



国防科技图书出版基金

空间遥操作技术

Space Teleoperation Technology

| 黄攀峰 刘正雄 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

0

空间遥操作技术

Space Teleoperation Technology

黄攀峰 刘正雄 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间遥操作技术 / 黄攀峰, 刘正雄著. —北京 :
国防工业出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-118-09813-6

I. ①空… II. ①黄… ②刘… III. ①遥控 IV.
①V556. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 303465 号



国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

开本 710×1000 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 字数 393 千字
2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的

效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜				
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新		
秘书长	杨崇新				
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳			
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣	
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力	
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

前 言

随着空间技术的发展,人类在空间的活动范围和内容越来越广阔,为了实现人在地面对空间飞行器的有效操作与控制,人类提出了空间遥操作的概念。空间遥操作是指在物理空间中,人与空间飞行器(如空间机器人)之间具有远距离跨度的约束之下,人通过天地信息链路实现与设备同步交互操作,从而帮助人类实现感知能力与行为能力延伸的一种操作方式。也就是利用计算机网络、软件工具和通信设备,遥操作人员对空间实验现场得到的反馈信息进行在线分析,通过监控、评估和修改步骤向空间飞行器载荷发送命令以调整某些参数,从而达到远程控制实验进程的目的。空间遥操作技术与传统意义上的遥控概念有着本质区别:遥控是指人在地面对空间飞行器的指令式触发,使其按照预定的动作自主完成规定动作与任务;空间遥操作是实现人对空间飞行器(如空间机器人)的实时交互式操作与控制。因此,空间遥操作技术是一种天地协同的强实时的操作与交互技术。随着空间任务的多样化和复杂化,空间遥操作技术必将丰富和完善遥控的概念和内涵,成为空间在轨操作、深空探测等航天任务的地面重要支持系统。

空间操作与控制已经成为空间技术发展的新方向,以空间大型机构的组装与建设技术、空间垃圾清理、在轨加注、空间飞行器援救等为代表的航天器在轨服务技术已经成为今后新型航天器技术发展的方向之一。目前,航天器在轨服务任务是极其复杂和艰巨的任务,仅依靠航天员的太空行走很难完成,因此,空间机器人将成为完成这些任务的主要力量,智能化程度高、操作灵巧的空间机器人将代替人来完成在轨服务任务。人类只需要置身于地面或者空间飞行器中,通过遥操作方式即可完成对空间机器人的操作与控制,使其按照人类预想的目标完成任务。

空间遥操作技术属于综合交叉新兴学科,包含计算机网络技术、现代通信技术、测控技术、机器人技术、人机交互技术等众多学科。空间遥操作系统属于一个天地大回路系统,遥操作端主要由遥操作系统和遥操作支持平台组成,远端(在轨飞行器)由空间机器人组成。利用天地通信链路组成闭环系统,整个系统的可操作性和可靠性受制于天地链路的时延,大时延将直接影响整个系统的稳定性和可操作性。因此,遥操作技术的关键问题是如何解决大时延造成的系统不稳定性和操作中的“运动—等待”现象。本书结合我国测控网络的布局特点,即上行带宽有限、测控弧段有限等约束条件,提出了我国空间机器人遥操作系统的设计原则和设计方案,突出解决了一批相关的关键技术,设计和研制了我国空间遥操作系统的试

验样机。并于 2013 年在我国首次开展了人在地面对在轨空间机械手的遥操作,试验达到了预期目标,圆满完成了试验任务,验证了我国自行研制的空间遥操作系统的可靠性和可用性。

本书是西北工业大学智能机器人研究中心研究团队近年来在完成我国某型空间机器人遥操作系统研制过程的理论成果的提炼和升华,是对攻克的主要关键技术所形成的重要理论成果的汇集,主要参考了研究过程中产生的技术报告、研究生学位论文。本书在重点介绍空间遥操作技术中的大时延遥操作技术、任务规划技术、预测仿真技术、人机交互技术、信息管理技术和地面验证技术研究的基础上,简要介绍我国某型空间机器人遥操作系统的设计原则和基本方案。

本书共分为 8 章:第 1 章介绍遥操作技术的发展历程、典型应用情况以及遇到的挑战等;第 2 章概要介绍遥操作的主要模式、空间遥操作过程的特点、遥操作的控制方法和基本理论以及遥操作的关键技术等;第 3 章阐述空间遥操作的任务规划技术,并作为遥操作的关键技术进行重点论述;第 4 章介绍空间遥操作的预测仿真技术,探讨如何消减大时延对遥操作的影响;第 5 章对空间遥操作的人机交互技术进行深入的分析 and 探讨;第 6 章介绍空间遥操作的地面验证技术;第 7 章介绍空间遥操作的信息管理技术;第 8 章介绍航天测控技术及空间遥操作天地大回路支持平台技术。

本书的完成是集体智慧的结晶,除了作者黄攀峰、刘正雄之外,王明、常海涛、田志宇、齐庆玺、周阳、台健生、王学谦、党小鹏、潘吉祥、戴沛等也做了大量工作,在此一并表示感谢。感谢梁斌、孙汉旭、黄学祥等的大力支持。

本书可作为高等院校航天应用类相关专业研究生和高年级本科生的教材,也可供从事空间机器人技术以及遥操作技术研究的工程技术人员参考。希望本书的出版对于推动空间遥操作技术在我国的研究与应用起到良好作用。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 机器人的发展历程	1
1.1.2 遥操作的由来	5
1.2 遥操作典型应用及技术验证试验	6
1.2.1 空间维护中的遥操作	7
1.2.2 远程医疗及远程手术中的遥操作	18
1.3 遥操作面临的挑战	21
参考文献	24
第 2 章 大时延空间遥操作技术	27
2.1 遥操作基本模式	27
2.1.1 直接操纵模式	27
2.1.2 监督操纵模式	29
2.1.3 全自主操纵模式	30
2.1.4 其他操纵模式	31
2.2 空间遥操作过程的特点	32
2.3 遥操作系统的评价指标	34
2.3.1 鲁棒性	34
2.3.2 任务性能	35
2.3.3 临场感	35
2.3.4 透明性	36
2.4 遥操作中常用的控制方法及理论	37
2.4.1 基于无源性理论的控制方法	39
2.4.2 基于事件的控制方法	41
2.4.3 基于 Lyapunov 函数的控制方法	42
2.4.4 基于滑模控制的方法	43
2.4.5 基于 H_∞ 理论的控制方法	45

2.4.6 基于自适应的控制方法	46
2.5 大时延空间遥操作的关键技术问题	48
2.5.1 具有临场感的人机交互技术	48
2.5.2 基于虚拟现实的预测仿真技术	49
2.5.3 空间机器人任务规划技术	51
参考文献	52
第3章 空间遥操作任务规划技术	56
3.1 任务规划技术发展历程	56
3.1.1 美军任务规划系统	58
3.1.2 ENVISAT 项目任务规划系统	61
3.1.3 “火星快车”项目任务规划系统	62
3.2 任务规划基本理论与方法	64
3.2.1 基于 Agent 的任务规划	64
3.2.2 基于 Petri 网的任务规划	68
3.3 空间机器人运动学基本理论	71
3.3.1 空间机器人运动学基础	71
3.3.2 位姿固定空间机器人运动学	75
3.3.3 自由飞行空间机器人运动学	75
3.3.4 自由漂浮空间机器人运动学	77
3.4 空间机器人运动规划基本理论	79
3.4.1 空间机器人笛卡儿空间规划技术	79
3.4.2 空间机器人关节空间规划技术	88
3.4.3 空间机器人非完整规划技术	95
3.4.4 仿真算例	108
3.5 空间遥操作任务规划系统设计与实现	111
3.5.1 功能要求	111
3.5.2 基本方案	111
参考文献	116
第4章 空间遥操作预测仿真技术	118
4.1 预测仿真的发展历程	118
4.1.1 可视化仿真技术	118
4.1.2 预测显示技术	118
4.2 空间遥操作预测仿真系统的设计	121
4.2.1 功能要求	121

4.2.2 基本方案	121
4.3 预测仿真相关技术	129
4.3.1 虚拟现实	129
4.3.2 增强现实	132
4.3.3 虚拟融合	143
4.3.4 基于层次包围体技术的碰撞检测	144
4.3.5 动力学预测	150
4.3.6 安全检查机制	158
4.3.7 参数辨识与模型修正	158
参考文献	166
第5章 空间遥操作人机交互技术	168
5.1 概述	168
5.2 人机交互技术发展	169
5.2.1 发展历程	169
5.2.2 主要研究内容	170
5.2.3 未来发展趋势	171
5.3 人机交互的原理与方式	172
5.3.1 人机界面技术	172
5.3.2 多通道交互	173
5.3.3 虚实融合和三维人机交互	176
5.3.4 可穿戴式人机交互	177
5.3.5 脑机交互	180
5.4 基于力反馈的双边遥操作技术	181
5.4.1 手控器技术	181
5.4.2 双边控制遥操作技术	185
5.5 虚拟夹具技术	197
5.5.1 虚拟夹具简介	197
5.5.2 速度型虚拟夹具	199
5.5.3 虚拟管道	206
5.5.4 虚拟夹具辅助空间遥操作	217
5.6 空间遥操作人机交互系统设计与实现	222
5.6.1 功能要求	222
5.6.2 系统组成	222
5.6.3 系统设计与实现	224
参考文献	227

第 6 章 空间遥操作地面验证技术	230
6.1 概述	230
6.2 地面验证原理	230
6.2.1 气浮及水浮试验系统	230
6.2.2 吊丝配重试验系统	231
6.2.3 失重飞机及落塔试验系统	232
6.2.4 混合试验系统	233
6.3 典型地面验证系统	233
6.3.1 载人航天器人工控制系统地面验证系统	233
6.3.2 SPDM 任务检验装置	235
6.3.3 ETS - VII 地面遥操作验证系统	235
6.4 空间遥操作地面验证系统的设计与实现	237
6.4.1 地面验证系统的组成与功能	237
6.4.2 空间机械手分系统模拟器	239
6.4.3 星务数传模拟器	244
6.4.4 动力学与图形工作站	248
6.4.5 时延模拟模块设计	250
参考文献	252
第 7 章 空间遥操作信息管理技术	254
7.1 信息管理技术的国内外研究现状	254
7.1.1 ETS - VII 地面控制系统	254
7.1.2 机器人控制模块化结构	256
7.1.3 JPL 的 WITS 系统	257
7.1.4 TeleRobot 系统	258
7.2 空间遥操作系统的网络与通信	259
7.2.1 遥操作系统的内部通信	259
7.2.2 空间通信的特点	261
7.3 信息管理系统详细设计	262
7.3.1 任务与功能	262
7.3.2 功能要求分解及系统的模块结构	263
7.3.3 设计原理及实现方案	265
参考文献	277
第 8 章 航天测控及空间遥操作支持平台技术	279
8.1 航天测控技术概述	279

8.1.1	航天测控技术的发展	280
8.1.2	主要协议和标准	282
8.1.3	国外航天测控概述	284
8.1.4	国内航天测控概述	288
8.2	航天测控网	290
8.2.1	时间统一系统	291
8.2.2	测控网的功能	294
8.2.3	测控网的设计	296
8.2.4	航天测控中心	299
8.2.5	航天测控站	300
8.3	空间遥操作支持平台设计	303
8.3.1	功能与组成	305
8.3.2	工作流程	306
8.3.3	工作模式	308
	参考文献	310

CONTENTS

1 Introduction	1
1.1 Summary	1
1.1.1 The History in Robotics	1
1.1.2 The Origin of The Teleoperation	5
1.2 Typical Application of Teleoperation and Technology Demonstration	
Experiment	6
1.2.1 Teleoperation in Space Maintenance	7
1.2.2 Teleoperation in Telemedicine and Remote Surgery	18
1.3 The Challenge for the Teleoperation	21
References	24
2 Technology of Space Teleoperation with Large Time Delay	27
2.1 The Basic Mode of Teleoperation	27
2.1.1 Direct Control Mode	27
2.1.2 Supervisory Control Mode	29
2.1.3 Automatic Control Mode	30
2.1.4 Other Operation Mode	31
2.2 The Characteristics of Space Teleoperation	32
2.3 The Evaluation Index of Teleoperation System	34
2.3.1 Robustness	34
2.3.2 Task Performance	35
2.3.3 Telepresence	35
2.3.4 Transparency	36
2.4 The Commonly Used Control Method and Theories in Teleoperation	37
2.4.1 Control Method Based On the Theory of Passive	39
2.4.2 Event – Based Control Method	41
2.4.3 Control Method Based on Lyapunov	42
2.4.4 The Control Method Based on Sliding Mode	43

2.4.5	Control Method Based on the Theory of H_{∞}	45
2.4.6	Control Method Based on Adaptive	46
2.5	The Key Technical Problems of Large Time Delay of Space Teleoperation	48
2.5.1	Human – Machine Interaction With Telepresence	48
2.5.2	Predictive Simulation Technology Based on Virtual Reality	49
2.5.3	The Task Planning Technology of Space Robot	51
	References	52
3	Task Planning for Space Teleoperation	56
3.1	Developmental Progress of Task Planning	56
3.1.1	Task Planning System of American Military	58
3.1.2	Task Planning System of ENVISAT	61
3.1.3	Task Planning of Mars Express Probe	62
3.2	Basic Theory and Methods for Task Planning	64
3.2.1	Task Planning Based on Agent	64
3.2.2	Task Planning Based on Petri Net	68
3.3	Basic Kinematic Theory for Space Robot	71
3.3.1	Kinematic Foundation for Space Robot	71
3.3.2	Kinematics for Fixed Position and Attitude Space Robot	75
3.3.3	Kinematics for Free – Flying Space Robot	75
3.3.4	Kinematics for Free – Floating Space Robot	77
3.4	Basic Theory of Path Planning for Space Robot	79
3.4.1	Planning in Cartesian Space for Space Robot	79
3.4.2	Planning in Joint Space for Space Robot	88
3.4.3	Non – Holonomic Planning for Space Robot	95
3.4.4	Simulation Case	108
3.5	Design and Realize of Task Planning System for Space Teleoperation	111
3.5.1	Demand of Function	111
3.5.2	Basic Scheme	111
	References	116
4	Forecast and Simulation for Space Teleoperation	118
4.1	Developmental Progress of Forecast and Simulation	118
4.1.1	Visualize Simulation	118

4.1.2	Forecast Display	118
4.2	Design of Forecast and Simulation System for Space Teleoperation ...	121
4.2.1	Demand of Function	121
4.2.2	Basic Scheme	121
4.3	Related Technology of P Forecast and Simulation	129
4.3.1	Virtual Reality	129
4.3.2	Augment Reality	132
4.3.3	Virtual Fusion	143
4.3.4	Collision Detection Based on Hierarchical Bounding Volume	144
4.3.5	Dynamic Prediction	150
4.3.6	Mechanics of Safety Check	158
4.3.7	Parameter Recognition and Model Revision	158
	References	166
5	Human – Machine Interaction Techniques in Space teleoperation	168
5.1	Introduction	168
5.2	Development In Human – Machine Interaction Techniques	169
5.2.1	Review of Development	169
5.2.2	Primary Content of Research	170
5.2.3	Prospect for Futher Research Work	171
5.3	Principle and Methods of Human – Machine Interaction Techniques	172
5.3.1	User Interface Techniques	172
5.3.2	Multi – Modal Human – Machine Interaction	173
5.3.3	Virtual – Reality Fusion and 3D User Interfaces	176
5.3.4	Wearable Human – Machine Interaction	177
5.3.5	Brain – Machine Interaction	180
5.4	Bilateral Teleoperation Systems with Force – Reflection	181
5.4.1	Hand Controller Techniques	181
5.4.2	Bilateral Teleoperation Techniques	185
5.5	Virtual Fixture Techniques	197
5.5.1	Introduction	197
5.5.2	Velocity – based Virtual Fixture	199
5.5.3	Virtual Tube	206
5.5.4	Space Teleoperation Based on Virtual Fixture	217

5.6	Design and Realize of Human – Machine Interaction System in Space Teleoperation	222
5.6.1	Demands in Application	222
5.6.2	Composition of Human – Machine Interaction System	222
5.6.3	Design and Realization of System	224
	References	227
6	Ground – based Verification Technology	230
6.1	Introduction	230
6.2	Principle of Ground – based Verification	230
6.2.1	Air Bearing Table and Fluid Suspension Experiment System	230
6.2.2	Hang Spring with Additional Bob – weight Experiment System	231
6.2.3	Parabolic Flights and Drop Tower Experiment System	232
6.2.4	Mixture Experiment System	233
6.3	Typical Ground – based Verification System	233
6.3.1	Manned – spacecraft Manual Control Ground – based Verification System	233
6.3.2	SPDM Task Verification Facility	235
6.3.3	Ground – based Verification System of The ETS – VII	235
6.4	Design and Realize of Ground – based Verification System in Space Teleoperation	237
6.4.1	Composition and Functions of Ground – based Verification System	237
6.4.2	Space Manipulator Simulator	239
6.4.3	Satellite House – keeping Simulator and Data Transmission Simulator	244
6.4.4	Dynamic and Graphic Workstation	248
6.4.5	Design of Time Delay Simulator	250
	References	252
7	Information Management for Space Teleoperation	254
7.1	Current State of Information Management Research	254
7.1.1	Ground Control System of The ETS – VII	254
7.1.2	Modular Architecture for Robot Control	256