

面向载人探月的宽基线相机视觉定位方法研究 与地面试验场验证

许雄^{1,2,3}, 岑文广¹, 曹子龙¹, 肖长江^{1,2,3}, 冯永玖^{1,2,3}, 谢欢^{1,2,3},
王栋⁴, 童小华^{1,2,3*}

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室,
上海 200092; 3. 上海市载人月球探测融合创新中心, 上海 200092;
4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:针对载人月球车速度较快, 远距离测量精度要求更高的特点, 研究利用宽基线双目相机提高其测量精度以支撑其自主导航定位能力。提出一种面向载人探月场景的宽基线双目相机视觉定位方法, 基于宽基线成像特点优化特征点提取与匹配过程, 通过特征点重投影误差与深度距离阈值设定保留更多远距离物方点参与位姿计算和优化, 提升位姿估计的精度。基于所搭建的宽基线立体相机开展了不同基线条件下的视觉定位实验数据采集与实验。与经典的ORB-SLAM2算法进行比较, 实验结果表明: 所提出的算法针对于宽基线实验数据能够取得更优的定位结果, 终点的相对位置偏差指标不超过3.1%。初步验证了宽基线导航相机架构在类地外天体场景下的可行性。

关键词: 载人探月; 双目视觉; 宽基线; 视觉导航定位

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2024)05-0652-07

DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2024.05.004

Research and Ground Validation on Visual Localization Methods with Wide-baseline Stereo Cameras for Manned Lunar Exploration

XU Xiong^{1,2,3}, CEN Wenguang¹, CAO Zilong¹, XIAO Changjiang^{1,2,3}, FENG Yongjiu^{1,2,3},
XIE Huan^{1,2,3}, WANG Dong⁴, TONG Xiaohua^{1,2,3*}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Planetary Mapping and Remote Sensing for Deep Space Exploration, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Integrated Innovation Center for Manned Lunar Exploration, Shanghai 200092, China; 4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The manned lunar rover typically operated at relatively high speeds and required high precision for long-distance measurements. The wide-baseline stereo cameras could be installed to improve the measurement accuracy and enhance its positioning capabilities. In this paper, a wide baseline stereo cameras based visual positioning method for manned lunar exploration was proposed. The feature point extraction and image matching processes based on the characteristics of wide baseline imaging were built. By optimizing feature point reprojection errors and depth distance thresholds, more distant object points were retained for pose estimation. Based on the designed wide-baseline stereo cameras, datasets were collected for the following visual localization experiments with dif-

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(42471450, 42221002, 42241167); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 许雄, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为巡视器视觉感知与导航定位。E-mail: xvxiang@tongji.edu.cn

* 通讯作者: 童小华, 男, 博士, 教授, 研究方向为航天测绘遥感与深空探测。E-mail: xhtong@tongji.edu.cn

ferent baselines. Compared to the classical ORB-SLAM2 algorithm, the experimental results demonstrated that the proposed algorithm achieved better positioning results for wide baseline experimental data, with the relative position deviation index at the endpoint was less than 3.1%. This research validated the potential of wide baseline cameras to be applied in planetary exploration.

Key words: manned lunar exploration; stereo vision; wide baseline; visual localization

1 引言

地外天体巡视器就位探测能够更加直接高效地进行详细深入的原位探测,对人类研究行星地质演化以及开发利用星表资源具有重要科学意义^[1-2]。美国阿波罗计划之后,人类的月球探索进入了一个低谷期,直到21世纪初,随着中国嫦娥探月三期工程的圆满成功与四期工程的全面推进,月球探测逐渐再次成为国内外关注的重点。在前期无人探月的基础上,中国计划在2030年前实现中国人首次登陆月球,开展月球科学考察,探索建造月球科研试验站及相关技术试验验证^[3]。此外,美国针对阿尔忒弥斯月球探测计划进行完善推进,预计2025年实现载人重返月球目标,建设永久月球行动基地,为未来的载人火星探索奠定基础^[4-5]。

包括载人月球车在内的巡视器作为执行探测任务的主要载体,其工作环境具有非结构化、地形复杂未知等特点,需要具备较高的自主能力,包括环境感知、自主导航定位和路径规划等^[6]。其中,自主导航定位功能是开展行星表面探测任务的基础,其主要依赖于巡视器所携带的相机等传感器通过视觉导航定位实现^[6]。视觉导航定位方法具有较高的定位精度与稳健性,一般是通过巡视器搭载的导航相机拍摄不同站点间的立体影像,对前后站影像进行匹配关联进而解算出巡视器的位姿变化。受运载能力、发射和着陆载荷布局等多方面限制,已有的无人巡视器大小受到严格限制,其相应的立体导航相机基线长度通常较短,例如,中国成功发射的无人巡视器所搭载的导航相机基线长度在27 cm左右;美国的火星巡视器中,毅力号携带的导航相机的基线长度最长,约为42 cm^[7]。根据立体成像原理,双目相机基线长度将会影响物方观测点的深度估计。通常基线长度越长,能够准确估计的距离越远,三维测量的精度越高,从而有效拓展导航相机的可靠观测范

围,让运动体有足够的时间完成障碍探测与避障控制操作。因而,宽基线双目相机架构对速度较快的运动载体(如载人月球车)的视觉导航定位应用具有重要研究意义。

载人月球车作为载人探测月面活动系统核心组成,对于开展探测任务、提高航天员工作效率等具有重要作用,同时在航天员离开之后可以扩展为自主探测设备,实现长期无人化自主活动,拓展勘察范围,提升探测综合效益^[8]。基于上述任务需求,载人月球车通常拥有远超无人巡视器的运行速度,有必要实现更远距离的高精度测量,以确保其自主行驶安全。参考美国成功发射的3辆LRV(Lunar Roving Vehicle)载人月球车,其整车长约3.1 m,轮距1.83 m,基于其较宽的车体,在理想情况下可以构建出基线长度接近米级的立体相机架构,以提升测量精度。

本文主要探索宽基线相机在载人探月场景下应用的可行性,提出了一种宽基线双目相机视觉定位方法,基于宽基线成像特点优化特征点提取与匹配过程,在同济大学月球与深空探测精密测绘遥感综合实验场开展地面试验验证,并与传统ORB-SLAM2算法比较定位效果。

2 宽基线相机视觉定位算法

2.1 相机标定

双目相机系统需要进行标定处理,为后续畸变校正与核线校正提供校正参数。经过校正后的影像能够利用核线约束减小搜索范围,提高立体匹配效率且降低错误匹配。

本文采用张正友标定法^[9]对双目相机进行立体标定,获得双目相机的内外参数,根据标定结果对原始图像进行畸变校正并生成核线影像。该方法采用棋盘格标定板作为双目相机的标定物,通过提取匹配棋盘格上的显著角点来构建标定影像之间的位置关系,并结合单应性变换迭代求解得到最终的内外参数估计结果。本文实验采用的

标定板规格为 6×3 , 每个棋盘格大小为 200 mm, 如图 1 所示。



图 1 标定影像
Fig. 1 Calibration image

2.2 视觉定位算法整体框架

本文基于特征点方法对序列立体影像进行相对位姿计算, 流程包括: 特征提取匹配、特征跟踪、位姿估计优化。整体技术路线如图 2 所示。

2.2.1 特征点提取与立体匹配

本文采用 ORB^[10] (Oriented Fast and Rotated BRIEF) 特征进行特征点提取匹配, 能够识别影像中的角点信息, 并具有良好的尺度与旋转描述性。之后, 针对提取的 ORB 特征进行均匀化分布处理, 通过四叉树方式对每幅影像进行节点划分, 对每个节点中最高响应值特征点进行保留, 以尽可能在空间均匀分布的情况下保证提取特征点的质量。

依据立体标定获得的双目相机内外参数对影像进行核线校正。在核线约束的基础上利用描述子距离进行匹配, 对左影像中的每一个 ORB 特征点在右影像对应行上的特征点集中搜索相似的匹配点。

由于宽基线相机影像数据具有更大的视角变化, 因而同名点的视差值相对会变化更大, 需要以右影像的待匹配点为中心进行更精确的特征点搜索。基于一定视差范围设置阈值 r 为搜索半径大小, 并在该范围内进行归一化 SAD (Sum of Absolute Differences) 匹配, 选择更加准确的匹配结果, 进行亚像素精化。除此之外, 立体匹配点对所覆盖的距离也得到拓展, 在相同的视差值情况下宽基线影像的特征点在物方坐标系中会具有更大的深度值, 即能够获得更远距离的视觉信息, 因而后续位姿计算可以加入更多远距离物方点。

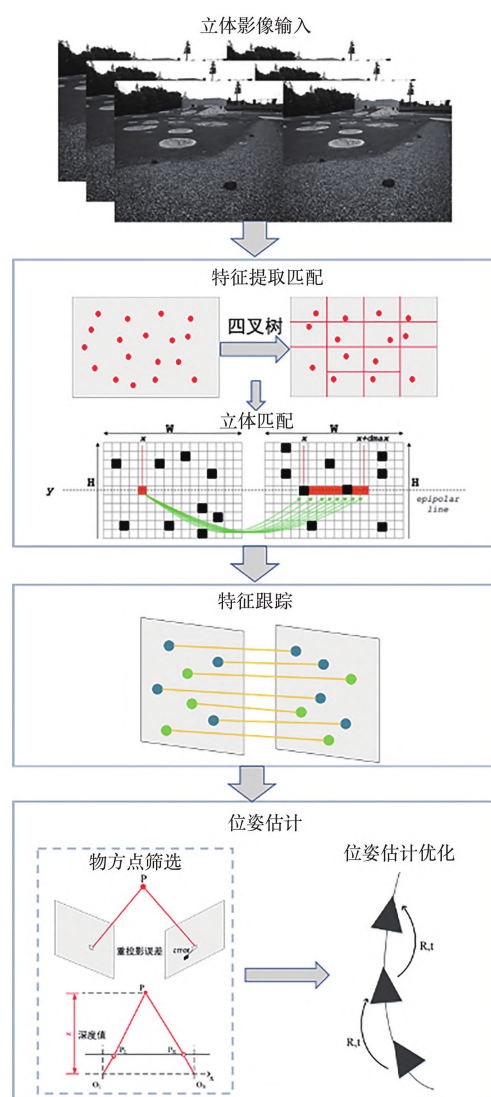


图 2 视觉里程计技术路线图
Fig. 2 Framework of the proposed method

2.2.2 位姿估计

立体匹配点对通过前方交会获得其在世界坐标系下的三维坐标, 为后续的运动估计提供初值输入。相邻帧的特征跟踪采用基于描述子的快速最近邻匹配获得初始跟踪结果, 然后对初始跟踪结果采用 RANSAC (Random Sample Consensus) 处理去除仍可能存在的错误匹配。

运动估计部分需要结合特征点三维坐标和跟踪结果进行计算, 采用 2D-3D 方法中的 EPnP 算法^[11]。首先, 选取至少 4 对匹配点进行初始 EPnP 运动估计, 利用初始估计结果计算所有匹配点的重投影误差, 如果误差小于设定阈值则认为内点, 内点数量大于 90% 则认为得到了正确

的相对位姿;然后,利用所有内点再进行一次EPnP运动估计,得到最终位姿结果。

EPnP估计中初值的准确性会对结果有较大影响,针对宽基线影像数据观测距离远的特点,参与位姿估计的三维点需要进行筛选,由于近处重叠区域随着基线长度增加而减小,因而需要加入更远距离特征点来提高其在影像中的良好分布性。结合特征点在每一帧的重投影误差与深度距离作为判断阈值,远距离物方点相应重投影误差范围设置更大,保留深度值为0.5~50 m的物方点作为运动估计算法的初值输入,同时也为后续的位姿优化提供更多观测量。

2.2.3 位姿优化

为了进一步提高立体视觉定位精度,针对视觉定位中多帧立体像对拥有共同观测的情况,采用固定优化窗口大小的递增式光束法平差对位姿结果进行优化。该方法第一次优化只优化当前相机的位姿结果,第二次优化递增式窗口中第一帧影像以外对应的相机位姿和观测点的三维坐标,有效提高了算法的鲁棒性与精度,具体过程如图3所示。

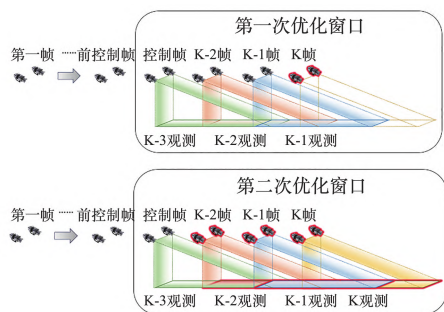


图3 位姿优化流程图

Fig. 3 Illustration of the pose optimization procedure

2.3 实验数据场地与实验数据集

2.3.1 双目相机架构

本文采用灰点相机作为基本单元进行双目相机模拟,其中,单个相机的视场角为 $72.51^\circ \times 57.62^\circ$,焦距为6 mm,图像大小为 2448×2048 pixel,成像距离可达50 m以上,能够支持5~25 Hz的影像数据采集频率。

为构建双目立体视觉系统,首先对2个灰点相机进行固连,采用定制钢轨作为2个相机连接的基础件,并通过快装板与夹紧结构将相机固定在基础件上,2个相机在基础件上的安装距离即是双目立体视觉系统的基线长度,从而完成双目

相机物理搭建。

通过外部信号触发器对双目立体相机进行电路连接,输出指定频率的触发信号控制双目相机同步地进行拍摄,获得立体影像数据,完成基于灰点相机的双目立体视觉系统构建。同时在定制钢轨的几何中心处安装GPS天线接收位置信息。该双目视觉测量系统具有较长的基线,根据立体测距原理可知其观测距离更远,观测精度也更高,能够获得更多外界环境信息。如图4所示为搭建的宽基线双目相机设备。

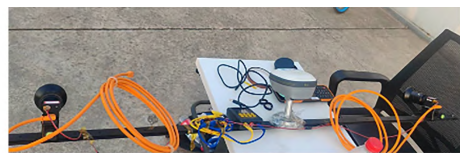


图4 宽基线双目相机设备

Fig. 4 Wide-baseline stereo cameras

2.3.2 实验场地

地外天体环境属于非结构化环境,与地球上的自然、城市环境有较大的区别,其纹理特征较为相似单一,灰度变化较不明显,视觉特征贫乏且缺乏多样性,不仅如此,地外环境本身恶劣多变,其复杂性和不确定性也会大大增加任务难度。

因目前未有巡视器搭载宽基线双目相机拍摄连续图像序列数据集,难以基于真实地外天体环境开展视觉定位实验,因此,本文依托同济大学月球与深空探测精密测绘遥感综合实验场及自行构建的导航相机架构,开展宽基线双目相机影像数据采集,该试验场由两部分构成:①基于月球表面环境搭建的月面模拟试验场,包含不同种类及尺寸的撞击坑,地面则是以灰色细小石块模拟月壤,同时有大小不一的玄武岩不规则分布在场各处;②基于火星表面环境搭建的火星模拟试验场,主要由深红色的火山石、火山灰等组成,且地面中不规则分布裸露着各种形状的岩石。

2.3.3 数据集

基于地面试验场进行不同基线长度导航相机影像数据采集,结合LRV载人月球车尺寸与行驶速度考虑,确保相机观测的最近重叠区域能够反映车体周围环境情况,设置基线长度分别为1.2 m与0.9 m。2类基线长度数据集均包含不同环境类别的影像数据,分别为月球试验场数据与火星试验场数据,如图5所示。

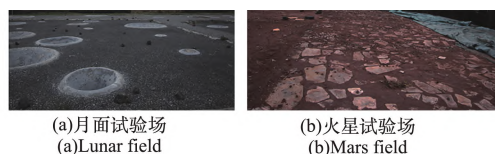


图5 模拟试验场

Fig. 5 Simulation field of Lunar and deep space exploration

月球试验场数据包含2组不同的行走轨迹,影像之中记录了月球试验场当中包含的玄武岩石块、撞击坑等地物特征;火星试验场数据也包含2组行走轨迹,一些裸露火山石等地物特征也被记录在导航相机影像之中。采集过程中相机运动速度约为2 m/s,并通过实时动态(Real Time Kinematic, RTK)测量技术定位获得地面真值(GPS),定位精度可达到厘米级。

3 验证实验及结果

基于上述试验场数据集进行算法实验,利用里程计评估(Evaluation of Odometry, EVO)^[12]工具对视觉导航定位算法的轨迹结果进行精度评定分析,所采用的误差评价指标如下:①绝对轨迹误差(Absolute Trajectory Error, ATE)。其实质是计算每个位姿李代数的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),能够描述2个轨迹之间的平移误差,是评价算法精度的首要指标。②相对位置偏差(Relative Error, RE)指标,用于描述定位结果,反映了轨迹最后一帧定位误差相对于轨迹总长度的比例。③完成度指标,即计算得到位姿结果的影像数量占完整轨迹影像帧数量的百分比,能够反映算法的稳定性。

本文以ORB-SLAM2^[13]的视觉定位实验结果

作为参考对比,分析提出的视觉导航定位算法地面试验结果。

图6为1.2 m宽基线长度的地面试验场数据集运行的轨迹结果。其中,虚线轨迹是地面真值,蓝色轨迹是提出算法的定位结果,绿色轨迹则是由ORB-SLAM2算法得到的结果,轨迹图中标记了行驶过程中的起点与终点,部分未标记终点则是起点与终点位置接近,可以视为同一位置。图6中01和02序列对应月球模拟试验场,实际轨迹长度分别约为71 m和91 m,03和04序列对应火星模拟试验场,实际轨迹长度分别约为38 m和29 m。4组数据序列都能在本文算法下恢复相机的全部行驶轨迹,与地面真值能较好地吻合。ORB-SLAM2算法的完成度最高不到86%,不能完成行驶轨迹的重建。

表1为01~04序列数据的定量分析结果。由表1可知,本文算法在4组序列的定位结果要比ORB-SLAM2更好,整体更加接近地面真值,仅在04序列的ATE上略差,其余的相对位置偏差和完成度均明显更优,本文算法达到了100%的完成度,终点位置的定位偏差在3.1%以内。

根据图6轨迹结果可以看出,ORB-SLAM2算法未能完整计算所有影像位姿,追踪丢失的时间节点主要出现在行驶过程中的转向操作。该类影像相较于直线行驶会存在更大的视角变化,相邻影像的特征点跟踪需要更强的鲁棒性,同时旋转过程更容易出现运动模糊的情况,从而导致位姿计算结果不稳定,轨迹不平滑。例如,03序列的轨迹结果,轨迹不够平滑且完成度不足70%。除此以外,导航相机在行驶过程中会观测到特征点

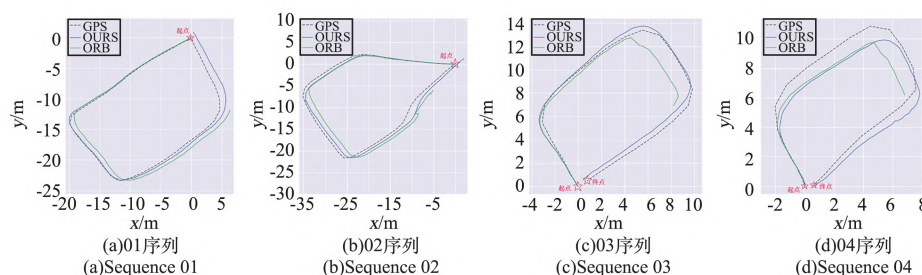


图6 地面试验场数据集运行轨迹(xy方向,基线1.2 m)

Fig. 6 Experimental results with the baseline of 1.2 m (xy direction)

表 1 地面试验场数据集算法试验精度比较(基线 1.2 m)
Table 1 Comparison results of the datasets with a baseline of 1.2 m

评价指标	月球场 01 ORB-SLAM2	月球场 01 本文算法	月球场 02 ORB-SLAM2	月球场 02 本文算法	火星场 03 ORB-SLAM2	火星场 03 本文算法	火星场 04 ORB-SLAM2	火星场 04 本文算法
ATE_{RMSE}/m	4.515	4.127	4.910	4.481	2.182	2.140	2.464	2.571
$RE/\%$	7.13	1.91	5.70	2.15	9.28	1.75	28.66	3.03
完成度/%	77.32	100.00	85.29	100.00	69.49	100.00	61.65	100.00

匮乏的试验场区域,使得影像匹配与跟踪过程更具有挑战性,特征点在图像中的分布效果也会受到影响,进而导致位姿结果误差增加。本文算法的特征提取与匹配过程针对上述情况具有更强鲁棒性,因而位姿估计结果更加稳定。

总体而言,本文算法在 1.2 m 基线长度导航相机影像数据下能够恢复其全部运动轨迹,定位结果优于算法 ORB-SLAM2。

图 7 为 0.9 m 宽基线长度的地面试验场数据集运行的轨迹结果,其示例与图 6 相同。05 和 06 序列对应月面模拟试验场,实际轨迹长度分别约为 70 m 和 91 m,07 和 08 序列对应火星模拟试验场,实际轨迹长度分别约为 41 m 和 31 m。4 组序列都能在所提算法下恢复相机全部的行驶轨迹,完成度均为 100%,与实际轨迹能较好地匹配,而 ORB-SLAM2 算法则未能将所有序列的影像位姿全部计算获取,仅有 05 序列达到了 100% 完成度,

但是 06 序列的完成度不足 50%。

表 2 展示了 05~08 序列数据的定量分析结果。由表 2 可知,所提算法在 4 组数据序列的定位结果上都达到了 100% 的完成度,与另一组基线长度数据集结果一致,其相对位置偏差指标也均优于参考算法结果,都在 2.4% 以内,仅有 07 序列中的 ATE 指标略差,其差值也仅为 2 cm。其中 05 序列 2 种算法都达到了 100% 的完成度,但是所提算法的定位精度明显更高。其主要原因为:①宽基线相机具有更远的观测距离,在位姿估计过程中考虑了远距离物方点对估计结果的影响,同时更远距离特征点的加入能提高影像中特征点分布的良好性,使得位姿解算不容易陷入局部最优值;②数据采集过程中会出现光照变化的情形,导致影像间差异增大,位姿计算不稳定,所提算法能通过递增式光束法平差对拥有共同观测的位姿进行优化,提高定位结果与鲁棒性。

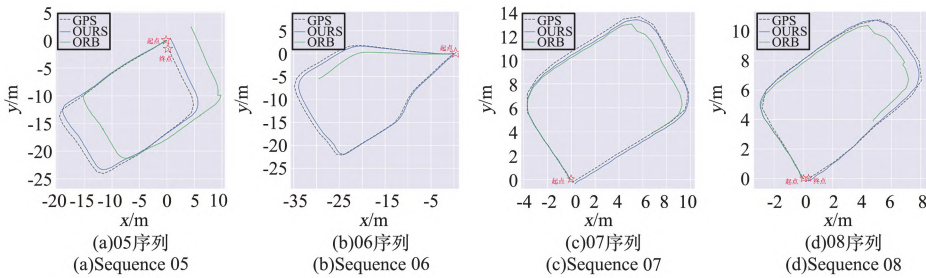


图 7 地面试验场数据集运行轨迹(xy 方向,基线 0.9 m)
Fig. 7 Experimental results with the baseline of 0.9 m (xy direction)

表 2 地面试验场数据集算法试验精度比较(基线 0.9 m)
Table 2 Comparison results of the datasets with a baseline of 0.9 m

评价指标	月球场 05 ORB-SLAM2	月球场 05 本文算法	月球场 06 ORB-SLAM2	月球场 06 本文算法	火星场 07 ORB-SLAM2	火星场 07 本文算法	火星场 08 ORB-SLAM2	火星场 08 本文算法
ATE_{RMSE}/m	7.644	5.474	7.221	6.213	1.247	1.267	1.885	1.814
$RE/\%$	8.24	2.38	31.2	1.42	5.28	0.95	11.11	0.71
完成度/%	100.00	100.00	36.33	100.00	78.93	100.00	77.45	100.00

依据实验结果对比可知,所提算法在2种基线长度下的模拟试验场数据的定位结果整体上优于ORB-SLAM2的结果,不仅全部达到100%完成度,且绝对轨迹误差与相对位置偏差也明显更小,定位精度更高,能更好地恢复相机运动轨迹。

表1与表2的实验结果显示,所提算法在基于模拟地外环境的宽基线双目相机影像数据上稳定地重建运动轨迹,评价指标中绝对轨迹误差在6.3 m以内,表示终点位置偏差的RE指标不超过3.1%,表明宽基线导航相机架构在高速载人探月任务下具有高精度视觉导航定位的可行性。

4 结论

针对载人探测车场景搭建了宽基线导航相机模块,在同济大学月球与深空探测精密测绘遥感综合实验场进行数据采集,利用所提出的视觉导航定位算法与ORB-SLAM2算法进行定位实验,恢复了宽基线导航相机的运动轨迹结果。实验结果表明,所提算法在模拟试验场的定位结果评价指标优于ORB-SLAM2,其相比于参考算法具有更好的定位精度与鲁棒性,可为后续载人月球车巡视探测自主导航定位任务提供参考。

参考文献(References)

- [1] 强祺昌,林宝军,刘迎春,等.深空探测自主导航技术综述[J].导航与控制,2023,22(1):19-32.
Qiang Q C, Lin B J, Liu Y C, et al. Review of autonomous navigation technology for deep space exploration[J]. Navigation and Control, 2023, 22(1):19-32. (in Chinese)
- [2] 李志平,顾朋,孙帅,等.未来行星表面漫游车自主导航技术研究[J].空间控制技术与应用,2021,47(5):58-67.
Li Z P, Gu P, Sun S, et al. Autonomous navigation technology of planetary rover[J]. Aerospace Control and Application, 2021, 47(5):58-67. (in Chinese)
- [3] 葛平,康焱,张天馨,等.2023年深空探测进展与展望[J].中国航天,2024(2):7-15.

- Ge P, Kang Y, Zhang T X, et al. Progresses and prospects of deep space exploration in 2023[J]. Aerospace China, 2024(2):7-15. (in Chinese)
- [4] 张绿云,杨开.美国NASA阿尔忒弥斯载人探月任务规划与进展[J].国际太空,2022(12):17-22.
Zhang L Y, Yang K. Overview and status of NASA's Artemis manned Lunar exploration mission[J]. Space International, 2022(12):17-22. (in Chinese)
- [5] 张扬眉.2023年国外深空探测领域发展综述[J].国际太空,2024(3):11-15.
Zhang Y M. Overview of the deep space exploration abroad in 2023[J]. Space International, 2024(3):11-15. (in Chinese)
- [6] 郭延宁,冯振,马广富,等.行星车视觉导航与自主控制进展与展望[J].宇航学报,2018,39(11):1185-1196.
Guo Y N, Feng Z, Ma G F, et al. Advances and trends in visual navigation and autonomous control of a planetary rover[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(11):1185-1196. (in Chinese)
- [7] Maki J N, Gruel D, McKinney C, et al. The Mars 2020 engineering cameras and microphone on the perseverance rover: A next-generation imaging system for Mars exploration[J]. Space Science Reviews, 2020, 216: 1-48.
- [8] 罗小桃,张崇峰,胡震宇,等.我国首次载人月球车任务需求分析[J].载人航天,2019,25(5):693-698.
Luo X T, Zhang C F, Hu Z Y, et al. Requirement analysis of the first manned lunar rover in China[J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(5):693-698. (in Chinese)
- [9] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [10] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]//2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE, 2011: 2564-2571.
- [11] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81: 155-166.
- [12] Grupp M. EVO: Python package for the evaluation of odometry and SLAM[EB/OL]. (2017-09-13)[2024-04-22]. <https://github.com/MichaelGrupp/evo>.
- [13] Mur-Artal R, Tardos J D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5):1255-1262.

(责任编辑:高 慧)