



“十一五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

拟人双臂机器人技术

· 丁希仑 著 ·



科学出版社

拟人双臂机器人技术

21世纪先进制造技术丛书

- | | |
|---------------------|-------|
| 拟人双臂机器人技术 | 丁希仑 |
| 制造系统运行优化理论与方法 | 邵新宇 等 |
| 数字化加工过程质量控制方法与技术 | 江平宇 等 |
| 金刚石涂层工具制备及其应用 | 陈 明 等 |
| 基于多色集合理论的信息建模与优化技术 | 李宗斌 等 |
| 仿人多指灵巧手及其操作控制 | 刘 宏 等 |
| 机构轨迹生成理论及其创新设计 | 肖人彬 等 |
| 分布交互式汽车驾驶训练模拟系统 | 陈定方 等 |
| 自动制造系统建模、分析与死锁控制 | 李志武 等 |
| 无线传感器网络与移动机器人控制 | 李文锋 |
| 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法 | 蔡自兴 等 |
| 机械故障的全息诊断原理 | 屈梁生 |

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-029864-5



9 787030 298645 >

工程技术分社
联系电话: 010-64034617
E-mail: gengjianye@mail.sciencep.com
销售分类建议: 机器人/机械/控制

定价: 65.00 元

“十一五”国家重点图书出版规划项目
21 世纪先进制造技术丛书

拟人双臂机器人技术

丁希仑 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面介绍了与冗余度拟人双臂机器人系统相关的基础理论和前沿技术,书中内容是根据作者所带领的研究团队近十年来依托国家 863 计划和北京市科技新星计划等课题以及 211 和 985 学科建设经费支持所取得的学术研究及技术实践成果整理撰写而成的。主要内容包括:拟人双臂机器人系统平台方案设计、冗余度机器人运动灵活性和可靠性分析、双臂协调操作的运动规划和协调任务规划方法、基于多传感器信息的分阶段控制及双臂协调控制方法、虚拟仿真环境平台的开发、拟人双臂机器人系统遥操作技术研究等。

本书对冗余度拟人双臂机器人的相关理论、方法以及关键技术问题等做了较为系统深入的论述,不仅包括了对冗余度机器人运动灵活性与可靠性及双臂协调操作运动规划等基础理论和科学问题的阐述,同时加入了冗余度拟人双臂机器人系统的技术发展前沿,如多传感器信息融合技术、智能控制技术、虚拟现实技术、遥操作技术等的应用,力求内容上与国内外最新研究成果同步。

本书可供机械电子工程、控制理论与控制工程、机械设计及理论等相关专业研究生阅读,也可作为机器人研究及自动化相关方向的科研人员与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

拟人双臂机器人技术/丁希仑著. —北京:科学出版社,2011

(“十一五”国家重点图书出版规划项目; 21 世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-029864-5

I. ①拟… II. ①丁… III. ①双臂机器人 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 264021 号

责任编辑:耿建业 迟 慧 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2011年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年1月第一次印刷 印张:21

印数:1 - 2 500 字数:406 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

王田苗(北京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

王越超(中科院沈阳自动化所)

王 煜(香港中文大学)

冯 刚(香港城市大学)

冯培恩(浙江大学)

任露泉(吉林大学)

江平宇(西安交通大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

宋玉泉(吉林大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

张宪民(华南理工大学)

李泽湘(香港科技大学)

李涤尘(西安交通大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

周仲荣(西南交通大学)

查建中(北京交通大学)

柳百成(清华大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

钟志华(湖南大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

顾佩华(汕头大学)

黄 强(北京理工大学)

黄 真(燕山大学)

黄 田(天津大学)

管晓宏(西安交通大学)

熊蔡华(华中科技大学)

翟婉明(西南交通大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

谭建荣(浙江大学)

雒建斌(清华大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有伦' (Xie Youyao).

华中科技大学

2008年4月

前 言

拟人双臂机器人是继类人机器人和两个单机器人协调作业之后的一个新的研究课题，是在机器人学研究中刚刚起步的基础性课题，有着重要的学术研究价值和现实的应用需求。目前，大多数的研究都建立在低自由度的双机械手或两个单臂机器人一起工作的条件下，并且对双臂协调的控制研究大多是针对某一特定工作状况下所进行的理论探讨，尚缺乏对整个系统架构的综合考虑。因此，作为最接近于模拟人类动作的自动化机器，对拟人双臂机器人在理论和应用方面的研究具有重要的意义。开展冗余度拟人双臂机器人的研究可为多机器人协调操作研究奠定理论基础，也可为核电站和空间站等特种应用机器人的研制以及先进制造业的发展提供必要的理论依据和技术支持。

两机器人协调系统比单个机器人具有更强的优越性，就某个具体作业任务而言，设计两个简单的机器人实现作业任务比设计复杂的单个机器人要容易、经济，并且具有较强的柔性、鲁棒性、容错性及并行性。双臂协调控制，即由两个单臂机器人相互协调、相互配合去完成某种作业，由于组成双臂协调控制系统的是两个独立的机器人，它们不可能是两个单臂机器人的简单组合，除了其各自操作目标的控制实现外，它们相互间的协调控制以及对环境的适应性就成为组合的关键。

拟人双臂机器人近似于人的双臂，能完成对于人来说易于实现的功能，具有很大的实用价值。人类手臂是由骨骼、关节和连接它们的肌肉构成，关节有一个或多个自由度。人类手臂有七个自由度，其中肩关节为三个，肘关节为一个，手关节为三个，属于冗余手臂。由于有这样的冗余性，在固定了指尖方向和手腕位置的情况下，可以通过旋转肘关节来改变手臂的姿态，能够回避障碍物。因此，人类手臂在灵活性和可靠性方面所表现出来的优势是无与伦比的。拟人双臂机器人在某种程度上可以比作两个单臂机器人在一起工作的情况，当把其他机器人的影响看成是一个未知源的干扰时，其中的一个机器人就独立于另一个机器人。但拟人双臂机器人作为一个完整的机器人系统，双臂之间存在着依赖关系。它们分享使用传感数据，双臂之间通过一个共同的连接形成物理耦合，最重要的是两臂的控制器之间的通信，使得一个臂对于另一个臂的反应能够做出对应的动作、轨迹规划和决策，也就是双臂之间具有协调关系，这在某种程度上可以看成是人体双臂的协调动作一样。但是，对于具有四肢的动物（包括人），其运动时很自然地便完成了从目标空间到关节空间坐标的转换。这个变化一方面是由基因与生俱来的，另一方面是通过后天学习来不断加以完善的。在一个躯体中的两个单臂相当于两个高水平的控制器，把所有动作的协调作为一个基准，那么，双臂的动作

过程就包含着复杂的机械系统、躯体反馈、视觉反馈、肤体接触、滑移检测以及脑力等在内的数据源，并且用预先获取的数据来确认这一资料数据的储存与处理能力，这正是拟人双臂机器人区别于两个独立单臂机器人组合的关键。

拟人双臂机器人重在面向作业任务的功能模拟，而不苛求“形似”，这一点与一般的类人机器人不尽相同。类人机器人的研究在形体结构模拟和双足行走方面已取得长足进步，但双臂功能还十分有限。在类人机器人的双臂研究上，既追求形体结构模拟又要实现功能模拟，这在一定程度上很难折中。而拟人双臂机器人是从功能上也就是从作业任务的实现能力上模拟人类的双臂功能，重点并不在于形体结构的模拟。因此，拟人双臂机器人是面向实际应用的功能性模拟，是再现人类双臂的功能，而不是简单地再现人类双臂的形体结构。

拟人双臂机器人在实现某些特定作业任务时具有独特的优势。拟人双臂机器人的作用特点主要表现在以下几个方面：一是在末端执行器（手）与臂之间无相对运动的情况下工作，如双臂搬运像钢棒这样的刚性物体，控制效果要优于两个单臂机器人的相应操作；二是在末端执行器（手）与臂之间有相对运动的情况下，通过两臂间较好的配合（协调）能对柔性物体如薄板等进行控制操作，而两个单臂机器人要做到这一点是比较困难的；三是拟人双臂机器人工作时，能够更有效地避免两个单臂机器人在一起工作时产生的冲突；四是拟人双臂机器人比两个单臂机器人更容易实现对多目标的有序操作与控制，如将螺帽放到螺钉上的配合操作。虽然拟人双臂机器人是在单臂机器人的基础上发展起来的，但由于拟人双臂机器人的特殊性，不能将单臂机器人的有关研究成果简单地移植到拟人双臂机器人上。因此，有必要对拟人双臂机器人的协调操作机理及应用做更深入的研究。

北京航空航天大学机器人研究所在 211 和 985 学科建设以及“十五”总装 863 项目的支持下，于 2001 年设计搭建了面向空间舱内作业的拟人冗余度双臂空间机器人系统实验平台，并在此平台上就拟人双臂机器人的各种相关理论与技术开展了大量的研究工作。本书是根据作者所带领的研究团队近十年来在此基础上所取得的学术研究及技术实践成果整理与归纳撰写而成的。一方面期望能够在此基础上推动进一步的深入研究，另一方面也期望可以为同行提供有借鉴价值的参考。

近十年来，本书作者在拟人双臂机器人技术研究中获得了国家 863 计划、国家自然科学基金（50720135503）、北京市科技新星计划等项目的资助，在此对有关部门表示感谢。另外，作者要特别感谢已故的中国工程院院士张启先教授对作者工作的支持，也要感谢研究小组里的战强、丑武胜、张武、杨巧龙、解玉文、何延辉、李海涛、张俊强、周军、李建伟、孙鹏飞和方承等同事和同学们对本书相关研究工作所做出的贡献。

拟人双臂机器人技术内容广泛，涉及诸多学科领域。由于作者水平和经验所限，书中难免存在不妥之处，恳请各位专家和读者批评指正。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究现状与发展趋势	2
1.2.1 拟人双臂机器人协调技术的国内外研究现状	2
1.2.2 遥操作机器人发展概述	14
1.3 研究基础、主要成果与涉及的关键技术.....	18
1.4 本章小结.....	19
参考文献	19
第 2 章 拟人双臂机器人系统平台方案设计	21
2.1 拟人冗余度双臂空间机器人系统的特点.....	22
2.2 拟人冗余度双臂空间机器人实验平台简介.....	22
2.2.1 平台设计思想	22
2.2.2 系统设备组成及简介	23
2.3 拟人冗余度双臂空间机器人特性分析.....	28
2.3.1 PA10 机器人的特性分析	28
2.3.2 Module 模块机器人的特性分析.....	33
2.4 本章小节.....	38
参考文献	38
附录	38
第 3 章 冗余度空间机器人系统在复杂环境下的灵活性和可靠性的理论研究	41
3.1 引言.....	41
3.2 机器人系统运动学建模与分析.....	41
3.2.1 PA10 机器人系统运动学建模与分析.....	41
3.2.2 模块机器人系统运动学建模与分析	48
3.3 机器人系统运动学优化.....	54
3.3.1 机器人系统运动学优化的传统方法	54
3.3.2 基于容错控制的冗余度机器人运动学优化.....	60

3.4	笛卡儿空间运动控制	66
3.4.1	直线姿态位置插补	66
3.4.2	圆弧轨迹插补	71
3.5	机器人系统运动学计算机仿真	73
3.5.1	传统方法的机器人系统运动学计算机仿真	73
3.5.2	基于容错控制的冗余度机器人运动学优化方法计算机仿真	79
3.6	实验	83
3.6.1	模块机器人插孔实验	83
3.6.2	PA10 机器人抓杯实验	85
3.7	本章小结	86
	参考文献	87
第4章	冗余度空间机器人双臂协调操作运动规划方法	89
4.1	双臂机器人协调操作任务的特点及分类	89
4.1.1	双臂机器人协调操作任务的特点	89
4.1.2	双臂机器人协调操作任务的分类	90
4.2	国内外研究现状	91
4.3	双臂机器人协调操作的约束关系	93
4.4	双臂机器人协调操作的运动学方程	93
4.4.1	开链运动学方程	94
4.4.2	闭链运动学方程	96
4.5	冗余度双臂机器人避关节极限优化	100
4.5.1	PA10 机器人运动学优化	101
4.5.2	Module 机器人运动学优化	101
4.6	冗余度机器人双臂协调避碰规划	102
4.6.1	单机器人避障规划概述	102
4.6.2	冗余度机器人双臂协调避碰规划	104
4.7	冗余度机器人双臂协调操作的灵活性	108
4.7.1	面向任务的操作度	108
4.7.2	双臂协调的操作度	112
4.7.3	面向任务的双臂协调操作度 (TODAMM)	114
4.8	本章小结	115
	参考文献	115
第5章	冗余度双臂空间机器人协调任务规划方法	117
5.1	任务分解	117
5.1.1	操作规划和动作规划	118

5.1.2 隐式基本操作	119
5.1.3 显式基本操作	122
5.1.4 任务规划、路径规划及轨迹规划的关系	123
5.2 任务分配	124
5.2.1 机器人及任务的能力分类描述	125
5.2.2 任务完成条件	126
5.3 系统规划流程	126
5.4 程序编制	128
5.5 本章小结	129
参考文献	129
第6章 基于视觉的机器人位姿检测方法	131
6.1 机器人视觉概述	131
6.2 视觉检测系统构造	133
6.2.1 全局检测单元	134
6.2.2 局部检测单元	134
6.2.3 系统的特点	135
6.3 视觉系统标定	136
6.3.1 摄像机标定	136
6.3.2 手-眼系统标定	141
6.3.3 摄像机-超声传感器的标定	144
6.4 物体空间位姿检测	145
6.4.1 目标物体识别	146
6.4.2 物体空间位姿检测方法	149
6.5 实验	153
6.5.1 系统标定	153
6.5.2 手-眼标定	155
6.5.3 物体位姿检测	156
6.6 本章小结	157
参考文献	158
第7章 基于多传感器信息分阶段控制方法	159
7.1 系统主要传感器及其性能	160
7.1.1 视觉传感器	160
7.1.2 超声传感器	161
7.1.3 六维腕力传感器	162
7.1.4 指端力传感器	162

7.2	人体感觉与运动控制系统	164
7.2.1	人体感觉与运动控制系统的结构	164
7.2.2	人体感觉与运动控制系统的模拟	167
7.3	基于多传感器信息的分阶段控制方法	168
7.3.1	多传感器信息的分类	168
7.3.2	分阶段控制系统结构及控制模型	169
7.3.3	基于模型知识库的物体识别方法	173
7.3.4	分阶段控制过程的实现	175
7.4	本章小结	178
	参考文献	178
第8章	冗余度双臂空间机器人的协调控制	179
8.1	双臂空间机器人的分层递阶控制结构	179
8.1.1	机器人规划系统概述	179
8.1.2	双臂空间机器人的分层递阶控制结构	181
8.2	双臂空间机器人的协调控制方法	184
8.2.1	主要协调控制方法分类	184
8.2.2	基于主从式双臂的力/位混合控制方法	188
8.3	本章小结	204
	参考文献	204
	附录	206
第9章	离线编程及虚拟仿真环境	217
9.1	机器人仿真技术概述	217
9.2	OG-DARSS 仿真系统介绍	218
9.2.1	任意构形串联机器人运动学建模	218
9.2.2	机器人三维仿真模型的建立	219
9.2.3	OG-DARSS 的模块介绍	221
9.3	实时控制环境	227
9.3.1	PA10 机器人的实时控制环境	228
9.3.2	模块机器人的实时控制环境	228
9.4	本章小结	229
	参考文献	229
第10章	拟人双臂机器人系统遥操作研究	230
10.1	单机-单操作者-多人机交互设备-多机器人遥操作体系	230
10.1.1	单机-单操作者-多人机交互设备-多机器人遥操作系统体系结构	230
10.1.2	基于虚拟现实的人机交互技术	230

10.1.3	基于 Internet 遥操作网络通信软件设计	240
10.1.4	多机器人遥操作控制策略的研究	251
10.1.5	遥操作实验研究	265
10.1.6	本节小结	273
10.2	多操作者-多机器人遥操作体系	273
10.2.1	多操作者多机器人遥操作系统体系结构	273
10.2.2	分布式预测图形仿真子系统	278
10.2.3	MOMR 系统的协调控制技术	289
10.2.4	多机器人遥操作技术	292
	参考文献	296
第 11 章	典型操作任务仿真及实验研究	299
11.1	模拟实验的条件及目的	299
11.1.1	模拟实验的条件	299
11.1.2	模拟实验的目的	300
11.2	实验平台通信结构及协调控制过程	300
11.3	空间舱内典型双臂协调操作任务模拟实验	302
11.3.1	双臂协调插孔	302
11.3.2	双臂协调拧螺母	307
11.3.3	双臂协调搬运箱体	313
11.4	本章小结	317
	参考文献	317
	附录	317

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

就目前的机器人技术水平而言,单个机器人在信息的获取、处理、控制及操作能力等方面都存在较大的局限性,对于复杂的工作任务及多变的工作环境,它的能力更显不足,如复杂的装配作业、搬运较重的物体(其质量超过一个机器人的承载能力)或柔软物体、安装或维修复杂的零件以及拉锯等,于是人们考虑采用两个或多个机器人的协调作业来完成单个机器人无法或难以完成的工作^[1]。随着操作环境和任务要求的复杂化,一般需要机器人既要有良好的灵活性又要有很高的可靠性,一般的非冗余度机器人难以达到要求。冗余度机器人固有的许多优点使之非常适合复杂任务和工作环境的要求,如:

① 冗余度机器人利用其冗余性可以克服奇异性、避关节角极限、提高灵活性、躲避障碍物及获得最小关节力矩等;

② 冗余度机器人具有容错性,可以在故障条件下进行任务再规划,具有较高的可靠性。

因此,冗余度机器人双臂协调操作的研究得到了越来越多的重视^[2]。

进入 21 世纪后,机器人技术进一步向智能化、网络化、与人和谐共存方向发展,其概念、内涵、研究内容、应用领域都发生了很大变化。美国以军事为背景,开发了多种无人作战平台和作战机器人系统;日本以拟人型机器人为重点,不断赋予机器人智能,并开拓新的应用领域;欧洲重点开发医疗、家庭用的智能机器人。从机器人的应用角度来考虑,应用许多最新的智能技术,如临场感技术、虚拟现实技术、多智能体技术、模糊神经网络技术、遗传算法和遗传编程、仿生技术、多传感器集成和信息融合技术以及纳米技术等来增强机器人的智能程度将是今后发展的一个重点。因此,给双臂机器人赋予智能以实现人类双臂的功能是当前研究的热门课题。

随着人类文明的高速发展,人类的生存空间不断扩展和延伸,在许多太空、海底、军事、核废料及有毒物质处理等人类难以到达或者对人类有危险的作业环境中,都可以利用遥操作技术遥控机器人代替人来完成任务,在一定程度上将人类从一些危险、极限、不可达和不确定性的环境中解放出来^[3]。遥操作技术不仅扩展了人类自身的能力,也提高和维护了人身安全。

20 世纪 90 年代以后,网络技术的飞速发展使得网络技术与机器人技术的结合也日益紧密。近些年来,基于网络的遥操作机器人技术在远程医疗、远程教育、家庭服务、娱乐、养老助残等方面得到了发展和应用。基于互联网的遥操作技术以其广泛的适用性、功能的多样性、成本的经济性,正成为机器人领域中的一个重要的前沿课题,受到人们越来越多的重视。

机器人遥操作技术作为“桥梁”,跨越空间,将操作者、机器人和控制对象闭合到一个环路中,在操作者与控制对象之间存在远距离跨度约束的情况下,实现人与机器人的同步交互操作,帮助人类实现感知能力和行为能力的延伸。将人加入机器人控制回路形成的机器人遥操作系统,是将人的智能与机器人的智能有机地结合起来,利用人的智能进行高层次的感知理解、问题求解、任务规划以及任务分解等,利用机器人完成低级感知控制、路径规划、精密运动、信息处理、常规和重复性的任务等工作,这样组成的人机智能系统就可以充分发挥人和机器人各自的优点。通过这种人机之间的协调和交互,不但可以增强机器人完成操作任务的能力,同时还拓展了机器人的应用领域。

1.2 研究现状与发展趋势

1.2.1 拟人双臂机器人协调技术的国内外研究现状

1.2.1.1 国外研究现状

双臂机器人最早在工业自动化生产线、社会服务等方面得到发展和应用,近年来逐渐向空间作业、深海作业和危险品处理等领域扩展。而拟人双臂机器人比普通的双臂机器人具有更高的灵活性,更适合于特殊复杂作业环境的操作任务需求。

图 1-1 是国外某工厂机器人化装配生产线^[4]。该机器人的两个手臂由一固件连接在一起,两臂可同时进行协调操作的工作,如装配、搬运物体等。

日本一家公司曾推出一种机器人产品,它的名字叫:Shakeutron^[5],如图 1-2 所示。其实它就是一个普通感应式便池改装的小便池机器人,方便一些肢体残疾的男士如厕。

众所周知,人类在日常生活和工作中遇到的复杂任务都需要靠双手来完成,而在遥操作任务中同样有许多操作仅靠单个机器人是不可能完成的。有人对空间环境中的操作任务做过统计,在常用的 195 项 EVA 任务中有 166 项需要用双手才能完成^[6],因此,至少需要两个机器人臂相互协调配合才能完成各项操作任务。近年来,拟人双臂机器人遥操作系统的应用研究得到了较多的重视。

在加拿大为美国设计的空间站遥操作机器人系统中,使用了两个结构对称的七自由度机械臂,臂上装有视觉相机,两臂末端装有遥操作器和力传感器。该系统

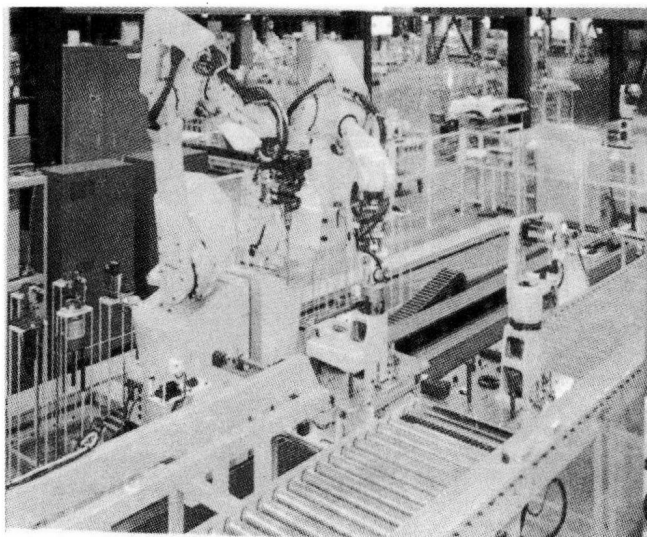


图 1-1 国外某工厂机器人化装配生产线



图 1-2 感应式便池改装的小便池机器人 Shakeutron

可实现空间站上大型设备安装、长期维护、探测和修理等工作。日本的 Fujitsu 空间系统实验室,使用了两个七自由度的机械臂系统,在地面空间机器人实验平台上成功地实现了卫星的停泊实验^[7]。

德国空间局 DLR 利用分别安装在上、下导轨上的两个机械臂协调操作进行舱内插拔电路板和维修卫星的地面模拟实验^[8],如图 1-3 所示。