

基于轻量型移动测量系统的地外熔岩管 3D探测与地表验证

赵昕¹, 梁福逊², 李健平², 陈一平³, 杨必胜²

(1. 武汉大学 计算机学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;
3. 中山大学 测绘科学与技术学院, 珠海 519082)

摘要: 熔岩管广泛存在于地球及地外天体, 可为人类未来登陆地外天体提供天然庇护, 地外熔岩管探测具有重要意义。然而, 熔岩管探测存在许多挑战, 已有的地球熔岩管探测方案设备不便携、自动化程度和工作效率低, 难以用于地外熔岩管探测。针对上述问题, 提出一种基于轻量型移动测量系统的熔岩管3D探测方法, 利用穿戴式设备实现高效精细的地图构建和三维形态表达, 并通过地球熔岩管探测进行验证。首先利用激光扫描高效获取熔岩管内点云, 并基于迭代卡尔曼滤波算法生成熔岩管3D点云实时地图。然后结合地面滤波、管道壁提取、法向量估计等点云智能处理方法, 实现熔岩管的三维智能化重建, 并作形态学分析。选取海南省海口市的仙人洞及七十二洞作为地外熔岩管的模拟场景进行实验, 结果表明, 所提方法实现了熔岩管3D实时自主测图, 生成的点云地图及3D模型相比于已有研究结果更精准、地貌形态细节信息更多, 可更好地满足熔岩管的形态分析需求, 有望为地外熔岩管探测提供基础。

关键词: 熔岩管; 轻量型移动测量系统; 激光点云; 三维建模; 形态学分析

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0385-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230143

引用格式: 赵昕, 梁福逊, 李健平, 等. 基于轻量型移动测量系统的地外熔岩管3D探测与地表验证[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 385-393.

Reference format: ZHAO X, LIANG F X, LI J P, et al. 3D detection of extraterrestrial lava tunnels based on lightweight mobile measurement system and surface verification on Earth[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 385-393.

引言

半个多世纪以来, 为探寻地外生命及人类宜居地, 多国相继组织开展了深空探测领域的重大科学与工程项目^[1-3]。研究表明, 月球和火星上存在大量熔岩管, 环境相对封闭, 结构稳定, 为外星探测基地建设提供了理想选址, 是深空探测的重要研究对象^[4-10]。

针对地外熔岩管常用的探测手段有光学影像探测^[11]、重力探测^[12-13]及雷达探测^[14-15]等。地外熔岩管形态通常是一条蜿蜒曲折的曲线通道, 且在部分区域存在着陷坑, 因此有学者通过在光学影像上寻找类似的连续曲线或者不规则塌陷来识别熔岩管^[11]。Chappaz等^[13]对月球进行了重力场探测, 并基于实测的重力异常估算了地下熔岩管的形态。Carrer等^[15]提出了利用雷达探测熔岩管的理论模型。然而, 国内外尚未有对地外熔岩管内部进行实地勘察与采样的工作^[10], 仅提出

利用轨道器、着陆器及洞穴机器人联合探测的设想方案^[9]。

相关研究表明, 地球和地外熔岩管形成机理相似, 火山喷发时, 高温岩浆在流动过程中, 黏度低的玄武质岩浆边流动边冷却, 在熔岩流表面固结成一定厚度的外壳, 形成绝热保护层, 使得内部岩浆以高温状态不断流动, 最终形成中空的管道, 即熔岩管。由于月球及火星等星球的表面重力较地球小, 其形成的熔岩管规模更大^[9]。因此, 通过对地球熔岩管的探测开展比较行星学研究, 有助于加深对月球和火星等星体上熔岩管的认知^[16-17]。

目前, 针对地球上的熔岩管探测方案有基于传统测绘^[18]、基于激光雷达^[19]、基于地质雷达^[20-21]等。董跃龙等^[18]采用传统测绘的方式对海口石山火山群地质公园周围的熔岩管进行探测, 并得到了手绘的地质结

构图。Santagata等^[19]对科罗娜 (Corona) 熔岩管的陆地部分进行了测量, 利用徕卡P40激光扫描仪采集了约5 km长的管道点云数据。浦长龙等^[20]采用地质雷达探测了镜泊湖世界地质公园熔岩管。上述方案虽然实现了地球熔岩管的探测制图与分析, 但其中所用传感器复杂, 自动化程度低, 获取数据效率低, 且难以实现对管道的完整覆盖, 不能支持精准的形态学分析, 也难以用于地外熔岩管的内部探测。对于地外熔岩管探测, 仍缺少一种自动化程度高, 可搭载在机器人等小型平台, 高效获取熔岩管内部地貌构造的探测方案。

针对上述问题, 本文提出一种基于轻量型移动测量系统WHU-Helmet^[22]的熔岩管3D探测与智能化形态分析方法, 利用激光扫描系统获取熔岩管的三维点云, 并基于迭代卡尔曼滤波实时构建全局点云地图。然后通过点云数据智能处理方法重建熔岩管3D模型, 并进行形态学分析。该移动测量系统轻便易携、作业方便, 可以搭载在机器人、机器狗等小型平台上。激光扫描不依赖环境光照, 点云实时优化保障点云数据质量, 可实现无人的自动化探测。点云智能处理方法与专家知识结合, 充分发掘3D数据潜力, 实现熔岩管形态学分析的自动化、语义化^[23]。地表验证结果表明, 该方案较好实现了地球熔岩管内部的无人探测, 可为后续的地外熔岩管探测方案提供参考。

1 方法

1.1 轻量型移动测量系统WHU-Helmet

1.1.1 装备与测量原理

为实现熔岩管的高效探测, 本文采用WHU-Helmet移动测量系统^[22], 该系统由武汉大学杨必胜团队研发, 具有成本低、轻量化、采集精度高等特点, 经验证在地下管道、地铁站、山区等复杂环境下的测量精度可达20 cm^[24], 十分适合熔岩管探测。

系统硬件组成如图1所示, 该系统搭载激光雷达、惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU)、相机。其中, IMU用于估计测量平台的姿态变化和位置变化, 减少探测过程中剧烈运动的影响。激光雷达和相机用于获取地物的几何信息和纹理信息。为保证获取地物正确坐标, 所有传感器进行时间同步^[25]。头戴式测量系统体积小、重量轻, 单个测量人员即可完成作业任务。

WHU-Helmet扫描系统^[26]通过建立世界坐标系 (F_W)、载体坐标系 (F_B) 以及雷达坐标系 (F_L)

3个坐标系之间的转换关系, 准确获取目标点的三维坐标。其中, 世界坐标系即建图坐标系, 在采集过程中固定不变, 通常参考初始帧设置; 载体坐标系是测量平台所在坐标系, 一般设置为与IMU三轴对齐; 激光雷达坐标系用于记录测量点与激光雷达的相对位置。由于作业过程中存在运动, 不同时刻采集的点云需要统一转换至世界坐标系再进行处理。先利用IMU等传感器的输出值, 获取 t 时刻载体在世界坐标系中的位置 $r_B^W(t)$ 及姿态 $R_B^W(t)$, 再根据事先标定的杆臂值 r_L^B 及安置角 R_L^B , 得到激光雷达测量的任意一点 r_p^L , 在全局坐标系下的坐标

$$r_p^W = R_B^W(t)R_L^B r_p^L + R_B^W(t)r_L^B + r_B^W(t) \quad (1)$$



图1 WHU-Helmet移动测量系统硬件图

Fig. 1 Hardware diagram of WHU-Helmet mobile measurement system

1.1.2 实时地图构建

实时点云地图的构建包括数据预处理、滤波优化以及构建地图等步骤, 流程如图2所示。

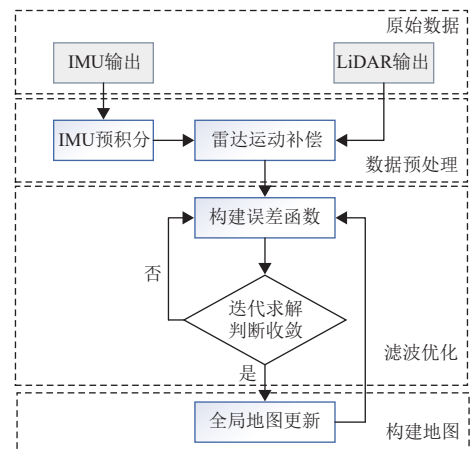


图2 实时点云地图构建流程图

Fig. 2 Workflow of point cloud map construction

1) 数据预处理: 由于激光雷达与测量目标间相对运动, 导致地物位置测量误差, 也即运动畸变。利用单帧激光扫描时间内的IMU数据对激光雷达进行补

偿, 将雷达单帧点云统一到初始时刻位置, 从而消除激光雷达的运动畸变。

激光雷达的测量频率高于IMU的测量频率, 因此, 采用预积分法获取激光雷达单帧扫描时间内的IMU数据^[27]。同时, 利用IMU提供的平台姿态, 得到地物在世界坐标系下的坐标。测量系统在 t_i 时刻到 t_{i+1} 时刻的相对位置关系可利用式(2)、式(3)求得

$$\mathbf{r}_B^W(t_{i+1}) = \mathbf{r}_B^W(t_i) + \mathbf{v}_B^W(t_i)\Delta t - \frac{1}{2}\mathbf{g}^W\Delta t^2 + \mathbf{R}_B^W(t_i)^T \left(\iint_{t \in [t_i, t_{i+1}]} [\mathbf{R}_B^W(t)(\hat{\mathbf{a}}(t) - \mathbf{b}_a(t))] dt^2 \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_B^W(t_{i+1}) = \mathbf{v}_B^W(t_i) - \mathbf{g}^W\Delta t + \mathbf{R}_B^W(t_i)^T \left(\int_{t \in [t_i, t_{i+1}]} [\mathbf{R}_B^W(t)(\hat{\mathbf{a}}(t) - \mathbf{b}_a(t))] dt \right) \quad (3)$$

2) 滤波优化: 已有LiDAR-SLAM系统中一般采用基于特征的方式^[28]实现帧与帧之间的配准, 但是在熔岩管中, 地形复杂且特征相近, 局部特征的有效性难以保障。为确保建图精度, 本文将若干相邻帧合并构成子图, 基于载体坐标系和世界坐标系的转换关系将子图转换至世界坐标系下, 采用最近邻的方式选取子图与全局地图的对应点, 进而构建误差函数, 并基于迭代卡尔曼滤波进行后端优化^[29]。

3) 构建地图: 当后端优化结果满足收敛条件时, 将子图融合到全局地图中, 使全局地图随着探测过程实时更新。

1.2 基于点云的熔岩管3D建模

熔岩管具有较强的封闭性, 内部地貌变化缓慢, 但在其演化过程中仍会存在一些特殊地貌, 例如出现塌陷, 形成落石堆。针对实验区域, 本文在熔岩管3D建模时考虑三种地物语义类型: 地面、管道壁、落石堆。熔岩管的建模与分析包括点云地图预处理、三维建模及形态学分析等步骤, 处理流程如图3所示。

1) 数据预处理: 点云地图中存在的噪点, 将影响3D模型的生成质量, 首先采用统计异常值去除算法(Statistical Outlier Removal, SOR)^[30]进行去噪, 假设所有点符合高斯分布, 利用K-D树计算每个点到 k 近邻点的距离, 并得到平均距离和方差, 基于平均距离和方差定义一个“正常范围”, 将平均点间距在正常范围外的点视为离群点, 予以剔除。

2) 三维建模: 在完成数据预处理后, 首先分别提取地面、落石堆和管道壁。由于地面、管道壁及落石堆具有不同的形态结构, 在完成噪点滤除后, 进行地面滤波, 并采用连通性分析进一步分离落石堆和管道

壁。采用布料模拟滤波(Cloth Simulation Filter, CSF)^[31]算法进行地面滤波, 得到地面点云。然后, 采用连通性分析分别提取落石堆和管道壁点云, 地面点云与管道壁点云共同围成管道的主体形态。为更准确地重建场景, 本文对落石堆进行单独建模, 并与地面和管道壁的建模结果一起, 以形成完整的熔岩管三维模型。

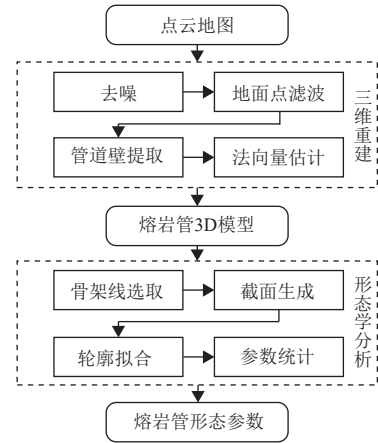


图3 熔岩管3D建模
Fig. 3 Lava tunnel 3D modeling

获得不同语义的点云后, 采用法向量估计、泊松重建方法, 构网建立3D模型。由于落石堆的存在, 地面点云中可能存在漏洞, 通过插值进行漏洞填补。法向量估计采用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)方法^[32]。对于任意点, 搜索并记录半径 R 范围内的点构成近邻点集, 利用近邻点集的三维坐标构建协方差矩阵

$$\mathbf{Cov}(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} \mathbf{Cov}(X, X) & \mathbf{Cov}(X, Y) & \mathbf{Cov}(X, Z) \\ \mathbf{Cov}(Y, X) & \mathbf{Cov}(Y, Y) & \mathbf{Cov}(Y, Z) \\ \mathbf{Cov}(Z, X) & \mathbf{Cov}(Z, Y) & \mathbf{Cov}(Z, Z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{Cov}(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (5)$$

其中: X 、 Y 、 Z 为近邻点集的三维坐标集合。利用奇异值分解协方差矩阵获得特征向量及特征值: n_1 、 n_2 、 n_3 (对应特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)。法向量方向近似为 n_3 的方向。进行法向量一致性检验, 剔除局部区域内与其它法向量差异过大的法向量之后, 利用三角面片构网, 进一步拟合曲面, 最终实现熔岩管的3D重建, 并进行可视化渲染。

为了更好地展示数据处理结果, 本文依次利用

天空可见度 (Portion of Visible Sky, PVS)、高程值、法向量方向、格网密度等方式对数据进行可视化渲染。

3) 形态学分析: 在得到熔岩管的三维模型后, 利用格网收缩算法^[33], 提取熔岩管的骨架线; 然后根据骨架线和熔岩管点云生成截面, 并对每个截面进行曲线拟合, 得到截面形态曲线, 再依次计算管道各截面的洞高、洞宽等形态参数, 并进行形态学分析。

2 实验与分析

2.1 实验区域

地外熔岩管在形成机理及管道结构上与地表熔岩管类似, 因此本文选取海口石山火山群地质公园的仙人洞和七十二洞作为验证场景, 进行实地探测与数据分析, 用于检验探测方案的科学性与有效性。数据采集相关信息见表1。

表1 熔岩管探测概况

Table 1 Overview of lava tunnel detection

名称	采集时间	耗时/min	范围/(m×m)	典型特征
仙人洞	2023/03/24	15	306 × 59	落石堆、天窗
七十二洞	2023/03/23	30	111 × 62	落石堆、天生桥、天窗

仙人洞熔岩管位于石山镇荣堂村北侧, 管道整体成曲线状且无分岔口, 内部有大型落石堆, 存在多处小范围塌陷或气洞。本文采集了仙人洞较完整的点云数据, 探测长度约300 m, 耗时约15 min, 其洞内情况如图4所示。



图4 仙人洞示意图

Fig. 4 Diagrammatic sketch of Xianren Cave

七十二洞位于石山镇荣堂村附近, 管道被塌陷分割为多段, 形成了散落状的地下区域, 地上部分有较多植被和居民区, 管道内存在多处塌陷, 地貌特征丰富。本文采集了七十二洞局部区域, 耗时约30 min, 其洞内情况如图5所示。



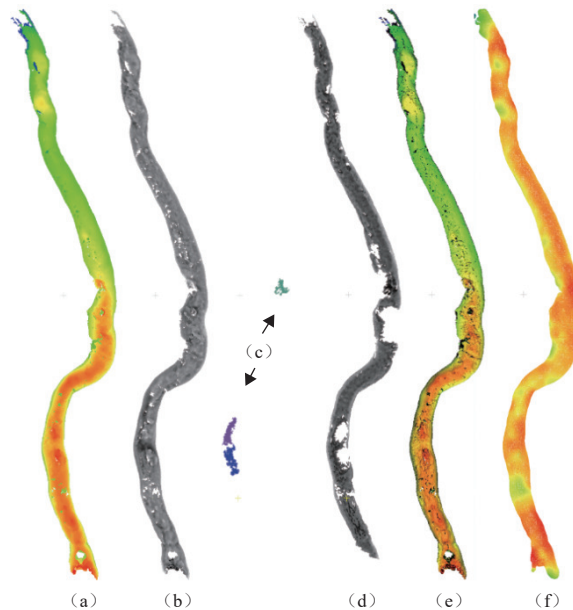
图5 七十二洞示意图

Fig. 5 Diagrammatic sketch of Seventy-Two Cave

2.2 实验结果

2.2.1 仙人洞

根据本文方法处理仙人洞数据, 部分结果如图6所示。图6 (b) 表明所提取的管道壁较为完整, 而图6 (d) 显示所提取的地面点云出现了空洞, 一方面由于落石堆点云已被滤除, 另一方面由于扫描视角的限制导致一些区域点密度过稀, 在进行地面滤波时相应区域也被剔除。图6 (c) 表明, 仙人洞管道中存在3处落石堆, 其中两处距离较近。图6 (e) 和图6 (f) 分别展示了管道表面法向量估计和表面三维重建的可视化结果。



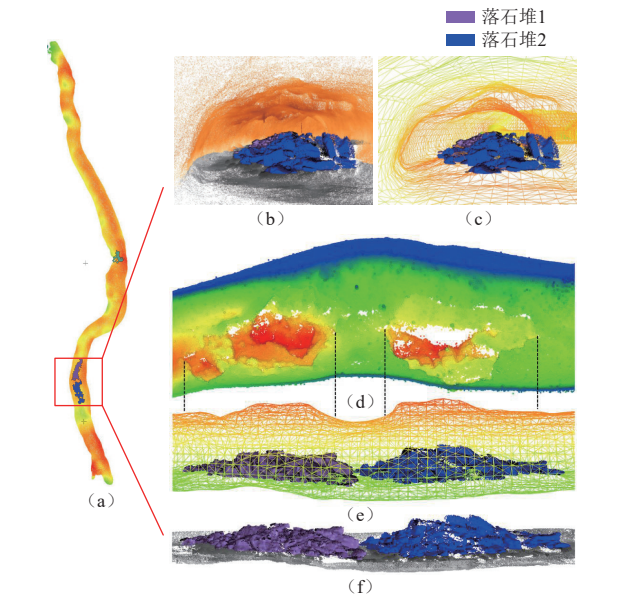
(a) 原始点云 (高程赋色); (b) 管道壁 (PVS赋色); (c) 落石堆 (语义标签赋色); (d) 地面 (PVS赋色); (e) 法向量估计 (法向量赋色); (f) 表面三维重建 (格网密度赋色)

图6 仙人洞点云数据处理结果

Fig. 6 Processing results of Xianren Cave

图7展示了熔岩管内落石堆所在的局部区域, 从图7 (b) 和图7 (c) 可见, 此处的两个相邻落石堆基本覆盖了地面, 在落石堆的左侧留有空隙。图7 (d)

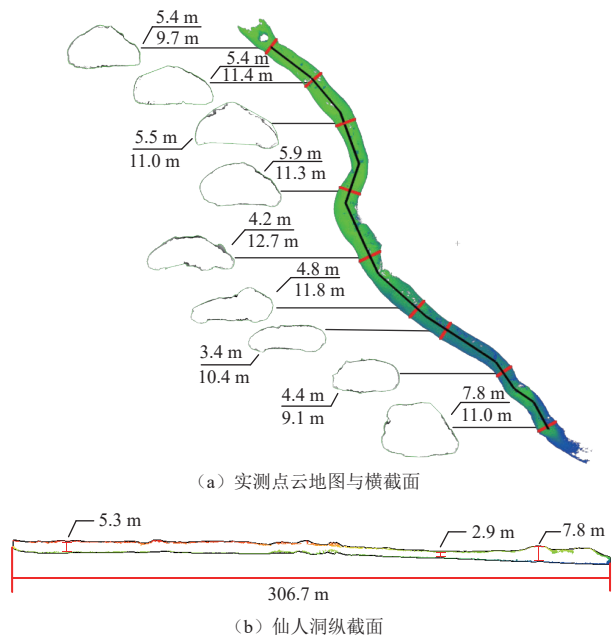
表明两处落石堆的上方均有塌陷, 塌陷范围与落石堆存在显著的对应关系。图7 (e) 和图7 (f) 侧视角显示, 落石堆的高度约为洞高的一半。



(a) 仙人洞三维模型; (b) 落石堆点云正视图; (c) 落石堆模型正视图; (d) 落石堆顶部塌陷; (e) 落石堆点云侧视图; (f) 落石堆模型侧视图

图 7 仙人洞局部落石堆
Fig. 7 Rockfall of Xianren Cave

仙人洞的形态参数估计结果如图8所示。图8 (a) 展示了仙人洞实测点云图及若干横截面结构图, 其中管道中心的黑色线为骨架线。管道沿骨架线长度约



(a) 实测点云地图与横截面

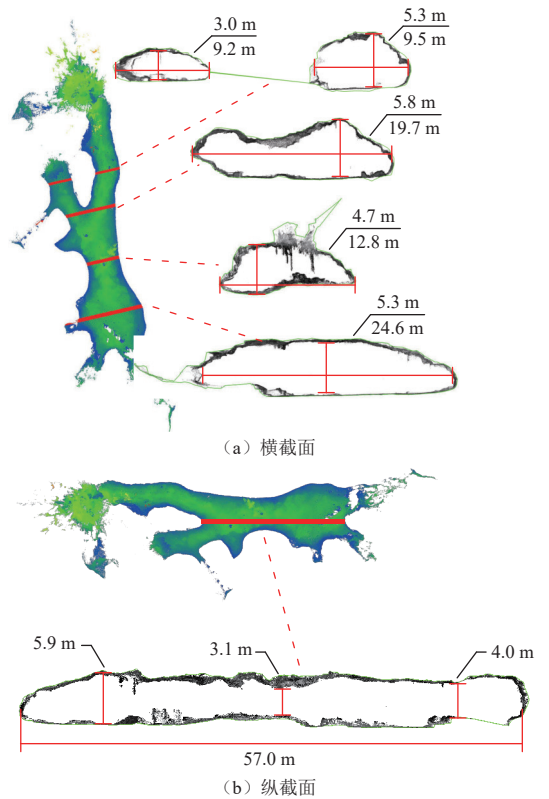
(b) 仙人洞纵截面

图 8 仙人洞实测图
Fig. 8 Xianren lava tunnel

310 m, 入口处天窗直径约 4 m, 管道内宽度变化较小, 平均宽度在 10 m 左右, 高度大致在 3~7 m 之间。红色线段标注了展示的横截面在管道中的位置。为了研究管道的高程变化, 本文沿骨架线切割, 获得了图8 (b) 所示的纵截面, 测得仙人洞的洞高最低处约为 2.9 m, 最高处约为 7.8 m。

2.2.2 七十二洞 (局部)

七十二洞 (局部) 的形态学参数如图9所示。探测区域存在一个典型分岔结构, 主线长度约 100 m, 最宽处约 20 m (图9 (a)), 最高处约 6 m (图9 (b)), 管道内在宽度和高度上均有较大变化, 地貌特征丰富。在实验区域内, 还存在着天窗、天生桥、落石堆等构造, 如图10所示, 两个紧邻的天窗中间形成了天生桥, 而在天窗的下方, 均有落石堆。



(a) 横截面

(b) 纵截面

图 9 七十二洞 (局部) 截面图
Fig. 9 Cross sections of Seventy-Two Cave (partial)

2.3 分析讨论

为验证提出方法在探测精度和形态刻画方面的优势, 本文分别进行了点云内符合精度评估实验, 以及与已有研究结果的对比实验。

2.3.1 点云内符合精度评估

仙人洞管道内部较长且无分叉口, 探测时往返路

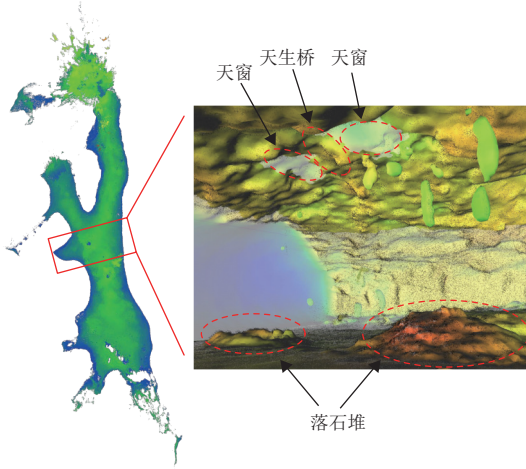


图 10 七十二洞 (局部) 特殊地貌

Fig. 10 Special landforms of Seventy-Two Cave (partial)

径完全重叠。将往返观测获取的点云地图作为两次独立测量结果进行比较,可以直观地反映出本文方法获取点云的内符合精度。本文采用点云到点云 (Cloud to Cloud, C2C) 距离作为误差衡量的标准,以往测点云为参考,计算返测点云到往测点云的C2C距离,评估两张地图的相对位置精度,从定性和定量的角度验证WHU-Helmet测量系统获取的数据可靠性。

图11展示了定性对比的结果,其中图11 (a) 为往返点云的C2C距离误差,由蓝到红误差逐渐增大,从图中可以发现,红色区域较少且集中在几个局部,整体上两份点云相对误差较小。以图11 (a) 中红框区域为例,图11 (b)、(c) 分别为该区域的往测点云和

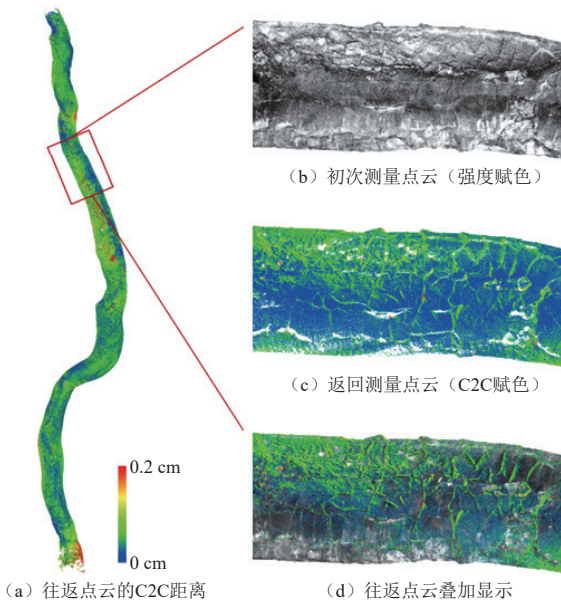


图 11 仙人洞往返测点云地图对比

Fig. 11 The comparison of round-trip point cloud maps for the Xianren Cave

返测点云,图11 (d) 为往返点云叠加显示,叠加结果表明两者在裂隙等纹理明显的细节区域重合度非常高,相对误差基本在0.1 m以下。

在定量分析方面,本文统计了所有点的C2C距离分布,结果如图12所示。统计结果显示,往返测地图的C2C距离误差平均值约4.9 cm,且大部分重访点的相对位置精度低于0.1 m,表明WHU-Helmet采集的点云数据达到了很好的内符合精度。

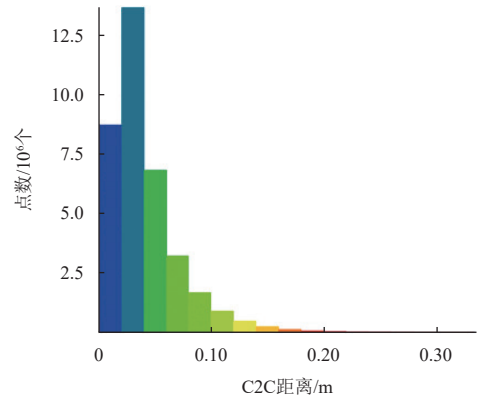


图 12 仙人洞往返测点云地图误差统计

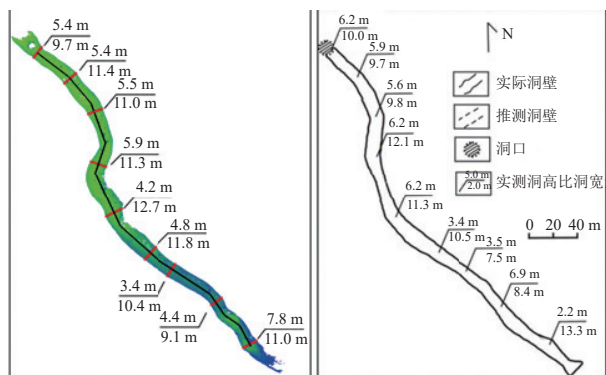
Fig. 12 Statistical Analysis of round-trip point cloud mapping errors in the Xianren Cave

2.3.2 已有研究结果对比

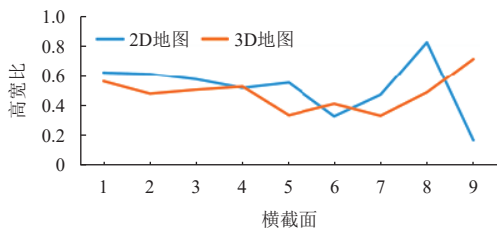
现有研究中,董跃龙等^[18]采用实地调查与激光测距仪、经纬仪、测高仪等传统测绘设备辅助的方式,对仙人洞进行探测并绘制了2D展布图 (图13 (b))。与本文的实测3D地图 (图13 (a)) 进行对比,人工测图结果在管道方向拐点处、宽度变化等区域细节缺失较多,更适于做定性展示,而难以用于定量参考。

本文选取图13 (b) 中标注高宽比的9个位置 (3D截面图细节见图8 (a)), 计算9个截面的高宽比并进行对比,图13 (c) 表明,虽然两种测图方式得到的高宽比整体变化趋势接近,部分位置的差值仍大于0.15。一方面,由于2D测图效率较低,仅能取少数横截面进行测量,且测量时存在较大定位模糊,导致记录的高宽值与标注位置难以准确对应。另一方面,本文方法全面记录了管道内的3D信息,可以基于重建结果获取任意位置的横截面测量统计,为研究人员提供更准确更详细的数据支持。

本文进一步统计了仙人洞的洞高、洞宽详细变化,如图14所示,其中图14 (a)、(b) 分别为洞高洞宽变化及高宽比统计。整体而言,仙人洞具有典型的管道状截面,洞宽始终大于洞高,平均高宽比约为0.48,截面多为拱形,洞宽变化幅度相比洞高更大。



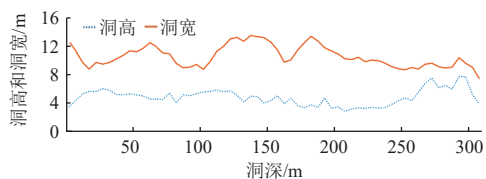
(a) 实测3D地图 (b) 已有2D地图



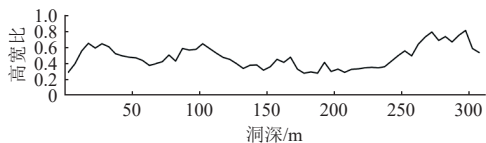
(c) 标注位置的高宽比值对比

图 13 与现有测量结果对比

Fig. 13 Comparison with existing results



(a) 洞高洞宽



(b) 高宽比

图 14 仙人洞洞高洞宽统计

Fig. 14 Xianren Cave cave height and width statistics

3 结 论

月球及火星的熔岩管探测是深空探测中的一项重要科学任务, 然而目前仍缺少对地外熔岩管内部的有效探测方案。本文提出了基于轻量型移动测量系统的熔岩管3D探测方案, 该方案采用的探测设备体积小, 质量轻, 可搭载在机器人等小型平台, 实现对地外熔岩管的联合探测。方案所提供的点云地图构建及三维模型生成的自动化程度高, 可以高效获取洞穴内部构造。本文以海口仙人洞和七十二洞熔岩管模拟地外熔岩管场景进行实验, 实验结果表明, 轻量型移动测量系统能快速获取可靠的熔岩管3D信息, 有效提升测量效率, 可以支持对熔岩管的短期内重复观测。熔岩管的自动化3D重建以点云地图为输入, 得到的三维模型

相较于传统测图结果具有精度更高、信息更丰富的优点, 可视化结果更清晰, 为精准的形态学分析和进一步的地质地貌分析提供了良好基础。本文提供的探测方案可以便捷地部署到洞穴机器人端, 作为探测模块为后续的探测工作提供可靠的数据分析与技术支持。

参 考 文 献

[1] 栾恩杰. 特约稿: 探索浩瀚宇宙建设航天强国——纪念中国深空探测12周年[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 295-306.
 LUAN E J. The rising China space heading for the endless universe[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 295-306.

[2] 王亦, 张贤国, 徐欣锋, 等. 中国月球及深空空间环境探测[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(2): 105-118.
 WANG C, ZHANG X G, XU X F, et al. The lunar and deep space environment exploration in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(2): 105-118.

[3] 董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(2): 99-114.
 DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.

[4] 于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 307-314.
 YU D Y, WU X Y, WU W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 307-314.

[5] 叶培建, 于登云, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器的成就与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 323-333.
 YE P J, YU D Y, SUN Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 323-333.

[6] 于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(2): 108-113.
 YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 108-113.

[7] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(5): 406-413.
 LI C L, LIU J J, GENG Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 406-413.

[8] HARUYAMA J, SAWAI S, MIZUNO T, et al. Exploration of lunar holes, possible skylights of underlying lava tubes, by smart lander for investigating moon (slim)[J]. Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2012, 10(Gists28): Pk_7-Pk_10.

[9] 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 J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48(11): 87-100.

[10] 周昶宇, 周米玉, 徐聿升, 等. 月面地貌勘察重建及其在熔岩管探测中的应用与展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(1): 34-48.

- ZHOU C Y, ZHOU M Y, XU Y S, et al. Lunar topographic survey and reconstruction and its application in lava tube exploration[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(1): 34-48.
- [11] LÉVEILLÉ R J, 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] BILLS B G, FERRARI A J. A lunar density model consistent with topographic, gravitational, librational, and seismic data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(8): 1306-1314.
- [13] CHAPPAZ L, SOOD R, MELOSH H J, 等. Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 105-112.
- [14] KAKU T, HARUYAMA J, MIYAKE W, 等. Detection of intact lava tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10155-10161.
- [15] CARRER L, GEREKOS C, BRUZZONE L. A multi-frequency radar sounder for lava tubes detection on the Moon: design, performance assessment and simulations[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 152: 1-17.
- [16] 耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务[J]. *深空探测学报 (中英文)*, 2018, 5(5): 399-405.
- GENG Y, ZHOU J S, LI S, et al. A Brief introduction of the first Mars exploration mission in China[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 399-405.
- [17] 段政, 邢光福, 朱祥坤, 等. 2023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.
- [18] 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, 2021.
- DONG Y L. Investigation on typical lava tunnels of Shishan Volcanic Group in Haikou[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2021.
- [19] SANTAGATA T, SAURO F, MASSIRONI M, et al. Subsurface laser scanning and photogrammetry in the Corona lava tube system[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Lanzarote, Spain: [s. n.], 2018: 5290.
- [20] 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. The application of ground penetrating radar to lava tunnel survey of the lake Jingpo-world geological park[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2015, 12(1): 117-121.
- [21] MIYAMOTO H, HARUYAMA J, ROKUGAWA S, et al. Acquisition of ground penetrating radar data to detect lava tubes: preliminary results on the Komoriana cave at Fuji volcano in Japan[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2003, 62: 281-288.
- [22] LI J, WU W, YANG B, et al. WHU-Helmet: a helmet-based multi-sensor SLAM dataset for the evaluation of real-time 3D mapping in large-scale GNSS-denied environments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-16.
- [23] YANG B, LIANG F, HUANG R. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1509.
- [24] LI J, YANG B, CHEN Y, et al. Evaluation of a compact helmet-based laser scanning system for aboveground and underground 3D mapping[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, 43: 215-220.
- [25] LI J, YANG B, CHEN C, et al. NRLI-UAV: non-rigid registration of sequential raw laser scans and images for low-cost UAV LiDAR point cloud quality improvement[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 158: 123-145.
- [26] LI J, YANG B, YANG Y, et al. Real-time automated forest field inventory using a compact low-cost helmet-based laser scanning system[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 118: 103299.
- [27] QIN T, LI P, SHEN S. Vins-mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 1004-1020.
- [28] ZHANG J, SINGH S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time[J]. *Robotics: Science and Systems*, 2014, 2(9): 1-9.
- [29] XU W, CAI Y, HE D, et al. Fast-lid2: fast direct lidar-inertial odometry[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(4): 2053-2073.
- [30] RUSU R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[J]. *Künstl Intell*, 2010, 24: 345-348.
- [31] ZHANG W, QI J, WAN P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 501.
- [32] DONG Z, YANG B, LIU Y, et al. A novel binary shape context for 3D local surface description[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 431-452.
- [33] AU O, TAI C, CHU H, et al. Skeleton extraction by mesh contraction[J]. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 2008, 27(3): 1-10.
- 作者简介:
赵昕(1998-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 多传感器融合SLAM。
通信地址: 武汉大学计算机学院(430072)
E-mail: xinzhaodc@whu.edu.cn
陈一平(1983-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 激光雷达遥感、智能三维点云处理、遥感图像处理等。
通信地址: 中山大学测绘科学与技术学院(519082)
E-mail: chenyp79@mail.sysu.edu.cn
杨必胜(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 三维地理信息获取与分析等。本文通信作者。
通信地址: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室(430079)
E-mail: bshyang@whu.edu.cn

3D Detection of Extraterrestrial Lava Tunnels Based on Lightweight Mobile Measurement System and Surface Verification on Earth

ZHAO Xin¹, LIANG Fuxun², LI Jianping², Chen Yiping³, Yang Bisheng²

(1. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Lava tunnels widely exist on planets and satellites, which can provide natural shelter for humans to land on in the future. Research on lava tunnels is of great significance. However, there are many challenges in extraterrestrial lava tunnel detection. Existing terrestrial lava tunnel detection schemes have devices that are not portable, with low levels of automation and work efficiency, and cannot be directly applied to the detection of extraterrestrial lava tunnels. To address the above problems, this paper proposes a 3D detection method for extraterrestrial lava tunnels based on the lightweight mobile measurement system, achieving efficient and detailed mapping as well as 3D morphology of lava tunnels, and carries out the verification in Earth lava tunnels. First, laser scanning is used to obtain the point cloud in the lava tunnel efficiently, and the 3D point cloud map of the tunnel is generated based on the iterative Kalman filtering algorithm. Subsequently, through point cloud processing methods such as ground filtering, tunnel wall extraction, and normal vector estimation, the 3D reconstruction of lava tunnels is achieved, followed by morphological analysis. This paper selects the Xianren Cave and Qishier Cave in Haikou, Hainan Province, as simulation scenarios for extraterrestrial lava tunnels to conduct experiments. Experiments indicate that the proposed method realizes real-time autonomous 3D mapping of lava tunnels. The generated point cloud maps and 3D models are more accurate and contain more detailed terrain information compared to existing research results. These indicate the proposed method better meets the morphological analysis needs of lava tunnels and provides a foundation for the in-depth study of extraterrestrial lava tunnels.

Keywords: lava tunnel; lightweight mobile measurement system; laser point cloud; 3D modeling; morphological analysis

Highlights:

- This paper utilizes the lightweight mobile measurement system to achieve efficient real-time detection of lava tunnels.
- This paper separates the ground, tunnel walls, and rockfall debris based on intelligent point cloud processing methods, achieving semantic segmentation of the lava tunnels.
- This paper constructs a 3D model of the lava tunnel based on point clouds, which is utilized for 3D morphological analysis. Compared to previous research, the detection results are better expressed and demonstrate higher accuracy.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]