

熔岩管探测的定位方法

寇玉珂^{1,2}, 万文辉¹, 邸凯昌¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感与数字地球重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对月球熔岩管内定位, 选取海南省海口石山火山熔岩洞作为模拟月球熔岩管实验区域, 利用立体视觉、激光雷达和IMU传感器进行模拟月球熔岩管环境下的定位实验, 应用立体视觉定位、激光扫描点云定位、视觉融合IMU定位、激光点云融合IMU以及视觉激光融合IMU定位等方法进行定位处理, 对各类方法在不同光照与地形条件熔岩管环境下定位结果的平均误差与稳健性进行对比分析。实验结果表明, 立体视觉在长距离行走模式下平均误差可达3.59%, 但平均误差与稳健性受制于光照条件; 激光雷达平均误差同视觉水平接近, 局部区域平均误差为1.89%, 但稳健性受数据采集率与视角影响; 立体视觉、激光雷达与IMU集成的定位在光照与地形起伏十分恶劣的熔岩管区域内取得了稳健定位结果, 是进行长距离连续定位的优先选择。研究结论为后续月球熔岩管探测定位传感器配置与定位方法研究提供了有益参考。

关键词: 月球熔岩管; 导航定位; 多传感器; 深空探测

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0338-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230184

引用格式: 寇玉珂, 万文辉, 邸凯昌. 熔岩管探测的定位方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 338-345.

Reference format: KOU Y K, WAN W H, DI K C. Localization methods for tube exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 338-345.

引言

月球熔岩管是月球表面以下的较长、弯曲蜿蜒的通道, 它记录了月球火山地质历史、撞击作用与空间风化历史, 通过分析其物质成分, 能够揭示月球岩浆活动性质^[1]。由于熔岩管具备巨大的可利用地下空间, 能提供温和适宜的环境和潜在的资源保障, 是建设月球基地的绝佳选择, 已被多个航天机构选为月球基地建设的优先考虑区域, 成为未来月球探测热点与前沿^[2]。

月球熔岩管存在于月表之下, 难以通过遥感手段进行直接观测, 探测难度较大。20世纪60年代, 研究人员利用月球遥感影像, 通过同地球熔岩管区域特征的对比, 提出了月海玄武岩上的蜿蜒形沟谷为熔岩管的猜想^[3]。随着遥感技术水平的不断提升, 研究人员获得了更丰富的月球熔岩管观测数据。2009年, 研究人员在“月亮女神”TC相机影像上, 发现了熔岩管上塌陷形成的天窗^[4]。随后, 在美国月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)窄角相机影像上发现了更多的熔岩管天窗^[5]。除了遥感影像, 研究人员还利用重力回溯及内部结构实验室探测器(Gravily

Recovery and Interior Laboratory, GRAIL)获取的月球重力场数据, 分析了月球熔岩管的形态^[6]。目前, 对月球熔岩管的探测均为轨道器遥感观测, 难以直接观测熔岩管内部构造与性质。随着月球基地建设任务的提出, 深入月球熔岩管内部进行近距离巡视探测成为未来熔岩管探测的趋势与热点。

目前, 月球巡视探测主要依靠月球车在月球表面进行移动探测。高平均误差定位是月球车进行环境感知分析、安全路径规划与避障等操作的前提与关键, 对月球车安全顺利实施探测任务有重要意义^[7-8]。已有的巡视探测任务中, 主要利用车载惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、里程计, 通过航迹推算方法为探测车提供连续定位。长距离行驶过程中, IMU漂移与车辆打滑会带来定位误差累积, 可通过车载相机采集的立体图像利用视觉定位方法修正误差累积。该定位方法已成功应用至美国“火星车”(Mars Exploration Rover Mission)探测任务以及中国的“嫦娥”系列与“天问一号”任务中^[9-12]。

月球熔岩管内部环境复杂, 相比月球表面地形更为崎岖, 光照条件也更为恶劣, 给月球熔岩管内的定

位处理带了更大的挑战, 已有巡视探测模式与方法在熔岩管环境下的适用性不明。地球上室内、地下矿井等复杂场景中除了视觉相机外, 还引用了激光雷达 (Light Detection and Ranging, LiDAR)、毫米波雷达及深度相机等主动三维成像传感器进行定位, 通过多传感器组合提升了定位稳健性与平均误差^[13-15]。然而, 面对月球熔岩管这类独特的非结构化复杂场景, 需要进一步分析不同传感器配置方案在月球熔岩管中的定位平均误差及稳健性表现, 为未来月球熔岩管中定位方法分析与设计提供必要基础, 对于熔岩管探测任务具有重要意义。

本文针对月球熔岩管探测的特点和挑战, 利用立体相机、激光雷达、惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 传感器设备完成模拟月球熔岩管环境下的定位试验, 分析不同传感器组合下的定位平均误差与稳健性, 为后续月球熔岩管探测器定位传感器组合方案与定位应用提供借鉴。

1 模拟月球熔岩管场景

月球熔岩管是月球火山时期火山喷发和熔岩流形成的地下通道。由于处在月表之下, 月球轨道器影像难以直接观测月球熔岩管的内部, 只能观测部分熔岩管塌陷后形成的“天窗”。研究人员综合重力异常、透地雷达及热异常探测等其它手段, 并比较了地球熔岩管特征后获得了对月球熔岩管的初步认识。目前, 月球熔岩管主要出现在玄武岩区域, 被认为是高温岩浆在地表流动过程中, 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后, 形成的中空管道。经过熔岩的不断补充与底部填充, 熔岩管形态逐渐呈现顶部圆形、底部平坦的形态, 估计其宽度为几十至几百m, 长度为几百m至几百km, 而深度达数十m^[1]。月球熔岩管内部除“天窗”附近区域, 均为永久阴影区, 无外部光照。

作为太阳系中火山活动最剧烈的天体之一, 地球上分布着广泛的熔岩管系统。海口石山火山群是国内为数不多的全新世火山喷发活动的休眠火山群之一, 在方圆 108 km 的园区内, 分布有 40 多座形态各异的火山^[16], 已发现了各具特色的火山熔岩管 30 余条^[17], 就熔岩管规模与多样性而言居国内首位。这些熔岩管同样由玄武岩构成, 宽度多在数十m, 长度由数百m至 1 km 以上, 在部分区域存在多个塌陷形成的“天窗”与塌陷谷, 内部形态丰富, 在形成机制、地质形态方面与月球上的小型熔岩管十分相似。

本文选取位于海南省海口市秀英区荣堂村

(19°56'28"N, 110°12'44"E) 的两处典型火山熔岩管——七十二洞熔岩管与仙人洞熔岩管中开展模拟月球熔岩管定位实验。其中, 七十二洞熔岩管主洞高度约3~4 m, 宽约20 m, 洞顶塌陷而成小型“天窗”及其坠石堆积, 洞入口区有呈圆形的天井式陷落坑, 洞内环境纹理信息较丰富, 洞口区域光照变化剧烈, 地形有起伏, 如图1 (a); 仙人洞熔岩管可通达长度超400余 m, 宽约15 m, 洞高约2~4 m, 狭窄处宽度约1 m, 洞内黑暗无光, 有不规则岩石堆积, 空间狭窄, 熔岩管弯曲延伸, 地形起伏较大, 无分支和“天窗”, 环境较复杂, 如图1 (b)。



(a) 七十二洞熔岩隧道

(b) 仙人洞熔岩隧道

图1 模拟月球熔岩管实验场景
Fig. 1 Simulated lunar lava tubes

2 熔岩管定位技术比较研究

为进行熔岩管定位技术比较研究, 本文在熔洞1 (七十二洞熔岩管) 和熔洞2 (仙人洞熔岩管) 中分别选取典型区段, 进行定位实验。实验中, 手持数据采集系统, 完成多段典型环境下的多传感器数据, 模拟基于多传感器的月球熔岩管内部定位实验, 验证多传感器组合定位在不同光照与地形条件下性能表现, 相应试验方案设计如图2所示。

2.1 定位数据获取

本实验中基于ZED2立体相机、Livox-Mid70激光雷达与MTI-680G惯性测量单元构建了定位数据采集系统, 如图3所示。

行驶过程中, ZED2相机视场角为120°, 以15 FPS 频率获取了尺寸为640 × 360像素的序列立体影像, 手持LED灯对前方区域进行亮度增强, 将照明区域与相机成像区域保持同步, 确保灯光照明范围覆盖立体相机成像区域, 如图4; Livox-Mid 70面阵激光雷达以大约20万点/秒速率获取前方70°视场角内激光点云数据, 如图5; MTI-680G则以200 Hz频率获取行驶过程中加速度与角速度测量数据。实验中, 在Ubuntu18.04系统的ROS Melodic平台上运行和处理数据, 将3种设备采集到的数据保存至rosvbag包中作为本文研究的原始数据, 其中立体视觉相机获取的原始图像已预先经过畸变和极线校正处理。

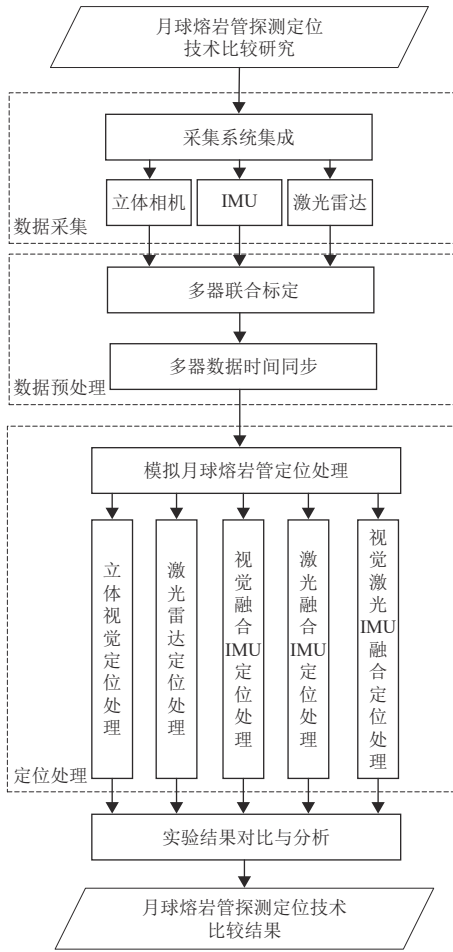


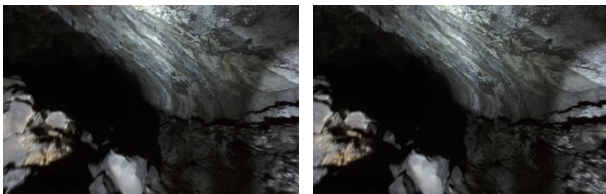
图2 月球熔岩管定位技术对比研究方案

Fig. 2 Research plan of performance comparison of localization methods in lunar lava tube



图3 数据采集系统

Fig. 3 Data acquisition system



(a) 左影像

(b) 右影像

图4 立体像对数据

Fig. 4 Stereo image data

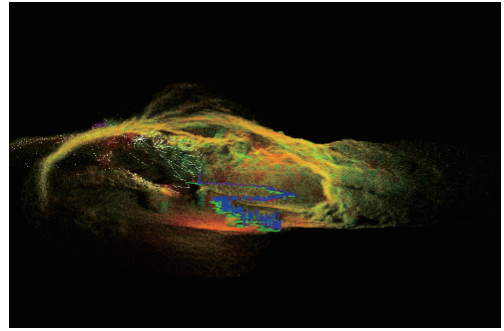


图5 激光雷达数据

Fig. 5 LiDAR data

2.2 数据预处理

针对不同器械坐标系统不一致的问题，试验开始前采用imu_utils^[18]工具包对惯性测量单元的内参数进行标定，然后使用Kalibr^[19]工具并配合标定板完成双目相机的内外参数标定以及相机和IMU外参的联合标定，再使用Lidar_align^[20]工具完成激光雷达和IMU的联合标定，从而实现多器坐标系统的统一。

基于多器之间采集频率、工作模式和采集速度不同，致使多器数据间时间基准不统一。因此，预先使用ROS时间同步模块实现立体相机、激光雷达和惯性测量单元传感器设备之间数据的时间同步，并将3类数据连同时间戳信息一同从rosvbag数据包中导出，完成实验数据时间同步预处理。

2.3 熔岩管定位对比方法

本文基于视觉、激光和IMU数据完成模拟月球熔岩管下的定位处理，对比分析不同器械组合定位平均误差与稳健性表现。实验分别在两个典型区段内通过手持设备以大约0.4 m/s前进速度，完成距离约50~300 m的数据采集。

熔洞1中的熔岩管顶部存在数个天窗，外部光线可直射进洞内，不同区域光照变化较大，但总体环境光照强度与可见度尚可。熔岩管内地形相对平坦，行走过程相对平稳。因此，在该实验区段内，同时采集立体视觉与激光扫描数据，模拟通行条件较好的熔岩管内单器定位，分别独立解算立体视觉与激光扫描数据，对比分析两类定位方法的平均误差。同时，在实验区内行走不同长度路径，验证不同长度下定位方案的稳健性。该区段中独立设备定位方法如下：

1) 立体视觉定位方法。通过相邻帧立体相机图像特征点匹配，不断解算序列立体影像位姿参数，实现连续定位。该方法利用了熔岩管内部视觉纹理信息，受环境特别是光照条件影响较大，在贫弱纹理或弱光照条件下存在定位失败可能。本文引用ORB-SLAM3^[21]算法中视觉解算模块来完成立体视觉定位处理。

2) 激光扫描点云定位方法。基于相邻帧点云间三维特征一致性, 通过点云对齐计算激光雷达位姿参数, 实现连续定位。月球熔岩管作为典型的管状结构, 具有一定的三维结构特征, 本文引用BALM^[22]算法实现激光雷达的定位探测。

熔洞2中的熔岩管无外部光照, 仅能依靠手持照明灯在洞内行进。该区段内地形十分复杂, 路面包含较大石块, 行走十分困难, 采集过程中设备抖动剧烈。针对此类光照极度缺乏、地形十分崎岖的困难区域, 本文在此环境下采集IMU数据, 分别同立体相机与激光雷达融合, 对比分析两类同惯导融合的定位方案的平均误差与稳健性。为进一步验证熔岩管环境下多器组合定位性能, 将立体视觉、激光扫描点云与IMU数据三者进行融合定位处理, 同其它两类方案一同对比分析。在该场景下中采样的定位方法如下:

(1) 视觉融合IMU定位方法。基于IMU观测数据, 预测立体相机帧间位姿变化, 结合特征点观测结果综合优化位姿参数, 能在短时视觉帧定位失败情况下输出连续定位结果, 定位稳健性较强。月球熔岩管内部环境光照条件较差, 本文引用ORB-SLAM3算法中视觉融合IMU的解算模块来实现定位。

(2) 激光点云融合IMU定位方法。基于IMU观测数据, 预测激光点云帧间位姿变化, 结合点云配准结果综合优化位姿参数, 能在短时激光点云帧配准定位失败情况下输出连续定位结果。本文引用Fast-LIO2^[23]算法实现激光融合IMU数据的定位解算。

(3) 视觉、激光融合IMU定位方法。通过IMU对帧间位姿变化初始估算, 利用立体视觉匹配结果与激光点云配准结果进行位姿参数统一优化, 既可通过多类观测数据统一优化提升平均误差, 又可提升定位方法在贫弱纹理光照与三维特征不充分区域的定位稳健性。本文应用LVI-SAM算法原理进行视觉、激光点云融合IMU的定位^[24]。

数据采集后, 基于公开程序处理数据并进行对比分析。

2.4 定位平均误差评定

由于熔岩管内环境十分复杂, 受环境、设备及其它保障条件所限, 难以直接采集行走过程中的高平均误差坐标信息作为定位平均误差评价参考。在熔洞1中, 熔岩管宽度尚可, 通过行走闭合环、统计行走轨迹闭合差作为定位误差, 将闭合差与总行走距离的比值作为定位平均误差评定指标; 熔洞2中, 熔岩管宽度较窄, 内部行走困难, 受限设备与环境条件, 未能采集闭合行走数据。综合考虑文献[21-25], 一般认为视

觉激光融合惯导的方法因其在帧间位姿变化参数估计时, 已充分利用视觉特征点匹配与激光点云配准结果作为联合观测, 定位平均误差较高。因此参考该结论, 将平均误差表现更好的视觉、激光融合惯导的定位方法结果作为参考, 分别评价视觉融合IMU及激光融合IMU的定位表现。

3 实验结果对比与分析

3.1 熔洞1结果

在熔洞1中, 首先同时采集序列立体视觉图像与激光三维扫描数据, 分别采用2.3节中立体视觉定位方法与激光扫描点云定位方法对采集数据进行定位解算, 得到定位结果如图6。

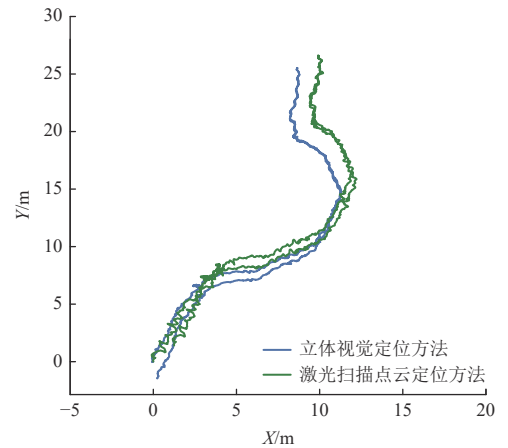


图6 熔洞1中视觉和激光点云定位计算的轨迹路线
Fig. 6 Trajectories of visual and laser point cloud based localization methods in cave 1

该实验中, 路径单程47.88 m, 双目立体视觉定位方法闭合差为1.46 m, 定位平均误差为1.53%。激光点云定位方法闭合差为1.81 m, 定位平均误差为1.89%。

为进一步验证立体视觉与激光扫描点云定位方法的稳健性, 在该熔洞中行走一个长距离闭环路径, 同时采集序列立体视觉图像与激光三维扫描数据并完成定位解算, 结果如图7。

该实验中, 路径全长246.56 m, 双目立体视觉定位方法闭合差为8.87 m, 定位平均误差为3.59%。激光点云定位方法则因路径中多处帧间点云数据配准失败而未能得出完整定位结果。

熔洞1实验结果如表1, 立体视觉与激光雷达定位方法在光照条件尚可、地形相对平坦环境可实现连续定位, 立体视觉定位方法定位平均误差略高。

长距离行驶状态下, 该类型激光雷达获取的扫描点云数据定位稳健性下降, 由于实验中熔岩管三维结构特征不丰富, 加之点云数据采集率不高, 点云帧间

视场重叠相对较低,传感器的抖动导致相邻帧点云配准失败,未能完成长距离定位,熔洞1中点云配准失败位置场景如图8所示。图中为获取的连续四帧激光雷达点云及对应视觉图像数据,其中图8(a)~(c)为连续配准成功的三帧点云,(d)为同(c)配准失败的第四帧点云。从图中可以看出,前三帧点云因视场变

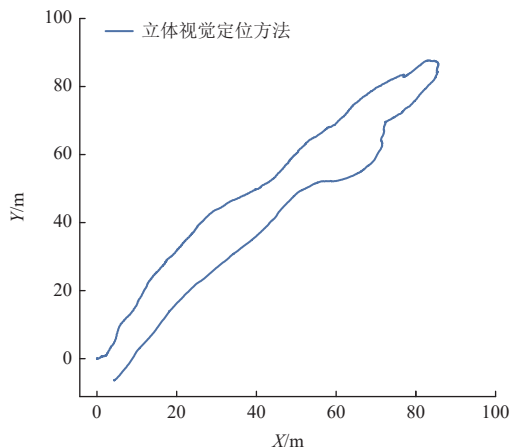


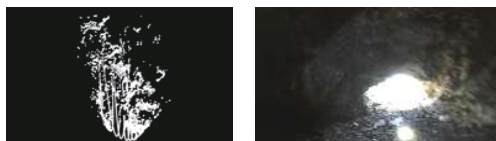
图7 熔洞1中视觉长距离视觉定位结果

Fig. 7 Long trajectory of visual based localization method in cave 1

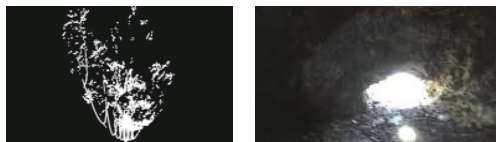
表1 熔洞1场景定位方法平均误差对比

Table 1 Comparison results of different methods in cave 1

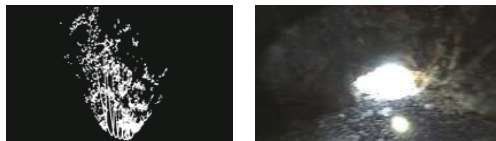
熔洞1场景	闭合误差	
	短距离行走 (95.76m)	长距离行走 (246.56m)
视觉定位/%	1.53	3.59
激光定位/%	1.89	未完成



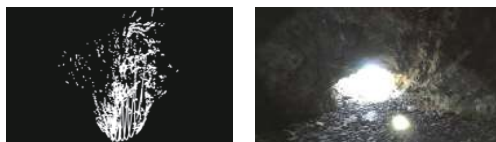
(a) 激光点云和图像数据显示结果



(b) 激光点云和图像数据显示结果



(c) 激光点云和图像数据显示结果



(d) 激光点云和图像数据显示结果

图8 熔洞1激光雷达点云配准失败情况

Fig. 8 Failure of LiDAR point cloud registration in cave 1

化平缓,且采集得到的三维点云主要集中于左侧洞壁,数据重叠较大,而第四帧点云由于向右侧转向,加上溶洞前进方向点云稀疏,获取的点云数据较多分布在右侧洞壁,同上一帧数据有效重叠变小,导致配准失败。

3.2 熔洞2实验结果

在熔洞2中,同样选择一处区域同时采集序列立体视觉图像、激光三维扫描数据及IMU惯性测量数据用于定位对比实验,分别利用2.3节所述方法视觉融合IMU、激光融合IMU及视觉、激光融合IMU进行定位处理。实验中,以立体视觉、激光融合IMU的结果为参考,分析定位方法误差水平。

该实验区段总行走里程为52.81 m,立体视觉融合IMU及激光扫描点云融合IMU相比视觉、激光融合IMU的结果,定位差异分别为12.35%与3.94%,3种方法定位结果路径如图9。从中可以看出,雷达融合IMU方法误差水平同视觉激光融合IMU方法误差水平相当,而视觉融合IMU方法定位偏离更大。经分析发现,这是由于该环境光照完全由携带的照明灯提供,立体视觉图像上特征点数量较熔洞1中图像特征变少,特征点也更集中分布在照明灯束周围,导致影像定位解算误差变大。而激光雷达数据特性不受环境光照影响。

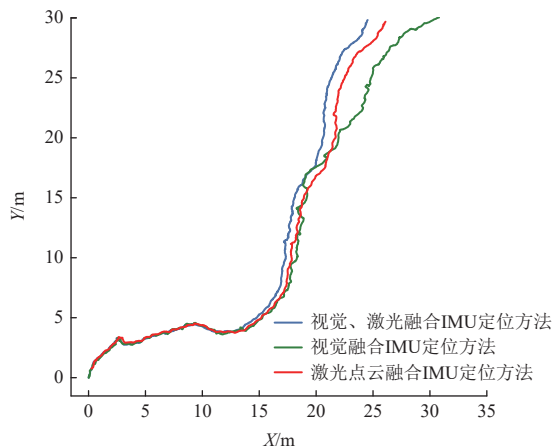


图9 熔洞2中定位结果路径

Fig. 9 Trajectories of localization results in cave 2

为验证定位稳健性,在熔洞2中行走一段长距离路径,同时采集相机、雷达与IMU定位数据。该路径全长314.87 m,定位轨迹结果如图10。

在熔洞2定位结果中,由于激光雷达视场角仅为70°,且场景存在大面积重复结构且缺乏明显特征,点云扫描密度不高,在由熔洞壁的一侧向另一个移动时,由于激光雷达指向变化较快,点云帧间存在抖动现象,导致激光扫描点云融合IMU多帧点云配准失

败, 如图11。从图中展示连续四帧点云与视觉数据可以看出, 图11 (d) 中的点云同之前的连续三帧点云的视场重叠相对较小, 难以完成有效配准。因而, 该实验中激光扫描点云融合IMU最终定位结果与参考结果偏离较大, 未能完成有效定位。

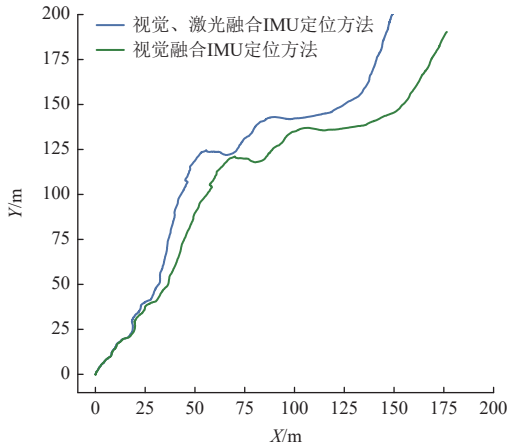


图 10 熔洞2长距离行走定位结果路径

Fig. 10 Trajectories of localization results in cave 2

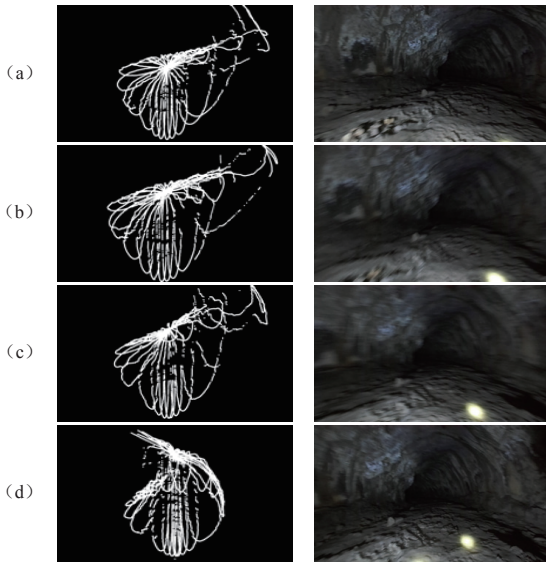


图 11 熔洞2激光雷达点云配准失败情况

Fig. 11 Failure of LiDAR point cloud registration in cave 2

视觉融合IMU定位结果相比视觉激光融合IMU结果定位差异为8.52%, 定位差异水平同熔洞2中短距离实验类似。该实验中定位对比结果如表2。

表 2 熔洞2场景定位方法对比结果

Table 2 Comparison results of different methods in cave 2

熔洞2 场景	相比视觉、激光融合IMU结果差异	
	短距离行走 (52.81m)	长距离行走 (314.87m)
视觉融合IMU/%	12.35	8.52
激光融合IMU/%	3.94	未完成

3.3 对比与分析

通过熔洞1与熔洞2实验结果的对比, 并参考中国月面巡视探测和地下巷道内部等场景下定位实验结果分析得到:

1) 立体视觉定位在熔岩管环境中可发挥重要作用。在具备天窗等光照条件尚可环境下, 通过照明灯的光照加强, 能够完成长距离下独立定位, 平均误差为3.59%。在无天窗、几乎完全封闭的熔岩管中, 因视觉特征提取困难, 数据特征与分布退化严重, 即使融合IMU数据, 定位偏差依然变大 (相对参考偏差达12.35%)。

2) 激光扫描点云定位不受环境光照影响, 其定位平均误差在熔洞1环境下定位平均误差为1.89%, 比同场景立体视觉定位平均误差略低。长距离行走状态下, 由于实验中激光雷达视场角较小, 点云扫描密度不高, 同时熔洞内行走十分不便, 导致长距离行走过程中, 存在相邻帧激光配准失败情况, 未能完成全程定位。因此, 在熔岩管探测中应选取激光雷达视场角更大、点云采集率更高的激光雷达以实现稳健定位。

3) 在完全无外部光照、地形更复杂的熔岩管区域, IMU是实现熔岩管内稳健定位的必备传使融合IMU进行定位, 视觉定位平均误差仍有一定下降, 而激光雷达受限硬件水平, 融合IMU进行定位仍失败。熔洞2区域实验结果表明, 使用立体视觉、激光雷达融合IMU进行定位是在复杂熔岩管环境下进行定位的优先选择。

4) 同中国“嫦娥”任务中月球车定位相比, 月球车采用的航迹推算方案定位平均误差为15%, 视觉定位方案定位平均误差优于4%^[8]。在熔洞1环境下, 长距离实验定位平均误差为3.59%, 表明光照良好条件下的熔岩管定位结果平均误差与月球车定位平均误差相当; 同地下巷道环境定位结果相比, 此场景下长距离行驶视觉定位误差约为2.35%, 视觉融合IMU与里程计的误差为2.08%^[26], 比溶洞1的视觉定位及溶洞2中多传感器组合定位平均误差要高。由于地下巷道以结构化场景为主, 巷道内地形平整, 而月球熔岩管内部为非结构化场景, 数据特征与分布退化严重, 提取的特征不丰富, 且地形起伏较大, 光照条件恶劣, 加之巷道实验中存在里程计及场景结构信息的约束优化, 因而相比溶洞实验取得了更好的平均误差。

4 结束语

本文针对月球熔岩管内部探测定位问题, 探索熔岩管内部多传感器组合定位方法, 选取了同月球熔岩

管形成机制与地质形态类似的海口石山火山熔岩管区域作为模拟实验区进行的定位实验。实验中,选取了已在行星探测应用的立体视觉与IMU这两类传感器,及正在论证可能应用于后续探测任务中的激光雷达,在2个熔洞实验区内采集了立体相机、激光雷达与IMU数据,通过应用立体视觉定位方法、激光扫描点云定位方法、立体视觉融合IMU定位方法、激光点云融合IMU定位方法以及视觉、激光融合IMU定位方法,验证了不同光照与地形条件下的熔岩管定位平均误差与稳健性。

实验表明,立体视觉在熔岩管定位中发挥了重要作用,长距离行走模式下平均误差可达3.59%,但在光照条件恶劣条件下平均误差下降明显。激光雷达不受环境光照影响,平均误差同视觉水平接近,局部区域最高达到1.89%,在光照与地形起伏十分恶劣的熔岩管区域内,立体视觉、激光雷达与IMU集成的定位是进行长距离连续稳健定位的优先选择。

实验中,单独使用视觉与激光雷达传感器进行定位均出现无法连续定位问题。由于熔岩管内光照条件直接影响视觉定位效果,后续研究与探测设计中可考虑选用功率更大的、照明范围更广的多个照明灯,构建照明灯阵列,并增加光照传感器,对探测环境的光强进行感知,根据周围环境的光照强度适时调节照明灯阵列的强度和照明范围,确保环境光照条件满足定位要求。同时,选用抗干扰能力较强、视场角更大、点云采集率更高的机械激光雷达^[27],调整行进速度,确保稳定获取特征更多、范围分布更广的场景三维特征,是减少激光匹配失败、提升激光传感器定位表现的有效途径。

未来的月球熔岩管探测中,环境的复杂性与未知性要求探测模式与方法具备更强的适应性与稳健性。通过本文定位对比结果,为后续月球熔岩管探测任务传感器配置提供有益参考,有望为后续月球科研站建设以及未来月球熔岩管开发和利用提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 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):585-589.
XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. The significance and preliminary ideas of detecting lunar lava tube caves[J]. Chinese Science: Physics, Mechanics, Astronomy, 2018, 48(11): 585-589.
- [2] 王赤,林杨挺,裴照宇,等. 月球科研站的关键科学问题[J]. 中国科学基金,2022,36(6):830-840.
WANG C, LIN Y T, PEI Z Y, et al. Key scientific issues of lunar research stations[J]. Science Foundation in China, 2022, 36(6): 830-840.
- [3] GREELEY R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills[J]. Earth Moon Planets. 1971, 3(3):289-314.
- [4] HARUYAMA J, HIOKI K, SHIRAO K M, et al. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(21):206-211.
- [5] ROBINSON M S, ASHLEY J W, BOYD A K, et al. Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits[J]. Planet Space Sci, 2012, 69(1):18-27.
- [6] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. Icarus. 2017, 282:47-55.
- [7] 吴伟仁,刘继忠,唐玉华,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.
- [8] 邱凯昌,王镭,邢琰,等. 深空探测车环境感知与导航定位技术进展与展望[J]. 测绘学报,2021,50(11):1457-1468.
DI K C, WANG J, XING Y, et al. Progresses and prospects of environment perception and navigation for deep space exploration rovers[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(11):1457-1468.
- [9] MAIMONE M, CHENG Y, MATTIES L. Two years of visual odometry on the Mars Exploration Rovers[J]. Journal of Field Robotics. 2007, 24(3):169-186.
- [10] LIU Z Q, DI K C, PEN M, et al. High precision landing site mapping and rover localization for Chang'e-3 mission[J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2015, 58(1):1-11.
- [11] LIU Z Q, DI K C, LI J, et al. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'e-4 mission[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63:170-181.
- [12] DI K C, LIU Z Q, YUE Z Y. Mars rover localization based on feature matching between ground and orbital imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2011, 77(8):781-791.
- [13] SHI Y L, ZHANG W M, YAO Z, et al. Design of a hybrid indoor location system based on multi-sensor fusion for robot navigation[J]. Sensors, 2018, 18(10):3581-3599.
- [14] HE C, MA R, QU H, et al. Research on mobile robot positioning and navigation system based on multi-sensor fusion[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1684(1):012011-012017.
- [15] WANG R Z, WAN W H, DI K C, et al. A high-accuracy indoor-positioning method with auto-mated RGB-D image database construction[J]. Remote Science, 2019, 11:2572-2591.
- [16] 唐少霞,毕华,赵志忠,等. 海口石山火山群国家地质公园地质旅游资源开发探讨[J]. 国土与自然资源研究,2011(2):59-60.
TANG S X, BI H, ZHAO Z Z, et al. Research on development of geological tourism resources of Volcanic Cluster National geological parks at Haikou Shishan[J]. Territory & Natural Resources Study, 2011(2):59-60.
- [17] 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.
- [18] DAVID T, ALBERTO P, EMANUELE M. A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments [C]//Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics

- and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014: 3042-3049.
- [19] FURGALE P, REHDER J, SIEGWART R. Unified temporal and spatial calibration for multi-sensor systems[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S. l.]: IEEE, 2013: 1280-1286.
- [20] LIU W, LI Z, MALEKIAN R, et al. A novel multi-feature based on-site calibration method for LiDAR-IMU system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(11): 9851-9861.
- [21] CAMPOS C, ELVIRA R, RODRIGUEZ J, J G, et al. ORB-SLAM3: an accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [22] LIU Z, ZHANG F. BALM: bundle adjustment for lidar mapping[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 6(2): 3184-3191.
- [23] XU W, CAI Y X, HE D J, et al. FAST-LIO2: fast direct LiDAR-Inertial odometry[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2022, 38(4): 2053-2073.
- [24] SHAN T X, ENGLLOT B, RATTI C, et al. LVI-SAM: tightly-coupled lidar-visual-inertial odometry via smoothing and mapping[C]//Proceedings of the Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Xi'an, China: IEEE, 2021: 5692-5698.
- [25] XU X, ZHANG L, YANG J, et al. A review of multi-sensor fusion slam systems based on 3D LIDAR[J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2835.
- [26] 万文辉, 李宁, 胡文敏, 等. 基于联邦滤波进行立体相机/IMU/里程计运动平台组合导航定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43: 101-106.
- WAN W H, LI N, HU W M, et al. Mobile platform localization by integration of stereo cameras, IMU and wheel odometer based on federated filter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43: 101-106.
- [27] ZHOU B, XIE D, CHEN S, et al. Comparative analysis of SLAM algorithms for mechanical LiDAR and solid-state LiDAR[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 5325-5338.
- 作者简介:
寇玉珂(1999-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 视觉导航定位。
E-mail: yukekou@163.com
万文辉(1985-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 深空探测平台环境感知与定位。本文通信作者。
通信地址: 北京市朝阳区大屯路甲20号北中国科学院空天信息创新研究院(100101)
电话: (010)64807987
E-mail: whwan@aircas.ac.cn

Localization Methods for Tube Exploration

KOU Yuke^{1,2}, WAN Wenhui¹, DI Kaichang¹

(1. Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Earth, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the localization of lunar lava tubes, the volcanic lava cave in Haikou City, Hainan Province, was selected as the experimental area for simulated lunar lava. Localization methods including stereo vision-based method, laser scanning point cloud based method, vision fused IMU based method, laser point cloud fused IMU based method, and vision, laser point cloud and IMU fused method are applied to localization in the field areas of simulated lava tubes. The experimental results show that the accuracy of stereo vision could reach 3.59% in long-distance travelling mode, but the accuracy and robustness decreased significantly in harsh lighting conditions. Lidar could achieve a similar-level accuracy as vision-based method, reaching 1.89% in local area, but its robustness was affected by data acquisition rate and field of view. The integrated localization method using stereo vision, LiDAR, and IMU achieved robust localization results in lava tube areas with extremely harsh lighting and terrain undulations, making it the preferred choice for long-distance continuous localization. The research conclusions provide valuable reference for subsequent research on sensor configuration and localization methods for lunar lava exploration missions.

Keywords: lunar lava tube; navigation and localization; multiple sensors; deep space exploration

Highlights:

- This article presented a comparative research study of localization using stereo vision, LiDAR, and IMU sensors in the simulated lunar lava tube environment.
- The accuracy and robustness of localization results of different sensor combinations under different illumination and terrain conditions in lava tube environment were compared and analyzed.
- The localization comparison research and analysis results with different sensor combinations provide an important reference for the design of future exploration missions under the lunar lava tube in the future.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]