

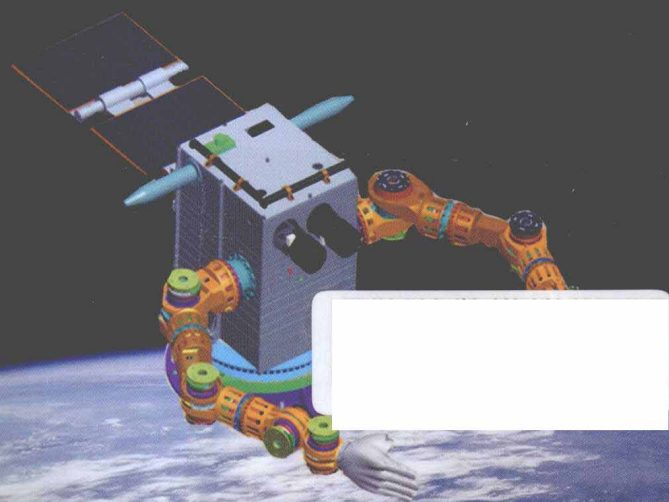


国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书
先进制造理论研究与工程技术系列

SPACE ROBOT AND TELEOPERATION

空间机器人及其遥操作

● 刘宏 刘宇 姜力 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

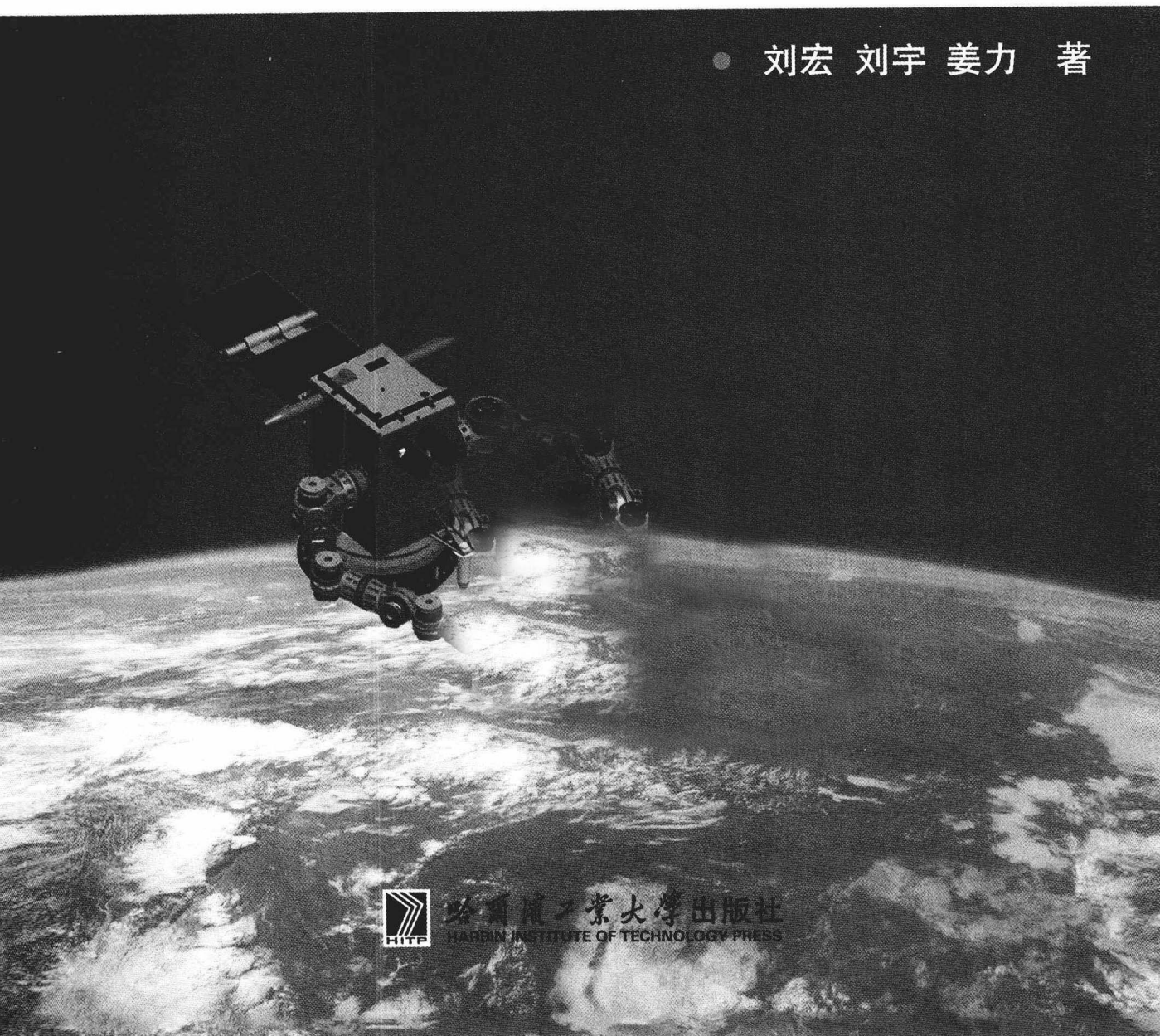


国家出版基金资助项目 · “十二五”国家重点图书
先进制造理论研究与工程技术系列

SPACE ROBOT AND TELEOPERATION

空间机器人及其遥操作

● 刘宏 刘宇 姜力 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书著者结合多年来对空间机器人研制的经验,从机构、传感、驱动、控制及空间环境适应性方面,系统地阐述了空间机器人研制的关键技术及工程特点。以此为基础,开展了空间机器人运动学、动力学、地面测试及标定等相关理论和试验的研究,并论述了空间机器人的遥操作技术。

本书可作为从事空间机器人研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

空间机器人及其遥操作/刘宏等著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2012. 9
ISBN 978—7—5603—3806—4

I. ①空… II. ①刘… III. ①空间机器人
IV. ①TP242. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 233098 号

责任编辑 田 秋 孙 杰
封面设计 高永利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451—86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19.5 字数 450 千字
版 次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3806-4
定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序

机器人技术作为 20 世纪人类最伟大的发明之一,从 20 世纪 60 年代以来,历经近半个世纪的发展取得了长足的进步。从早期的示教在线机器人,带感知的机器人到今天的智能机器人,各种用途的机器人已经广泛地应用在人类社会生活的各个领域。工业机器人技术逐渐走向成熟,各种用途的特种机器人走向实用化,这些都预示着机器人技术在 21 世纪有着灿烂的明天。

空间机器人一直是先进机器人领域的一个重要研究方向。近年来,由于人类对宇宙空间的探索活动越来越活跃,越来越深入,因此,对空间机器人提出了更迫切的需求和更高的性能要求。宇宙太空是一个高辐射、高真空、大温差和微重力的危险环境,宇航员进行空间作业时面临很大的危险,并且完成一次作业所需要的成本是非常昂贵的,此外,一些空间任务是宇航员根本无法涉足和完成的。于是,利用机器人代替人类进行空间作业应运而生。许多发达国家对空间机器人研究给予了高度的重视和支持,德国、日本和美国分别通过 ROTEX、ETS VII 以及 Orbital Express 等项目先后开展了空间机器人的在轨演示验证,并且美国已经把行星探索机器人送上了火星;此外,加拿大所研制的空间机械臂 SRMS 和 SSRMS 分别在卫星和空间站维护方面发挥了关键性的作用。

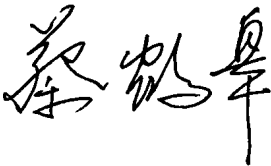
我国开展空间机器人的研究较晚,系统的研究工作从 20 世纪 90 年代才开始。然而,在各个机器人研发团队的不断努力下,已经取得了一些重要的成就。在空间机器人方面,有多项理论和技术达到了国际先进水平。但是应该清醒地看到,由于起步晚,基础设施落后,高水平的专业人才短缺,我们的空间机器人整体水平与发达国家相比仍然存在较大的差距。目前,我国“921”载人航天工程已成功地进行了系列“神舟”飞船的发射和试验,“嫦娥”探月工程也已经启动,发展与之配套的空间机器人作业系统迫在眉睫。这对于空间机器人研究人员而言,既是一个良好的历史机遇,更是一个严峻的挑战。该书的出版将有利于培养该方面合格的人才,从而助推我国空间机器人的发展。

该书在综述国内外空间机器人领域相关研究成果的基础上,结合哈尔滨工业大学机器人研究所近年来在空间机器人领域的最新研究成果编写而成。该书从空间机器人研制出发,系统地阐述了空间机器人的机构设计、传感、驱动以及控制,并针对空间环境的特点,在硬件和软件方面给出了环境适应性设计方法。在此基础上,该书综述了空间机器人的运动学和动力学的基本理论,并根据空间机器人非完整冗余特性,给出了空间机器人的路径规划方法。由于空间机器人是针对空间微重力环境而设计的,这给地面测试工作带来了挑战,在全面把握国内外空间机器人地面测试的基础上,该书提出了基于气浮平台的位姿精度测试方法,并系统地论述了运动学参数标定方法。该书在最后一章简述了空间机器人的遥操作

系统,并通过实验研究了力反馈柔性虚拟夹具辅助主从遥操作和基于多传感器的空间机器人目标捕获自主遥操作。

空间机器人学涉及机械、电子、通信、精密仪器、空间科学、计算机和控制等多个学科领域,是一个相互交叉的综合性学科领域,要想在一本书中囊括所有内容是非常困难的。该书力图使空间机器人领域的研究人员了解空间机器人的研究现状,掌握基本的理论和技术,突出特色,强调著者团队的研究成果,起到抛砖引玉的作用。

该书的出版发行,将填补我国在空间机器人专著方面的空白。作为机器人领域的老一辈学者,我乐见这样的成果。也相信,随着我国整体国力的增强,科技水平的进步,人才素质的提升,我们的空间机器人研究工作一定会迎来一个飞速发展的阶段,会取得更多、水平更高的研究成果,我们自己的空间机器人一定会遨游太空。

中国工程院院士 

2012年8月12日
于哈尔滨工业大学

前 言

随着人类对空间的不断探索,宇航科学与技术这一研究领域变得日益重要。空间探索已不再仅仅具有国家荣誉的象征意义,它已成为涉及科学发展、未来资源乃至国家安全的重大问题。

尽管载人航天活动已经有几十年的发展历史,但是对于人类来说,太空仍然是一个高辐射、高真空、极端温度和微重力的危险环境。目前,在进行舱外作业(Extravehicular Activities, EVA)时,宇航员必须穿上价格昂贵且厚重的宇航服。与人类宇航员相比,空间机器人在轨作业系统具有多方面的优越性:它不需要复杂的生命支持系统;适应空间环境;可以长时间工作;可以降低成本,提高空间探索的效益。空间机器人既可以代替人类宇航员进行长期、危险的舱外作业,也可以作为宇航员的工具辅助完成高精度、高可靠性的操作任务。由于空间机器人的重要作用,美国、日本、加拿大、德国等发达国家都在加大力度支持不同用途空间机器人的研究。可以说,拥有先进的宇航作业系统就能占据宇航探索和开发的主导地位。我国载人航天工程“921”和“嫦娥”探月工程已经启动,并进行了系列“神舟”飞船的试验,发展我国独立自主的宇航作业系统已经成为迫在眉睫的任务。

未来的空间机器人将向小型化、低成本、高度集成化和智能化的方向发展。本书遵循空间机器人的发展趋势,着重阐述了哈尔滨工业大学机器人研究所关于空间机器人系统及理论的最新研究成果。全书共 10 章,第 1 章回顾和综述了国内外空间机器人的发展现状和趋势;第 2 章介绍了空间机械臂的机构设计,包括构型设计、模块化关节设计、手爪设计以及锁紧释放机构的设计,其中,重点阐述了空间机械臂关节轴承的预紧方式及预紧载荷确定方法。第 3 章和第 4 章分别介绍了空间机械臂的传感和驱动系统,在传感技术方面,重点阐述了关节位置传感、六维力/力矩传感器和手眼视觉;在驱动系统中,重点阐述了关节制动器的设计以及永磁同步电机的数学模型、矢量控制和相电流重构技术;第 5 章介绍了空间机械臂的控制系统,其中,重点阐述了基于 ARM 处理器的中央控制器和基于场效应逻辑阵列(FPGA)的关节控制器,并针对空间机械臂低刚度的特点,建立了柔性关节机器人的数学模型,研究了柔性关节机器人的位置控制和阻抗控制;第 6 章重点分析了空间辐射环境和热环境对空间机器人的影响,并给出了适应性设计;第 7 章以机器人学理论为基础,结合空间机器人的具体特点,重点阐述了自由漂浮状态下空间机器人的运动学和动力学,并基于虚拟样机技术对所研制的空间机械臂进行了运动仿真;在第 8 章中,以运动学和动力学为基础,重点介绍了空间机器人的非完整路径规划、笛卡尔空间路径规划和反作用优化方法,其中,在反作用优化方面,提出一种基于关节轨迹参数化方法的具有全局最小扰动的机械臂轨迹规划方法;第 9 章介绍了空间机器人的地面测试系统,其中,重点阐述了应用较广泛的吊丝配

重地面测试系统,并研究了基于气浮方式的六自由度空间机器人位姿精度测试方法及参数标定方法;最后,介绍了空间机器人环境试验的情况;第10章从遥操作系统的体系结构、遥编程技术和碰撞检测技术等方面介绍了空间机器人遥操作问题,重点研究了力反馈柔性虚拟夹具辅助主从遥操作和基于多传感器的空间机器人目标捕获自主遥操作。

本书主要由刘宏、刘宇和姜力撰写并统稿。其中,刘宏和刘伊威参与了第1章的撰写,史士财、朱映远和岳宏浩参与了第2章的撰写,姜力和樊绍巍参与了第3章的撰写,谢宗武和顾义坤参与了第4章的撰写,倪风雷和刘业超参与了第5章的撰写,金明河和魏然参与了第6章的撰写,赵京东、杨大鹏和徐文福参与了第7章的撰写,王滨和史士财参与了第8章的撰写,高海波、刘宇和孙奎参与了第9章的撰写,蒋再男和夏进军参与了第10章的撰写。

本书是在全面分析和总结国内外在空间机器人领域相关研究的基础上,结合哈尔滨工业大学机器人研究所近年来在空间机械手和多指机器人灵巧手等方面的研究成果撰写而成的。如果本书能对研究和开发空间机器人的学者和工程技术人员起到启示作用,我们将感到非常荣幸。同时,也希望各位读者能够对本书存在的问题进行批评指正。

著者 刘宏 刘宇 姜力

2012年7月

于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 空间机器人的定义和分类	1
1.2 空间机器人的发展概况	2
1.2.1 舱内/舱外服务机器人	2
1.2.2 自由飞行机器人	7
1.2.3 星球表面探测机器人	10
1.2.4 空间机器人的发展趋势	11
1.3 空间机器人基础理论的研究	11
1.3.1 运动学和动力学建模的研究	12
1.3.2 运动规划的研究	13
1.3.3 控制方法的研究	14
第 2 章 空间机械臂的机构设计	16
2.1 机械臂的构型设计	16
2.2 模块化关节的结构设计	17
2.3 手爪的结构设计	18
2.4 锁紧释放机构的设计	18
2.4.1 锁紧位置确定	19
2.4.2 锁紧释放机构的设计	19
2.5 空间机械臂关节的轴承预紧	21
2.5.1 轴承基本理论和空间关节轴承参数计算	22
2.5.2 空间关节轴承的有限元分析	28
2.5.3 空间关节轴承刚度测试与分析	37
2.5.4 空间环境下的关节轴承预紧	40
第 3 章 传感技术	50
3.1 外部传感技术	50
3.1.1 视觉传感器	50
3.1.2 测距传感器	50
3.1.3 接近觉传感器	52
3.1.4 触觉传感器	52

3.1.5	力/力矩传感器	53
3.2	内部传感技术	56
3.2.1	规定位置的检测	56
3.2.2	位置的检测	56
3.2.3	速度和角速度的检测	58
3.2.4	加速度的检测	58
3.3	空间机器人传感系统的设计	59
3.3.1	电机位置传感器	59
3.3.2	关节位置传感器	60
3.3.3	基于多传感器信息的关节位置计算方法	60
3.3.4	关节力矩传感器	62
3.3.5	电机电流传感器	65
3.3.6	限位传感器	67
3.3.7	温度传感器	68
3.4	空间机器人视觉	68
3.4.1	机器人视觉与计算机视觉的关系	68
3.4.2	计算机视觉的理论框架	68
3.4.3	机器人视觉控制	71
3.4.4	空间机器人视觉的特点	72
3.4.5	手眼视觉技术	73

第4章 驱动技术 77

4.1	电机	77
4.1.1	电机概述	77
4.1.2	空间机器人系统中的直流无刷电机	78
4.1.3	直流无刷电机的位置检测	79
4.2	电机控制器	80
4.3	关节制动器的设计	82
4.3.1	制动器概述	82
4.3.2	空间机械臂制动器概述	83
4.3.3	空间机械臂制动器的设计指标分析	83
4.3.4	空间机械臂制动器的结构设计	85
4.3.5	空间机械臂制动器的电磁线圈设计	87
4.4	永磁同步电机的数学模型	88
4.4.1	静止坐标系下的 PMSM 模型	89
4.4.2	旋转坐标系下的 PMSM 模型	90
4.5	永磁同步电机的矢量控制	92
4.5.1	PMSM 的矢量控制原理	92
4.5.2	基于矢量控制的 PMSM 电流控制方法	93

4.6 PWM 调制技术	95
4.6.1 正弦波脉宽调制 (SPWM)	96
4.6.2 正弦波加三次谐波注入法脉宽调制	97
4.6.3 空间电压矢量调制方式	98
4.6.4 SPWM、SPWM 注入三次谐波以及 SVPWM 的比较	100
4.7 永磁同步电机的相电流重构	101
4.7.1 相电流检测方法概述	101
4.7.2 基于单电流传感器的相电流检测技术	102
4.7.3 SSPS 相电流重构算法	104
4.7.4 性能分析	107
4.7.5 实验验证	110
第 5 章 控制系统	113
5.1 机器人控制系统的结构	113
5.1.1 串行处理结构	113
5.1.2 并行处理结构	114
5.2 中央控制器	114
5.2.1 硬件系统	115
5.2.2 容错和故障诊断系统	117
5.3 关节控制器	119
5.3.1 FPGA 的选型	119
5.3.2 关节控制器的冗余设计	120
5.3.3 看门狗监控电路	120
5.3.4 基于 Nios 的控制器软件系统	121
5.4 柔性关节机器人模型	121
5.4.1 建模过程中的几点假设	122
5.4.2 柔性关节机器人的完整模型	122
5.4.3 柔性关节机器人的简化模型	123
5.5 柔性关节机器人位置控制	124
5.5.1 单柔性关节性能分析	124
5.5.2 柔性关节机器人的奇异摄动控制	125
5.5.3 基于柔性补偿的奇异摄动控制	127
5.6 柔性关节机器人笛卡尔阻抗控制	131
5.6.1 刚性机器人阻抗控制的操作空间法	131
5.6.2 柔性关节机器人操作空间法	133
5.6.3 笛卡尔阻抗控制的实现方案	135
5.6.4 基于关节力矩的笛卡尔阻抗控制策略的理论分析	138
第 6 章 空间环境适应性	142
6.1 空间辐射环境分析及适应性设计	142

6.1.1	总剂量效应	142
6.1.2	单粒子翻转效应	145
6.1.3	单粒子门锁效应	147
6.1.4	充电—放电损伤效应	149
6.2	空间热环境适应性设计	150
6.2.1	热设计基本原则	150
6.2.2	总体设计	150
6.2.3	中央控制器热设计	151
6.2.4	空间机械臂的热设计	152
6.3	空间机器人关节的容错设计	153
6.3.1	关节的故障检测	153
6.3.2	关节的容错策略	157
6.3.3	关节控制器容错方案的实现	157
6.3.4	CAN 总线故障检测及恢复	160
6.3.5	门锁电源保护电路的测试	161
6.4	空间机器人中央控制器的容错设计	162
6.4.1	中央控制器的模型	162
6.4.2	容错系统的功能描述	163
6.4.3	中央控制器的双机同步方案设计	166
6.4.4	双机通信方案设计	167
6.4.5	系统级故障检测与诊断方案	169
6.4.6	软件 EDAC 技术	174
第 7 章	空间机器人的运动学和动力学	179
7.1	空间机器人运动学	179
7.1.1	空间机器人模型和坐标系	179
7.1.2	刚体姿态的表示	181
7.1.3	空间机器人一般运动方程	183
7.1.4	基座位姿固定时的运动学方程	184
7.1.5	自由飞行模式的运动学方程	184
7.1.6	自由漂浮模式的运动学方程	185
7.1.7	空间机器人的虚拟机械臂建模方法	187
7.2	空间机器人动力学方程	188
7.2.1	空间机器人系统的能量	188
7.2.2	空间机器人一般动力学方程	189
7.2.3	自由漂浮空间机器人动力学方程	189
7.3	自由漂浮空间机器人与固定基座机器人的比较	190
7.3.1	位置级运动学比较	190
7.3.2	速度级运动学比较	190

7.3.3 工作空间比较	191
7.4 基于虚拟样机技术的空间机器人建模和仿真	191
7.4.1 空间机械臂模型	192
7.4.2 基于虚拟样机技术的空间机器人建模过程	193
7.4.3 仿真任务	193
7.4.4 关节的运动测试	194
7.4.5 直线和圆弧运动阶段	194
7.4.6 动力学仿真	195
第8章 空间机器人的运动规划	199
8.1 空间机器人运动规划概述	199
8.2 空间机器人的非完整路径规划方法	200
8.2.1 非完整路径规划的问题描述	201
8.2.2 非完整路径规划的问题求解	202
8.3 空间机器人的笛卡尔空间路径规划方法	204
8.3.1 固定基座机器人的笛卡尔空间路径规划	204
8.3.2 空间机器人的笛卡尔空间路径规划	204
8.4 空间机器人的反作用优化	208
8.4.1 反作用优化问题的描述	208
8.4.2 一种基于关节变量参数化的全局反作用优化方法	209
第9章 空间机器人地面测试与试验	217
9.1 微重力模拟系统概述	217
9.2 吊丝配重测试装置	219
9.2.1 测试装置工作原理	219
9.2.2 吊丝配重测试装置组成	220
9.2.3 主要部组件的方案	222
9.2.4 吊丝配重测试装置的控制系統	223
9.2.5 测试装置的保护措施	223
9.3 基于气浮方式的空间机器人位姿精度测试	224
9.3.1 采用气浮方式的空间机器人位姿测试方案一	224
9.3.2 采用气浮方式的空间机器人位姿测试方案二	226
9.3.3 采用气浮方式的空间机器人位姿测试方案三	226
9.4 运动学参数标定	227
9.4.1 标定模型的完整性	227
9.4.2 运动学误差模型	228
9.4.3 运动学参数误差辨识	236
9.5 环境试验	243
9.5.1 试验的分类	244

9.5.2 试验项目说明	244
第 10 章 空间机器人的遥操作技术	249
10.1 空间机器人遥操作概述	249
10.1.1 空间机器人遥操作的特点	250
10.1.2 空间机器人遥操作的人机接口技术	250
10.2 空间机器人遥操作系统的体系结构	251
10.2.1 大时延遥操作系统的体系结构	251
10.2.2 双向遥操作	253
10.2.3 自主遥操作	255
10.2.4 共享遥操作	258
10.2.5 3 种遥操作方式的比较	259
10.3 碰撞检测技术	259
10.3.1 碰撞检测概述	259
10.3.2 碰撞检测技术分类	260
10.3.3 碰撞检测的基本方法	261
10.4 力反馈柔性虚拟夹具辅助双向遥操作	262
10.4.1 传统虚拟夹具算法	262
10.4.2 柔性虚拟夹具算法	263
10.4.3 融合虚拟力反馈的柔性虚拟夹具方法	264
10.4.4 融合颜色识别的柔性虚拟夹具方法	265
10.4.5 主从遥操作实验	266
10.5 基于多传感器的空间机器人目标捕获自主遥操作	273
10.5.1 视觉引导下的目标捕获方法	273
10.5.2 基于 Kalman 滤波的目标运动预测	273
10.5.3 空间机器人目标捕获的自主遥操作实验	274
参考文献	279
术语索引	296

第 1 章 绪 论

随着社会的进步和科技的发展,人类遨游宇宙的梦想逐步成为现实,如卫星的发射、月球和行星的探测、载人航天的成功等。在空间活动中,航天器的交会对接和在轨维护以及生产、装配、检测、维护等空间任务需要在轨完成。由于空间环境的恶劣性和复杂性,人类宇航员在空间进行作业具有很大的难度和危险性,而且出舱作业的费用非常高,因此,空间机器人在轨服务成为空间活动的发展趋势,得到了高度重视,相关研究工作十分活跃。空间机器人不仅可以代替人类宇航员在危险环境下进行长时间的舱外作业,而且可以作为人类宇航员的辅助工具完成高精度、高可靠性的操作任务。与人类宇航员相比,空间机器人具有更强的抗高低温和抗辐射能力,不需要复杂、耗资巨大的环境控制系统、生命保障系统和救生系统。

空间机器人技术涉及机械学、电子学、力学、通信、自动控制、信息科学、人工智能和计算机等多个领域。近年来,美国、日本、加拿大、德国等发达国家在空间机器人方面进行了大量的研究工作,研制成功了不同用途的多种空间机器人系统。我国空间机器人及其遥操作的研究工作起步较晚,在空间机器人理论和技术方面,与国际先进水平相比存在很大的差距。

本章将首先介绍空间机器人的定义和分类,然后重点介绍空间机器人的发展及其趋势,最后介绍空间机器人相关理论的研究情况。

1.1 空间机器人的定义和分类

空间机器人是应用在宇宙空间中一类特种机器人。根据不同的划分标准和原则,空间机器人有多种分类方法。其中,按照用途的不同,空间机器人可以分为舱内 / 舱外服务机器人、星球探测机器人和自由飞行机器人 3 种。

(1) 舱内 / 舱外服务机器人(Intravehicular/Extravehicular Robot)。

作为空间站舱内使用的机器人,舱内服务机器人主要用来协助航天员进行舱内科学实验以及空间站的维护。舱内服务机器人可以降低科学实验载荷对航天员的依赖性,在航天员不在场或不参与的情况下也能对科学实验载荷进行照管。舱内服务机器人要求质量轻、体积小,且具有足够的灵活性和操作能力。

作为空间站(或者航天飞机)舱外使用的机器人,舱外服务机器人主要用来提供空间在轨服务,包括小型卫星的维护、空间装配、加工和科学实验等。空间环境是非常恶劣的,如强辐射、高温差和超真空等,这些因素给人类宇航员在太空的生存和活动带来很大的影响和威胁;同时出舱作业的费用是相当昂贵的。因此,舱外服务机器人的研究和实验工作非常重要。

(2) 星球探测机器人(Planetary Exploration Robot)。

星球探测机器人被用来执行行星和月球等星球表面的探测任务。在星球探测中,机器人用来探测着陆地点,进行科学仪器的放置,收集样品进行分析等。为了满足探测任务要

求,与其他用途的空间机器人相比,星球探测机器人应具有更强的自主性,能够在较少地面干预的情况下独立地完成各项任务。

(3) 自由飞行机器人(Free Flying Space Robot,FFSR)。

自由飞行机器人是指飞行器上搭载机械臂的空间机器人系统,由机器人基座(卫星)和机械臂组成,具有自由飞行和自由漂浮两种工作状态。自由飞行机器人用于卫星的在轨维护和服务,也可在未来的空间战争中攻击敌方卫星。自由飞行机器人的运动学和动力学存在耦合,当工作在自由漂浮状态时,机械臂运动对基座产生的反作用力将改变机器人基座的位置和姿态,此时采用地面固定基座机器人的控制技术难以完成规定的操作任务。

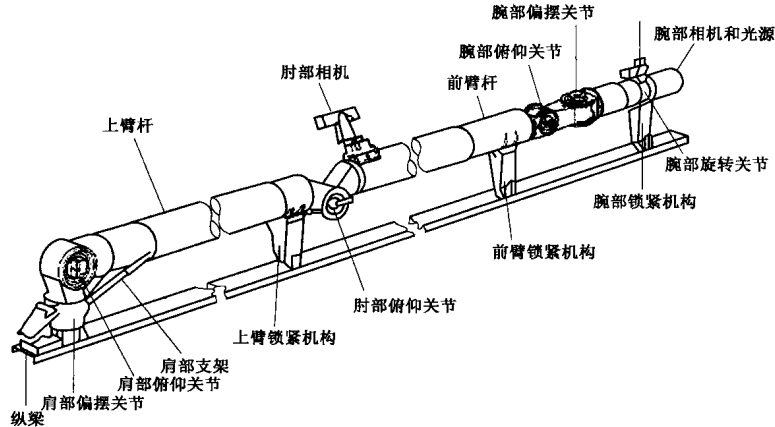
1.2 空间机器人的发展概况

空间机器人具有几十年的发展历史,本节介绍近年来空间机器人研究方向的代表性成果及其发展趋势。

1.2.1 舱内 / 舱外服务机器人

1. 加拿大的空间遥操作机器人系统

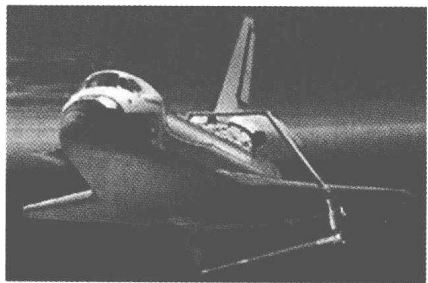
加拿大研制的航天飞机遥操作臂系统(Shuttle Remote Manipulator System,SRMS)是空间机器人概念产生以来第一个成功应用的空间机械臂系统,如图 1.1 所示。该机械臂



(a) SRMS 组成



(b) SRMS 用于空间站舱外操作



(c) SRMS 用于航天飞机的维护

图 1.1 加拿大研制的航天飞机遥操作臂系统(SRMS)

具有六自由度,全长15.2 m,质量410 kg,空载情况下的最大移动速度可达60 cm/s,臂杆采用碳纤维材料。该机械臂可以由计算机进行编程控制,也可以由宇航员进行手动控制。SRMS在1981年首次使用,其设计寿命为10年或者100次飞行任务。SRMS由宇航员在舱内进行操作,可以用于展开和回收卫星、组装国际太空站和传送部件。2005年,SRMS协助宇航员成功地完成了“发现者”号航天飞机的热防护系统维修工作。

加拿大耗资10亿美元研制的空间站移动服务系统(Mobile Servicing System,MSS)如图1.2所示。MSS由3部分组成:长17 m的7自由度机械臂系统(Space Station's Remote Manipulator System,SSRMS)、专用的灵巧机械手(Special Purpose Dexterous Manipulator,SPDM)和移动平台系统(Mobile Base System,MBS)。在遥操作方式下,SSRMS可以在轨道上移动空间站的外围设备,可以在舱外行走,可以进行装配和维修工作。安装在末端的小型双臂灵巧操作器可以为SSRMS提供操作小尺寸物体的能力,完成一些复杂的操作任务,如更换在轨可替换单元(Orbital Replaceable Unit,ORU)等。2001年4月,SSRMS将1吨多重的包装箱传送给“奋进者”号航天飞机上的机械臂SRMS带回地面,实现了机械臂的空间握手。2001年7月,SSRMS在宇航员的控制下成功地实现了密封舱的搬运和装配。

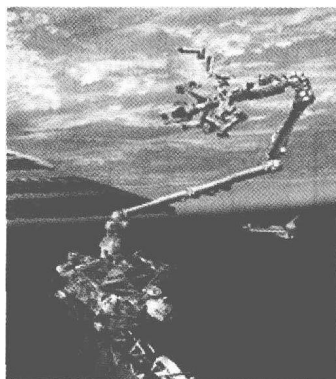


图 1.2 加拿大的空间站移动服务系统(MSS)

2. 德国宇航中心的 ROTEX 实验

德国宇航中心(DLR)研制的基于多传感器的小型空间机器人系统(ROTEX),是世界上第一个实现地面遥操作的舱内空间机器人实验系统,其主要目标是验证大时延条件下的地—空遥操作。ROTEX系统具有六自由度,可达工作空间为 1 m^3 。ROTEX系统的主要特点是具有多种感知功能:在机械臂末端有刚性和柔性六维力/力矩传感器各1个,同时还具有触觉传感器、9个激光测距传感器和1对微型立体摄像机。

1993年4月,DLR在哥伦比亚号航天飞机上成功地进行了ROTEX的舱内遥操作实验,包括空间装配、连接/断开电气插头和自由漂浮物体抓握等,如图1.3所示。ROTEX采用了3种操作模式:基于图形预测显示系统的地—空遥操作、基于传感器的离线编程监控式操作以及宇航员主从遥操作模式。图1.4为ROTEX遥操作系统原理图。

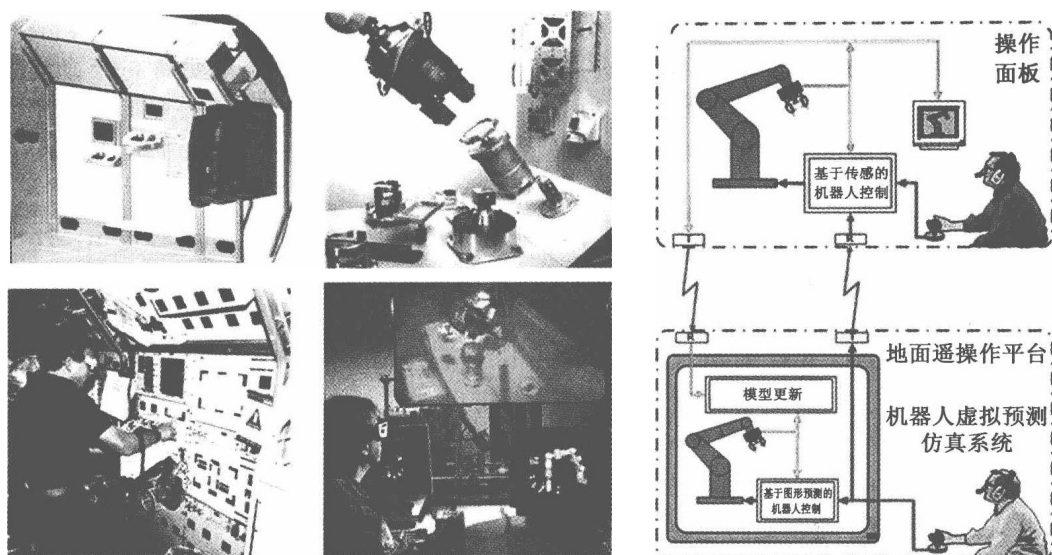


图 1.3 DLR 在 ROTEX 实现的遥操作场景及框图

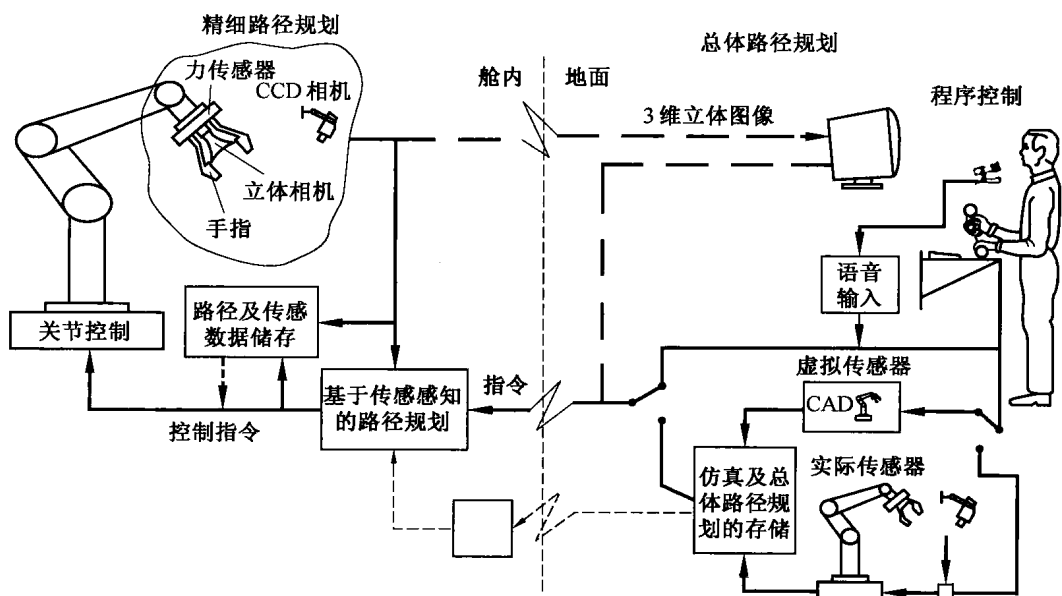


图 1.4 ROTEX 遥操作系统原理图

3. DLR 和 NASA 的机器人宇航员

机器人宇航员的概念最早是由 DLR 在 1997 年提出的。当时的背景是：一颗刚刚发射的卫星 TV-SAT-I 在进入轨道后，其太阳能电池板不能自动打开，而卫星所在的轨道是载人航天无法到达的轨道。因此，DLR 提出在移动卫星上安装两个轻型机器人手臂、两个多指灵巧手及一对摄像机(图 1.5) 组成机器人宇航员，去接近、捕获和维修故障卫星。

DLR 第三代轻型臂采用全模块化的设计思想，如图 1.6 所示。整个臂的质量为 13~14 kg，负荷约 10 kg，功耗小于 100 W，长约 1.2 m，最大关节速度约 $180^\circ/\text{s}$ 。它具有七自由度，