

面向未来月面科考的熔岩管实景三维建模技术研究

阳乔^{1,2,3}, 康志忠^{1,2,3}, 胡腾^{1,2,3}, 叶晨鸣^{1,2,3}, 刘东鸣^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 月球与行星遥感探测研究中心, 北京 100083;
3. 教育部深空探测联合研究中心月球与行星探测国际合作研究分中心, 北京 100083)

摘要: 提出一种融合机载LiDAR, 贴近摄影测量, 以及GeoSLAM手持激光扫描仪点云数据来源的面向未来月面科考的熔岩管实景三维建模方法。首先进行实体划分, 随后依据语义信息进行实体特征提取, 并提出一种新的mesh模型构建方法, 通过多层次模型构建方法以及骨架加细节建模方法来对熔岩管内表面的模型进行mesh模型构建, 最后在模型内部不同层间分别构建实体, 以模拟不同层的原始状态, 并以此对层厚、剥落物体积两方面进行测量。通过对位于黑龙江省镜泊湖的熔岩管三维建模表明: 基于多源数据融合的熔岩管实景三维建模方法具有高精度、高真实度等特点, 为后续月球熔岩管天窗检测、地月模拟对比以及内部探测提供重要参考。

关键词: 三维重建; 机载LiDAR; 贴近摄影测量; 熔岩管; GeoSLAM扫描仪

中图分类号: P184.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0355-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230181

引用格式: 阳乔, 康志忠, 胡腾, 等. 面向未来月面科考的熔岩管实景三维建模技术研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 355-364.

Reference format: YANG Q, KANG Z Z, HU T, et al. Research on realistic 3d modeling technology of lava tube for future lunar scientific expedition[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 355-364.

引言

月球基地建设是未来月球探测的必然选择。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与欧洲航天局(European Space Agency, ESA)已经开展了较长时间的月球基地概念研究及初步规划, 其中月面熔岩管洞穴多次被列为未来月球基地的首选或优先考虑的区域^[1]。月面熔岩管对于月球基地建设具有多种潜在的优点: 相对恒温的内部环境、防宇宙射线照射、极少受到月尘和溅射物影响、能够防止陨石或微陨石撞击、可能赋存挥发分或水冰、具有巨大的可利用地下空间、物质组成可揭示月球岩浆活动性质、内部的特殊环境具有重要的天体生物学意义等探测意义^[2]。这些熔岩管的尺寸适合建立永久性的基地, 可以提供获得多种资源, 包括挥发性物质甚至可能含被困在洞穴沉积物中的水冰^[3]。

月面熔岩管洞穴因其独特的地理构造与潜在的庇护价值, 在多次月球基地选址探讨中被视为首选或优先考察的区域。然而, 鉴于当前技术限制与月球探测的复杂性, 难以直接获取月球熔岩管内部的详尽数据。

鉴于此, 地球熔岩管的研究显得尤为重要。通过对地球熔岩管的深入探究, 可以洞察其形成机制、地质特征以及稳定性等关键因素, 进而为月球、火星等外星球上熔岩管的研究提供方法论的借鉴与科学参考。

熔岩管具有较为复杂的空间结构, 这是因为熔岩管在形成时受到多种因素共同影响^[4], 包括熔岩流的性质以及地形等^[5]。目前对于熔岩管的研究集中于火山喷发特征^[6]、位置走向^[7]、分布特征与成因^[8]等方面, 而目前的数据产品主要是采用矢量或栅格数据模型, 对具有鲜明多维、动态特征的现实世界进行数字化抽象、描述与表达, 所形成的数字地理空间框架在本质上是2(或2.5)维的, 虽在各项工程建设与管理决策中发挥了重要作用, 但难以完全满足在真三维数字空间中观察、量测、分析、研判及模拟的实际需要^[9]。为了更好地展示熔岩管内部的空间结构, 实现数据交互, 2(或2.5)维的数据类型难以满足对熔岩管的探测与利用, 因此选择对熔岩管进行实景三维建模, 三维模型不仅能为未来月球基地的选址提供可行性验证以及实验依据, 也能辅助对于火山活动相关地质现象

收稿日期: 2023-11-28 修回日期: 2024-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0123300); 国家自然科学基金(42371453); 国防科工局民用航天技术预先研究项目(D020103)

的研究和展示。

熔岩管的稳定性取决于其宽度、顶部厚度,以及构成该结构的岩石是处于静岩石状态还是泊松应力状态^[10]。由于熔岩管顶部崩落,其多层结构裸露便可以通过点云数据进行分析测量。基于这些数据可以作为熔岩管稳定性的判定依据,同时对熔岩管的生成演化等研究提供数据支撑。

为了更好地对熔岩管形态结构等数据进行获取,便需要依赖新兴的测绘手段。随着国家的大力推广^[11],实景三维数据已经被应用到各个行业^[12]。在测绘地理信息科学领域^[13],卫星遥感、卫星导航定位、无人机航空摄影^[14]、移动测量等地理信息技术^[15]与多视角图像匹配^[16]、多数据融合等技术相结合^[17],使得真实场景的精细化三维表达成为可能,并以实景三维模型作为主要的数据载体^[18]。目前对于熔岩管的形成机理已经有了较为详实的研究,而仍存在如下不足:

1) 对于熔岩管的内部构造的研究主要还是集中在通过局部图片以及手绘图的方式来进行展示,对于后续的研究难以提供有力的材料支撑。

2) 由于熔岩管等地下管道结构难以通过无人机进行大范围的数据采集,且存在光照条件差,目视环境差等不利因素,目前的三维建模方法存在缺陷,难以通过单一的数据进行整体模型的构建。

3) 目前对熔岩管内部的各个部分的数据采集和分类主要以局部的目视提取为主,需要专业的地质工作者进行现场考察区分。

4) 目前在对熔岩管内部进行数据提取时针对的是理想状态下的模拟截面。由于熔岩管内部为自然生成的表面,较为崎岖,因此目前的方法对于熔岩管内部数据的测量存在较大缺陷。

针对上述问题,本文将聚焦于具有语义信息的地

形级三维建模,选择使用多源数据进行管道的实景三维建模。主要的创新点有:

1) 通过结合geoslam以及贴近摄影测量数据对包括天窗侧壁在内的熔岩管内外进行了全方位的测量,并且进行了精确的模型构建,模型误差小于0.1 m,不同模型部件内部完整,高精度建模部分结构细节真实,有较高的还原度。

2) 通过对熔岩管微观地貌图的调查和了解,进行了具有语义信息的熔岩管三维模型实体划分,为后续对熔岩管内部结构的研究提供模型数据。

3) 对点云进行了基于主成分分析PCA(Principal Component Analysis)的顶部剥落面自动提取,检测范围误差约为0.2 m。同时基于提取结果对断面进行了基于断面分割的多层次精细建模,可以对熔岩管顶部的多层剥落分别进行测量与模拟,为后续研究提供更加丰富的数据。

4) 借助对地球熔岩管的数据采集与三维实景模型的构建,为后续针对月球、火星等外星体的熔岩管研究提供了方法论的借鉴与参考。

1 研究方法

鉴于当前地外行星熔岩管数据的匮乏,采用地面熔岩管数据作为方案设计与模型构建的基础。在本研究中,选定镜泊湖区域的熔岩管作为方案设计的对象。

1.1 研究区域与数据预处理

1.1.1 研究区域概况

镜泊湖风景区位于黑龙江省东南部张广才岭与老爷岭之间,宁安市西南60 km处,距牡丹江市90 km,总体规划面积为1 726 km²,景区由百里长湖、火山口原始森林、渤海国上京龙泉府遗址3部分组成。火山分布情况如图1所示^[6]。

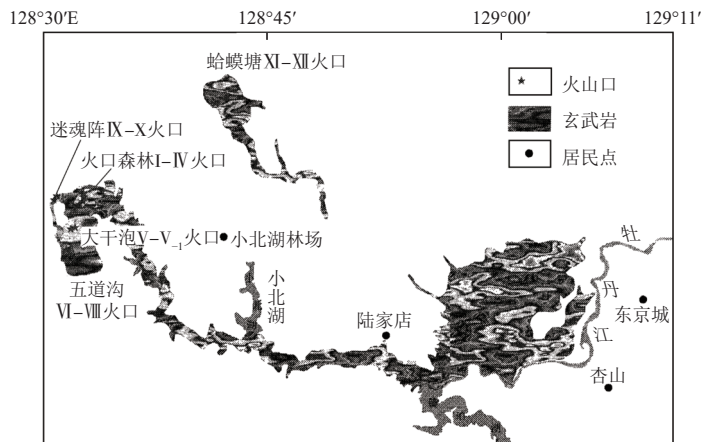


图1 镜泊湖全新世火山分布图^[6]

Fig. 1 Location of volcanic vents in Jingpo Hu Holocene volcano

镜泊湖世界地质公园火山熔岩流台地面积广大, 约 500 km², 在公园东北部镜泊近期熔岩台地上已经发现数个规模不等的熔岩管, 是研究熔岩管形成机制的理想场所^[8]。

1.1.2 数据预处理

本次研究采用M600 PRO挂载五镜头+精灵4RTK对天窗侧壁进行数据采集, 并使用GEOSLAM ZEB-HORIZON 移动手持扫描仪对管道内部进行数据获取。仪器部分参数如表1所示。

表 1 SLAM扫描仪参数
Table 1 SLAM Scanner parameters

| 参数 | 数值 |
|----------|-----------|
| 最大测程/m | 100 |
| 扫描视角/(°) | 270 × 360 |
| 相对精度/cm | 1.5~3 |

由于数据来源多样, 且密度存在差异, 因此需要先对数据进行预处理, 包括点云的生成, 滤波, 以及点云的拼接。

首先需要处理贴近摄影测量数据。本文利用metashape软件将贴近摄影测量获得的影像数据转化为点云数据。随后通过同名点将3种类型的点云进行拼接, 并通过CSF (Cloth Simulation Filter) 算法^[22]实现地面点提取, 滤除位于天窗坑底处生长的树木等植被的干扰。

1.2 熔岩管实体特征提取

1.2.1 熔岩管实体划分

经过上述步骤将多源点云数据进行了点云拼接获得了结合熔岩管地面以及内部管道的完整点云。而为

了进行具有语义信息的实体划分, 模型构建前需要对点云进行分割分类。由于不同区域的熔岩管内侧微观地貌的分布存在差异, 部分微观地貌是否存在也有不确定性。因此本次实验主要根据熔岩管的几何结构特征对熔岩管进行实体化分主要分割为以下几个大类:

1) 天窗塌陷区以及熔岩管内部地面: 为了形成合理的天窗底部, 将底部覆盖物去除后的天窗底部点云。结合洞内地面获得可以获得完整的熔岩管原始走向信息。微观地貌中岩阶分布于熔岩管底部。

2) 天窗侧壁: 在拼接后介于地面和管内点云之间的崖壁部分点云。该部分为熔岩管顶部脱落后暴露在外的完整断面, 其中包括各个时期所生成的熔岩管顶部地层信息。

3) 熔岩管拱顶: 包括熔岩管烘烤层以及熔岩钟乳石的弧形顶部, 为最内侧熔岩管的原始表面。

4) 熔岩管内部崩落区顶部断面: 由于熔岩管内部同样存在崩落现象, 导致原始的拱顶受到破坏并露出顶部断层, 使得熔岩管该管段趋于方形, 与原始的熔岩管拱顶存在较大差异, 因此需要与原始拱顶进行区分。

5) 熔岩管内部崩落区侧面: 由于熔岩管的崩落主要存在于顶部, 因此在崩落区侧面仍有部分原始结构保留, 在对顶部断面进行拆分后, 崩落区侧面同样进行了实体化分。

熔岩管内部结构可进行细分, 如图2所示^[4]。本次实验区域位于天窗附近, 同时管直径较大, 有不同程度的碎石崩落, 对洞内微观地貌存在破坏。因此在后续的研究中将主要对保存完好的洞顶断面以及绳状熔岩流纹存在的侧壁进行实体划分与提取。

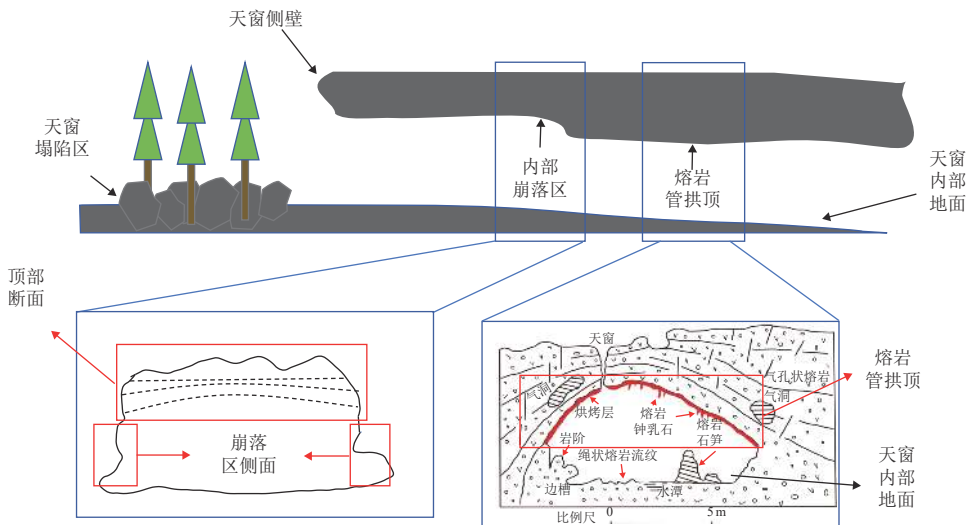


图 2 结构划分示意图

Fig. 2 Structure division diagram

1.2.2 熔岩管顶部断面提取

为了实现对断面点云的自动分割提取,设计了一种基于主成分分析的断面点自动提取算法。

首先需要对管顶数据进行拆分提取,由于熔岩管为天然洞穴,形状较复杂,无法快速通过手动分割的方式进行分割,因此选择多面CSF^[19]来进行管顶点分割。由于熔岩管洞顶结构较复杂,难以直接进行提取,因此选择将左右侧壁以及底部滤除,留下熔岩管顶部点。即旋转点云,进行CSF滤波将底部和侧面滤除和拆分。

为了提取包含断面的特殊区域,提高运算效率,选择随机采样的方式进行断面点初始滤波,随后将对随机采样的初始点进行断面点判断。具体的判断方法如下:假设 p_i 为随机采样后的任意点搜索半径内的所有点

$$\bar{p}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (1)$$

其中: n 为搜索半径内点的数量,所有点的张量可写成矩阵形式即

$$M = \frac{1}{n} Q^T Q \quad (2)$$

其中: $Q = (p_1 - \bar{p}, p_2 - \bar{p}, \dots, p_n - \bar{p})$ 。由式(2)可知 M 为对称矩阵,因此

$$M = RIR^T \quad (3)$$

其中: R 为旋转矩阵; I 为特征值矩阵,其中包括 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 (\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3)$

$$\vartheta = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (4)$$

若 ϑ 小于阈值,则该判定点周围存在面特征,可以判断为平整区域;若 ϑ 大于阈值,则代表附近点云不存在明显的面特征,即可判断为含断面的墙面剥落区域。

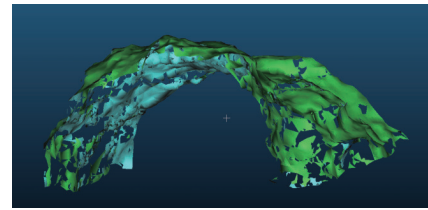
通过对熔岩管结构的自动提取与分类,实现了具有语义信息的点云分类,为后续的基于语义信息的实体构建划分提供语义基础。

1.3 实景三维模型构建

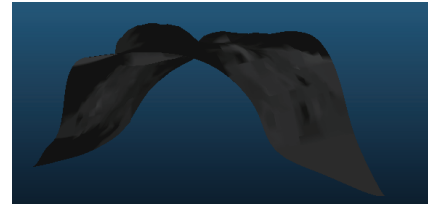
模型构建前需要进行多尺度降采样。由于硬件限制,完整的高密度点云难以构成模型用于后续处理和展示,因此根据研究对象的不同,进行多尺度的降采样。对于地表以及崖壁部分的点云,仅需展示其趋势,因此选择稀疏采样构建,减少模型面数。对于洞内点云,对岩层结构需要有适当的展示,因此使用较密集采样,提升模型的真实度。对于断面处点云,需要对岩层建构纹理有细节展示,需要加强模型的真实

感,因此选择模型面数较多的密集采样。

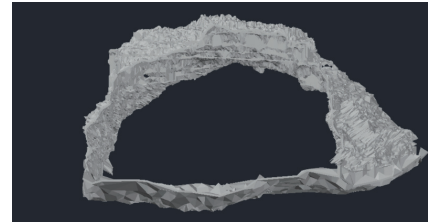
目前基于点云的表面提取算法大多是对点云的外表面进行模拟,比如滚球法(Ball Pivoting)三维表面重建^[21],如图3(a);泊松重建^[20],如图3(b)。而熔岩管进行模型构建时,需要针对内表面构建mesh模型。滚球法是基于球体围绕点云数据进行三角化,也是目前进行复杂模型构建的常规方法之一,该方法在面对天窗侧面以及洞侧等立面时,由于Geoslam数据存在大量杂点,立面也存在许多复杂的断面结构,因此使用该方法会产生空洞,如图3(a)、图4(a),需



(a) 滚球法三维表面重建



(b) 泊松重建



(c) 多层次模型构建方法

图3 多种建模方法结果对比

Fig. 3 Comparison of results of multiple modeling methods

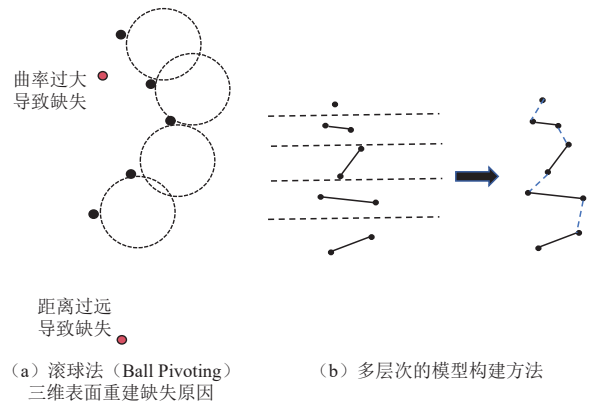


图4 滚球法缺失原因及本文采用的方法的原理介绍

Fig. 4 The reasons for the lack of rolling ball method and introduces the principle of the method adopted in this paper

要手工进行补充, 虽滚球法对细节能有一定的展示和表达, 但存在大量的漏洞。而泊松三维重建是一种利用表面法线信息来重建三维物体表面的方法。但该方法在处理类似于熔岩管侧壁的复杂形状与结构时, 无法捕获细节, 导致重建结果不够精确或失真, 如图3(b)所示, 因此泊松重建法较为完整, 但细节丢失严重, 难以进行后续的应用。

为了实现对熔岩管场景的模型构建, 本次实验使用了多层次模型构建方法以及骨架加细节建模方法来构建熔岩管模型, 如图3(c), 图4(b)。

多层次模型构建方法是通过最邻近点在层间构建mesh薄片, 随后将层间薄片进行连接, 并在两层mesh模型中填充实体, 从而获取仿真无缺漏的整体模型。基于该模型可以进行后续分层、编辑与应用。在对稀疏部分以及较密集部分进行建模时, 主要采用多层次模型构建方法进行模型的构建; 由于稀疏部分主要区域包括地面以及悬崖侧面, 这两部分分布大量碎石以及植被干扰, 因此选择采用较少的点云密度进行模型生成; 而对于洞内的非关键点部分, 由于其分布特征较少, 仅需要使用较密集的点云进行模型构建便可以对内部情况有较好的展示。

对于存在复杂结构的断面部分, 本文使用了一种更加真实的模型构建方式, 即以多层切割模型构建法的建模结果作为骨架, 通过旋转建模法构建表面, 以此构建精细模型。首先, 使用多层结构分割建模法构建管道侧面的主体框架。随后使用旋转建模法, 即通过PCA算法获得细节部件点云的主成分表面, 并将其旋转至水平, 从而生成细节部件的mesh模型, 如图5所示。该方法可以实现针对密集点云的表面重建, 对于熔岩管侧面的原始结构以及表面特征都能存在较好的保留。而对于洞顶, 其主要的分布特征便是多层结构, 因此在通过骨架加细节方法对洞壁进行高精度与

高还原度的模型构建后, 将洞顶模型通过多层次模型构建方法进行构建, 将其与洞壁骨架进行连接, 获取最终的细致模型。

在完成模型构建后, 根据不同分层信息可以进行不同材质的模型渲染, 从而获得更加细致且还原度更高的建模结果。

2 数据结果处理与分析

2.1 实验数据集

本次建模采用的数据是位于中国黑龙江省牡丹江市宁安市境西南部镜泊湖附近的牡丹江火山口国家森林公园。该地形成于距今1万年前, 火山喷发形成了7个直径大小不等的火山口及岩浆流淌形成的地下熔岩洞群。本次建模数据来源于其3号熔岩管。具体的研究区域在遥感影像中如图6所示。

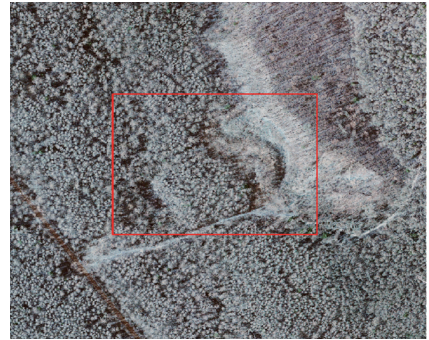


图6 研究区域遥感影像

Fig. 6 Remote sensing images of the study area

该区域熔岩管具有丰富的结构, 同时该熔岩管管径较大。由图6可知, 该熔岩管区域具有丰富的地表裸露区域, 同时周围植被相对而言较为稀疏, 便于进行数据采集。

2.2 点云预处理与实体特征提取结果

处理完成后对机载lidar所获取的点云数据以及Geoslam数据进行滤波, 排除杂点的影响。由于Geoslam的点云密度过大, 受硬件限制, 先根据研究区域进行裁剪。同理, 将机载lidar数据进行实验区域的裁剪。由于机载lidar数据包含坐标系, 因此选择以机载lidar数据作为基准将贴近摄影测量数据所生成点云以及Geoslam数据进行手动拼接。先通过特征点进行匹配将贴近摄影测量所生成的点云数据与Geoslam数据进行拼接。首先根据点云的密度将贴近摄影测量数据转化为近似密度的点云数据。随后人工选择特征点进行两片点云间的拼接。在自动粗拼接完成后, 进行精拼接, 由于只有较少的重合点因此目前的常规自动精拼接方法难以进行有效的修正, 因此选择对点云进行多次手

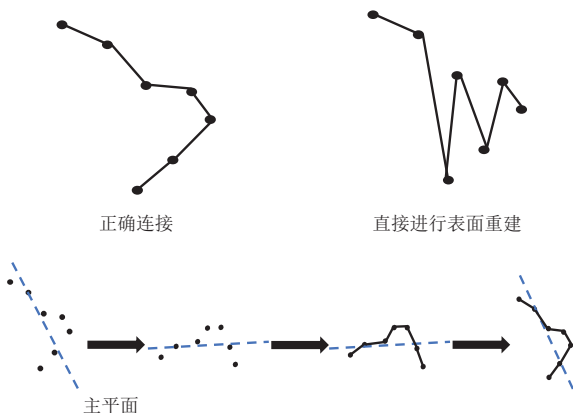


图5 旋转建模法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of rotation modeling method

动微调,从而获得更好的拼接结果。随后使用拼接后的点云数据与机载lidar所采集的点云数据使用相同方式进行拼接。拼接结果如图7。拼接完成后,在3个点云内分别选择3组具有明显特征的同名点,取距离均值获得最终的拼接精度如表2。

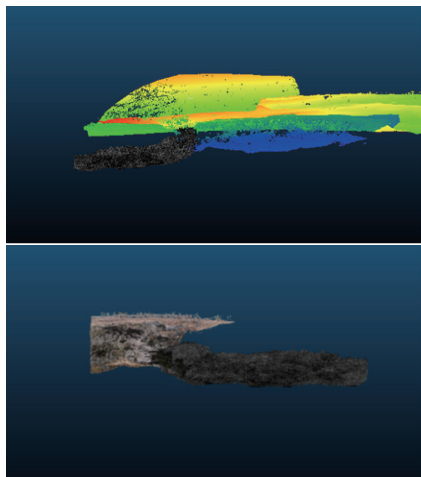


图7 多源数据拼接结果
Fig. 7 Results of multi-source data concatenation

在完成整体点云的拼接后,对洞内点云进行分割处理,保留洞顶点云进行阈值分类。本次研究所设定断面提取的阈值为0.1。结果如图8所示。

红色部分所示代表管顶断面存在位置,算法精度如表3所示。

后续将依据该算法,对红色密集的范围进行更加高精度的建模。

表2 点云拼接精度

Table 2 Point cloud stitching accuracy

| 参数 | 误差 | m |
|------------------|-------|---|
| P_1 (Geoslam-机载) | 0.079 | |
| P_2 (Geoslam-机载) | 0.063 | |
| P_3 (Geoslam-机载) | 0.031 | |
| P_1 (Geoslam-贴近) | 0.042 | |
| P_2 (Geoslam-贴近) | 0.035 | |
| P_3 (Geoslam-贴近) | 0.061 | |

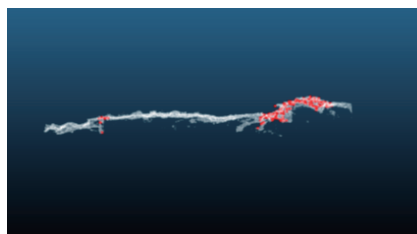


图8 断面区域提取结果
Fig. 8 Cross section area extraction results

表3 实体特征提取精度

Table 3 Entity feature extraction accuracy

| 参数 | 数值 | 误差 |
|-------------|--------|--------|
| 断面个数 (实际) | 2.000 | — |
| 断面个数 (提取) | 2.000 | 0 |
| 断面长 (实际) /m | 27.658 | — |
| 断面长 (提取) /m | 27.431 | -0.227 |

2.3 模型展示

从断面处精细模型中较为清晰地看出熔岩管中的断层、绳状熔岩流纹、以及右侧塌陷的情况 (见图9)。

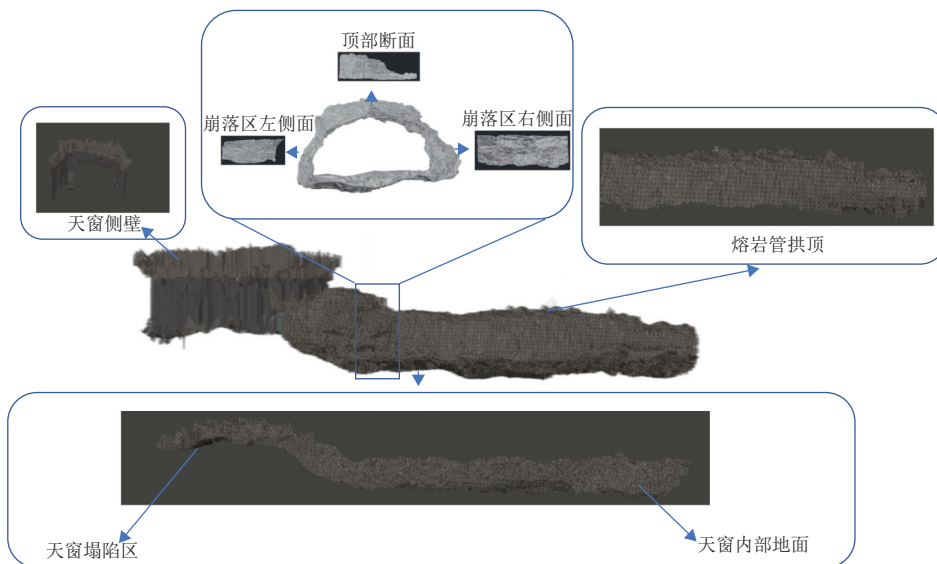


图9 模型全景展示
Fig. 9 Model panorama display

在完成建模后, 对模型进行渲染并赋予材质信息。根据图片信息选择合适的颜色材质, 由于前期的建模使用的是多层次建模法, 因此可以对整体模型进行更加准确有辨识度的材质赋予。

为了体现实景三维模型的真实感, 对熔岩管模型内部进行了模型拍摄, 如图10所示。

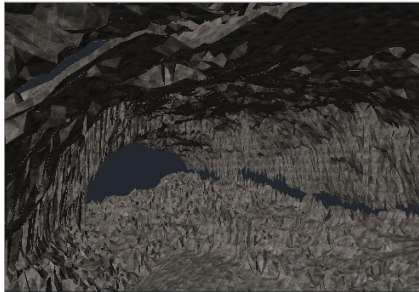


图 10 熔岩管模型内部展示
Fig. 10 Model panorama display

通过实体划分以及多层次的模型构建, 对整体模型的断面区, 进行了提取与精细建模, 并通过不同尺

寸的体素大小对模型进行多尺度的降采样。如表4所示。

表 4 多尺度的降采样量化参数

Table 4 Multi-scale down sampling quantization parameters

| | | m |
|-----|------|---|
| 参数 | 体素大小 | |
| 稀疏 | 1.00 | |
| 较密集 | 0.50 | |
| 密集 | 0.01 | |

由于底面分布大量的脱落碎石, 对熔岩管的形态结构反应较少, 因此选择稀疏建模, 仅构建大致趋势; 熔岩管顶部除断层区域外, 整体较为平滑完整, 特征较少, 同时没有断层裸露, 因此仅采用如图所示的较密集建模; 而天窗裸露部分虽然存在断面, 但由于存在树木根系破坏与遮挡以及部分被泥土覆盖, 因此也仅对天窗侧面进行较密集建模。

2.4 重建结果精度验证

为了对建模细节处进行展示, 选择了熔岩管近天窗处进行了影像采集, 便于和建模数据进行对比, 见图11。



(a) 熔岩管侧面

(b) 顶面

图 11 模型与真实影像对比

Fig. 11 The model is compared with the real image

随后对模型中的各语义实体部件以及整体框架进行测量, 并与实际测量结果进行对比, 结果如表5所示。

表 5 实际测量结果与模型测量结果对比

Table 5 Comparison of actual measurement results with model measurement results

| | | | m |
|---------------|-------|-------|---|
| 参数 | 数值 | 误差 | |
| 断层单层测量 (实际) | 0.406 | — | |
| 断层单层测量 (模型) | 0.422 | 0.016 | |
| 横向管径 (中) (实际) | 9.627 | — | |
| 横向管径 (中) (模型) | 9.678 | 0.051 | |
| 纵向管径 (实际) | 8.884 | — | |
| 纵向管径 (模型) | 8.975 | 0.091 | |
| 横向管径 (上) (实际) | 9.417 | — | |
| 横向管径 (上) (模型) | 9.325 | 0.092 | |

通过对建模细节处进行展示, 与熔岩管外侧的影像对比, 以及多处测量结果与模型测量数据的统计, 说明模型可以对熔岩管内部结构进行有效的反映, 对各语义实体部件的真实大小和形状也能进行高精度的还原。

2.5 基于三维模型的熔岩管断面参数提取

上述对模型的精度验证可以保证基于该模型对熔岩管参数进行提取是准确有效的, 因此通过上述模型进行熔岩管的相关三维参数进行提取。

首先是对熔岩管顶部断面的多层填充模型构建。由于顶部岩石已经剥落, 使用传统的测量手段难以对顶面岩石的剥落物情况进行定量的测量, 因此本文提出了一种新的基于模型的断面拟合方法来解决这个问题。

熔岩管顶部有多层岩石剥落, 根据剥落断面对洞顶的不同层进行填充拟合, 可以展示不同层岩石的崩落体积, 填充拟合结果如图12所示。

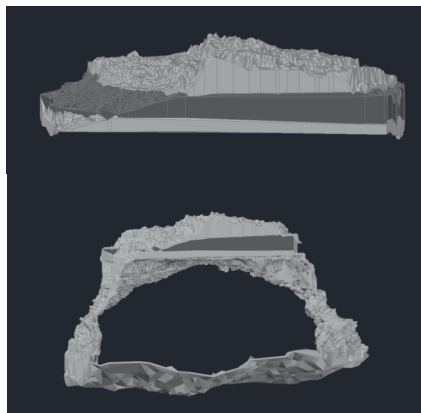


图 12 断面填充模型
Fig. 12 Cross section filling model

随后对顶部断面的多层填充模型体积进行统计, 结果如表6所示。

表 6 顶部剥落物体积统计
Table 6 Top stripping volume statistics

| 参数 | 数值 | m^3 |
|-----|--------|-------|
| 断面1 | 20.914 | |
| 断面2 | 34.416 | |
| 断面3 | 24.547 | |

从统计结果中不难看出: 第一层断面面积较小, 大多为零星的崩落, 因此体积占比较小; 第二层断面面积较大, 同时单层厚度较厚, 因此崩落的体积最大; 第三层较薄, 面积较大, 因此整体的体积略大于断面1。

3 结 论

模型构建实验表明, 通过使用多源数据融合能够对熔岩管内外进行完整、真实、一体化的三维建模。实验结果可总结为以下几点:

1) 基于激光雷达扫描仪所采集的点云数据能够对地下无光场景进行高效且直观的展示。

2) 通过多层次模型构建方法进行三维重建可以有效提升模型的质量和可利用性。不同于mesh表面模型, 通过包含语义信息的三维实体构建可以更加准确地进行不同部件的参数提取。

3) 在建立熔岩管模型时, 应充分考虑地质模型以进行合理的模型分割, 并以合适的精细程度对模型进行构建。本文利用CSF进行洞内点云部件的分割, 并

使用自动的断面提取算法进行了洞顶断面提取。而针对过于精细的模型存在的硬件负担, 提高模型的可利用性, 本文使用了多尺度、多精细度的模型构建, 在保证精细度和真实度的前提下, 有效提高了模型的加载效率和后续研究的可利用性。

4) 通过对断面的参数提取, 能够为后续的岩层结构探究提供检验数据。同时, 通过对断面的分层分析以及填充拟合, 也能为熔岩管结构稳定性的探究提供判定依据, 为后续月球熔岩管天窗检测、地月模拟对比以及内部探测提供有效的参考。

5) 由于断面处有植被生长, 因此本次实验需要使用无人机对断面进行补测, 在月球环境下熔岩管断面不存在植被的影响, 因此不需要使用无人机补充测量, 只需要通过月球轨道器搭载的高分相机便可以对断面进行采集。而手持式的激光扫描设备在月球上将集成到洞穴机器人上, 对熔岩管数据进行无人化的数据采集。本文所使用的方法可以应用于洞穴机器人所采集的数据进行模型的构建。

未来, 此三维模型将在实景三维的相关研究中发挥更深入的应用价值, 并为月球熔岩管天窗、断面等结构的探究提供坚实的数据支持。同时, 通过本次对地球熔岩管的数据采集与三维实景模型的精确度验证, 证实了该方法能够为后续月球、火星等外星体的熔岩管研究提供重要参考与借鉴。

致 谢

谨向黑龙江省镜泊湖自然保护区管理委员会、黑龙江省第二测绘工程院在测量工作中给予的大力支持与协助, 对斯卡纳(北京)科技有限公司在熔岩管点云数据采集方面所提供的帮助, 致以深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] HURWITZ D M, HEAD J W, HIESINGER H. Lunar sinuous rilles: distribution, characteristics, and implications for their origin[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 79-80: 1-38.
- [2] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2018, 48(11): 86-99.
XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(11): 86-99.
- [3] BLAMONT J. A roadmap to cave dwelling on the Moon and Mars[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(10): 2140-2149.
- [4] 董跃龙, 穆海鑫, 张丽宾, 等. 海口石山火山群地质公园典型熔岩隧道调查研究: 中国地质学会旅游地质与地质公园研究分会第34届年会暨福建龙岩地质公园建设与旅游发展研讨会[C]//中国福建龙岩: 中国地质学会旅游地质与地质公园研究分会第34届年会暨福建龙岩地质公园建设与旅游发展研讨会, 2019.

- [5] CALVARI S, PINKERTON H. Formation of lava tubes and extensive flow field during the 1991-1993 eruption of Mount Etna[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 1998, 103(B11): 27291-27301.
- [6] 陈洪洲, 马宝君, 高峰. 镜泊湖全新世火山喷发特征[J]. *中国地震*, 2005(3): 360-368.
CHEN H Z, MA B J, GAO F. Characteristics of Holocene volcanic eruption in Jingpo Lake[J]. *Earthquake Research in China*, 2005(3): 360-368.
- [7] 浦长龙, 郭磊, 詹涛. 地质雷达在镜泊湖世界地质公园熔岩隧道调查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2015, 12(1): 117-121.
PU C L, GUO L, ZHAN T. Application of geological radar in lava tunnel survey in Jingpohu Global Geopark[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2015, 12(1): 117-121.
- [8] 詹涛, 张海燕, 张俊, 等. 镜泊湖世界地质公园熔岩隧道分布特征及成因[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2017, 33(5): 87-93.
ZHAN T, ZHANG H Y, ZHANG J, et al. Distribution characteristics and genesis of lava tunnels in Jingpohu Global Geopark[J]. *Journal of Natural Science, Harbin Normal University*, 2017, 33(5): 87-93.
- [9] 陈军, 刘建军, 田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(10): 1568-1575.
CHEN J, LIU J J, TIAN H B. The basic positioning and technical path of 3D China construction[J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2022, 47(10): 1568-1575.
- [10] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. *Icarus*, 2017, 282: 47-55.
- [11] 朱家松, 张伟晔, 于文率, 等. 基于优视摄影测量的天-空-地协同实景三维构建方法[J]. *测绘通报*, 2023(S1): 24-31.
ZHU J S, ZHANG W Y, YU W Z, et al. 3D construction method of space-space-ground collaborative reality based on UVISION Photogrammetry[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(S1): 24-31.
- [12] WONG K, ELLUL C. USER Requirements gathering for a national 3d mapping product in the united kingdom[C]//Proceedings of 13th 3D GeoInfo Conference. [S. l.]: 13th 3D GeoInfo Conference, 2018.
- [13] 包楠楠, 樊轩呈, 曲欣然. 实景三维在数字乡村智慧管理平台中应用[J]. *测绘通报*, 2023(S1): 84-86.
BAO N N, FAN X C, QU X R. Application of real scene 3D in digital rural intelligent management platform[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(S1): 84-86.
- [14] MUSIALSKI P, WONKA P, ALIAGA D G, et al. A survey of urban reconstruction[J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(6): 146-177.
- [15] QI K, ZHANG J X, HUANG G M, et al. Technology on high-accuracy dem extraction from airborne interferometric sar: xxiv isprs congress: imaging today[C]//Proceedings of 24th ISPRS Congress on Imaging Today, Foreseeing Tomorrow. [S. l.]: 24th ISPRS Congress on Imaging Today, Foreseeing Tomorrow, 2022.
- [16] 蔡军, 江伟, 温日强, 等. 贴近摄影测量与BIM技术在濒危民族建筑部件级实景三维建设中的应[J]. *测绘通报*, 2022(12): 19-23.
CAI J, JIANG W, WEN R Q, et al. Application of close photogrammetry and BIM Technology in 3D construction of building parts of endangered nationalities[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(12): 19-23.
- [17] LEE M J, PARK S Y. 3D Surface reconstruction from multi-view and multi-date google Earth satellite images with 3d homography-based projective reconstruction[C]//Proceedings of Xxiv Isprs Congress Imaging Today, Foreseeing Tomorrow, Commission Ii. [S. l.]: 24th ISPRS Congress on Imaging Today, Foreseeing Tomorrow, 2022.
- [18] 朱庆, 张利国, 丁雨淋, 等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 1040-1049.
ZHU Q, ZHANG L G, DING Y L, et al. From 3D modeling to digital twin modeling[J]. *Journal of Surveying and Mapping*, 2022, 51(6): 1040-1049.
- [19] ZHANG W M, QI J B, WAN P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 1-10.
- [20] KAZHDAN M, HOPPE H. Screened poisson surface reconstruction[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2013, 32(3): 2-8.
- [21] BERNARDINI F, MITTLEMAN J, RUSHMEIER H, et al. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999, 5(4): 349-359.

作者简介:

阳乔(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向:熔岩管探测,激光雷达技术,实景三维建模。

通信地址:北京市海淀区学院路29号(100083)

电话:(010)82321299

E-mail: zzkang@cugb.edu.cn

康志忠(1975-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:激光雷达技术、实景三维建模以及月球与行星遥感。**本文通信作者。**

通信地址:北京市海淀区学院路29号(100083)

Research on Realistic 3D Modeling Technology of Lava Tube for Future Lunar Scientific Expedition

YANG Qiao^{1,2,3}, KANG Zhizhong^{1,2,3}, HU Teng^{1,2,3}, YE Chenming^{1,2,3}, LIU Dongming^{1,2,3}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Research Center of Lunar and Planetary Remote Sensing Exploration, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Subcenter of International Cooperation and Research on Lunar and Planetary Exploration, Center of Space Exploration, Ministry of Education of the People's Republic of China, Beijing 100083, China)

Abstract: This article proposed a 3D real scene modeling method for lava tubes that integrates airborne LiDAR, close-range photogrammetry, and point cloud data from GeoSLAM handheld laser scanner, with a focus on future lunar surface scientific explorations. Firstly, the entities were divided, and then entity feature extraction was performed based on semantic information. A new mesh model construction method was proposed, which uses multi-level model construction method and skeleton-plus-detail modeling method to construct the mesh model of the inner surface of the lava tube. Finally, entities were constructed separately between different layers inside the model to simulate the original state of different layers, and to measure layer thickness and volume of spallation. The 3D modeling of the lava tube located in Jingpo Lake, Heilongjiang province, shows that the 3D modeling method for lava tubes based on multi-source data fusion has high precision and high realism, providing an important reference for subsequent lunar lava tube skylight detection, Earth-Moon simulation comparison and internal exploration.

Keywords: 3D reconstruction; airborne LiDAR; proximity photogrammetry; lava tube; GeoSLAM scanner

Highlights:

- Combining GeoSLAM and close-range photogrammetry data allowed for a comprehensive measurement of the interior and exterior of lava tubes, resulting in the creation of highly accurate models that faithfully replicated the details of lava tubes.
- The semantic information-based division of the three-dimensional model of lava tube micro-landscapes was conducted to delineate entities within lava tubes. This process aimed to provide model data for subsequent research on the internal structure of lava tubes.
- PCA-based top peeling surface extraction was applied to the point cloud data, with a detection range error of approximately 0.2 meters. Simultaneously, utilizing the extraction outcomes, a multi-level refined modeling based on section segmentation was performed. This approach facilitated separate measurements and simulations of the multiple layers of peeling at the top of lava tubes.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]