# 国内外行星表面巡视器自主导航 技术研究

解杨敏<sup>1</sup>,季 力<sup>1</sup>,魏祥泉<sup>2</sup>,陈 萌<sup>2</sup>,邹怀武<sup>3</sup>

(1.上海大学 机电工程与自动化学院,上海市机械自动化及机器人重点实验室,上海200444;2.上海宇航工程系统研究所,上海201109;3.上海市空间飞行器机构重点实验室,上海201108)

摘 要:作为航天技术发展的前沿和趋势,深空探测是人类历史上最为复杂的系统工程之一。星球巡视器是 在星球表面移动作业的无人探测系统,能够对星球表面进行大面积、近距离和接触式的考察,是地外星球着陆探测 作业的主要手段。星球巡视器导航技术是研究星球巡视器的关键技术之一,其导航自主性能直接影响星球探测计 划能否顺利进行。本文首先概述了星球巡视器自主导航技术内涵,介绍了国内外巡视器导航技术的研究现状,分 析了自主导航技术中地图建模、定位算法与路径规划技术的发展过程,最后指出了星球巡视器导航技术所要急需 突破的几个关键技术与发展方向。

关键词:深空探测;星球巡视器;导航技术;地图建模;定位算法;路径规划
 中图分类号: V 423.6 文献标志码: A DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2021.01.008

# Domestic and Overseas Research Status on Autonomous Navigation Technology of Planetary Rovers

XIE Yangmin<sup>1</sup>, JI Li<sup>1</sup>, WEI Xiangquan<sup>2</sup>, CHEN Meng<sup>2</sup>, ZOU Huaiwu<sup>3</sup>

(1.Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2.Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China; 3.Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** As the frontier in the development of aerospace technology, deep space exploration is one of the most complex system engineering in human history. Planetary patrol is an unmanned detection system that operates on the surface of the planet. It can carry out large-scale, close-range and contact investigations on the surface of the planet. It is the main method for detecting the landing of extraterrestrial planets. Planet voyager navigation technology is one of the key technologies for studying the planetary voyager. Whether the planetary exploration program can be carried out smoothly will be directly affected by its autonomous navigation performance. First, the general background and concepts of the autonomous navigation technology of the planetary rovers are introduced, and then the development history and current status of the technology are described. With analysis of the research status, the limitations of current technology on the simultaneous localization and mapping (SLAM) and path planning are pointed out, followed by the prediction of the development tendency in several aspects.

**Key words:** deep space exploration; planetary patrol; autonomous navigation technology; simultaneous localization and mapping (SLAM); global positioning; path planning

0 引言

深空探测作为航天技术发展的前沿和趋势,是

人类历史上最为复杂的系统工程之一。如图1所 示,在2013年,随着嫦娥三号着陆器和玉兔号巡视

收稿日期:2020-01-06;修回日期:2021-01-04

基金项目:上海市青年科技启明星计划(19QA1403500)

作者简介:解杨敏(1984—),女,博士,副教授,主要研究方向为移动机器人技术、控制理论及其应用。

器在月球表面的成功着陆和作业,完成了对月球进 行土壤成分研究、化学元素测量、空间环境感知的 科学任务,中国跨出了外星球表面勘探的第一步,成为第三个在月球上实现软着陆的国家<sup>[1]</sup>。



(a) 玉兔号巡视器在月球表面成功着陆



**Fig.1** Yutu lunar patrol<sup>[1]</sup>

与此同时,世界各科技强国也纷纷展开各自的 深空探测计划。欧洲空间局与俄罗斯开展合作,计 划于2020年前实现火星着陆巡视<sup>[2-3]</sup>。日本发展的 重点是实施多类型小行星的取样返回任务,以保持 在小行星探测领域的优势地位<sup>[3]</sup>。印度计划2020 年前实施月球着陆巡视探测和第二次火星探测<sup>[2]</sup>。 美国则计划于2020年再次发射火星着陆器(如图2 所示),为2030年的载人探火计划做准备<sup>[4]</sup>,并同时 启动了重返月球计划<sup>[5]</sup>。中国在近期和中期计划中 将分别对月球和火星进行探测,实现"绕、落、回"和 "绕、落、巡"工程目标<sup>[6-7]</sup>。2018年12月,嫦娥四号 以软着陆方式登陆月球背面,将利用地月拉格朗日 2点中继卫星首次对月球背面进行巡视探测,实现 采样返回任务,并将以5年、10年为期开展利用巡视 器进行的月球南北极探测<sup>[6]</sup>。由此可见,在未来 10年的航天科技竞争中,地外星球的着陆探测作业 将是深空探测的主要任务之一。

星球巡视器是在星球表面移动作业的无人探测系统,能够对星球表面进行大面积、近距离和接触式的考察,是地外星球着陆探测作业的主要手段<sup>[8]</sup>。因宇宙空间具有微重力、高真空、强辐射、剧烈变化的温度和亮度等特点,无论在前期空间探测还是后期开发利用阶段都需要依赖巡视器完成人类难以或无法胜任的任务,而其完成各项任务的自

主程度则成为衡量巡视器工作性能的重要指标<sup>[9]</sup>。 然而,迄今为止所有在星球作业的星球巡视器都或 多或少地依赖于人工决策,自主导航能力不足成为 制约其漫游能力的主要原因<sup>[10]</sup>。



图 2 美国 NASA 2020年火星表面巡视器示意图<sup>[4]</sup> Fig.2 US NASA 2020 Mars Rover schematic<sup>[4]</sup>

我国对新一代星球巡视器性能指标要求进一步提高,对构建自主、精准、自适应的智能导航系统的需求更为迫切,具体体现在以下几个方面:

1)通信延时的影响。玉兔号与地球指挥中心 的通信时间约为1s,可以满足"信息回传一地面指 挥中心处理决策一发送遥控指令"的遥操作序列时 间要求。然而,即将进行的月球背面探测需要通过 中继星进行与地面的通信,且将出现部分时间段通 信中断的情况;而火星距离遥远,信号往返需要 20 min左右<sup>[11]</sup>,因此,在将来的探月和探火计划中过 于依赖遥控技术对巡视器进行指挥操作是不现实 的。地面站只能向太空发送对星球巡视器的宏观 和全局行动指令,而微观和局部的行动则需要通过 其感知和导航系统来进行自主规划<sup>[9]</sup>。

2) 长距离探测的任务需求。玉兔号的设计速 度为200 m/h,最终活动在着陆器的20 m范围以 内,其整个活动场景和轨迹都可以被着陆器监测 到。然而,下一代巡视器将远离着陆器进行工作, 如美国对未来巡视器的设计要求为每天行走超过 1 km<sup>[12]</sup>,且要求其进行在着陆器几百公里外的探测 活动<sup>[10,13]</sup>。在这样的长距离探测任务中,巡视器在 大部分时间将脱离着陆器的监测范围,它必须具有 对环境进行精确感知、自我定位并进行地形自适应 的自主导航能力,以确保移动过程的高效和 安全<sup>[12,14]</sup>。

3)取样返回的任务需求。美国NASA、欧洲航 天局、中国航天局都在未来计划中要求巡视器能够 从工作点进行采样返回<sup>[15]</sup>,这对巡视器的自主导航 系统,尤其是其全局定位能力提出了更高的要求。 与现有的局部定位技术不同,巡视器必须能够在来 回途中减少与着陆器相对位置的定位累积误差,根 据全局地图及定位制定返回着陆器的路线,实现自 主回航<sup>[16]</sup>。

综上所述,实时定位与环境建模、全局定位信息获取和地形自适应路径规划决策,是星球巡视器 在弱通信条件下完成长距离、高效率探测作业和取 样返回任务的必备关键技术。融合上述3项功能的 自主导航系统是保障巡视器移动过程的行驶安全、 扩展其巡视探测范围、增强其对未知环境适应性、 确保采样回归任务成功的前提,对我国深空探测任 务目标的实现具有极其重要的意义。

1 星球巡视器自主导航技术概述

无人驾驶系统的一般功能结构流程如图 3 所示。





总体来说,为实现一个无人系统的自主驾驶功能,需要对实时定位及地图建模(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)、全局定位、路径规 划和轨迹追踪控制各子系统进行算法设计,统称为 导航控制技术(Guidance, Navigation, and Control Techniques, GN&C)。其中,轨迹追踪控制方案与 巡视器运动机构设计方式高度相关,具有极大的系 统特异性且技术相对成熟<sup>[10]</sup>。

实时定位及地图建模模块在不依赖于外界标 定参考物的情况下,使用巡视器自身的传感器系 统,通过运动过程前后时刻的感知差异推测相对运 动关系,从而实现对航迹和地图的构建,提供实时 的巡视器定位信息。

全局定位校正间断性地引入绝对空间中的外 界参考,与实时构建的地图信息进行配准对标,消 除长距离的工作中不可避免的定位漂移,校正航迹 误差,实现对巡视器在绝对空间的定位。

路径规划技术则根据环境感知及定位信息,在 综合考虑路径的可通过性、避障要求以及路径长度 要求下,制定相关策略计算巡视器的前进路线,保 障其行驶安全。由于外星球地形地貌复杂且不可 预知,巡视器的路径规划算法需要对复杂地形具有 自适应性,并能够满足相对于巡视器的行驶速度来 讲的实时计算要求。

值得说明的是,并非所有成熟的地面传感定位 技术都能用于星球巡视器自主导航<sup>[9]</sup>。举例来说, 多数星球不具有地球一样特殊的大气环境,磁场强 度也不稳定,因此,基于空气介质的测量技术(如超 声波传感器等)和利用磁场的测量仪器均无法应用 于月球等星球环境;此外,在外星球上无法在预先 安装基站时对基站精确定位和定向,所以基于定向 测距原理(如激光测距等)的定位方法实用性较差; 由于距离遥远,地球GPS定位系统也无法为星球探 测车提供导航服务。迄今为止,在文献中记载可用 于星球巡视器的车载传感器种类及功能分类如图 4所示<sup>[17-20]</sup>,通过使用不同的传感器组合可以进行位 置及姿态的估测,实现实时航迹推算及地图建模的 功能。

2 国内外巡视器导航技术工程应用 现状

在星球巡视器技术研发应用中,美国无疑处在



图4 星球巡视器定位及地图建模传感器



遥遥领先的位置。从1971年到2012年,美国已经 向火星成功发射多台着陆器和4台巡视器,其着陆 点分布如图5所示,4台巡视器的外观对比如图 6所示。



图 5 美国火星着陆器及巡视器全球位置示意图<sup>[21]</sup>

Fig.5 Schematic diagram of the global location of the US Mars lander and patrol<sup>[21]</sup>



图 6 美国发射的火星巡视器 Fig.6 Mars patrol launched by the United States

1997年着陆的旅行者号(Sojourner)作为第一辆成功在火星行走的巡视器,活动在着陆器的 10 m×10 m的范围内。旅行者号依赖于探路者号 着陆器和地面指挥中心进行星际导航。利用其搭 载的导航相机及着陆器相机,指挥中心人工计算出 一条能够避障避险的安全轨迹,每次规划1~2 m的 前进距离回传给旅行者号。旅行者号则根据规划 轨迹进行运动,到达局域目标点后停止行动并使用 轮式里程计和陀螺仪进行航迹推算及自定位<sup>[22]</sup>。 其航迹测算误差约为行进距离的10%。

相对于行动效率低下、自主能力差的旅行者号, 2004年着陆的勇气号和机遇号在自主导航技术上有 了划时代的进步。它们利用惯性单元和轮式里程计 估算位姿,同时加入太阳定位技术提高姿态估计准 确度。更为重要的是引入了多对立体视觉里程计, 通过前后帧图像中的特征点(石块顶端)检测与其分 布模式匹配,利用光束平差法(Visual Odometry-Bundle Adjustment, VO-BA)计算两个邻摄像点的 位姿关系,大大减少了崎岖路段轮式里程计由于滑 移产生的定位误差[23](如图7所示,横坐标为行进距 离,纵坐标为定位误差,橙色部分表示光束平差法所 引进的误差,紫色部分表示非光束平差法所引进的 误差)。同时立体视觉能够自动检测定位危险区域 特征,生成三维地形图,通过石块或者台阶的高度及 密度、地形的倾斜度及平整度标记可通过区与危险 区,在所有可行弧线路径中选择最短最安全的路径 进行自主避障(如图8所示,绿色部分表示可通过 区,红色部分表示危险区)<sup>[24]</sup>。在勇气号和机遇号的 行动过程中,全自主导航已经被应用于部分路段(如 图 9 所示,绿色线段表示全自动导航的路段),这表 明其定位精度和避障可靠性大大增强,使得它们在 火星上的行走里程达到了约8km与20km,并能在 地形复杂崎岖的山区环境行动(如图9所示,机遇号 在 Sol 304 进行的 24°爬坡运动)。然而由于参数设 定不合理或阴影处理不当,机遇号在Sol137、141和 235分别出现了几次定位错误[25],且在图像特征不丰 富地区,仍然需要大量依赖人工导航。

2012年着陆的好奇者号采用了核动力技术,其 自动导航系统原理基本与勇气号与机遇号一致,利 用了立体导航相机与立体避障相机的组合进行自 定位与避障,达到了相对快的行驶速度(人工导航 模式下140m/h、自主避障模式下45m/h、全自主导



图7 勇气号和机遇号视觉里程计与轮式里程计精度对比<sup>[23]</sup>

Fig.7 Accuracy comparison between the visual odometer and the wheel odometer for the Courage and Opportunity<sup>[25]</sup>





Fig.8 Schematic diagram of autonomous obstacle avoidance strategy and path planning for the Courage and Opportunity<sup>[24]</sup>

航模式下 20 m/h),但仍不能全程脱离人工导航进 行自主行动<sup>[26]</sup>。为了更好地用于地形三维建模及 导航,好奇号装载了彩色全景摄像机以获得图像等 信息,喷气推进实验室(JPL)地面中心的科学家可 以通过这些信息发掘科学探测目标,完成好奇号的 火星探索任务。美国"火星 2020"计划中,NASA设 计的新一代火星车,在好奇号的硬件基础上,加装 了测地雷达、X射线光谱仪、紫外线激光器等传感 器,新一代火星车的视觉系统载有多达 23 个相机, 在全自主导航模式下,预计行驶速度可达 42 m/h, 40 d即可赶超机遇号 14 a 的行驶记录。由此看来, 利用多类传感器信息融合,实现星球巡视器的环境 感知和自主导航,从而提高系统可靠性是巡视器自





主作业能力提升的关键和发展方向。

2013年着陆的中国玉兔号月球巡视器采用了 地面遥操作的方式进行导航定位、月面地形重构和 行驶路径规划。玉兔号配备的相机可供地面指挥 中心进行视觉定位并进行月面三维地形建模,并基 于此信息进行人工轨迹规划,完成导航避障策略。 其总行进距离小于20m<sup>[1]</sup>,导航定位技术水平基本 与旅行者号一致。2019年着陆的嫦娥四号所携带 的巡视器在其自主巡视技术和能力上与一代玉兔 相似,采用的仍是短距及人工参与的巡航技术。

近10年实现星球巡视车在外星环境成功工程 应用的国家只有美国和中国。在实时定位及地图 建模方面,美国研发了基于立体视觉的航迹推算和 地图信息获取技术,在路径规划方面实现了基于地 形信息的避障避险算法,两者综合的全自主导航技 术在部分火星区域成功应用。但因缺少全局定位 算法只能小范围使用且不能完成采样取回任务,而 已有算法也存在着可靠性不足、受环境参数影响 大、效率低的问题,因此,只能部分地替代人工导航 技术,自主性和地形适应性不足成为制约巡视器的 行走速度与探测距离的瓶颈。而中国的自主导航 技术与美国还存在着十几年的差距,其应用现状不 能满足国家提出的深空探测战略发展需求。

3 国内外巡视器导航技术研究现状

针对应用现状的不足,各国研究者们在近年来 将新技术新算法引入星球巡视器自主导航技术的 研发。在下面的内容中,将按照图3中的技术构架 对近年星球巡视器自主导航技术研究作逐一梳理。

#### 3.1 实时定位与地图建模

实时定位与地图建模技术要求系统根据多种 车载传感器(如图4所示)的测量对巡视器的位姿进 行测算并实时更新地图信息。这一方向在实际星 球巡视中的技术应用最为成熟。国内外相对于实 际工程技术有特异性的研究成果代表,按照传感器 技术使用发展脉络的总结见表1。

轮式里程计精度受运动滑移影响较大,以及惯 性单元存在大的零点漂移误差不能单独用于长时 定位,因此,需要配合其他测量手段进行可靠定位。 代表性的方法如文献[20]中给出的将惯导与星敏 深度融合算法,将误差测量漂移控制在20m以内。

视觉里程计已经被证明能够提供更加准确的 相对位姿估算,同时也能提供稀疏的地图信息<sup>[17]</sup>。 但相对来说其匹配算法存在鲁棒性不强的难 题<sup>[27-28]</sup>。文献[29-30]分别从特征点权值调整和利 用结构特征对象出发减小远像点误差及摄角误差, 但还未见能够减小多变光源和环境对视觉传感精 度影响的通用技术。

激光三维扫描特点是可以快速获取大量高精 度地形测量点,被引入到巡视器的地图建模及匹配 融合中。文献[18]提出了加入曲率和法向量构成 的7维迭代临近点(Iterative Closest Point, ICP)匹 配算法,能够解决部分重合数据匹配问题。文献 [19]利用尖点特征检测加特征稀疏及稠密 DARC-ES 法<sup>[31]</sup>(Data Aligned Rigidity-Constrained Exhaustive Search)双重匹配的方法,得到很高的里程计和 地图精度(见表1),但其结果都依赖于特定地形特 征且计算量大。

				-	-			
文献	机构	使用传 感器	应用对象	定位方法	里程计方法	地图建模	实验准确度	技术成熟度
[17]	欧州宇 航局	视觉+ 轮式+ IMU	ExoMars	图像特征匹配 (Harris,SURF,SIFT)	图像特征匹配	稀疏地图	_	进行了有限 的实验
[28]	美国俄 亥俄州 立大学	视觉		石头特征提取+ 分布模式匹配	BA法		里程的1%	进行大量地 面实验场验 证实验
[18]	加拿大 航天局	LiDAR	_	7D ICP匹配		稠密地图	对少量重合数据匹配效果好	在地面实验 场验证
[19]	多伦多 大学(加 拿大)	倾角 仪+Li- DAR	UTIAS	尖点特征检验+特征分布模 式匹配+DARCES稠密匹配	BA法	稠密地图	平均位置误差0.35m,平均 角度误差2.11°,平均地图误 差0.04m	进行大量地 面实验场验 证实验
[20]	北京航 空航天 大学	惯导+ 星敏	_	深度融合策略使得星敏测量 与惯性单元			控制位置零漂在20m以内	仿真验证
[29]	中科院 等	视觉		特征点权值匹配(SIFT)			定位相对精度4.28%	利用嫦娥三 号数据进行 验证
[30]	重庆大 学	视觉	_	结构特征对象匹配		_	对差异图片匹配效果好	未进行星球 车相关实验

表1 巡视器 SLAM 算法相关代表文献

Tab.1 Patrol SLAM algorithm related representative literatures

总的来说,经过大量实验验证,国外的SLAM 技术相关研究趋势为应用多传感器融合技术提高 定位和地图建模的精度和可靠性,其技术相对成 熟,但因各类传感器在不同工作条件下精度差异较 大,算法通常对适用的环境有要求,还未能解决在 多种非结构化复杂环境下的多传感精确融合问题。 而国内的研究仍大量局限于视觉领域,且更多局限 于定位技术的讨论,还不能证明其在长程连续运动 过程中能够形成准确的航迹及地图信息。然而,大 量的视觉里程计相关研究表明其在未来的局部定 位系统中将发挥越来越重要的作用。文献[45]表 明,在美国的下一代ExoMars火星车系统中,视觉 里程计导航将取代轮式里程计成为主要定位技术 手段。

## 3.2 全局定位

全局定位需要依靠外界参照物信息与巡视器 本体测量进行匹配,从而在全局坐标系定位当前位 置,校正航迹。

由于巡视器全局定位能够控制长距离航迹推 算漂移误差,作为返回式作业的使能技术在近年来 得到了学界的关注。巡视器全局定位算法相关代 表文献见表2。

文献[32]提出的天际线匹配方法 VIPER(Virtual

Intelligent Planetary Exploration Rover)是早期在实验中得到验证的星球车全局定位方案。其原理为将视觉图像的天际线特征与在全局地形DEM(Digital Elevation Map)提取的天际线形状进行贝叶斯最大似然估计匹配,确定全局地图与巡视器相对位姿关系。虽然其使用的原始数据分辨率较差,导致原文中定位误差相对较大,但因其经过大量地面实验验证,在许多后继文献中被用来作为对标标准。

另外,一种经过大量实验验证的方法则是利用 LiDAR(Light Detection and Ranging)扫描生成局域 地图地形特征,并利用地形特征进行匹配,相关工 作见文献[10,16]。不同的是,文献[10]的匹配特 征为自动检测的地形尖点,而文献[16]的特征为手 动选取,两者都经过了大量的户外移动平台动态实 验,并取得了可以相比拟的全局定位精度。两者都 与VIPER方法进行了对比,得出了相同的结论,即 在不同的地形条件下基于LiDAR地形和天际线匹 配的方法各有优势。然而,由于局域地形探测的视 觉和激光传感器在遇到近距离障碍物时会出现严 重遮挡,故而在某些遮挡严重的地形,如峡谷地形 工作时匹配效果不佳。同时,如果地形缺乏相应特 征,也会影响匹配的鲁棒性和准确度。

在全局匹配方面还有一些值得关注的前瞻性 和研究性工作。如文献[33]利用了视觉特征点,通

文献	机构	使用传感器	全局数据源	特征检测	特征匹配	实验准确度	技术成熟度
[32]	巴西圣保罗 大学			天际线形状	贝叶斯最大似然估计	最大误差约200~ 400 m	进行了大量 户外地形实验 验证
[10]	美国俄亥俄 州立大学	LiDAR+视觉+倾角 仪/太阳敏感器	GeoBase	尖点特征	基于形状膨胀的多点 匹配	最大误差 <50 m	进行了大量 户外地形实验 验证
[16]	加拿大多伦 多大学	LiDAR+视觉+倾角 仪/太阳敏感器	着陆器降落过 程摄像	手动选取	最小平方差法	最大误差 <70 m	进行了大量 户外地形实验 验证
[33]	法国图卢兹 大学	视觉	LiDAR高程图	稠密点匹配	离散粒子滤波	最大误差2m (地图分辨率1m)	进行少量实验 验证
[13,34]	中国遥感科 学重点实验 室	视觉高程图	Hirise	石块特征或 SIFT图像特 征	最小平方差法	亚相素级	利用火星数据 库进行验证
[46]	丹麦奥尔堡         视觉           大学         视觉		Hirise	灰度、能量图、 纹理特征向量	DARCES 穷举搜索算 法进行星座模式匹配	最大误差49.5m, <2%路程	进行地球地形 模拟验证
[35]	哈尔滨工业 大学	巡视器视觉	着陆器视觉	高点	预筛+RANSAC	误差小于2m	地面模拟月球 场地

表2 巡视器全局定位算法相关代表文献

Tab.2 Patrol global positioning algorithm related representative literatures

过粒子滤波优化算法与LiDAR地图进行稠密点匹配,达到了像素级匹配精度。文献[13,34]利用立体视觉与HiRISE(High Resolution Imaging Science Experiment)系统地图进行物理特征或图像特征匹配,在现有的火星数据库数据进行验证时得到了亚相素级的精度。文献[48]利用立体视觉与HiRISE系统地图进行基于灰度、纹理等多特征向量的兴趣区提取,并利用DARCES穷举搜索算法进行兴趣区星座分布的模式匹配进行定位,其在类火星地面实验图像上取得了3km距离最大定位误差小于50m的定位精度。文献[35]利用两组立体视觉进行最高值点匹配,在试验场地静态图形测量定位精度达到2m。这些文献提出的方法因还未在移动平台及多类地形上进行动态过程实验验证,其可靠性、准确性和对抗环境干扰的鲁棒性还有待进一步检验。

#### 3.3 路径规划

路径规划的主要任务是根据任务规划,依赖当 前定位及地图信息对巡视器在地形上行驶的安全 性进行评估,并通过优化方法得到满足避障、防倾 倒、路径短的能够到达目标位置的安全行驶路线。 因此,路径规划技术的核心要素有两个:一为如何 设计行驶安全性的评估函数从而得到可通过性评 价地图;二为如何根据可通过性评估结果进行路径 规划和优化。

在可通过性研究方面,因为星球表面为环境复 杂的非结构化地形,用于传统室内避障的二维地图 不足以支持可通过性分析要求,因此常使用规则或 不规则网格的高程地形图。在早期的研究中,对可 通过性的评价基本基于对地形本身危险要素在待 选路径上的分布评价<sup>[37-38]</sup>,而后期逐渐引入了车体 与地形交互的姿态分析<sup>[14,12,40]</sup>,从而使行驶安全性 的评估更加准确,然而由于其栅格密度大,计算效 率低。为此,文献[39]提出用规则网格构建可通过 性数据图,用地形云点数据计算车位姿数据从而量 化可通过性的方法。其优势在于兼顾了规则栅格 数据处理量小而云点数据信息量大的特点。可惜 的是此种可通过性分析方法未能用于路径规划,因 而没有实验验证其实用性及可行性。

在路径规划算法方面,用做巡视器路径规划的 数学方法与一般的路径规划几乎相同,可通过性作 为一项权值加入路径优化计算中,从而得到行驶安 全性与路径效率兼顾的优化结果。如表3所示,文 献[37-38]通过用于火星车的Morphin算法(也称作 GESTALT系统<sup>[41]</sup>)在备选曲线中做出选择,路径 规划常见的各类图形搜索算法<sup>[12,14,37,4243]</sup>也被用于巡 视器路径规划中。

Tab.3         Patrol path planning algorithm related representative literatures							
文献	机构	地图种类	路径选取方式 可通过性评价		是否考虑车 运动学	路径规划算法	
[37]	法国LAAS/CNRS实验室	规则网格 DEM	弧线簇	危险地形检测	否	A*搜索	
[38]	美国喷气动力实验室	规则网格 DEM	弧线簇	危险地形检测	否	GESTALT	
[39]	澳大利亚悉尼大学	云点或者拟合地图	规则网格 DEM	车姿态及运动机构位形	车姿态估算		
[12, 14]	加拿大麦吉尔大学	不规则网格 DEM	不规则网格DEM	地形倾斜度与车姿态估算	粗略计算	Dijkstra's图形搜索	
[42]	澳大利亚野外机器人研究中心	不规则网格 DEM	不规则网格DEM	地形倾斜度和粗糙度	否	A*图形搜索	
[43]	上海宇航系统工程研究所	规则网格 DEM	弧线簇	危险地形检测	否	A*图形搜索	

#### 表3 巡视器路径规划算法相关代表文献

# 4 结束语

由以上国内外研究现状分析可知,巡视器的自 主导航系统应用水平远远跟不上深空探测工程发 展的需求<sup>[47]</sup>。同时虽然各国学者在巡视器自主导 航系统关键技术的各方面都进行了长期的研究,但 总的来说还不够全面和成熟<sup>[44]</sup>,我国的相关研究尤 为落后。总结来说,对以下几个方面关键技术进行 研究突破的需求十分迫切:

1)具有环境和工况自适应性的多传感器融合 定位。多种传感器的联合使用能够使定位的准确 度得以提高,然而现有的算法对融合定位策略应用 的环境条件依赖性强,不能在多种工作情况下保证 融合定位精度。研发一种能够适应各种典型外星 地形环境的传感器融合策略,能够使巡视器在变化 的工况下进行准确自定位,从而保障其在多种复杂 环境的自主安全作业。

2)基于非完备局域地图的可适应多地形环境的全局定位。由于巡视器的局域地图不可避免的非完备性和典型地貌特征差异性,基于全局地图进行特征匹配的全局定位算法在各地形条件下的性能差异巨大,从而有可能带来大的全局定位偏差。因此,对现有的特征匹配算法进行改进,从而使其能够在信息部分缺失情况下适应各种典型外星地形环境,是保障其远距离作业及采样取回任务成功的关键。

3)实时安全的路径规划算法。路径规划的安 全性评估包含了避障可靠性及行驶稳定性,因此, 必须考虑车体与多变地形的交互位姿关系并量化 其可通过性。然而,现有的考虑交互关系的评价方 法计算复杂且不能满足路径规划的实时性要求,因 此,需要加以改进以解决路径规划计算实时性与可

#### 靠性之间的矛盾。

针对现有星球巡视器面临的诸多挑战,开展巡视器多传感器融合定位、可适应多地形环境的全局 定位、实时安全的路径规划算法等领域的创新研究,提升巡视器的智能化、自主化程度,可为我国未 来的星球巡视器深空探测提供有价值的参考方案 和开放的学术思路。

### 参考文献

- [1]肖龙,凌宗成,张昊,等.月球科学的新认识:嫦娥三号 月球车探测成果[J].中国科学基金,2016(3):213-216.
- [2]于登云,孙泽洲,孟林智,等.火星探测发展历程与未来 展望[J].深空探测学报,2016,3(2):108-113.
- [3] 王帅,卢波.世界深空探测发展态势及展望[J].国际太空,2015,441:43-49.
- [4] MOORE C. Advanced exploration systems [R]. Presentation to the NASA Advisory Council, 2012.
- [5] WEISBIN C R, SMITH J H, VAN HOUTEN T, et al. Technical feasibility and relative productivity of alternate NASA robotic missions to a lunar dark crater [J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(1):120-128.
- [6]付毅飞.我国"十三五"将启动探月工程四期:未来15 年探测火星、小行星和木星[EB/OL].(2016-12-28)
   [2019-10-07]. http://www.spaceflightfans. cn/7718. html.
- [7]付毅飞.深空探测:2020年开启火星之旅[EB/OL].
   (2007-03-08) [2019-10-07]. http://www.xinhuanet.
   com/tech/2017-03/08/c\_1120588201.htm.
- [8] 熊蓉,傅博,王越,等.星面探测机器人自主移动技术 [J].上海航天,2019,36(5):11-20.
- [9] 岳海媛,解玉文,丁希仑,等.星球探测机器人导航定位 技术研究进展[J].机器人技术与应用,2008(3):20-25.
- [10] CARLE P J F, FURGALE P T, BARFOOT T D. Long-range rover localization by matching LIDAR

scans to orbital elevation maps [J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(3):344-370.

- [11] PYRZAK G, MCCURDY M, RABE K J, et al. Targeting and localization for mars rover operations
  [C]// 2006 IEEE International Conference on Information Reuse & Integration. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006:23-27.
- [12] YENILMEZ L, TEMELTAS H. Autonomous navigation for planetary exploration by a mobile robot [C]// International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2003:397-402.
- [13] DI K, LIU Z, YUE Z. Mars rover localization based on feature matching between ground and orbital imagery
  [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2011, 77(8):781-791.
- [14] REKLEITIS I, BEDWANI J L, DUPUIS E, et al. Path planning for planetary exploration [C]// 2008 Canadian Conference on Computer and Robot Vision. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008:61-68.
- [15] SCHENKER P S, HUNTSBERGER T L, PIRJANIAN P, et al. Planetary rover developments supporting mars exploration, sample return and future human-robotic colonization [J]. Autonomous Robots, 2003, 14(2/3):103-126.
- [16] BARFOOT T, FURGALE P, STENNING B, et al. Field testing of a rover guidance, navigation, and control architecture to support a ground-ice prospecting mission to Mars [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(6):472-488.
- [17] KOSTAVELIS I, BOUKAS E, NALPANTIDIS L, et al. SPARTAN system: towards a low-cost and highperformance vision architecture for space exploratory rovers [C]// 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011:1994-2001.
- [18] GEMME S, BAKAMBU J N, REKLEITIS I. 3D reconstruction of environments for planetary exploration
  [C]// The 2nd Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV' 05). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005:594-601.
- [19] TONG C H, BARFOOT T D, ÉDUPUIS. Threedimensional SLAM for mapping planetary work site environments [J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29 (3):381-412.
- [20] HE Z, WANG X, FANG J. An innovative high-

precision SINS/CNS deep integrated navigation scheme for the Mars rover [J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 39:559-566.

- [21] Wikipedia. Features and artificial objects on Mars [EB/ OL]. (2015-11-22) [2019-10-07]. https://infogalactic. com/info/List\_of\_artificial\_objects\_on\_Mars.
- [22] TOMPKINS P. Mission-directed path planning for planetary rover exploration [M]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2005:1-192.
- [23] DI K, WANG J, HE S, et al. Towards autonomous mars rover localization: operations in 2003 MER mission and new developments for future missions [J]. Int Arch Photogramm Remote Sens, 2008, 37: 957-962.
- [24] KAESS M. Simultaneous localization and mapping with infinite planes [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015:4605-4611.
- [25] CHENG Y, MAIMONE M, MATTHIES L. Visual odometry on the Mars exploration rovers [C]// 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005:903-910.
- [26] GONZALEZ R, APOSTOLOPOULOS D, IAGNEMMA K. Slippage and immobilization detection for planetary exploration rovers via machine learning and proprioceptive sensing [J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(2):231-247.
- [27] 王晓岩,刘建军,张吴明,等.行星无人探测车地形重构 技术综述[J].天文研究与技术,2016,13(4):464-472.
- [28] LI R, DI K, HOWARD A B, et al. Rock modeling and matching for autonomous long - range Mars rover localization [J]. Journal of Field Robotics, 2007, 24 (3):187-203.
- [29] 马友青,刘少创,贾阳,等.基于立体图像的月球车导航 定位试验研究[J].中国科学:技术科学,2014,44(10): 1097-1104.
- [30] 李晶.月面探测中视觉定位技术研究[D].重庆:重庆 大学,2015.
- [31] CHEN C S, HUNG Y P, CHENG J B. RANSACbased DARCES: a new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images [J].
  IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(11):1229-1234.
- [32] COZMAN F, KROTKOV E, GUESTRIN C. Outdoor visual position estimation for planetary rovers

[J]. Autonomous Robots, 2000, 9(2):135-150.

- [33] PHAM B V, MALIGO A, LACROIX S. Absolute map-based localization for a planetary rover [EB/OL].
  (2014-07-08) [2019-10-07]. https://hal. archivesouvertes.fr/hal-01020989/document.
- [34] DI K, YUE Z, LIU Z, et al. Automated rock detection and shape analysis from Mars rover imagery and 3D point cloud data [J]. Journal of Earth Science, 2013, 24 (1):125-135.
- [35] 温博.月球车视觉导航方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨 工业大学,2007.
- [36] LI R, DI K, HWANGBO J, et al. Integration of orbital and ground images for enhanced topographic mapping in Mars landed missions [EB/OL]. (2009-03-09) [2019-10-07]. https://www.asprs.org/a/ publications/proceedings/baltimore09/0040.pdf.
- [37] LACROIX S, MALLET A, BONNAFOUS D, et al. Autonomous rover navigation on unknown terrains: functions and integration [J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(10/11):917-942.
- [38] GOLDBERG S B, MAIMONE M W, MATTHIES L. Stereo vision and rover navigation software for planetary exploration [C]// IEEE Aerospace Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2002:5.
- [39] HO K, PEYNOT T, SUKKARIEH S. Analysis of terrain geometry representations for traversability of a Mars rover [C]// The 11th Australian Space Science Conference. Canberra, Australia: National Space Society of Australia Ltd, 2012:359-372.
- [40] SIMMONS R, HENRIKSEN L, CHRISMAN L, et al. Obstacle avoidance and safeguarding for a lunar rover [C]//AIAA Forum on Advanced Developments

in Space Robotics. Reston, USA: AIAA, 1996:1-9.

- [41] PEYNOT T, LACROIX S. Selection and monitoring of navigation modes for an autonomous rover [C]// 10th International Symposium on Experimental Robotics. Berlin: Springer, 2008:121-130.
- [42] POTIRIS S, TOMPKINS A, GOKTOGAN A. Terrain-based path planning and following for an experimental mars rover [C]// Australasian Conference on Robotics and Automation. Melbourne, Australia: ARAA, 2014:1-10.
- [43] 魏祥泉,黄建明,顾冬晴,等.火星车自主导航与路径规 划技术研究[J].深空探测学报,2016,3(3):275-281.
- [44] BOUKAS E, GASTERATOS A, VISENTIN G. Localization of planetary exploration rovers with orbital imaging: a survey of approaches [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation Workshop: on Modelling, Estimation, Perception and Control of All Terrain Mobile Robots. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014:589-602.
- [45] BAGLIONI P, JOUDRIER L. Exomars rover mission overview [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation Workshop: on Planetary Rovers. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 1026-1037.
- [46] BOUKAS E, GASTERATOS A, VISENTIN G. Introducing a globally consistent orbital - based localization system [J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(2):275-298.
- [47] 宝音贺西,马鹏斌.火星探测器自主导航方法综述[J]. 飞控与探测,2018,1(1):34-40.
- [48] GU Y, OHI N, LASSAK K, et al. Cataglyphis: an autonomous sample return rover [J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(2):248-274.