



中国科学院机械工程系列规划教材

机器人学

— 运动学、动力学与控制

宋伟刚 编著



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院机械工程系列规划教材

机器人学——运动学、 动力学与控制

宋伟刚 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

全书共分10章。第1章介绍了机器人技术的发展及其种类、工作原理,机器人设计、控制与编程的基本方法。第2章和第3章介绍机器人机械系统分析的数学、力学基础。第4章和第5章论述串联机器人操作手运动静力学和动力学。第6章讨论机器人的轨迹规划问题,介绍了插补方式分类与轨迹控制方法,轨迹规划和连续路径轨迹的表示方法。第7章和第8章介绍了并联机器人、轮式机器人动力学分析方法。第9章介绍机器人运动控制问题,包括运动控制与动态控制、多关节机器人的控制、线性化模型设计机器人控制器方法、机器人手臂的自适应控制和学习控制等。第10章介绍机器人力控制。

本书可作为高等学校研究生或高年级本科生的机器人学相关课程的教材,也可供从事机器人研究、开发和应用的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机器人学:运动学、动力学与控制/宋伟刚编著. —北京:科学出版社,2007
(中国科学院机械工程系列规划教材)
ISBN 978-7-03-020176-8

I. 机… II. 宋… III. 机器人学-高等学校-教材 IV. TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 152583 号

责任编辑:段博原 潘继敏 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年10月第一次印刷 印张:20 1/4

印数:1—3 000

字数:376 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

装备制造业是我国国民经济中的重要基础工业。机械装备为各类产品的物化提供平台和载体,机械装备的技术水平是衡量社会生产力水平的重要标志,机械科学、机械工程技术和机械工业的发展水平对经济建设和社会发展的作用都至关重要。

目前,世界机械工业产值达到了总工业产值的 $1/3$ 以上。我国制造业增加值在国内生产总值所占的比重高达 40% ,我国的财政收入一半也来自制造业。随着我国加入 WTO,经济越来越融入到全球经济体系中,我国的制造业在世界制造业中的地位越来越重要,并正从制造大国迈向制造强国。至少在本世纪的前 20 年,制造业将仍然是我国国民经济增长的主要来源,因此需要大批综合素质高、能力强的机械类专业人才。

另外,我国高等教育从精英型教育阶段进入了大众型教育阶段,实现了高等教育的历史性的跨越式发展,技术的进步和社会的发展也对高等院校机械工程教育的人才培养提出了新的要求。

为此,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织我国机械工程领域的中国科学院院士、教育部教学指导委员会成员、教学名师以及经验丰富的专家教授组成编委会,共同组织编写了这套《中国科学院机械工程系列规划教材》,以适应我国高等机械工程教育事业的发展,更好地实现机械工程类专业人才的培养目标,在规模上、素质上更好地满足我国机械科学技术和机械工业发展的需要,为建设创新型国家做出贡献。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。本套教材依据教育部相关教学指导委员会制定的最新专业规范和机械基础课程最新的教学基本要求,同时吸取不同层次学校教师的意见,进行了教材内容的编排与优化,能够满足各类型高校学生的培养目标。
2. 结构体系完备。各门课程的知识之间相互衔接,以便学生完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、多媒体课件、习题集及网络课程等。
3. 作者经验丰富。参加本套教材编写的人员不少来自相关国家重点学科、国家机械教学基地的院校,有些还是国家级、省部级教学成果奖完成人,国家级、省级精品课程建设负责人以及相关院校的骨干教师代表。
4. 理论与实际相结合,加强实践教学。在达到掌握基本理论、基本知识、基本

技能的教学要求前提下,注重例题、设计实践和实验教学,着力于学生分析问题能力、创新能力和实际动手能力的培养。

另外,为了保证本套教材的质量,编委会聘请国内知名的同行专家对教材进行了审定。

我们还将根据机械科学与工程学科发展的战略要求,对本套教材不断补充、更新,以保持本套教材的系统性、先进性和适用性。

我们热忱欢迎全国同行以及关注机械科学与工程教育、教学及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议,一道为我国机械工程教育的发展而努力。

中国科学院院士



2006年5月

前 言

机器人是当代科学技术的产物,是高新技术的代表。从 20 世纪 60 年代开始,伴随着微计算机技术的发展,机器人科学与技术得到了迅猛发展。全世界已经有近 100 万台机器人在各个领域(特别是在制造系统)应用。宋健指出“机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制最有说服力的成就,是当代最高意义上的自动化”。机器人学是集力学、机械工程学、电子学、计算机科学和自动控制为一体的综合性技术学科。目前在工科高等学校相继开设了机器人技术方面的课程。本书就是为了适应上述需要编写的。由于机器人学涉及机构与机械理论、控制与驱动技术、传感与信息处理、专家系统、机器智能等广泛领域,为避免与其他课程内容重复,本书集中介绍机器人学中的机器人运动学、动力学与控制问题。

本书共分 10 章。第 1 章介绍了机器人技术的发展及其种类、工作原理,机器人设计、控制与编程的基本方法,分析了机器人的发展趋势。第 2 章和第 3 章介绍机器人机械系统分析的数学、力学基础,重点讨论了刚体旋转和姿态的表示方法、坐标变换和齐次变换,叉乘矩阵、不变量的概念等;通过引入螺旋的概念给出刚体运动的分析方法,介绍了刚体力学的牛顿-欧拉方程、凯恩方程。第 4 章以串联结构机械手为对象介绍机器人运动学正向问题的分析方法,对解耦结构串联机器人进行逆向运动学分析,引入了灵巧性指标。第 5 章介绍了串联结构机器人的牛顿-欧拉和欧拉-拉格朗日动力学方程,讨论了前向和逆向动力学算法。第 6 章讨论机器人的轨迹规划问题,介绍了插补方式分类与轨迹控制方法,给出了点到点控制的轨迹规划过程,介绍了连续路径轨迹的表示方法。第 7 章和第 8 章介绍了并联机器人、轮式机器人动力学分析方法,有关一般结构串联结构机器人运动学逆向运动学的分析引自 J. Angeles 的精彩归纳。第 9 章介绍机器人的运动控制问题,包括运动控制与动态控制、多关节机器人的控制、线性化模型设计机器人控制器方法、机器人手臂的自适应控制和学习控制等。第 10 章介绍机器人的力控制,包括机器人的触觉系统与腕力传感器、机器人的阻抗控制和机器人的位置和力混合控制。

感谢东北大学研究生院对本书出版所给予的大力支持,感谢东北大学机械工程与自动化学院以及所有关心、支持和帮助过我的同事和朋友们。感谢科学出版

社段博原同志的大力支持。本书引用了本人翻译的《机器人机械系统原理》一书的相关内容。

由于作者水平有限,时间仓促,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

宋伟刚

2007 年 7 月于东北大学

目 录

序

前言

第 1 章 机器人系统概述	1
1.1 引言	1
1.2 机器人系统工作原理	3
1.2.1 机器人的分类	3
1.2.2 机器人的结构形式	5
1.2.3 机器人系统工作原理	14
1.3 机器人的设计、控制与编程	16
1.3.1 机器人系统的设计	16
1.3.2 控制与编程	18
1.4 机器人的新发展与发展趋势	19
第 2 章 刚体的转动和旋转变换	22
2.1 引言	22
2.2 矩阵与线性变换	22
2.2.1 矩阵	22
2.2.2 线性变换	23
2.2.3 叉乘矩阵	26
2.3 投影与镜像变换	27
2.4 刚体的旋转	29
2.4.1 旋转矩阵的性质	29
2.4.2 旋转矩阵的推导	31
2.4.3 旋转的指数表示	33
2.4.4 旋转的欧拉角	34
2.4.5 旋转的欧拉-罗德里格斯参数	35
2.4.6 旋转和映像的合成	37
2.5 坐标变换和齐次变换	38
2.5.1 两个坐标系之间的坐标旋转变换	38

2.5.2	原点移动的坐标变换	39
2.5.3	齐次坐标	39
2.6	相似变换和不变量概念	43
2.6.1	相似变换	43
2.6.2	不变量的概念	45
2.6.3	旋转的线性不变量	47
第3章	刚体的运动学与力学基础	50
3.1	引言	50
3.2	一般刚体运动及其螺旋	51
3.2.1	直线的 Plücker 坐标	51
3.2.2	刚体运动的螺旋	54
3.2.3	刚体的姿态	57
3.3	刚体的一般瞬时运动与速度分析	58
3.3.1	刚体绕固定点的旋转	58
3.3.2	刚体的运动的速度分析	59
3.3.3	刚体运动的瞬时螺旋	60
3.3.4	刚体的运动旋量	62
3.4	刚体运动的加速度分析	64
3.5	固定在移动坐标系下刚体的速度和加速度分析	66
3.6	刚体的静力分析	68
3.7	刚体动力学方程	71
3.7.1	动量、动量矩和动能	71
3.7.2	牛顿-欧拉方程	74
3.7.3	凯恩方程	75
第4章	串联机器人操作手运动静力学	81
4.1	引言	81
4.2	D-H 表示方法	81
4.3	6R 操作手运动学	87
4.4	解耦操作手逆运动学问题	91
4.4.1	定位问题	91
4.4.2	定向问题	103
4.5	串联操作手的速度分析	107
4.5.1	解耦操作手的速度分析	107

4.5.2 解耦操作手的奇异位形分析	111
4.5.3 操作手工作空间	114
4.6 串联操作手的加速度分析	117
4.7 串联操作手的静力学分析	119
4.8 可操作性与灵巧度与运动灵巧性指标	120
4.8.1 操作手定位	124
4.8.2 操作手的定向	125
4.8.3 操作手的定位和定向	125
第5章 串联机器人操作手动力学	130
5.1 引言	130
5.2 逆向和前向动力学	130
5.3 多体系统动力学的基本原理	131
5.3.1 术语和基本概念	131
5.3.2 串联操作手的欧拉-拉格朗日方程	132
5.4 递归逆向动力学	135
5.4.1 运动学计算:外向递归	135
5.4.2 动力学计算:内向递归	138
5.5 机器人动力学中的自然正交补	142
5.5.1 约束方程和运动旋量形关系的推导	145
5.5.2 非惯性基座杆件	149
5.6 操作手前向动力学	149
5.7 重力合并到动力学方程	154
5.8 耗散力模型	154
第6章 轨迹规划	157
6.1 引言	157
6.2 插补方式分类与轨迹控制	158
6.3 拾放操作与点到点控制的轨迹规划	160
6.3.1 多项式插值	161
6.3.2 摆线插值	164
6.3.3 通过中间位姿的轨迹	165
6.4 用三次样条对拾放作业综合	166
6.5 曲线方向的表示方法	169
6.6 参数路径的表示	174

第7章 复杂机器人机械系统运动学	186
7.1 引言	186
7.2 一般6转动关节机械手的运动学逆问题	186
7.2.1 预备知识	187
7.2.2 双变量方程方法	197
7.2.3 单变量多项式方法	199
7.2.4 解的数值条件作用	206
7.2.5 其他关节角的计算	207
7.2.6 计算实例	210
7.3 并联操作手运动学	214
7.3.1 并联操作手的速度和加速度分析	225
7.4 轮式机器人	230
7.4.1 传统车轮机器人	230
7.4.2 全方位轮式机器人	235
第8章 复杂机器人机械系统动力学	239
8.1 引言	239
8.2 机器人机械系统的动力学上的分类	239
8.3 完整系统动力学模型的结构	240
8.4 并联操作手动力学	242
8.5 轮式机器人动力学	250
8.5.1 传统车轮机器人	251
8.5.2 全方位轮式机器人	259
第9章 机器人的运动控制	267
9.1 控制器与控制方法	267
9.1.1 运动控制与动态控制	267
9.1.2 机器人的控制器	268
9.1.3 控制性能要求	272
9.2 多关节机器人的控制	273
9.2.1 位置伺服控制	274
9.2.2 速度控制	275
9.2.3 加速度控制	275
9.2.4 计算力矩控制	276
9.3 线性化模型设计机器人控制器方法	277

9.4 机器人手臂的自适应控制	280
9.4.1 机器人状态方程	280
9.4.2 模型参考自适应控制	281
9.4.3 自校正自适应控制	283
9.4.4 基于机器人特性的自适应控制	284
9.5 学习控制	285
9.6 典型机器人控制系统	288
第 10 章 机器人的力控制	291
10.1 引言	291
10.2 作业约束与力控制	292
10.3 机器人的触觉系统与腕力传感器	294
10.4 机器人的阻抗控制	297
10.5 机器人的顺应控制	300
10.6 机器人的位置和力混合控制	302
参考文献	305

第 1 章 机器人系统概述

1.1 引言

机器人是当代科学技术的产物,是高新技术的代表。从 20 世纪 60 年代开始,伴随着微计算机技术的发展,机器人科学与技术得到了迅猛的发展。全世界已经有近 100 万台机器人在各个领域(特别是在制造系统)应用。

机器人一词最早出现在 1920 年捷克剧作家 Karel Capek 的幻想情节剧 Rossum's Universal Robots(RUR)中,第一次提出了“robota”这个名词,意为“强制劳动者”。各国对机器人的译法,几乎都从斯洛伐克语“robota”音译为“罗伯特”(如英语 robot,日语ロボット,俄语 рабoтa,德语 robot 等),中文译为“机器人”。在真正意义的机器人尚未出现的时代,科学幻想中的机器人已经拥有了和人同样的相貌和智能,在科幻电影“未来世界”中描述了机器人企图统治世界的场景。1940 年,美国著名科学幻想小说家 Issac Asimov 在他的小说《我是机器人》中提出了有名的“机器人三原则”,即:

第一条,机器人不应伤害人类;

第二条,机器人应遵守人类的命令,与第一条违背的命令除外;

第三条,机器人应能保护自己,与第一条相抵触者除外。

这是给机器人赋予的伦理纲领。机器人的研究与开发制造一直将这三原则作为机器人开发的准则。

1947 年,美国原子能委员会的阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)开发了遥控机械手,1948 年又开发了机械式主从机械手。1952 年数控机床的诞生,以及与数控机床的控制、机械零件的研究为机器人的开发奠定了技术基础。现代工业机器人源于 George C. Devol 在 1956 年按照他的专利制作的可编程机械手的原型(1961 年,专利号 2988237)。Joseph Engelberger 购买了 Devol 的专利,组建了 Unimation 公司。1962 年,Unimation 公司推出了 Unimate,第一台机器人安装在通用汽车公司(General Motors)的压铸件装配线上。因而把 Joseph Engelberger 称为机器人之父。同时 AMF 公司推出了 Verstran。这些工业机器人的控制方式与数控机床的控制方式大致相同,但外形特征迥异,其结构类似人的手和臂的组成。

日本在 1967 年由川崎重工业公司从美国 Unimation 公司引进机器人及其技

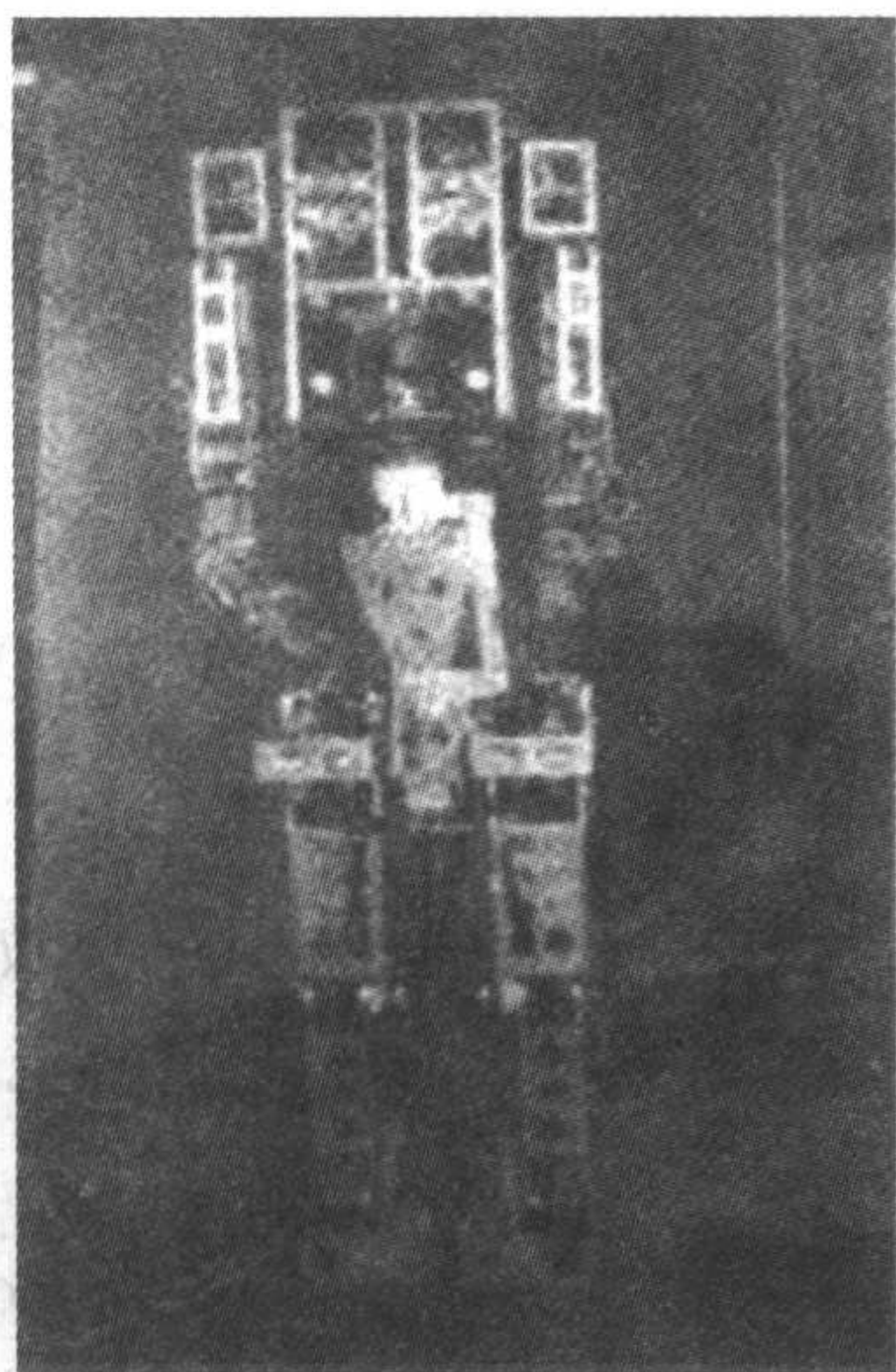


图 1-1 加藤一郎研制的仿人机器人

术,建立起生产车间,并于 1968 年试制出第一台川崎的 Unimate 机器人。

1973 年,日本的机器人之父,早稻田大学的加藤一郎教授开始研究仿人机器人,成功研制出了双腿走路的机器人,如图 1-1。

1974 年,美国 Cincinnati Milaeron 公司推出第一台小型机控制的机器人 T3。同年,意大利的 Olivetti 公司制造了第一台装配机器人 SIGMA。

1978 年日本山梨大学的牧野洋提出了 SCARA 机构,经过三年的时间,完成了实用的 SCARA 机器人的开发。

1979 年 Unimation 公司推出可用于装配的通用机器人 PUMA(programmable universal manipulator),该机器人采用多 CPU 两级计算机控制结构体系。PUMA 的诞生可看作是工业机器人的成熟,直到现在,工业机器人的整个机械结构、驱动、控制结构、编程语言均和 1979 年的产品无本质差别。

自 20 世纪 70 年代末,我国的蒋新松院士在国内率先开始机器人及相关技术的研究与实践。在他的领导下,研制了我国第一台示教再现机器人和第一台水下机器人,创建了我国机器人示范工程。人们尊称其为中国的机器人之父。

在机器人学研究方面的标志性成果包括 Denavit 和 Hartenberg(1954)提出用于表达空间杆件几何关系的一般方法,该方法可用于解机器人正运动学;Ernst(1962 年)和 Boni(1962 年)分别研究带触觉和压觉传感器的机械手;Uicker(1964 年)的博士学位论文研究了空间杆件的动力学;Pieper(1968 年)的博士学位论文中用代数方法解逆运动学问题;McCarthy(1968 年)在 Stanford AI Lab 研究带摄像机、麦克风的机器人,能根据人的指令发现并抓取积木;Kahn 和 Roth(1971 年)研究机器人的最少时间控制;Paul(1972 年)研究关节空间轨迹规划;Bolles 和 Paul(1973 年)用装有视觉和力觉的 Stanford arm 完成水泵装配;Bejezy(1974 年)研究机器人的动力学和计算力矩控制;Bolles(1976 年)发展了机器人编程语言 AL;Paul(1979 年)研究了笛卡儿空间的轨迹规划;Lozano-Perez 和 Wesley(1979 年)研究机器人避障问题;Paul(1981 年)出版了《Robot Manipulator: Mathematics, Programmings and Control》。

机器人技术与研究的迅猛发展,使我们今天难以给机器人下一个确切的定义。而为了规定技术、开发机器人新的工作能力和比较不同国家和公司的成果,就需要对机器人这一术语有某些共同的理解。现在,世界上对机器人还没有统一的定义,

各国都有自己的定义。这些定义之间差别较大。例如,随着引用定义的不同,对1982年日本的机器人装机总数的估计,可在3000~47000台变化。这种变化的部分原因是很难区别简单的机器人与其密切相关的运送材料的“刚性自动化”技术装置。尽管也可以将纯粹的智能计算机信息处理系统、一些玩具、娱乐类产品也称为机器人,而通常意义上的机器人的主要特征体现在以下几个方面:

(1) 在结构上,机器人模拟了动物(特别是人)的肢体功能,在空间中构成多轴驱动的机器或机械电子装置,例如,工业机器人模拟了人类的从腰部到手掌的上肢,步行机器人模拟了人类或步行与爬行动物的下肢。

(2) 具有通用性与灵活性,通过编程可以改变机器人所完成的工作任务,这里所提到的编程是广义的,即可能是在编程系统下进行人工编程,也可能是自动编程。

(3) 具有一定程度的智能,能够自主的完成一定操作。尽管从字面上给人感觉机器人具有很好的智能,但是目前机器人的智能还是非常有限的。

传统机器人学的研究内容包括运动学、动力学、轨迹规划、操作手控制(包括位置与力控制)、机器人传感器、路径规划与任务规划。这些研究内容均在笛卡儿空间对机器人或环境用符号进行描述(关节空间可映射至笛卡儿空间),然后实施规划和控制。

近年来,机器人学向深度和广度发展的研究有:多机器人系统的运行学、动力学、运动规划、控制和协调等问题;冗余度机器人的运动学、动力学、运动规划和控制问题;弹性机器人的运行学、动力学、运动规划和控制问题;复杂环境中机器人的基于多传感器的信息处理与任务实现问题;移动机器人的结构、传感器、控制与任务规划等。爬行、步行、飞行、水下、轮式、履带式等能移动的机器人均是移动机器人,够成非常丰富的研究内容,由于机器人在工作空间中移动,首要问题即是避障与导航,而且移动机器人需要具有在动态环境中的自主运动和作业的能力。

1.2 机器人系统工作原理

1.2.1 机器人的分类

机器人种类繁多,可以从不同的角度对其分类。例如,机器人的结构与构型、控制方式、信息输入方式、智能程度、用途、移动性等。这里仅按用途和技术等级来说明。

1) 按照负载能力和动作空间划分

超大型机器人:负载能力 1000kg 以上;大型机器人:100~1000kg/10m² 以

上;中型机器人:10~100kg/1~10m²;小型机器人:0.1~10kg/0.1~1m²;超小型机器人:0.1kg 以下/ 0.1m² 以下。

2) 按技术等级划分

按照从低级到高级的发展程度可分为三类机器人。

第一代机器人主要以“示教-再现”的方式工作。目前已商品化、实用化的工业机器人大都属于第一代机器人。“示教”是工作人员通过“示教盒”将机器人开到某些希望的位置上,按“示教盒”上的“记忆键”,并定义这些位置的名字,让机器人记忆这些位置。工作人员利用机器人编程语言编制机器人工作程序时,就可利用这些已定义的位置。在机器人运行工作程序时,可再现这些位置。第一代机器人具有完备的内部传感器,检测机器人各关节的位置及速度,并反馈这些信息,控制机器人的运动。

第二代机器人拥有外部传感器,对工作对象、外界环境具有一定的感知能力。感知的信息参加控制运算。例如,装备几个摄像机的机器人可以确定散放在工作台上的零件位置,准确地将它们拿起并放到规定的位置上去。第二代机器人正在越来越多地用在工业生产中。

第三代机器人拥有多种高级传感器,对工作对象、外界环境具有高度适应性和自治能力,可以进行复杂的逻辑思维和决策,在作业环境中独立行动,是一种高度智能化的机器人。第三代机器人又称作高级智能机器人,目前,第三代机器人处于研究及发展阶段。智能机器人既不同于工业机器人的“示教一再现”,也不同于操纵机器人的“操纵”,而是一种“认知-适应”的工作方式。智能机器人应具备以下四种机能:

运动机能:施加于外部环境,相当于人的手、脚等动作机能;

感知机能:获取外部环境信息的能力,如视觉、触觉、听觉、力觉、距离感、接近觉等;

思维能力:认识、推理、判断能力;

人-机对话机能:理解指示命令,输出内部状态,与人进行信息交换的能力。

3) 按照开发内容和目的区分

从机器人的发展历程的角度将机器人分为两大类,即工业机器人和特种机器人(服务机器人)。

狭义的工业机器人专指面向工业领域的多关节机械手或操作机(manipulator)。例如,焊接、喷漆、装配、搬运机器人,即串联结构操作手。

这里的服务机器人是广义的,指除工业机器人以外的用于非制造业并服务于人类的各种机器人,它的范围极其广泛,结构、尺度、功能、应用领域各异。主要包括:服务于人类日常生活的清扫机器人、看护机器人、导盲机器人(导盲犬)等;应用于极限环境的水下机器人、太空机器人、排爆机器人等;应用于采矿、农业、林业、建

筑、军事等领域的机器人；以操作为前提的微操作机器人；以及以服务于人类休闲、娱乐为目的娱乐机器人，如演奏、表演、下棋、探险机器人。

1.2.2 机器人的结构形式

1) 机器人的运动副

空间机构(包括并联机构、串联机构以及串联并联混合机构)大多由低副机构组成。常见的低副机构有转动副(R-revolute joint)、移动副或棱柱副(P-prismatic joint)、螺旋副(H-helix joint)、圆柱副(C-cylindrical joint)、平面副(E-plane joint)、球面副(S-spherical joint)以及虎克铰(Hooke joint)或通用关节(U-universal joint),如图 1-2。转动副(R)、移动副(P)和螺旋副(H)是最基本的低副机构,其自由度 $d=1$ 。为了分析方便,当运动副的自由度数大于 1 时,将运动副用单自由度的运动副等效合成。表 1-1 为各种低副机构的自由度 d 和用多个单自由度等效的形式。

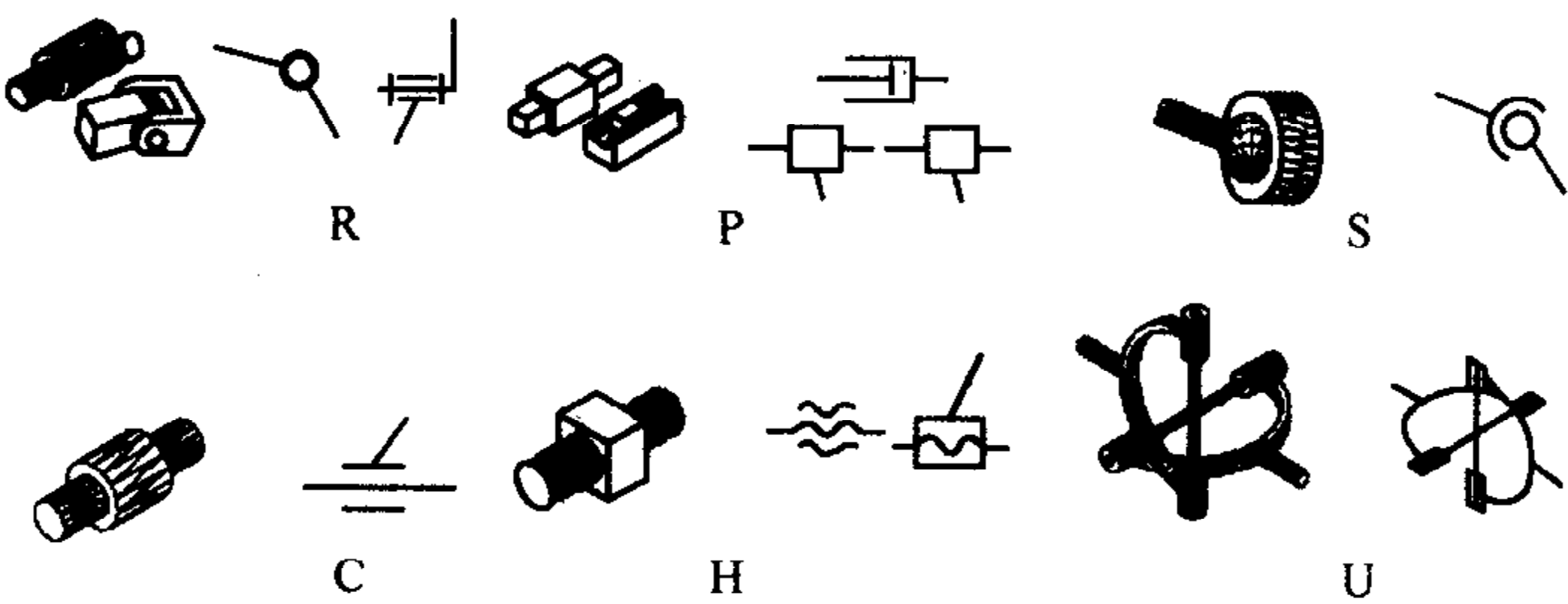


图 1-2 常用的运动副

表 1-1 低副机构的自由度和等效形式

	转动副 R	棱柱副 P	螺旋副 H	圆柱副 C	平面副 E	球面副 S	通用关节 T
自由度 d	1	1	1	2	3	3	2
等效的单自由度关节形式				PR	PPR	RRR	RR

2) 串联机器人

串联结构操作手是较早应用于工业领域的机器人。机器人操作手开始出现时,是由刚度很大的杆通过关节连接起来的,关节有转动和移动两种,前者称为旋转副(revolute),后者称为棱柱关节(prismatic joint)。而且,这些结构是杆之间串联(concatenation),形成一个开运动链(open kinematic chain),除了两端的杆只能和前或后连接外,每一个杆和前面和后面的杆通过关节连接在一起。由于操作手的这种连接的连续性,即使它们有很强的连接,它们的负载能力和刚性与例如 NC 这样的多轴机械比较起来还是很低。很明显,刚性差就意味着位置精度低。