



空间作业智能操控技术研究展望

张哲^{1,5}, 刘传凯^{2,3*}, 王明明^{3,4*}, 罗建军^{3,4}, 武黎明^{3,4}, 陈诺^{3,4}

1. 探月与航天工程中心, 北京 100190;

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;

4. 西北工业大学航天学院, 西安 710072;

5. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081

* E-mail: ckliu2005@126.com; mwang@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2022-03-10; 接受日期: 2022-07-15; 网络版发表日期: 2024-01-08

国家自然科学基金(批准号: 61972020, 61973256, 62003025)和航天飞行动力学技术重点实验室基金(编号: 6142210200307)资助项目

摘要 空间环境错综复杂, 由航天员出舱完成各类空间任务难度较大. 利用空间机器人操控技术, 能够扩展航天员的操作能力, 有效提高空间作业的自主化和智能化水平. 本文介绍了空间作业操控的概念与内涵、国内外空间机器人操控技术应用与发展现状, 分析了在轨服务、星表巡视和星表采样等三类场景下空间机器人操控技术的特点. 在此基础上, 对其中涉及的智能感知与信息融合、任务规划、预测仿真等前沿关键技术进行了总结, 并结合未来空间探索的需求, 研究提出了空间作业操控技术的智能化发展趋势.

关键词 空间操控, 在轨服务, 星表探测, 人工智能, 机器人

1 空间作业操控的概念及内涵

1.1 空间作业操控的概念

空间作业操控是指地面操作人员根据空间机器人获取的图像、位姿数据和作用力等遥现场信息, 使用人机交互设备生成操作控制指令并通过信道发送至空间机器人, 以控制其完成空间探测与操作任务的一种技术手段, 是空间机器人延拓任务能力、提升智能化水平的重要途径, 也是空间机器人领域极具挑战性的研究方向. 然而, 囿于现有的航天科技水平, 人类抵达并长期驻留地外空间面临巨大技术挑战. 利用空间作业操控技术, 可以有效控制空间机器人完成深远距离下

的复杂任务^[1-6].

1.2 空间作业操控系统的组成

根据空间作业任务要求, 空间作业操控系统主要包含三个部分: 地面系统、通信传输系统和空间作业系统, 如图1所示. 地面系统主要包括遥测处理、遥控注入、数据管理与分析、任务规划、动作规划、虚拟仿真及预测、人机交互等子系统, 地面操控团队负责地面系统的运维与使用, 实现人类智能向太空的拓展; 通信传输系统主要包括测控和数传通信两个部分, 是空间作业系统与地面系统连接的媒介; 空间作业系统包括空间机器人、各类传感器和环境, 通过数据获取

引用格式: 张哲, 刘传凯, 王明明, 等. 空间作业智能操控技术研究展望. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 289–303

Zhang Z, Liu C K, Wang M M, et al. Development and prospects of space intelligent operation (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 289–303, doi: 10.1360/SST-2022-0090

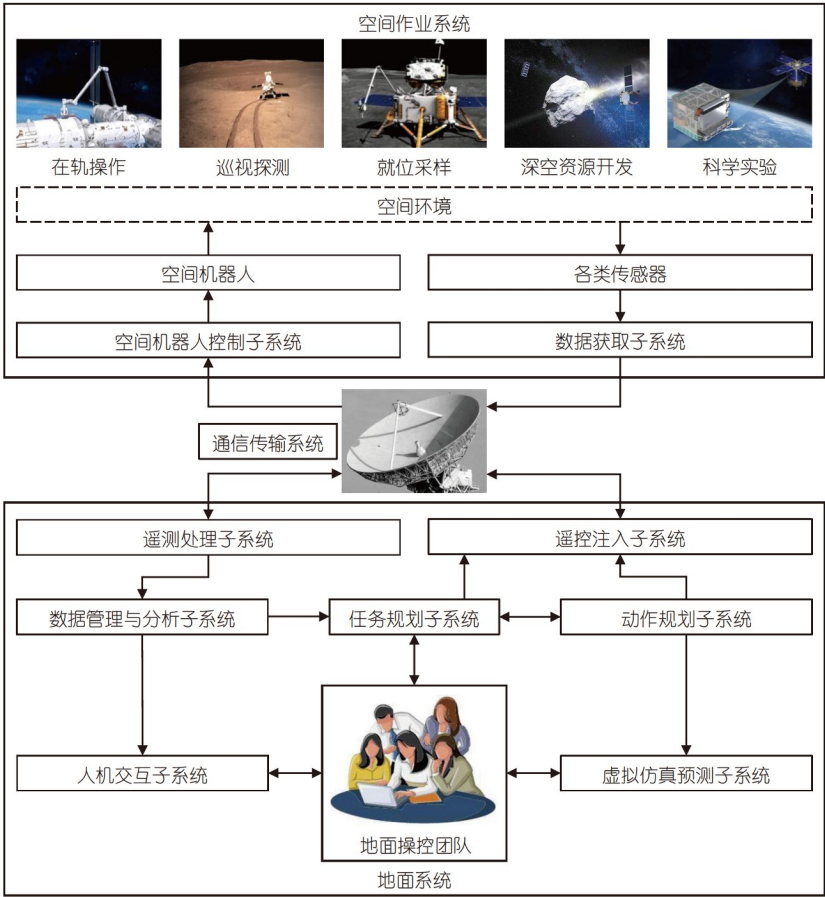


图 1 (网络版彩图)空间作业操控系统总体架构图
Figure 1 (Color online) Architecture diagram of space operation system.

子系统采集各类传感数据, 通过空间机器人控制子系统实现其运动。

1.2.1 地面系统

地面系统是空间作业系统和任务管理的基础平台, 提供人与空间作业系统交互的接口, 用于把操作者引入空间作业操控系统的控制回路中, 为空间机器人的控制子系统提供目标任务、动作过程、控制指令等相关信息, 同时地面操控人员也能感知由空间传感器获取的环境、交互数据等信息, 判断当前状态并结合目标任务适当地调整动作, 保证空间机器人操作过程的动态稳定控制。地面系统构建形式灵活多样, 根据任务类型和操作对象的不同, 可设计为不同的体系框架。早期的地面操控以主从式同构控制为主, 预先在地面模拟空间的操作, 近似地将地面主端操作过程复制到空间从端, 实现对空间机器人的随动式控制; 后

来, 为了应对各类复杂任务和多变场景, 提出了异构型控制机制, 即在地面建立异步模拟仿真系统或平行仿真系统, 通过将复杂任务预先规划并在地面全面验证, 保证空间作业系统执行的可靠性, 同时在地面利用各类传感信息对任务状态进行精确测量, 由此引导空间机器人完成复杂精细的作业任务。

1.2.2 空间作业系统

空间作业系统主要包括空间机器人和地外空间环境两个部分。空间机器人作为空间探测和作业的主体执行机构, 通常会根据具体任务的差异, 设计成不同的结构, 如星球表面探测多采用轮式探测车, 星表采样多采用钻取机构或机械臂与铲勺组合机构, 在轨操作多采用冗余机械臂结构等。空间机器人既可仅作为被控部件使用, 也可自带控制系统, 以实现自主规划与操作。在当前空间机器人智能化水平有限的条件下,

多采用机器人半自主控制或完全由地面系统控制的模式。

1.2.3 通信传输系统

通信传输系统能够进行双向信息传递, 不仅可以把地面系统的指令信息传递给空间作业系统, 还可以将空间作业系统的状态和传感等相关信息反馈回地面。目前, 空间作业系统与地面系统的通信传输主要由航天器测控和数传通信两个部分组成。航天器测控采用统一的载波信道对下行状态遥测数据、跟踪测量数据和上行遥控指令数据进行传输, 主要用于对航天器飞行和工作状态进行跟踪、测量和控制; 数传通信是无线电高速数据传输的简称, 主要用来传输航天器空间作业所获取的信息, 而非维持航天器正常运行所必须的工作信息, 例如数字图像、数字语音、有效载荷的试验数据等。对于近地、高轨、月球乃至深空等不同距离条件下的空间作业任务, 通信系统的传输性能直接影响对现场信息的获取能力, 是开展空间作业的地面操控需要提升的重要方面。

2 空间作业操控技术发展现状及特点

因受太空环境恶劣、航天员生存保障困难、运输成本高等因素的影响, 使用空间机器人操控方式代替人类完成在轨服务或星表探测等任务成为一种有效的手段。按照执行任务的不同, 根据时间顺序, 本文针对在轨服务机器人、星表巡视机器人和星表采样机器人三个类别, 分析空间作业操控技术的发展现状并总结其特点。

2.1 在轨服务机器人操控发展现状

早期的在轨服务任务由航天员出舱实施, 由于太空环境复杂恶劣, 航天员需承受巨大的生理和心理压力, 严重影响任务完成的质量。提高空间机器人操控技术成为完成在轨维护、卫星抓捕、货物转运等任务的有效手段。根据载体航天器的不同, 可将其在轨服务空间机器人分为航天飞机机械臂、空间站机器人、自由漂浮空间机器人等三类。

2.1.1 航天飞机机械臂的在轨操控

在航天飞机早期的使用过程中, 缺乏一种部署和

回收有效载荷的方法。为此, 加拿大为NASA研制了航天飞机遥控机械臂系统(shuttle remote manipulator system, SRMS), 简称加拿大臂^[7], 如图2(a)所示。该系统是世界上第一套空间机器人系统, 于1981年发射升空。加拿大臂可由舱内的航天员通过显示控制面板和手动控制器进行操作, 支持预编程和手动控制两种模式, 辅以臂上相机获取的舱外信息, 曾在卫星抓取与维修、辅助航天员太空行走、国际空间站建设等各类任务中发挥了重要的作用^[8]。但作为早期的空间机器人系统, SRMS不支持地面遥操作和自主智能操控能力。

最早支持地面遥操作的空间机器人是德国航空航天中心飞行验证项目ROTEX(roboter technology experiment)中的小型机械臂系统, 于1993年发射升空^[9]。该项目验证了多传感器手爪、大延时遥操作和具有时延补偿能力的三维图像仿真等技术, 完成了桁架结构装配、可更换单元操作和漂浮物体捕获等三类基本任务^[10,11], 如图2(b)所示。

2.1.2 空间站机器人的在轨操控

空间站机器人是进行太空探索与开展各类空间技术试验的重要机构, 目标任务的不同使得空间站机器人在尺寸、结构、功能等方面都有所差异, 大体上包含舱外大型机械臂、灵巧轻型机械臂和类人机器人等类型。

从技术角度来说, 舱外大型机械臂系统由航天飞机机械臂发展而来, 较为成熟, 且已经在负载转运与部署、大型结构对接装配、航天员支持辅助等任务中发挥过作用, 有较为丰富的实验经验。其中, 最典型的大型空间站机械臂系统是由加拿大研制的SSRMS(space station remote manipulator system), 简称加拿大臂2号, 于2001年发射升空^[12]。除此之外还包括1997年

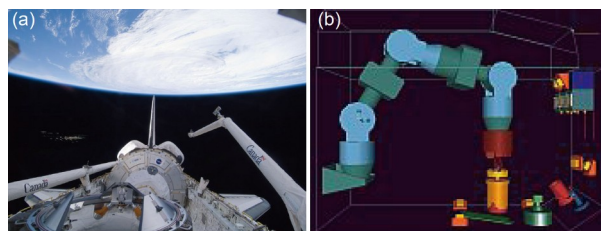


图2 (网络版彩图)航天飞机上的机械臂系统。(a) 加拿大臂系统; (b) ROTEX系统

Figure 2 (Color online) Robotic arm system on the space shuttle. (a) SRMS; (b) ROTEX system.

发射并在轨实验的日本远程机械臂系统JEMRMS(Japanese experiment module remote manipulator system)^[13]、1996年开始研制于2021年发射入轨的欧洲机械臂系统ERA(European robotic arm)^[14]以及中国空间站中使用的大型舱外机械臂系统。为了完成多种任务并保证可靠性,上述舱外大型机械臂系统大多设置多种操控模式,如SSRMS支持预编程、航天员操控和地面遥控操作^[15],JEMRMS可实现预编程和单关节速率控制,包括双边、主从和重定义位姿等操作方法^[16]。而其中遥控操作模式的实现是各类空间机器人设计的难点,面对大时延的影响,要保证机械臂动作的稳定性与安全性,需要力与视觉的反馈、精确的动力学建模进而仿真预测等技术。如SSRMS的安全监视系统能够对空间机械臂的延时状态进行图像显示,并根据动力学引擎和视觉图像数据建立预测仿真模型,预测机械臂运动^[13,17]。JEMRMS的地面观测系统也能实现机器臂任务的遥测显示、载荷停靠时的图像处理以及反映实时遥测数据的3D图形等,以保证JEMRMS在轨操作的安全性^[18,19]。加拿大臂2号的灵巧末端Dextre具有力反馈和视觉反馈的功能,从而支持人在回路的精细操作^[20,21]。同样为了保证任务执行的安全可靠,需要借助预测仿真系统对任务提前规划与仿真验证。如ERA具有地面任务准备与训练设备(mission preparation and training equipment, MPTE),能够生成精确定义的任务序列^[22]。空间站舱外大型机械臂系统如图3所示。

轻型机械臂系统也是各国研究的重点,相比舱外大型机械臂系统,此类机械臂尺寸小、材质轻,往往面向灵巧操作等任务。如德国宇航中心于2005年在国际空间站上进行的ROKVISS(robotics component verification on ISS)项目,验证了轻型空间机械臂在轨操作的多项关键技术^[23]。在地面遥控操作模式下,操作人员根据反馈信息操作交互设备,施加的操作力和位置信号作为空间机器人的控制指令。该模式能够将操作人员纳入控制的闭环回路中,实现天地控制的同步性^[24]。和舱外大臂系统一样,为了解决时延对控制产生的影响,建立了精确的机器人模型,用于图像预测与时延预测,并据此设计了时延补偿控制策略,以实现变时延条件下的稳定控制^[25,26]。我国依托载人航天工程,在在轨服务机器人的操控技术上取得了一定进展。2016年,中国的空间实验室“天宫二号”携带的机械臂系统实现了中国首次人机协同的各类在轨服务任

务^[27]。基于视觉伺服、力柔顺控制、虚拟显示等技术验证了机器人人机协同操控与遥控等方面的性能^[28,29]。基于示教学习的半自主遥控操作是空间机械臂远程操控的有效方法,尤其是在通信受限和动作重复的空间场景下,文献^[30]提出的半自主遥控操作方法能根据当前环境生成更低耗的任务轨迹,有效提高了天宫二号机械臂的操作智能化水平。且设计了基于空间扩展状态观测器的模糊控制律,有效提高了机械臂抓取漂浮物体时的轨迹跟踪能力^[31]。空间站轻型机械臂系统如图4所示。

类人的空间机器人系统以美国的Robonaut计划为代表,其机器人项目Robonaut 2于2011年发射至国际空间站服务。Robonaut 2需协助航天员在空间站完成各类任务,要求其具备一定的智能性,如灵巧操作^[32]、抓取规划^[33]、人机协同^[34]、智能感知^[35]等。为实现Robonaut 2同航天员之间的协同工作与遥控操控

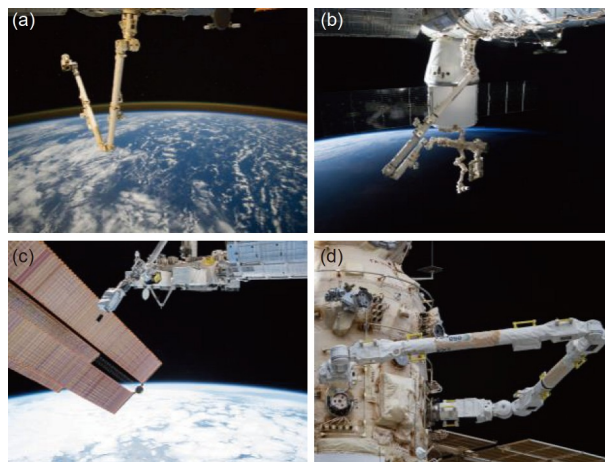


图3 (网络版彩图)空间站大型机械臂系统。(a) SSRMS; (b) Dextre灵巧机械臂; (c) JEMRMS; (d) ERA

Figure 3 (Color online) Space station large robotic arm system. (a) SSRMS; (b) Dextre dexterous robotic arm; (c) JEMRMS; (d) ERA.

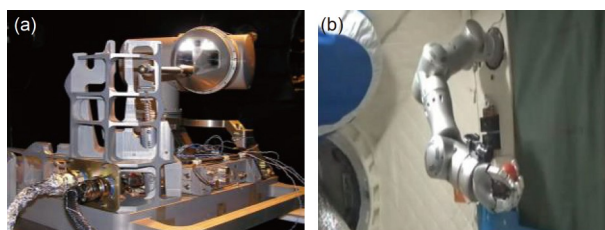


图4 (网络版彩图)空间站小型机器人系统。(a) ROKVISS系统; (b) 天宫二号机械臂

Figure 4 (Color online) Space station small robot system. (a) ROKVISS system; (b) robotic arm of Tiangong 2.

制, 该系统配备了力传感器、触觉传感器、VR相机、力反馈手套等设备. Robonaut 2的遥操作系统是RTS (Robonaut Teleoperation System), 在机器人操作系统ROS上搭建, 具有多层架构的特点. 根据传感信息与交互设备, Robonaut 2能够实现直接反馈、共享反馈和监督控制等多种模式^[36]. Robonaut 2的在轨场景如图5所示.

2.1.3 自由漂浮空间机器人的在轨操控

除了航天飞机和空间站上的机器人系统外, 携带空间机械臂并具有自由飞行能力的卫星也是完成在轨服务任务的重要工具. 与附着于航天飞机或空间站上的机器人系统不一样, 自由飞行的机器人系统不受基座位置约束和狭小空间环境限制, 可做大范围机动飞行, 灵活性更强. 但同时给在轨操控带来挑战.

日本于1997年发射的工程试验卫星ETS-VII(Engineering Test Satellite-VII)是世界上第一个携带空间机器人并在轨自由飞行的系统, 其主要任务包括星载机器人系统性能评估、卫星姿态与机械臂协调控制、机械臂地面遥操作和在轨服务演示验证^[37], 如图6(a)所示. ETS-VII的跟踪星上有两个六自由度的机械臂, 可由地面控制站遥控操作. 为了应对时延和通信能力限制, 遥操作系统的不同功能分别部署在卫星和地面上^[38,39]. 德国启动了轨道任务服务系统DEOS(deutsche orbitale servicing)^[40,41], 如图6(b)所示. 该项目的目标星是非合作航天器, 期望完成的任务是对地球同步轨道上的卫星进行故障检查与维修、燃料加注、碎片清除等. DEOS的机械臂由地面操作人员发送操控指令实现控制, 机械臂的运动以半自主的模式进行, 正常情况下, 自动地执行控制指令并完成预设任务. 只有当发现异常或者出现故障时, 才由地面操作人员进行直接遥控控制. 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DAPRA)于2012年启动的“凤凰计划”中, 服务航天器上携带的空间机械臂系统也设计了地面遥操作系统. 考虑非合作目标在轨操作的复杂性, 该操控系统综合利用预测仿真、在轨系统参数辨识、时延建模等多项关键技术, 设计了非完全预知环境下大延时多自由机器人遥操作系统. 为了确保空间机械臂在轨拆装、更换与维修任务的安全性, 在地面设置了紧急停止功能. 我国空间机器人研究虽然起步较晚, 但在操控验证试验方面也取

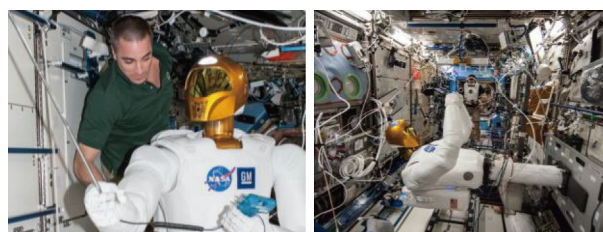


图 5 (网络版彩图) Robonaut 2机器人系统
Figure 5 (Color online) Robonaut 2 robot system.

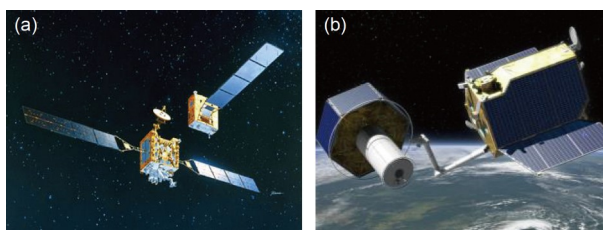


图 6 (网络版彩图)自由漂浮空间机器人的在轨操控. (a) ETS-VII; (b) DEOS系统
Figure 6 (Color online) On-orbit manipulation of free-floating space robot. (a) ETS-VII; (b) DEOS system.

得了一定的成果. 2013年, “试验七号”卫星搭载的空间机械臂开展了在轨操控的验证试验^[42,43]. 该系统支持自主、遥编程、主从等多种遥操作控制模式, 完成了空间机械臂跟踪接近、目标捕获等关键技术的验证. 地面操控系统中设置了任务规划、预测仿真、人机交互等多个子系统, 实现了空间作业系统在轨任务的规划与验证、过程信息存储等功能, 为我国机械臂在轨操作的地面操控验证积累了经验.

2.2 星表巡视探测机器人操控发展现状

自20世纪70年代苏联第一次派送“月球车1号”登陆月球, 到2021年5月中国首个火星探测器“祝融号”成功着陆, 人类星表巡视探测的任务不断深化. 探测机器人的探测过程主要在地面操控人员的主导下进行, 地面操控技术一直发挥着重要作用. 操控模式已从最初的人工判读卫星地图来规划行驶路线, 发展为依靠地面系统分析遥现场环境来规划行驶路线. 随着星表探测器智能化水平的提高, 操控模式和理念逐步向天地一体、虚实融合的方向发展.

2.2.1 月球表面巡视探测机器人的操控

苏联于1970年11月发射的Lunar-17携带Luno-

khod-1月球探测器,第一次使用月球车在月表进行巡视探测任务,开启了星表着陆勘测的历史.1973年1月发射的Lunar-21将Lunokhod-2月球探测器成功送至月球.这两辆月球车可在地面操作人员的控制下行走,并对月表进行勘探.安装其上的摄像机可以拍摄周围环境的照片,根据这些图像信息,操作人员可以得出环境中的障碍物信息、路径可行性等分析结果.摄像机获取的图片和操作人员上传的指令都需要由通信传输系统实现,在当时带宽的条件下难以保证实时性.且下传的图像质量低,操作人员对环境的分析不精确,难以完成高精度的操作任务.但在自主能力不强的条件下,这种操控模式能够保证较为安全的巡视探测过程.

20世纪70年代,美国实现了多次载人登月的空间探测任务.其中的阿波罗月球车(Lunar Roving Vehicle)是美国“阿波罗”计划中第15~17三次任务中使用的载人月球车.阿波罗月球车具备导航功能,能够指示行驶的大致位置和方向,航天员可依靠人工判读卫星影像来规划探测路线,实现月面勘察任务;地面控制中心可以根据卫星影像和下行数据辅助支持航天员开展探测活动.

上述美苏两国的探月任务都在20世纪70年代进行,且时至今日鲜有展开持续性的后继工作.当时的操控技术过于简易,难以面向当前各国重新提及的各类探月计划.基于人工智能技术实现星表巡视探测任务的智能化操控水平,成为当前研究与应用的可行潜在方向.随着各国航天水平的差异化发展,我国近年来成功实施多项探月活动,为后续计划和智能操控技术的发展提供了丰富的经验^[44].

在“嫦娥三号”^[45]、“嫦娥四号”^[46]任务中,“玉兔号”和“玉兔二号”月球车在地面操控的支持下开展巡视探测任务,由北京航天飞行控制中心作为巡视探测的地面遥操作中心,负责任务数据通讯、遥现场环境感知、探测任务规划、巡视导航、路径规划与指令生成等工作^[47].与过去月球巡视探测车相比,玉兔系列月球车具有更高的智能化水平.一方面,为完成月球车的大范围探测任务,基于人工智能方法实现了快速任务规划的建模与求解^[48];另一方面,为了保证行进的安全性,基于立体相机获得的视觉反馈信息,实现了精确的自主定位^[49].

上述智能化方法在玉兔系列月球车上成功进行了验证,与传统的规划与控制方法相比,表现出更高的性

能,这表明智能化方法在星表巡视探测任务中具有良好的应用前景.从探月的角度出发,其他国家近些年并没有展开月表巡视探测和取样返回等各类任务,总的来说,智能方法在该领域的应用尚未积累充分的经验和达到较高的水平,应用方向目前停留在视觉信息处理和顶层任务设计方面,尚未在决策控制与大型智能系统等领域中有实际的应用,亟待进一步的发展.各国月球车如图7所示.

2.2.2 火星表面巡视探测机器人的操控

和月球探测任务相比,火星探测任务面临更大的时延和极端星表环境,这要求火星车具有更高的自主能力和安全保障措施.

以美国2004年火星探测漫游者(Mars Exploration Rover, MER)计划的火星车^[50,51]为代表,操控系统采用了地面遥操作和自主模式相结合的方式,这种方式能降低时延的影响,并降低通信传输系统的负担.即地面的操作人员仅需对任务进行高级规划,火星车搭载的计算机系统能实现自主导航^[52]与决策并产生动作序列^[53],使探测域更广、执行效率更高.当火星车执行任务时,收集相应的环境图像信息,并进行地形障碍等的分类训练,提升了火星车的行进能力^[54].与MER火星车类似,2012年的“好奇号”火星车,其工作目标、任务实施流程沿用了相同的探测模式,但性能

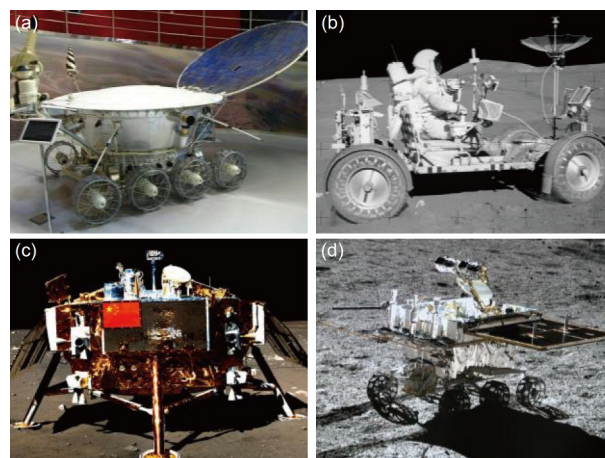


图7 (网络版彩图)月球表面巡视探测任务. (a) 苏联月球车; (b) 阿波罗月球车; (c) 嫦娥系列探测任务; (d) 玉兔系列月球车

Figure 7 (Color online) Lunar surface patrol and exploration missions. (a) Soviet lunar rover; (b) Apollo moon rover; (c) Chang'e series of exploration missions; (d) Yutu series of lunar rovers.

方面有较大提升^[55]。好奇号火星车的导航定位中增加了车辙摩斯码等新特征,使得地面遥控操作中心能够更加精确地定位火星车的行驶轨迹和状态,并且加强了火星车探测方向的中长期规划的能力^[56],且同样具备基于图像的地形分类能力^[57]。

2021年,美国实施了最新的火星探测任务,成功将毅力号火星巡视器送至火星。毅力号火星车的任务目标是探寻火星古老生命的迹象,并将观测和采集结果打包存储,以便后续的火星探测任务将这些资料返回地球^[58]。毅力号火星车增加了一些新功能,使其能够在之前无法降临的着陆点着陆。同时增加了一套相机和声音采集装置,使其能够捕获下降和着陆时的影音信息^[59]。此外,携带的小型旋翼无人机能够验证旋翼飞机在地外行星稀薄空气中的性能^[60]。

中国的火星探测任务也正在顺利进行。2021年中国首个火星车“祝融号”成功着陆火面,并开展了各项高效的巡视探测任务^[61,62]。“祝融号”火星车在火面移动采用地面规划加火面自主的移动模式,每一步移动都依靠地面规划控制完成,巡视过程包括感知、移动和探测三个阶段^[63]。针对环境感知计算量大影响行走效率的问题,“祝融号”火星车验证了立体视觉算法,实现了高效率避障行走^[64]。在通信传输方面,图像压缩软件在大时延带宽有限的情况下有效降低了误码率^[65]。同时,为了保证火星车的安全行走与规划,实现了基于多源影像的高精度定位方法^[66]。上述智能算法有效提高了“祝融号”火星车的自主智能决策水平。各火星巡视探测器如图8所示。

2.3 星表采样机器人操控发展现状

利用探测器在地外星球表面就位采样和开展样品成分分析是人类深度认知星球表面成分和结构的重要方式。以美苏为代表的航天强国针对月球、火星实现了就位探测与采样、月球样品返回等任务。1970年苏联发射的“月球16号”探测器,成功从月球表面取回101g月壤,是世界上首次完成的星表采样与返回任务。而美国2007年发射的“凤凰号”火星探测任务则是最为典型的星表采样分析任务,其探测器着陆于火星的北极地区,携带机械臂、各类相机、高温气体分析仪、显微镜、电化学和导电率分析仪等设备,目标是通过长期的观测分析和采样分析,实现火星北极地区微生物生存环境的考察。面对非结构化星表环境探测的复

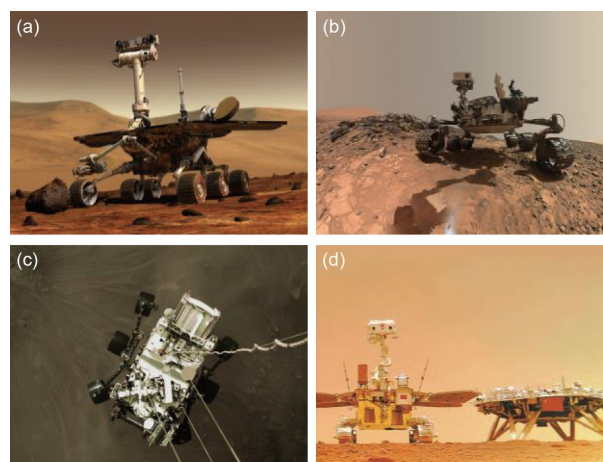


图8 (网络版彩图)火星表面巡视探测器。(a) 勇气号火星车; (b) 好奇号火星车; (c) 毅力号火星车; (d) 祝融号火星车
Figure 8 (Color online) Mars surface rover. (a) Spirit rover; (b) Curiosity rover; (c) Perseverance rover; (d) Zhu Rong rover.

杂任务要求,并受机械臂自主操作能力的限制,通常利用地面规划控制的方式辅助完成采样和各类操作任务。本节针对“凤凰号”、“洞察号”和“嫦娥五号”探测任务中机械臂采样过程的地面遥控支持方式进行论述。

2.3.1 “凤凰号”火星探测器的机械臂采样操控

MER火星车具备一定的采样能力,但“凤凰号”火星车的不同在于,其停留在固定的位置而重点关注垂直采样^[67,68]。“凤凰号”火星探测器的地面操控系统是探测器序列和可视化程序(rover sequencing and visualization program, RSVP)^[69],能根据全景图像数据指定目标位置,通过命令子序列来模拟机械臂运动、检测碰撞、估计命令持续时间,并上传完整的命令序列文件至探测器。该操控系统在很大程度上依赖于地表的立体成像仪和机械臂相机的成像数据,这些数据可以生成机械臂工作空间的数字高程模型(digital elevation maps, DEM),并用来定义机械臂的活动目标,如挖掘、样本采集、岩石推动等。

2.3.2 “洞察号”火星探测器的仪器安放操控

“洞察号”火星探测器配有仪器部署系统(instrument deployment system, IDS)、科学载荷以及安装在探测器上的辅助外围设备^[70]。在部署科学载荷之前,洞察号探测器的地面操控团队需要获得相应坐标系下

工作区的地形信息, 并生成双目拼接图像从而得到工作区的数字高程图DEM, 审查后选择出放置科学载荷最合适的地点. IDS的操控团队通过构建序列, 将科学载荷放置在仪器展开臂的工作区中. 由于地震试验仪等仪器安防的精度要求较高, 因此需要在地面根据洞察号获取的火面图像重建火面作业的半物理现场, 通过地面验证仪器安防过程后再将完整的指令序列文件上传至探测器执行^[71].

2.3.3 “嫦娥五号”月球探测器的采样操控

“嫦娥五号”月球探测器采样是我国首次从地外星表获得样本, 也是我国首次使用遥操作技术在月球表面实施复杂的机械臂操控类任务^[72]. 地面遥操作中心综合利用机械臂采样任务规划、多特征融合视觉定位、机械臂采样最优构型设计和月面采样虚拟仿真等技术, 对采样过程进行全程规划、构型求解、对准环节视觉定位引导. 为了对月面采样过程的实时跟踪监视, 地面遥操作中心建立了基于虚拟仿真的采样三维可视化系统, 能够实时呈现月面的采样工作实况和关键性测控数据, 并预示机械臂规划的全程轨迹、机械臂及其他活动机构的下一步动作以及当前状态与下一步状态的偏移量, 监督机械臂每一步动作的安全性和合理性, 为嫦娥五号月面安全高效采样提供了关键支撑^[73,74]. 各星表采样机器人如图9所示.

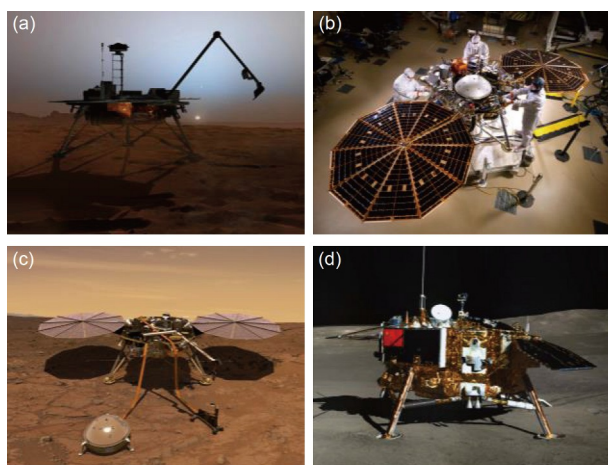


图9 (网络版彩图)星球表面采样机器人. (a) 凤凰号机械臂采样; (b) 洞察号地面实验; (c) 洞察号就位采样; (d) 嫦娥五号月表采样

Figure 9 (Color online) Planet surface sampling robot. (a) Sampling of the Phoenix robotic arm; (b) Insight ground experiment; (c) sampling in place of Insight; (d) Chang'e 5 Moon surface sampling.

2.4 空间作业操控任务的主要特点

综上, 空间作业操控技术成为在轨结构组装、空间垃圾清理、卫星维护等服务任务和星表巡视、采样等探测任务的重要支撑技术与重点发展方向. 面对不同任务的操控系统组成复杂, 涉及计算机、通信、测控、机器人、人机交互等多个学科的交叉, 同时空间作业操控过程又具有时延大、通信带宽有限、任务可操作时间短、人在回路等显著的特点, 是当前实时高效、高可靠性操作任务的重要支撑手段. 空间作业操控的特点及典型应用实例见表1.

3 空间智能操控关键技术

空间操控技术的应用场景包括在轨服务、星表环境勘测、星表岩壤采样等任务, 需要面临天地主从端通信时延、空间环境恶劣与非结构化等各种挑战, 会给地面操作人员的合理操控带来困难. 一方面, 时延问题使操作人员不能实时获取空间机器人系统反馈回来的图像、力等信息, 会造成对环境模糊和不真实的感受, 无法准确对机器人当前的状态做出判断并发送操作指令; 另一方面, 粗糙的视觉与图像处理技术使操作人员不能够对未知的非结构化的环境有清晰的感知, 控制指令不能够精准实现期望的空间操作任务. 针对这些问题, 需要解决大时延、非结构化环境下空间作业操控过程的智能感知与信息融合、任务规划、人机交互、预测仿真等关键技术.

3.1 智能感知与信息融合技术

在轨服务任务、星表巡视与采样任务中, 空间作业操控过程都将面临复杂、多变、非结构化的未知环境, 使得任务过程存在很大的不确定性, 尤其是在天地通信时延较大的技术背景下, 通过智能感知并融合多源信息实现环境建模, 对后续的任务规划、人机交互等都具有重要意义. 具体而言, 面对复杂的星表环境, 探测器需要配备多传感器以实现对外部环境的自主感知; 为实现对更大区域的探测, 探测器要能够根据传感器信息对星表资源进行辨别区分; 为实现多探测器协同工作, 需要多个探测器的综合感知信息与多类传感器的融合感知. 主要的研究内容包括: (1) 复杂非结构化环境的适应性感知技术, 需要探测器具备多源传感器

表 1 空间作业操控的特点及典型应用实例分析

Table 1 Characteristics of space operation control and analysis of typical application examples

特点	示例	原因	影响
空间作业系统与地面控制系统通信时延大	ROTEX整个回路时延为5~7 s; 玉兔2号月球车整个回路时延30~60 s; 火星车单程时延约在3~22 min之间	距离远及信号回路中转处理的影响; 中继星中转代传, 遥测数据解析、打包和下传准备时间长; 距离远, 信号传输时间长, 利用火星轨道器中转	给控制的稳定性带来挑战; 给控制过程的安全性监视带来影响; 只能进行开环控制, 地面难以干预控制过程
星地回路之间测控与通信带宽有限	早期的ETS-VII上行遥控信道速率为4 kbps, 支持下传5 fps的图像数据, 目前国际空间站的数据传输速率可达到600 Mbps; 嫦娥四号中继星数据传输速率为0.5~32 kbps; 火面直接与地面数据传输速率小于32 kbps, 我国祝融号火星车的数据传输速率仅有16 kB/s	测控及通信技术的进步, 使得天地通信速率快速提升, 能够支持多路视频图像和大量数据的实时传输; 中继星中转传输, 定向数传能力有限; 火面与地面直接通信困难, 数据传输速率低, 可借助火星轨道器中转提升数据传输效率	早期信道传输速率影响操控安全性, 随着测控上行速率和数据下传效率的逐步提升, 在近地条件下逐步能够支持空间操作状态的连续追踪与操控; 给数据获取的实时性造成很大影响; 影响火面数据的获取效率
用于操控任务的执行时间短	ETS-VII单次操控弧段为20 min; 我国空间站的单次测控弧段为几分钟到30 min不等	空间机器人轨道周期短且相对速度高; 全球测控站少, 能支持空间站测控的中继星少	短时间限制无法完成复杂的操控任务; 为了保证操作过程的安全性和可监视性, 一个复杂的任务需要拆分在多个弧段中完成
人在闭环控制系统中	操控人员通过人机交互接口发送指令; 操控人员进行感知、规划、验证等操作, 确保操作任务的安全性	机器人的复杂操作过程需要地面人员干预和辅助完成; 机器人智能自主的能力水平较低, 无法实现对环境的自主感知与行为的自主规划	操作员的操作水平影响任务完成质量; 地面的自主化和智能化水平影响探测任务实施效率

信息融合、探测器自主定位与导航、星表力学特性适应等能力, 以保证探测器在差异性环境中运动的安全性; (2) 探测过程对环境的成熟性感知, 通过传感信息, 对环境中物体进行辨别和分类, 收集并建立星表环境与资源数据, 实现探测器对环境辨识能力不断提升。

3.2 空间智能操控任务规划技术

任务规划技术包括对操控任务的分解、决策、路径规划、执行和感知等过程。其中各层功能为: 任务分解层接受任务输入并对任务进行详细的数学建模, 且进一步分解成多个子任务; 任务决策层能够实现对各个子任务优先级的排序; 路径规划层要针对具体的子任务, 结合机器人的能力限制与环境约束等, 在笛卡尔空间或关节空间生成机器人的可执行路径; 任务执行层需要将各子任务的轨迹序列自动生成控制指令, 发送给空间机器人执行; 任务感知层需要结合空间机器人的视觉、力觉传感器, 将图像和力等反馈信息下传给地面。综述任务规划技术的分层次要求, 需要实现的功能包括: (1) 具备自动任务规划能力, 降低对操作人员的要求; (2) 能够适应不同的空间作业操控任务和模式; (3) 路径规划要满足自主性、快速性、安全性; (4) 能够对空间机器人的当前状态进行直观显示, 提高可操作性。

3.3 具有临场感的人机交互技术

临场感技术是空间作业操控人机交互技术的核心, 是指系统一方面把本地操作人员通过肢体、头部等产生的运动状态作为控制指令发送给空间机器人系统, 同时又把机器人的运动信息和与环境作用时得到的视觉、力觉等感知信息反馈给操作人员, 并使其生理上产生相应的感受, 以此提高判断和控制的准确性。临场感技术可以使操作人员快速直观了解空间机器人的工作状态, 提高空间机器人的操控性能。通过更先进的临场感技术, 操作人员可以将人类的智慧和操作经验更好地拓展到空间任务中, 辅助机器人实现稳定准确的空间作业, 从而极大扩展空间机器人在复杂环境中的应用范围。主要研究内容包括: (1) 人机交互表示模型与设计方法; (2) 遥现场信息的可用性分析与评估; (3) 各感官多通道协同交互技术; (4) 人机相互认知与智能人机交互技术; (5) 虚拟环境中的友好交互与沉浸式操控技术。

3.4 基于数字孪生的预测仿真技术

由于空间作业操控的距离较远且通信的带宽有限, 因此空间机器人与地面之间的信号传输必然会有较大的时延, 这会影响操控系统的稳定性和实时性。

为了降低时延问题对遥操作的影响, 当前主要采用 Move-Wait 的模式, 即操控人员给机器人发送控制指令之后, 等待机器人完成动作并反馈回运动和力觉信息后, 再发送下一指令。这种操作方式会显著增加任务执行的代价, 且难以适应复杂的操控任务。通过建立空间机器人系统的精确数字孪生模型, 对时延过程机器人的运动作出预测, 并辅助力、视觉等交互手段, 可以克服时延带给操作人员的错误感官, 从而建立高效的空作作业操控回路, 实现地面人员对空间复杂任务的全程指导。基于数字孪生的预测仿真系统需要具有状态预测、可视化仿真、模型参数辨识、碰撞检测等能力。主要的内容包括: (1) 高沉浸感的数字孪生仿真技术; (2) 虚实融合和增强现实技术; (3) 空间机器人运动的碰撞检测技术; (4) 高精度系统建模与动力学预测技术; (5) 参数辨识与模型实时修正技术。

4 空间作业操控的智能化发展趋势

随着人工智能技术的飞速发展与应用, 机器人在空间中的能力呈现出自主化、智能化、群体化的发展趋势, 地面操控也呈现出新的发展特点, 逐渐由当前依靠地面规划为主的操控模式向在轨行为自主、地面综合规划指导的方向发展。然而从当前人工智能技术在机器人领域的应用情况来看, 未来很长一段时间内机器人将继续以单一功能的智能化为主, 机器人的感知、认知、规划与决策能力远不及人类, 复杂的空间机器人探测与操作类任务仍然长期需要依靠地面的人工支持, 人在回路的操控模式仍然是提升机器人探测与操作能力、确保任务执行可靠性的有效手段。但是充分利用人工智能技术, 将会给空间机器人的操控模式带来很大的转变, 有效提高任务执行的效率。

人工智能涉及的研究方向和内容较为广泛, 目前并没有明确统一的定义。大体来说, 人工智能假借计算机模拟人类智能, 附加各类传感器件和执行元件, 赋予机电系统以一定程度的智能化水平, 是多学科交叉的研究领域。就其研究内容而言, 可以分为专家系统、计算机视觉、自然语言处理、机器人学、机器学习等多个方面; 就其智能化程度而言, 可分为弱人工智能、强人工智能、超级人工智能三个层次。

人工智能技术在航天领域的应用从20世纪60年代开始, 已经发展了半个世纪之久。专家系统是首先用在

航天系统中的人工智能技术, 为了便于工程师对火箭进行故障诊断和判别, 美国在“阿波罗”计划中首次使用了专家系统。但当任务复杂时, 专家系统的单一推理方法无法满足智能化需求。这一时期, 具有智能化水平的空间机器人系统发展迅速, 尤其在各种月球和火星探测任务中应用广泛。在执行此类星表探测任务时, 使用了诸如视觉定位、地形分类、任务规划等多种人工智能技术, 有效提升了机器人操控的智能化水平。而近些年随着大数据、云计算、深度学习等人工智能技术的迅猛发展, 其在航天领域的应用范围也在快速扩大。

但目前人工智能在航天中的应用还处在较低水平, 以弱人工智能为主, 以强人工智能作为长期研究目标。根据世界各国航天领域的发展规划, 未来空间作业操控的应用场景将会集中在月球基地建设、深空天体资源探测与开发等方面, 而空间作业操控的智能化发展将会呈现出自主学习、虚实融合、混合与群体智能的特征, 具体的内涵如下:

4.1 月球基地建设和深空天体探测牵动空间作业操控的智能化

现阶段世界各国航天任务仍以少量的探测器为主, 各探测器都具有明确的空间作业目标。伴随着以阿尔忒弥斯为代表的世界各国月球探测计划的推进, 空间作业操控正在成为月球基地建设和深空天体探测的核心能力支撑, 在众多应用场景需求迫切, 包括多探测器复杂飞行过程的自主智能规划、探测器的精准着落与大范围勘察、保障人员长期驻留的星表基地智能化管理、原位资源开采与利用、多类别机器人协同工作与自主学习、基地设施的多机器人协同组装与建造。可以看出, 此类航天操控任务对系统的智能化水平提出了极高的要求, 研究智能技术在空间作业操控中的应用愈加重要。

4.2 赋予空间机器人学习能力以不断提高操控智能化水平

空间机器人不仅需要具有自主探测与操作的能力, 未来还需要具有在轨或在星球表面长期持续学习的能力, 空间机器人需要在执行任务的过程中不断学习各类技能来提升自身感知、规划、决策、控制以及环境适应的水平。而在此过程中, 地面人员的遥操作规

划与控制决策成为空间机器人学习的有效输入, 强力支撑其探测与操作任务技能的提升. 同时, 针对复杂任务还要能够实现多个机器人的同步在线学习, 学习人类的协同操作技能, 提升多机器人或机器人群体的协同作业智能化水平.

4.3 构建智能化数字孪生体以实现虚实融合远程操控模式

将数字孪生技术与智能技术深度融合, 通过构建智能化的数字孪生体, 可以建立孪生支持下的空间机器人虚实融合远程操控系统. 基于数字孪生系统, 能设计从虚拟空间到真实空间的技能迁移学习策略, 即通过数字孪生体在虚拟环境中进行技能学习训练与迁移应用, 来提升空间机器人实体的实际任务操作能力, 实现空间机器人实际操作能力和数字孪生模型的同步进化.

4.4 推广单一智能为混合智能与集群智能以提高系统性能

从现阶段智能技术应用水平出发, 未来的更大规模、更为复杂的空间作业操控任务仍需要人在回路的操控模式, 因此智能技术需要从机器智能扩展成人机协同的智能. 计算机能够存储海量数据并进行高速搜索与计算, 人类在环境感知、推理与决策等方面更加高效, 因此综合人机智能的优势, 发展混合智能可赋

予机器人系统更强的能力. 另一方面, 单一机器人难以处理复杂大规模的任务, 多机器人配合工作也将成为未来空间作业操控的重要模式.

综上所述, 面向月球和行星探测、卫星在轨维修与延寿为主体的未来空间作业操控任务, 地面远程操控技术会随着空间机器人应用的智能化发展而不断更新, 正向天地一体、孪生支持、虚实融合、智能学习的方向发展, 智能化发展路线图如图10所示. 地面远程操控将成为空间机器人学习人类技能、提升智能化水平的重要手段. 对空间机器人地面操控系统的体系化探索与深化研究, 能够为发展空间机器人智能化探测与灵巧操作技术、构建新的航天器操控模式提供良好的支撑.

随着空间机器人在空间中应用的逐步增多, 空间作业操控技术迅猛发展, 并具有广阔的应用前景. 展望未来, 作为综合性多学科交叉研究领域, 其发展仍面临一系列的技术挑战. 面向后续在轨服务、月球基地建设和深空天体探测等任务, 结合当前的理论与技术发展, 实现空间作业操控的智能化仍需开展进一步研究空间作业系统、天地信息系统和地面操控人员之间的高度融合机理与互动模型, 从基础理论研究方面揭示跨时空大数据的高度融合机理与融合交互规律, 突破以下关键技术: (1) 多模态信息融合感知; (2) 脑机接口与融合控制; (3) 人机融合与混合智能; (4) 操作技能迁移学习; (5) 多功能精细化灵巧操控; (6) 多机器人

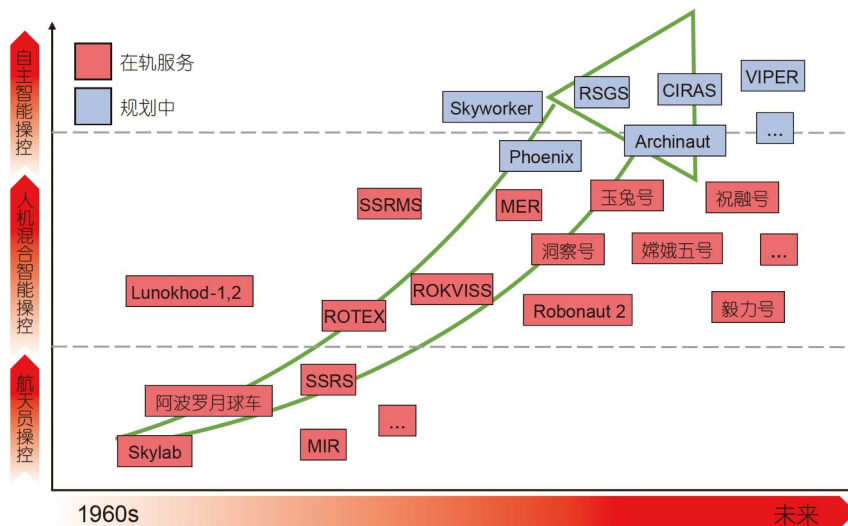


图 10 (网络版彩图)空间作业操控智能化发展趋势

Figure 10 (Color online) The development trend of intelligent space operation control.

协同与集群智能; (7) 数字训练与平行推演等. 构建环境数据、对象行为、时间规律和人类认知相结合的地面智能操控系统, 通过空间多模态数据的长期聚合处理分析和操作技能的持续学习, 实现空间环境、探测行为及规律的增量式学习认知与空间机器人长周期自主探测的持续赋能.

5 结论

空间智能操控技术能够将人类的智慧和操控经验

拓展应用到空间机器人本体上, 辅助机器人完成复杂空间任务和实现精准操作, 能够有效提高空间机器人的性能和应用范围, 将会随着人机混合智能技术的发展, 在在轨服务、星表深度探测等领域发挥更多的作用. 本文回顾了国内外空间作业操控技术发展的研究现状, 分析了空间操控技术的智能化发展趋势, 概括了大时延、非结构化环境下空间智能操控所需要重点研究的智能感知与信息融合、智能任务规划、人机交互、预测仿真等关键技术, 可为后续我国的空间探测智能操控的发展提供参考.

参考文献

- 1 Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Prog Aerospace Sci*, 2014, 68: 1–26
- 2 Gao Y, Chien S. Review on space robotics: Toward top-level science through space exploration. *Sci Robot*, 2017, 2: aan5074
- 3 Xue Z, Liu J, Wu C, et al. Review of in-space assembly technologies. *Chin J Aeronaut*, 2021, 34: 21–47
- 4 Wang M M, Luo J J, Yuan J P, et al. In-orbit assembly technology: Review (in Chinese). *Chin J Aeronaut*, 2021, 42: 523913 [王明明, 罗建军, 袁建平, 等. 空间在轨装配技术综述. *航空学报*, 2021, 42: 523913]
- 5 Xue Z H, Liu J G. Review of space manipulator control technologies (in Chinese). *Robot*, 2022, 44: 107–128 [薛智慧, 刘金国. 空间机械臂操控技术研究综述. *机器人*, 2022, 44: 107–128]
- 6 Zhang Y X, Huang J, Han L L. Research status of planetary surface mobile exploration robots: Review (in Chinese). *Chin J Aeronaut*, 2021, 42: 523909 [张元勋, 黄靖, 韩亮亮. 星表移动探测机器人研究现状综述. *航空学报*, 2021, 42: 523909]
- 7 Aikenhead B A, Daniell R G, Davis F M. Canadarm and the space shuttle. *J Vacuum Sci Tech A-Vacuum Surfs Films*, 1983, 1: 126–132
- 8 Jorgensen G, Bains E. SRMS history, evolution and lessons learned. In: *AIAA Space Conference & Exposition*. 2011. 7277
- 9 Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, et al. Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features. *IEEE Trans Robot Automat*, 1993, 9: 649–663
- 10 Hirzinger G, Landzettel K, Fagerer C. Telerobotics with large time delays-the ROTEX experience. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Munich, 1994. 4998129
- 11 Brunner B, Hirzinger G, Landzettel K, et al. Multisensory shared autonomy and tele-sensor-programming-key issues in the space robot technology experiment ROTEX. In: *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Yokohama, 1993. 2123–2139
- 12 Gibbs G, Sachdev S. Canada and the International Space Station program: Overview and status. *Acta Astronaut*, 2002, 51: 591–600
- 13 Matsueda T, Kuraoka K, Goma K, et al. JEMRMS system design and development status. In: *IEEE National Telesystems Conference*. Atlanta, 1991. 391–395
- 14 Boumans R, Heemskerk C. The European robotic arm for the International Space Station. *Robot Autonom Syst*, 1998, 23: 17–27
- 15 Rembala R, Aziz S. Increasing the utilization of the ISS Mobile Servicing System through ground control. *Acta Astronaut*, 2007, 61: 691–698
- 16 Wakabayashi Y, Morimoto H, Satoh N, et al. Performance of Japanese robotic arms of the international space station. *IFAC Proc Volumes*, 2002, 35: 115–120
- 17 Belghith K, Nkambou R, Kabanza F, et al. An intelligent simulator for telerobotics training. *IEEE Trans Learn Technol*, 2011, 5: 11–19
- 18 Abiko S, Yoshida K, Shoji K, et al. Performance improvement of JEMRMS in light of vibration dynamics. In: *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS05)*. Munich, 2005. 1–8
- 19 Kitajima Y, Hattori H, Ueno H, et al. Development and realtime monitor of JEM robotics operation ground observatory (ROGO). In: *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*. 2010. 851–858
- 20 Coleshill E, Oshinowo L, Rembala R, et al. Dextre: Improving maintenance operations on the International Space Station. *Acta Astronaut*, 2009,

64: 869–874

- 21 Aziz S. Development and verification of ground-based tele-robotics operations concept for Dextre. *Acta Astronaut*, 2013, 86: 1–9
- 22 Beerthuizen P G, Kruidhof W. System and software safety analysis for the ERA control computer. *Reliab Eng Syst Saf*, 2001, 71: 285–297
- 23 Landzettel K, Preusche C, Albu-Schaffer A, et al. Robotic on-orbit servicing-DLR's experience and perspective. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006. 4587–4594
- 24 Preusche C, Reintsema D, Landzettel K, et al. Robotics component verification on ISS ROKVISS-preliminary results for telepresence. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006. 4595–4601
- 25 Landzettel K, Albu-Schäffer A, Brunner B, et al. ROKVISS verification of advanced light weight robotic joints and tele-presence concepts for future space missions. In: 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA). 2006
- 26 Albu-Schaffer A, Bertleff W, Rebele B, et al. ROKVISS—Robotics component verification on ISS current experimental results on parameter identification. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, 2006. 3879–3885
- 27 Wen H. Tiangong-2 space laboratory achieved multiple “first-time” verifications (in Chinese). *Aerosp China*, 2016, 11: 4–7 [文汇. 天宫二号空间实验室实现多项“首次”验证. 中国航天, 2016, 11: 4–7]
- 28 Liu D Y, Liu H, Li Z Q. Calibration strategy of space manipulator system on-orbit servicing fine operation. *J Astronaut*, 2017, 38: 630–637 [刘冬雨, 刘宏, 李志奇. 空间机械臂手系统在轨精细维修操作的标定策略. 宇航学报, 2017, 38: 630–637]
- 29 Liu H, Li Z Q, Liu Y W, et al. Key technologies of TianGong-2 robotic hand and its on-orbit experiments (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 1313–1320 [刘宏, 李志奇, 刘伊威, 等. 天宫二号机械手关键技术及在轨试验. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1313–1320]
- 30 Li C, Jiang Z, Li Z, et al. A novel semi-autonomous teleoperation method for the Tiangong-2 manipulator system. *IEEE Access*, 2019, 7: 164453–164467
- 31 Fan C, Xie Z, Liu Y, et al. Manipulator trajectory tracking of fuzzy control based on spatial extended state observer. *IEEE Access*, 2020, 8: 24296–24308
- 32 Ku L Y, Rogers J, Strawser P, et al. A framework for dexterous manipulation. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Madrid, 2018. 18361645
- 33 Ku L Y, Learned-Miller E, Grupen R. Associating grasp configurations with hierarchical features in convolutional neural networks. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vancouver, 2017. 2434–2441
- 34 Baker W, Kingston Z, Moll M, et al. Robonaut 2 and you: Specifying and executing complex operations. In: IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts. Austin, 2017. 17155152
- 35 Badger J M, Strawser P, Farrell L, et al. Robonaut 2 and Watson: Cognitive dexterity for future exploration. *IEEE Aerospace Conference. Big Sky*, 2018. 17878193
- 36 Diftler M A, Mehling J S, Abdallah M E, et al. Robonaut 2—The first humanoid robot in space. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, 2011. 2178–2183
- 37 Oda M, Kibe K, Yamagata F. ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minncapolis, 1996. 739–744
- 38 Oda M, Doi T. Teleoperation system of ETS-VII robot experiment satellite. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Grenoble, 1997
- 39 Yoon W K, Goshozono T, Kawabe H, et al. Model-based teleoperation of a space robot on ETS-VII using a haptic interface. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, 2001. 407–412
- 40 Reintsema D, Thaeter J, Rathke A, et al. DEOS—the German robotics approach to secure and de-orbit malfunctioned satellites from low Earth orbits. In: i-SAIRAS Aerospace Exploration Agency (JAXA). Sapporo, 2010. 244–251
- 41 Jia P, Liu H Y, Li H. Development analysis of DEOS (in Chinese). *Aerosp China*, 2016, 6: 24–29 [贾平, 刘海印, 李辉. 德国轨道任务服务系统发展分析. 中国航天, 2016, 6: 24–29]
- 42 Liang B, Li C, Xue L J, et al. A Chinese small intelligent space robotic system for on-orbit servicing. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2006. 4602–4607
- 43 Gao X H, Jin M H, Xie Z W, et al. Development of the Chinese intelligent space robotic system. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006. 994–1001
- 44 Li Q Z, Jia Y, Peng S, et al. Top design and implementation of the lunar rover mission planning (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2017, 4: 58–65

- [李群智, 贾阳, 彭松, 等. 月面巡视探测器任务规划顶层设计与实现. 深空探测学报, 2017, 4: 58–65]
- 45 Li C, Liu J, Ren X, et al. The Chang'e 3 mission overview. *Space Sci Rev*, 2015, 190: 85–101
- 46 Jia Y, Zou Y, Ping J, et al. The scientific objectives and payloads of Chang'E-4 mission. *Planet Space Sci*, 2018, 162: 207–215
- 47 Wu W R, Zhou J L, Wang B F, et al. Key technologies in the teleoperation of Chang'E-3 "Jade Rabbit" rover (in Chinese). *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 425–440 [吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 425–440]
- 48 Gao W, Cai D B, Zhou J P, et al. Activity planning method for Chang'E-3 "Jade Rabbit" rover (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2017, 43: 277–284 [高薇, 蔡敦波, 周建平, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器行为规划方法. 北京航空航天大学学报, 2017, 43: 277–284]
- 49 Ma Y Q, Liu S C, Sima B, et al. A precise visual localisation method for the Chinese Chang'e-4 Yutu-2 rover. *Photogram Rec*, 2020, 35: 10–39
- 50 Crisp J A, Adler M, Matijevic J R, et al. Mars exploration rover mission. *J Geophys Res*, 2003, 108: 8061
- 51 Bajracharya M, Maimone M W, Helmick D. Autonomy for mars rovers: past, present, and future. *Computer*, 2008, 41: 44–50
- 52 Maurette M. Mars rover autonomous navigation. *Autonomous Robots*, 2003, 14: 199–208
- 53 Alexander D A, Deen R G, Andres P M, et al. Processing of Mars Exploration Rover imagery for science and operations planning. *J Geophys Res*, 2006, 111: E02S02
- 54 Halatci I, Brooks C A, Iagnemma K. A study of visual and tactile terrain classification and classifier fusion for planetary exploration rovers. *Robotica*, 2008, 26: 767–779
- 55 Vasavada A R. Mission overview and scientific contributions from the Mars Science Laboratory Curiosity Rover after eight years of surface operations. *Space Sci Rev*, 2022, 218: 14
- 56 Zhang C, Ono M, Lanka R. Multiresolution partitioned gaussian process regression for terrain estimation. In: IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2018
- 57 Chakravarthy A S, Roy R. MRSCAtt: A spatio-channel attention-guided network for Mars rover image classification. In: IEEE/CVF Conference On Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Nashville, 2021. 1961–1970
- 58 Farley K A, Williford K H, Stack K M, et al. Mars 2020 mission overview. *Space Sci Rev*, 2020, 216: 142
- 59 Maki J N, Gruel D, McKinney C, et al. The Mars 2020 engineering cameras and microphone on the perseverance rover: A next-generation imaging system for Mars exploration. *Space Sci Rev*, 2020, 216: 137
- 60 Balam J, Aung M M, Golombek M P. The ingenuity helicopter on the perseverance rover. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 56
- 61 Li C, Zhang R, Yu D, et al. China's Mars exploration mission and science investigation. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 57
- 62 Zou Y, Zhu Y, Bai Y, et al. Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission. *Adv Space Res*, 2021, 67: 812–823
- 63 Zhang H, Lu H, Yu T Y, et al. Teleoperation technology of Zhurong Mars Rover (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2021, 8: 582–591 [张辉, 卢皓, 于天一, 等. “祝融号”火星车遥操作技术. 深空探测学报, 2021, 8: 582–591]
- 64 Mao X Y, Miao Z F, Chen J X, et al. Parallel design and implementation of stereo vision algorithm of Zhurong Mars rover (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2022, 9: 202–210 [毛晓艳, 苗志富, 陈建新, 等. “祝融号”火星车立体视觉算法并行设计与实现. 深空探测学报, 2022, 9: 202–210]
- 65 Zhu J B, Xu Y, Wang C L, et al. Image compression software design for Zhurong Mars exploration rover (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2021, 8: 503–510 [朱剑冰, 徐勇, 王翠莲, 等. “祝融号”火星车图像压缩软件的设计与实现. 深空探测学报, 2021, 8: 503–510]
- 66 Wang J, Li D F, He X M, et al. High precision localization of Zhurong rover based on multi-source images (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2022, 9: 62–71 [王稼, 李达飞, 何锡明, 等. 基于多源影像的“祝融号”火星车高精度定位. 深空探测学报, 2022, 9: 62–71]
- 67 Shotwell R. Phoenix—The first Mars scout mission. *Acta Astronaut*, 2005, 57: 121–134
- 68 Trebi-Ollennu A, Volpe R, Bonitz R, et al. *In situ* robotic arm operations. *IEEE Robot Automat Mag*, 2006, 16: 34–43
- 69 Wright J, Hartman F, Cooper B, et al. Driving on Mars with RSVP. *IEEE Robot Automat Mag*, 2006, 13: 37–45
- 70 Trebi-Ollennu A, Kim W, Ali K, et al. InSight Mars lander robotics instrument deployment system. *Space Sci Rev*, 2018, 214: 93
- 71 Bailey P, Sorice C, Trebi-Ollennu A, et al. Deployed instrument monocular localization on the InSight Mars lander. In: IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2020
- 72 Hu H, Pei Z Y, Li C L, et al. Overall design of unmanned lunar sampling and return project—Chang'e-5 mission (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1275–1286 [胡浩, 裴照宇, 李春来, 等. 无人月球采样返回工程总体设计——嫦娥五号任务. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1275–1286]
- 73 Liu C K, Li J, Zhang T Z, et al. Key technologies in the teleoperation of the Chang'e-5 lunar sampling (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2022, 52: 473–

488 [刘传凯, 李剑, 张天柱, 等. 嫦娥五号月面采样遥操作中的关键技术. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 473–488]

- 74 Hu X D, Zhang K, Xie Y, et al. Path planning of lunar surface sampling manipulator for Chang'E-5 mission (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2021, 8: 564–571 [胡晓东, 张宽, 谢圆, 等. “嫦娥五号”月面采样机械臂路径规划. 深空探测学报, 2021, 8: 564–571]

Development and prospects of space intelligent operation

ZHANG Zhe^{1,5}, LIU ChuanKai^{2,3}, WANG MingMing^{3,4}, LUO JianJun^{3,4}, WU LiMing^{3,4} & CHEN Nuo^{3,4}

¹ Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100190, China;

² Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

³ Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;

⁴ School of Astronautics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

⁵ School of Astronautics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

The space environment is intricate and complex; thus, it is difficult for astronauts to complete various space tasks out of the capsule. The use of space robotic manipulation technology can extend the operational capability of astronauts and effectively improve the level of autonomy and intelligence of space operations. This study introduces the concept and connotation of space operation manipulation and the current situation of space robotic manipulation technology application and development at home and abroad and analyzes the characteristics of space robotic manipulation technology in three types of scenarios, namely, on-orbit service, star surface inspection, and star surface sampling. On this basis, the frontier key technologies involved in intelligent sensing and information fusion, mission planning, prediction, and simulation are summarized, and the intelligent development trend of space operation manipulation technology is proposed in light of future space exploration needs.

space manipulation, on-orbit service, planetary exploration, artificial intelligence, robot

doi: [10.1360/SST-2022-0090](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0090)