) triangulation result without point cloud classification

图 6 体现的是大场景建模效果,肉眼看似没有太大变化,但图 7 相对来讲比较复杂,从图 7(a)可

以明显看出,棕色部分的纹理表达比图 7(b)表达得更为详细,改进后的效果明显优于普通建模的方式。

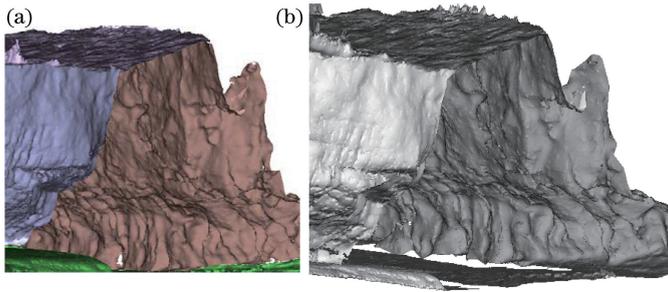


图 7 模型 2 点云分类后模型。(a)点云分类后三角化结果;(b)点云未分类三角化结果分析

Fig. 7 Model 2 after point cloud classification. (a) Triangulation result after point cloud classification; (b) triangulation result without point cloud classification

对比图 8 可以更清晰地看出,通过点云分类特征线提取后的效果更优,图 8(a)中显示通过点云分类后的建模成果,能够完整地表达出溶洞的基本形

态,然而从图 8(b)可以明显看出,钟乳石结构的表达基本不完整。因此越是钟乳石丰富的地方,本文方法的优势越凸显。

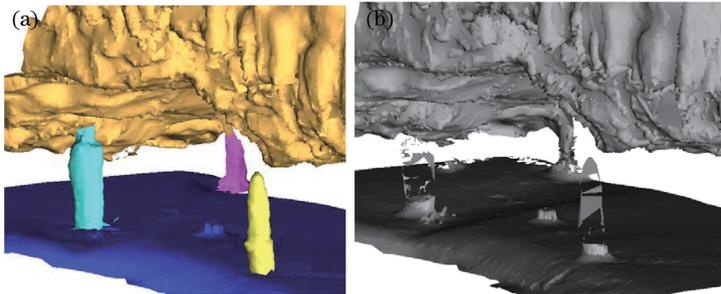


图 8 模型 3 点云分类后模型。(a)点云分类后三角化结果;(b)点云未分类三角化结果

Fig. 8 Model 3 point after cloud classification. (a) Triangulation result after point cloud classification; (b) triangulation result without point cloud classification

#### 4.2 两种方法建模性能对比分析

按照 2.1 节中的精度分类原则,选取采用精度为 A 类和 D 类的同一分辨率三维重建方法与本文提出的多分辨率三维重建方法作对比,在同一台计算机上进行性能测试。表 2 给出两种方法建模时三

角网的重建个数与需要花费的时间。

通过表 2 可以看出:多分辨率三维重建后与同一分辨率 D 类三角化个数很接近,没有明显变少,但是从利用本文方法与 A 类同一分辨率三维重建后的结果可以明显看出,多分辨率三维重建的方法

表2 多分辨率三维重建性能对照表

Table 2 Comparison of multi-resolution and overall-resolution 3D reconstruction performance

Model	Number of triangular grids with different resolutions	Time consumed by different resolutions /s	Number of D-class resolution triangular grids	Time consumed by D-class resolution /s	Number of A-class resolution triangular grids	Time consumed by A-class resolution /s
1	1487382	577	1487875	693	2976587	1237
2	388255	151	387146	197	785426	526
3	108362	40	107522	52	223658	154

三角化数量明显减少,由此可以得出利用本文方法进行三维重建可以减少数据量,达到降低数据文件大小的目的;通过对比两种方法所需的三维重建的时间,可以看出按照多分辨率三维重建所需消耗的时间明显少于同一分辨率三维重建时间,说明点云通过分类、特征线提取后效率更高。故本文算法能够高效、低内存地实现溶洞三维建模。

## 5 结 论

采用一种基于三维激光点云特征线提取的技术,针对溶洞进行多分辨率三维重建。该方法采用改进的邻近点几何特征提取特征值,增加法向量角作为检测特征点的一项依据,根据设置的不同的表面弯曲度进行溶洞特征线的提取,提取效果较为理想;采用SPSO算法与模糊C-均值(FCM)进行点云分类,分类结果可以满足溶洞点云分类的需求;采用折线生长方法将特征点连接成特征线并将其投影到三维点云上,从结果中可以明显看到在点云质量较差的部位,提取点云的拟合效果有所差异,最终实验结果实现了点云分类,达到快速、精确的三维重建效果。通过统计分析,结果显示采取本文方法后的三维重建性能与质量明显优于普通建模方式,具有较高的实际应用价值。如何进一步优化溶洞建模效率和减少建模数据量在今后还需继续研究。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Y H, Geng G H, Wei X R, et al. A statistical approach for extraction of feature lines from point clouds[J]. *Computers & Graphics*, 2016, 56: 31-45.
- [2] Altantsetseg E, Muraki Y, Matsuyama K, et al. Feature line extraction from unorganized noisy point clouds using truncated Fourier series[J]. *The Visual Computer*, 2013, 29: 617-626.
- [3] Fu S Y, Wu L S. Feature line extraction from point clouds based on geometric structure of point space [J]. *3D Research*, 2019, 10(2): 16.
- [4] Zhou W, Peng R C, Dong J, et al. Automated extraction of 3D vector topographic feature line from terrain point cloud[J]. *Geocarto International*, 2018, 33(10): 1036-1047.
- [5] He T, Xiong F G, Han X, et al. A feature curve extraction algorithm for point cloud based on covariance matrix[J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(3): 275-280, 286.  
贺彤, 熊风光, 韩燮, 等. 一种基于协方差矩阵的点云特征曲线提取算法[J]. *计算机工程*, 2018, 44(3): 275-280, 286.
- [6] He T, Xiong F G, Han X, et al. A novel method of point cloud feature curves extraction [J/OL]. *Computer Engineering*: 1-8 [2019-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1289.tp.20170719.1047.002.html>.  
贺彤, 熊风光, 韩燮, 等. 一种新颖的点云特征曲线提取方法[J/OL]. *计算机工程*: 1-8 [2019-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1289.tp.20170719.1047.002.html>.
- [7] Dong W. Feature extraction of the building point cloud by using geometrical characteristics of adjacent points[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071006.  
董伟. 利用邻近点几何特征实现建筑物点云特征提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071006.
- [8] Chen P, Tan Y W, Li L. Extraction of building's feature lines based on 3-D terrestrial laser scanning [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(3): 9-11.  
陈朋, 谭晔汶, 李亮. 地面三维激光扫描建筑物点云特征线提取[J]. *激光杂志*, 2016, 37(3): 9-11.
- [9] Wang X H, Wu L S, Chen H W, et al. Feature line extraction from a point cloud based on region clustering segmentation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1110001.  
王晓辉, 吴禄慎, 陈华伟, 等. 基于区域聚类分割的点云特征线提取[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1110001.
- [10] Wang X H, Wu L S, Chen H W, et al. Region segmentation of point cloud data based on improved particle swarm optimization fuzzy clustering [J].

- Optics and Precision Engineering, 2017, 25 (4): 1095-1105.
- 王晓辉, 吴禄慎, 陈华伟, 等. 应用改进的粒子群优化模糊聚类实现点云数据的区域分割[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 1095-1105.
- [11] Huang M, Ma C S, Yang F, et al. Theory and method of surface laser point cloud processing and fine construction[D]. Beijing: Science Press, 2016.
- 黄明, 马朝帅, 杨芳, 等. 地面激光点云处理与精细构建理论与方法[D]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [12] Daniels J, Ha L K, Ochotta T, et al. Robust smooth feature extraction from point clouds [C] // IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2007 (SMI'07), June 13-15, 2007, Lyon, France. New York: IEEE, 2007: 9855058.
- [13] Liu Q, Geng G H, Zhou M Q, et al. Algorithm for feature line extraction based on 3D point cloud models [J]. Application Research of Computers, 2013, 30 (3): 933-937.
- 刘倩, 耿国华, 周明全, 等. 基于三维点云模型的特征线提取算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(3): 933-937.
- [14] Bai H Q, Xia Y H, Yang M L, et al. 3D modeling and mapping technology and application in the development of large karst cave tourism[J]. Software Guide, 2019, 18(6): 138-142.
- 柏宏强, 夏永华, 杨明龙, 等. 大型溶洞旅游开发中三维建模测绘技术及应用[J]. 软件导刊, 2019, 18 (6): 138-142.
- [15] Huang D, Xia Y H, Bai H Q, et al. Urban tree feature extraction based on 3D laser scanning technology[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(3): 92-95, 99.
- 黄德, 夏永华, 柏宏强, 等. 基于三维激光扫描技术的城市树木特征提取[J]. 城市勘测, 2019(3): 92-95, 99.
- [16] Nie J H, Liu Y, Gao H, et al. Feature line detection from point cloud based on signed surface variation and region segmentation[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(12): 2332-2339.
- 聂建辉, 刘焯, 高浩, 等. 基于符号曲面变化度与特征分区的点云特征线提取算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(12): 2332-2339.
- [17] Yang B S, Wei Z, Li Q Q, et al. A classification-oriented method of feature image generation for vehicle-borne laser scanning point clouds [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39 (5): 540-545.
- 杨必胜, 魏征, 李清泉, 等. 面向车载激光扫描点云快速分类的点云特征图像生成方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 540-545.