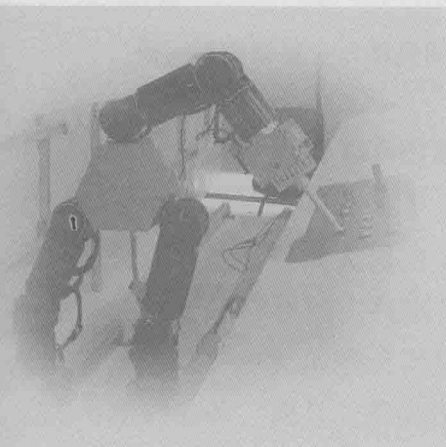




空间站多臂机器人 运动控制研究

Motion Control of Multi-arm
Robot in Space Station

◎ 李 辉 蒋志宏 著



空间站多臂机器人 运动控制研究

Motion Control of Multi-arm
Robot in Space Station

© 李辉 蒋志宏 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

空间站多臂机器人运动控制研究/李辉, 蒋志宏著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 3

ISBN 978 - 7 - 5682 - 6758 - 8

I. ①空… II. ①李…②蒋… III. ①空间机器人 - 运动控制 - 研究 IV. ①TP242. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 034167 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 10.5

责任编辑 / 杜春英

字 数 / 139 千字

文案编辑 / 杜春英


版 次 / 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 55.00 元

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前 言

空间站机器人不受人类生理条件限制，利用其辅助或代替航天员在恶劣空间环境下进行空间探测是空间站发展的必然选择，是欧美俄等航天大国的重点发展方向，也是我国未来空间站发展的重要战略领域。我国拟 2020 年前后建成空间站，目前空间站运行维护主要依赖航天员。然而 50% 的航天员在空间站会出现运动病症状，而且长期处于微重力环境中可能导致航天员出现多种生理、病理现象，从而严重危害航天员的身体健康。同时，空间强辐射及高速碎片等环境也会威胁航天员的生命安全。机器人宇航员具有与航天员类似的外形，可以在不改变空间站环境的情况下辅助或代替航天员完成多种任务，是美国、俄罗斯、欧盟和中国等航天强国的研究重点。因此，用机器人宇航员辅助甚至代替航天员进行空间站维护与值守具有重大意义。

大范围移动作业是制约机器人宇航员辅助或代替航天员进行空间站维护与值守的难题。空间站舱内空间狭小，很难安装专用装置（如滑轨等）实现机器人大范围移动，因此，机器人宇航员必须自身具有大范围移动的能力，才可能实现像航天员一样对空间站多种设备和仪器进行操作，实现空间站的少人化和无人化。然而，设计能够在空间站进行大范围维护作业的机器人十分困难。

作者大量分析和总结了空间站机器人领域内各类最新文献，并以自己的博士论文，以及国家自然科学基金、国家“863 计划”、

国家科技支撑计划等项目的研究成果为基础，提出了一种多臂空间站服务机器人，为实现机器人在空间大范围运动与作业提供了一种可能的解决方案。作者系统性整理了多臂空间站服务机器人的机构设计、运动学、动力学和移动作业控制等内容，著成此书。该书撰写过程中倪文成、魏博、莫洋、孙泽源、程凌博做了大量工作，同时得到了国家自然科学基金（61733001、61573063、61873039、U1713215）的资助，特此感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏或者不当之处，恳请读者批评指正。

作者

2018年12月



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究空间站机器人的意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	3
1.3 本书的主要内容	14
第 2 章 空间站多臂机器人机构设计	16
2.1 空间站多臂机器人仿生设计分析	16
2.2 空间站多臂机器人机械机构	22
第 3 章 空间站多臂机器人冗余自由度多臂协调规划	27
3.1 空间站多臂机器人移动作业能力分析	27
3.2 空间站多臂机器人运动学	33
3.3 双臂协调冗余 8 自由度移动作业	37
3.4 基于空间网格划分的冗余自由度的全局轨迹优化	50
3.5 三臂协调移动作业规划	56
第 4 章 基于双前馈空间站机器人的关节控制	64
4.1 空间站多臂机器人动力学模型	64
4.2 关节电动机动力学模型	71
4.3 双动力学前馈控制策略	85

第 5 章 基于视觉的目标识别与定位算法	93
5.1 基于 Retinex 的图像增强	94
5.2 基于图像全局特征库的目标识别	97
5.3 基于图像局部兴趣点的目标识别	107
5.4 基于双目视觉的目标定位	115
第 6 章 空间站多臂机器人运动柔顺控制	119
6.1 柔顺作业控制任务分析	120
6.2 柔顺控制策略选择	128
6.3 基于遗忘因子函数的阻抗控制策略	129
6.4 控制系统中关节反馈出现误差累积的原因与解决方案	149
参考文献	154

第 1 章

绪 论

1.1 研究空间站机器人的意义

机器人不受人类生理条件限制，利用其辅助或代替航天员在恶劣环境下进行空间利用和探测是空间站自动化技术发展的必然选择，是欧美俄等航天大国的重点发展方向，也是我国未来空间站发展的重要战略领域。我国拟在 2020 年前后建成规模较大、长期有人参与的国家级太空实验室，并逐步发展成中国空间站^[1-3]。国家需要基于空间站进行大量观测、探测、研究等工作，以在全球占领空间技术的有利战略位置，对整体提升综合国力将起到至关重要的作用。目前空间站运行绝大部分依赖航天员，有安全风险。50% 的航天员在空间站会出现运动病症状，而且长期处于微重力环境中可能导致航天员出现多种生理、病理现象，从而严重危害航天员的身体健康。同时，空间强辐射及高速碎片等环境也会威胁航天员的生命安全。每次出舱任务都是以航天员的健康和生命安全风险为代价，并且经济、时间、人力成本巨大。用机器人辅助甚至代替航天员能够提高效率，有重大意义^[4-8]。

空间站的建设与发展,需要航天员完成大量的维修与维护操作并进行科学实验:在空间站建设过程中,需要进行许多质量高达二三十吨舱体的搬运和装配工作;在空间站运营发展过程中,航天员需要进行大量的维护作业和科学实验,如舱体、太阳翼、实验平台等的观测、照料、维修和实验作业等。由于空间环境极其恶劣,如微重力、真空、强辐射、高低温、振动和冲击等,这些与地面截然不同的空间环境因素会极大地影响航天员的生理、心理健康^[9~11]。生理方面,太空失重会导致航天员肌肉质量和体积明显减小,易疲劳,同时发生肌肉力量减小等功能性变化^[12,13],而太空辐射会对航天员的视网膜产生危害,导致白内障,还会对航天员的DNA造成危害,引起细胞变异,甚至发生癌变^[14]。心理方面,航天员空间值守将长期处在与世隔绝的空间站中,密闭狭小的空间舱、静寂无声的太空环境、规定好的交际方式、与地面有限的联系及失重所造成的不适感等会引发航天员一系列的心理问题,如厌倦、抑郁、思念亲人和人际关系紧张等^[15~17]。这一系列的生理、心理问题会极大地影响航天员的作业效率和工作能力。而机器人不受人类生理、心理条件的限制,同时有强于人类的负载能力和作业精度,空间机器人辅助甚至代替航天员在恶劣环境下进行空间利用和探测,能够极大地提高工作效率,降低风险,是未来空间站技术发展的必然选择,具有重要意义^[18]。

鉴于上述原因,很多国家和地区都在积极开展空间机器人技术的研究,逐渐采用空间机器人辅助甚至代替航天员执行一些空间作业。加拿大臂Ⅱ由加拿大斯帕公司研制,从1998年开始部件入轨与安装,是目前功能最完备、体积最大、技术最先进的大型空间机械臂,在国际空间站建设、发展和运营期间,加拿大臂Ⅱ在大质量舱体捕获、对接组装和辅助航天员出舱活动等方面发挥了重要作用^[19,20],但其灵巧作业能力差,需航天员出舱进行维护作业。考虑到航天员出舱危险且代价大,研制了专用双臂机器

人 SPDM (Special Purpose Dexterous Manipulator)^[21], 以降低航天员出舱频次。但是, 在微重力环境下双臂机器人 SPDM 完成特定的预设任务也非常困难^[22], 仍需要一定数量的航天员在空间站值守并不定期进行舱外危险作业。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 研制的 Robonaut 2 是太空中第一个人形机器人, 已于 2011 年登上国际空间站^[23], 正在验证其空间智能作业技术, 最终 Robonaut 2 机器人有望接管国际空间站人类航天员所从事的最危险、机械化或者复杂性工作^[24,25]。然而, 空间微重力环境下, 机器人航天员作业运动模态及动力学特性与地面重力环境截然不同^[26,27], 同时空间杂散光及辐射等环境对机器视觉等传感器的影响巨大^[28], 导致 Robonaut 2 在空间站辅助航天员灵巧作业存在诸多挑战^[29]。德国和俄罗斯也在集中力量研发机器人航天员 Justin 和 SAR-401^[30,31], 其目标是实现机器人航天员在空间站环境下辅助或代替航天员进行维护作业。空间机器人可以辅助航天员进行空间作业, 扩展其维护作业区域, 对国家空间技术的发展有着极其重要的推动作用。因此, 随着我国空间站事业的发展, 发展空间机器人装备技术已经有了十分紧迫的应用需求。

空间站工作环境特殊, 舱内外结构环境复杂, 常规的机器人构型并不是最适用于空间站移动作业的构型方式。此外, 机器人在空间站微重力环境中进行移动作业, 对机器人的安全性、稳定性要求较高, 也对机器人移动与作业运动规划提出了更高的要求。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

空间机器人可以长期在空间环境中工作。另外, 空间机器人的作用不仅仅局限于辅助或代替航天员完成部分空间操作, 更重要的是它能扩展人类进行空间操作的能力。空间机器人在负载能力、精确定位能力和环境适应能力上都优于人类, 可以完成诸如

空间站舱体装配、精密设备空间安装、有害环境下的空间实验等人类无法胜任的空间操作。

由于空间机器人的适应性和高效性，其已经成为人类探索、开发和利用太空的重要手段，在空间站建设与发展中扮演着重要的角色。美国、加拿大、俄罗斯、欧共体以及日本等都在积极推进空间机器人的研究。国内如中国空间技术研究院、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学 and 北京理工大学也进行了这方面的研究。

1.2.1 空间单臂机器人国内外研究现状

1. 德国 ROTEX 空间机器人

德国空间研究所的空间机器人 ROTEX，是典型的舱内服务机器人，如图 1.1 所示。ROTEX 具有 6 个自由度，工作空间有 1.5 m^3 ，安装在空间实验室的导轨上^[32,33]。在其手爪上安装有多个传感器：触觉阵列、六轴力/力矩传感器、抓取力传感器、激光探测器和立体摄像机等。此外在机器人操作空间上方还装有两台摄像机，用于提供操作空间的视觉信息^[34,35]。

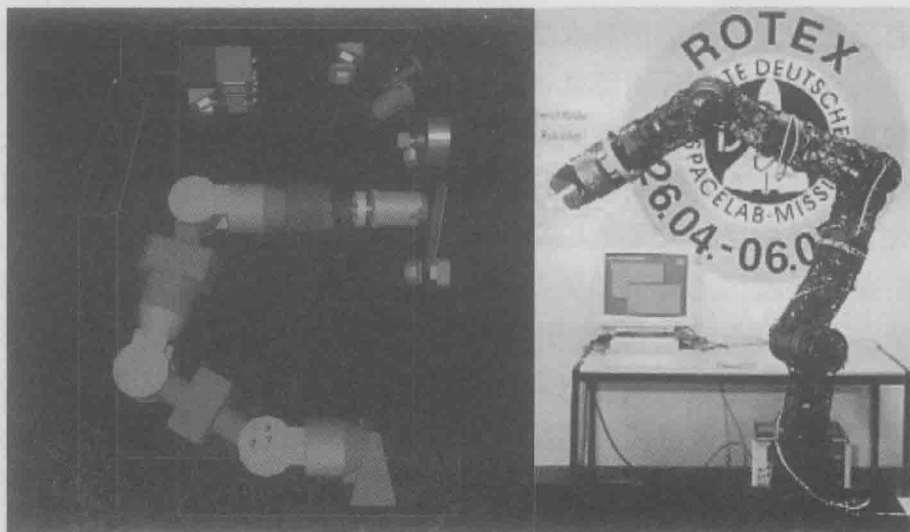


图 1.1 舱内服务机器人 ROTEX

1993年4月,ROTEX搭乘美国“哥伦比亚”号航天飞机进行了多种操作实验,包括航天员借助立体视觉摄像头进行在轨遥操作、借助预测仿真系统进行地-空遥操作、基于传感器进行离线编程操作。在这些操作模式下,机器人成功完成了各种插头的连接/分离、结构组装以及浮游物体抓取等实验^[36]。该研究首次验证了机器人代替航天员完成在轨操作任务的可能性。

2. 德国 ROKVISS 机械臂

2005年1月,德国研制的ROKVISS机械臂发射至空间站,并安装在国际空间站俄罗斯服务舱内^[37]。ROKVISS机械臂除了执行空间站舱外作业任务,还可以在卫星上执行各种操作任务。ROKVISS在国际空间站运行的主要目的在于验证高集成、小质量模块化关节以及从自动控制到地面远程控制模式下机械臂的运行性能^[38-41]。ROKVISS的主要机构如图1.2所示,机器人整体机构较为简单,且体积较小,仅有两个关节、一个长50cm的手指及两个内置照相机。

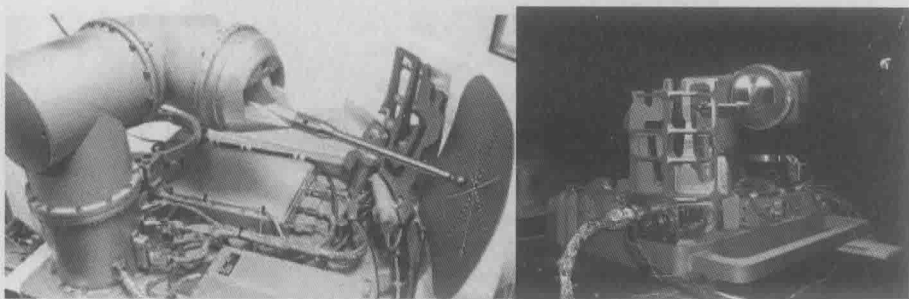


图 1.2 德国 ROKVISS 机械臂

3. 加拿大 SRMS 机械臂

美国航天飞机的机械臂SRMS(Shuttle Remote Manipulator System)由加拿大斯帕公司研制,也称为加拿大臂,如图1.3所示。加拿大臂是人类历史上第一套空间机械臂,自1981年随“哥伦比亚”号航天飞机投入使用以来,完成了辅助卫星入轨、

维护故障卫星、修复及升级哈勃太空望远镜、转移和支持航天员舱外作业、国际空间站的在轨建设以及国际空间站在轨操作的观测辅助任务^[42,43]。

加拿大臂的制作材料主要是碳纤维，具有较高的强度，已经有三组设备分别应用在美国不同的航天飞机上。加拿大臂由三个关节和两个臂杆组成6自由度机械臂系统（包括肩关节俯仰、偏航自由度，肘关节俯仰自由度，腕关节俯仰、偏航及滚转自由度），具体构型如图1.3所示。加拿大臂长15 120 mm，直径为330 mm，质量为410 kg，空间负载能力为29 t，空载下移动速度为60 cm/s，满载下移动速度为6 cm/s，航天员可以在航天飞机内通过操作手柄控制机械臂运动，负载情况下末端位置精度为 ± 50.8 mm，姿态精度为 $\pm 1^\circ$ ，可完成对目标载荷的精细操作^[44,45]。加拿大臂肘部和腕部安装了相机，肘部相机可为操作臂及作业目标提供可视画面，腕部相机可为末端执行器和捕获机构的操作提供辅助。

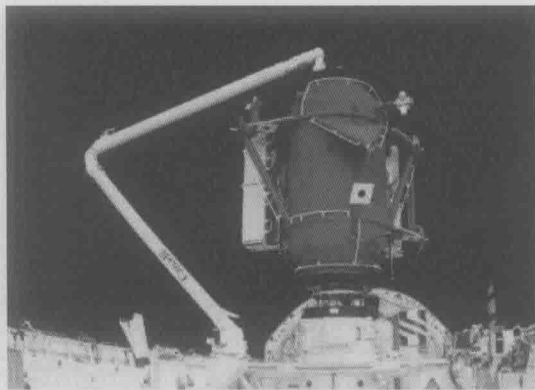


图 1.3 加拿大斯帕公司研制的加拿大臂

加拿大臂采用航天员在轨操作方式进行控制，航天飞机内的航天员通过舱内机器人工作站操作加拿大臂，加拿大臂的操作模式包括自动模式、手动增强模式、单关节驱动模式、直接驱动模式和备份驱动模式。

4. 加拿大 SSRMS 机械臂

SSRMS 由加拿大斯帕公司研制, 于 1998 年开始部件入轨与安装, 主要用于执行大型有效载荷和 ORU 的相关操作任务, 如停泊与脱离、机动及与其他机器人系统共同执行控制转移操作任务^[46,47]。SSRMS 可以在作业过程中对 SPDM 进行定位, 提供 EVA 支持, 进行国际空间站的外部检查以及自由飞行器的捕获和轨道停靠和脱离^[20]。

如图 1.4 所示, 空间站遥操作机械臂系统 SSRMS 是由 6 自由度航天飞机远程机械臂 SRMS 演变而来的机械臂系统 (故又称为加拿大臂 II), 操作灵活性大为提高。机械臂臂长 17 600 mm, 臂直径为 350 mm, 质量为 1 800 kg, 空间负载能力为 116 t, 平均能耗为 435 W, 共有 7 个自由度 (包括肩关节俯仰、偏航及滚转自由度, 肘关节俯仰自由度, 腕关节俯仰、偏航及滚转自由度)。机械臂可通过任意一端附着在空间站上作为基座进行固定基作业操作。机械臂末端位置精度为 45 mm, 空载最大移动速度为 37 cm/s, 满载移动速度为 1.2 cm/s, 可操作的最大载荷为 116 t。有 4 个摄像头, 配备有触觉传感器, 具有自动视觉捕捉、自动避撞等功能^[48]。



图 1.4 国际空间站上的加拿大臂 II

航天员根据反馈的实时视频图像,通过机器人操作台(Robot Work Station, RWS)操作面板、手柄等设备实现对 MSS 的操作控制。近年来,对于部分常规例行检查任务, MSS 主要通过地面遥操作的方式进行控制,以减轻航天员的工作负担。

5. 欧空局 Eurobot 机器人

欧空局(全称欧洲航天局, European Space Agency, ESA)主持研制的三臂爬行机器人 Eurobot 是多臂空间爬行机器人的典型代表^[49,50]。如图 1.5 所示,它由 3 个大小和力量与人类手臂相似的 7 自由度机械臂组成,在每个手臂的末端装有一台相机。该机器人共有 4 种末端执行机构,通过机械臂末端快速更换接口可以实现不同末端执行机构的快速更换^[51]。当安装手爪时,机器人可以通过对空间站上的 EVA 把手进行牢固抓握和 3 个臂的交替移位实现其空间站的移动,到达工作位置后,可以根据执行任务的不同,安装不同的执行机构来完成任务,所有的执行机构都装在机器人的身上。该机器人由蓄电池提供动力源,并且可在轨进行替换^[52]。



图 1.5 欧空局 Eurobot 机器人

6. 欧洲臂(ERA)

1994 年 4 月,欧洲航天局与俄罗斯航天局合作研制欧洲臂(European Robotic Arm, ERA)项目,用于维护国际空间站俄罗

斯舱段的运行^[53]。如图 1.6 所示, ERA 是第二个到达 ISS 的机器人系统, 欧洲臂由 2 个臂杆和 7 个关节组成, 共有 7 个自由度。该机械臂机构对称, 两端分别是肩部和腕部, 各有 3 个自由度(俯仰、偏转和转动自由度), 通过 2 个碳纤维材料的臂杆和 1 个肘部转动关节把肩部和腕部连接在一起。机械臂臂长 11.2 m, 自重 630 kg, 末端最大移动速度为 10 cm/s, 定位精度可达 5 mm, 最大可操作载荷为 8 t。ERA 在俄罗斯舱段主要用于安装、展开或更换太阳动力平台上的太阳翼, 操作有效载荷以及辅助航天员执行出舱维修任务^[54,55]。

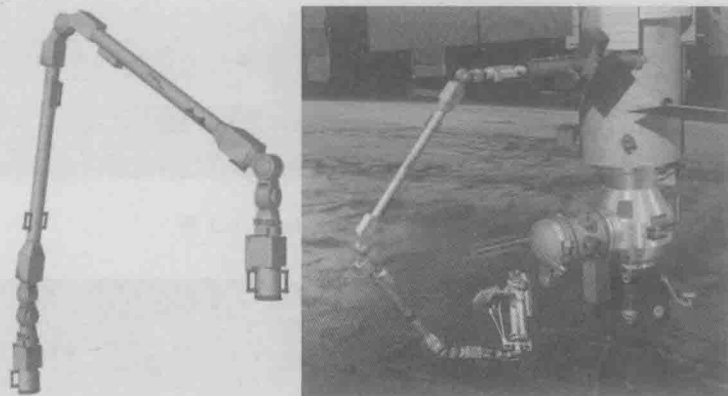


图 1.6 欧洲臂

机械臂工作时, 一个末端固定作为基座, 另一个末端执行操作任务; 爬行运动通过两个末端交替在舱外附着点上运动实现。欧洲臂上共有 4 个相机和 4 个照明单元, 每个末端执行器上和每个臂上都分别有 1 个, 以精确运送执行出舱作业任务的航天员到达作业位置。在摄像机的辅助下, 欧洲臂可以完成关节、任务空间运动行为, 并完成靠近运动等^[56]。它主要有全自动模式、部分人工模式和全人工模式 3 种模式。

(1) 全自动模式: 操作者使用由单个命令组成的专用任务命令集和自动序列来控制 ERA。

(2) 部分人工模式: 操作者使用预先编程的通用微小自动序

列来控制 ERA。

(3) 全人工模式：操作者直接控制 ERA 单关节的旋转或笛卡儿空间参数。

7. 国内空间单臂机器人研究现状

图 1.7 所示为中国航天科技集团公司五院总体部研制的大型空间机械臂，是由 7 个模块化关节、2 个臂杆和 2 个末端执行器组成的 7 自由度冗余机械臂系统，机械臂全长 10 m，最大负载为 25 t，具有类似空间站遥操作机械臂系统 SSRMS 的自主爬行及扩展能力，通过头尾互换可以实现机械臂大范围空间的灵活应用，通过爬行达到每一个角落。可进行地面遥操作，机械臂配备 3 台视觉相机，肩部、肘部、腕部各 1 台，肩部和腕部相机可对目标实现识别和位姿测量功能，肘部相机具有视频监视功能。该机械臂主要用于未来中国空间站建造、日常维护和部件更换、维修任务^[57]。



图 1.7 中国空间机械臂

1.2.2 空间站多臂机器人国内外研究现状

单臂空间机器人能够完成的任务有限，很多复杂的任务无法完成，因此，针对空间复杂结构环境以及移动作业任务需求，设计适合空间站移动作业的多臂机器人也是当前空间机器人研究的重点，如仿人机器人 Robonaut 2、仿生机器人 SpiderFab 等。