

面向地外天体熔岩管的三维探测与形态研究

杜雨萌, 陈一平, 张帅, 张吴明

(中山大学测绘科学与技术学院, 珠海 519082)

摘要: 针对地外天体熔岩管探测, 利用激光雷达技术对与月球、火星具有较高相似度的海口市石山火山群区域内的熔岩管进行了实地勘测, 提出了基于网格划分的天窗检测方法以及利用基于数据增强与多尺度特征学习网络的裂缝检测方法, 对熔岩管内部结构进行探测及形态研究; 使用便携式手持激光扫描仪对管道内部进行全方位扫描获得高精度点云数据, 在ContextCapture软件中完成三维建模, 对管道内特殊的微型地貌天窗及其内壁裂隙进行了自动化的检测与提取。实验结果表明, 利用激光扫描仪搭配点云处理软件及程序可以高效、直观且真实地还原熔岩管的形态结构, 进行量化分析, 对管道内特殊的微型地貌可进行检测与提取。

关键词: 熔岩管; 地外基地; 三维建模; 形态分析

中图分类号: P232

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0346-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230174

引用格式: 杜雨萌, 陈一平, 张帅, 等. 面向地外天体熔岩管的三维探测与形态研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 346-354.

Reference format: DU Y M, CHEN Y P, ZHANG S, et al. Three-dimensional detection and morphological study of lava tubes on extraterrestrial bodies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 346-354.

引言

深空探测通常指对月球及以远的地外天体进行空间探测的活动^[1], 是国家科技创新的标志, 也是国家战略权益保障的需求。近年来, 中国航天事业不断刷新纪录, 进入创新发展“快车道”, 取得了全球瞩目的成就。2019年, “嫦娥四号”实现全人类首次月球背面软着陆。2022年, “嫦娥五号”完成月表采样返回, 为人类提供了月球高纬度地区的表面样本, 给月球风化研究提供了独特视角。2020年7月, “天问一号”火星探测器成功发射并进入预定轨道, 并在2021年5月成功软着陆于火星表面, “祝融号”火星车驶上火星表面, 开始巡视探测。2021年11月, “天问一号”环绕器成功实施第五次近火制动, 准确进入遥感使命轨道, 开展火星全球遥感探测, 并成功得到火星全球影像图^[2-4]。随着中国行星探测事业的发展, 人们对于行星的认知更加深入, 探索的需求更加强烈。2023年5月, 中国载人月球探测工程登月阶段任务已启动实施, 并计划在2030年前实现中国人首次登陆月球^[5]。除此之外, 国际月球科研站也将按照3个阶段分步实施, 计划于2030年前后建成基本型。进行空间技术实验, 探索人类驻留、生命保障的关键技术是未来月球探测的主要任务^[6-8]。

熔岩管是火山喷发后熔岩流动过程中形成的管道。表层熔岩因散热冷却会首先固结为一定厚度的外壳, 构成绝热保护层, 而内部熔岩因散热较慢, 仍以高温状态继续流动。当火山喷发减弱、岩浆断流时, 最后的内部熔岩冲出前缘限制, 流空后, 就形成了中空的管道, 即为熔岩管。熔岩管的外壳可以抵挡月球表面极端的温度、微小陨石撞击以及太阳辐射等不利的环境条件, 提供较为稳定和安全的居住环境。其中空的管道结构, 具有很高的空间利用和扩展性, 月面熔岩管多次被列为未来月球基地的首选区域^[9-12]。

天窗是熔岩管中特殊的微地貌类型, 存在于管道的顶部, 呈近似圆形的开口, 因形状像房屋的天窗而得名。天窗下方常见有塌落的岩块堆, 如海口市七十二洞南段的中部, 天窗与坠石堆积对应分布。这表明它是熔岩隧道形成后洞顶的局部崩落所致。天窗在熔岩管上的分布稀少且零散, 而在月球、火星等地外天体上, 天窗出露在地表, 是熔岩管的标志, 可以成为地下探测器的入口, 具有极高的研究价值。

激光雷达是一种快速获取目标三维坐标的测量方式, 具有高精度、高分辨率、不受光照条件影响的优点, 能够实现快速、大范围空间扫描, 广泛应用于地下空间测量、地质勘测等领域。熔岩管内部环境黑

暗、地形蜿蜒崎岖,利用便携式激光雷达对熔岩管进行探测可以快速获得其结构、形状以及表面纹理等三维信息,具有广泛的应用前景^[13-15]。此外,搭载激光雷达的小型智能机器人也可以通过熔岩管顶部天窗进入熔岩管内部,进行探测活动。

除月球、火星外,地球上也蕴含丰富的熔岩管。目前,受行星探测器等技术发展水平的限制,针对月球、火星等地下熔岩管的研究仅依靠天体表面遥感影像,未能对其内部的形态与结构进行立体直观的认识,而地球熔岩管凭借其地质结构的相似性可以为地外天体熔岩管的研究提供参考^[16]。目前,国内外已组织多次实地熔岩管探测实验,使用激光雷达作为探测手段,对其三维形貌进行量化研究,以服务于地外天体的熔岩管探测。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在2017年及2022年使用地基激光扫描仪分别对位于爱荷达州及加利福尼亚州的熔岩管进行了实地测量与三维还原^[17-18]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)同样在2022年对西班牙兰萨罗特岛的熔岩管进行了三维激光测量,以还原其形态结构^[19]。

目前,受熔岩管内部环境黑暗未知、地形崎岖等自然条件的限制,对于熔岩管的勘测仍处在实地观察、人工测量等阶段,不能对其形态结构进行高效、直观且全面的量化认知。本文以海口市石山火山群区域内的熔岩管作为研究区域,使用激光雷达进行实地勘测,为地外天体熔岩管的三维探测与形态研究提供技术与理论参考。创新性如下:

1) 首次利用激光雷达技术对海口市石山火山群区域内的熔岩管群进行实地勘测,对管道内部进行全方位扫描,基于测量得到的高精度点云数据三维建模,并以三维点云数据对熔岩管内部进行三维形态分析,为人类进入太空熔岩管提供了技术思路;

2) 针对大规模熔岩管特殊的微型地貌天窗个数随机、尺寸各异、形状多样以及分布不均且分散的特点,提出了基于网格划分的天窗检测与识别方法,平均检测率可达93.5%,为人类进入管道内部提供了探索价值;

3) 利用基于数据增强与多尺度特征学习网络的裂缝检测方法,对管道内壁裂隙进行了自动检测,检测率达到87.5%,为对熔岩管内部的纹理走向以及灾害预报提供了技术支撑;

4) 大量实验结果表明,利用激光数据可以高效、直观且真实地还原黑暗的熔岩管形态结构,进行量化分析,为地外天体熔岩管的研究提供参考。

1 研究区域与数据采集

1.1 研究区域概况

地球与月球、火星等地外天体下的熔岩管具有形态与结构上的相似性。本文选择海南省海口市石山火山群内的熔岩管作为研究对象。石山火山群位于海南省海口市西南15 km的秀英区石山、永兴两镇境内,区内火山群面积约108 km²,分布40多座各种类型的火山和30余条熔岩隧洞,具有大规模的熔岩管群和丰富的火山地质遗迹,是研究地外天体熔岩管的理想模拟环境,提供了宝贵的地质对比和研究机会。本文对该管道群内的七十二洞、仙人洞和卧龙洞3个代表性熔岩管进行了三维实地探测,现将3个熔岩管的基本情况介绍如下。

七十二洞(图1)熔岩隧道位于马鞍岭北侧,石山镇荣堂村附近,因其内部有多处塌陷而被分割成数个熔岩隧道段而得名七十二洞。七十二洞熔岩管全长780余米,主洞高度约3~4 m,宽度约20 m,由多条熔岩隧道交汇而成。洞内自然景观丰富,有洞顶局部塌陷而形成的塌陷坑和天窗,两个天窗之间的残留洞顶构成的“天生桥”,洞顶岩块沿节理崩落并堆积在洞底而构成的“洞中岩堆”以及一长条熔岩管整段脱落而构成的“塌陷谷”。七十二洞天然出露,内部完整清晰,能为熔岩隧道的形成、演化、消亡提供重要依据,具有较高的科学研究价值和美学观赏价值^[20]。



图1 七十二洞示意图
Fig. 1 Illustration of Seventy-Two Cave

仙人洞(图2)位于石山镇荣堂村北侧,总体长度可达1 216.5 m,为海口火山群中最长的熔岩隧洞。洞内有纵向的边槽、岩阶、绳状流纹等熔岩流动留下的痕迹。洞口高6.2 m,宽10.0 m,本文实际探测长度为250 m左右。仙人洞主体近乎于南北向展布,并向北、北西方向进一步延伸。洞内宽度变化不大,一般5~10 m,高度变化在2~8 m之间。在本次实地勘测过程中,发现内部有3处出现大面积坍塌,南段坍塌面积较

大,较为严重,堆积物堵塞管道。洞内发育有边槽、岩阶、绳状流纹等熔岩流动遗留的痕迹,洞顶见数个气洞,现为蝙蝠栖息地;局部管道顶塌方,可见后期形成的具柱状节理玄武岩。



图2 仙人洞示意图
Fig. 2 Illustration of Xianren Cave

卧龙洞(图3)位置距仙人洞不到1 km,洞长约3 km,管道内空间很大。本文仅对卧龙洞开展部分探测,探测长度约40 m,宽度在6 m左右,洞内高度不到3 m。



图3 卧龙洞示意图
Fig. 3 Illustration of Wolong Cave

1.2 数据采集

本文使用SLAM100手持式激光扫描仪进行熔岩管的勘测。手持式激光扫描仪轻便、灵活,在隧道、洞穴等狭小的地下空间中有极强的可操作性,是野外探测的理想工具。仪器部分参数如表1所示,外观如图4所示。

表1 SLAM扫描仪部分参数
Table 1 Scanner parameters of SLAM100

项目	参数
激光视场角/(°)	270 × 360
绝对精度/cm	5
内部电池续航/h	2.5
工作温度/°C	-10~+45
尺寸/mm	372 × 163 × 106
激光等级	Class1



图4 SLAM100手持激光扫描仪示意图
Fig. 4 Illustration of the SLAM100

2 三维检测方法

2.1 三维建模

激光雷达可以快速获取目标物体高精度的三维坐标,同时其得到的点云数据蕴含目标物体丰富的表面形状、轮廓和细节信息。对地外天体下的熔岩洞穴进行激光测量,基于点云数据进行三维建模可以对管道内部形态建立直观认知,为未来探索任务提供地形导航和安全评估。本文利用ContextCapture软件对实测得到的海口市熔岩管点云数据进行建模,以直观观察研究区域内熔岩管的立体形态与表面纹理。Context-Capture是由Bentley Systems开发的一款专业三维数据捕捉和建模软件。它可以利用普通照相机、激光扫描仪、无人机、飞机等设备采集的图像和点云数据,创建高质量、高精度的三维模型,是目前常用的实景建模软件。该软件自动对原始点云进行分块,构建三角格网来生成表面模型,再将构建好的模型进行拼接。由于采集到的点云数据不可避免地存在离群噪声点,因此,在构建模型之前,利用统计滤波结合人工裁剪对原始点云进行了去噪工作,以保证模型的建立精度。

2.2 基于网格划分法的天窗检测

天窗是熔岩管中特殊的微地貌类型,位于熔岩管的顶部,为一接近圆形的空洞。对于地外天体熔岩管,天窗是识别的标志,是未来探测器的理想入口。图5所示为七十二洞中存在的某一天窗景观,其在点云数据中呈现如图6所示的形态。

由于天窗在管道上的分布稀少且零散,难以寻

找, 本文基于网格划分法^[21], 完成了实测3个熔岩管段内天窗的自动化检测, 检测流程如图7所示, 具体检测方法如下。



图 5 七十二洞中存在的天窗景观
Fig. 5 Illustration of the skylight in Seventy-Two Cave

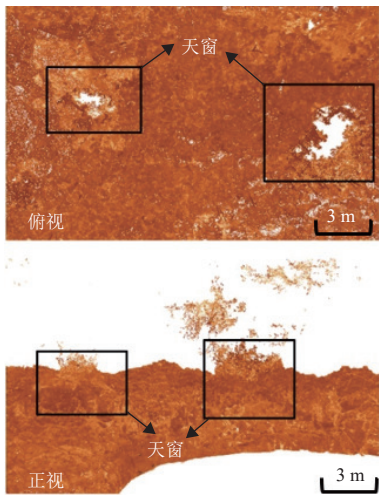


图 6 七十二洞中的天窗在点云数据中的可视图
Fig. 6 Point cloud of the skylight in Seventy-Two Cave

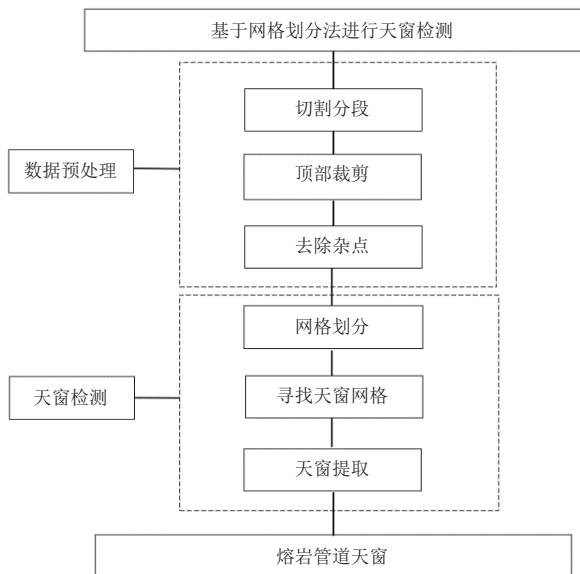


图 7 基于网格划分法的天窗检测流程图
Fig. 7 Flowchart of skylight detection based on grid division

1) 数据预处理

由于熔岩管数据规模较大, 首先使用CloudCompare软件中的裁剪工具将点云切割分段, 对每段点云分别进行处理。随后, 裁剪出各段管道的顶部半圆形区域用作后续天窗检测。最后, 去除管道内外杂乱、不规则的噪声点, 保证管道点云的数据质量, 提高检测精度。数据预处理情况如图8所示。

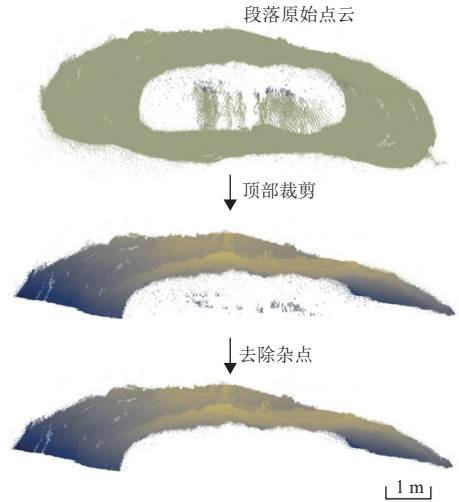


图 8 数据预处理示意图
Fig. 8 Illustration of data preprocessing

2) 基于网格划分法进行天窗检测

基于网格划分法提取天窗边界主要可以分为3步: 网格划分、寻找天窗网格、进行天窗提取, 具体方法如下。

(1) 网格划分

为方便后续数据处理, 首先将三维点云 $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 投影至 XOY 平面上, 得到二维点集 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 其中 $q_i = (x_i, y_i, z_i)$ 、 $p_i = (x_i, y_i)$ 。

遍历所有点, 计算出点云集中 x 、 y 坐标的最值 x_{\max} 、 x_{\min} 、 y_{\max} 、 y_{\min} , 据此计算均匀网格的边长

$$L = \sqrt{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})/m} \quad (1)$$

其中: 搜索分辨率 m 决定了边界提取中网格的大小, 代表了网格划分的精细程度。分辨率的值越大, 网格单元越小, 对应的边界提取精度也更高。相反, 分辨率的值越小, 网格单元越大, 对应的边界提取精度会降低。依据天窗的形态大小, 设置搜索分辨率, 进行网格的划分。

确定网格大小后, 可以分别计算在 x 和 y 方向上的网格数

$$x_{\text{num}} = \left\lceil \frac{x_{\max} - x_{\min}}{L} \right\rceil + 1 \quad (2)$$

$$y_{\text{num}} = \left\lfloor \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{min}}}{L} \right\rfloor + 1 \quad (3)$$

(2) 寻找天窗网格

遍历数据点 $p_i = (x_i, y_i)$, 将依次放入其所在的网格单元 (u, v) 内。其中, $u \in [0, x_{\text{num}}]$, $v \in [0, y_{\text{num}}]$ 。

依据数据集中各点坐标值与网格边长进行分配, 公式为

$$u = \left\lfloor \frac{x_i - x_{\text{min}}}{L} \right\rfloor \quad (4)$$

$$v = \left\lfloor \frac{y_i - y_{\text{min}}}{L} \right\rfloor \quad (5)$$

将数据点依次分配到规则网格后, 首先判断各均匀网格内是否含有数据点, 并据此将其分为两类: “空孔”与“实孔”。若网格内含有数据点, 则将其定义为“实孔”, 若不含数据点, 将其定义为“空孔”。

由于天窗在预处理后的点云数据中呈现中空形态, 具有明显的几何边界, 因此“空孔”不可能为天窗所在的网格, 只需关注均匀网格中的“实孔”。依次判断各“实孔”周围8个网格的类别, 若“实孔”周围有一个以上的“空孔”, 则判定其为天窗的边界。

(3) 天窗提取

在上述两个环节中, 投影到二维平面上的三维点云先被划分为均匀网格, 再依据其网格内点的数量被分为“空孔”和“实孔”两类。依次遍历各均匀网格, 首先判断该网格是否为“实孔”, 若为实孔, 则继续判断该网格邻域网格的类别是否满足上述天窗边界的要求, 若符合要求则保留, 不符合要求舍弃。遍历完所有网格后, 留下的网格即为天窗检测的最终结果。

2.3 基于数据增强与多尺度特征学习网络的裂隙检测

受外界因素作用影响, 熔岩管内表面不可避免地存在裂隙。熔岩管裂隙的研究可以判断其内部结构的稳定性和可能的崩塌风险, 对于评估地外天体熔岩管作为未来探索任务或居住地点的潜在安全性至关重要。在对海口市熔岩管群进行实地勘测时, 拍摄到的管道不同角度的内部裂隙如图9所示。在实地测量过程中, 由于对管道内部进行了多方位、多角度的扫描, 致使裂隙在实际点云数据中, 并不会产生缺失, 而是在垂直管道内壁进行观察时, 会因为裂隙两侧岩石的厚度存在差异而产生点云数据重叠, 导致该处颜色较深。图10为管道裂隙在点云中的表征, 可以看到, 裂隙形态细长, 且颜色区别于其他区域。对管道裂隙进行检测, 可以对管道的灾害和坍塌等安全性进行评估, 预测可能发生的地质灾害。本文基于数据增强与

多尺度特征学习网络对熔岩管的部分区域进行了裂隙的检测。



图9 不同角度的熔岩管内表面裂隙

Fig. 9 Cracks in the inner surface of lava tubes in different angle



图10 管道裂隙在点云数据中的表征

Fig. 10 Point cloud of the cracks in the lava tubes

提出的网络主要包含点云数据增强算法和多尺度特征学习网络模型, 该方法首先在道路裂隙数据集上进行了训练和测试并取得了显著效果。具体而言, 首先进行数据增强处理扩充原始点云数据样本库, 然后再对多尺度特征学习网络进行训练并得到裂隙检测结果。

在数据增强环节, 首先将原始点云数据进行分割、裁剪、调整与拼接等操作, 在保持裂隙原有几何结构特性的基础上扩充点云样本库。随后, 再对得到的增强样本集进行随机下采样, 减少数据量以方便后续处理。

在多尺度特征学习部分, 采用了独特的多尺度特征深度学习网络框架, 将裂隙检测任务与显著性目标检测任务相结合。受RandLA-Net^[22]启发, 本文所提出特征提取过程可以表示为

$$F(P) = R((f_{i,j}) | j = 1, \dots, K) \quad (6)$$

其中: $R(\cdot)$ 表示U-net (上采样-下采样) 形式架构, 如RandLA-Net, K 为搜索到的近邻点。其结构如图11所示, 其中 N 代表点集 P 中所包含点的数量, M 代表特征通道数。

图12为本方法的网络架构图, 是一个包含五级编码器与四级解码器的U型网络框架。该网络混合了不同大小的感受野从而使网络能够从不同的尺度捕获更多的上下文信息, 同时使用池化操作增加网络架构的整体深度, 从而实现高精度的裂隙检测。

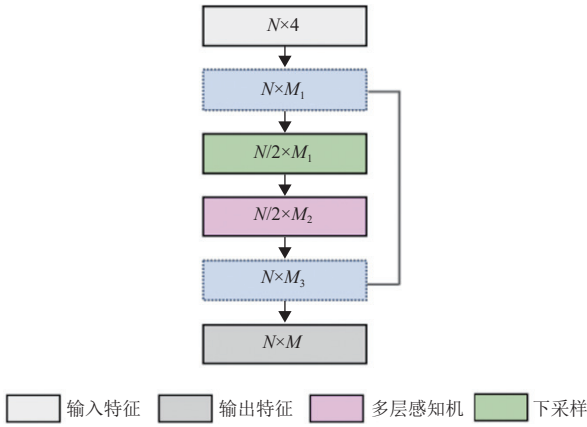


图 11 特征提取示意图
Fig. 11 Illustration of feature extraction

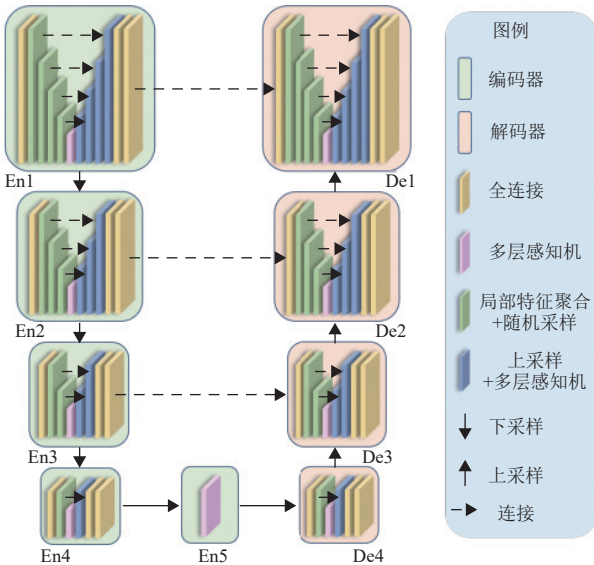


图 12 模型网络架构图
Fig. 12 Illustration of the model network

3 实验与结果

3.1 三维建模

依照前文所提的实验方法对原始点云数据进行预处理, 利用ContextCapture软件分别对七十二洞、仙人洞和卧龙洞三个熔岩管进行三维建模, 建模效果分别如图13~15所示。该模型能够从形态结构上对熔岩管进行三维还原, 以建立对管道的直观认识。图16展示了熔岩管内部的具体建模效果, 可以看到管道内部散落的石块。

3.2 天窗检测结果

本文基于网格划分法, 对3段熔岩管分别进行天窗检测, 由于原始点云数据庞大, 分别将其切割裁剪后, 平均每次处理的点云数量约1 500万个。将检测出的天窗点设置为红色, 结果发现, 七十二洞熔岩管内存在两个位置相近的天窗, 仙人洞段存在一个天窗。

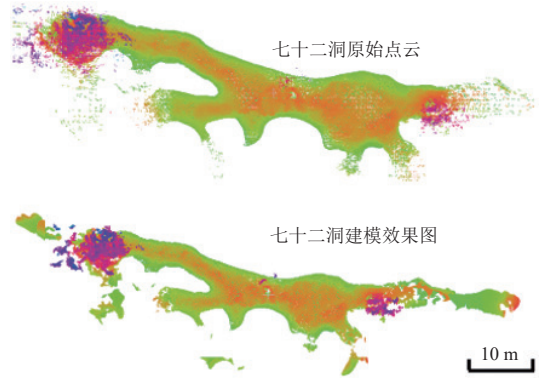


图 13 七十二洞建模效果图
Fig. 13 Illustration of the 3D model in Seventy-Two Cave

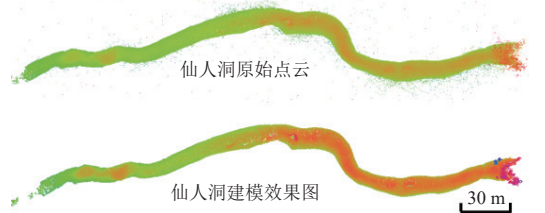


图 14 仙人洞建模效果图
Fig. 14 Illustration of the 3D model in Xianren Cave

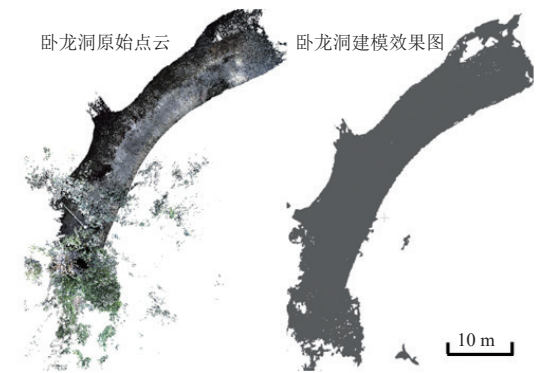


图 15 卧龙洞建模效果图
Fig. 15 Illustration of the 3D model in Wolong Cave

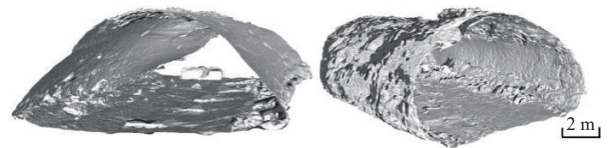


图 16 管道内部模型效果图
Fig. 16 Illustration of the 3D model inside of lava tube

图17和18分别展示了对七十二洞进行天窗检测的实验效果图以及对仙人洞进行天窗检测的实验效果图。从熔岩管俯视图上可以发现, 两个管道的天窗可以被清晰地检测出, 呈现红色。图中其它微小、不规则的白色空隙为激光雷达在数据采集过程中受扫描角度等限制产生的细微数据缺失, 已在算法中通过合理

的阈值设置将其过滤。位于边界的红色线条则为同时识别出实验点云边界,与天窗有明显的区分。

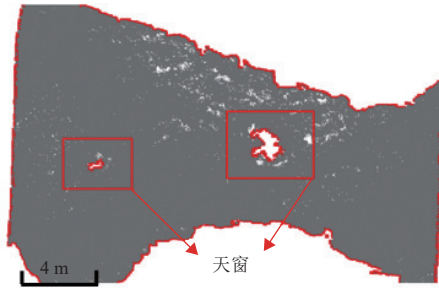


图 17 七十二洞内识别到的天窗
Fig. 17 Skylights identified in Seventy-Two Cave

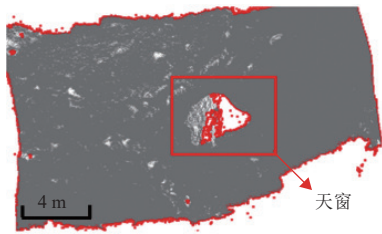


图 18 仙人洞内识别到的天窗
Fig. 18 Skylights identified in Xianren Cave

根据实地勘察情况及熔岩管原始点云数据,依据天窗的真实形态,在3个管道上人为识别出真实天窗并将其裁剪标出,作为天窗的“真值”,使用检测率和交并比评价该方法的精度。记天窗真值点集为 A , $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,实际天窗检测结果为点集 B , $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$,其中, $a_i = (x_i, y_i, z_i)$, $b_i = (x_i, y_i, z_i)$,则检测率 R 计算公式为

$$R = \frac{A \cap B}{A} \quad (7)$$

交并比 IoU 计算公式为

$$IoU = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (8)$$

由此计算出七十二洞和仙人洞的天窗检测精度如表2所示,卧龙洞经人工识别不存在天窗。

表 2 天窗检测精度评价表

Table 2 Skylight detection accuracy evaluation

评价指标	七十二洞	仙人洞	均值
检测率 R	95.7	91.3	93.5
交并比 IoU	91.2	85.4	88.3

由于数据采集段存在的天窗数量较少,样本较为单一,不能较好地证明实验方法的有效性。本文在原始熔岩管段上,根据真实天窗三维形态、大小,在管

道上的位置,人工仿制了3个天窗样本,进行天窗检测实验。由于管道壁存在一定的厚度,在实地进行激光雷达扫描时,天窗处的管道壁同样也被记录在点云数据中,使天窗呈现近似烟囱的形状。因此,在制作模拟天窗时,除在管道壁上合适的位置裁剪形状近似圆形的空洞之外,同样依据实地测量到的管壁厚度为模拟天窗加上了突出的管壁部分,以模拟在管道内进行激光雷达扫描时天窗呈现的点云特征。实验显示,该方法在3组模拟天窗上都取得了较好的检测效果。

人工仿制天窗样本与真实天窗样本的点云表征如图19所示,对应实验效果如图20所示,表3为模拟实验得到的天窗检测精度。

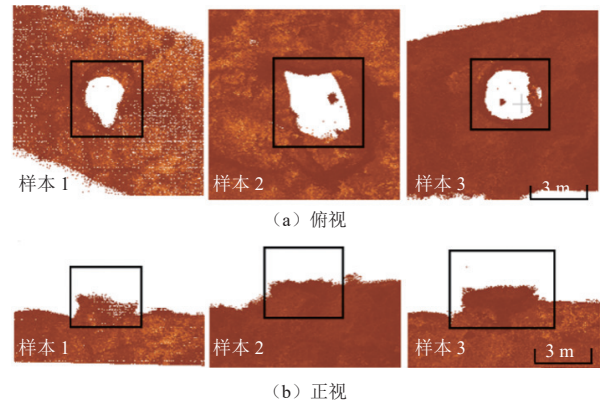


图 19 人工仿制天窗样本示意图
Fig. 19 Illustration of simulated skylights

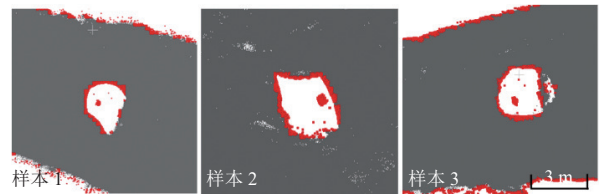


图 20 人工仿制样本实验效果图

表 3 模拟天窗检测精度评价表

Table 3 Detection accuracy evaluation of simulated skylights

评价指标	样本1	样本2	样本3	均值
检测率 R	96.5	95.1	96.7	96.1
交并比 IoU	93.3	92.7	93.6	93.2

3.3 裂隙检测结果

基于数据增强与多尺度特征学习的网络模型对实地勘测熔岩管的部分段落进行裂隙检测,结果表明,该网络对于熔岩管内的裂隙纹理有较好的检测效果。由于内部探测过程极为艰难,本文借助实地勘探过程中内部加光拍摄到的洞内裂隙照片,对实测三维点云数据中约4 m典型区域内的裂隙进行了人工识别与标

注,与算法检测结果进行对比,得到裂隙检测率为87.5%。图21为裂隙检测实验效果图,红色区域为检测裂隙的可视化效果,框选区域即为进行裂隙人工识别标注的区域,并附上了该典型区域内的裂隙人工标注结果。

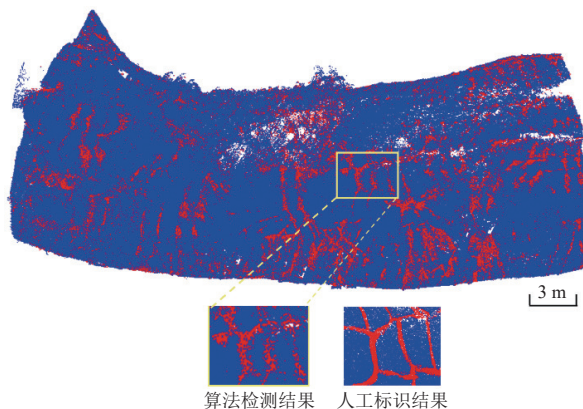


图21 裂隙检测效果图

Fig. 21 Detection result of cracks in lava tube

4 结 论

熔岩管作为月球、火星等天体上发现的较为稳定的地下结构,是地外基地建设的首选区域,而地球上存在的丰富的熔岩管则提供了宝贵的研究资源。

本文利用激光雷达技术,使用手持式激光扫描仪SLAM100对海口市石山火山群区域内的七十二洞、仙人洞和卧龙洞3个熔岩管进行了实地勘测,并建立了三维模型,通过提出的基于网络划分的方法以及基于数据增强与多尺度特征学习的方法对其内部的天窗以及裂隙进行了识别提取,平均检测率分别可达93.5%和87.5%。结果表明,基于激光扫描仪采集得到的高精度点云数据,是进行地下空间的有效方式,可高效、直观且真实地还原熔岩管的形态结构并对管道内特殊的微型地貌进行检测与提取,进行量化分析。该过程为地外天体熔岩管的研究提供了可行的参考。

参 考 文 献

[1] 孙泽洲,孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报,2015,47(6):785-791.
SUN Z Z, MENG L Z. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(6): 785-791.

[2] 叶培建,邹乐洋,王大铁,等. 中国深空探测领域发展及展望[J]. 国际太空,2018(10):4-10.
YE J P, ZOU L Y, WANG D Y, et al. Development and prospect of chinese deep space exploration[J]. Space International, 2018(10): 4-10.

[3] 吴伟仁,刘继忠,唐玉,等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报(中英

文),2019,6(5):405-416.

WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et. al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405-416.

[4] 李春来,刘建军,左维,等. 中国月球探测进展(2011-2020年)[J]. 空间科学学报,2021,41(01):68-75.
LI C L, LIU J J, ZUO W, et. al. Progress of China's lunar exploration(2011—2020)[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(01): 68-75.

[5] 我国载人登月任务全面启动[J]. 红外,2023,44(9):50.

[6] 欧阳阳远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展,2004(3):351-358.
OUYANG Z Y. Exploration project and development strategy[J]. Advances in Earth Science, 2004(3): 351-358.

[7] 张育林,刘红卫,蒋超,等. 地月空间发展的若干工程与技术问题[J]. 宇航学报,2023,44(4):612-632.
ZHANG Y L, LIU H W, JIANG C, et. al. Several engineering and technical issues in the development of cislunar space[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4): 612-632.

[8] 裴照宇,刘继忠,王倩,等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. 科学通报,2020,65(24):2577-2586.
PE Z Y, LIU J Z, WANG Q et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577-2586.

[9] GREEN J. The geology of the lunar base[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1963, 105(9): 491-625.

[10] GREELEY R. Lava tubes and channels in the lunar marius hills[J]. The Moon, 1971, 3(3): 289-314.

[11] RICHARD J. LEVEILLE A, DATTA S. Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: a review[J]. Planetary and Space Science, 2010, 58(4): 592-598.

[12] 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):87-100.
XIAO L, HUANG J, ZHAO W J, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. SCIENTIA SINICA Physical, Mechanics & Astronomic, 2018, 48(11): 87-100.

[13] 李清泉,李必军,陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000(5):387-392.
LI Q Q, LI B J, C J. Research on laser range scanning and its application[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2000(5): 387-392.

[14] 马洪超. 激光雷达测量技术在地学中的若干应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2011,36(2):347-354.
MA H C. Review on applications of LiDAR mapping technology to geosciences[J]. Earth Science, 36(2): 347-354.

[15] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报,2017,46(10):1509-1516.
YANG B S, LIANG F X, HUANG R G. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1509-1516.

[16] 段政,邢光福,朱祥,等. 琼北地区第四纪熔岩隧道群研究:形态学及其比较行星学意义[J]. 岩石学报,2023,39(8):2347-2364.
DUAN Z, XING G, F, ZHU X K, et al. Quaternary lava tubes in northern Hainan Island: morphology and significance of comparative planetology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(8): 2347-2364.

[17] GARRY W B, HUGHES S S, NAWOTNIAK S E, et al. Planetary

- exploration of lava tubes with Lidar at Craters of the Moon, Idaho[C]//National Aeronautics and Space Administration: Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas, USA: [s. n.]:2017.
- [18] BELL JR E, SCHMERR N, YOUNG K, et al. Field mapping and modeling of terrestrial lava tube magnetic anomalies as an analog for lunar lava tube exploration and prospecting[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(6): e2021JE007140.
- [19] TOMASI I, MASSIRONI M, MEYZEN C M, et al. Inception and evolution of La Corona Lava Tube System (Lanzarote, Canary Islands, Spain)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(6): e2022JB024056.
- [20] 董跃龙. 海口石山火山群典型熔岩隧道调查研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2022.
DONG Y L. Investigation on typical lava tunnels of Shishan Volcanic Group in Haikou[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2022.
- [21] 杨雪娇. 点云的边界提取及角点检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
YANG X J. Research on the algorithms of point cloud boundary extraction and corner detection[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [22] HU Q, YANG B, XIE L, et al. RandLA-Net: efficient semantic segmentation of large-scale point clouds[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). [S. l.]: IEEE, 2020: 11108-11117.
- 作者简介:
杜雨萌(2002-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 点云数据智能处理与应用。
通信地址: 广东省珠海市香洲区唐家湾镇大学路2号中山大学测绘科学与技术学院(519082)
E-mail: duym9@mail2.sysu.edu.cn
陈一平(1983-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 点云数据智能处理与应用。本文通信作者。
通信地址: 广东省珠海市香洲区唐家湾镇大学路2号中山大学测绘科学与技术学院(519082)
E-mail: chenyp79@mail.sysu.edu.cn
张吴明(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 三维信息获取与处理研究。
通信地址: 广东省珠海市香洲区唐家湾镇大学路2号中山大学测绘科学与技术学院(519082)
E-mail: zhangwm25@mail.sysu.edu.cn

Three-Dimensional Detection and Morphological Study of Lava Tubes on Extraterrestrial Bodies

DU Yumeng, CHEN Yiping, ZHANG Shuai, ZHANG Wuming

(School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: For the detection of lava tubes on extraterrestrial bodies, this paper utilizes LiDAR technology to conduct field surveys on lava tubes in the Shishan Volcanic Cluster area of Haikou City, which has a high degree of similarity with the Moon and Mars. It also proposes a skylight detection method based on grid division and applies a crack detection method based on data enhancement and multi-scale feature learning network to detect the internal structure of the lava tube and study its morphology. The interior of the lava tubes is scanned in all directions using a portable handheld laser scanner in the first. Based on the high-precision point cloud data obtained by measurement, this paper completes a three-dimensional model using the ContextCapture software, and some special miniature geomorphic like skylight in the tube and the tubes' inner fissure is detected and extracted automatically. The experimental results show that the laser scanner combined with point cloud processing software and program can efficiently, intuitively and truly restore the morphology and structure of the lava tube, conduct quantitative analysis, and detect the special miniature geomorphology in the tube.

Keywords: lava tube; extraterrestrial base; three-dimensional modeling; morphological analysis

Highlights:

- This paper firstly utilizes the high-resolution laser scanner to conduct a high efficiency detection of the lava tube and complete a 3D model based on the high precision point cloud data.
- This paper proposes a skylight detection method based on grid division, which provides exploration value for human entering the interior of the lava tube.
- This paper applies a crack detection method based on data enhancement and multi-scale feature learning network, which provides references for the texture trend in lava tubes and disaster prediction.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]