CONTROL OF NETWORKED TELEROBOTICS IN A COMPLICATED EXTERNAL ENVIRONMENT

复杂外部环境下网络化遥操作机器人控制

翟弟华　夏元清　著

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

CONTROL OF NETWORKED TELEROBOTICS IN A COMPLICATED EXTERNAL ENVIRONMENT

复杂外部环境下网络化遥操作机器人控制

翟弟华　夏元清　著

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

内 容 简 介

针对复杂环境下网络化遥操作机器人控制设计与分析难题，本书基于作者长期从事的网络化机器人及应用等相关科研实践，介绍了一种基于动态补偿思想的辅助切换滤波控制综合设计方法。该方法具有控制结构简单、分析方法易移植和保守性低等优点。本书将从关节空间遥操作到任务空间遥操作、从同构遥操作到异构遥操作、从单主单从遥操作到多主多从遥操作，系统讨论辅助切换滤波控制方法在复杂外部环境下网络化遥操作系统控制中的应用，并以脊柱微创手术为背景，给出该方法在遥操作机器人高性能控制中的使用方法。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

复杂外部环境下网络化遥操作机器人控制/翟弟华，夏元清著．—北京：北京理工大学出版社，2019.7

ISBN 978-7-5682-7118-9

Ⅰ.①复…　Ⅱ.①翟…②夏…　Ⅲ.①机器人控制　Ⅳ.①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 107418 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／北京地大彩印有限公司
开　　本／710 毫米×1000 毫米　1/16
印　　张／18.5
字　　数／326 千字
版　　次／2019 年 7 月第 1 版　2019 年 7 月第 1 次印刷
定　　价／68.00 元

责任编辑／张海丽
文案编辑／张海丽
责任校对／周瑞红
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

作者简介

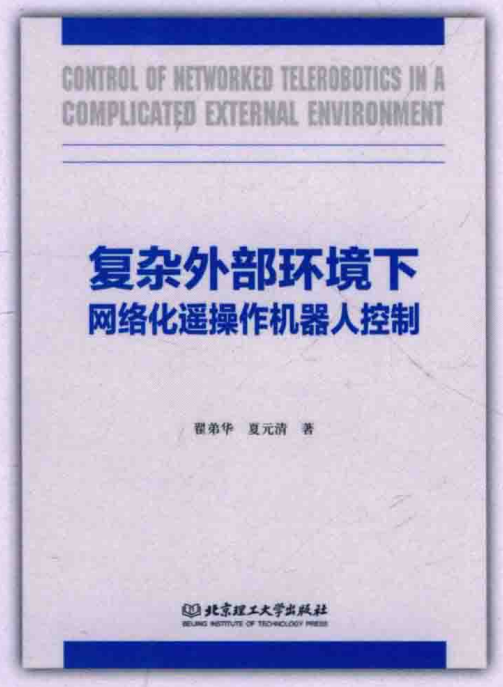


翟弟华，男，1988年生，安徽马鞍山市人，博士。现为北京理工大学特别副研究员、硕士生导师。主要研究方向为机器人控制、网络化非线性系统分析与控制、智慧医疗等，在IEEE系列汇刊上发表论文多篇。研究工作得到了国家自然科学基金青年基金项目、空间智能控制技术重点实验室开放基金和中国电机工程学会青年人才托举计划资助。



夏元清，男，1971年生，安徽天长市人，博士。现为北京理工大学讲席教授，博士生导师，北京理工大学自动化学院院长、学科带头人，教育部“长江学者”特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、国家“万人计划”领军人才、享受国务院特殊津贴专家。主要研究领域为多源信息复杂系统的信息处理与控制、云控制理论与应用、空天地一体化网络协同控制等。主持国家重点研发计划、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目、973计划子课题等项目多项。在国内外重要学术刊物上发表论文300余篇，其中被SCI收录280余篇，出版英文专著8部，论文累计被引用1万余次。曾获得国家科技进步二等奖1项、教育部自然科学二等奖2项、北京市科学技术二等奖2项。

投稿邮箱：xueshu@bitpress.com.cn
咨询电话：(010) 68911947　68911085



策划编辑：张海丽　宋　肖
执行编辑：李丁一
封面设计：北日方 装帧设计

前　言

本书的主题是网络化遥操作机器人控制。网络化遥操作机器人因其能够代替人类在危险、恶劣环境中进行作业，在航天、军事、医疗、灾难救援、核能材料处理等领域有着广泛的应用前景。然而，通信网络的引入，加之机器人系统本身及其作业环境的复杂性，给其控制带来了相当的影响。在过去的半个多世纪中，针对遥操作系统控制已取得一系列研究成果，发展了包括基于无源性理论、基于输入到状态/输入到输出稳定的小增益定理等在内的多种控制方法。但是，这些方法在应用于网络化遥操作系统控制时仍然面临着不同程度的局限性。因此，寻找新的有效先进控制方法是遥操作系统研究中的一个重要方向。

对此，笔者将系统研究复杂外部环境下网络化遥操作机器人的控制设计和性能分析新方法。对于网络化遥操作机器人控制问题，在过去的几年中，笔者从控制实施便捷性、分析方法通用性、性能提升三个方面进行考虑，基于动态补偿思想，提出并发展了一套面向遥操作系统的辅助切换滤波综合控制设计方法。实现了从关节空间遥操作到任务空间遥操作、从同构遥操作到异构遥操作、从单主单从遥操作到多主多从遥操作等多型控制任务的设计和分析。相较传统方法，基于辅助切换滤波的遥操作机器人综合设计具有控制结构简单、分析方法易移植、保守性更低等优点。近4年来，笔者在该领域发表了包括IEEE汇刊在内的学术论文多篇，得到了国内外同行的高度评价。为系统总结笔者在遥操作机器人控制设计和性能分析方面的新发现，特编著出版本书。

本书的内容除绪论外，可分为四大部分：

第一部分，即第2章，简要概述了遥操作机器人控制的数学基础，包含遥操作机器人系统建模、系统稳定性定义及其判别等内容。

第二部分是关节空间单主单从同构遥操作控制，包括第3章~第5章内容。在第3章中，通过一般双边遥操作控制任务引入辅助切换滤波控制设计方法，给出了基于该方法的遥操作机器人控制设计和稳定性分析的一般步骤。在此基础上，考虑到机器人实际运行时面临的执行器饱和约束，第4章给出了输入饱和约束下基于辅助切换滤波的遥操作系统自适应控制设计方法。第3章、第4章的控制设计只实现了遥操作机器人渐近收敛控制，为了确保遥操作系统具有更好的同步性能，在第5章中综合利用非光滑控制技术和辅助切换滤波控制方法，针对不考虑执行器饱和与考虑执行器饱和两种情形，提出了遥操作机器人有限时间控制方法，为复杂网络环境下遥操作系统实现更快的主从同步提供了可能。

第三部分是任务空间多主多从遥操作控制，包括第6章和第7章。在完成某些复杂任务时，多机器人协调协作比单机器人更具优势，因此本书介绍了基于辅助切换滤波的遥操作机器人综合设计在多边协调遥操作控制领域的应用。首先，通过应用空间变换理论获得遥操作系统运动/力解耦空间，在第6章提出了基于混合运动/力控制架构的多边协作遥操作系统的新的智能控制方法。为了提高传统非约束型协调协作控制方法性能，在第7章提出了基于从机器人运动同步的非约束型协调控制方案。通过在传统非约束型协作控制策略中引入从机器人间同步误差控制，并结合辅助切换滤波方法，设计了新型神经网络自适应控制器；接着引入了描述性能控制技术，确保在操作者操控差异性和外部不确定性因素存在的情况下从机器人协调协作性能。

第四部分是高性能控制及其应用，包括第8章~第10章。该部分内容主要依托北京市自然科学基金重点项目展开，研究辅助切换滤波控制方法在脊柱微创手术遥操作机器人上的应用。在第8章中，考虑到脊柱周边环境的特殊性和复杂性，需要机器人具有高度的灵活性并且具有自主避障功能，研究了带冗余自由度从机器人的双边异构遥操作系统控制问题。基于辅助切换滤波控制技术，提出了具有时变通信时滞的异构遥操作机器人系统半自主自适应控制新方法，提高了复杂、动态环境机器人作业能力。在第9章中，考虑到脊柱微创手术机器人对控制的精准度有很高的要求，提出了基于描述性能控制策略的遥操作系统高性能同步控制方案。在允许主/从机器人与操作者/环境有力的交互情况下，实现了时变通信时滞下的主、从机器人同步（瞬态/稳态）性能的定量分析与控制。在第10章中，为了克服经典描述性能控制方法易受干扰引发控制奇异问题，借鉴事件驱动控制思想，提出了遥操作系统切换类描述性能控制方法。该方法进一步提高了闭环控制鲁棒性，在保证高精准主从同步控制的同时，提升了闭环控制的可靠性。

本书的研究内容得到了国家自然科学基金青年科学基金“人机协作环境下网络化机器人高性能控制关键技术研究”（61803033）和北京市自然科学基金重点基金“脊柱微创手术网络化遥操作机器人的基础问题与关键技术”（4161001）等项目的支持。本书的出版得到了北京理工大学研究生院的大力支持。在出版经费方面，得到了北京理工大学优秀博士学位论文出版项目基金资助。值此书出版之际，笔者在此对给予支持和资助的单位与个人表示衷心的感谢！

由于笔者水平以及研究工作的局限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正！

作　者

符号及术语说明

$(\star)_m$, $(\star)_s$	下标m和s分别表示主机器人和从机器人
$(\star)_h$, $(\star)_e$	下标h和e分别表示操作者和环境
DOF	自由度（degree of freedom）
$\boldsymbol{q}_\star(t)$, $\dot{\boldsymbol{q}}_\star(t)$, $\ddot{\boldsymbol{q}}_\star(t)$	分别为机器人的关节位置、速度和加速度，其中$\star \in \{m, s\}$（正文中简略表达，省略时间系数，记为$\boldsymbol{q}_\star$, $\dot{\boldsymbol{q}}_\star$, $\ddot{\boldsymbol{q}}_\star$）
$\boldsymbol{X}_\star$	机器人末端执行器位姿坐标，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{M}_\star(\boldsymbol{q}_\star)$	机器人对称正定惯性矩阵，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{C}_\star(\boldsymbol{q}_\star, \dot{\boldsymbol{q}}_\star)$	机器人离心力和哥氏力矩阵，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{g}_\star(\boldsymbol{q}_\star)$	机器人重力向量，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{J}_\star(\boldsymbol{q}_\star)$	反映机器人关节速度到末端执行器运动速度变换关系的雅可比矩阵，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{\tau}_\star$	机器人控制输入扭矩，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{y}_\star(t)$	辅助切换滤波器状态输出，其中$\star \in \{m, s\}$
$\boldsymbol{\mathcal{K}}_\star(t)$	辅助切换滤波器切换规则，其中$\star \in \{m, s\}$
$\kappa_{\star,i}(t)$	$\boldsymbol{\mathcal{K}}_\star(t)$的第$i$个对角线元素，其中$\star \in \{m, s\}$
$d_{\mathrm{m}}(t)$	主机器人与从机器人间的通信时滞
$d_{\mathrm{s}}(t)$	从机器人与主机器人间的通信时滞
$\bar{d}$	通信时滞上界
$\tilde{d}$	通信时滞变化率的绝对值上界
$\boldsymbol{I}$	具有合适维数的单位矩阵
$\mathrm{diag}[a_1, a_2, \cdots, a_n]$	以标量$a_j (j = 1, 2, \cdots, n)$为对角元素的对角矩阵
$\mathrm{block\ diag}[\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2, \cdots, \boldsymbol{A}_n]$	以矩阵$\boldsymbol{A}_j (j = 1, 2, \cdots, n)$为对角元素的分块对角矩阵
$A_{\star,i}$	向量（矩阵）$\boldsymbol{A}_\star$的第i个（对角线）元素
$\mathcal{B}^C$	集合$\mathcal{B}$的补集
$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$	矩阵$\boldsymbol{A}$的转置
$\boldsymbol{A}^{-1}$	方阵$\boldsymbol{A}$的逆
$\boldsymbol{A}^{+}$	矩阵$\boldsymbol{A}$的伪逆

$\boldsymbol{A}^{-\mathrm{T}}$	$\boldsymbol{A}^{-\mathrm{T}}=\left(\boldsymbol{A}^{-1}\right)^{\mathrm{T}}$
$(\hat{\star})$	$(\star)$的估计值
$(\tilde{\star})$	$(\tilde{\star})=(\star)-(\hat{\star})$
$\sup\alpha(t)$	$\alpha(t)$的上确界
$\operatorname{ess\,sup}\alpha(t)$	$\alpha(t)$的本性上确界
$\lambda_{\max}(\boldsymbol{A})$	矩阵$\boldsymbol{A}$的最大特征值
$\lambda_{\min}(\boldsymbol{A})$	矩阵$\boldsymbol{A}$的最小特征值
$\max(A)$	A中的最大值
$\min(A)$	A中的最小值
$\mathrm{Tr}(\boldsymbol{A})$	矩阵$\boldsymbol{A}$的迹
$<(>)$	小（大）于
$\leqslant(\geqslant)$	小于（大于）等于
$\neq$	不等于
$\equiv$	恒等于
$A:=B$	把表达式A记作B
$\forall$	对于全部，对于每一个
$\in$	属于
$\bigcap$	交集运算
$\bigcup$	并集运算
$A\backslash B$	A中不包含B的部分
$\Longrightarrow$	蕴含
$\sum$	求和
$\{\cdot\}$	GL矩阵
$\bullet$	GL算子
e	自然对数的底数
$\boldsymbol{e}(t)$	跟踪误差，书中多数时候省略写成$\boldsymbol{e}$
$\gamma\in\mathcal{K}$	$\mathcal{K}$类函数γ
$\gamma\in\mathcal{GK}$	广义$\mathcal{K}$类函数γ
$\gamma\in\mathcal{KL}$	$\mathcal{KL}$类函数γ
$\gamma\in\mathcal{GKL}$	广义$\mathcal{KL}$类函数γ
$\mathbb{R}_+$	所有非负实数
$\mathbb{R}^n$	n维实欧几里得空间
$\mathbb{R}^{n\times m}$	n行m列实矩阵集合

$C_{\bar{d}}^n$	$C([-\bar{d},0];\mathbb{R}^n)$的简写，将区间$[-\bar{d},0]$映射到$\mathbb{R}^n$中连续函数所组成的空间
$\lvert\star\rvert$	欧几里得范数，定义为：对任意的$\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}}$，$\lvert\boldsymbol{x}\rvert=(\sum\limits_{i=1}^{n}\lvert x_i\rvert^2)^{\frac{1}{2}}$
$\lVert\star\rVert$	对任意的$\boldsymbol{\phi}\in C_{\bar{d}}^n$，定义为$\lVert\boldsymbol{\phi}\rVert=\sup_{-\bar{d}\leqslant\tau\leqslant 0}\lvert\boldsymbol{\phi}(s)\rvert$
$\lVert\star\rVert_\infty$	本性上确界范数
$\lVert\star\rVert_{M_2}$	M_2范数，对任意的$\boldsymbol{\phi}\in C([-\bar{d},0];\mathbb{R}^n)$，定义为$\lVert\boldsymbol{\phi}\rVert_{M_2}=\left(\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}(0)\boldsymbol{\phi}(0)+\int_{-\bar{d}}^{0}\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}(\tau)\boldsymbol{\phi}(\tau)\mathrm{d}\tau\right)^{\frac{1}{2}}$
$\mathrm{sat}(\cdot)$	饱和函数
$\mathrm{sgn}(\cdot)$	符号函数
D^+V	V的右上Dini导数
$\alpha\circ\beta$	$\circ$复合函数算子，$\alpha\circ\beta$表示α和β的复合函数，定义为：如果$\alpha:A\to B$，$\beta:B\to C$，则$\alpha\circ\beta:A\to C$

目 录

第 1 章 绪论 …… 1
1.1 研究背景及意义 …… 1
1.2 复杂网络及外部环境下遥操作系统控制 …… 3
1.3 输入饱和约束下遥操作系统控制 …… 6
1.4 多边协调协作遥操作控制 …… 7
1.5 异构遥操作控制 …… 9
1.6 遥操作系统高性能控制 …… 10
1.7 当前研究难点与本书研究内容 …… 12
1.8 本书的章节安排 …… 12
第 2 章 基础理论 …… 14
2.1 引言 …… 14
2.2 机器人的数学模型 …… 14
2.2.1 拉格朗日运动方程 …… 14
2.2.2 机器人动力学 …… 18
2.2.3 基本性质 …… 21
2.2.4 遥操作机器人系统数学描述 …… 23
2.3 时滞系统 …… 24
2.3.1 时滞的建模 …… 24
2.3.2 泛函微分方程 …… 25
2.3.3 切换系统 …… 26
2.3.4 时滞系统稳定性及其判据 …… 27
2.4 本章小结 …… 35
第 3 章 遥操作机器人自适应控制 …… 36
3.1 引言 …… 36
3.2 问题描述 …… 36
3.3 自适应控制器设计 …… 37
3.4 闭环遥操作系统稳定性分析 …… 42
3.5 单主多从遥操作系统自适应控制 …… 45

3.6 仿真验证 …… 50
3.7 本章小结 …… 55
第 4 章 输入饱和约束下遥操作机器人控制 …… 56
4.1 引言 …… 56
4.2 问题描述 …… 57
4.3 饱和约束自适应控制器设计 …… 59
4.4 闭环遥操作系统稳定性分析 …… 63
4.5 实验验证 …… 67
4.6 本章小结 …… 72
第 5 章 遥操作机器人自适应有限时间控制 …… 74
5.1 引言 …… 74
5.2 双边遥操作机器人有限时间自适应控制 …… 74
5.2.1 有限时间控制器设计 …… 76
5.2.2 闭环遥操作系统稳定性分析 …… 79
5.2.3 仿真验证 …… 85
5.3 遥操作机器人有限时间饱和自适应控制 …… 90
5.3.1 抗饱和有限时间自适应控制器设计 …… 93
5.3.2 稳定性分析 …… 96
5.3.3 仿真验证 …… 104
5.4 本章小结 …… 116
第 6 章 基于混合运动/力控制的多边协调遥操作 …… 118
6.1 引言 …… 118
6.2 问题描述 …… 118
6.2.1 主机器人动力学模型 …… 119
6.2.2 从机器人动力学模型 …… 120
6.2.3 控制目标 …… 124
6.3 多边协调控制器设计 …… 125
6.4 闭环稳定性分析 …… 127
6.5 仿真验证 …… 131
6.6 本章小结 …… 137

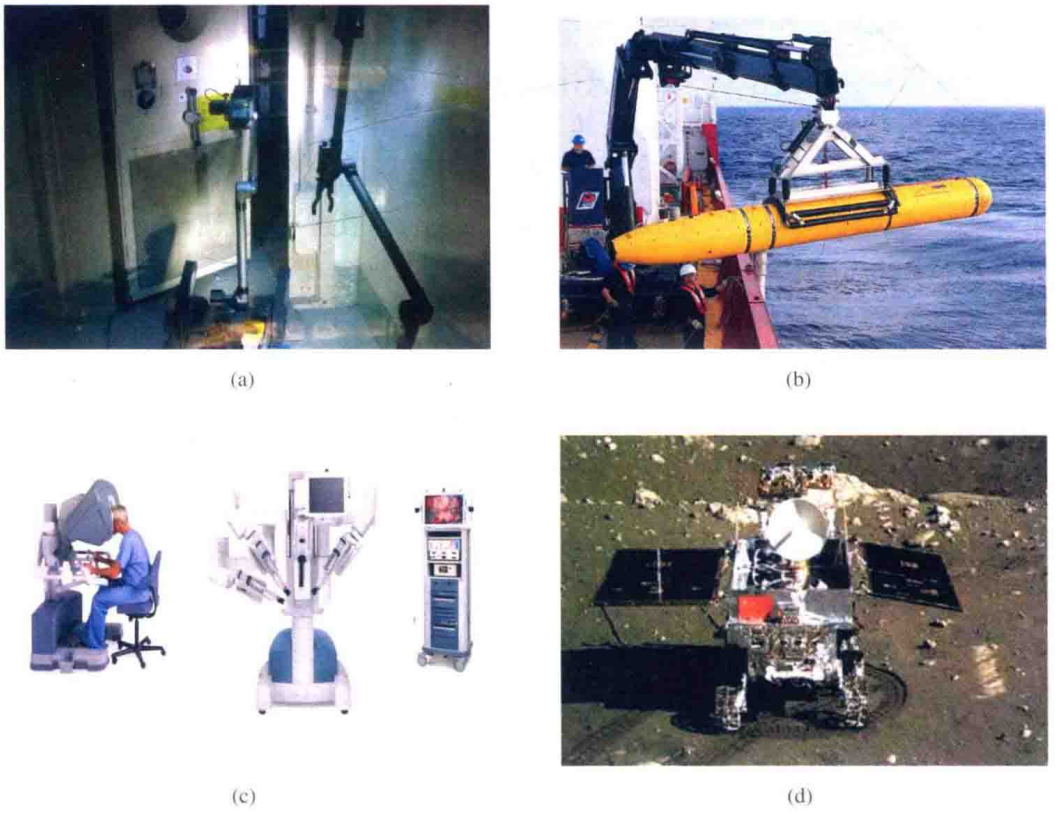
第 7 章 基于描述性能控制的多边协调遥操作 …… 138
7.1 引言 …… 138
7.2 问题描述 …… 138
7.3 多边协调控制器设计 …… 140
7.3.1 自适应神经网络控制器设计 …… 144
7.3.2 滤波器子系统 …… 147
7.3.3 完备闭环遥操作系统 …… 149
7.4 稳定性分析 …… 149
7.5 仿真验证 …… 157
7.6 本章小结 …… 165
第 8 章 异构遥操作系统半自主自适应控制 …… 167
8.1 引言 …… 167
8.2 问题描述 …… 168
8.2.1 机器人动力学 …… 168
8.2.2 输入不确定性 …… 170
8.2.3 控制目标 …… 171
8.3 任务空间遥操作 …… 172
8.4 稳定性分析 …… 175
8.5 从机器人的半自主控制 …… 180
8.6 仿真验证 …… 181
8.7 本章小结 …… 197
第 9 章 遥操作机器人任务空间描述性能控制 …… 198
9.1 引言 …… 198
9.2 问题描述 …… 199
9.2.1 机器人动力学 …… 199
9.2.2 控制目标 …… 201
9.3 控制器设计 …… 202
9.3.1 描述性能控制策略 …… 202
9.3.2 控制扭矩设计 …… 203
9.3.3 完备闭环遥操作系统 …… 207
9.4 稳定性分析 …… 208

9.5 仿真验证 …… 216
9.6 本章小结 …… 228
第 10 章 基于类描述性能控制策略的遥操作系统鲁棒高性能控制 …… 229
10.1 引言 …… 229
10.2 问题描述 …… 234
10.2.1 机器人动力学模型 …… 234
10.2.2 类描述性能控制策略的概念 …… 234
10.3 网络化机器人类描述性能自适应控制器设计 …… 236
10.4 类描述性能控制系统稳定性分析 …… 241
10.5 遥操作系统类描述性能控制 …… 251
10.6 仿真验证 …… 252
10.7 本章小结 …… 264
参考文献 …… 265

第1章　绪论

1.1　研究背景及意义

网络化遥操作机器人控制是进入21世纪以来机器人系统与控制领域的热点研究方向之一[1-3]。得益于网络技术的引入，遥操作机器人能够代替人类在危险、恶劣环境中作业[4,5]，因此在各种应用中得到迅速发展。近年来在许多重大事件中都可以见到它的身影，如日本福岛核电站事故救援[6]、MH370搜救[7]、远程外科手术[8]、“玉兔”号月球车[9]等，如图1.1.1 所示。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 1.1.1　各种遥操作机器人

(a)日本福岛核电站事故救援中使用的PackBot机器人；(b)MH370客机搜救使用的Bluefin-21的水下机器人；(c)“达芬奇”手术遥操作机器人系统；(d)“玉兔”号月球车

结构上，遥操作机器人系统是由操作者、主机器人、从机器人、工作环境以及通信网络形成的一个整体[2]。本质上，它是一个典型的网络化非线性动态

系统。因此，其同时具有非线性特性和网络化特征。迄今，遥操作系统控制仍然面临着诸多挑战：一方面，遥操作机器人作业时，复杂的外部环境，加上机器人本身的强非线性时变特性，使得机器人的控制设计变得困难；另一方面，网络的引入虽可使得遥操作在不同系统之间进行数据传输，并为不同地点的操作者实现资源共享和协调合作提供了便利，但也给遥操作机器人控制带来了困难。遥操作控制通常伴随网络化传输，现实网络系统对于信息传输本身的不稳定性、突发性、易受干扰、噪声抑制能力差，以及信息在网络传输过程中不可避免的时滞、丢包、错码、失实等不利因素，对于遥操作机器人的稳定控制产生了相当的影响。考虑到机器人大都是非线性时变系统，现有针对线性网络化控制系统的研究成果难以直接应用于此类系统控制和分析。事实上，在文献[10]中，法国著名控制专家Richard教授就曾指出：非线性时滞系统的控制问题仍然是没有解决的问题（open problem），需要进一步研究。目前，针对网络化遥操作系统控制设计和分析，研究者已经提出了很多方法，如基于波变量和散射理论的方法[11–13]、无源性方法[13, 14]、ISS/IOS（input-to-state stability/input-to-output stability）小增益定理方法[15–19]等。然而，这些方法在使用时面临着不同程度的局限性。传统波变量方法和散射理论仅仅适用于常值通信时滞情形[1]。无源性方法要求主、从外部输入（分别指操作者和环境外力）满足无源条件，而实际系统复杂多样，未必处处满足无源性[16, 20]。现有ISS/IOS小增益方法虽然很好地避免了无源性要求，但机器人的位置信号也属于闭环系统状态，根据ISS/IOS的定义[21–23]，此时，当机器人的外部输入撤除后，主、从机器人将逐渐达到运动同步，并最终停止在零位置上；而实际遥操作系统，当外部输入撤除后，运动趋势应是主、从机器人运动逐渐达到同步，在同步后应停止在该位置，而不是继续同步运动至零位置。为此，针对复杂网络及外部环境下的遥操作系统，寻找新的有效控制设计及分析方法是十分必要和迫切的。

对此，在国家自然科学基金青年科学基金项目“人机协作环境下网络化机器人高性能控制关键技术研究”（61803033）和北京市自然科学基金重点项目“脊柱微创手术网络化遥操作机器人的基础问题与关键技术”（4161001）支持下，本书系统研究了复杂外部环境下网络化遥操作机器人的控制设计和性能分析新方法。针对控制实施便捷性、分析方法通用性、性能提升的要求，基于动态补偿思想，本书提出了一种面向遥操作系统的辅助切换滤波控制方法，并针对从关节空间遥操作到任务空间遥操作、从同构遥操作到异构遥操作、从单主单从遥操作到多主多从遥操作等多型控制任务，在同时存在不对称时变通信时滞、无源/非无源外部输入、执行器饱和、模型不确定性和外部干扰等复杂环境下给出了具体的设计与性能分析过程，在更广的适用范围内取得了更好的控制

效果。相关成果被用于脊柱微创手术网络化遥操作机器人的高精准度控制、高灵活性及自主避障性能等关键科学问题的解决，提高了复杂、动态环境中机器人作业的能力。

1.2 复杂网络及外部环境下遥操作系统控制

现代意义上最早的遥操作系统可以追溯至20世纪50年代。当时为了在核试验中保护工作者免受辐射影响，美国Argonne国家实验室Goertz等设计了第一台主从遥操作系统，主、从机器人采用机械结构连接[4]。1954 年，他们又开发了基于电气式机械手的新遥操作平台[27]。从那以后，鉴于遥操作的优势，遥操作机器人系统被迅速地应用到许多新领域：从20世纪60年代的潜艇水下维护遥操作机器人[28]，到90年代用于高压线路维修的遥操作机械臂[29]；从1993 年的哥伦比亚号航天飞机上搭载的Rotex 空间机械臂[30]，到2001年Marescaux 博士开发的第一台遥操作手术机器人[26]等。进入21世纪，随着网络通信技术的高速发展，远程数据传输和数据交换得以实现，使得基于网络的遥操作机器人控制系统在各种应用中得到迅速发展[28, 31–33]。

一个典型的网络化遥操作系统由五部分组成，即操作者、主机器人（也称触觉接口）、从机器人（也称远端工作机器人）、环境和通信网络[2]。遥操作系统极大地拓展了人类在危险、恶劣环境中的作业能力。网络的引入给遥操作实现带来便利的同时，也给其控制设计和分析带来了新的挑战。下面针对本书工作简单总结相关研究现状。①

遥操作控制理论自20世纪50年代诞生以来，经历了许多重要发展时刻。20世纪60 年代，遥操作系统开始考虑通信时滞的影响[34]，此时监督控制等方法被用于解决常值通信时滞下遥操作控制[35]。80年代开始，更多先进控制理论相继问世并被用于遥操作系统控制，包括基于李雅普诺夫稳定性方法、无源性方法等，其中很多方法仍然是现在遥操作系统控制的流行方法[11, 36]。80年代末到90 年代初，基于二端口网络的遥操作系统虚拟表示控制方法[11]、波变量方法[12]等相继出现，此阶段的遥操作控制或不考虑时滞影响，或只考虑常值通信时滞。90年代起，人们开始逐步应用因特网，此时开始关注时变通信时滞的遥操作系统控制[37]。现有用到的控制方法主要包括监督控制、无源性方法、滑模控制方法、基于李雅普诺夫稳定性理论的控制方法、鲁棒控制方法、预测控制方法，以及以上控制策略的组合等。

① 需要注意的是，遥操作控制有两大指标，即稳定性和透明性。稳定性是系统的基础，本书的工作也暂时只考虑遥操作系统的稳定性。因此，以下研究现状回顾将只侧重于稳定性。