在轨对星球表面遥操作技术现状与展望

张立宪^{1*}, 肖广洲¹, 王东哲¹, 李云鹏¹, 韩岳江¹, 刘冬雨², 王为²

1. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094

* E-mail: lixianzhang@hit.edu.cn

收稿日期: 2020-03-22; 接受日期: 2020-04-20; 网络版发表日期: 2020-05-27

摘要 在轨对星球表面遥操作技术面向未来星球表面样本收集与分析、设备运输与部署、基础设施建设与维护等日益增长的复杂任务需求, 通过星球轨道载人航天器内的航天员在轨遥操作星球表面的机器人执行作业任务, 是推动未来载人登月、月球基地建设和载人火星探测等任务实质进展的关键支撑. 本文综述了NASA, ROSCOSMOS, ESA等航天机构围绕在轨对星球表面遥操作开展的Surface Telerobotics, KONTUR, METERON等工程专项和系列在轨技术试验, 分析了在轨对星球表面遥操作中的人机交互界面设计、人机工效设计、力反馈和空间通信等关键技术, 并结合中国未来深空探测发展趋势和任务需求, 提出了利用即将建成的中国空间站开展航天员在轨对地遥操作挖掘安置试验、遥操作建筑3D打印试验等技术试验设想, 为中国未来月球基地建设等重大深空任务中在轨对星球表面遥操作技术的研究和试验验证提供参考.

关键词 深空探测, 星球基地建设, 在轨遥操作, 人机交互, 人机工效

1 引言

随着航天相关技术的日益进步和完善, 人类的航天活动日益频繁并逐渐向更具挑战的地外星球探索方向发展. 月球和火星是目前最具吸引力的探测对象. 美国、中国、俄罗斯、欧洲航天局等全球航天活动的主导国家和组织相继公布的深空探测计划均将载人登月、月球基地建设和火星探测作为重要战略目标. 这要求部署在目标星球上的作业机器人执行巡视、勘探、样本收集和分析、设备运输与部署、基础设施建设与维护等日益增长的复杂作业任务.

近年来, 智能机器人相关技术快速发展, 然而受限

于星球表面未知的非结构化环境, 星球表面作业机器人在今后相当长时间内仍难以实现全自主作业, 且全自主机器人软硬件系统的可靠性和应对突发状况的可控性远不能满足航天任务要求^[1]. 因此, 目前已实施的所有星球表面无人探测器(美国的勇气号、机遇号和好奇号火星车, 中国的玉兔号月球车等)任务作业依然采用地球控制中心遥操作控制模式.

地球控制中心遥操作控制模式由地面操作者根据星球表面作业机器人(具有局部自主能力)的状态反馈对其进行遥操作控制, 可以实现在星球表面缓慢移动、拍照、监测温度、分析星球表面特征等简单作业任务. 但受限于地球与目标星球之间遥远距离造成的

引用格式: 张立宪, 肖广洲, 王东哲, 等. 在轨对星球表面遥操作技术现状与展望. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 716–728

Zhang L X, Xiao G Z, Wang D Z, et al. Review and prospects of orbit-to-surface teleoperation (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 716–728, doi: 10.1360/SST-2020-0120

较大通信时延、信道抖动和丢失、远程作业环境可视化受限等问题,该模式下机器人的决策与控制过程极其缓慢和低效,无法应对未来火星探测和星球基地建设等工程中高自由度、强交互性、需要手眼协调的星球表面低延迟响应操作任务需求^[1,2]。

在轨对星球表面遥操作,如图1所示,是指航天员在星球轨道载人航天器内,通过视觉呈现和力觉反馈等设备来感知星球机器人作业状态,并控制其执行作业任务。这与地球控制中心遥操作控制模式相比,大大缩短了通信距离,保障了足够低的通信时延,提高了操作效率,使星球表面机器人在有限的寿命周期内完成更多的科学任务,同时避免了非必需的航天员着陆星球表面、暴露于星球表面危险环境、发射返回星球轨道的风险和巨额成本,减少了资源的损耗,对推动载人登月、月球基地建设和载人火星探测等深空战略任务实质进展具有重要意义^[2,3]。

2 必要性分析

在轨对星球表面遥操作,相比于星球表面机器人全自主作业,加入了人的认知、灵活性和适应性等重要能力^[4]。人的认知能力可以快速识别和应对突发状况;人的灵活性能保证对环境中的复杂元素进行安全操作;人的适应性能对不完全预知甚至完全未知的事物、问题和风险做出快速反应。这些能力的补充将大大提高操作过程可控性、可靠性和作业效率。如

图 1 (网络版彩图)在轨对星球表面遥操作(来源: NASA)
Figure 1 (Color online) Orbit-to-surface teleoperation (credit: NASA).

美国火星探测任务首席研究员Steve Squyres所言“勇气号和机遇号在火星上五年半的时间里完成了什么,你和我可以在一周内完成”。

在轨对星球表面遥操作,相比于从地球控制中心对星球表面遥操作,补充了极其关键的低延迟响应能力,显著提高了作业效率和任务成功率^[5];低延迟决策控制能够促进星球机器人在有限的寿命周期内开展更多的作业任务,获得更多科学回报;低延迟监督能够保障航天员快速发现并纠正机器人的操作错误,及时对那些可能导致机器人受损或任务失败的问题进行补救;星球基地建设等任务中普遍存在高自由度、强交互性、需要手眼协调等要求对传感信息进行低延迟响应的星球表面作业需求,而低延迟遥操作是这类作业任务顺利开展的最有效途径^[2,6]。

在轨对星球表面遥操作,相比于航天员直接着陆星球表面操作,大大降低了航天任务的风险和成本:避免了星球表面的尘土等物质进入舱外航天服甚至航天员居住舱而引起物理甚至生物污染的风险;避免了非必须的航天员着陆星球表面、暴露于星球表面恶劣环境、发射和返回星球轨道的风险和巨额成本,大大减少资源损耗;解决了穿着厚重舱外航天服进行操作的低效问题,大大提高了作业效率^[7]。

在轨对星球表面遥操作具有不可替代性,未来日益增长的复杂深空任务需要将地球控制中心遥操作模式与在轨对星球表面遥操作模式有机结合,缺一不可。半自主机器人在星球表面执行具体操作任务,航天员在轨动态监督和低延迟遥操作,地面控制中心专家团队规划顶层任务,三者协同配合,最优化作业过程,最小化任务成本。同时,随着载人深空探索任务逐渐向太空更深处发展,航天员与星球机器人间的联系更加密切,在轨对星球表面遥操作相关关键技术的成熟度将成为制约星球探索任务的关键^[8]。

3 研究进展

美国航空航天局(NASA)、俄罗斯国家航天集团(ROSCOSMOS)、欧洲航天局(ESA)和德国航空航天中心(DLR)围绕在轨对星球表面遥操作先后立项开展了3个工程专项,持续投入了大量资源和人力,积累了大量技术成果和试验经验。2012年, NASA率先独立开展了Surface Telerobotics工程专项,并于2013年进行了

3次在轨试验测试; 之后, ROSCOSMOS联合DLR开展了KONTUR工程专项, 并于2015年进行了两组在轨试验测试; 随后, ESA牵头主导, 联合NASA, DLR, ROSCOSMOS开展了METERON工程专项, 并密集开展了8项在轨试验。

3.1 Surface Telerobotics工程专项

NASA针对如何提高航天员在轨遥操作星球表面机器人作业的效率做了大量技术预研, 并开展了Surface Telerobotics工程专项, 以模拟月球轨道载人航天器内的航天员遥操作月球漫游车在月面部署射电望远镜的作业场景(如图2所示)。项目主要研究在受到通信时延、微重力、狭小空间、时间和注意力受限等外部因素影响下航天员如何高效遥操作星球机器人作业。项目分为4个实施阶段: 任务前规划、勘探作业现场、部署射电望远镜和检查部署状况^[9]。

任务前规划: 2013年春, 试验团队选择加利福尼亚艾姆斯研究中心的模拟月球地形试验基地作为测试场地, 并根据该场地的卫星遥感图像(其分辨率与当前月球轨道航天器对月面遥感观测图像的分辨率相当)考察确定射电望远镜部署范围, 设计月球车任务序列, 并制作航天员操作负荷问卷表以量化操作感受。后期空间站内的航天员将使用笔记本电脑, 结合任务级监督控制和动作级操作控制模式, 通过低延迟通信链路遥操作基地内的漫游车作业。

勘探作业现场: 2013年6月17日, 航天员在国际空间站内遥操作K10漫游车巡视和勘探作业现场周围环境, 如图3所示。航天员通过K10上搭载的相机获取现

图2 (网络版彩图)月球漫游车在月面部署射电望远镜(来源: NASA)

Figure 2 (Color online) Lunar rover deploys a radio telescope on the lunar surface (credit: NASA).

图3 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面K10漫游车勘探现场(来源: NASA)

Figure 3 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a K10 rover on the ground to survey the site (credit: NASA).

场近距离高分辨率图像以补充卫星遥感低分辨率场景数据, 研究确定适合部署射电望远镜的具体位置, 并对地表特征(障碍物、斜坡和起伏等)进行评估和三维建模, 标记后期部署中潜在的障碍。

部署射电望远镜: 2013年7月26日, 航天员在国际空间站内遥操作地面K10漫游车在预定位置部署射电望远镜天线阵列(嵌有导电天线的60 cm宽的聚酰亚胺薄膜柔性胶板), 如图4所示, 三块胶板长条按Y形展开, 模拟未来月球射电望远镜的可能配置^[10]。

检查部署状况: 2013年8月20日, 航天员在国际空间站内遥操作地面K10漫游车使用高分辨率摄像机对射电望远镜部署情况进行详细检查, 拍摄记录每一块天线胶板的高分辨率图像, 校验部署位置的准确度, 定位和分析潜在的部署缺陷(撕裂、扭结等)。

Surface Telerobotics工程项目成功实现了航天员在轨对地球表面探测车的遥操作交互控制。试验表明: 交互式监督命令序列模式是实现探测器勘探和部署等任务作业的有效方案; 机器人状态三维可视化呈现, 能使航天员保持较好的态势感知能力, 有效降低脑力负荷; 星球表面作业机器人的局部自主能力有利于保障航天员在低工作负荷下安全高效完成操作任务^[11]。

3.2 KONTUR工程专项

KONTUR工程专项由ROSCOSMOS和DLR联合开展, 由空间站内的航天员通过笔记本电脑和力反馈操纵器遥操作地面机器人执行作业任务^[12]。项目主要通过两组在轨试验来研究在轨对地遥操作过程中远程

图 4 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面K10漫游车模拟部署射电望远镜(来源: NASA)

Figure 4 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a K10 rover on the ground to deploy a simulated radio telescope (credit: NASA).

呈现和力反馈等技术的有效性, 同时探索了微重力等环境因素对遥操作过程的影响。

项目前期由DLR研制了专用于在轨遥操作的宇航级力反馈操纵器, 如图5所示, 指标为^[13]: 两个转动自由度, 转动极限为 $\pm 20^\circ$, 角度分辨率为 0.00318° , 刷新率为1 kHz, 最大作用力为15 N。

第一组试验(2015年8月)如图6所示, 由航天员通过力反馈操纵器在轨遥操作地面机械臂执行作业任务。试验设置了两个任务: 第一个是非接触式跟踪瞄准任务, 要求航天员遥操作地面机器人末端触控笔快速

图 5 (网络版彩图)DLR研制的力反馈操纵器(来源: DLR)

Figure 5 (Color online) A force feedback manipulator developed by DLR (credit: DLR).

移动到当前点亮的LED指示灯正前方(不接触面板); 第二个为接触式轮廓描写任务, 要求航天员遥操作地面机器人末端触控笔沿着指示路径滑动(轻微接触面板)。两个任务均设置接通和不接通力反馈运动阻尼两种对比模式。试验表明^[13]: 非接触式跟踪瞄准任务中, 力反馈阻尼降低了航天员平均移动速度, 但有效缩短了任务完成时间; 在接触式轮廓描写任务中, 航天员仅通过视觉反馈很难准确把握接触面大小, 借助力反馈可以减少51%的脱离接触和接触力过大问题。

第二组试验(2015年12月)如图7所示, 设置了三个操作任务^[14]: 其一, 航天员在轨遥操作地面机器人实现与地面人员握手; 其二, 航天员在轨遥操作地面机器人抓取酒杯并与地面人员碰杯; 其三, 航天员在轨操控地面机器人右臂, 俄罗斯国家机器人控制中心的研究人员操控机器人左臂, 两人协作抓取并移动桌上的弹性球。三个任务均顺利完成。

项目验证了在轨对地遥操作过程中远程呈现和力反馈等技术的可行性和有效性, 对比分析了空间微重力环境和地面环境中力反馈遥操作过程的差异, 并据此对力反馈软硬件设备进行了适配性设计优化, 为未来星球基地建设等深空任务中的在轨遥操作实际应用提供成熟可靠的软硬件和技术基础^[15,16]。

图 6 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面机器人跟踪瞄准LED灯和描写轮廓(来源: DLR)

Figure 6 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a robot on the ground to track LED light and draw silhouettes (credit: DLR).

图 7 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面机器人握手、碰杯和抓取气球(来源: DLR)

Figure 7 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a robot on the ground to shake hands, clink cups and grab balloons (credit: DLR).

3.3 METERON工程专项

METERON是由ESA发起和主导, 联合DLR, NASA, ROSCOSMOS针对航天员在轨对星球表面遥操作需求的工程专项^[17]. 项目由空间站内的航天员通过平板电脑、力反馈操纵器等人机交互设备, 遥操作地面不同作业场景中的多种机器人执行操作任务, 探索不同任务下最高效适用的系统配置, 测试和验证不同工况条件下相关技术的可行性和有效性^[18].

第一项试验(Haptics-1, 2014年7月): 如图8所示, 航

图 8 (网络版彩图)航天员在国际空间站内操作力反馈操纵器(来源: ESA)

Figure 8 (Color online) An astronaut on board the ISS operates the force feedback manipulator (credit: ESA).

航天员在国际空间站内通过平板电脑和具有主动关节阻抗控制的单自由度力反馈操纵器与地面交互. 试验收集了大量微重力环境下航天员操作的完整人因数据集, 如位置和力控制任务中肢体运动的极限范围、感受扭矩和刚度的最小刺激阈值、肢体的刚度以及其他定义人体交互感知和操作能力的参数数据, 为后期试验中人机交互设备的优化设计提供依据^[19,20].

第二项试验(Haptics-2, 2015年6月): 试验的主要目的是对国际空间站与地面机器人之间的通信链路进行通信性能测试与评估, 量化研究其通信时延、抖动和丢包率. 数据表明^[21], 该通信链路的平均往返时间延迟为850 ms, 最小延迟为800 ms, 最大延迟为956 ms, 平均丢包率为4.6%. 此外, 试验通过两个分别部署在国际空间站和地面实验室内的完全一致、互相跟随运动的力反馈操纵器, 实现了航天员与地面人员之间的力觉推拉交互式间接握手, 如图9所示.

第三项试验(Interact-1, 2015年9月): 如图10所示, 航天员在国际空间站内通过力反馈操纵器遥操作地面机器人(Interact Centaur rover)执行机械装配任务. 试验中, 航天员遥操作地面机器人规划运动路径并接近任务面板, 然后将销钉连接器对准任务面板上的装配孔, 最后将连接器准确插入装配孔内(装配间隙小于

图 9 (网络版彩图)航天员在轨与地面人员通过两个力反馈操纵器实现“握手”(来源: ESA)

Figure 9 (Color online) An astronaut in orbit shakes hands with a crew on the ground via two force feedback manipulators (credit: ESA).

图 10 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面机器人将销钉插入孔中(来源: ESA)

Figure 10 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a robot on the ground to insert the pin into the hole (credit: ESA).

0.15 mm)完成电气连接, 触发指示器点亮. 试验应用了增强感知用户界面、激光导引辅助对准、预测显示时延补偿、模型介导控制等方法来辅助航天员准确、高效遥操作, 验证了航天员从空间站遥操作地面机器人进行精密操作和装配的可行性与有效性.

第四项试验(Interact-2, 2015年9月): 如图11所示, 航天员在国际空间站内通过平板电脑和力反馈操纵器遥操作地面机器人(Eurobot模拟星球车)维修位于荷兰模拟月球基地的大型设备. 试验圆满成功, 且效果远优

图 11 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面机器人维修大型设备(来源: ESA)

Figure 11 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a robot on the ground to repair large equipment (credit: ESA).

于预期. METERON工程专项系统工程师Jessica Grenouilleau表示“这项试验表明, 我们已具备在月球轨道航天器上遥操作月球表面机器人的能力”.

第五项试验(SUPVIS Justin-1, 2017年8月): 航天员通过平板电脑遥操作具有一定局部自主能力的人形机器人拔插电源接口(用于连接太阳能电池板模块和能源收集基站), 如图12(a)所示. 试验采用了一种新颖的上下文感知任务控制方法保证航天员与半自主机器人之间的高效协作. 试验中, 航天员通过太阳能设备上的LED指示灯提供的视觉反馈信息来感知太阳能设备当前状态, 并据此做出下一步操作判断, 然后通过交互界面选择对应高级指令控制机器人执行预设的任务^[22-24]. 这次试验有效验证了航天员在轨与地面半自主机器人协同作业的可行性与有效性^[25,26].

第六项试验(SUPVIS Justin-2, 2018年3月): 航天员从国际空间站遥操作人形机器人清除太阳能面板表面的灰尘以提高其光电转化效率, 如图12(b)所示. 清洁工具的手柄设计了沟槽和较大接触面, 保证机器人能够稳健抓取. 试验采用基于知识驱动的监督自治遥操作模式^[19,22], 利用机器人的局部智能来接管较低级别的动作, 航天员只需通过平板电脑上的人机交互界面手动调整一些参数化命令即可实现遥操作控制^[27]. 有

图 12 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面机器人拔插接口(a)和清洁太阳能面板(b)(来源: ESA)

Figure 12 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a robot on the ground to plug interface (a) and clean solar panel (b) (credit: ESA).

效减少航天员心理压力和工作负荷,为航天员同时遥操作多个地面机器人以执行更加复杂庞大的作业任务提供了可能.试验证明,任务级半自主监督控制对于通信时延较大的工况是非常有效且必要的^[25].

第七项试验(SUPVIS Justin-3, 2018年8月):航天员从国际空间站遥操作地面人形机器人执行完整的接收天线安装和设备模块更换任务,如图13所示.这次试验的亮点在于操作前不进行详细步骤设计,操作过程中地面人员不提供任何支持,航天员被要求完全独立地遥操作地面机器人完成操作任务和应对意外状况,验证了航天员在轨遥操作地面半自主机器人长时间作业和执行端到端完整任务的可行性与有效性^[22,25].

第八项试验(Analog, 2019年11月):这是ESA综合METERON工程专项多年积累的技术成果和系列在轨试验经验开展的一次全面验证试验.如图14所示,试验中,航天员在国际空间站内根据两台笔记本电脑中呈现的作业现场视频反馈和辅助提示信息,通过壁挂式六自由度力反馈操纵器遥操作地面模拟月球车避开障碍物行驶到指定地点,然后采集岩石放入收纳盘中,并对岩石进行探测.试验圆满完成,且航天员0.5 h便完成了预期1 h的工作任务,验证了在轨遥操作星球车进行长时间复杂任务作业的可行性.

4 关键技术

4.1 人机交互界面设计

人机交互界面是航天员感知地面作业现场状态,输入任务级操作指令的主要媒介.人机交互界面设计的优劣将直接决定航天员遥操作效率甚至任务成败,因此,必须充分考虑各种潜在因素的影响,最优化设计效果.一方面根据不同任务及同一任务不同阶段的具体状况,将航天员执行任务所必须的地面作业状态全面呈现;另一方面优化交互界面,将可视化信息减少到必要的最小值,突出重点信息,减少低层次非必需的机器人参数数据显示,以最容易理解的方式向航天员提供与当前任务最相关的反馈,降低航天员脑力负荷,避免因图形界面繁杂引起注意力分散^[27,28].

以NASA开展的航天员在空间站内遥操作地面K10机器人部署射电望远镜试验所用的人机交互界面为例,如图15所示.界面根据不同操作需求分为任务序列模式及动作指令模式:在任务序列模式下航天员选定并发送任务序列,机器人接收任务序列并自主完成序列任务,操作界面提示任务序列执行进展情况;在动作指令模式下航天员发出具体操作动作指令,机器人接收指令并跟踪执行对应具体移动或转动动作.

图 13 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面机器人安装天线(a)和更换模块(b)(来源: ESA)

Figure 13 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a robot on the ground to install antenna (a) and replace module (b) (credit: ESA).

图 14 (网络版彩图)航天员在轨遥操作地面漫游车避障和采集岩石(来源: ESA)

Figure 14 (Color online) An astronaut in orbit teleoperates a rover on the ground to avoid obstacles and collect rocks (credit: ESA).

图 15 (网络版彩图)在轨对地遥操作的人机交互界面(来源: NASA)

Figure 15 (Color online) Human-computer interaction interface for orbit-to-ground teleoperation (credit: NASA).

为了减少航天员训练时间和脑力负荷, 人机交互界面的颜色、外观和功能需要符合空间站内图形显示通用标准, 且不同操作模式在人机交互界面的功能布局上基本一致, 主要呈现由地面相机、雷达和惯性单元等传感器反馈的机器人运动轨迹、三维可视化高保真地形图以及周围潜在的危險和障碍, 以及主视角、跟随视角及俯视视角操作图像, 同时以进度条或文本框形式显示任务进程、机器人参数等辅助信息, 保障航天员高效率感知地面作业现场操作状况^[24,29,30]。

4.2 人机工效设计

人机工效基于人体测量学、生物力学、系统工程等学科知识, 研究如何进一步优化系统软硬件设计, 以适配人的操作局限, 提高操作效率^[31,32]。航天员在轨对星球表面遥操作过程中将受到来自空间微重力环境等因素的影响^[33]。因此, 人机交互软硬件系统在满足功能要求的同时, 还必须进行人机工效设计, 以适配空间在轨环境下航天员的操作特征, 降低操作负荷, 实现高效率作业^[34]。以航天员在空间站内用右手操作力反馈操纵器为例, 如图16所示, 在微重力环境下, 为避免被操纵器反作用力推开, 需要设置一个固定在舱内的手柄供航天员用左手紧紧握住, 并布置一根绑带以限制航天员右手臂运动范围。

图 16 (网络版彩图)用于在轨对地力反馈遥操作的人机工效设计(来源: DLR)

Figure 16 (Color online) Ergonomic design for orbit-to-ground force feedback teleoperation (credit: DLR).

世界各主要航天机构在航天人机工效方面开展了大量研究^[35-37], 主要包括: (1) 空间环境下人的能力特性研究, 从航天员生理和心理两方面出发, 研究空间环境对人体作业能力的影响; (2) 航天工效学设计与评价体系研究, 根据人体作业特性进行适应性设计, 建立航天员及空间站舱内设施评价体系; (3) 航天员建模与仿真系统设计, 利用计算机技术对航天员作业能力建模, 依照航天工效学评价体系进行系统设计, 有效缩短研制周期, 降低研制成本。

4.3 力反馈

力反馈是指在人机交互过程中, 被操作的机器人或仿真系统对操作者的输入做出响应, 并通过力反馈设备作用于操作者的过程, 如图17所示. 遥操作过程中, 力反馈设备通过位置和角度传感器测量航天员的操纵方向和位移大小, 并将数据输入主控计算机处理后发送给地面作业机器人, 地面作业机器人执行动作并将运动过程中的力觉信号反馈到空间站端的力反馈设备, 形成阻尼、振动等力觉响应, 辅助航天员态势感知和下一步操作决策^[14,38].

力反馈技术将人的适应性思维与敏锐力觉相结合, 增强了态势感知与响应能力, 大大提高了遥操作效率. 目前已开展的空间站对地遥操作试验中广泛应用了力反馈技术, 如KONTUR工程专项中航天员通过二自由度力反馈操纵器遥操作机器人作业; METERON工程项目第三项试验中, 航天员通过单自由度力反馈操纵器遥操作地面机器人将销钉连接器插入装配孔, 第八项试验中, 航天员通过六自由度力反馈操纵器遥操作地面机器人避障和采集岩石.

4.4 空间通信

空间通信是航天员与星球表面作业机器人进行信息交互的基础. NASA和ESA开展的系列在轨对地遥操作试验均通过SCaN网络实现数据传递^[28]. SCaN网络由近地网(NEN)、空间网(SN)和深空网(DSN)组成, 如图18所示. 近地网由部署在全球的地面站和集成系

图 17 (网络版彩图)航天员在轨通过力反馈操纵器向机器人发出操作指令(来源: ESA)

Figure 17 (Color online) An astronaut in orbit sends instructions to robots through force feedback manipulators (credit: ESA).

图 18 (网络版彩图)SCaN网络体系架构(来源: NASA)

Figure 18 (Color online) SCaN network system architecture (credit: NASA).

统组成, 为低轨道、地球同步轨道、月球轨道提供空间通信和跟踪服务; 空间网由运行在地球同步轨道的卫星星座及相关地面系统组成, 为低轨任务提供低延迟、高速率通信; 深空网由大口径天线地面站组成, 服务深空量级距离的微弱信号通信.

天地空间通信具有误码率高、中断频繁、上下行速率不对称等情况, 然而在轨对星球表面遥操作过程的强交互性要求通信过程必须持续、稳定、可靠. 对此, NASA开发了专用的DTN(延迟/中断容忍网络)协议以增加通信过程可靠性^[28,39], 如图19所示. DTN是一种全局网络架构, 利用存储转发机制进行数据通信, 将航天器和地面站作为节点, 每个节点都能够保存数据, 并在下个节点可用时将数据传递下去, 最终将数据可靠、高效地传递到航天器或地面站^[18,40].

图 19 (网络版彩图)DTN协议空间应用架构(来源: NASA)

Figure 19 (Color online) DTN protocol space application architecture (credit: NASA).

通信质量的优劣将直接决定遥操作效率高低甚至任务成败. 未来将引入光通信等新技术补充射频通信的不足, 发展性能更高、体积更小、更灵活的地面系统, 部署天基中继通信体系, 开发更完善的通信协议, 不断提升空间通信的可用性、可靠性和安全性, 以支持更具挑战的深空在轨遥操作任务需求.

5 展望

NASA, ESA和ROSCOSMOS借助国际空间站, 围绕在轨对星球表面遥操作已持续开展大量技术研究和多次在轨试验, 然而中国尚未在这方面开展针对性技术研究. 同时, 由于中国未参与国际空间站建设和运营, 目前在这方面的试验经验也是一片空白. 考虑到中国空间站将于2022年前后建成运营, 将具备开展空间站对地面遥操作试验条件, 本文在借鉴相关成果的基础上, 面向中国月球基地建设和载人火星探测等任务需求, 围绕在轨对星球表面遥操作技术, 设计在轨对地遥操作挖掘安置试验, 在轨对地遥操作建筑3D打印试验等全作业流程的中国空间站对地面遥操作任务试验, 积累相关技术成果和试验经验.

5.1 在轨对地遥操作挖掘安置试验

在未来月球基地建设中广泛存在挖掘基坑和安置设备等操作需求, 如月面基地核电源系统的辐射屏蔽要求挖掘深坑、安置核电堆、掩埋屏蔽体, 月面科学实验舱的固定需要挖掘基坑和埋设固定等. 据此, 设计空间站在轨对地遥操作挖掘安置试验, 如图20和21所示, 通过空间站内的航天员在轨遥操作地面挖掘安置作业机器人依次完成挖掘基坑、安置设备、填平基

图 20 (网络版彩图)在轨对地遥操作挖掘安置试验流程
Figure 20 (Color online) Flowchart of excavation and placement by orbit-to-ground teleoperation.

图 21 (网络版彩图)在轨对地遥操作挖掘安置
Figure 21 (Color online) Excavation and placement by orbit-to-ground teleoperation.

坑等具体操作任务, 验证在轨对星球表面遥操作重型机械作业的可行性与可靠性.

5.2 在轨对地遥操作建筑3D打印试验

在月球表面构筑安全防护建筑物, 是载人登月和月球基地长期建设必须解决的问题. 目前国内外普遍认为采用多自由度3D打印机器人, 原位利用月球表面月尘月壤资源3D打印月面建筑结构, 是在月面构筑安全防护建筑物的有效途径^[41]. 因此, 如图22和23所示,

图 22 (网络版彩图)在轨对地遥操作建筑3D打印试验流程
Figure 22 (Color online) Flowchart of 3D printing of buildings by orbit-to-ground teleoperation.

图 23 (网络版彩图)在轨对地遥操作建筑3D打印
Figure 23 (Color online) 3D printing of buildings by orbit-to-ground teleoperation.

设计空间站在轨对地遥操作建筑3D打印试验, 由航天员在轨遥操作地面3D打印机器人依次完成步进式、补料式、模型式3D打印操作任务。

6 总结

在轨对星球表面遥操作技术是推动未来载人登月、月球基地建设和火星探测等任务实质进展的关键支撑。本文综述了NASA, ROSCOSMOS, ESA, DLR等

航天机构围绕在轨对星球表面遥操作开展的三个工程专项以及系列在轨技术试验, 分析了在轨对星球表面遥操作过程中的关键技术, 并结合我国未来深空探测任务需求, 提出了在轨对地面遥操作挖掘安置、建筑3D打印试验等设想。我国应抓住2022年前后将建成运营自己的空间站的有利局面, 及时布局相关项目, 研制相关软硬件系统, 开发测试关键技术, 探索高效的运作模式, 争取为月球基地建设和载人火星探测等战略性任务积累坚实基础和领先优势。

参考文献

- 1 Fong T, Rochlis Zumbado J, Currie N, et al. Space telerobotics. *Rev Human Factors Ergonom*, 2013, 9: 6–56
- 2 Oleson S R, Landis G A, McGuire M L, et al. HERRO mission to mars using telerobotic surface exploration from orbit. *J Brit Interplan Soc*, 2011, 64: 304–313
- 3 Lester D F, Hodges K V, Anderson R C. Exploration telepresence: A strategy for optimizing scientific research at remote space destinations. *Sci Robot*, 2017, 2: ean4383
- 4 Schmidt G R, Landis G A, Oleson S R. Human exploration using real-time robotic operations (HERRO): A space exploration strategy for the 21st century. *Acta Astronaut*, 2012, 80: 105–113
- 5 Lupisella M L, Wright M R, Bleacher J E, et al. Low-latency teleoperations and telepresence for the evolvable mars campaign. In: 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, 2017
- 6 Landis G A. Teleoperation from mars orbit: A proposal for human exploration. *Acta Astronaut*, 2008, 62: 59–65
- 7 Lupisella M L. Low-latency teleoperations: Operational implications for human space exploration. In: 2018 SpaceOps Conference. Marseille, France, 2018. 2487
- 8 Mellinkoff B J, Spydell M M, Bailey W, et al. Quantifying operational constraints of low-latency telerobotics for planetary surface operations. In: 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, 2018
- 9 Burns J O, Mellinkoff B, Spydell M, et al. Science on the lunar surface facilitated by low latency telerobotics from a Lunar Orbital Platform-Gateway. *Acta Astronaut*, 2019, 154: 195–203
- 10 Burns J O, Kring D A, Hopkins J B, et al. A lunar L2-farside exploration and science mission concept with the Orion Multi-Purpose Crew Vehicle and a teleoperated lander/rover. *Adv Space Res*, 2013, 52: 306–320
- 11 Bualat M, Schreckenghost D, Pacis E, et al. Results from testing crew-controlled surface telerobotics on the international space station. In: 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space. Saint-Hubert, Canada, 2014
- 12 Stelzer M, Steinmetz B M, Birkenkamp P, et al. Software architecture and design of the Kontur-2 mission. In: 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, 2017
- 13 Weber B, Balachandran R, Riecke C, et al. Teleoperating robots from the international space station: Microgravity effects on performance with force feedback. In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Macau, China, 2019. 8138–8144
- 14 Artigas J, Balachandran R, Riecke C, et al. Kontur-2: Force-feedback teleoperation from the international space station. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden, 2016. 1166–1173
- 15 Muliukha V, Ilyashenko A, Zaborovsky V, et al. Space experiment “Kontur-2”: Applied methods and obtained results. In: 2017 21st Conference of Open Innovations Association. Helsinki, Finland, 2017. 244–253
- 16 Muliukha V, Guk M, Silinenko A, et al. Communication technologies for force-feedback teleoperation of on-ground robots from the international space station in the frame of the “Kontur-2” experiment. In: 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. Moscow, Russia, 2017
- 17 Lii N Y, Leidner D, Schiele A, et al. Simulating an extraterrestrial environment for robotic space exploration: The METERON SUPVIS-JUSTIN

- terorbotic experiment and the SOLEX proving ground. In: 13th Symposium on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. Noordwijk, Netherlands, 2015
- 18 Lii N Y, Leidner D, Birkenkamp P, et al. Toward scalable intuitive telecommand of robots for space deployment with METERON SUPVIS-JUSTIN. In: 14th Symposium on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. Leiden, Netherlands, 2017
 - 19 Schmaus P, Leidner D, Kruger T, et al. Knowledge driven orbit-to-ground teleoperation of a robot coworker. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 5: 143–150
 - 20 Schiele A, Aiple M, Krueger T, et al. Haptics-1: Preliminary results from the first stiffness JND identification experiment in space. In: International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications. London, UK, 2016. 13–22
 - 21 Schiele A, Krüger T, Kimmer S, et al. Haptics-2—A system for bilateral control experiments from space to ground via geosynchronous satellites. In: 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Budapest, Hungary, 2016. 892–897
 - 22 Schmaus P, Leidner D, Bayer R, et al. Continued advances in supervised autonomy user interface design for METERON SUPVIS-JUSTIN. In: 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 2019
 - 23 Leidner D, Birkenkamp P, Lii N Y. Context-aware mission control for astronaut-robot collaboration. In: 14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation. Leiden, Netherlands, 2017
 - 24 Birkenkamp P, Leidner D, Lii N Y. Ubiquitous user interface design for space robotic operation. In: 14th Symposium on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. Leiden, Netherlands, 2017
 - 25 Bayer R, Schmaus P, Pfau M, et al. Deployment of the SOLEX environment for analog space telerobotics validation. In: 70th International Astronautical Congress. Washington DC, USA, 2019
 - 26 Lii N Y, Riecke C, Leidner D, et al. The robot as an avatar or co-worker? An investigation of the different teleoperation modalities through the Kontur-2 and METERON SUPVIS-JUSTIN space telerobotic missions. In: 69th International Astronautical Congress. Bremen, Germany, 2018
 - 27 Birkenkamp P, Leidner D, Borst C. A knowledge-driven shared autonomy human-robot interface for tablet computers. In: 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Madrid, Spain, 2014. 152–159
 - 28 Schmaus P, Leidner D, Kruger T, et al. Preliminary insights from the METERON SUPVIS-JUSTIN space-robotics experiment. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 3836–3843
 - 29 Hart S, Kramer J, Gee S, et al. The pharaoh procedure execution architecture for autonomous robots or collaborative human-robot teams. In: 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. New York, USA, 2016. 888–895
 - 30 Thronson H A, Valinia A, Bleacher J, et al. Low-latency science exploration of planetary bodies: A demonstration using ISS in support of mars human exploration. In: AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition. San Diego, USA, 2014. 4287
 - 31 Chen S G, Jiang G H, Wang C H. Advancement in space human factors engineering (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2015, 2: 7–17 [陈善广, 姜国华, 王春慧. 航天人因工程研究进展. *载人航天*, 2015, 2: 7–17]
 - 32 Novak J B, Addy D. Human engineering topics for the international space station. *Aviat Space Envir Md*, 2000, 71: 117–121
 - 33 Kalery A Y, Sorokin I V, Tyurin M V. Human space exploration beyond the international space station: Role of relations of human, machine and the “Earth”. *Acta Astronaut*, 2010, 67: 925–933
 - 34 Wang W, Zhang W, Feng W. The astronaut ergonomics assessment methodology in microgravity environment. In: 2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering. Beijing, China, 2017
 - 35 Wang C H, Chen X P, Jiang T, et al. Research and practice in space ergonomics (in Chinese). *Space Medic Med Eng*, 2018, 31: 172–181 [王春慧, 陈晓萍, 蒋婷, 等. 航天工效学研究与实践. *航天医学与医学工程*, 2018, 31: 172–181]
 - 36 Stoll E, Jaekel S, Katz J, et al. SPHERES interact-Human-machine interaction aboard the International Space Station. *J Field Robot*, 2012, 29: 554–575
 - 37 Oei I, Mirra C. Europe’s human research experiments integration on the International Space Station. *Acta Astronaut*, 2008, 63: 1126–1136
 - 38 Estrada E, Yu W, Li X. Stability and transparency of delayed bilateral teleoperation with haptic feedback. *Int J Appl Math Comput Sci*, 2019, 29: 681–692
 - 39 Sarkarati M, Merri M, Nergaard K, et al. How to plug-in your rover into a space mission to moon or mars. In: 2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications. Queenstown, New Zealand, 2015. 318–324
 - 40 Wang Y, Yang H, Chen X, et al. Energy saving scheme of delay/disruption tolerant network in deep space communications. In: 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Yangzhou, China, 2016

- 41 Jakus A E, Koube K D, Geisendorfer N R, et al. Robust and elastic Lunar and Martian structures from 3D-printed regolith inks. *Sci Rep*, 2017, 7: 1–8

Review and prospects of orbit-to-surface teleoperation

ZHANG LiXian¹, XIAO GuangZhou¹, WANG DongZhe¹, LI YunPeng¹, HAN YueJiang¹,
LIU DongYu² & WANG Wei²

¹ School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

² China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Orbit-to-surface teleoperation (OTST) is aimed at serving the planet-surface robotic operations including the collection and analysis of material, transportation and deployment of equipment, construction and maintenance of infrastructure, etc. It allows for the planet-surface tasks performed by robots that are teleoperated by astronauts in orbiting spacecraft, which is a crucial technology for manned lunar-landing, lunar bases construction and manned Mars exploration missions in the future. In this paper, the existing projects and experiments of OTST carried out by NASA, ROSCOSMOS, ESA and DRL are reviewed. The key technologies such as man-machine interaction interface design, ergonomics design, force feedback and space-ground communication are analyzed. Moreover, considering the trend and demands of China's deep space exploration in the future, the envision that using the to-be-built Chinese space station to carry out experiments such as orbit-to-ground teleoperation on equipment placement and 3D printing of buildings is proposed. This work may provide some insight into the technologies and experiments of OTST for China's lunar base construction and other major deep space missions in the future.

deep-space exploration, planetary bases construction, on-orbit teleoperation, man-machine interaction, ergonomics

doi: [10.1360/SST-2020-0120](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0120)