

# 月面南极巡视器自主导航路径规划算法

王慧婷<sup>1</sup>, 余萌<sup>1</sup>, 李昱叶<sup>1</sup>, 胡涛<sup>2</sup>, 郑博<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 211106; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 针对巡视器在月球南极弱通信条件下实现阴影区探测及自主采样返回等复杂任务时, 对高精度自主导航系统的迫切需求, 综合考虑巡视器安全保障及月面南极具有提升导航精度属性环境因素等, 结合A\*算法构建的全局辅助路径与DWA (Dynamic Window Approach) 算法, 提出一种实现巡视器高精度自主导航的融合路径规划算法 (Landmark Integrated Path Planning Algorithm, LIPPA)。将激光雷达定位建图算法的定位精度作为评价指标, 分别设置了数学仿真及半物理试验来验证本算法的可行性和在不同应用场景对提升巡视器导航精度的有效性。试验结果表明, 巡视器沿着LIPPA规划的路径移动时, 与单因素考量的传统路径规划算法相比, 激光雷达定位建图算法在二维平面的平均绝对定位误差最大减少了42%, 可为月面南极复杂地貌环境下的自主导航与路径规划任务提供技术支撑。

**关键词:** 月球南极; A\*算法; DWA算法; 高精度自主导航; 融合路径规划算法

**中图分类号:** V44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2023)06-0598-10

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230084

**引用格式:** 王慧婷, 余萌, 李昱叶, 等. 月面南极巡视器自主导航路径规划算法[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 598-607.

**Reference format:** WANG H T, YU M, LI Y Y, et al. Autonomous navigation path planning algorithm for rovers in lunar south pole surface[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 598-607.

## 引言

为进一步验证月球成为未来人类长期开展科研探测任务甚至是定居地的可能性, 未来月球南极探测的重点是寻找水冰资源, 随着对月球不断深入探索, 研究人员发现在月球南极阴影区(如陨石坑内)可能赋存着大量的水冰<sup>[1]</sup>, 由于复杂地形的遮挡、对地可见的高度角低及月球自转、天平动等影响, 导致一些阴影区内存在通信条件弱、通信阻断的情况<sup>[2]</sup>, 巡视器难以通过传统遥操作方式实现漫游巡视的任务<sup>[3]</sup>, 此外, 与月球中低纬地区相比, 月球南极的地形地貌更复杂且未知, 这要求巡视器须具备高精度导航及自主路径规划能力, 而在复杂环境下自主路径规划离不开精确的定位信息与高精度环境地图的支撑。

构建月面环境地图以往主要依赖于视觉相机, 但阴影区复杂的光照特性极大程度限制了相机等视觉传感器的使用, 基于此引入基于激光雷达实时定位与建图 (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) 技术来实现巡视器在未知环境下的定位与建图<sup>[4]</sup>, 其精度也与路径规划结果紧密相关。然而, 不同于地面拥

有各种高楼、马路及植被等丰富的环境特征, 月面南极的环境特征稀疏且单一、纹理贫瘠且地形地貌非结构化。除此之外, 一些阴影区内部物质的光学表征效能也具有未知性, 这些不利因素致使激光雷达难以获取有效的点云特征或是提取到的点云特征呈现单调性及纹理稀疏性, 从而进一步影响点云特征驱动下定位建图的精度。因此, 巡视器在进行路径规划过程中有必要将提升定位建图精度这一指标纳入考量, 从而使巡视器能够具有准确感知环境、精准定位并成功实现自主路径规划的能力。

目前巡视器全局路径规划方法, 如A\*算法<sup>[5]</sup>、RRT (Rapidly-exploring Random Trees) 算法<sup>[6]</sup>、遗传算法<sup>[7]</sup>等, 虽然能够获取全局最优路径却不具备规避未知障碍物的能力, DWA (Dynamic Window Approach) 算法<sup>[8]</sup>、D\*算法<sup>[9]</sup>及人工势场法<sup>[10]</sup>等局部路径规划算法虽然具有良好的局部避障能力但规划成功率较低, 为保障巡视器在月面南极复杂环境下能够安全行驶并提升自主路径规划算法的成功率, 融合全局与局部路径规划算法, 王楷文等<sup>[11]</sup>提出了一种滚动窗口局部避障算法, 并将基于A\*算法构建的全局辅助线引入其中实

收稿日期: 2023-05-23 修回日期: 2023-08-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (62103259); 南京航空航天大学青年科技创新基金资助项目

现了全局与局部地图的融合, 进一步提高了月面巡视器路径规划的成功率。吴伟槐等<sup>[12]</sup>通过加权融合月面地形、光照和通信等环境因素优化了A\*算法的评价函数, 同时基于改进后的D\*算法进行局部路径规划, 保证了巡视器在未知障碍环境具有安全行驶的能力。

综上所述, 未来巡视器在月球南极弱通信条件下执行复杂的漫游巡视任务时, 对高精度导航及自主路径规划能力的需求将更为迫切, 本文综合考虑巡视器安全保障及月面具有提升导航精度属性的环境因素等, 提出一种实现巡视器高精度自主导航的融合路径

规划算法, 旨在一定程度上抑制SLAM技术由于特征匹配匮乏而迅速增长的状态估计误差。

本文所提改进的LIPPA整个流程如图1所示, 首先利用SLAM技术构建用于巡视器自主路径规划的环境地图, 然后基于A\*算法构建全局辅助路径, 在融合全局辅助路径与DWA算法的基础上, 引入具有导航精度提升属性的月面南极显著路标来构造新评价函数, 旨在自主路径规划过程中, 进一步提升定位建图的精度, 最后通过导航精度评估试验来验证本算法对巡视器导航精度提升的有效性。

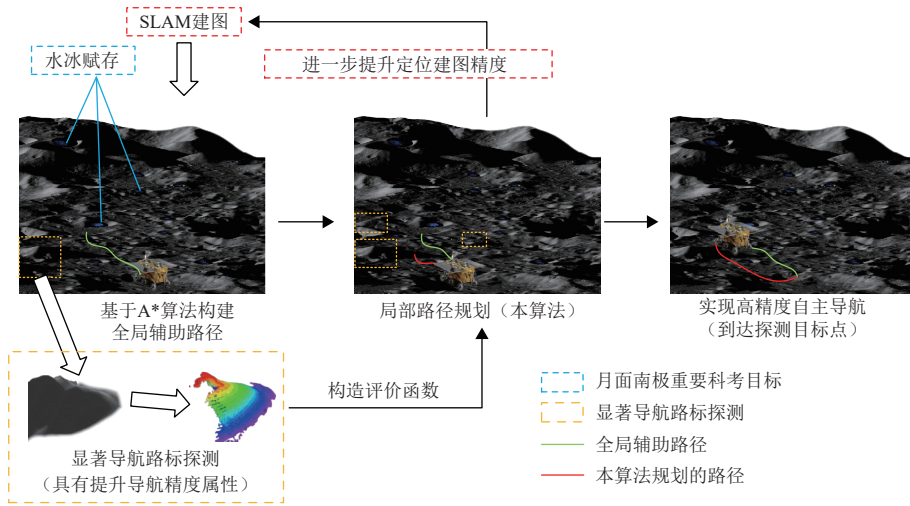


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed LIPPA algorithm

### 1 构建月面巡视器全局辅助路径

A\*算法具有规划路径距离短、计算简单等特点, 在全局路径规划中得到了广泛应用。但其规划的路径常常具有冗余、拐点较多的不足, 不利于巡视器在复杂、崎岖月表环境下运动的控制, 因此, 本节将A\*算法规划的路径进一步平滑处理, 构建一条全局辅助平滑路径, 旨在为后续基于DWA的局部路径规划算法提供前置基础。

在A\*算法输出的路径节点中, 进一步提取关键节点<sup>[13]</sup>构建全局辅助路径, 如图2所示, S, G分别为起始栅格和目标栅格的中心节点, 1~7为路径节点, 黑色区域为形式障碍。可以看出优化前存在多处路径拐点, 对其进行关键节点提取处理。①起始节点与目标节点均为关键路径节点。②从起始节点开始, 遍历所有的路径节点直至到达目标节点, 首先找出与当前节点最近的关键节点, 然后检测二者之间所围成的矩形区域内是否存在障碍物, 若不存在, 则舍弃当前节

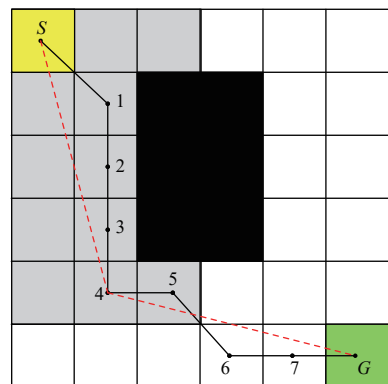


图 2 提取关键节点

Fig. 2 Extracting the key points

点。若存在, 则进一步检测连接二者的线段是否经过障碍物。如果经过, 则舍弃当前节点, 选择上一节点作为关键节点。否则, 舍弃当前节点, 对下一节点继续以上操作。节点5与距其最近的关键节点S所围成的矩形区域内(灰色区域)存在障碍物, 且相连线段经过障碍物, 因此选择节点4作为关键节点, 继续从节点

6开始遍历,重复以上操作,最终得到的关键路径节点为 $S, 4, G$ 。③对提取出的关键路径节点进行共线判断,保证任意3个关键路径节点不在同一直线上。④提取剩余关键路径节点,依次连接构建全局辅助路径如图2所示的红色虚线。

## 2 融合全局辅助路径的局部路径规划方法

### 2.1 DWA算法

为不失一般性,本文基于三自由度模型对巡视器进行运动学建模如图3所示,并建立离散时间下的巡视器运动学方程为

$$\begin{cases} x = x + v\Delta t \cos \theta_t \\ y = y + v\Delta t \sin \theta_t \\ \theta_t = \theta_t + \omega\Delta t \end{cases} \quad (1)$$

其中: $v$ 、 $\omega$ 分别为巡视器在当前时刻的牵引速度与转角速度; $\theta_t$ 为航向角; $\Delta t$ 为时间间隔。

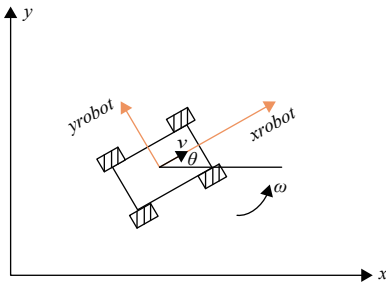


图3 巡视器运动学模型

Fig. 3 Kinematic model of the lunar rover

基于全局路径规划所预测的关键路径节点,利用DWA算法对局部路径实时规划,其基本原理是在动态的预测窗口内进行局部运动轨迹预测,并基于设定的指标评价预测轨迹。基于式(1)运动模型,在巡视器的速度空间采样,便可获得不同的运动预测轨迹,对得到的轨迹进一步进行评价即可获取最优轨迹。

在实际环境中,巡视器速度采样空间范围会受到自身性能及环境的限制,主要有以下3个方面。

1) 巡视器受自身最大和最小牵引速度、转角速度的限制

$$V_m = \{v \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]\} \quad (2)$$

其中: $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 分别为巡视器的最小与最大牵引速度; $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$ 分别为巡视器的最小与最大转角速度。

2) 巡视器受驱动电机性能的影响,存在最大加减速的限制

速的限制

$$V_d = \left\{ (v, \omega) \mid \begin{array}{l} v \in [v - \dot{v}_b \Delta t, v + \dot{v}_a \Delta t] \wedge \\ \omega \in [\omega - \dot{\omega}_b \Delta t, \omega + \dot{\omega}_a \Delta t] \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中: $\dot{v}_a$ 、 $\dot{v}_b$ 分别为巡视器的最大加速度与最大减速度; $\dot{\omega}_a$ 、 $\dot{\omega}_b$ 分别为巡视器的最大转角加速度与最大转角减速度。

3) 基于巡视器安全考虑,需设置最大速度(转角速度),从而确保规避障碍的刹车距离,为此对巡视器的速度及转角速度进行限制

$$V_a = \left\{ (v, \omega) \mid \begin{array}{l} v \leq \sqrt{2 \cdot \text{dist}(v, \omega) \cdot \dot{v}_b} \wedge \\ \omega \leq \sqrt{2 \cdot \text{dist}(v, \omega) \cdot \dot{\omega}_b} \end{array} \right\} \quad (4)$$

其中: $\text{dist}(v, \omega)$ 为巡视器预测轨迹末端点与障碍物间的最小距离。

巡视器的速度采样空间将同时满足以上3个条件,具体的表现形式为

$$V_r = V_m \cap V_d \cap V_a \quad (5)$$

根据采样速度得到若干组预测轨迹后,用评价函数对轨迹评估,以此来获取最优轨迹。传统DWA的评价函数为

$$G = \alpha \times H_t + \beta \times L_o + \gamma \times V \quad (6)$$

其中: $H_t$ 为预测轨迹末端点与目标点的方位角之差; $L_o$ 为预测轨迹末端点与障碍物的最小距离; $V$ 为巡视器当前时刻的牵引速度,为避免某一因素在评价函数中占比过重, $H_t$ 、 $L_o$ 、 $V$ 均已做归一化处理; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 均为权重系数。

### 2.2 评价函数优化

传统DWA算法仅以单一目标点作为引导且规划效果依赖于权重系数的选择,在复杂环境中,其容易陷入局部死区而导致规划失败。因此,引入A\*算法构建的全局辅助路径进一步作为DWA选择预测轨迹的依据。

将巡视器与全局辅助路径之间的距离及夹角作为新的评价指标,对评价函数式(6)进行优化,优化后的评价函数表示为

$$G_e = \alpha \times H_s + \beta \times L_o + \gamma \times V + \lambda L_s \quad (7)$$

其中: $H_s$ 为预测轨迹末端点与距离其最近的全局辅助路径之间的角度差; $L_s$ 为预测轨迹末端点与距离其最近全局辅助路径之间的距离。基于评价函数式(7)使巡视器规划的运动轨迹尽可能地靠近全局辅助路径,可在一定程度上提高传统DWA算法规划的成功率<sup>[11]</sup>。

### 3 面向导航精度提升的路径规划算法优化

在月面南极探索复杂地形区域时, 需考虑地面通讯遮挡、先验地图描绘匮乏等不利因素。针对此问题, 引入实时定位与建图技术进行复杂地形探索的导航、建图支持, 其精度也与路径规划的成功率与有效性直接相关, 尽管将全局与局部路径规划算法相融合可在一定程度提高现有路径规划算法的成功率, 但在环境更复杂且未知的月面南极, 尤其是一些具有丰富水冰赋存的阴影区, 巡视器将更依赖于精确的定位信息保证自主路径规划的安全可靠性。因此, 本节以提升巡视器的导航精度为目标, 基于有利于提升导航精度属性的月面环境因素构造新评价函数项。

考虑月面南极地形的特殊性, 显著的点云特征或是导航路标通常对应岩石、陨石坑和斜坡等地形起伏度大的障碍物。因此, 依赖外部环境信息自主定位精度的提升, 需充分利用岩石、陨石坑等障碍路标。除此之外, 月球南极分布着较多的撞击坑, 地形起伏较大, 这种复杂的路况会影响巡视器行驶的平稳性, 从而加剧激光雷达运动的畸变, 为使激光雷达获取更为准确的测量信息, 在保证安全的前提下, 巡视器应当与障碍保持恰当距离, 从而充分保证障碍路标对导航精度的提升效能。

基于上述内容, 本节提出一种新的评价函数项  $N$ , 该评价函数在保证巡视器可规避障碍物的同时, 也能对预测轨迹与显著导航路标的距离及探测数量进行评估。

导航路标探测示意图如图4所示, 灰色部分为形式障碍物, 在月面环境中, 障碍往往伴随复杂的地形起伏, 因此也是较为显著的导航路标, 绿色曲线为DWA算法在当前时刻生成的预测轨迹簇, 在预测轨迹末端点绘制与巡视器的航向角夹角为  $\alpha$ 、半径为  $R$  的扇形区域 (虚线区域, 半径基于巡视器的探测范围设定)。利用扇形区域内显著导航路标的面积占比与距预测轨迹末端点最近的显著导航路标之间距离之比作为评价指标, 优化后的评价函数表示为

$$N = \begin{cases} -6, & d \leq \delta_{\min} \\ \lambda_{\text{in}}/d_{\text{in}}, & \lambda_{\text{in}} \neq 0 \wedge d > \delta_{\min} \\ 0.001, & \lambda_{\text{in}} = 0 \wedge d > \delta_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $d$  为预测轨迹末端点与显著导航路标之间的最小距离;  $\delta_{\min}$  为设定的最小距离阈值;  $\lambda_{\text{in}}$  为扇形区域内巡视器所能观测到的显著导航路标的面积占比;  $d_{\text{in}}$  为扇形区域内轨迹末端点与显著导航路标之间的最小距

离。当预测轨迹与显著导航路标保持一定的安全距离, 扇形区域内显著导航路标占比越高且巡视器与显著导航路标的距离越近时, 评价函数得分越高。

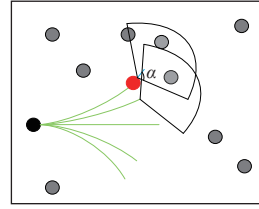


图4 显著导航路标探测示意图

Fig. 4 Diagram of salient navigation landmark detection

综合以上所有考量, 最终的评价函数可表示为

$$G_e = \alpha \times H_s + \beta \times N + \gamma \times V + \lambda L_s \quad (9)$$

### 4 高精度自主导航路径规划算法仿真分析

为验证LIPPA的有效性, 设置如图5~7所示的3个仿真场景, 黑色部分为形式障碍物, 红色星号为目标所在位置, 绿色曲线为巡视器在当前时刻预测的轨迹簇, 蓝色曲线为DWA算法最终规划出的路径轨迹, 红色折线为基于A\*算法构建的全局辅助路径, 黄色曲线为RRT算法规划的路径轨迹。各仿真的起始点均为  $(0, 0)$ , 并设置上节所述的扇形区域半径  $R = 4$ , 夹角  $\alpha = 60^\circ$ 。

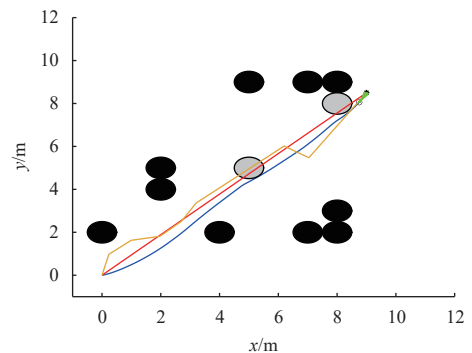


图5 引入未知障碍物的路径规划结果

Fig. 5 Path planning results with introduction of unknown obstacles

首先对巡视器的局部避障能力进行验证, 在构建好的全局地图上添加两个未知障碍物 (激光雷达未检测到或是突然出现的物体), 然后将LIPPA的路径规划与仅利用RRT算法的路径规划及基于A\*算法构建的全局辅助路径进行对比, 仿真结果如图5所示。其中, 灰色部分为添加的未知形式障碍物, 目标点的位置为

(9, 8.5), 评价函数式(9)的各项权重参数为 $\alpha=2$ 、 $\beta=0.3$ 、 $\gamma=1$ 、 $\lambda=2$ 。由仿真结果可知,无论是基于A\*算法构建的全局辅助路径还是RRT算法规划路径都无法应对存在未知障碍物的环境,而LIPPA算法能实时地检测到新的障碍物并对其规避,且与RRT算法相比,本算法规划出的路径更加平滑,易于巡视器移动控制。

设置复杂场景来验证本文所提出的LIPPA对复杂环境的适用性,将仅利用DWA算法进行路径规划与本

文所提出的路径规划算法的规划对比。设置两组仿真的目标点为(10, 9), 仿真结果分别如图6所示。图6(a)为仅利用DWA算法进行路径规划的仿真结果,可以看出仅依赖于DWA在复杂环境进行路径规划容易陷入局部死区,从而导致路径规划失败。图6(b)为本文提出的路径规划算法仿真结果,评价函数式(9)的各项权重参数设置为 $\alpha=5$ 、 $\beta=0.1$ 、 $\gamma=1$ 、 $\lambda=5$ ,可以看出引入全局辅助路径后,巡视器可以成功到达目标点。

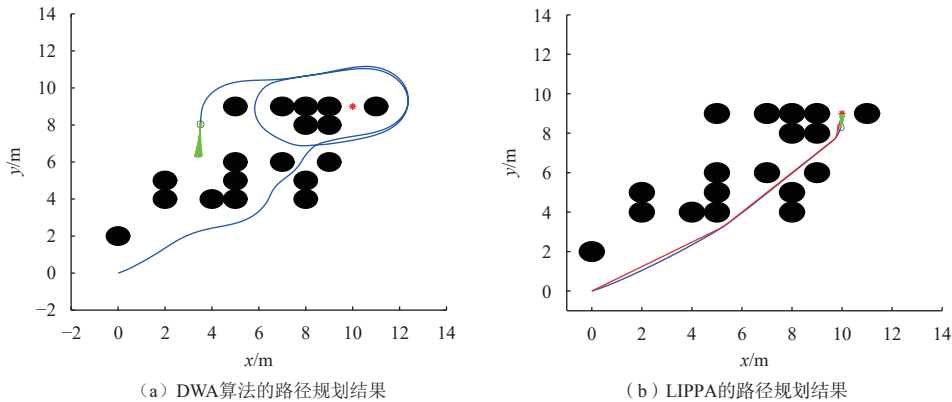


图6 复杂场景下的路径规划结果

Fig. 6 Path planning results in complex scenarios

为验证LIPPA在环境为特征稀疏场景下的应用,选择目标点的位置(7, 6),然后将仅利用融合路径规划算法与LIPPA规划后的结果做对比,其最终的仿真结果如图7所示。其中,图7(a)为仅利用融合路径规划算法的仿真结果,图7(b)为LIPPA仿真结果,

将评价函数式(7)与评价函数式(9)的各项权重参数均设置为 $\alpha=5$ 、 $\beta=0.1$ 、 $\gamma=1$ 、 $\lambda=5$ 。从图7可以看出,基于有利于提升导航精度属性的月面环境因素优化后,改进的融合路径规划算法可以更加靠近障碍物行走,使激光雷达探测到更为充足且准确的点云信息。

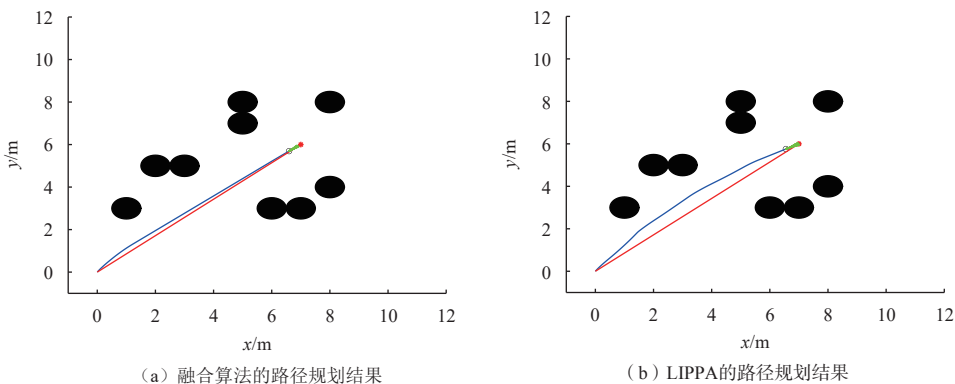


图7 环境特征稀疏的场景下的路径规划结果

Fig. 7 Path planning results for scenarios with sparse environmental features

由上述各仿真结果可知,本文提出的LIPPA是可行的,与单一的路径规划算法相比,本算法更能适应复杂且未知的环境,巡视器不仅能够实时的规避未知障碍物,也能沿着靠近具有更多显著导航路标特征的

区域移动,从而进一步提升导航精度。为进一步验证巡视器沿着LIPPA规划的路径移动时对导航精度提升的有效性,分别设置简单场景来验证本文所提出的LIPPA算法在环境特征稀疏场景下的应用。

## 5 定位精度评估试验验证

### 5.1 定位精度评估数学仿真分析

选取2组场景对巡视器在月面南极的巡视探测模拟, 各模拟场景的点云地图分别如图8和图9所示, 仿真总时长200 s。巡视器搭载着激光雷达, 激光雷达的有效探测距离50 m、水平视场360°、垂直视场±15°。根据巡视器在模拟场景内获取的实时虚拟点云数据进行定位估计。

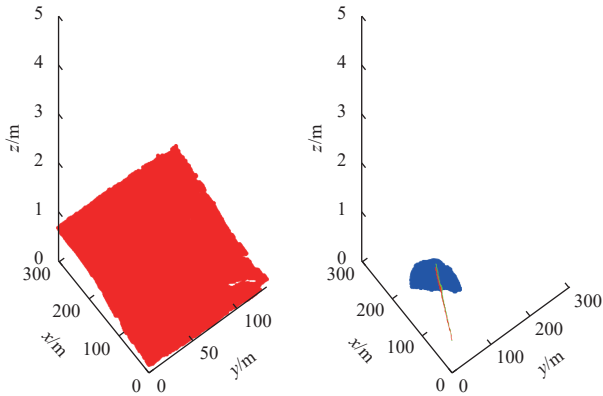


图8 场景1点云地图与行驶轨迹

Fig. 8 Point cloud map and the travel path in scenario 1

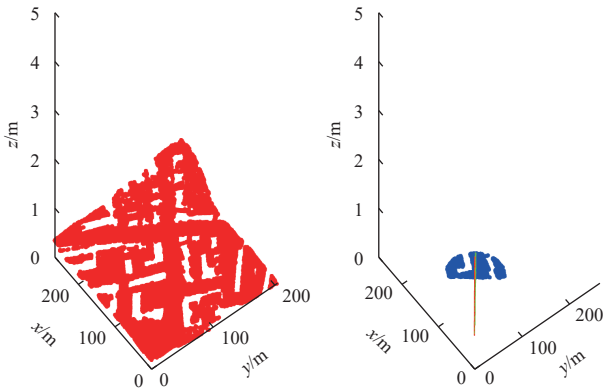


图9 场景2点云地图与行驶轨迹

Fig. 9 Point cloud map and the travel path in scenario 2

利用SLAM技术进行自主导航过程中, 巡视器的定位估计误差会随着时间的推移而快速增长, 针对此问题, 文献[14]提出一种重观测算法, 其通过重观测置信度更高的显著路标特征来抑制SLAM算法定位误差的增长。重观测算法依赖于ICP<sup>[15]</sup> (Iterative Closest Point) 等点云配准算法进一步精确巡视器定位估计, 激光雷达能否探测到显著的导航路标特征信息也与其抑制效果息息相关, 因此可将本文所提出的LIPPA应用于重观测过程, 进一步提升巡视器的导航精度。

基于上述内容, 本节将文中所提出的路径规划算法及RRT算法分别应用于巡视器的定点探测与重观测

任务, 选择相同的起始点与目标点进行路径规划, 共设置4组仿真: 巡视器沿着RRT算法规划的路径进行定点探测任务; 巡视器沿着LIPPA算法规划的路径进行定点探测任务; 巡视器沿着RRT算法规划的路径每隔20 s启动一次ICP重观测; 巡视器沿着LIPPA算法规划的路径每隔20 s启动一次ICP重观测, 然后分别记录每组仿真巡视器基于雷达点云数据的定位估计误差来进一步评估LIPPA算法对导航精度提升的有效性。

基于场景1和场景2的单个仿真结果如图8~11所示。在图8和图9中, 红色曲线为巡视器沿着本文算法规划的路径移动时, 基于雷达点云数据进行定位估计的轨迹, 绿色曲线为巡视器的真值轨迹。图10和图11的横坐标为仿真时间, 纵坐标为定位误差, 黑色实线与绿色实线分别为应用RRT算法及LIPPA进行定点探测任务时巡视器的定位误差曲线, 红色虚线和蓝色虚线分别为应用RRT算法及LIPPA进行重观测任务时定位误差曲线。

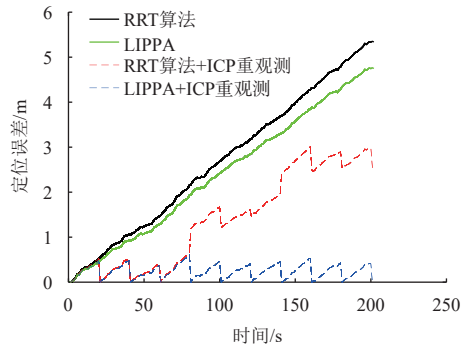


图10 场景1下各仿真的定位误差

Fig. 10 Location error of different simulation results in scenario 1

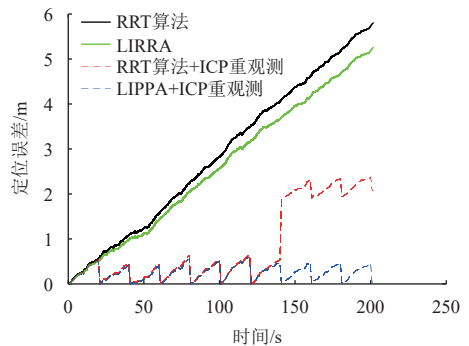


图11 场景2下各仿真的定位误差

Fig. 11 Location error of different simulation in scenario 2

从单个仿真的结果可以看出, 在具有不同地形地貌的场景中, 无论是执行定点探测任务还是重观测任务, 巡视器利用本算法自主导航的导航精度均优于使用RRT算法导航的精度。

为进一步验证仿真结果的有效性,在场景1和场景2分别随机选取60个不同的目标点,然后对设置的4组仿真进行蒙特卡洛仿真,最终得到的仿真结果如图12和图13所示,两组场景下不同仿真的累计平均绝对定位误差(Mean Absolute Error, MAE)如表1和表2所示。

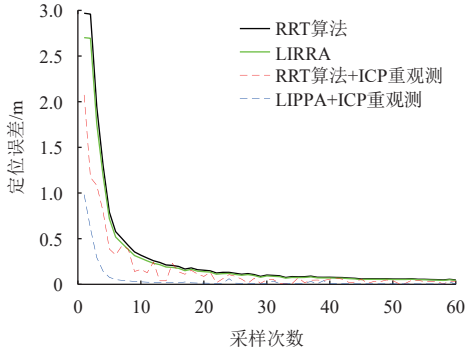


图12 场景1定位误差MAE统计结果(蒙特卡洛仿真)  
Fig. 12 MAE MC simulation results in scenario 1

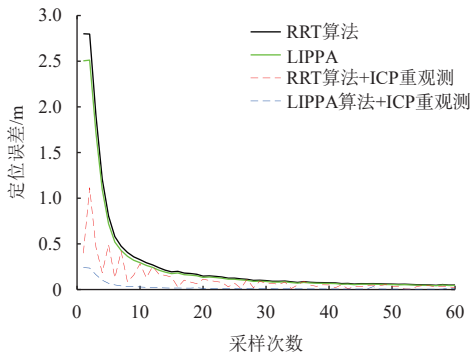


图13 场景2定位误差MAE统计结果(蒙特卡洛仿真)  
Fig. 13 MAE MC simulation results in scenario 2

表1 定位误差MAE总和(场景1)

Table 1 Total MAE results in scenario 1

仿真	MAE总和/m
RRT算法	172.89
本算法	155.69
RRT算法+ICP重观测	93.74
本算法+ICP重观测	21.62

表2 定位误差MAE总和(场景2)

Table 2 Total MAE results in scenario 2

仿真	MAE总和/m
RRT算法	171.28
本算法	154.00
RRT算法+ICP重观测	74.32
本算法+ICP重观测	15.98

蒙特卡洛与单次仿真的结果是一致的,在不同场景及不同的应用任务情况下,选择不同的目标点,与常规RRT算法相比,本算法均能在一定程度提升巡视器的导航精度,这证明了本算法对不同应用场景的适

用性及提升导航精度的有效性。

## 5.2 定位精度评估半物理试验验证

综合试验条件的限制及对试验效果的考量,选择在具有高精度动态捕捉系统的室内搭建半物理试验场景,利用石块来模拟月面岩石,并搭建斜坡来模拟月面南极起伏的地形。试验用到的4轮巡视器及室内试验场景如图14所示。巡视器搭载的主要器件:1个思岚2D激光雷达,1个Velodyne 16线激光雷达,3个反光标识点,2个装有基于Ubuntu18.04的ROS Melodic系统的控制器。同时,在室内试验场景部署了Nokov光学三维运动捕捉系统(共12个动作捕捉镜头),如图15所示。



图14 试验条件  
Fig. 14 Experiment conditions

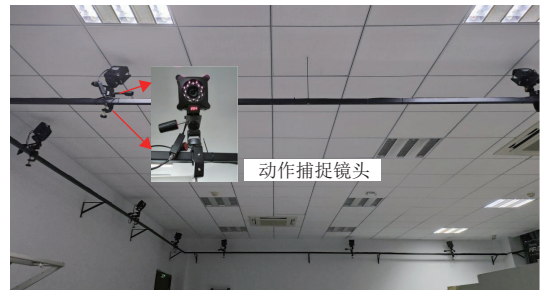


图15 Nokov光学三维运动捕捉系统  
Fig. 15 Nokov optical 3D motion capture system

LOAM<sup>[16]</sup> (Lidar Odometry and Mapping in real Time) 算法是一种适用于广阔室外环境的SLAM算法,可为巡视器在月面南极的自主导航过程提供实时定位信息并实现构建环境地图,但其依赖于激光雷达所探测到的特征点云间配准来进行定位估计,能否探测到充足的显著导航路标特征与其定位效果息息相关。因此,将LOAM算法的状态估计误差作为评价指标来验证本算法对导航精度提升的有效性。首先利用键盘控制巡视器移动,同时开启cartographer算法的建图节点对实际场景进行建图,构建好的全局栅格地图如图16所示。

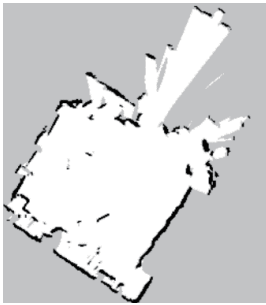


图 16 试验场景栅格地图  
Fig. 16 Grid map of experimental site

为验证改进的LIPPA对导航精度提升的有效性, 设置了3组对照试验: 通过遥操作控制巡视器执行定点探测任务(巡视器在移动过程中尽可能远离障碍物); 巡视器利用融合A\*算法与DWA的路径规划算法自主导航到探测目标点; 巡视器利用本文提出的路径规划算法自主导航到探测目标点。各试验的探测目标点与起点均相同, 巡视器在进行导航试验时各项运动学的参数如表3所示。

表 3 巡视器的运动学参数  
Table 3 Kinematic parameters of the rover

参数	数值	参数	数值
最大牵引速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	0.5	最大转角速度/ (rad·s <sup>-1</sup> )	0.7
最小牵引速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	0.0	最小转角速度/ (rad·s <sup>-1</sup> )	0.3
最大加(减)速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	0.5	最大转角加(减)速度/ (rad·s <sup>-2</sup> )	3.5
牵引速度采样点数/个	6.0	转角速度采样点数/个	20.0

在巡视器移动的过程中, 同时开启LOAM算法与Nokov光学三维运动捕捉系统对巡视器的状态实时估计, 然后记录每组试验的定位估计结果, 应用本算法进行自主导航后结果如图17所示, 绿色曲线为基于A\*算法构建的全局辅助路径。

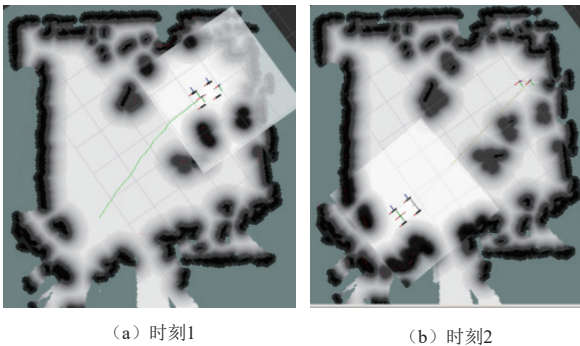


图 17 试验(3)的导航结果  
Fig. 17 Navigation result of experiment 3

巡视器在执行各试验定点探测任务时, LOAM算法在X轴与Y轴的定位误差曲线如图18所示(LOAM

算法的坐标系已被映射到了Nokov光学三维运动捕捉系统的坐标系下, 即后右右手坐标系)。各试验中LOAM算法在X轴与Y轴的定位误差MAE如表4所示。

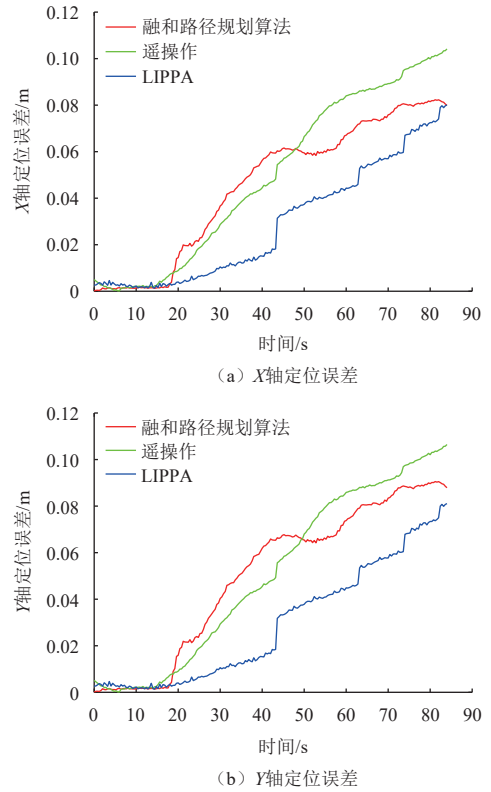


图 18 LOAM 定位误差比较结果  
Fig. 18 Comparison of LOAM location error results

表 4 各试验的定位误差MAE  
Table 4 MAE of different experiments

试验	MAE/m (X轴)	MAE/m (Y轴)
遥操作	0.049	0.050
融合路径规划算法	0.045	0.049
本算法	0.028	0.029

由试验结果可知, 与遥操作及传统融合A\*算法和DWA路径规划算法相比, 巡视器利用本文提出的改进LIPPA自主导航时, LOAM算法在X和Y轴的定位精度均有一定程度的提升, 主要是因为巡视器在移动过程中能够获取更准确的激光雷达测距信息以及更充足的显著导航路标特征, 也进一步验证了本算法对巡视器导航精度提升的有效性。

## 6 结 论

基于月面南极的环境特征, 本文提出了一种实现高精度自主导航的路径规划算法, 首先将基于A\*算法构建全局辅助路径与DWA算法进行融合, 然后以提高巡视器的导航精度为目标, 面向具有利于提升导航精

度属性的月面南极环境因素提出了一种新评价函数,通过设置数学仿真及搭建室内半物理试验场景来进行导航精度评估试验验证,仿真与试验结果表明了所提出的改进LIPPA可行性及对复杂环境的适应性,本算法对巡视器导航精度提升的有效性。后续将搭建更为复杂且真实的室外试验场景并部署高精度车载RTK设备来进一步验证本算法提升巡视器导航精度的效果。

## 参 考 文 献

- [1] 程安云,王世杰,李雄耀,等. 月球南北两极研究进展与发展趋势[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1070-1074.  
CHENG A Y, WANG S J, LI X Y, et al. Researches on lunar poles: advances and trends[J]. *Advances in Geophysics*, 2007, 22(4): 1070-1074.
- [2] 吴伟仁,于登云,王赤,等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 223-231, 240.  
WU W R, YU D Y, WANG C, et al. Proposals for sites selection of soft landing on lunar south polar region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 223-231, 240
- [3] 解杨敏,季力,魏祥泉,等. 国内外行星表面巡视器自主导航技术研究[J]. *上海航天(中英文)*, 2021, 38(1): 61-71.  
XIE Y M, JI L, WEI X Q, et al. Research on autonomous navigation technology of planetary surface inspectors at home and abroad[J]. *Shanghai Aerospace(Chinese and English)*, 2021, 38 (1): 61-71
- [4] 李廷睿. 月面场地集成仿真环境搭建及漫游机器人路径规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
LI T R. Construction of integrated simulation environment of lunar surface and path navigation of rover[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [5] HART P E, NILSSON N J, RAPHEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. *IEEE Transactions on Systems Science & Cybernetics*, 1972, 4(2): 28-29.
- [6] KARAMAN S, WALTER M R, PEREZ A, et al. Anytime motion planning using the RRT\*[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE, 2011.
- [7] LAMINI C, BENHLIMA S, ELBEKRI A. Genetic algorithm based on approach for autonomous mobile robot path planning[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 127: 180-189.
- [8] CHANG L, SHAN L, JIANG C, et al. Reinforcement based mobile robot path planning with improved dynamic window approach in unknown environment[J]. *Autonomous Robots*, 2021, 45(1): 51-76.
- [9] 秦旭,黄晓华,马东明,等. 基于改进D\*算法的巡检机器人路径规划[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(6): 10-13.  
QIN X, HUANG X H, MA D M, et al. Path planning of inspection robots based on improved D\* algorithm[J]. *Combined Machine Tools and Automated Machining Technology*, 2022(6): 10-13.
- [10] 朱浩亮,陈一新,詹苗芃,等. 基于人工势场的 UAV编队避障研究[J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(28): 35-38.  
ZHU H L, CHEN Y X, ZHAN Z P, et al. Research on obstacle avoidance of UAV formation based on artificial potential field[J]. *Science and Technology Innovation and Application*, 2021, 11(28): 35-38.
- [11] 王楷文,彭松,刘少创,等. 基于A\*算法优化的月面巡视器路径规划研究[J]. *航天器工程*, 2019, 28(1): 19-26.  
WANG K W, PENG S, LIU S C, et al. Study on path planning of lunar rover based on A\* algorithm optimization[J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(1): 19-26.
- [12] 吴伟槐. 月面巡视器路径规划方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.  
WU W H. Research on the path planning method of lunar surface rover[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [13] 张振,张华良,邓永胜,等. 融合改进A\*算法与DWA算法的机器人实时路径规划[J]. *无线电工程*, 2022, 52(11): 1984-1993.  
ZHANG Z, ZHANG H L, DENG Y S, et al. Real time path planning of robot by combing improved A\* algorithm and dynamic window approach[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(11): 1984-1993.
- [14] 余萌. 行星着陆巡视自主视觉导航方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
YU M. Research on autonomous visual navigation method for planetary landing and exploration mission[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [15] BESL P J, MCKAY H D. A method for registration of 3D shape[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [16] ZHANG J, SINGH S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time[C]//Proceedings of Robotics: Science and Systems. California: [s. n.], 2014.

作者简介:

**王慧婷**(1999-),女,硕士,主要研究方向:航天器自主导航。

通信地址:江苏省南京市南京航空航天大学航天学院(211106)

电话:18851875289

E-mail: wanghuiting@nuaa.edu.cn

**余萌**(1988-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向:航天器自主导航及态势感知。**本文通信作者。**

通信地址:江苏省南京市南京航空航天大学航天学院(211106)

电话:15250997028

E-mail: yuxy21@nuaa.edu.cn

# Autonomous Navigation Path Planning Algorithm for Rovers in Lunar South Pole Surface

WANG Huiting<sup>1</sup>, YU Meng<sup>1</sup>, LI Yuyue<sup>1</sup>, HU Tao<sup>2</sup>, ZHENG Bo<sup>2</sup>

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** When the lunar rover in the future performs complex tasks such as shadowed regions detection and autonomous sampling and return under weak communication conditions in the lunar south pole, the demand for high-precision autonomous navigation system will become more urgent. Taking into account the safety guarantee of the lunar rover and the lunar environmental factors with navigation benefits, a new fusion path planning algorithm for high-precision autonomous navigation was proposed in this paper, by integrating a global auxiliary path based on optimized A\* algorithm with Dynamic Window Approach. With location error of simultaneous localization and mapping based on lidar serving as an evaluation index, a numerical simulation and a semi physical experiment were established to verify the feasibility of this algorithm and the effectiveness of improving navigation accuracy of the rover in different application scenarios. Experiment results show that compared with traditional path planning algorithms with single factor considerations, the average absolute location error of simultaneous localization and mapping algorithm in the two-dimensional plane was reduced by a maximum of 42% when the lunar rover moved along the path planned by the proposed algorithm, which can provide technical support for autonomous navigation and path planning tasks in the complex environment of the lunar south pole.

**Keywords:** the lunar south pole; A\* algorithm; DWA; high-precision autonomous navigation; fusion path planning algorithm

## Highlights:

- A new fusion path planning algorithm is proposed in the paper for high-precision autonomous navigation under weak communication conditions in the complex environment of the lunar South Pole.
- A fusion path planning algorithm is used in the paper, where a global auxiliary path based on optimized A\* algorithm is integrated with DWA.
- With the purpose of improving navigation precision, a new cost function is established based on lunar environmental factors with navigation benefits.
- The simulation results demonstrate that the proposed path planning algorithm is effective in improving navigation precision.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]