

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.03.008

面向月面遥操作连续驾驶的正射地图增量 拼接与风险预示方法

刘传凯^{1,2,3}, 袁美娟¹, 张楚^{2,3}, 张作宇^{2,3}, 朱容琪^{2,3}, 张宽^{2,3}, 朱常明^{2,3}

(1. 江西理工大学电气工程与自动化学院, 赣州 341000; 2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;

3. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 遥操作驾驶是驱动月球车实施高效探测的一种重要方式,但受限于时延条件下环境信息与指令控制滞后导致的安全风险,当前在地面缺少有效的快速预警提示手段。为此提出面向遥操作连续驾驶的月面正射地图增量拼接与风险预示方法,针对月球车近场视野盲区、视场前后表达不连续以及弱纹理和强光照变化条件下图像特征易失效等问题,设计月面正射地图增量拼接框架,通过双目重建、局部正射图生成、多帧点云配准与增量融合实现几何地形和图像纹理的协同拼接与环境地图的增量式更新。在此基础上进一步融合地形坡度、粗糙度及纹理信息得到风险代价图,并叠加月球车轨迹与航向信息,形成运动态势图。实验结果表明,该方法在连续行驶过程中稳定生成具有较好几何一致性和空间连续性的正射预示图,能够适应月面弱纹理、阴影显著和局部起伏地形等复杂环境,可为月球车遥操作提供直观、连续的风险预示支持。

关键词: 月面巡视;遥操作驾驶;双目视觉;正射图增量拼接;风险区域预示

中图分类号: V476.3; TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)03-0549-11

An Incremental Orthophoto Map Stitching and Risk Anticipation Method for Continuous Teleoperated Lunar Rover Driving

LIU Chuankai^{1,2,3}, YUAN Meijuan¹, ZHANG Chu^{2,3}, ZHANG Zuoyu^{2,3}, ZHU Rongqi^{2,3},
ZHANG Kuan^{2,3}, ZHU Changming^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 3. Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China)

Abstract: Teleoperated driving is an important approach for efficient lunar rover exploration. However, communication delays may cause a temporal mismatch between environmental perception and command execution, increasing safety risks during rover operation. To address this problem, this paper proposes an incremental lunar orthophoto map stitching and risk anticipation method for continuous teleoperated driving. Considering the near-field blind zones of lunar rovers, discontinuous environmental representation across successive fields of view, and the vulnerability of image features under weak texture and strong illumination variations, an incremental orthophoto mapping framework is developed. The framework integrates stereo reconstruction, local orthophoto generation, multi-frame point cloud registration, and incremental fusion to achieve coordinated stitching of terrain geometry and image texture, as well as continuous environmental map

基金项目: 航天飞行动力学技术重点实验室基金(KJW6142210240103)。

收稿日期: 2026-03-30; **修订日期:** 2026-05-01

通信作者: 刘传凯,男,正高级工程师,E-mail:ckliu2005@163.com。

引用格式: 刘传凯,袁美娟,张楚,等. 面向月面遥操作连续驾驶的正射地图增量拼接与风险预示方法[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(3): 549-559. LIU Chuankai, YUAN Meijuan, ZHANG Chu, et al. An incremental orthophoto map stitching and risk anticipation method for continuous teleoperated lunar rover driving[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(3): 549-559.

updating. Furthermore, terrain slope, roughness, and texture information are fused to construct a risk cost map, which is overlaid with rover trajectory and heading information to generate a motion-aware situational map. Experimental results show that the proposed method can stably generate orthophoto preview maps with good geometric consistency and spatial continuity in complex lunar surface environments, providing intuitive and continuous risk anticipation support for ground-based lunar rover teleoperation.

Key words: lunar exploration; teleoperated driving; binocular vision; incremental orthophoto mapping; risk awareness

月面巡视探测是深空探测任务的重要组成部分,也是开展月面资源调查、环境勘测与长期驻留技术验证的重要基础。在实际任务中,月球车通常依赖地面遥操作完成路径选择、越障控制和作业决策。受月地远距离通信、有限带宽及显著时延等条件制约,地面获取的环境信息与月球车实际运行状态之间始终存在时间差,操作者难以及时、连续地掌握车辆前方区域的地形与障碍分布,遥操作驾驶的环境感知与决策因此受到明显制约^[1-2]。

现阶段月球车地面遥操作仍以分段式“移动-等待”模式为主,由地面控制中心根据回传环境信息完成遥现场重构、视觉定位、指令生成,经验证后上传执行^[3]。这种方式在工程上具有现实合理性:大时延条件下连续闭环控制容易引起操作不稳定,采用分段规划、分段执行利于保障任务安全;地面遥操作与器上局部自主结合,也能够一定程度上弥补操作者感知不充分的问题,提高月球车行驶安全性^[4]。但该模式的局限同样突出:环境感知、路径规划、规划验证和控制实施串行展开,控制链条长、决策环节多,任务执行效率较低;车辆前进过程中前后时刻观测区域持续变化,操作者只能依据相互割裂的瞬时视图进行判断,难以形成对区域整体地形结构的稳定认知;月球车按既定指令序列执行过程中,地面难以及时修正和干预,连续驾驶条件下的应急处置能力受到明显限制^[5]。因此,在大时延条件下为地面操作者提供连续、直观且具有预示能力的环境表达,已成为提升月球车遥操作效率与安全性的关键问题^[6]。

连续驾驶模式下构建的地图必须随车体运动持续更新,并在时延条件下为操作者提供空间连续的环境认知。王贵财^[7]基于双目立体视觉开展了月面环境地形重构研究,Liu等^[8]针对嫦娥三号任务实现了高精度着陆区制图与巡视器定位。这类单帧立体视觉方法仅能恢复车辆停靠时的局部地形,无法及时反映连续运动过程中的环境变化,且受月面弱纹理、强光照影响,深度估计精度难以保证。在此基础上,研究者进一步探索了图像拼接与正射影像生成方法。胡社教等^[9]提出了基于图像灰度特征矢量的全景图像拼接算法,对重叠区域要求低、计算量小。丁伟等^[10]针对计算资源受限的

扑翼飞行机器人,提出了基于聚类分析和块匹配的图像拼接方法。Huang等^[11]针对多视角摄影测量DEM融合问题,提出了全局配准、加权聚类融合和空洞填补的三步法流程。然而,上述方法主要面向固定视点环绕拍摄或多源数据离线融合场景,在车辆连续运动时难以保证帧间配准的实时性与准确性,且拼接结果存在明显的空间不一致性,难以支撑在线地图连续更新。

相比之下,地面无车系统在在线增量式建图方面已形成了较为成熟的技术路线。CAD-Mesh-er^[12]采用关键帧选择与增量融合相结合的方式,实现了稠密地图的渐进式构建。针对纯几何配准鲁棒性不足的问题,Wang等^[13]通过跨模态特征融合增强点云配准约束,证实图像纹理信息能有效补偿几何信息不足;Ma等^[14]通过图像与点云协同建模提升跨模态匹配性能,表明二维纹理与三维几何的联合表征有助于提高配准稳定性。这些方法在地面已得到广泛应用,但尚未在月面连续驾驶场景中开展系统性研究。

考虑到地面环境条件与月面场景存在显著差异,地面非结构化场景中的增量建图思路难以直接应用于月面地图拼接。地面场景通常具有较丰富的纹理信息以及相对稳定的结构化几何先验,而月表自然地形中普遍存在纹理分布不均、局部灰度重复等特点^[15-18]。同时,月面不存在大气散射,太阳直射条件下高亮区与深阴影并存,不同视角和不同时刻获取的图像外观差异明显,阴影边缘和高亮区域容易引起特征缺失或误匹配,进一步增加了多帧配准与连续拼接的难度。因此,面向月面连续驾驶场景的环境表达方法不能简单沿用地面图像拼接思路,而需要更加依赖几何约束下的连续空间表达与增量更新机制^[15,17-18]。

针对上述问题,本文面向月面巡视连续遥操作辅助需求,提出一种正射图像增量拼接与风险预示方法。该方法以双目重建获得的局部三维地形作为几何约束,以局部正射图作为纹理表达单元,通过几何与纹理的协同配准、投影和融合,将连续获取的双目观测数据转化为时间上连续、空间上衔接且便于驾驶判断的环境预示信息。

具体而言,首先利用同步双目图像恢复局部三维点云信息并构建数字高程模型(Digital elevation model, DEM);然后将原始透视图转换为具有统一俯视图结构的单帧局部正射图;随后结合里程计先验与增量广义迭代最近点(Generalized iterative closest point, GICP)几何修正,并在修正后的几何关系下完成正射纹理的连续拼接与增量融合,使纹理更新过程受到地形结构约束。针对多帧重叠区域,进一步依据成像距离优先保留观测条件更优的像素信息,以减弱远距离观测造成的纹理退化,提高拼接边界自然性、局部清晰度和整体空间一致性。最后,基于DEM的坡度、粗糙度和图像纹理信息构建风险代价图,并与全局正射纹理、月球车轨迹和朝向信息融合,形成面向遥操作连续驾驶辅助的运动态势图。

1 遥操作地图构建的总体设计

1.1 遥操作驾驶需求分析

月面遥操作驾驶是实现月面连续巡视探测的重要方式之一。然而,受地月通信时延、带宽受限以及月面复杂环境条件等因素影响,地面操作人员难以像地面车辆那样依赖实时、完整的环境信息完成连续驾驶^[19]。如图1所示,在地月通信条件下,遥操作链路存在时延,地面人员获取的环境信息具有一定滞后性,而月面巡视过程中的地形起伏、障碍分布及局部阴影变化又会进一步增加驾驶判断难度。这种反馈滞后与环境理解不连续的叠加效应,显著增加了认知负担与操作疲劳,进而降低了遥操作任务的整体执行效率^[19]。因此,为遥操作驾驶提供更加连续、直观和稳定的环境感知与风险预示结果,成为提升月面巡视探测效能的关键所在。

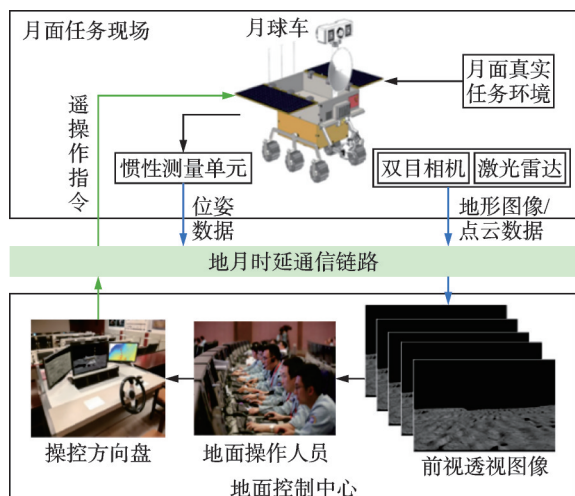


图1 地月时延通信下月面巡视遥操作系统场景示意图

Fig.1 Scene schematic of lunar rover teleoperation system under earth-moon time-delay communication

月面遥操作驾驶中,环境感知主要依赖单帧或离散站点回传的双目图像与重建结果,这类方式仅能呈现车辆停靠时刻的局部场景,无法形成覆盖行驶路径的连续环境表达^[3]。受透视投影影响,单帧图像存在显著的“近大远小”效应,近处障碍物占比过大,而远处地形信息被压缩至图像顶部,操作者难以准确判断前方距离与坡度变化。更为关键的是,月球车自身结构及视场角限制导致车辆正下方及近场区域存在感知盲区,车轮即将碾过的地面细节、紧邻车体的坑洼或石块往往被车身遮挡或处于图像边缘,操作者无法获得脚下路况的直观信息。同时,月面缺乏大气散射,远离车辆的周边区域在图像中呈现为单一灰暗色调,弱纹理特性使得坡面起伏、碎石分布等关键地形特征难以辨识,操作者对前方路况的感受仅停留在模糊轮廓层面,难以对陡坡、坑洼等危险区域形成准确预判。

进一步地,月面场景普遍存在强光照变化、阴影显著及局部起伏复杂等特点,不同时刻获取的图像之间往往存在明显外观差异^[15]。同时,由于巡视过程中相机位姿持续变化,同一区域在不同帧中的成像尺度与观察角度并不一致,这不仅增加了跨帧对应关系建立的难度,也使连续拼接过程中更易出现局部错位、边界不连续及整体表达漂移等问题^[16-17]。已有月面图像拼接与匹配研究表明,在复杂月面场景下,仅依赖图像特征易受到弱纹理和视角变化的显著影响^[18]。因此,在离散观测、近场盲区与跨帧对应困难共同作用下,操作者在连续驾驶过程中容易面临环境感知滞后与空间认知不清的问题,从而制约遥操作效率与安全性^[19]。

与地面非结构化场景建图主要关注通用环境重建或局部拼接不同,面向地月通信时延条件下连续行驶阶段的月面遥操作辅助,主要解决以下3个问题:

(1) 地月通信时延条件下,前视相机单帧观测存在明显视场局限,且受车体结构、相机安装方式和近场盲区影响,操作人员获取的环境信息呈现离散、局部和滞后的特点,难以形成对连续行驶路径区域的整体认知。

(2) 月表弱纹理、强阴影和视角变化并存,导致跨帧对应关系难以稳定建立,连续拼接过程易出现局部错位与累计漂移。

(3) 传统环境重建结果主要停留在纹理或几何显示层面,难以直接为操作人员提供可通行性判断所需的风险区域提示和运动态势信息。

针对上述问题,首先以局部正射图作为基本环境更新单元,通过双目重建获得局部三维地形信

息,并将图像纹理投影到统一地面参考平面下,形成局部正射环境表达,从而减弱前视图像中的透视畸变、尺度变化和视角差异对环境理解与连续拼接的影响。随后,在里程计位姿递推的基础上引入几何约束的增量拼接与融合方法。通过增量 GICP 点云配准修正当前局部地形与已有地图之间的空间关系,使纹理拼接过程受到三维地形结构约束;同时,针对多帧融合中的重叠区域,设计了基于成像距离比分析的像素更新策略,优先保留成像距离更近、观测条件更优的像素信息,以减弱远距离观测造成的分辨率下降和纹理退化影响,提高拼接边界的自然性、局部清晰度和整体空间一致性。

进一步地,基于 DEM 提取坡度和粗糙度信息,并融合图像纹理特征构建风险代价图,在此基

础上叠加月球车轨迹与航向信息,形成面向遥操作连续驾驶辅助的运动态势图。通过该方式,环境表达结果不再停留于单纯的纹理或几何显示层面,而是进一步转化为能够支持通行判断和风险预示的驾驶辅助信息。

1.2 图像拼接融合框架设计

针对月面遥操作连续驾驶中单帧视场有限、前后观测不连续以及跨帧结果难以稳定拼接与融合等问题,构建了一套面向连续驾驶辅助的环境表达系统框架,如图 2 所示。该框架以左、右相机图像及对应里程计位姿信息为输入,自上而下依次经过探测、算法、计算 3 个环节的逐层处理,最终输出融合正射纹理、风险区域、月球车轨迹与航向信息的运动态势图。

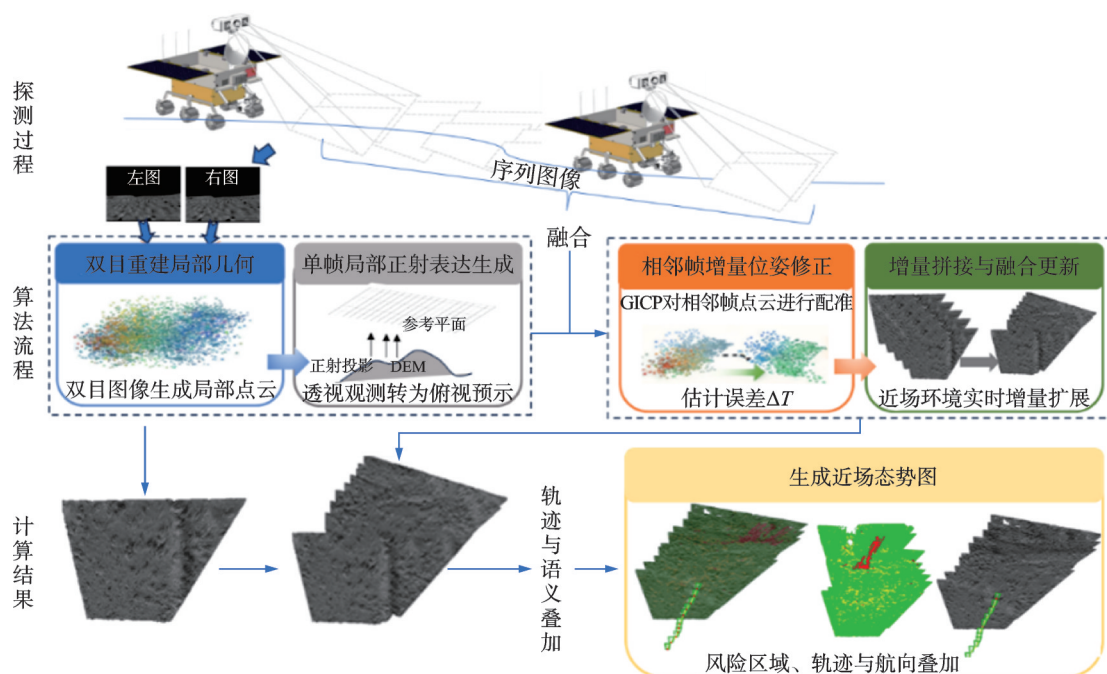


图 2 系统框架图

Fig.2 System framework

在探测环节,系统首先利用双目立体视觉同步采集左右相机图像,通过立体匹配恢复当前时刻场景的三维点云,并进一步构建 DEM,完成局部环境几何信息的原始获取^[15]。在此基础上,算法环节承接探测结果,一方面将原始透视图像投影至统一俯视参考平面生成单帧局部正射图,有效削弱透视畸变、视角变化和成像尺度差异对环境理解的影响;另一方面结合里程计先验与增量 GICP 局部几何修正,对相邻帧点云进行配准,实现历史观测与当前观测在同一参考空间下的稳定对齐。通过引入局部几何一致性约束,能够有效抑制长序列处理中容易出现的局部错位、边界不连续和整体漂移问题。最终在计算环节,系统将多帧局部正射图按照配准后的位姿关系逐步扩展至全局正射地图,形成

随月球车行驶持续更新的空间连续表达,同时依据 DEM 的坡度与粗糙度特征构建风险代价图,并与全局纹理、月球车轨迹和朝向信息融合,生成适用于遥操作辅助的运动态势图。与一次性离线拼接方式不同,本文采用增量式处理模式,使环境表达能够随观测持续更新,具备满足遥操作辅助驾驶环境更新需求的准实时处理能力,更符合月面遥操作连续驾驶的应用需求。

2 月面地图在线构建与增量更新

所采用的正射图像增量拼接与风险预示方法,与已有方法相比,关键改进体现在局部正射表达、增量几何修正以及风险预示耦合 3 个方面。以局部正射图和局部 DEM 作为统一环境表达单元,并

在运动先验基础上引入增量几何修正与风险信息同步维护机制,以提高连续驾驶场景下地图表达的空间一致性和决策支撑能力。首先,基于同步双目图像恢复局部三维点云,并构建局部数字高程模型与局部正射图;其次,在运动先验约束下实现当前局部表达与已有地图之间的位姿修正和递推更新;最后,在更新后的高程信息基础上计算通行风险代价,并构建运动态势图。按照上述技术流程,将分别阐述局部环境表达生成、地图增量更新以及风险信息构建等内容。

2.1 基于局部正射表达的环境建模

设时刻 k 左、右相机采集的同步图像分别为 I_k^L 和 I_k^R ,左相机坐标系记为 C_k ,相机内参矩阵为 K ,双目基线长度为 b 。对双目图像进行极线校正与立体匹配后,左目图像中任一有效像素点 $p=[u, v, 1]^T$ 在相机坐标系中的三维坐标 $X_k^c=[x_k^c, y_k^c, z_k^c]^T$ 可表示为

$$z_k^c = \frac{f_x b}{d_k(u, v)}, X_k^c = z_k^c K^{-1} p \quad (1)$$

式中: $d_k(u, v)$ 为像素 (u, v) 处的视差值; f_x 为图像 u 方向焦距。由式(1)可恢复当前时刻相机坐标系下的局部点云。

在当前时刻局部点云上建立局部参考平面坐标系 O_k 。设其原点为 o_k ,平面内两个正交单位向量为 $e_{k,1}$ 和 $e_{k,2}$,法向量为 n_k 。则局部点云中任一点 $x_{k,i}$ 在局部参考平面中的正射坐标及法向高程可表示为

$$\begin{bmatrix} \xi_{k,i} \\ \eta_{k,i} \\ h_{k,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{k,1}^T \\ e_{k,2}^T \\ n_k^T \end{bmatrix} (x_{k,i}^c - o_k) \quad (2)$$

式中: $(\xi_{k,i}, \eta_{k,i})$ 为三维点在局部参考平面上的正射坐标, $h_{k,i}$ 为相对于参考平面的高程值。在给定地面分辨率 ρ 的条件下,对局部参考平面进行规则栅格化。设栅格 (m, n) 对应区域为 Ω_{mn} ,则局部高程图可表示为

$$D_k(m, n) = \Phi_h \left(\left\{ h_{k,i} \mid (\xi_{k,i}, \eta_{k,i}) \in \Omega_{mn} \right\} \right) \quad (3)$$

式中: $D_k(m, n)$ 为局部DEM在栅格 (m, n) 处的高程值; $\Phi_h(\bullet)$ 为高程聚合算子。

由局部平面坐标与高程值可恢复栅格 (m, n) 对应的三维点,即

$$x_k(m, n) = o_k + \xi_m e_{k,1} + \eta_n e_{k,2} + D_k(m, n) n_k \quad (4)$$

式中: ξ_m, η_n 分别表示栅格 (m, n) 中心在局部参考平面两个基方向上的坐标。再将其投影回左目图像,可得当前时刻的局部正射图表达为

$$O_k(m, n) = I_k^L(\Pi(x_k(m, n))) \quad (5)$$

式中: $\Pi(\bullet)$ 为三维点到图像平面的投影算子; $O_k(m, n)$ 为局部正射图在栅格 (m, n) 处的纹理值。

式(2)至式(5)表明,局部正射图 O_k 与局部DEM D_k 是以当前时刻局部三维地形为约束形成的尺度一致表达,以便于后续的几何位姿修正和地图环境更新。

2.2 图像位姿修正与地图增量更新表示形式

设截至时刻 $k-1$ 已形成的全局正射图、全局高程图和累计权重图分别为 $M_{k-1}(u, v), H_{k-1}(u, v)$ 和 $W_{k-1}(u, v)$ 。当前时刻更新上一时刻已经形成的地图状态,当前帧先修正当前局部表达与已有地图之间的空间关系,再依据空间重叠关系完成递推融合。

设运动先验给出的当前帧初始位姿为

$$T_k^0 = \begin{bmatrix} R_k^0 & t_k^0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $R_k^0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $t_k^0 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 分别表示当前时刻相对于已有地图参考坐标系的初始旋转和平移。由式(6)可将当前时刻局部点云初步映射到已有地图坐标系中,但该映射仅反映近似空间关系,难以保证连续更新过程中的几何一致性。

设当前时刻局部点云为 $\mathcal{P}_k = \{x_{k,i}\}$,已有地图中与其重叠区域对应的参考点云为 $\mathcal{Q}_k = \{y_{k,j}\}$ 。为修正当前帧相对于已有地图的空间关系,引入位姿修正量

$$\Delta T_k = \begin{bmatrix} \Delta R_k & \Delta t_k \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\Delta R_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $\Delta t_k \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 分别为对运动先验的旋转修正量和平移修正量。

设当前帧点云中第 i 个点 $x_{k,i}$ 与参考点云中第 j 个点 $y_{k,j}$ 构成对应点对,则修正位姿作用下的几何残差为

$$r_{ij} = y_{k,j} - (\Delta R_k (R_k^0 x_{k,i} + t_k^0) + \Delta t_k) \quad (8)$$

考虑到月面局部点云通常具有明显的面状结构及各向异性分布,采用GICP对当前帧与已有地图之间的相对位姿进行修正^[20]。设 C_i 和 C_j 分别为点 $x_{k,i}$ 与 $y_{k,j}$ 邻域的协方差矩阵,则其优化目标可表示为

$$\min_{\Delta R_k, \Delta t_k} \sum_{(i,j) \in C_i} r_{ij}^T (C_j + \Delta R_k C_i \Delta R_k^T)^{-1} r_{ij} \quad (9)$$

式中 C_i 为当前帧局部点云与参考点云之间的对应点集合,可得到当前帧在运动先验基础上的最优修正位姿。于是,当前时刻用于地图更新的最终位姿为

$$T_k = \Delta T_k T_k^0 \quad (10)$$

式(10)表明,先通过GICP对当前局部地形与已有地图之间的空间关系进行补偿,再参与全局地图状态的递推更新。

设当前时刻局部正射图和局部 DEM 经最终位姿 T_k 映射到统一参考平面后的结果分别为 $\tilde{M}_k(u, v)$ 和 $\tilde{H}_k(u, v)$ 。记当前帧中栅格 (u, v) 对应的成像距离为 $\tilde{D}_k(u, v)$ ，已有全局地图中该栅格当前保留像素对应的成像距离为 $D_{k-1}(u, v)$ 。其中，成像距离可由相机光心到对应地形点之间的空间距离计算得到。成像距离越近，该区域对应的地面分辨率越高，纹理细节保持越充分。因此，将成像距离作为重叠区域像素择优更新的判据。

设当前帧与已有地图的重叠区域为 Ω_k^{ov} ，新增区域为 Ω_k^{new} 。对于重叠区域，采用的是比较当前帧与历史地图在同一栅格处的成像距离，并优先保留成像距离更近的像素信息。为简化表示，以下各变量均表示栅格 (u, v) 处的取值。重叠区域内的更新规则为

$$(M_k, H_k) = \begin{cases} (\tilde{M}_k, \tilde{H}_k) & \tilde{D}_k < D_{k-1} \\ (M_{k-1}, H_{k-1}) & \tilde{D}_k \geq D_{k-1} \end{cases} \quad (u, v) \in \Omega_k^{ov} \quad (11)$$

式(11)表示，当当前帧在该位置具有更近的成像距离时，采用当前帧的正射灰度和高程信息更新全局地图；否则，保留上一时刻地图中已有的像素和高程值。与之对应，成像距离图同步更新为

$$D_k(u, v) = \min[D_{k-1}(u, v), \tilde{D}_k(u, v)] \quad (u, v) \in \Omega_k^{ov} \quad (12)$$

对于新增区域，由于已有地图中尚不存在对应栅格，因此直接写入当前帧映射结果，即

$$M_k(u, v) = \tilde{M}_k(u, v), H_k(u, v) = \tilde{H}_k(u, v), \quad D_k(u, v) = \tilde{D}_k(u, v) \quad (u, v) \in \Omega_k^{new} \quad (13)$$

对于既不属于重叠区域也不属于新增区域的栅格，则保持上一时刻地图状态不变，即

$$M_k(u, v) = M_{k-1}(u, v), H_k(u, v) = H_{k-1}(u, v), \quad D_k(u, v) = D_{k-1}(u, v) \quad (14)$$

由式(11)至式(14)可知，在重叠区域内采用的是一种基于成像距离比分析的像素择优更新策略。该策略优先保留观测距离更近、空间分辨率更高、纹理退化更弱的像素信息，从而减弱远距离观测带来的分辨率下降、纹理模糊和边界退化影响。相比直接覆盖或简单平均，该方法能够在连续地图更新过程中保留更优观测条件下获得的局部细节，使重叠区域的清晰度、边界自然性和整体可读性得到改善。

2.3 月球车通行风险代价计算

连续环境图虽然改善了近场地形的整体可读性，但其仍主要停留在纹理与几何显示层面，操作人员仍需进一步判断局部区域的通行风险^[21]。为增强环境表达对遥操作决策的辅助作用，进一步基

于 DEM 的坡度与粗糙度特征构建风险区域表达，将连续环境图提升为同时包含结构信息与风险提示的态势图^[22]。

设全局 DEM 为 $H_k(u, v)$ ，则栅格 (u, v) 处的坡度可由局部高程梯度近似表示为

$$\tilde{s}_k(u, v) = \arctan \sqrt{\left(\frac{\partial H_k}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_k}{\partial v}\right)^2} \quad (15)$$

为刻画局部表面起伏程度，定义粗糙度为栅格邻域内高程值相对均值的标准差，即

$$\tilde{r}_k(u, v) = \sqrt{\frac{1}{|\mathcal{N}_{u,v}|} \sum_{(i,j) \in \mathcal{N}_{u,v}} (H_k(i,j) - \bar{H}_{u,v})^2} \quad (16)$$

式中： $\mathcal{N}_{u,v}$ 表示以栅格 (u, v) 为中心的局部邻域， $\bar{H}_{u,v}$ 为该邻域内高程均值； $\tilde{s}_k(u, v)$ 和 $\tilde{r}_k(u, v)$ 分别表示当前时刻由 DEM 计算得到的坡度和粗糙度。

为避免早期危险区域在后续局部平缓观测中被轻易削弱，采用偏保守的时序最大值保持策略，对坡度和粗糙度风险几何量进行递推更新，即

$$s_k(u, v) = \max\{s_{k-1}(u, v), \tilde{s}_k(u, v)\} \quad (17)$$

$$r_k(u, v) = \max\{r_{k-1}(u, v), \tilde{r}_k(u, v)\} \quad (18)$$

式中 $s_k(u, v)$ 和 $r_k(u, v)$ 分别表示时序保持后的坡度风险量和粗糙度风险量。该策略能够保留历史观测中出现过的较高风险信息，避免危险区域因后续局部平缓观测或单帧重建误差而被低估。

基于坡度和粗糙度，可进一步定义风险代价值为

$$C_k(u, v) = \alpha \hat{s}_k(u, v) + \beta \hat{r}_k(u, v) \quad (19)$$

式中： $\hat{s}_k(u, v)$ 和 $\hat{r}_k(u, v)$ 分别为归一化后的坡度和粗糙度， α 和 β 为权重系数。在计算风险代价前分别对二者进行归一化处理，使其统一映射到 $[0, 1]$ 区间。

权重系数主要用于表征坡度和粗糙度对月球车通行风险的相对影响。考虑到坡度直接影响月球车的姿态稳定性、爬坡能力和倾覆风险，而粗糙度主要反映局部地形起伏和行驶平顺性，在实验中设置坡度项权重略高，取 $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$ 。该权重为基于月面巡视安全性和工程可解释性的经验设定。

由于 $\hat{s}_k(u, v)$ 和 $\hat{r}_k(u, v)$ 均已归一化到 $[0, 1]$ 区间，且 $\alpha + \beta = 1$ ，综合风险代价值 $C_k(u, v)$ 也位于 $[0, 1]$ 区间。为便于风险图颜色显示，将归一化风险区间等间隔划分为 4 个等级。设风险等级为 $G_k(u, v)$ ，则分级映射关系为

$$G_k(u, v) = \begin{cases} 1 & 0 \leq C_k(u, v) < 0.25 \\ 2 & 0.25 \leq C_k(u, v) < 0.50 \\ 3 & 0.50 \leq C_k(u, v) < 0.75 \\ 4 & 0.75 \leq C_k(u, v) \leq 1.00 \end{cases} \quad (20)$$

式中 $G_k(u, v) = 1, 2, 3, 4$ 分别对应风险等级颜色划为低风险、中低风险、中高风险和高风险。

在此基础上,可生成连续更新的风险代价图,并进一步叠加全局正射图纹理、月球车历史轨迹和当前航向信息,形成适用于遥操作辅助的运动态势图。

综上所述,所提方法是以当前时刻构建的局部正射图与局部 DEM 为基本环境表达单元,在位姿修正后按照空间重叠关系进行融合更新与扩展更新,并在更新后的 DEM 基础上同步保持风险信息,从而实现面向连续驾驶场景的准实时增量地图维护与风险预示。

3 实验设计与结果分析

3.1 仿真场景构建与实验设置

为验证所提方法在地月通信时延条件下月面连续遥操作辅助场景中的有效性,基于 Chrono 构建了月面巡视仿真环境,并在该环境下开展了连续驾驶实验,如图 3 所示。实验系统主要由月面巡视仿真、地面遥操作控制和环境信息处理 3 部分组成。仿真端负责生成月球车连续运动过程中的左右双目图像与对应里程计位姿;地面控制端采用罗技 G29 方向盘模拟连续驾驶输入;环境信息处理端对双目同步图像、里程计位姿以及双目相机标定参数进行联合处理,完成“点云重建-DEM 生成-局部正射投影-位姿修正-全局增量拼接-风险区域表达”的处理流程。实验以模拟月面连续遥操作过程中环境信息随车体前进持续变化的应用场景。

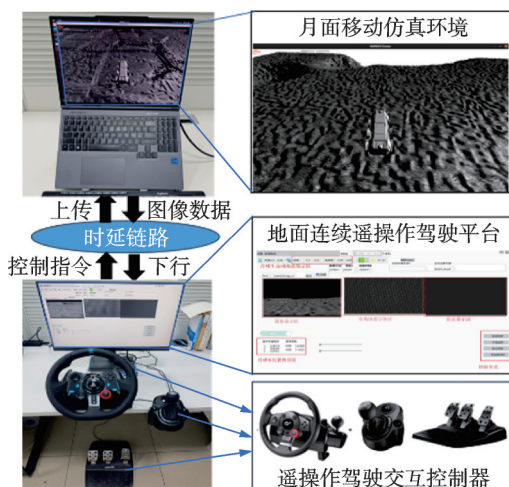


图 3 月面连续遥操作驾驶的实验系统

Fig.3 Experimental system for continuous teleoperated driving on lunar surface

双目相机分辨率设置为 $1\ 920$ 像素 \times $1\ 080$ 像素,水平视场角为 75° ,双目基线长度为 0.24 m,相机安装俯仰角为 20° 。DEM 分辨率设为 0.02 m,

正射图分辨率与 DEM 保持一致,对应像素密度为 50 像素/m。为保证输入时序一致性,双目图像与里程计采用同步机制进行联合处理,最大同步时间窗设为 0.08 s。实验在 Ubuntu 20.04 与 ROS 环境下运行,处理器为 Intel Core i7-12700H,内存为 32 GB,图像处理、点云配准与地图构建主要依赖 OpenCV 与 PCL 实现。

为兼顾计算负担与环境更新连续性,采用固定步长候选关键帧与失败后顺延重试相结合的更新机制。正常情况下,系统每 3 帧选取 1 帧作为候选关键帧;若该帧因点云数量、正射图有效覆盖率或局部配准质量不满足要求而被拒绝,则其后相邻帧立即升格为新的关键帧继续处理。针对里程计在长序列递推中的累计误差,在关键帧更新基础上引入增量 GICP 局部几何修正;当配准质量不足时,则退化为仅依赖里程计先验的更新方式。系统输出单帧 DEM、单帧正射图、全局纹理拼接图、全局风险区域图及态势图,用于对处理过程和最终效果进行分析与验证。

3.2 局部正射图生成结果分析

局部正射图生成质量直接影响后续全局拼接的连续性,因此首先对单帧几何恢复与局部正射图结果进行分析。实验表明,在双目视差估计正常、点云稠密度较高的情况下,生成的局部 DEM 能够较好表征月球车前方地形的高程起伏,并与实际地表结构保持一致的几何趋势。在此基础上,原始透视图经过正射投影后可转换为统一俯视表达,从而有效减弱前视视角带来的几何畸变。图 4 给出了原始图像、点云俯视结果以及单帧正射图之间的对应关系,可以看出单帧正射图在大多数时刻能够保持较好的几何一致性和纹理连续性,为后续多帧拼接提供可靠输入。

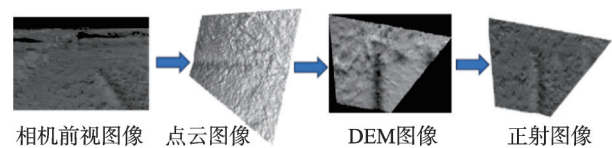


图 4 局部正射图生成过程结果示意图

Fig.4 Schematic diagram of generation process and results for local orthophoto

综上所述,局部正射图生成模块能够在大多数帧上稳定输出几何一致、纹理连续的俯视图,为后续全拼接提供可靠基础,而对异常帧进行有效剔除,则为整套系统的鲁棒运行提供了保障。

3.3 全局增量拼接结果分析

在局部正射图基础上,采用固定参考平面表达与增量映射方式构建全局拼接图。实验结果表明,

该方法能够随着月球车行进持续扩展全局画布,并在时间上保持较好的空间连续性,如图 5 所示。

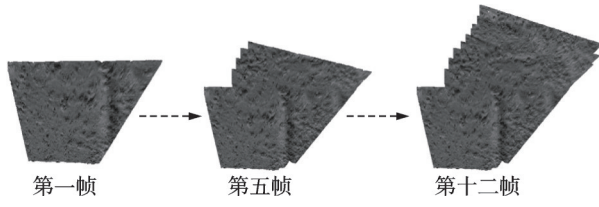


图 5 序列正射拼接图

Fig.5 Schematic diagram of sequential orthophoto mosaic

在多帧融合阶段,若仅依据里程计先验将相邻帧直接映射到统一参考平面中,重叠区域容易出现边界错位和局部结构重影。为抑制该类误差的累积传播,引入增量 GICP 对相邻时刻点云进行局部几何修正。如图 6 所示,未经修正时相邻帧在边缘区域存在明显错位,而引入 GICP 后,相邻帧局部地形结构对齐更好,同时对当前帧位姿提供了厘米级局部修正,重叠区域的一致性得到明显提高。图 7 进一步说明 GICP 在保持整体时序连续性的基础上,有效抑制了里程计误差累积。

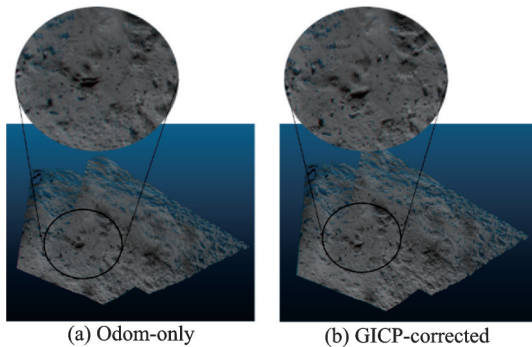


图 6 GICP 修正前后对比图

Fig.6 Comparison before and after GICP correction

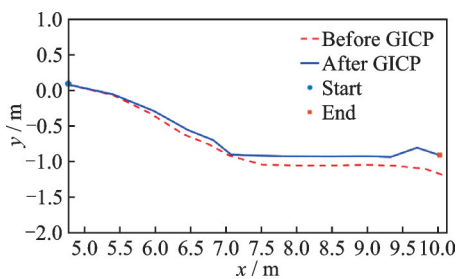


图 7 GICP 位姿轨迹对比

Fig.7 Comparison of GICP pose trajectories

为进一步验证所提方法在月面遥操作连续驾驶辅助场景中的优势,在统一采用上述 GICP 位姿修正的前提下,设置了传统几何拼接基线与本文方法进行对比,如图 8 所示。传统几何拼接基线仅对逐帧配准后的点云进行统一参考平面投影,不进行图像正射校正与多视纹理融合,其结果主要停留在几何拼接后的俯视表达层面。相比之下,所提方法

通过局部正射校正、增量纹理融合与全局递推更新,能够获得更稳定、更完整的连续环境重建结果,在纹理组织、局部结构辨识度和边界规整性方面更优,因此更适合遥操作连续驾驶辅助中的环境判读与风险预示。

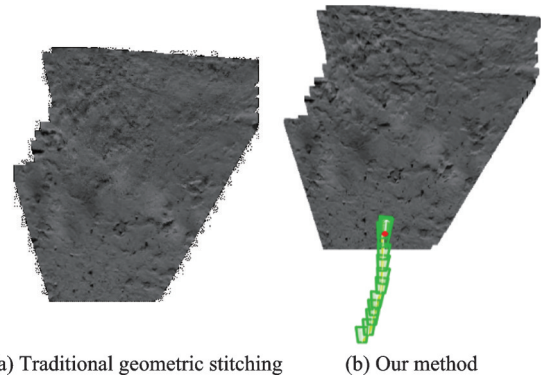


图 8 全局地图对比结果

Fig.8 Comparison results of global maps

在此基础上,进一步从局部环境表达质量、前后有效更新之间的连续性以及系统处理效率 3 个方面进行统计,结果如表 1 所示。正常情况下,系统按跨 3 帧方式选取候选关键帧;若某候选帧因点云、正射图或局部配准质量不满足要求而被拒绝,则其后相邻帧立即升格为新的关键帧继续尝试。在 169 帧输入数据中,共生成 57 帧候选关键帧,最终接受 53 帧,候选关键帧接受率为 92.98%,说明该机制在大多数时刻能够稳定获得有效更新。

表 1 环境连续更新有效性关键指标

Table 1 Key indicators of continuous environment update effectiveness

指标	数值
相邻关键帧平均相对位移/m	0.171 2
相邻关键帧最大位移/m	0.320 2
相邻有效更新平均重叠率	0.954 5
相邻有效更新平均位移占局部覆盖宽度比例/%	4.1
相邻有效更新最大位移占局部地图覆盖宽度比例/%	7.7
平均单帧处理时延/ms	2 134.63

由表 1 可知,相邻关键帧平均相对位移为 0.171 2 m,相邻有效更新平均重叠率达到 0.954 5,且平均位移和最大位移占局部覆盖宽度比例分别为 4.1% 和 7.7%,说明顺延重试机制能够保证前后两次有效更新之间保持较高空间重叠,环境地图不会因单次关键帧更新失败而出现明显断裂。

为进一步说明系统运行效率,图 9 给出了各个主要处理模块的平均耗时统计。结果表明,双目重建、局部配准和 DEM 构建为主要时间开销来源,

而正射投影与全局拼接耗时相对较低。系统平均单帧处理时延为 2 134.63 ms,约为 2.13 s。结合月球车低速行驶特点,设月球车行驶速度为 v ,单帧处理时间为 T_p ,则处理期间车辆前进距离可表示为

$$\Delta l = vT_p \quad (21)$$

本文实验中 $T_p = 2.13$ s。若按月球车低速遥操作行驶速度 $v = 0.05$ m/s 估算,则处理期间车辆前进距离约为 0.106 5 m。该位移量小于相邻关键帧平均相对位移,且相邻有效更新平均重叠率较高,说明系统在当前处理时延下仍能够保持连续的环境表达。考虑到所提方法面向遥操作辅助中的环境图更新与风险预示,并不直接参与月球车底层运动控制闭环,因此平均约 2.13 s 的处理时延能够满足低速月面巡视场景下“准实时”连续遥操作辅助需求。

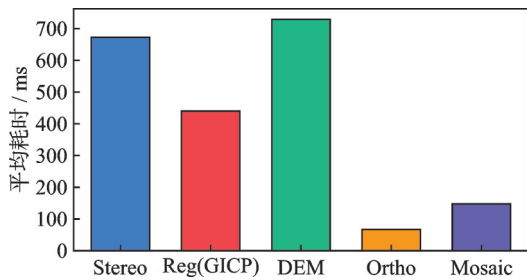
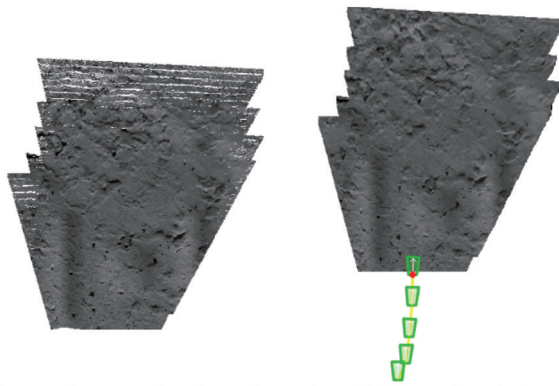


图 9 各模块平均耗时统计

Fig.9 Average time consumption statistics of each module

此外,还补充了基于纹理特征驱动的点云配准方法与所提方法的对比结果,如图 10 所示。基于纹理特征驱动的点云配准方法主要依赖前后帧图像特征建立对应关系,对局部地形几何约束的利用相对不足,因此在连续视角变化和纹理较弱条件下,容易出现匹配不稳定、重建稀疏及局部不连续等问题。相比之下,所提方法将几何地形信息与纹理信息协同纳入连续更新过程,能够形成更稳定、更完整的环境重建结果。



(a) Texture feature registration and mosaic (b) Proposed method

图 10 纹理特征配准拼接与本文方法对比

Fig.10 Comparison between texture feature registration and mosaic and proposed method

综合来看,所提方法的优势并非来自单一模块,而是体现在整套流程的协同作用上。图 6 和图 7 表明,增量 GICP 能够对连续序列中的局部几何关系进行修正,从而有效抑制里程计误差累积,保证地图更新过程的空间稳定性;图 8 表明,通过点云与纹理的协同配准,将几何拼接结果进一步组织为更适合遥操作辅助判读的环境表达;图 10 则进一步说明,单纯依赖纹理特征驱动的点云配准方法难以在该场景下稳定形成连续、完整的环境结果,而所提方法通过几何地形与纹理信息的协同组织,能够获得更稳定、更连贯的全局环境重建效果。

3.4 风险区域表达结果分析

在获得全局正射拼接结果的基础上,进一步基于局部数字高程模型提取坡度与粗糙度等几何特征,构建风险区域表达结果,并与纹理拼接图、月球车运动轨迹及当前朝向信息进行叠加,形成面向遥操作辅助的运动态势图。与仅依赖图像灰度或颜色信息的区域判别方式不同,风险区域的生成主要依据地形几何属性,因此其结果更直接反映局部区域的通行难度与潜在越障风险。

地形风险分布如图 11 所示,绿色区域主要对应坡度较小、表面较平整的可通行区域;黄色区域对应坡度或粗糙度有所增大的过渡区域;红色区域主要分布于局部高差明显、地表起伏较强的位置,反映出较高的行驶风险;白色区域则对应观测不足或几何信息不可靠的位置。整体上,风险区域分布与 DEM 所表征的高程变化趋势基本一致,说明基于坡度与粗糙度的风险表达能够较好反映地形特征。

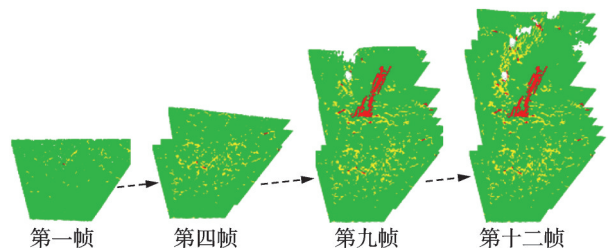


图 11 风险分布图

Fig.11 Risk distribution maps

结合图 12 轨迹拼接图和图 13 轨迹态势图可知,构建的风险区域表达不仅能够反映局部地形通行风险,还在一定程度上保留了观测置信度信息。通过将风险图与全局正射拼接图进行半透明叠加,并同时叠加月球车轨迹与方向箭头,可形成更接近真实遥操作需求的运动态势图^[22],从而增强操作人员对近场地形结构、历史路径与通行风险的综合感知能力。

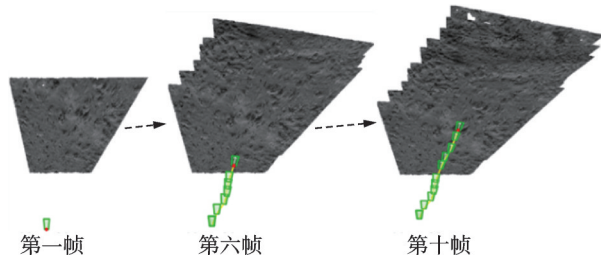


图 12 轨迹拼接图

Fig.12 Trajectory mosaic diagrams

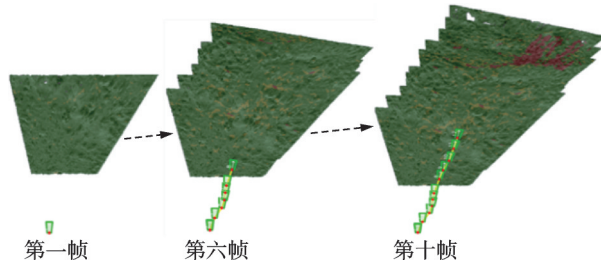


图 13 轨迹态势图

Fig.13 Trajectory situation maps

4 结 论

针对月面遥操作连续驾驶过程中环境观测离散、前视图透畸明显以及环境信息难以连续组织的问题,提出了一种面向遥操作辅助的正射地图增量拼接与风险预示方法。该方法以前视双目图像和里程计位姿为输入,通过双目重建生成局部点云与局部DEM,并构建单帧局部正射图;在此基础上,以局部正射表达替代原始前视图作为环境更新单元,在统一参考平面约束下实现多帧结果的递推拼接;同时结合增量GICP对关键帧之间的局部几何关系进行修正,以抑制连续更新过程中的误差累积;进一步利用DEM的坡度与粗糙度信息生成风险区域图,并与拼接结果、月球车轨迹及航向信息共同组织为面向遥操作连续驾驶辅助的环境表达结果。

实验结果表明,所提方法能够在连续行驶过程中稳定生成局部正射结果,并实现全局环境信息的持续更新。对比实验表明,所提方法相较于传统几何拼接方法,在纹理连续性、边界规整性和环境可判读性方面具有更好表现;相较于基于纹理特征驱动的配准方法,在连续视角变化和纹理条件较弱场景下能够获得更稳定、更完整的环境重建结果。相关定量统计进一步说明,所提方法在局部环境表达完整性、跨帧连续更新能力以及系统运行节奏方面,能够满足月面低速遥操作连续驾驶辅助的应用需求。

本文主要面向双目视觉条件下的月面环境连续表达与风险预示问题展开研究。选择双目视觉作为研究对象,主要考虑其能够同时提供纹理与几何信息,且系统构型相对简单,适于月球车近场环

境感知任务。然而,所提方法对双目匹配质量仍较为敏感,当视差估计退化或点云有效覆盖不足时,会导致DEM质量下降,并进一步影响正射图生成与全局拼接效果;与此同时,激光雷达在弱纹理场景下具有更稳定的几何获取能力,后续可结合激光点云或视觉和激光融合观测,对连续地图构建精度、风险评估鲁棒性及复杂地形适应能力开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 于常青. 基于增强现实的月面巡视器遥操作控制[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
YU Changqing. Research on teleoperation control of lunar rover based on augmented reality [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [2] 李卫华, 郭军龙, 丁亮, 等. 月球车地面遥操作技术发展现状与未来展望[J]. 航空学报, 2023, 44(1): 026333.
LI Weihua, GUO Junlong, DING Liang, et al. Development status and future prospect of lunar rover ground teleoperation technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(1): 026333.
- [3] 杨成, 宋军, 孙军, 等. 月球车实时遥操作方法研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(4): 461-472.
YANG Cheng, SONG Jun, SUN Jun, et al. Research on real-time teleoperation method of lunar rover [J]. Science China: Information Sciences, 2014, 44(4): 461-472.
- [4] 李群智, 贾阳, 陈建新. 月球探测器遥操作系统初步研究[J]. 机器人技术与应用, 2008(3): 33-36.
LI Qunzhi, JIA Yang, CHEN Jianxin. Preliminary study on teleoperation system of lunar probe[J]. Robot Technology and Application, 2008(3): 33-36.
- [5] 刘传凯, 李剑, 张天柱, 等. 嫦娥五号月面采样遥操作中的关键技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(3): 473-488.
LIU Chuankai, LI Jian, ZHANG Tianzhu, et al. Key technologies in teleoperation of Chang'e-5 lunar surface sampling[J]. Science China: Technological Sciences, 2022, 52(3): 473-488.
- [6] COLOMA S, MARTINEZ C, YALÇIN B C, et al. Enhancing rover teleoperation on the moon with proprioceptive sensors and machine learning techniques [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 11434-11441.
- [7] 王贵财. 基于双目立体视觉的月面环境地形重构方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
WANG Guicai. Research on lunar terrain reconstruction method based on binocular stereo vision [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.

- [8] LIU Z Q, DI K C, PENG 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): 145-155.
- [9] 胡社教, 陈宗海, 刘年庆. 基于视觉临场感的机器人遥操作全景环境构建[J]. *模式识别与人工智能*, 2004, 17(1): 124-128.
HU Shejiao, CHEN Zonghai, LIU Nianqing. Panoramic environment construction for robot teleoperation based on visual telepresence[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2004, 17(1): 124-128.
- [10] 丁伟, 张峰, 崔龙, 等. 基于聚类分析的扑翼飞行器视觉图像处理和图像拼接方法[J]. *信息与控制*, 2024, 53(3): 416-432.
DING Wei, ZHANG Feng, CUI Long, et al. Vision image processing and stitching method for flapping-wing flying robots based on cluster analysis[J]. *Information and Control*, 2024, 53(3): 416-432.
- [11] HUANG R, DING W, XU Z, et al. Fusion of multiple photogrammetric DEMs for large-scale lunar topographic mapping[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(6): 5227-5242.
- [12] JIA Y, CAO F, WANG T, et al. CAD-Mesher: A convenient, accurate, dense mesh-based mapping module in slam for dynamic environments[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2026, 28: 1025-1036.
- [13] WANG Z Y, HUANG S G, BUTT J A, et al. Cross-modal feature fusion for robust point cloud registration with ambiguous geometry[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2025, 227: 31-47.
- [14] MA W, HUANG Y H, TANG S J, et al. Cross-modal 2D-3D feature matching: Simultaneous local feature description and detection across images and point clouds[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2025, 229: 155-169.
- [15] ISLAM B, SINGH A, TRIVEDI S D, et al. Lunar DEM and orthoimage generation from TMC-2 stereo data and their quality assessment[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2023, 51(6): 1187-1196.
- [16] DI K H, JIA M N. High-resolution large-area digital orthophoto map generation using LROC NAC images[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2019, 85(7): 481-491.
- [17] LIU Z Q, DI K H, LI J, et al. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'e-4 mission[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2020, 63(4): 170-181.
- [18] CHEN Z H, LI K H, LI H R, et al. Metric localization for lunar rovers via cross-view image matching[J]. *Visual Intelligence*, 2024, 2(1): 12.
- [19] LITAKER H L, BEATON K H, LI Z Q, et al. Lunar terrain vehicle (LTV) remote teleoperation studies under four lunar communication latencies[C]//*Proceedings of 2025 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE*, 2025: 1-21.
- [20] SEGAL A, HAEHNEL D, THRUN S. Generalized-ICP[C]//*Proceedings of the Robotics: Science and Systems Conference. Seattle: [s.n.]*, 2009.
- [21] ILES P, WINTER M, SILVA N, et al. Surface navigation [M]//*Contemporary Planetary Robotics: An Approach Toward Autonomous Systems. Weinheim: Wiley-VCH*, 2016: 181-254.
- [22] NISHISHITA T, ISHIGAMI G. Slip estimation model for traversability-based motion planning of cargo rover on extraterrestrial surface[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2025, 12: 1638667.

(编辑:夏道家)