

# 空间机器人的遥操作

李 成 梁 斌

(北京控制工程研究所, 2729 信箱 36 分箱, 北京 100080)

**摘 要:** 本文分析了空间机器人遥操作的特点, 时延对空间机器人遥操作的影响, 总结了空间机器人遥操作的指令模式和控制模式, 展望了空间机器人遥操作的发展前景。

**关键词:** 空间机器人; 遥操作; 时延

**中图分类号:** TP242; V448.132 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2001)01-0095-04

## TELEOPERATION OF SPACE ROBOTICS

Li Cheng Liang Bin

(Box 2729-36, Beijing 100080)

**Abstract:** This paper summarize the characteristics, the influence of time-delay, the instruction modes and control modes of space robotics teleoperation, forecast its developing prospect.

**Key words:** Space robotics; Teleoperation; Time-delay

### 1 引言

随着人类空间活动的不断发展, 随着航天飞机、宇宙飞船和空间站的建立, 空间机器人技术越来越受到各国的重视。在未来的空间活动中, 将有大量的空间生产、空间加工、空间装配、空间维护和修理工作进行。这样大量的工作不可能仅仅依靠宇航员完成, 必须充分利用空间机器人。空间工作需要在一个了解不多而且不可控的环境中工作, 因此, 发展地面遥操作技术可以大大减小宇航员从事危险工作的代价和成本。美国 NASA 指出, 到 2004 年, 50% 的在轨和行星表面工作将通过遥操作空间机器人实现<sup>[1]</sup>。1999 年 8 月召开的中国空间机器人及遥操作科学技术研讨会, 针对我国空间机器人的发展计划, 也建议应着重从事具有大时延的遥操作技术的研究<sup>[2]</sup>。

根据执行任务的不同, 目前在太空中使用的空间机器人有三种类型, 舱外机器人服务系统在近地轨道的航天器舱外完成各种操作任务。科学载荷机器人服务系统在可控环境中, 完成科学实验操作任务。行星表面考察机器人系统对行星表面进行科学考察, 包括采集土壤和岩石样本、观察行星地形地貌等任务。

收稿日期: 1999-11-18, 修回日期: 2000-09-19

作者简介: 李成 (1972-), 男, 控制理论与控制应用专业博士后, 研究方向为空间机器人控制、遥操作、多维系统动态校正

## 2 空间机器人遥操作的特点

空间机器人遥操作与地面机器人遥操作有很多不同<sup>[1]</sup>。在地面上,遥控机器人一般包括如下特征:用于水下和核环境中;限制在实时人工控制范围内;对工作环境了解较多、非重复性任务;有限的可维护性。

与之相比,空间机器人遥操作具有如下特征:同时需要遥操作及自动控制;对工作环境有部分了解;非重复性任务;任务环境模型不完整;操作者与操作手之间存在变化的时延;灵巧、轻便、柔性的操作手;复杂的运动学和动力学关系;新型运动机构;对遥操作设备的后勤服务能力有限;受到热、辐射、真空、变化的光照环境、对目标视觉条件有限等因素影响;可以从突发事件中自动恢复(包括系统故障及错误)。

空间机器人遥操作中最主要的问题是空间与地面通讯中的时间延迟以及有限的数据传输带宽<sup>[3]</sup>。通讯延迟包括遥控指令的延迟和遥测信号的延迟,主要由光传播速度造成。时延对空间机器人最大的影响是使连续遥操作闭环反馈控制系统变得不稳定(在指令反馈控制系统中,由于指令发送的间断性,所以时延不会造成闭环系统的不稳定)。同时存在时延下,即使操作者完成简单工作也需要比无时延情况下长的多的时间,这是由于操作者为避免系统不稳定,必须采取“运动-等待”的阶段工作方式。

总而言之,下个世纪的空间机器人必须比目前的空间机器人对突发事件的反应更灵活,强调遥操作人机器人项目并忽略人在太空中的重要性,而是要找到在给定任务目标的条件下人和机器人最佳的任务组合。

## 3 空间机器人的遥操作方式

空间机器人遥操作方式根据操作地点可以分为空间遥操作和地面遥操作两种。空间遥操作由宇航员在轨道飞行器上进行控制,地面遥操作在地面控制站进行。相对来说,空间遥操作环路时延很小,基本上对操作效果没有什么影响。

### 3.1 空间机器人遥操作指令方式

遥操作控制指令由操作员向遥点操作器发送,目前空间机器人遥操作的指令发送方式主要有以下几种<sup>[1]</sup>:

程序模式遥操作,这种方式简便安全,适合大多数目标精确定义的空间机器人操作。缺点在于不连续的末端力控制和对命令轨迹的安全检查。

手控器模式遥操作,将手控器的位置变化连续传送给空间机器人,在板计算机将此数据作为机械手末端轨迹进行解码并对机器人进行控制。空间遥操作中大多采用了这种指令方式。它的缺点与程序模式遥操作基本相同。

协调模式遥操作,将程序指令和手控器运动数据同时连续发送给空间机器人,手控器的作用是使操作员可以随时干预指令执行过程以处理突发事件。这种方式融合了程序模式和手控器模式,避免了上述两种方法的缺点,但仍存在低控制频率问题。

### 3.2 空间机器人遥操作控制方式

空间机器人遥操作控制方式根据机器人智能程度的高低可以将其分为纯粹遥操作、半自主遥操作和自主遥操作<sup>[4]</sup>,而空间机器人也由此分为三代。目前使用的空间机器人系统多

采用纯粹遥操作和半自主遥操作,正在研制的行星表面考察机器人将采用自主遥操作的工作方式。

纯粹遥操作,又称主-从遥操作。这种控制方式下的机器人智能程度较低,需要操作员发送详细的工作指令,指令发送一般采用手控制器,遥操作质量由操作员决定,不仅要花费很长时间训练操作员,而且操作员工作时劳动强度大,易疲劳,难以完成高精度操作。

半自主遥操作,又称共享遥操作。在这种控制方式中,机器人控制系统具有一定的智能程度,工作目标的部分自由度(或部分工作目标)由操作员控制,而其它的自由度(或工作目标)则由控制系统控制。这种控制模式减轻了操作员的工作强度,大大提高了工作效率。

自主遥操作,又称监测遥操作。在这种控制方式中,遥点机器人智能具有分层结构,人的智能能够在机器智能的各个层级上输入。监控遥操作系统一般包括三个回路:远程回路、监控回路和本地回路。远程回路利用传感器反馈信息,自主完成操作现场的工作目标。监控回路包括操作员在内,估计机器人系统的工作效能,设立新的工作目标,而且在必要时由人直接控制机器人的动作。本地回路利用各种遥操作技术,提供遥点机器人状态和工作环境,预报下一个动作。监测控制技术的应用,将操作员排除在远程工作回路之外,避免了时延的影响,同时操作员又可随时干扰遥点机器人的工作情况,不仅可以大大提高遥操作机器人的工作效率,而且增加了遥操作系统的灵活性。

### 3.3 空间机器人地面遥操作技术

地面遥操作中,操作员可能在一个环境未知、轨迹不确定的情况下工作,需要调整由于地面模型和空间模型不匹配所造成的各种误差,因此操作员必须可以对空间的工作情况随时进行干预。由于时延的存在,地面遥操作一般采用“移动-等待”或监测控制的工作方式,造成系统动态性能差,难以实现连续操作和精细操作。为此人们研究了各种人机界面技术帮助操作员了解遥点的环境和工作情况,提高遥操作的工作效率。不同的技术在辅助完成不同的工作时效果也有所不同。NASA 进行的实验表明,在接近和移动 ORU 时,预测显示技术辅助下的工作时间最短,而在插入 ORU 时,力反馈技术辅助下的工作时间最短<sup>[7]</sup>。

在遥操作系统中,手控制器将操作员的操作、控制意图准确传递给遥点机器人,同时把机器人的受力状态逼真地反馈给操作员的双重任务,它的动作灵巧性和处理复杂操作的能力和效率是自主操作所无法比拟的。在紧急情况处理中,手控操作更具重要性。手控制器包括滑杆、空间鼠标、空间球、关节型和直角坐标型等多种形式。

目前,3D 预测仿真图形是解决大时延遥操作的主要方法,日本的 ETS-VI,德国的 RO-TEX 和美国 NASA 进行的遥操作实验都采用了这一方法<sup>[3,4,5,6,9,10]</sup>。预测显示系统利用计算机图象处理方法估计系统未来状态。目前有两种类型的预测器,一种基于系统当前状态和时间延迟来估计系统未来状态,例如,泰勒序列外插方法。另一种将系统当前状态和时间延迟输入一个模型,估计未来时刻的控制信号。在信号时延大于 0.5s 和图象显示速度小于每秒 4 帧的情况下,预测显示器的作用非常明显。

力反馈系统在具有力接触的工作环境中具有重要的作用,通常采用与手控制器结合或计算机显示的形式实现。大时延下的力反馈与视觉反馈有所不同,时延后的反馈力不能直接

施加到操作员的控制手上,因为这相当于给控制附加了一个干扰分量。实验结果表明,直接力反馈和双力反馈方式在完成“接触—抓取”工作时表现良好。日本 ETS-VII 科学实验卫星在进行地面遥操作实验时,采用了多种力反馈技术辅助遥操作,包括可视化预测力方法、基于预测力的地面遥控制、可视化力反射和力调节控制方法。

虚拟现实系统,是指通过计算机对真实环境的运动进行模拟计算,并通过图形显示(或触觉、听觉显示)系统和交互接口设备,合成的信息交互界面。通过虚拟现实技术建立交互控制界面,可以实现临场感交互界面;可以作为先进的仿真工具,将虚拟环境同预测技术相结合进行预测显示;可以利用合成技术进行增强现实显示。虚拟现实技术需要精确的环境模型,在环境状态未知时无法采用。

#### 4 总结和展望

空间机器人技术是人类进军太空的基础之一,在高度自主的智能机器人技术尚未成熟之前,遥操作技术正在成为空间机器人技术研究的热点。由于受经济因素和后勤保障的限制,我国建造的空间实验室只能是短期有人照料,长期无人看护的工作状态。这时,充分利用遥操作空间机器人进行舱内科学实验的维护和照料就显得十分必要。同时,对月球的探测和开发也要利用到遥操作空间机器人。这都要求我们必须尽快展开对大时延下空间机器人遥操作技术的研究。

可以预见,随着计算机技术、传感器技术和机器人控制技术的发展,空间机器人遥操作技术及理论也将不断发展,这必将有助于我国空间技术的进步,促使我国逐渐从一个空间大国走向空间强国。

#### [参 考 文 献]

- [1] 国家高技术航天领域遥科学及空间机器人专家组. 空间机器人与遥科学资料选编, 1998
- [2] 国家高技术航天领域遥科学及空间机器人专家组. 空间机器人及遥科学技术研讨会论文集, 1999
- [3] Overview of Space Telerobotics. Progress in Astronautics and Aeronautics. V161
- [4] Toward Advanced Teleoperation in Space. Progress in Astronautics and Aeronautics. V161
- [5] Teleoperation: From the Space Shuttle to the Space Station. Progress in Astronautics and Aeronautics. V161
- [6] Overview of Space Telerobotics. Progress in Astronautics and Aeronautics. V161
- [7] Oda Mitsushige. Study of the Coordinated Control of the Satellite Attitude and the Satellite Mounted Robot Arm. NASDA English Translation. 1998
- [8] Thomas B. Sheridan. Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis. IEEE Trans. RA, 1993, 5 (9): 592-606
- [9] Toru Kasai. Results of the ETS-7 Mission-Rendezvous Docking and Space Robotics Experiments. Proc. Fifth Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 1999, 299~306
- [10] Kohtaro Matsumoto. Teleoperation Control of ETS-7 Robot Arm for On-Orbit Truss Construction. Proc. Fifth Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 1999, 313~318