



航天科技图书出版基金资助出版

空间机器人 运动控制方法

郭琦 洪炳镕 编著



中国宇航出版社

空间机器人 运动控制方法

郭琦 洪炳镕 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间机器人运动控制方法/郭琦,洪炳镕编著. —北京:中国宇航出版社,2011. 1

ISBN 978-7-80218-890-7

I. ①空… II. ①郭…②洪… III. ①机器人-运动控制 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 255774 号

责任编辑 舒承东 责任校对 祝延萍 封面设计 宇航数码

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com/ www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 5.25 字数 146 千字

书号 ISBN 978-7-80218-890-7

定价 48.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010)68767205, 68768904

前 言

随着空间科学技术的飞速发展,研究和开发太空资源已成为人类文明发展的一个重要方向。然而严苛的空间环境如真空、辐射、大温差等,给人类在太空的生存和活动带来了巨大的威胁,载人航天活动所付出的成本极其昂贵^[1]。从安全、效率、成本的角度来看,完成大量、复杂的空间作业(如大型空间站的建造和维护等)仅仅依靠航天员是不够的,很多舱外作业需要由空间机器人来完成^[2]。

自由飞行空间机器人(Free-Flying Space Robot, FFSR)是目前空间机器人研究领域中的一个主要研究方向,它由机器人本体和搭载在本体上的空间机械臂组成。由于FFSR的本体内携带推进装置,因此它可以在微重力环境中自由飞行或浮游,代替航天员在太空中从事空间站建造、失效卫星的维修与回收、空间生产及科学实验等工作。

空间机器人学作为一门新兴的学科,涉及到计算机、人工智能、自动控制、无线电通信、传感器融合、人工生命、机械学和力学等多个研究领域。目前对空间机器人的研究大多集中在单臂空间机器人上,而对双臂空间机器人研究得较少^[14-15]。由于空间作业的特殊性和操作任务的复杂性,要求机器人具有协调作业^[16-17]、姿态控制等能力,同时要求空间机器人具有多臂性的特点,并具有较高的自主性,因此双臂或多臂自由飞行空间机器人是未来空间机器人的主要研究方向。但是,由于空间机器人工作在微重力的环境下,当机器人的手臂运动时,会对本体产生反作用力和力矩,从而改变机器人本体的位置和姿态,即空间机器人的手臂和本体之间存在着运动学和动力学耦合。如果不考虑这种影响,而依然采用地面固定基座机器人的控制技术,空间机器人就无法完成预定的操作任务。为解决这个问题,必须找到能够考虑这种相互作用的建模方法和控制算法。空间机器人的研究主

要涉及运动学模型的建立、运动控制和姿态控制等方面。本书主要对双臂自由飞行空间机器人在微重力环境下的运动学模型、姿态控制、参数辨识、多个空间机器人操作同一目标的动力学控制等进行了深入系统的研究。

本书是在分析和总结国内外近年来对 FFSR 相关研究的基础上,综合郭琦、吴葳、何光彩等人的博士学位论文研究成果撰写而成的,作者进行了整体的编辑和修改。此外,在洪炳镕、柳长安、刘宏出版的《自由飞行空间机器人运动控制及仿真》的基础上,本书扩充了 n 自由度空间机器人运动学模型的推导,给出了 n 自由度空间机器人广义雅可比矩阵求导公式,并给出了双臂 n 自由度空间机器人姿态控制的通用模型公式,在该领域的研究中具有一定的学术价值和实际意义。

自由飞行空间机器人技术是面向 21 世纪的一项高新技术,正处于飞速发展中,期望本书能对研究和开发空间机器人的科学家和工程技术人员具有一定的参考作用和使用价值。

作者
哈尔滨工业大学
2010 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自由飞行空间机器人概述	1
1.2.1 自由飞行空间机器人的概念	1
1.2.2 空间机器人的分类	2
1.2.3 空间机器人的发展过程	4
1.2.4 空间机器人的研究类别	4
1.3 空间机器人研究现状	5
1.3.1 我国空间机器人研究现状	5
1.3.2 国外空间机器人研究现状	6
1.4 空间机器人运动控制及姿态控制研究	11
1.4.1 建模方法	11
1.4.2 运动控制	13
1.4.3 姿态控制	15
第 2 章 双臂 n 自由度空间机器人广义雅可比矩阵推导	19
2.1 引言	19
2.2 模型及参数定义	21
2.3 运动学方程及广义雅可比矩阵的推导	23
2.4 姿态受限广义雅可比矩阵的推导	35
2.5 双臂 3 自由度空间机器人运动控制的计算机仿真	36
2.6 DFFSR 的运动特性	39
2.6.1 姿态干扰特性	39

2.6.2	冗余特性	40
2.6.3	非完整性	40
2.7	DFFSR 的工作空间及其划分	41
2.7.1	工作空间	41
2.7.2	工作空间划分	44
2.7.3	连杆质量对工作空间的影响	45
第 3 章	基于再生核理论的 n 自由度 DFSR 姿态控制	47
3.1	引言	47
3.2	DFFSR 姿态控制因素	48
3.3	再生核理论	48
3.3.1	定义	48
3.3.2	基本性质	49
3.3.3	再生核的表示	50
3.3.4	$H(R)$ 的再生核	50
3.3.5	标准正交基	51
3.3.6	函数的逼近	51
3.4	基于再生核理论的 n 自由度 DFSR 姿态控制	52
3.4.1	姿态控制	52
3.4.2	算法步骤	54
3.5	基于再生核理论的 DFSR 姿态控制仿真	55
3.5.1	仿真目的	55
3.5.2	仿真实验	55
3.6	与其他姿态控制算法的比较	58
第 4 章	基于受限最小干扰图的 DFSR 姿态控制	60
4.1	干扰图与增强干扰图	60
4.1.1	干扰图	60
4.1.2	增强干扰图	61

4.2	姿态干扰的计算及受限最小干扰图	63
4.2.1	姿态干扰的计算	63
4.2.2	最小干扰图	67
4.2.3	RMDM 图与 EDM 图的比较	69
4.3	基于 RMDM 的姿态控制算法及计算机仿真	71
4.3.1	零姿态干扰的计算	71
4.3.2	基于 RMDM 的姿态控制算法	72
4.3.3	计算机仿真及实验结果的比较	75
第 5 章	DFFSR 在浮游状态下捕捉目标的路径规划算法	78
5.1	引言	78
5.2	DFFSR 捕捉静态目标的路径规划算法	78
5.2.1	捕捉策略	79
5.2.2	捕捉静态目标路径规划算法	80
5.2.3	计算机仿真	84
5.3	DFFSR 捕捉运动目标的路径规划算法	85
5.3.1	捕捉策略	85
5.3.2	捕捉运动目标路径规划算法	86
5.3.3	计算机仿真	88
5.4	DFFSR 避免碰撞路径规划算法	88
5.4.1	双向双启发函数	89
5.4.2	避免碰撞路径规划算法	90
5.4.3	计算机仿真	92
第 6 章	DFFSR 回收失效卫星的任务规划	93
6.1	引言	93
6.2	回收失效卫星的任务规划	93
6.2.1	基于层次结构的任务规划	93
6.2.2	回收失效卫星的任务规划	96

6.3	DFFSR 回收静态失效卫星的任务规划	97
6.3.1	任务规划算法	97
6.3.2	计算机仿真	103
6.4	DFFSR 回收运动失效卫星的任务规划	104
6.4.1	任务规划算法	104
6.4.2	计算机仿真	108
6.5	带有姿态控制的任务规划	110
6.5.1	带有姿态控制的任务规划	110
6.5.2	计算机仿真	111
第7章	基于再生核理论实现多 FFSR 协调控制	113
7.1	引言	113
7.2	基于再生核理论实现多 FFSR 协调操作动力学控制	113
7.2.1	几何模型	113
7.2.2	FFSR 协调操作动力学方程	113
7.2.3	基于 RKT 实现动力学控制	115
7.2.4	与其他算法的比较	117
7.3	基于再生核理论实现两个单臂 FFSR 协调控制仿真	118
7.3.1	仿真目的	118
7.3.2	仿真实验	119
第8章	空间机器人的参数辨识	124
8.1	引言	124
8.2	前馈神经网络的逼近能力和学习算法	124
8.2.1	多层前馈神经网络的逼近能力	124
8.2.2	多层前馈神经网络的学习算法	125
8.3	非线性同伦综合学习算法	126
8.3.1	同伦 BP 学习算法	126
8.3.2	非线性同伦 BP 学习算法	127

8.3.3	非线性同伦综合学习算法	129
8.3.4	各种算法的性能比较	130
8.4	自由飞行空间机器人参数辨识	132
8.4.1	基于神经网络的参数辨识算法	132
8.4.2	计算机仿真	134
第9章	基于 Vega 的 DFFSR 三维视景仿真系统的实现	137
9.1	引言	137
9.2	仿真系统建模	140
9.2.1	几何模型	140
9.2.2	三维实体建模	141
9.3	基于 Vega 的仿真系统	142
9.3.1	仿真系统的开发环境	142
9.3.2	仿真系统的结构简介	143
9.3.3	仿真系统的实现方法	144
9.4	基于 Vega 的仿真系统实现	145
9.4.1	DFFSR 捕捉静止目标的仿真	145
9.4.2	DFFSR 捕捉运动目标的仿真	145
9.4.3	DFFSR 变轨运动的仿真	147
参考文献	149

第 1 章 绪 论

1.1 引言

空间机器人学作为一门新兴的学科，涉及到计算机、人工智能、自动控制、无线电通信、传感器融合、人工生命、机械学和力学等多个研究领域。我国空间机器人的研究起步于“八五”期间，主要是进行一些理论研究和地面试验平台的研制。为了跟踪目前世界先进国家在空间机器人研究^[3-10]的发展水平，尽快缩短与世界先进国家之间发展水平的差距，我们必须加速发展空间机器人的研究工作^[11]。这方面国家给予了大力的支持。美国、日本、加拿大、俄罗斯和西欧国家都在加紧进行空间机器人的研制和实验工作。如美国斯坦福大学空间机器人实验室在 1992 年就研制了自由飞行空间机器人地面试验平台；日本东芝公司和东京大学联合开发了自主型空间机器人操作实验平台等^[12]。另外，日本已发射了 ETS-VII 型工程试验卫星，主要研究自主交会对接技术和面向 21 世纪人类空间活动所需的空间机器人技术^[13]。

1.2 自由飞行空间机器人概述

1.2.1 自由飞行空间机器人的概念

空间机器人是指在太空环境下进行空间作业的机器人，它由机器人的本体及搭载在本体上的机械手组成。自由飞行空间机器人 (FFSR) 是空间机器人的一种，它的本体内携带推进装置，可在自由飞行或自由浮游状态下工作。近年来在国内外发表的文献中，对这

种具有移动功能的空间机器人有多种称谓,如机器人卫星(Robot Satellite)、空间机械手(Space Manipulator)^[19]等,实质上它们都是指在飞行器上搭载机械手的空间机器人系统,因此这些概念都是等价的。

空间机器人的主要任务包括:1) 空间站的建造,空间机器人可以承担大型空间站中各组成部件的运输及部件间的组装等任务;2) 卫星和其他航天器的维护与修理,如失效卫星的回收、零件更换和空间飞行器的物资补给等;3) 空间生产和科学实验,利用宇宙空间微重力和高真空的特点,生产出地面上难以生产或无法生产的产品。与地面机器人相比,空间机器人具有体积小、质量小、低功耗、寿命长和高可靠性的特点,因此成为许多国家研究和开发工作的重点项目。

1.2.2 空间机器人的分类

从20世纪90年代中期以来,国际上正在研制与开发的空间机器人大体上分为三类:舱外活动机器人(EVR)、科学有效载荷服务器、行星表面漫游车。

为了对空间机器人做深入系统的研究,可将空间机器人按控制方式可分为三类^[20]:

(1) 主从式遥控机械手(Master-Slave Teleoperator)

主从式遥控机械手由主手和从手组成。从手的动作完全由操作人员通过主手进行控制。美国早期航天器上的机器人都属于这种类型。这种遥控机械手具有严重的缺点。首先操作人员是整个控制回路中的组成部分,操作人员的劳动强度很大,短时间操作即可使操作人员很疲惫。其次在进行遥控操作时,由于控制信号的传输有延时,延时大到一定程度系统就不稳定。因此早期航天器上的遥控机械手都采用发信、等待、发信的开环控制方式,以解决稳定性问题。

(2) 遥控机器人(Telerobot)

遥控机器人是一个将遥控和一定程度的自主技术结合起来的机

机器人系统。该系统具有两个回路：本地控制回路和远地控制回路，两回路之间进行通信。具有智能传感器的机器人与远地计算机构成远地回路，远地计算机根据操作人员发出的指令控制机器人进行工作，这个回路是低智能、高响应速率（即高带宽）回路。操作人员工作在本地回路里，不直接操纵机器人，而是借助遥测装置发来的各种信息，利用操作人员的高智能监控远地回路中机器人的工作。操作人员向远地回路发指令，又从远地回路接收信息，根据这些信息制定新的指令，这个回路称为高智能、低响应速率回路。目前，空间机器人的智能还不高，适应环境的能力还不强，在航天飞机和早期空间站所使用的多属于这种类型的机器人。美国约翰逊航天飞行中心提出的遥控机器人工作系统(Telerobotic Work System, 简称 TWS)为这类机器人的典型代表。

(3) 自主式机器人(Autonomous Robot)

自主式机器人是一种高智能机器人，这种机器人具有类似人的视觉、触觉、力觉、接近觉和听觉等感知功能，能感知外界环境的变化和自动适应外界环境。自主式机器人具有规划、编程和诊断功能，具有修理其他机器人和自修理功能。自主式机器人可以根据 CAD/CAM 数据和专家系统的指示，自主地完成各种任务。将这种机器人装上推进系统，或者安装在自由平台上，就成为自由飞行空间机器人，可以把它派往太空，对空间飞行器进行维修。自主式空间机器人正处于研制阶段，美国、日本、加拿大、德国、法国、英国、意大利和俄罗斯等国家都在研制这种机器人。随着电子学、计算机科学、人工智能和机器人技术的进一步发展，功能完善的自主式空间机器人必将在人类的太空活动中发挥巨大的作用。

此外，空间机器人还可以根据机器人在载人航天器的舱内外活动范围、机器人在宇宙空间作业的位置、人的操作位置、形式与功能进行分类。

1.2.3 空间机器人的发展过程

根据空间机器人的形式和性能,其发展可分为如下三个阶段^[21]:

(1) 近距离遥控阶段

操作员对离自己很近的空间机械手以基本的控制模式进行遥控操作,机械手严格地执行操作员的命令。空间舱遥控机械手系统(SRMS)和日本实验舱遥控机械手系统(JEMRMS)都属于这类机器人。

(2) 远距离遥控阶段

空间机器人是一个在载人航天器上搭载机械手的系统,可在轨道上边飞行边执行给定任务。操作员可向轨道上的机器人发出控制命令。由于距离很远,必须考虑时间延迟以及如何解决由于通信延迟而带来的图像预显示问题。1993年4月由德国实验成功的ROTEX空间机器人系统是世界上第一个远距离控制空间机器人。

(3) 自主控制阶段

自主型空间机器人可不受操作员的控制,在轨道上边自由飞行边自主地执行给定任务。这类机器人除了具有外部感觉的功能外,还具有规划和决策的功能,可以适应周围环境的变化而自主地执行指定工作。这是空间机器人发展的最高级阶段,现在还主要处于研究阶段。由于通信延迟及操作者容易疲劳等因素,空间机器人比其他任何类型的机器人更需要自主化。

1.2.4 空间机器人的研究类别

空间机器人的研究可以分为三个方面:1)基本理论方法的研究;2)地面实验平台的研究;3)实际空间应用系统的开发。

由于机器人智能还未达到实用阶段,目前对空间机器人的研究还主要集中在理论和方法的探索上。计算机仿真技术和地面实验平台的研制是验证基本理论和方法的重要途径。

1.3 空间机器人研究现状

1.3.1 我国空间机器人研究现状

我国航天事业经过几十年的发展,为空间机器人的研制积累了宝贵的经验并取得了丰硕的成果^[22]:1)我国已经发射了几十颗卫星,对太空环境有了较深入的研究;2)通过长期的航天探测活动,我国在航天材料、电子技术、飞行器结构设计以及航天系统的应用方面积累了丰富的经验,掌握了较为丰富的空间应用技术资料;3)我国的机器人技术和卫星发射技术不断进步,为在卫星上搭载空间机器人系统奠定了坚实的基础;4)我国已经发射了7艘神舟号飞船,完成了3次载人航天飞行,在航天通信和航天器结构设计方面积累了丰富的经验;5)国家863计划空间机器人专家组和哈尔滨工业大学的科研人员对日本发射的ETS-VII和它所完成的实验进行了深入的技术分析,为FFSR的研制提供了宝贵的经验。目前我国在技术上已经具备了条件,可以利用空间机器人技术配合返回舱进行空间科学实验、加工生产新材料以及新药品等。

国家高技术航天领域空间机器人工程研究中心已研制出一种舱外自由移动机器人(Extravehicular Mobile Robot,EMR),如图1-1所示。EMR能够完成拧螺丝、拔插头、抓拿浮游物体等精细操作,通过事先输入的指令和空间站的遥控,还可以对空间站进行装配、检测和维修,提供照料和维护科学实验等多种服务^[23-24]。在研制空间机器人的同时,空间机器人工程研究中心还正在抓紧重点研制无人遥控月球探测机器人(即月球车)^[25]。

鉴于空间机器人在空间探索的重要作用,国内的一些高校和部分科研院所都在进行空间机器人的基础研究工作,部分单位研制成功了地面实验平台^[26-29]。

哈尔滨工业大学机器人研究所在空间机器人的研究方面取得了

大量成果，设计制造了空间站用机械臂的地面实验平台，为将来我国的探月工程设计开发了月球探测车用机械臂。邓宗权教授的课题组在月球探测机器人的研究方面成果颇丰，研究开发了多套月球探测机器人样机，并且承担着探月机器人的研究的很大比例的工作^[30-32]。

哈尔滨工业大学的 FFSR 的研究在国内具有领先地位，洪炳镕教授的空间机器人课题组研发的“星载自主控制系统地面试验平台”实现了多传感器信息融合、实时视觉处理、基于广义雅可比矩阵的卫星姿态调节的空间机器人运动控制以及微重力条件下的避碰运动规划。该课题组开发的“双臂自由飞行空间机器人自主规划仿真系统”具备了视觉学习功能，可以通过视觉学习适应不同的环境条件，实现了两个机械臂协调工作捕捉目标物体。该课题组在 2000 年 10 月完成了双臂自由飞行空间机器人地面实验平台的研制工作，实验证明，该地面试验平台基本能够模拟空间机器人空间微重力环境。

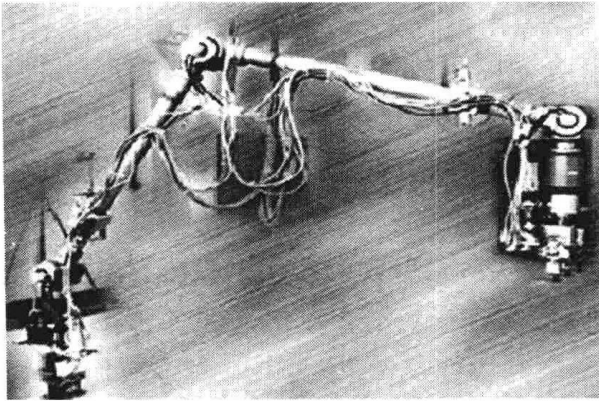


图 1-1 中国的空间机器人 EMR

1.3.2 国外空间机器人研究现状

自 20 世纪 80 年代以来，美国、日本、加拿大、欧空局等国家和机构大力发展空间机器人技术，并相继发射试验卫星进行了各种试验。从日本的 ETS-VII 试验卫星到美国的“轨道快车”计划，从交会对接到目标捕获，空间机器人逐步展现出其强大的实用性和广阔的