



复杂月面多维约束下的移动与操作联合规划方法

刘传凯^{1,2,3*}, 陈亮¹, 黄开启^{1*}, 张济韬^{2,3}, 王晓雪^{2,3}, 张作宇^{2,3}, 张宽^{2,3}

1. 江西理工大学机电工程学院, 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

* E-mail: ckliu2005@126.com; kaiqi.huang@163.com

收稿日期: 2025-11-13; 接受日期: 2026-02-11; 网络版发表日期: 2026-06-08

国家自然科学基金面上项目(编号: 62373034)资助

摘要 月球车携带机械臂长距离移动作业是未来月球资源开发和科研站建设的重要探测模式, 然而受到月面复杂地形、时变光照约束和苛刻探测条件等因素影响, 月球车与机械臂组合体的联合作业规划是探测中面临的重要难题. 对此本文提出一种面向复杂月面作业的机器人移动与操作联合规划方法. 首先通过月球车与机械臂组合体的高维状态空间建模实现在任务层级上的一体化表达, 然后综合考虑障碍规避、光线遮挡和作业逻辑等约束, 构建状态空间分区化的多路径转移优化模型, 设计适用于大范围移动与精细操作的改进型双层A*算法, 实现了高维连续状态空间的分片解耦搜索和最优移动与操作轨迹联合求解. 相比于传统方法, 本文方法能够有效降低高维空间的计算复杂度, 快速实现移动代价最优的车臂联合路径规划. 实验结果验证了本文方法的有效性, 为未来月球车与机械臂组合体探测提供可行途径.

关键词 车臂联合规划, 运动学建模, 多约束条件, 改进型双层A*算法, 路径规划, 状态管理机制

1 引言

月球已成为世界各国持续探索的要地, 尤其是月球南极区域据推测蕴藏珍贵的水冰和氦3资源, 以及丰富的贵金属和常规金属矿产资源, 能够为未来月球基地建设提供重要的物质基础^[1~3], 因此成为21世纪各国探测的首选目的地. 中国探月工程自2004年立项以来, 已成功完成“绕、落、回”三步走^[4], 实现月面巡视探测(嫦娥三号、四号)与着陆采样(嫦娥五号、六号)的分阶段实施^[5]. 我国探月工程四期将重点推进月球

南极环境与资源探测任务, 开展长期大范围巡视探测与定点采样任务, 建立月球科研站基本型, 为未来月球国际科研站建设提供重要技术基础. 因此, 亟需发展月面机器人(月球车)移动采样技术, 以支持月面复杂环境下的资源勘探与开采.

巡视探测与采样任务的核心在于月球车移动探测与机械臂样本采集的协同, 而现有研究多将车体移动与机械臂操作解耦为独立子系统, 依赖人工预设规则实现流程串接^[6~8]. 较为典型的研究主要有以下两类.

一是采用单一算法分别对车体移动和机械臂操作

引用格式: 刘传凯, 陈亮, 黄开启, 等. 复杂月面多维约束下的移动与操作联合规划方法. 中国科学: 技术科学, 2026, 56
Liu C K, Chen L, Huang K Q, et al. A unified mobility and manipulation planning method under complex multidimensional constraints on the lunar surface (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56, doi: 10.1360/SST-2025-0343

进行规划, 通过定义代价函数将运动规划问题建模为一个最优化问题. 文献[9]使用遗传算法规划移动平台(车体)的行驶路径(笛卡儿坐标), 考虑了行进距离和障碍物碰撞等代价, 再利用同样的优化算法计算机械臂的相关配置. 该方法通过全局搜索优化目标函数, 提高路径质量, 但往往计算量较大, 求解效率不高. 针对此问题, Saoji等人使用RRT-Connect进行机械臂和移动平台的运动规划, 但规划是分开进行的, 对于拾取和放置任务, 移动平台的目标是预先记录的, 而机械臂目标配置是从基于碰撞的预先计算的两个末端执行器姿态中选择的^[10]. 二是结合不同算法的优点, 采用混合算法分别对车体移动和机械臂操作进行规划. 如后退地平线任务和运动规划(retreat horizon task and motion planning, RH-TAMP)算法^[11]使用RRT-Connect进行机械臂规划, 使用Dijkstra算法进行移动平台路径规划; 文献[12]将A*算法用于移动平台规划, 而RRT用于机械臂规划. 其中物体拾取和物体卸载时移动平台的位置是预先记录的, A*算法将此作为移动平台的目标配置.

上述车体移动和机械臂操作分别规划的方法, 只是单独实现两个子系统的规划功能, 在考虑机械臂是否可达目标点时, 车体停靠位置还需依赖人工辅助定点, 任务实施效率受限^[13,14]. 车体移动与机械臂操作解耦为独立子系统规划方法受制于任务自主性、环境适应性等方面的固有弱点, 在任务过程中需要人工介入调整与决策, 实施效率不高. 为了能够实现复杂月面环境下月面机器人(月球车)巡视探测与采样任务的更加高效协同, 研究者开始探索移动平台与机械臂联合规划方法, 即车臂联合规划方法(以下以此为名称).

车臂联合规划在巡视探测与采样任务中, 是指按照一定约束条件寻找到满足任务安全性和准确性要求的月球车巡视路径和机械臂关节构型^[15]. 目前, 国内外学者针对车体移动与机械臂操作的联合规划方法开展了多项研究. 其中较为典型的主要有以下三类.

一是同时考虑车臂联合的稳定性和可操作性的协同运动规划策略. 文献[16]提出一种协同运动规划策略, 通过动态评估移动平台受扰后的稳定性, 将平台动力学、机械臂工作空间与系统稳定性纳入统一优化框架, 为后续研究提供了动力学耦合分析的基础. 李新春等人则进一步从机械臂可操作度理论切入, 将固定

基座机械臂的广义可操作度扩展至移动机械臂系统, 定量分析了全方位移动平台对机械臂奇异位姿、可操作度及方向可操作度的动态影响, 阐明了移动平台运动对机械臂灵活性的约束机制^[17]. 二是将复杂环境下的联合规划问题转化为全局层-局部层分层规划问题. Pilania等人提出了一种自适应分层规划算法, 首先生成移动平台的全局路径图, 随后在路径节点上检测机械臂与环境的干涉关系, 实现了全局层移动平台路径与局部层机械臂路径的解耦优化^[18]. 三是通过优化控制量或引入误差补偿机制进一步提升车臂联合规划系统的运动控制能力及跟踪精度. Bai等人面向高精度装配场景, 提出了多约束集成规划方法, 通过同时优化关节角、关节速度、奇异姿态回避等约束, 解决了移动平台与机械臂组合体在大型构件装配中的运动精度问题^[19]. Xing等人设计了一种基于加权矩阵的移动平台与机械臂之间的联合运动方法, 并引入关节力矩差补偿机制, 显著提高了末端轨迹的跟踪精度^[20].

上述几类方法主要是在移动平台与机械臂之间协调规划, 考虑移动平台与机械臂之间的相互作用, 规划出符合预期的运动路径, 虽在车臂联合规划方面取得了一定的成果, 但目前仍存在以下问题: (1) 多数现有研究场景仅需关注避障或路径最短等单一目标, 难以适用于真实月面任务中光照、作业逻辑、可达性等任务相关约束众多的巡视探测与采样任务中; (2) 现有研究多将移动平台位姿作为变量, 优化机械臂的工作空间或将机械臂可操作性作为移动平台路径选择的约束, 在兼顾大范围移动的运动效率和末端操作精度方面仍存在提升空间.

针对上述问题, 本文提出了一种适用于月面非结构化环境下月球车与机械臂组合体协同作业的联合规划方法. 构建了状态空间分区化的多路径转移优化模型, 对复杂月面多维约束条件进行了形式化表达, 并在此基础上提出了一种改进型双层A*算法用于联合规划求解. 首先, 将月球车的位姿信息与机械臂的多关节状态参数统一映射至世界坐标系下, 构建高维状态空间, 并借助正运动学模型明确两者之间的空间转换关系. 随后, 围绕月球车与机械臂组合体的高维状态空间模型引入多维约束条件, 将路径搜索与机械臂操作序列的求解共同纳入离散空间中, 构建状态空间分区化的多路径转移优化模型. 最后, 提出一种兼顾移动平台大范围导航与机械臂局部精细操作能力的改进

型双层A*算法求解可行路径, 并进行实验仿真验证车臂联合规划方法的可行性与有效性.

2 车臂组合体联合运动建模

由于月表地形复杂, 存在凹坑、石块、倾斜面等多类地形^[21]. 现有的移动平台与机械臂运动学模型多基于平面地形分别构建, 难以适应月面上存在坡度、凹坑等非结构化地形的实际情形. 因此, 本节将构建一种能够准确描述非平面移动月球车姿态与位置变化的模型, 并与其上机械臂实现运动学耦合.

2.1 移动平台运动学建模

如图1所示, 为描述车体在三维空间中的位姿, 建立以下坐标系: 世界坐标系 $\{w\}$ 、车体坐标系 $\{a\}$ 、机械臂基座坐标系 $\{b\}$.

则车体在空间中的位置由其相对于世界坐标系的位置向量决定, 将其定义为

$$P_a^w = [x, y, z]^T, \quad (1)$$

其中, P_a^w 表示基座质心在世界坐标系中的三维位置, 为避免欧拉角表示时的奇异性, 本研究采用单位四元数法代替欧拉角描述移动基座姿态. 则车体在空间中的姿态由其相对于世界坐标系的平衡姿态决定, 可定义为

$$q_a^w = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T, \quad (2)$$

其中, q_a^w 是单位四元数, 用于表示平台在三维空间的

朝向, 四元数可以看作是表示绕单位轴 $n = [n_x, n_y, n_z]^T$ 旋转角度 θ 的一种方式:

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + (n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k}) \sin \frac{\theta}{2}. \quad (3)$$

将该式展开即可得

$$q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \\ n_x \sin \frac{\theta}{2} \\ n_y \sin \frac{\theta}{2} \\ n_z \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, q_0 为标量, 用于控制旋转角度, 小角度时接近1, 大角度时接近0; q_1, q_2, q_3 为矢量, 用于控制旋转轴的旋转方向与旋转幅度, 值越大代表旋转越剧烈.

则移动平台的姿态即可通过四元数转换为旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_a^w = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

再结合上述位置向量 P_a^w , 即可构造出移动平台在世界坐标系下的齐次变换矩阵:

$$T_a^w = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_a^w & P_a^w \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2 车载机械臂运动学建模

机械臂是采样执行机构中的主要运动部件之一, 它用来支撑腕关节和末端执行器, 并使它们能在三维空间中运动, 达到工作空间的任意位置. 本文车载机械臂采用四自由度结构方式.

如图2所示, 为月球车与机械臂组合体中机械臂部分三维效果图, 机械臂采用串联式结构的设计, 包含四个轴, 第2、3、4轴是平行轴, 第1轴与它们垂直, 将第1轴和第2轴称为肩关节, 第3轴称为肘关节, 第4轴称为腕关节, 肩关节和肘关节之间称为大臂, 肘关节和腕关节之间称为小臂. 其结构上主要分为底座、腰部回转机构、大臂、小臂和采集器五个部分, 设计有腰部回

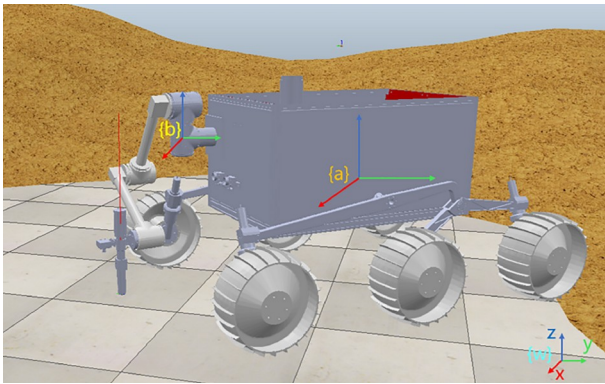


图1 (网络版彩图)三维模型中坐标系定义图

Figure 1 (Color online) Definition diagram of coordinate system in 3D model.

转、大臂俯仰、小臂俯仰和采集器翻滚4个自由度, 整体采用重力方向展开型结构。

为描述车载机械臂的操作空间以及标定机械臂的运动学参数, 本文采用D-H(Denavit-Hartenberg)参数法建立其坐标系体系与运动学模型, 为后续的正逆运动学分析与路径规划奠定基础。其D-H建模如图3所示。

根据车载机械臂的D-H模型与相应尺寸参数, 可以构建出如表1所示的车载机械臂的D-H参数表。

则机械臂第*i*个关节相对于第*i*-1个关节的变换关系可表示为

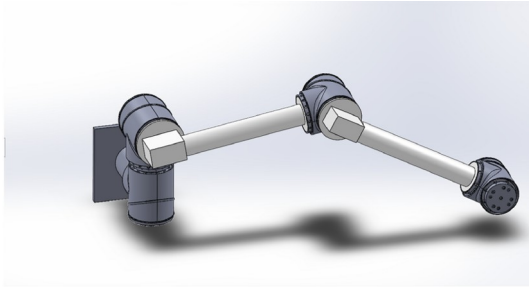


图2 车载机械臂三维视图

Figure 2 3D diagram of the on-board robotic arm.

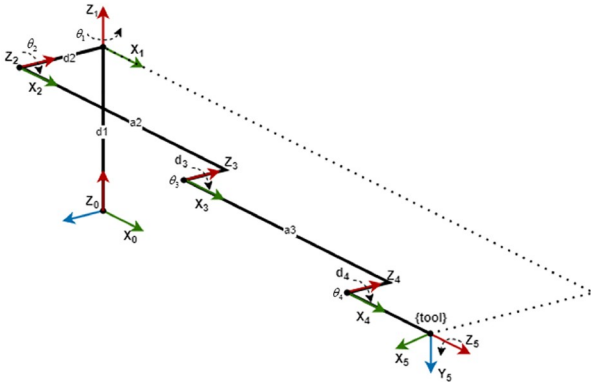


图3 (网络版彩图)车载机械臂D-H建模

Figure 3 (Color online) D-H modeling of vehicle-mounted robotic arm.

表1 车载机械臂D-H参数表

Table 1 D-H parameter table of the on-board robotic arm

关节 <i>i</i>	θ_i (°)	d_i (mm)	α_i (°)	a_i (mm)
1	θ_1	122	0	0
2	θ_2	100	-90	340.5
3	θ_3	80	0	346
4	θ_4	55	0	0

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据上述公式, 可通过矩阵连乘方式求出末端执行器相对于机械臂基座的位姿变换矩阵:

$$T_{\text{end}}^b = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3. \quad (8)$$

2.3 车臂联合的运动学建模

联合建模的核心目标是求解机械臂末端相对于世界坐标系的齐次变换矩阵, 用以统一描述移动平台与机械臂末端的空间变换关系, 该模型是联合规划、运动控制及避障优化的基础。

考虑到机器人运动学模型是由移动平台和机械臂共同组成的运动学冗余系统, 本文将该系统表征为

$$q = [q_a^T, q_b^T]^T, \quad (9)$$

其中, $q_a = [x \ y \ z \ \theta]^T$ 为移动平台的基础配置, $q_b = [q_{b1} \ q_{b2} \ q_{b3} \ q_{b4}]^T$ 为车载机械臂的关节配置。而由于机械臂基座刚性安装于移动基座车体结构上, 因此其机械臂基坐标系{*b*}与平台坐标系{*a*}之间存在固定的位姿变换关系, 记作齐次变换矩阵:

$$T_b^a = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^a & \mathbf{p}_b^a \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中, $\mathbf{R}_b^a$ 表示机械臂基坐标系相对于平台坐标系的方向关系, 通常为恒定旋转矩阵; $\mathbf{p}_b^a$ 表示移动平台坐标系原点指向机械臂基座坐标系原点的三维平移向量。

基于上述内容, 最终机械臂末端相对于世界坐标系的位姿变换可表示为

$$T_{\text{end}}^W = T_a^W T_b^a T_{\text{end}}^b. \quad (11)$$

3 月面多约束下的车臂联合规划建模

本文针对月球车与机械臂组合体巡视采样过程建模, 将机械臂操作序列求解和路径搜索整合到月面多维约束优化模型中, 并通过空间离散化求解优化问题。如图4所示是车臂联合采样示意图, 月球车与机械臂组合体巡视途径区域可能存在复杂地形, 不同的搜索策

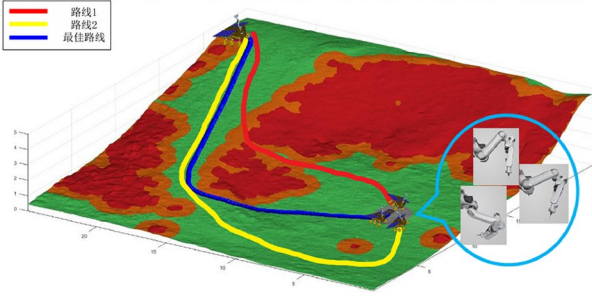


图4 (网络版彩图)车臂联合规划示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of joint planning for vehicle and arm.

略,可能会计算得到不同的规划结果,需综合权衡各个制约因素影响,寻求机械臂和月球车能够共同达到最优的状态^[22].

假设 $X_{(t)}$ 是月球车与机械臂组合体相对于时间 t 的理想任务轨迹,该轨迹是由规划算法在离散状态空间中生成的参考轨迹序列,其本质为规划层输出的期望状态演化路径.对于固定时间 t ,每个 $X_{(t)}$ 被称为月球车与机械臂组合体的位姿,并以 m 个自由度为特征,机器人的关节空间在位姿角度上通过逆运动学与任务轨迹节点可表示为

$$q_t = \frac{X_{(t)}}{k}, \quad (12)$$

其中, k 表示正向运动学函数, q_t 即表示由逆运动学得到的关节空间参考轨迹,并以 n 个自由度为特征,由于机械臂运动学冗余性的存在,从 $X_{(t)}$ 到 q_t 的映射在一般情况下并非一一对应,而是可能存在多解.具体解释为:当自由度数 n 大于任务轨迹节点表征所需的变量数 m 时,自由度冗余为

$$r = n - m > 0, \quad (13)$$

其中, r 为冗余自由度,对于冗余机器人:式(12)允许无限数量的解,即一个任务轨迹节点对应于无数个机器人关节配置.当 $r > 0$ 时,为每个 t 求解式(12)的过程称为冗余分辨率,通常可以通过优化一些性能指标进行约束求解,本节从实际月面任务出发,将一系列相应约束数学形式化,以优化求解最优路径.

3.1 关节限制和纯滚动约束

在月球车与机械臂组合体中,机械臂的关节限制

是构建运动学模型与路径规划时必须考虑的重要因素.特别是在月面等复杂地形环境下,关节限制不仅影响机械臂的可达性,还直接影响其操作的稳定性.

机械臂的关节限制主要包括关节角度限制、关节速度限制、关节加速度限制.关节角度限制指每个旋转关节只能在一定的范围内运动,防止关节机械碰撞,限制关节进入奇异区间.在实际任务中,关节的转动速度不能无限大,关节速度限制可以有效实现机械臂的精确控制.关节加速度限制用于限制关节单位时间内的速度变化率,避免震荡与不稳定,对于轨迹平滑性与轨迹跟踪控制尤为关键,在月面低重力与低阻尼环境中可防止振动传播.

本文对关节限制的定義如下:

$$\begin{aligned} q_b &\leq q_b \leq \overline{q}_b, \\ \dot{q}_b &\leq \dot{q}_b \leq \overline{\dot{q}}_b, \\ \ddot{q}_b &\leq \ddot{q}_b \leq \overline{\ddot{q}}_b, \end{aligned} \quad (14)$$

其中, q_b 表示机械臂各关节的关节角度, q_b 和 $\overline{q}_b$ 分别表示最小和最大关节角度; $\dot{q}_b$ 表示机械臂各关节的关节速度, $\dot{q}_b$ 和 $\overline{\dot{q}}_b$ 分别表示最小和最大关节速度; $\ddot{q}_b$ 表示机械臂各关节的关节加速度, $\ddot{q}_b$ 和 $\overline{\ddot{q}}_b$ 分别表示最小和最大关节速度.

纯滚动约束指的是车轮与地面之间在运动时只有滚动,没有滑动,即车轮的接触点在某一时刻相对地面速度为零.这种约束使车体无法横向“漂移”,而必须沿车轮方向前进.由于月面环境松软而不平整,月壤摩擦系数低,过快转向易打滑,且倾斜地形下重力分量影响运动方向,纯滚动模型能更真实模拟车体运动状态,而月面车通常采用六轮独立驱动悬挂,但单轮仍服从局部纯滚动约束.

本文对于移动平台的约束定义为

$$\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \leq V_{\max}, \quad (15)$$

$$|\dot{\theta}| \leq \omega_{\max}, \quad (16)$$

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx}, \quad (17)$$

其中, $V_{\max}$ 和 $\omega_{\max}$ 分别表示移动基座的最大切向速度和最大角速度.

3.2 行驶代价约束

行驶代价约束的设计旨在优化月面移动过程中复

杂非结构化地形对月球车能耗与任务安全性的影响。由于月面低重力与松软土壤的特性, 高梯度区域不仅导致严重的能量损耗, 还伴随着极高的打滑与倾覆风险。本文通过将地形高度与坡度映射为统一的代价度量, 并以此作为行驶代价约束的代价函数, 通过对高梯度区域加以高代价惩罚, 可在路径搜索阶段引导月球车优先选择地势平缓的行进路线, 实现月球车移动能耗优化与行驶安全保障。本文基于高度和坡度的计算是将环境地形特征量化为行驶代价, 以便在路径规划中使用^[23]。然而地形环境是基于地形重建的三维模型, 无法数字化, 故本文将该地形的三维模型离散为一个结构化网格地图, 因此地形高度可以表示为 $Z(x,y)$, 即 $Z(x,y)$ 是任一网格点 (x,y) 处对应的地形高度, 那么地形高度的代价可定义为

$$C_{\text{height}}(x,y) = Z(x,y). \quad (18)$$

但为了避免代价量纲不同导致的权重失衡, 需要对其进行归一化处理, 将代价映射到统一范围(如 $[0,1]$), 地形高度代价变化为

$$C_{\text{height_norm}} = \frac{C_{\text{height}} - \min(C_{\text{height}})}{\max(C_{\text{height}}) - \min(C_{\text{height}})}. \quad (19)$$

坡度则由地形高度 $Z(x,y)$ 的梯度即一阶导数决定。在离散网格中, 梯度通过中心差分近似计算:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} \approx \frac{Z(x+\Delta x,y) - Z(x-\Delta x,y)}{2\Delta x}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y} \approx \frac{Z(x,y+\Delta y) - Z(x,y-\Delta y)}{2\Delta y}, \quad (21)$$

其中, 参数 $\Delta x = \Delta y = 0.1$ 对应网格间距, 因此坡度代价定义为梯度向量的模长(欧几里得范数):

$$S(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2}. \quad (22)$$

所以, 综合地形代价可以定义为

$$C_{\text{total}}(x,y) = \alpha C_{\text{height_norm}}(x,y) + \beta S_{\text{norm}}(x,y), \quad (23)$$

式中 α 和 β 是权重系数, $S_{\text{norm}}(x,y)$ 是归一化后的坡度代价, 计算方式与式(19)高度归一化代价计算方式相同。

如图5所示, 生成地形代价地图后, 可用于月球车与机械臂组合体路径规划时有效避开高代价区域(陡坡或高地), 实现行驶代价最优的目标。

3.3 自碰撞与障碍物规避

设 $q_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个关节的关节位置向量, 同时 $V_i[q_i(t)]$ 为第 i 个连杆的凸包(convex hull)。仿真场景中月球车可以设置为一个凸包, 机械臂根据关节可以设置为多个凸包, 则月球车与机械臂组合体可以看成多个凸包的组合体。 $V[q(t)]$ 即为 t 时刻月球车与机械臂组合体所占用的体积, $V[q_i(t)]$ 为第 i 个关节所占用的体积。在关节构型 $q(t)$ 中, 形式化为单个连杆体积的并集, 即

$$V[q(t)] = \bigcup_{i=1}^n V_i[q_i(t)]. \quad (24)$$

则相应的自碰撞约束与障碍物规避可以表示为

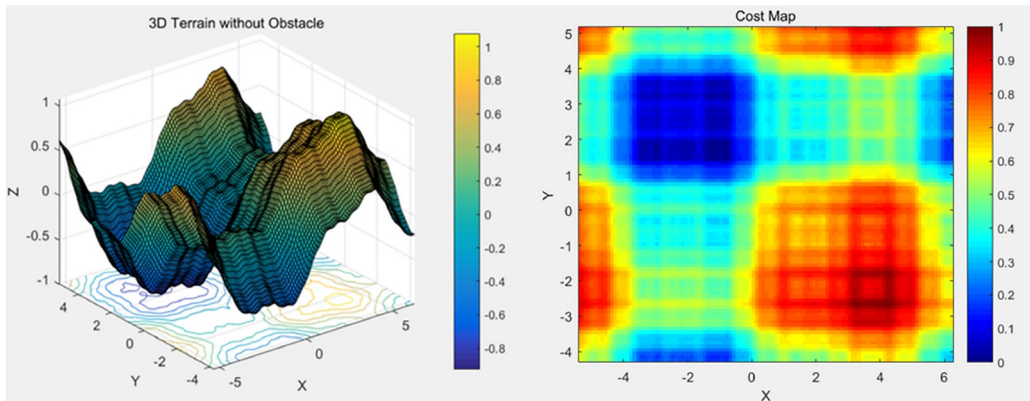


图5 (网络版彩图)网格化地形图与行驶代价图

Figure 5 (Color online) Grid topographic map and travel cost map.

$$\begin{cases} V[q(t)] \cap V_c = \emptyset, \\ V[q_i(t)] \cap V[q_j(t)] = \emptyset, \end{cases} \quad (25)$$

其中, V_c 为静态环境中的障碍物体积, $i, j = 1, \dots, n$ 且 $i \neq j$.

需要强调的是, 为了精确描述非结构化环境下的车臂几何形态, 本文在运动学建模层面及仿真物理模型中采用凸包集合来表征月球车与机械臂的物理属性. 然而, 为了降低联合规划的计算复杂度并保证实时性, 在规划算法实现层面, 并未直接进行凸包相交计算. 而是将月球车与机械臂模型离散化映射为二维栅格地图和三维体素地图. 同时, 考虑到凸包膨胀导致的碰撞可能, 本文在基于二维栅格和三维体素的车臂联合规划中, 引入了额外的膨胀系数或安全距离, 抵消了仿真过程中将原始几何体模型简化为凸多面体产生的几何偏差.

3.4 月球车与机械臂组合体最终停泊位置遮蔽光线规避

由于行星表面成像的光照条件欠佳、行星表面地形纹理缺失, 若巡视采样时再有光线遮挡, 会使得相机成像存在局部光线干扰、明暗差异小、纹理变化不显著, 这给后期环境精细化重建带来了很大的困难^[24]. 针对此问题, 本文对月球车与机械臂组合体增加了最终停泊位置遮蔽光线规避约束, 具体表示为

$$V[q_f(t)] \cap \gamma = \emptyset, \quad (26)$$

其中, $V[q_f(t)]$ 为月球车与机械臂组合体在最终航点的体积, γ 为光源中心点与目标点之间连接的一条直线^[25]. 图6为该约束的示意图.

3.5 月面多维约束优化模型

本节通过月面多维约束数学形式化, 将联合规划问题转化为多约束条件下的优化问题. 优化模型构建为

$$\begin{aligned} I_{fc} &= \arg \min_{q_{a_i}, q_{b_i}, m} \left[\sum_{i=1}^m \phi_a(q_{a_i}) + \phi_b(q_{b_i}) \right], \\ \text{s.t. } & V[q(t)] \cap V_c = \emptyset, \\ & V[q_i(t)] \cap V[q_j(t)] = \emptyset, \\ & V[q_f(t)] \cap \gamma = \emptyset, \end{aligned} \quad (27)$$

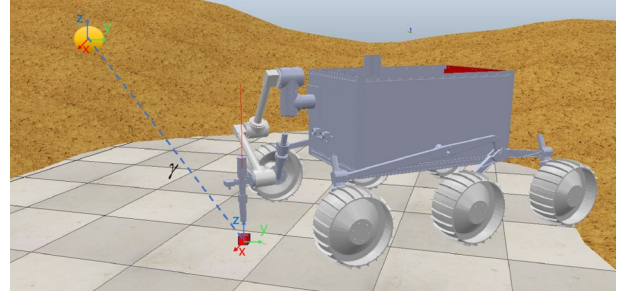


图6 (网络版彩图) 规避光线遮蔽示意图

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of avoiding light obstruction.

其中, q_{a_i} 和 q_{b_i} 分别为月球车在任一路径点的位姿和机械臂在任一路径点的位姿; 本文路径搜索方法是时间离散为 m 个路径点, 而每个路径点对应多个月球车与机械臂位姿, 通过引入多维约束条件优化求解代价最优路径及位姿. ϕ_a 和 ϕ_b 分别表示任一路径点上月球车与机械臂的代价预估值. 为表征轨迹连续代价, 引入积分形式, 则有

$$\begin{aligned} \phi_a(q_{a_i}) &= \int_{t_{i-1}}^{t_i} C_{\text{total}}(x, y) dt, \\ \phi_b(q_{b_i}) &= \int_{t_{i-1}}^{t_i} \rho(x, y, z) dt, \end{aligned} \quad (28)$$

式中, $C_{\text{total}}(x, y)$ 为综合地形代价, 具体计算原理见式(23), $\rho(x, y, z)$ 表示机械臂三维体素网格空间中每个体素之间的代价, 计算原理是通过三维体素网格对机械臂末端执行器(tool center point, TCP)可行空间进行离散化, 并对每个体素附加代价权重, 使A*算法在代价最小的体素序列上完成末端路径搜索.

4 基于改进型双层A*算法的车臂联合求解

本文主要基于改进型双层A*算法进行月面多维约束条件下的车臂联合的路径求解. 本节将阐述关于该算法的流转逻辑、层间切换原理以及相较于传统算法的具体优势.

4.1 改进型双层A*算法原理

传统A*算法是一种启发式搜索算法, 常应用于路径规划中. 该算法的主要原理是基于图搜索和启发式估计, 在加权图中, 从起点到终点找到总代价最低的

路径. 算法在搜索过程中基于一个启发式代价估计函数来选择扩展的节点. 总代价函数通常表示为

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (29)$$

其中, $g(n)$ 表示从起点到当前节点 n 的累积代价, $h(n)$ 为当前节点到目标节点的启发式代价估计, 常采用欧氏距离或曼哈顿距离.

本文基于第3节内容, 将代价函数优化表示为

$$\begin{cases} f(a_n) = g(n) + h(n) + C_{\text{upper}}, \\ f(b_n) = g(n) + h(n) + C_{\text{lower}}, \end{cases} \quad (30)$$

其中, $f(a_n)$ 和 $f(b_n)$ 分别为月球车移动和机械臂操作的代价函数; C_{upper} 为月球车移动时多项代价加权组合形式, 定义为

$$C_{\text{upper}} = \lambda_1 C_{\text{obs}} + \lambda_2 C_{\text{reach}} + \lambda_3 C_{\text{light}}, \quad (31)$$

式中, C_{obs} 为障碍物惩罚项, C_{reach} 为机械臂末端可达性惩罚项, C_{light} 为光照遮挡惩罚项. C_{lower} 为机械臂操作时多项代价加权组合形式, 定义为

$$C_{\text{lower}} = \lambda_4 C_{\text{coll}} + \lambda_5 C_{\text{light}}, \quad (32)$$

其中, C_{coll} 为三维体素空间中不可达体素(障碍物)惩罚项, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ 为各项代价的权重配置参数. 各代价项的权重设置遵循“安全优先, 兼顾效率”的原则, 采用分级惩罚机制. 通过对障碍物、光照禁区与机械臂工作范围超限区设定极大的惩罚因子将其近似为硬约束, 确保规划路径绝对安全; 对于地形坡度, 设定中等权重将其作为软约束, 引导车辆优先选择平坦区域, 但在无路可走时允许翻越缓坡; 基础权重设为常数, 作为路径长度优化的基准. 具体算法流程如图7所示.

传统A*算法通常基于单一空间的路径搜索, 难以同时兼顾移动平台的大范围导航与机械臂的局部精细作业, 且对于车臂联合运动学模型的多约束路径求解计算复杂度较高. 而本文提出的改进型双层A*算法首先通过对联合状态空间进行分区化处理, 在远距离阶段仅在低维车体空间中搜索路径, 接近目标区域后, 引入机械臂自由度, 在局部高分辨率体素空间中执行三维A*操作规划, 将高维搜索问题转化为两个低维搜索问题, 有效降低计算复杂度. 其次, 在代价函数中预先嵌入机械臂可达性、遮光约束与作业需求, 不仅使得规划出的路径相对最短, 还能避开陡坡和光照遮挡

Algorithm 1: MinimalCostPath

```

1 创建并初始化地图棋盘;
2  open_list.append(current_position);
3  while open_list ≠ {} do
4      取出第一个 (F 最小, 判定最优) 位置;
5      current_position = open_list[0];
6      open_list.remove(current_position);
7      if 成功找到解 then
8          逆溯路径;
9          倒序输出;
10         return;
11     end
12 else
13     将下一步可到达的位置加入 open_list, 并检查记录的最小代价路
    径 G 是否需要更新, 记录最小代价路径经过的上一个点;
14     维护当前已知最小代价 G, 如果未遍历或需更新;
15     end
16 end

```

图7 A*算法的基本流程

Figure 7 Basic flow of A* algorithm.

区, 同时形成了机械臂可操作性的全局引导. 同时, 通过误差驱动的层间切换机制, 避免了“车体到位但机械臂不可达”的死锁风险.

算法第一层基于二维栅格地图建立环境模型, 综合地形坡度、障碍物分布、光照遮蔽等多源信息, 构建代价地图, 采用基于numpy数组优化的A*算法进行求解, 在全局地图上规划车体从当前位置至最佳停靠点的最优路径, 实现大范围高效避障导航. 该停靠点是基于月球车移动与机械臂操作状态切换条件(式(33))确定的. 具体方式如图8所示.

由图可知, 图中包含有四条不同的路径, 其中, 路径1中车体最终停靠位置处于光照遮蔽区域; 路径2行驶距离较远且最终车体停靠位置没有在机械臂可达区域范围内; 路径3月球车移动时机械臂最大工作空间包络线与环境障碍物发生干涉. 路径1、2、3皆会导致任务无法顺利完成, 因此, 唯有路径4符合本文的搜索策略且可保证任务顺利实施.

算法第二层基于机械臂末端笛卡儿空间构建三维可达空间体素网格(voxel). 在该空间内, 采用三维A*算法对机械臂末端路径进行规划, 通过插值驱动末端运动, 实现对目标点的逐步接近.

该算法策略在保持搜索效率的同时兼顾精度与灵活性, 适用于巡视探测与采样任务中大范围移动与局部精细操作的协同规划. 需要指出的是, 该分层策略并非单纯的工程实现, 同时也具有理论优势, 是本文针对高维构型空间的降维解耦手段. 若直接对7自由度车臂组合体进行联合规划会遭遇维数灾难, 计算复

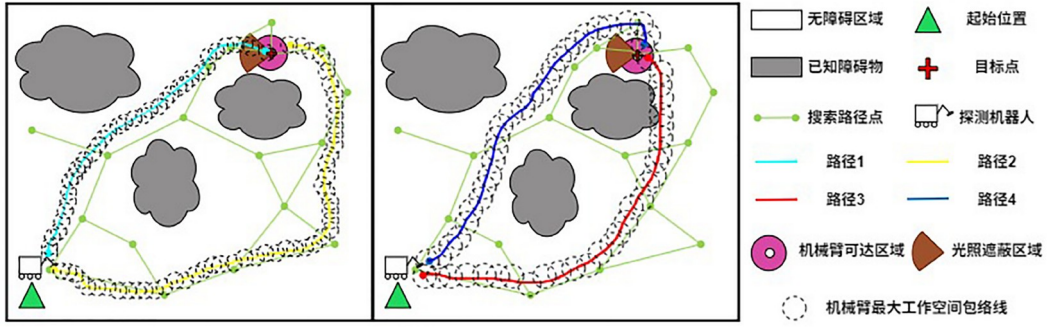


图 8 (网络版彩图)月球车最优路径搜索示意图

Figure 8 (Color online) Schematic diagram of optimal path search for lunar rover.

杂度呈指数级增长. 而本文方法通过理论推导, 将机械臂的可达工作空间和任务约束(如光照、避障)嵌入到车体移动代价函数中, 构建了可行停靠域. 这种策略将高维搜索问题转化为两个低维搜索问题, 有效解决了车臂联合规划中算法高效性与车臂协同性相互平衡的难题.

4.2 层间切换机制

为保证双层A*规划算法在复杂月面环境下的有效性与稳定性, 本节对上层移动规划与下层机械臂规划之间的切换条件及其对整体搜索过程的影响进行分析.

与传统分层规划中依赖经验规则进行层间切换不同, 本文采用基于误差的数学条件作为触发依据, 从机制上避免死锁与局部最优问题.

在上层规划阶段, 移动平台路径搜索在二维离散代价地图中进行, 其目标是最小化综合代价函数, 该代价函数不仅包含行驶距离与障碍规避项, 还通过权重场形式嵌入机械臂可达性与光照遮挡惩罚. 当移动平台到达目标区域附近时, 通过计算当前位置与规划目标之间的欧氏位置误差、判断在三维体素空间是否存在可行路径以及遮光代价小于最大阈值作为层间切换条件. 具体表示为

$$S_{a \rightarrow b} = (\varepsilon_d \leq \delta_b) \cap [IK_{\text{feasible}}(b) = 1] \cap (C_{\text{light}} \leq \bar{C}_{\text{light}}), \quad (33)$$

其中, $S_{a \rightarrow b}$ 表示月球车移动状态切换为机械臂操作状态, ε_d 表示当前位置与规划目标之间的欧氏距离误差, δ_b 表示机械臂最大工作半径(实验取0.8倍的机械臂臂

长), $IK_{\text{feasible}}(b) = 1$ 表示机械臂在运动学上有解, 即在三维体素空间中存在可行路径, $\bar{C}_{\text{light}}$ 表示遮光代价的最大阈值. 当上述三个条件均满足时, 认为移动平台已满足机械臂操作所需的空间与姿态条件, 从而触发下层机械臂规划.

在下层规划阶段, 机械臂末端路径搜索在离散三维体素空间中进行, 采用三维A*算法求解末端从当前位姿到目标位姿的可行路径. 该阶段不再改变移动平台位姿, 从而避免联合状态空间的反复回溯.

综上, 本文双层A*规划算法在状态转移上具有明确的阶段单调性, 各阶段之间不存在回退到前一层的循环调用, 不会产生层间锁死或无穷循环的问题. 同时, 由于上层规划采用基于全局栅格地图的搜索算法且代价函数已提前嵌入机械臂可达性约束, 既规避了月球车陷入局部极小值, 又有效降低了机械臂陷入奇异构型或关节限位导致的高代价风险. 因此, 本文方法在大幅降低计算复杂度的前提下, 获得了对全局最优解的紧密逼近.

5 实验验证

为验证本文所提出方法的有效性, 实验按照月面倾斜类地形在V-REP(现已更名为CoppeliaSim)中进行建模仿真. V-REP是一个功能强大的机器人仿真平台, 广泛用于机器人学、人工智能、自动化和控制系统等领域的研究和开发, 其提供了一个灵活的模块化架构, 用户可以自定义机器人模型、传感器、环境、控制器等, 且内置多个物理引擎(如Bullet, ODE, Vortex, Newton等), 可以模拟真实的物理环境(例如摩擦、碰

撞、重力等)。如图9所示即为在仿真平台中搭建的仿真环境。

由于实验需要进行复杂路径规划, 在保持精度进行实时的算法优化与仿真的同时, 还需提供详细的数值分析和结果可视化。因此, 实验还利用了Python作为算法设计和验证的核心平台, 提供更高效的计算和优化过程。双平台仿真的具体原理如图10所示。

在实际月面环境中, 机器人的姿态信息是基于环境感知信息进行几何解算获得的。仿真过程中, 利用V-REP在机器人上搭载深度相机与激光雷达等感知传感器, 获取周围地形的点云信息, 构建数字高程模型(digital elevation model, DEM)。在离散化的栅格地图中, 通过计算高程梯度得到地形在 X 和 Y 方向的斜率进而差分近似求得法向量 $\mathbf{n}$ 。结合当前的航向角 θ 即可构建出描述车体三维姿态的目标四元数, 实现车体在复杂地形上的姿态估计, 并收集数据如路径代价、避障成功率、任务完成情况等。再通过远程应用程序接口(application programming interface, API)实现Python与V-REP的实时交互, 定期向Python发送打包后的收集数据, Python会负责计算路径和机械臂规划, 每个规划周期, Python会发出控制指令, 指令在Python中实现实时控制逻辑, 包括路径规划、避障决策、机械臂操作等。通过通信接口定期向V-REP发送控制指令(如移动命令、机械臂动作、传感器数据读取指令等)。V-REP根据指令执行仿真环境中机器人的运动和任务。

为验证所提出的车臂联合规划方法的有效性, 本文搭建了基于Python语言与V-REP仿真平台的联合控制仿真环境, 本节将基于该仿真环境进一步提出联合规划系统的设计, 随后再基于可视化仿真结果分析方法的可行性。

5.1 联合规划系统设计

本文设计的车臂联合规划系统采用状态空间分区化的规划策略, 首先, 将移动平台的非平面位姿与机械臂多关节状态统一建模于世界坐标系下, 形成高维状态空间, 通过正运动学模型建立两者之间的转换关系。路径规划过程采用高维连续状态空间分片解耦搜索策略, 在大范围行进时, 高维状态空间中主要通过调整移动平台自由度实现路径规划, 在接近目标区域后, 主要通过调整机械臂自由度, 在高维状态空间内搜索末端可达的最优路径, 整体任务流程由状态机统一管理,

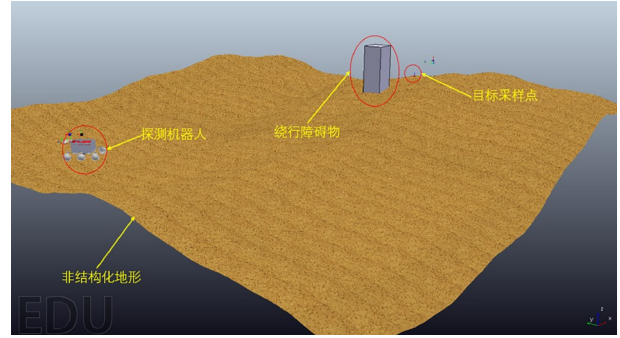


图9 (网络版彩图)月面非结构化地形仿真环境效果图

Figure 9 (Color online) Effective image of unstructured terrain simulation environment on the moon surface.

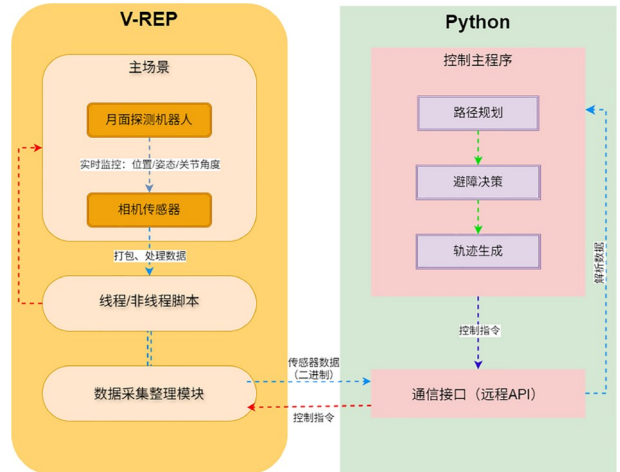


图10 (网络版彩图)双仿真平台控制原理图

Figure 10 (Color online) Schematic diagram of dual simulation platform control.

且通过引入多重误差模型动态参与状态转移判断与控制指令调整, 形成闭环控制链路。对应原理图如图11所示。

图11所示的车臂联合规划系统原理图中主要包括高维状态空间建模模块、感知与地图构建模块、路径规划模块、误差反馈与闭环控制模块、状态管理模块。其中高维状态空间建模模块主要基于本文第1节的理论采用正运动学模型统一描述月球车与机械臂组合体的位姿; 感知与地图构建模块通过集成仿真环境中的视觉传感器, 动态感知月球车与机械臂组合体的运行状态, 构建多维动态代价图; 路径规划模块主要基于改进型双层A*算法进行路径规划; 误差反馈与闭环控制模块用于大范围行进导航与机械臂末端操作的时

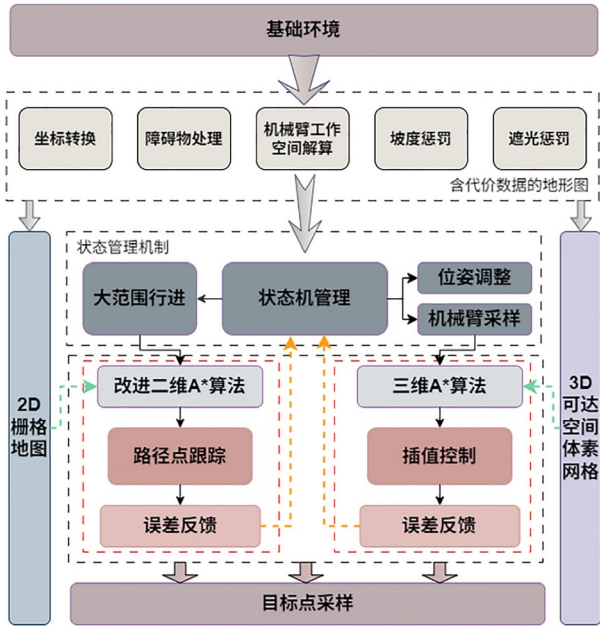


图 11 (网络版彩图)车臂联合规划系统原理图

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of the vehicle-arm joint planning system.

序执行与插值调节; 状态管理模块用于整体流程控制, 实现了车臂联合规划系统的任务协作与分阶段控制。

在本文所构建的车臂联合规划系统中, 误差反馈机制贯穿于路径跟踪控制与状态机管理的各个阶段, 构成了整个系统决策与控制逻辑的重要反馈环节。误差的设计涵盖了车体路径导航中的位置与航向偏差计算, 以及机械臂末端路径跟踪中的位置误差反馈控制, 从而实现了月球车与机械臂运动状态的动态调节与精细控制。在大范围行进时, 误差反馈由位置误差和航向误差两部分构成, 其欧氏位置误差定义为

$$\varepsilon_d = \|\mathbf{p}_{\text{car}} - \mathbf{p}_{\text{goal}}\|_2, \quad (34)$$

其中, $\mathbf{p}_{\text{car}}$ 表示当前车体质心位置, $\mathbf{p}_{\text{goal}}$ 表示目标位置。当 ε_d 小于机械臂最优工作空间时, 认为小车已接近目标区域, 可进入下一个作业状态。航向误差则表示为

$$\varepsilon_\theta = (\theta_g - \theta_c + \pi) \bmod 2\pi - \pi, \quad (35)$$

其中, 车体前进方向由前后车轮构建的向量定义, 记为当前航向角 θ_c , 而目标点方向定义为 θ_g , 通过设定角度阈值, 系统判断是否需要优先调整车头方向, 进而采取轮速差异控制策略完成转向或直行动作。

对于机械臂末端控制, 在路径规划阶段基于 3D A* 算法搜索出末端位置序列, 在执行过程中通过逐步插值控制末端点进行精细跟踪。需要指出的是, 本文研究重点聚焦于复杂月面环境中的移动与操作联合规划问题, 相关多智能体协同控制方法将作为本文方法在未来工作的自然拓展方向^[26-28]。其中, 机械臂末端的位置误差定义为

$$\varepsilon_{\text{arm}} = \|\mathbf{p}_{\text{now}} - \mathbf{p}_{\text{aim}}\|_2, \quad (36)$$

式中, $\mathbf{p}_{\text{now}}$ 为当前末端位置, $\mathbf{p}_{\text{aim}}$ 为期望目标位置, 若误差 $\varepsilon_{\text{arm}} > \Delta_s$, 则进行线性插值修正:

$$\mathbf{p}_{\text{now}} \leftarrow \mathbf{p}_{\text{now}} + \frac{\mathbf{p}_{\text{aim}} - \mathbf{p}_{\text{now}}}{\varepsilon_{\text{arm}}} \cdot \Delta_s, \quad (37)$$

其中, Δ_s 为设定的末端步长, 若误差小于该阈值, 认为末端已到达目标, 自动推进到下一个插值段或状态节点。

同时, 实验采用有限状态机机制对车臂联合规划系统进行统一调度与阶段管理。完整状态流转逻辑如表 2 所示。

表 2 所示的状态机机制的整个控制流程通过状态变量控制执行逻辑的切换, 从导航阶段、目标定位与调整、机械臂插值控制执行阶段直至任务完成, 实现对小车移动、转向、避障与机械臂轨迹跟踪的分阶段协调。每个状态通过误差计算驱动状态转移, 并配合路径规划、控制执行与仿真反馈, 实现稳定、可控的车臂联合操作流程。

5.2 结果可视化分析

实验以机械臂工作空间作为加权代价, 引导月球车与机械臂组合体停靠在目标点附近区域。具体实现方式为: 在移动平台路径规划阶段, 通过对候选停靠位置进行机械臂末端可达性分析, 将不可达或操作代价较高的区域映射为附加代价项叠加至上层路径代价函数(式(30))中。机械臂的 D-H 建模在第 2 节已讲述, 基于该 D-H 参数表, 实验应用蒙特卡罗采样法计算机械臂工作空间。计算结果如图 12 所示。

如图 12 所示分别展示了机械臂点云工作空间的三维视图、X-Z 视图、X-Y 视图, 且工作空间中的采样点分多种颜色以表示末端相对于基座的欧氏距离。距离越远, 颜色越偏红, 移动代价相对越高; 距离越近, 颜

表 2 状态机机制

Table 2 State machine mechanism

状态编号	状态名称	功能描述	跳转条件
1	大范围行进与路径规划	使用2D A*算法规划路径, 朝目标区域移动	到达目标区域, 切换至状态2
2	位置调整	车体靠近目标, 停靠在机械臂作业范围内	机械臂最优工作空间覆盖目标, 切换至状态3
3	位姿调整	车体调整朝向, 使车体正面对准机械臂采样目标, 同时规避遮光区域	位姿调整完成, 切换至状态3.1
3.1	机械臂作业准备	停止车体运动, 准备机械臂末端插值控制	准备完成, 切换至状态4
4	机械臂路径跟踪	基于3D A*算法规划路径, 逐段插值移动	路径点跟踪完成切换至状态5
5	机械臂准备回收	机械臂规划路径返回初始位置	规划完成, 切换至状态6
6	机械臂回收插值运动	机械臂末端插值回归初始位置	回收完成, 切换至状态7
7	等待下一任务	机械臂停止, 车体停止, 等待新的采样目标	新目标下发, 重新切换到状态1

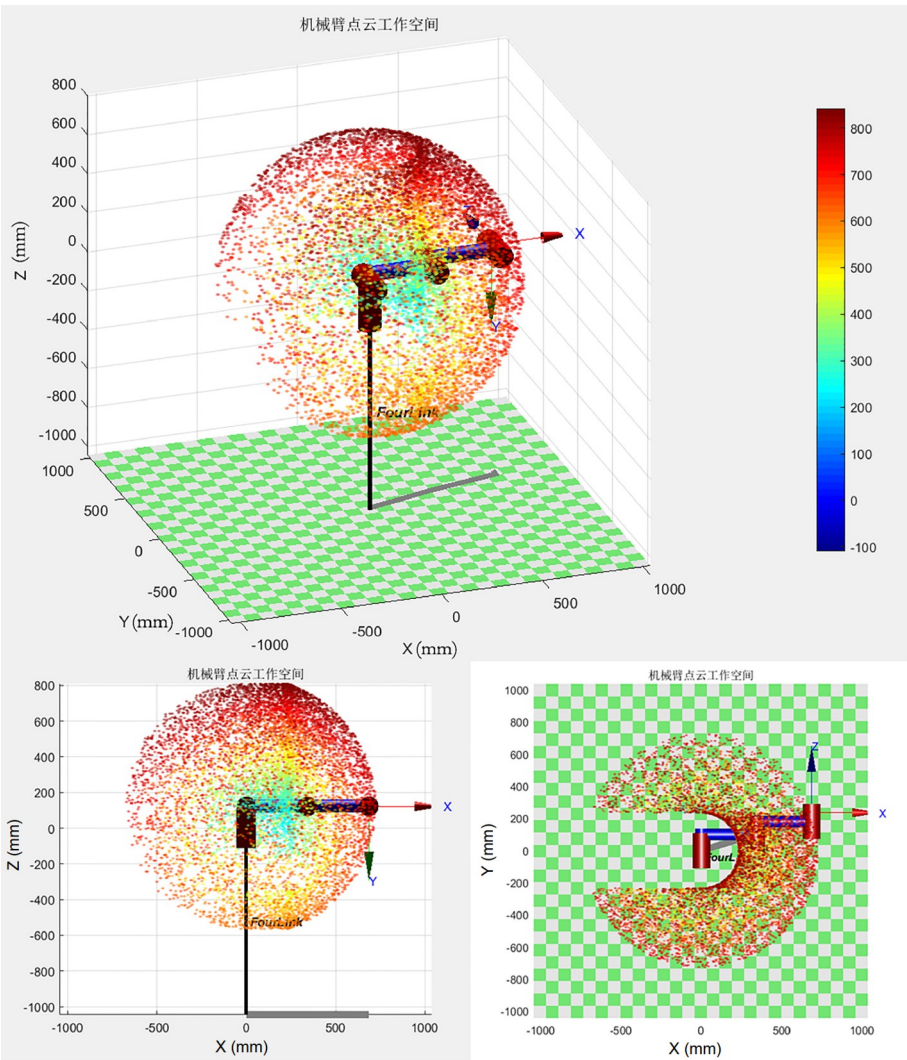


图 12 (网络版彩图)机械臂点云工作空间视图
Figure 12 (Color online) View of the robotic arm's point cloud workspace.

色越偏蓝, 移动代价相对越低. 同时, 图12中X-Y视图可以很明显看到, 在X负半轴机械臂工作区域内有一部分区域未被采样点覆盖, 其原因是实验将车体体积作为了约束条件, 可以防止机械臂运动时月球车与机械臂组合体的自碰撞.

由于实验设置的蒙特卡罗采样次数为100000次, 仿真时如果依照此方法计算会大大加剧计算量. 故在月球车与机械臂组合体大范围行进时, 只计算机械臂的最大工作空间包络线作为加权代价. 结果如图13所示.

当状态机进入状态2时, 系统才会进一步按上述蒙特卡罗采样方法计算机械臂最优工作空间, 并相应精确停靠位置, 使得机械臂最优工作空间覆盖目标点.

图14为机械臂末端到达采样点时的仿真图, 图中亮面即为光照充足面, 暗面为缺乏光照面. 由图可知月球车与机械臂组合体采样时有效避免了光照遮挡.

仿真结束后, 实验采集了仿真过程中的关键性能指标对本文提出的联合规划方法及相应算法进行分析.

如图15所示为路径代价随仿真时间的变化关系曲线, 图中曲线表明本文方法可在仿真开始时快速计算出路径代价, 且随着月球车与机械臂组合体接近目标点路径代价不断下降, 最后趋于收敛.

图16和17显示了移动平台在任务执行过程中的二维行驶轨迹以及三维姿态变化曲线.

如图16和17所示车体轨迹整体表现平稳, 转弯阶段基本无抖动, 且能有效绕开障碍区域, 在局部路径上体现出较好的平滑性; 结合轨迹中标注的车体姿态向量, 可以观察到车体在目标点附近自动调整方向与

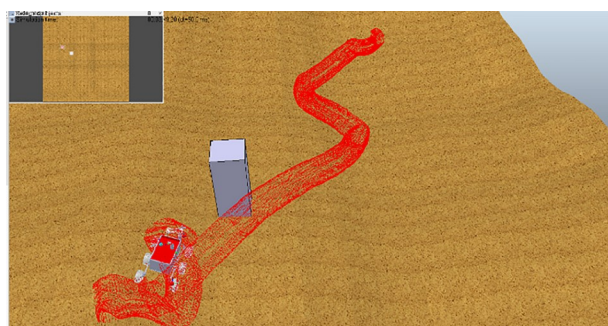


图13 (网络版彩图)机械臂最大工作空间包络线计算结果图
Figure 13 (Color online) Calculation result diagram of the envelope line of the robot arm's maximum working space.

姿态角度, 为后续机械臂操作创造良好作业位姿.

同时, 车载机械臂四个关节的角度变化随时间演化曲线如图18所示, 运动开始时机械臂关节角度出现小幅度变化是因为原先的机械臂位姿为奇异位姿, 故需错开些许关节角度.

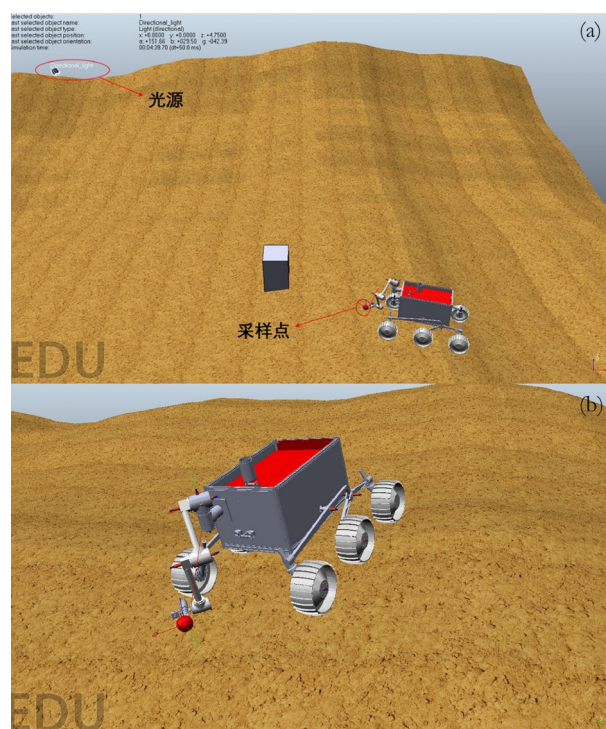


图14 (网络版彩图)机械臂采样图. (a) 月球车、采样点与光源位置关系图; (b) 机械臂采样工具采样图

Figure 14 (Color online) Sampling by robotic arm. (a) Diagram of the relationship between the lunar rover, sampling point, and light source position; (b) sampling by robotic arm sampling tool.

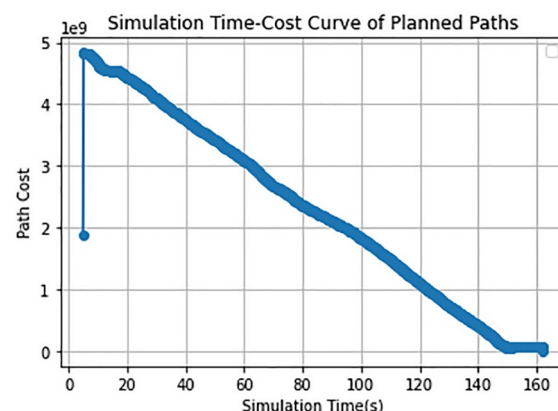


图15 (网络版彩图)仿真时间与代价曲线
Figure 15 (Color online) Simulation time and cost curve.

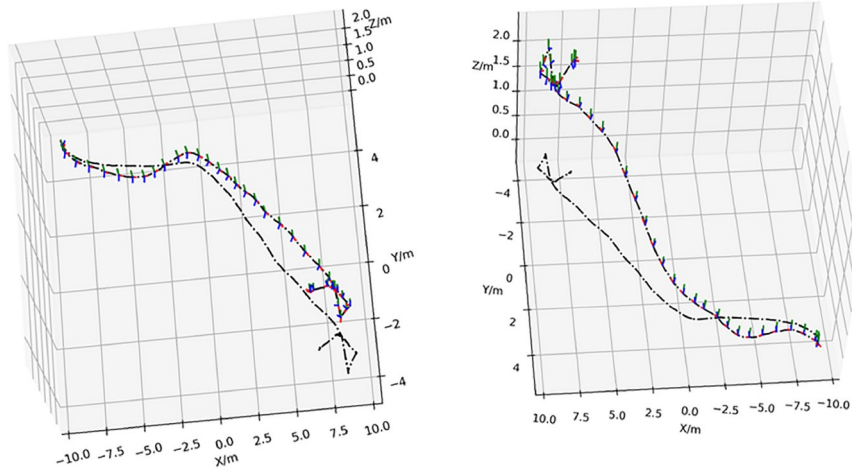


图 16 (网络版彩图)移动平台位姿变化图

Figure 16 (Color online) Diagram of pose changes of mobile platform.

为评估规划系统的鲁棒性, 系统实时记录了车体位置误差、车体方向误差、机械臂末端误差三类误差, 具体情况如图19和20所示。

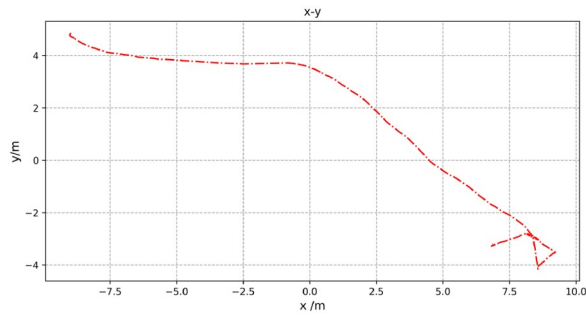


图 17 (网络版彩图)移动平台位行驶轨迹图

Figure 17 (Color online) Trajectory diagram of mobile platform.

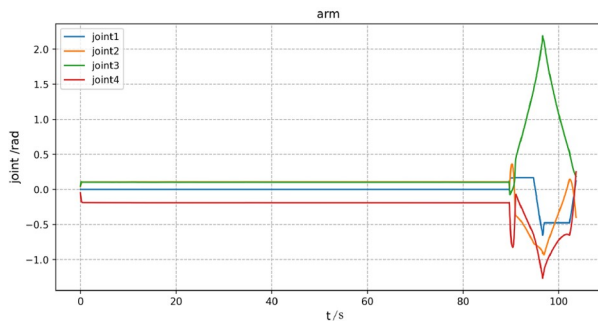


图 18 (网络版彩图)车载机械臂关节角变化图

Figure 18 (Color online) Diagram of joint angle changes of the on-board robotic arm.

图19和20分别展示了上述误差在整个任务过程中的变化趋势. 结果表明, 车体位置误差在到达目标前持续下降, 在最终阶段收敛至0.1 m以下, 车体航向误差基本控制在 ± 0.1 rad内, 实现平稳对准. 机械臂末端误差在插值控制过程中平滑下降, 最终稳定在1 mm以内, 之后误差变化是由于机械臂采样后收回远离了目标点. 评估验证了系统在任务执行中路径规划的能力与精度.

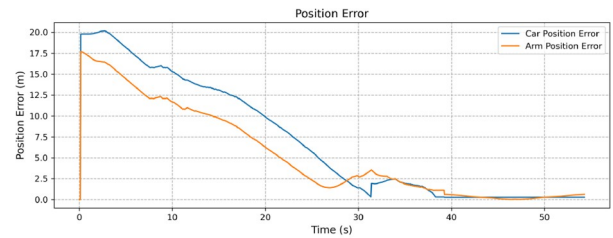


图 19 (网络版彩图)车体位置与机械臂末端误差变化

Figure 19 (Color online) Variation of errors between the vehicle body position and the end of the robotic arm.

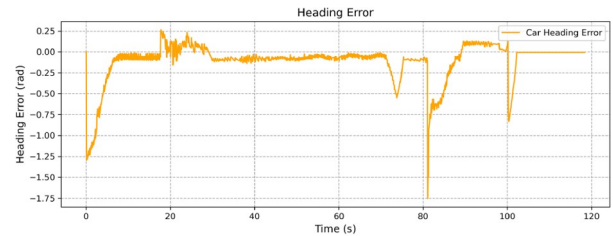


图 20 (网络版彩图)车体航向误差变化

Figure 20 (Color online) Change in vehicle heading error.

6 结论

本文针对复杂月面环境下机器人移动与操作联合规划时耦合关系复杂、实际任务约束众多、大范围导航与局部精细操作能力兼顾等问题,提出了一种适用于月面非结构化环境下车臂协同作业的联合规划方法,构建了状态空间分区化的多路径转移优化模型,对复杂月面多维约束条件进行了形式化表达,并在此基础上提出了一种改进型双层A*算法用于联合规划求解。首先将移动平台的位姿与机械臂多关节状态统一建模于世界坐标系下,形成高维联合状态空间,并通过正运动学模型建立移动平台与机械臂之间的变换关系。随后,基于车臂联合状态空间模型引入多约束条件,将机械臂操作序列求解和月球车路径搜索整合到状态空间分区化的多路径转移优化模型中。其次,设

计了改进型双层A*算法求解可行路径,所求解的路径同时兼顾移动平台的大范围导航与机械臂的局部精细作业。

为验证规划方法的有效性,设计了月球车与机械臂组合体巡视采样任务的仿真实验,并实时记录了车体位置误差、车体方向误差、机械臂末端误差三类误差,评估路径规划能力。仿真实验结果表明,车体位置误差在到达目标前持续下降,在最终阶段收敛至0.1 m以下,车体方向误差控制在 ± 0.1 rad内,实现平稳对准。机械臂末端误差在插值控制过程中平滑下降,最终稳定在1 mm以内,评估验证了本文所提出的车臂联合规划方法在月球车路径搜索与机械臂轨迹生成过程中具备良好的规划能力和精度,为未来面向月面作业等复杂场景下月球车与机械臂组合体的联合控制策略提供了实用价值。

致谢 论文在北京航天飞行控制中心空间遥操作团队的通力协作下得以顺利完成,在此深表感谢。

参考文献

- 1 Lin Y, Yang W, Zhang H, et al. Return to the Moon: New perspectives on lunar exploration. *Sci Bull*, 2024, 69: 2136–2148
- 2 Chen R, Wang X, Yuan S, et al. A solution of lunar manufacturing and launch base. *Acta Astronaut*, 2025, 236: 897–903
- 3 Pei Z, Wang Q, Xu L, et al. Strategic analysis of scientific activities and study on the overall plan of scientific operation platforms based on the lunar research station. *Chin J Space Sci*, 2025, 45: 1–4
- 4 Li C L, Yan W, Liu J J, et al. China's lunar exploration promotes innovative development in lunar and planetary science (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2023, 11: 2437–2456 [李春来, 严韦, 刘建军, 等. 中国月球探测促进月球与行星科学创新发展. *中国科学: 地球科学*, 2023, 11: 2437–2456]
- 5 Hussain B, Guo J, Fareed S, et al. Robotics for space exploration: From Mars rovers to lunar missions. *Int J Ethical AI Appl*, 2025, 1: 1–10
- 6 Yang M F, Zhang W, Zhang G, et al. China's achievements in the development of unmanned automatic lunar sampling and return exploration technology (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2024, 6: 1–13 [杨孟飞, 张伍, 张高, 等. 我国月球无人自动采样返回探测技术发展成就. *航天器工程*, 2024, 6: 1–13]
- 7 Li M, Zhang X, Ding Y, et al. Research progress on autonomous navigation technology for landing and roaming of extraterrestrial surface detectors. *J Deep Space Explor*, 2025, 2: 110–123
- 8 Yang C, Li G L, Feng X M, et al. Remote operation simulation verification technology for lunar surface sampling robotic arm (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 12: 1480–1491 [杨成, 李贵良, 冯晓萌, 等. 月面采样机械臂遥操作仿真验证技术. *中国科学: 技术科学*, 2021, 12: 1480–1491]
- 9 Dong P, Zhao X. Static path planning of tracked mobile manipulator and simulation. In: *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*. IEEE, 2011. 2266–2269
- 10 Saoji S, Rosell J. Flexibly configuring task and motion planning problems for mobile manipulators. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 2020. 1285–1288
- 11 Castaman N, Pagello E, Menegatti E, et al. Receding horizon task and motion planning in changing environments. *Robotics Autonomous Syst*, 2021, 145: 103863

- 12 Rastegarpanah A, Gonzalez H C, Stolkin R. Semi-autonomous behaviour tree-based framework for sorting electric vehicle batteries components. *Robotics*, 2021, 10: 82
- 13 Sánchez-Ibáñez J R, Pérez-del-Pulgar C J, García-Cerezo A. Path planning for autonomous mobile robots: A review. *Sensors*, 2021, 21: 7898
- 14 Gul F, Mir I, Abualigah L, et al. A consolidated review of path planning and optimization techniques: Technical perspectives and future directions. *Electronics*, 2021, 10: 2250
- 15 Han F, Jelvani A, Yi J, et al. Coordinated pose control of mobile manipulation with an unstable Bikebot platform. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2022, 27: 4550–4560
- 16 Huang Q, Tanie K, Sugano S. Coordinated motion planning for a mobile manipulator considering stability and manipulation. *Int J Robotics Res*, 2000, 19: 732–742
- 17 Li X C, Zhao D B, Yi J Q. Analysis of the manipulability of an omnidirectional mobile manipulator (in Chinese). *Chin J Mech Eng*, 2006, 14: 1442–1447 [李新春, 赵冬斌, 易建强. 一种全方位移动机械手的可操作度分析. *中国机械工程*, 2006, 14: 1442–1447]
- 18 Pilia V, Gupta K. A hierarchical and adaptive mobile manipulator planner with base pose uncertainty. *Auton Robot*, 2015, 39: 65–85
- 19 Bai Q, Li P, Tian W, et al. Coordinated motion planning of the mobile redundant manipulator for processing large complex components. *Int J Adv Manuf Technol*, 2022, 121: 6703–6721
- 20 Xing H, Gong Z, Ding L, et al. An adaptive multi-objective motion distribution framework for wheeled mobile manipulators via null-space exploration. *Mechatronics*, 2023, 90: 102949
- 21 Ye Z, Qian J, Xu Y, et al. Adaptive weighted multi-image shape from shading for precise topographic reconstruction at the lunar south pole. *Astron J*, 2025, 170: 31
- 22 Liu Q, Gao Y H, Liu C K, et al. Research on dynamic task planning method for lunar surface sampling robotic arm (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 12: 1492–1506 [刘茜, 高宇辉, 刘传凯, 等. 月面采样机械臂动态任务规划方法研究. *中国科学: 技术科学*, 2021, 12: 1492–1506]
- 23 Chen W, Wu P, Gong Y, et al. The role of energy consumption in robotic mobile fulfillment systems: Performance evaluation and operating policies with dynamic priority. *Omega*, 2025, 130: 103168
- 24 Wang L, Yu J, Tian M. Research on key technologies of lunar patrol perception in sparse scenes. *UPB Sci Bull Ser C*, 2023, 85: 33–48
- 25 Storiato F, Ferrentino E, Salvioli F, et al. Optimal whole body trajectory planning for mobile manipulators in planetary exploration and construction.. arXiv: [2405.14363](https://arxiv.org/abs/2405.14363)
- 26 Ren Y, Sosnowski S, Hirche S. Fully distributed cooperation for networked uncertain mobile manipulators. *IEEE Trans Robot*, 2020, 36: 984–1003
- 27 Xu T, Yang T, Duan Z, et al. Distributed coordination of networked manipulators: A two-layer control scheme. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2023, 31: 2660–2672
- 28 Zeng D, Wang Y, Jiang Y, et al. Distributed neural adaptive impedance control for cooperative manipulation with unknown objects. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2025, 36: 12363–12376

A unified mobility and manipulation planning method under complex multidimensional constraints on the lunar surface

LIU ChuanKai^{1,2,3}, CHEN Liang¹, HUANG KaiQi¹, ZHANG JiTao^{2,3}, WANG XiaoXue^{2,3}, ZHANG ZuoYu^{2,3} & ZHANG Kuan^{2,3}

¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, 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

Long-distance mobility operations of lunar rovers equipped with robotic arms represent an essential exploration mode for future lunar resource exploitation and scientific station construction. However, the joint operation planning of rover-manipulator systems faces significant challenges due to the complex lunar terrain, time-varying illumination constraints, and harsh environmental conditions. To address these challenges, this paper proposes a unified mobility and manipulation planning method for robotic operations on complex lunar surfaces. First, a high-dimensional state-space model of the rover-manipulator ensemble is established to achieve an integrated task-level representation. Then, by comprehensively considering constraints such as obstacle avoidance, illumination occlusion, and task logic, a partitioned multi-path transfer optimization model is constructed. An improved dual-layer A* algorithm is designed for both large-scale navigation and fine manipulation, enabling decoupled search in high-dimensional continuous state spaces and joint optimization of mobility and manipulation trajectories. Compared with traditional methods, the proposed approach effectively reduces the computational complexity of high-dimensional spaces and achieves rapid, cost-optimal joint path planning for the rover and manipulator. Experimental results verify the effectiveness of the proposed method, providing a feasible approach for future lunar exploration missions involving integrated rover-manipulator systems.

coordinated vehicle-arm planning, kinematic modeling, multi-constraint conditions, dual-layer A* algorithm, path planning, state management mechanism

doi: [10.1360/SST-2025-0343](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0343)