

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

机器人技术基础

机电一体化系列

机器人技术基础

JIQIREN JISHU JICHU

熊有伦 主编

华中理工大学出版社

华中



土

7/242
X67

442624

机电一体化系列

机器人技术基础

熊有伦 主编

熊有伦 唐立新 编
丁 汉 刘恩沧

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

机器人技术基础/熊有伦 主编

武汉:华中理工大学出版社,1996年8月

ISBN 7-5609-1305-9

I. 机…

II. ①熊… ②唐… ③丁… ④刘…

III. 机器人-工业机器人-人工智能-自动控制

IV. TP242

机电一体化系列

机器人技术基础

熊有伦 主编

责任编辑:陈训杰 钟小珉

*

华中理工大学出版社出版发行

(武汉·武昌·喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室照排

湖北省新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:280 000

1996年8月第1版 1999年1月第3次印刷

印数:7 001 - 10 000

ISBN 7-5609-1305-9/TP·179

定价:11.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 提 要

本书系统地介绍了机器人的基础理论和关键技术。主要包括:机器人的机构、位姿描述和齐次变换、操作臂运动学、操作臂雅可比、操作臂动力学、轨迹规划、操作臂控制、机器人语言和离线编程等。本书反映了机器人学在规划、控制和编程方面近期所取得的成果。此外,书中还附有习题和编程练习。

本书可用作高等工院校机电一体化、机械制造、自动化技术等专业机器人技术课程的教材,也可供从事机器人研究的科技工作者使用。

DW20/02

代 序

机械工业是重要的基础工业,是国民经济发展的先导部门。历史的实践已一再证明:先进的技术装备与先进的制造技术在国民经济发展中,起着何等重要的作用;而先进的装备与先进的制造技术则正是由先进的机械工业来提供的。马克思讲得何等的深刻:“大工业必须掌握它特有的生产资料,即机器的本身,必须用机器生产机器,这样,大工业才建立起与自己适应的技术基础,才得以自立。”过去是这样,现在是这样,将来也还是这样。

当然,由于现代科学技术的迅猛发展,特别是由于微电子技术、电子计算机技术的迅猛发展,机械工业已发生了而且还在继续发生极为深刻的变化:机械技术与微电子技术的紧密结合,特别是与微计算机技术的紧密结合,现代机械技术所拥有的技术较以往远为高,远为新,远为广,远为复杂而先进;机电一体化技术与产品是十分突出的表现之一。这一深刻的变化是一股强大的潮流与一个严重的挑战,而且这一股潮流与这一个挑战是不应抗拒的,也是不可抗拒的。“顺之者昌,逆之者亡”,这是无法改变的现实。

这一深刻的变化反映在:机械工程、机械工业的面貌与内容发生了根本性的变化。过去,理论上主要以力学作为基础,实践上主要以经验作为基础,现在,作为基础的理论远不限于力学,还有系统论、控制论、信息论、传感理论、信号处理理论、电子学、计算机学等等,作为实践的基础远不限于经验,而且还涉及各有关的学科,同时,本身也在形成自己的学科体系——制造理论、工艺理论。机械产品的性质也在发生重大的变化,新的机械产品在不同程度上都同微电子技术、微计算机技术相结合,取代、延伸、加强与扩大人脑的部分作用。机械产品的种类与品种正日新月异,老的正在脱胎换骨,新的不断问世,几乎“无所不包”、“无孔不入”,大有令人瞠目结舌之势。与此相适应,机械制造技术正在彻底改造,广泛采用各种高新技术,特别是微电子技术与电子计算机技术,从数控化走向柔性化、集成化、智能化,成为现代科技前沿热点之一。与此相适应,企业的管理也在发生根本性的变化,从以产品为主的管理发展到以面向市场的信息为主的管理。

在这一深刻变化与严重挑战面前,谁胜谁负,谁兴谁衰,人才是关键。中共中央负责同志今年4月24日同部分学部委员座谈时就强调指出:要振兴经济,首先要振兴科技;要振兴科技,首先是培养人才。要发展机电一体化技术与产品,要实现机械工业的根本改造,没有高层次的科技人才是不行的。为了培养机械技术与电子技术紧密结合的高层次科技人才,有关各国都在探索其最优道路。我国采取果断措施,在大量减少专业种类的情况下,设立了“机电控制与自动化专业”,为进一步高质量地快速地培养这方面的人才创造更好的条件。事实上,我国不少高等

院校已在这一工作上作了多年的探索,试办了诸如机电一体化试点班,试点专业之类,华中理工大学也是其中的一页。创办这一方面的专业,也是一项改革,也是一项艰难的事业。鲁迅先生讲得好:“愈艰难,就愈要做。改革,是向来没有一帆风顺的。”正因为如此,我们必须继续迎着艰难去探索。

众所周知,教材,是人才培养中的重要一环,教材建设是一个学校最基本的建设之一。为此,华中理工大学有关教师在以往试点工作的基础上,总结了自己的经验,学习了兄弟学校的经验,有组织有计划地编写了这一方面的成套教材。这样,可以一方面适应目前形势发展的急需,一方面也是进一步的继续探索。

《诗经》讲得好:“嘤其鸣矣,求其友声。”由于编者业务水平的有限,探索经验的不足,编写时间的紧迫,这套教材中的错误、不妥与缺陷在所难免,敬希专家与读者拨冗指教,我们将不胜感谢。

教授、中国科学院学部委员

杨叔子

1992. 4. 30

前 言

机器人学是一门迅速发展的综合性前沿学科,也是一门最年轻的课程。80年代初,美国、日本和西欧国家的一些大学有关专业相继为研究生和本科生开设了机器人学方面的课程。我校机制专业也于1984年开始讲授“工业机器人”选修课,以后又对机电一体化专业的本科生和研究生开设“机器人技术基础”或“机器人学”课程。本书旨在较系统地介绍机器人设计、控制、编程和使用的技术要点和基础理论,作为机电一体化、机制、锻压、液压、自控和计算机应用等专业本科生的教材,并且希望本书也适用于这些专业的研究生中的初学者。

青年一代,特别是现在在读的本科生和研究生,作为跨世纪人才,必将面临21世纪的挑战,面临高新技术和自动化技术的冲击,面临国际市场经济和科技迅猛发展的激烈竞争。机器人学的有关课程实质上是迎接未来挑战的有力武器和理想助手。机器人使人类从繁琐、恶劣的作业环境中解脱出来,而去从事更加雄伟的事业,开创未来世界;同时,机器人也将成为人类认识自身的借鉴。机器人所涉及的学科领域十分广泛,其核心内容大致可分为三方面:感知(Perception)、操作(Manipulation)和思维(Thinking),后者是联系前两者的纽带。正像Brady所说的,机器人是由传感(Sensing)、行动(Effecting)和思维三者组成,由后者将前两者集成起来。

全书共分八章。第一章概括介绍机器人的发展、应用和机器人机构;第二章介绍刚体的空间描述和齐次变换,其中包括欧拉角和RPY角;第三章讨论操作臂运动学,D-H表示法,运动方程的建立和运动学反解;第四章讨论操作臂的速度雅可比和力雅可比,刚度和变形,误差标定和补偿;第五章讨论操作臂动力学,包括拉格朗日动力学和牛顿-欧拉递推动力学,关节空间和操作空间的表示方法;第六章主要讨论在关节空间和操作空间中的轨迹规划方法,利用样条函数、驱动函数和四元数的插补方法;第七章阐述机器人的控制,包括位置控制和力控制,着重介绍控制规律的分解、单关节的线性模型和控制,操作臂控制的实际问题 and 非线性、多变量及位置时变所引起的问题,并讨论力控制、混合控制和阻抗控制的有关概念;第八章阐述机器人语言总体结构,VAL语言编程,离线编程系统的组成,介绍基于微机的机器人离线编程和仿真系统HOLPSS。

本书是根据作者多年来教学、科研的实践和体会,并参考有关书籍和文献(特别是文献[1]~[4])编写而成的。各章之后都附有习题,部分习题可选为课外练习,部分习题可作为深入研究的材料。与本书配套使用的是《机器人离线编程和仿真系统HOLPSS及其编程手册》。使用该手册,通过编程和仿真练习,一方面可以使学生交互式地掌握所学到的机器人有关知识;另一方面使学生提高开发和使用机器人的实践能力。

本书由丁汉编写第八章部分内容,刘恩沧编写第一章的§1.3和§1.4两节及第七章的§7.9节部分内容,其余各章节由熊有伦、唐立新编写,并由熊有伦主编。另外,赵东波、秦志强和朱恒编写的《机器人离线编程和仿真系统HOLPSS的编程手册》与本书配合使用。同时,本书在修改和校对时得到了秦志强、张卫平和尹周平等同志的帮助。本书的出版是与华中理工大学出版社的热情支持和大力帮助分不开的,特别是本书得到了责任编辑的仔细编审和加工,在

此深表感谢!

机器人学是一门新兴学科,许多问题有待进一步探讨,有待继续发展。因此,本书的谬误和不足在所难免,切望读者不吝指正。

编者

1995年12月

目 录

第一章 概述	(1)	习题	(69)
§ 1.1 机器人与自动化	(2)	第五章 操作臂动力学	(72)
§ 1.2 机器人的应用	(4)	§ 5.1 连杆的速度和加速度分析	(72)
§ 1.3 机器人机构	(6)	§ 5.2 连杆静力学分析	(77)
§ 1.4 机器人规格	(12)	§ 5.3 牛顿-欧拉递推动力学方程	(78)
习题	(14)	§ 5.4 关节空间和操作空间动力学	(82)
第二章 位姿描述和齐次变换	(15)	§ 5.5 动力学性能指标	(84)
§ 2.1 刚体位姿描述	(15)	§ 5.6 动力学优化设计	(86)
§ 2.2 坐标变换	(16)	§ 5.7 拉格朗日动力学	(89)
§ 2.3 齐次坐标和齐次变换	(18)	§ 5.8 操作臂的动力学建模和仿真	(92)
§ 2.4 齐次变换矩阵的运算	(20)	习题	(92)
§ 2.5 变换方程	(22)	第六章 轨迹规划	(94)
§ 2.6 欧拉角与 RPY 角	(23)	§ 6.1 轨迹规划的一般性问题	(94)
§ 2.7 旋转变换通式	(26)	§ 6.2 关节轨迹的插值	(95)
§ 2.8 自由矢量的变换	(29)	§ 6.3 笛卡尔空间规划方法	(103)
习题	(30)	§ 6.4 四元数与直线轨迹规划	(109)
第三章 操作臂运动学	(32)	§ 6.5 轨迹的实时生成	(113)
§ 3.1 连杆参数和连杆坐标系	(32)	§ 6.6 基于动力学模型的轨迹规划	(115)
§ 3.2 连杆变换和运动学方程	(35)	习题	(116)
§ 3.3 XHK 5140 换刀机械手运动学方程	(35)	第七章 操作臂的控制	(118)
§ 3.4 PUMA 560 机器人运动学方程	(39)	§ 7.1 引言	(118)
§ 3.5 PUMA 560 机器人运动学反解	(43)	§ 7.2 单关节的线性模型和控制	(118)
§ 3.6 腕部三轴相交时的封闭解	(46)	§ 7.3 控制规律的分解	(123)
§ 3.7 运动学反解的有关问题	(48)	§ 7.4 操作臂的非线性控制	(126)
§ 3.8 关节空间和操作空间	(50)	§ 7.5 操作臂的多关节控制	(129)
习题	(51)	§ 7.6 控制中的实际问题	(129)
第四章 操作臂的雅可比	(55)	§ 7.7 工业机器人控制系统	(133)
§ 4.1 雅可比矩阵的定义	(55)	§ 7.8 基于直角坐标的控制	(134)
§ 4.2 微分运动和广义速度	(56)	§ 7.9 操作臂的力控制	(136)
§ 4.3 雅可比矩阵的构造法	(57)	§ 7.10 李亚普诺夫稳定性分析	(141)
§ 4.4 PUMA 560 的雅可比	(59)	习题	(143)
§ 4.5 力雅可比	(61)	第八章 机器人语言和离线编程	(146)
§ 4.6 奇异性和灵巧度	(62)	§ 8.1 机器人语言概述	(146)
§ 4.7 刚度和变形	(65)	§ 8.2 机器人语言结构	(148)
§ 4.8 误差标定和补偿	(67)	§ 8.3 VAL 语言	(151)
		§ 8.4 机器人语言的有关问题	(155)

§ 8.5 离线编程系统的特点和要求 …… (156)	习题 …… (169)
§ 8.6 离线编程系统的组成 …… (158)	附录一 机器人技术基础编程实验 …… (170)
§ 8.7 离线编程和仿真系统 HOLPSS …………… (164)	附录二 有关术语英-汉对照 …… (172)
§ 8.8 离线编程系统的发展和拓广 …… (166)	参考文献 …… (174)

第一章 概 述

本书所指的机器人(如图 1-1 所示),是工业机器人,或称机器人操作臂、机器人臂、机械手等。从外形来看,它和人的手臂相似,是由一系列刚性连杆通过一系列柔性关节交替连接而成的开式链。这些连杆就像人的骨架,分别类似于胸(chest)、上臂(upper arm)和下臂(for arm),工业机器人的关节相当于人的肩关节(shoulder)、肘关节(elbow)和腕关节(wrist)。操作臂的前端装有末端执行器(末端件)(end-effector)或相应的工具(tool),也常称为手(hand)或手爪(gripper)。手爪是由两个或多个手指(finger)所组成,手指可以“开”与“合”,实现抓取动作(grasping)和细微操作(fine manipulation)。手臂的动作幅度一般较大,通常实现宏操作(macro manipulation)。

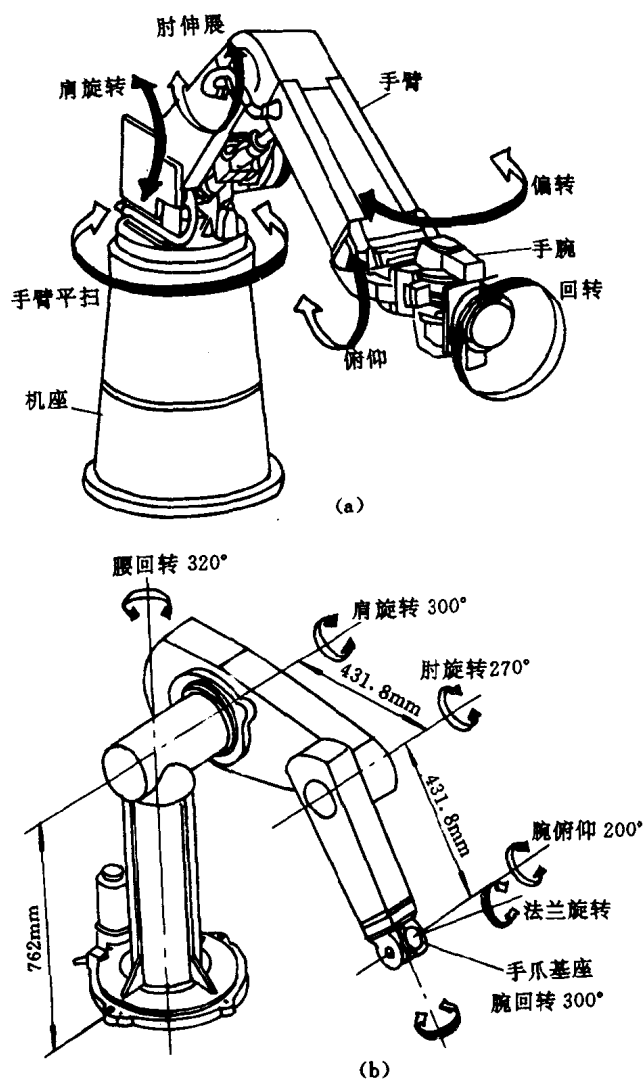


图 1-1 两种工业机器人

(a) Cincinnati Milacron T³ 机器人; (b) PUMA 560 系列机器人

§ 1.1 机器人与自动化

现代制造业中所应用的工业机器人大多是和柔性自动化紧密联系在一起的。机器人与计算机辅助设计(CAD)系统、计算机辅助制造(CAM)系统一起标志着制造自动化的一个崭新的阶段。制造业的第一次革命是从单件小批手工作业到大批大量生产的机械自动化,出现了高效自动化的生产线(简称自动线)。但是,这种“刚性”自动线还不能满足现代化制造系统的要求。由于市场竞争、产品的多样化和小批量,以及经常更换产品的需要,要求制造系统具有柔性,所谓柔性自动化生产系统是指具有可编程功能的,能适应多种任务要求而不改变系统的硬件结构的自动化生产系统。数控(NC)装置是柔性自动化的中心环节,也是工业机器人的技术基础之一。图 1-2 所示为带视觉系统的 NC 搬运机器人的工作情况。

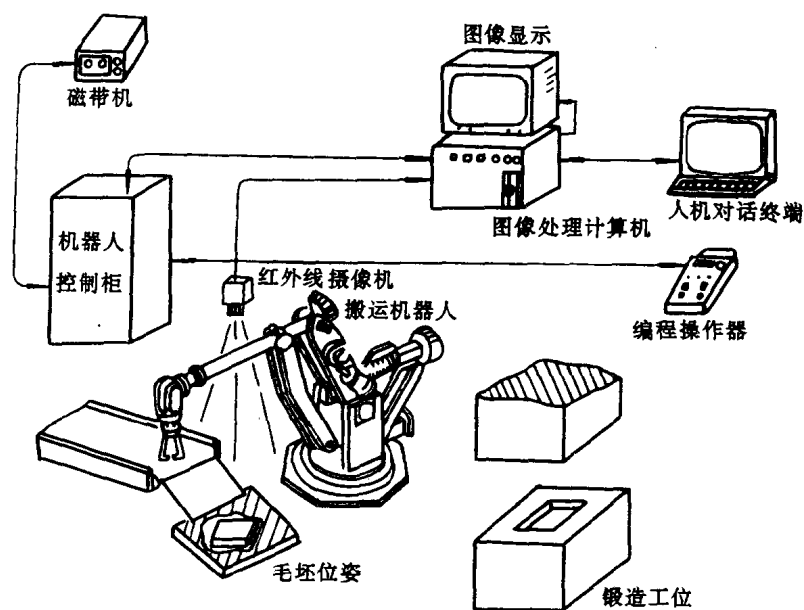


图 1-2 带视觉系统的 NC 搬运机器人

工业机器人的产生还和遥控机械手有联系,这种遥控机械手用于人类不能到达或不便到达的工作环境(如放射性材料周围、深海、太空等)中的作业。第一个主-从式机械手是 1948 年开发的,一种电气驱动的机械装置,如图 1-3 所示。整个装置是由两个相似的操作臂:主臂和从臂组成。主臂的各个关节都装有位置传感器,用来测量操作人员控制的主臂端部的运动,并将其转换成电信号,传递到从臂,使之完成相似的运动。这样,从臂便可复制主臂的运动。主-从式机械手一般具有六个自由度,能使所夹持的物体保持任意的位置和姿态。多数关节都是转动关节,和人的臂相似,这样,使得操作臂能够复现人臂的运动,并且具有较大的工作空间和灵活性,满足某些操作系统的需要。

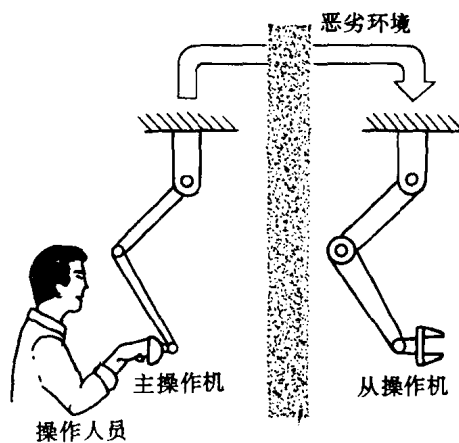


图 1-3 主-从式机械手

现代工业机器人在结构形式上与人臂和遥控机械手相似,而在控制原理上则是基于数控和遥控的概念。因此,现代工业机器人可以看成是一个数控操作臂,其中操作人员直接操作的主臂由数控装置所代替。

由此可见,数控机床和遥控机械手的出现产生了一个崭新的工程领域:机器人学,一门研究机器人设计、制造和使用的学科。值得说明的是,机器人的出现引起了许多科学和技术的变革,特别地,对于设计和控制领域的影响是难以估量的。

首先机器人要求具有高度的能动性和灵活性,具有广阔的可达空间,能在拥挤的环境中工作,能处理各种各样的工作要求,能完成不同的作业任务。这些是以前任何机械装置不能达到的,因此,机器人的结构设计和传统的机械设计有质的差别。机器人的机械结构总的看来是由一系列连杆并由关节串连起来的开式链,相当于一系列的悬臂杆件串接在一起,机械刚度和精度都很差。因而从结构上看,和重载、高精作业机床完全两样。由于操作臂的串联开式结构,存在误差和变形的累积,因此在结构设计时,一方面要保证开链结构的能动性和灵活性,一方面要处理这种结构带来的问题:运动的传递,机器人的标定,误差的补偿和消除等。

操作臂的开链结构使得操作臂的位移方程非常复杂,因此,需要寻求有效的分析方法来建立操作臂的运动学方程及其反解。操作臂运动学是机器人技术的一个重要基础。由于传统的机械运动学主要讨论由单个驱动器带动的单输入机构,而机器人则是多输入的空间机构。所以需要相应的分析方法。

操作臂的动力学求解非常复杂,是个多输入、多输出的非线性的强耦合的位置时变的动力学系统。每个关节的负荷受到其他关节运动的影响,作用在每个关节上的惯性负载随操作臂的形位在很大范围内变化,在高速情况下,离心力和哥氏力的影响十分严重。机器人运动学和动力学的复杂性使得机器人的控制十分困难。标准的线性控制技术往往行不通或不合理,因此,迫切需要建立机器人有效的控制系统设计方法。

其次,机器人与 NC 机床不同,机器人作业时要与周围设备相互作用。NC 机床所加工的工件预先已经定位和夹紧;而机器人的工作环境预先往往没有规定。因此,需要开发有效的手段和装置来识别工件位置,并将其坐标信息与其他外设进行通信。

最后,机器人与主-从机械手也不相同,前者是个自治系统,而后者实质上为手控系统。主-从机械手工作时,由操作人员进行决策和操作。操作人员理解给定的任务、制定相应的策略、规划操作顺序,根据其经验和知识,采用有效的方法进行操作。操作人员的决策通过主臂传递到从臂,从臂的运动情况通过监视,调整或修正控制以达到预期的结果。因而操作人员是控制回路的一个主要部分。而机器人则在控制回路中排除了操作人员,规划和控制指令均由机器人本身自动生成,预先规划好操作顺序,生成每步运动指令和代码,这样,机器人本身能够理解和执行规定的任务。同时,机器人还要具有存储指令和操作数据的能力。因此,编程和指令的生成是机器人工作所必需的。此外,为了使机器人能监视自身的运动状态,并适应环境的变化和干扰,还应装有各种内部传感器,如数码盘和测速电机等;和各种各样的外部传感器,如视觉(图 1-2 所示的红外线摄像机)、力觉和触觉等传感器,用来采集自身信息和环境信息。基于传感器的控制策略,除了利用传感器的信息之外,还要求相应的控制算法和对于作业的深入理解。

机器人是实现柔性自动化中最典型的机电一体化装置。通常将机器人定义为:由各种外部传感器引导的,带有一个或多个末端执行器,通过可编程运动,在其工作空间内对真实物体进行操作的,软件可控制的机械装置。

§ 1.2 机器人的应用

在机器人这一总的范畴之内,除了制造业中应用的工业机器人(操作臂)之外,还有种类繁多的各类机器人,分别用在资源开发、排险救灾、社会服务和军事、航天等方面。

一、工业机器人

图 1-4 列出各类制造业中使用机器人的情况以及发展趋势。从 70 年代开始,工业机器人在汽车工业中得到了广泛应用,今后仍将是工业机器人的主要用户。从发展趋势看,工业机器人在其他制造行业中的应用将会增加(见图 1-5)。

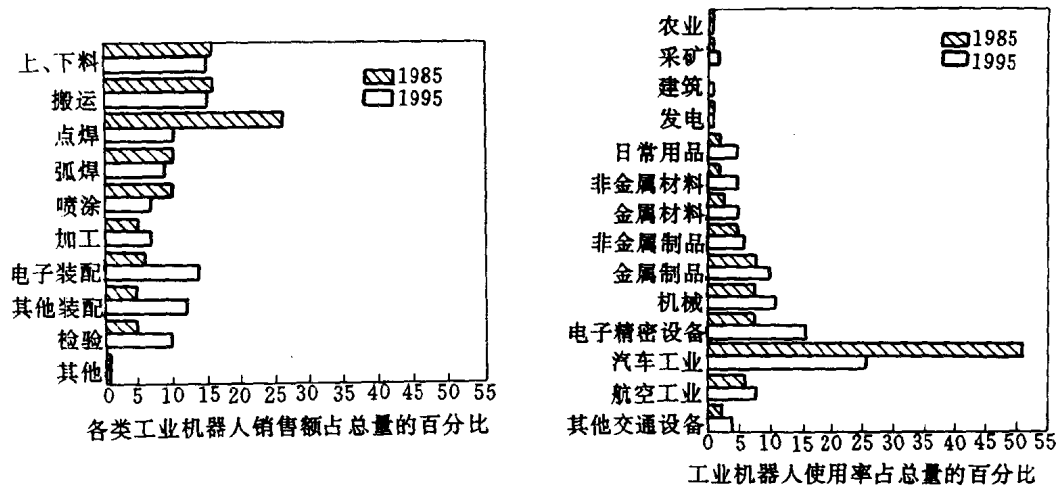


图 1-4 美国各类工业机器人销售额所占百分比

(加工包括划线、钻孔和磨削等)

图 1-5 美国各种行业使用机器人所占百分比

工业机器人大都用于简单、重复、繁重的工作,如上、下料,搬运等,以及工作环境恶劣的场所,如喷漆、焊接、清砂和清理核废料等。图 1-5 列出各类机器人所占比例。据市场分析预测,今后对精密装配和检验机器人的需求量将逐渐增加,其中包括机器装配和电气装配。装配用机器人面临着富于挑战性的环境。总的说来,装配过程可以抽象为约束运动规划问题,可以看成是在工作空间中末端作用器与对象之间一系列相互接触“碰撞”的结果。为了解决环境的不确定性、传感器的不确定性和控制的不确定性,这类机器人带有外部传感器,实现细微操作、补偿和顺应控制。

二、极限环境作业机器人

机器人代替人类工作,最能发挥作用的场所是对人类有危险的环境,如有放射性的地方,被污染的环境。煤矿、深海和太空等极限(恶劣)环境将成为机器人活跃的场所,又如用在高层建筑或油田进行灭火救灾等的机器人都属于极限作业机器人。日本通产省工技院从 1983 年开始对极限作业机器人的有关技术进行研究和开发;美国在宇宙探测中把航天飞机所用的柔性操作臂列为重要研究内容。

为了完成这些极限作业,机器人技术尚待解决的问题很多。一般认为极限作业机器人属于第三代机器人的范畴,应具有某些智能。

现在工业中应用的喷漆、搬运、点焊机器人,大都属于第一代机器人,具有示教再现的功能或具有可编程的 NC 装置,设有位置、速度、力等内部信息的检测元件(内部传感器)和基于这

些传感器的控制系统和伺服机构。

图 1-6 所示是工业机器人的原理图。每个关节由直流伺服(或交流伺服)电机驱动,用微机控制,具有示教再现的功能,可进行机器人语言编程或离线编程。只要在直角坐标系或工具坐标系中指定机器人的路径和速度,计算机就可进行插补运算、坐标变换和运动学反解,算出关节角,进行运动控制。为了实现给定的运动,只要指定运动的起点和终点,途中各点均由计算机自动生成,以此缩短示教时间。

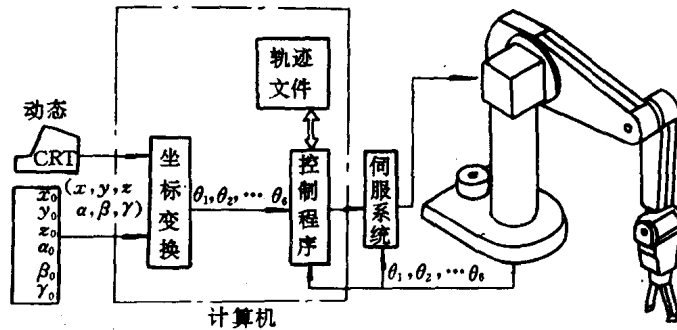


图 1-6 工业机器人原理图

第二代机器人不仅具有内部传感器,还能利用外部传感器探测外部环境和操作对象的有关信息,来改变行动,进行规划,适应外界的变化和干扰。第二代机器人的中心技术是传感器技术和微机控制技术。

第三代智能机器人将极大地扩展机器人的应用领域,是当前研究的重点。智能机器人本身能够认识工作环境、工作对象及其状态,它根据人给予的指令和“自身”认识外界的结果,独立地决定工作方式,由操作机构和移动机构实现任务目标,并能适应工作环境的变化。

智能机器人只需要告诉它去“做什么”,而不用告诉它“怎么作”。为此,智能机器人应具有四种机能:运动机能——相当于人的手和脚、臂和腿的动作机能,对外界环境施加作用;感知机能——获取外部环境信息以便进行自我行动决策和监视的机能;思维机能——求解问题的认识、推理、判断机能;人-机通信机能——理解指示命令,输出内部状态,与人进行信息交换的机能。由此可见,智能机器人的“智能”特征就在于它具有与外部世界——对象、环境和人相适应、相协调的工作机能。从控制方式看,智能机器人不同于工业机器人的“示教、再现”,不同于遥控机器人的“主-从操纵”,而是以一种“认知-适应”的方式自律地进行操作。

三、医疗福利机器人

对患有先天性疾病、慢性病或因意外事故失去部分人体机能的病人进行补偿的机械,和用来为残疾人服务的机械统称为医疗福利机器人。如动力假肢属于前者;后者包括护理机器人和导盲犬机器人等,又称为福利机器人。

动力假肢的研究要达到以下三个目的:a. 设计、制造外观和结构都与人的肢体充分相似的硬件。包括自由度的分配和机械结构,小型灵巧的传动系统和动力源,与人感觉相似的触觉、力觉传感器,以及研究合适的材料等。b. 实现人的肢体动作的控制。分析人的肢体动作,用机械来实现这些动作,探索连杆机构控制的一般理论以达到预期的控制效果。c. 实现人-机信息传递。例如利用肌肉电流产生人到机械的指令信号,利用振动刺激、电刺激引起皮肤感觉达到机械反馈到人的信息传递。

此外,机器人已开始服务于第三产业,如商业中心、办公室、旅客服务、家务劳动和保健等。

§ 1.3 机器人机构

机器人机构包含手臂、手腕、手爪和行走机构等部分,它实现机器人的运动机能,完成规定的各种操作。操作臂通常是由一系列连杆通过关节顺次相连的开式链。关节决定两相邻连杆

副之间的连接关系,也称运动副。运动副分两类:高副和低副。两连杆之间相对运动时,若是面接触,称为低副机构;若是线接触或点接触,则称为高副机构。常见的低副机构有六种,如图 1-7 所示。其中旋转副、移动副和螺旋副具有 1 个自由度;圆柱副具有 2 个自由度;平面副和球面副具有 3 个自由度。工业机器人最常用的两种关节是旋转关节和移动关节。下面分别介绍手臂、手腕和手爪的结构。

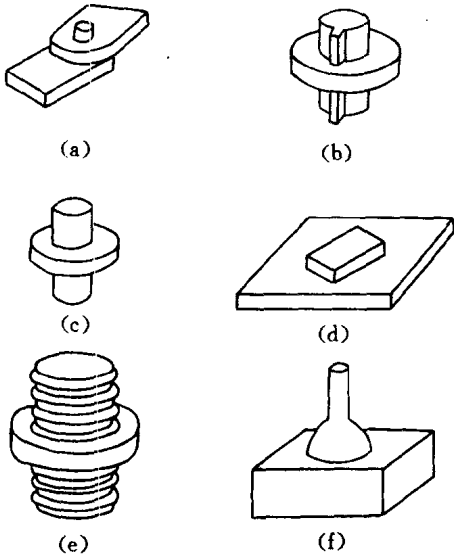


图 1-7 六种低副机构

(a) 旋转副; (b) 移动副; (c) 圆柱副;
(d) 平面副; (e) 螺旋副; (f) 球面副

一、操作臂的工作空间形式

刚体在三维空间中有 6 个自由度,显然,机器人要完成任一空间作业,也需要 6 个自由度。机器人的运动是由手臂和手腕的运动组合而成的。通常手臂部分有 3 个关节,用以改变手腕参考点的位置,称为定位机构;手腕部分也有 3 个关节,通常这 3 个关节轴线相交,用来改变末端件(如手爪)的姿态,称为定向机构。整个操作臂可以看成是定位机构连接定向机构。

机器人手臂的前 3 个关节顺次连接的 3 个连杆,形成定位机构。3 个关节的种类决定了操作臂工作空间的形式。表 1-1 列出了常见的 5 种形式。下面分别讨论这几种类型。表中 P 表示移动关节; R 表示转动关节。

1. 直角坐标式机器人

这种机器人的外形轮廓与数控镗铣床或三坐标测量机相似,如图 1-8 所示,3 个关节都是移动关节,关节轴线相互垂直,相当于笛卡尔坐标系的 x 、 y 和 z 轴。这种形式的主要特点是:a. 结构刚度高,多做成大型龙门式或框架式机器人;b. 3 个关节的运动相互独立,没有耦合,不影响手爪的姿态,运动学求解简单,不产生奇异状态;c. 工件的装卸、夹具的安装等受到立柱、横梁等构件的限制;d. 占地面积大,动作范围小;e. 它的控制方式与数控机床类似;f. 操作灵活性较差。

表 1-1 机器人工作空间的坐标形式

机器人	关节 1	关节 2	关节 3	旋转关节数
直角坐标式	P	P	P	0
圆柱坐标式	R	P	P	1
球(极)坐标式	R	R	P	2
SCARA	R	R	P	2
关节式	R	R	R	3

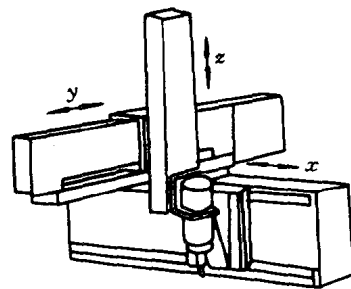


图 1-8 直角坐标式机器人

2. 圆柱坐标式机器人

圆柱坐标式机器人如图 1-9 所示,是以 θ 、 z 和 r 为参数构成坐标系,手腕参考点 P 的位置

可表示为 $p=f(\theta, z, r)$, 其中, r 是手臂的径向长度; θ 是手臂绕水平轴的角位移; z 是在垂直轴上的高度。如果 r 不变, 手臂的运动将形成一个圆柱表面, 空间定位比较直观。手臂收回后, 其末端可能与工作空间内的其他物体相碰, 移动副不易防护。

3. 球(极)坐标式机器人

球坐标式机器人如图 1-10 所示, 其腕部参考点运动所形成的最大轨迹表面是半径为 r_m 的球面的一部分, 以 θ, φ 和 r 为坐标, 任意点 P 可表示为 $p=f(\theta, \varphi, r)$, 这类机器人占地面积小, 工作空间较大, 移动关节不易防护。

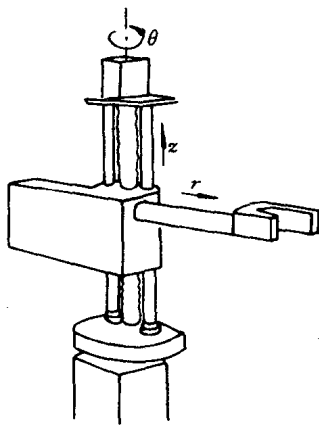


图 1-9 圆柱坐标式机器人

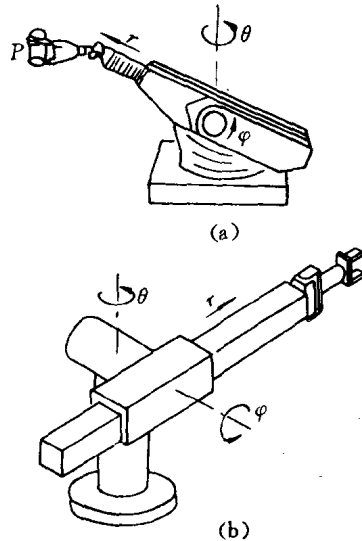


图 1-10 球(极)坐标式机器人

4. SCARA 机器人

SCARA 机器人有 3 个旋转关节, 其轴线相互平行, 在平面内进行定位和定向。另一个关节是移动关节, 用于完成末端件在垂直于平面的运动。手腕参考点的位置是由两旋转关节的角位移 φ_1 和 φ_2 , 及移动关节的位移 z 决定的, 即 $p=f(\varphi_1, \varphi_2, z)$, 如图 1-11(a) 所示。这类机器人结构轻便、响应快, 例如 Adept 1 型 SCARA 机器人运动速度可达 10m/s, 比一般关节式机器人快数倍。它最适用于平面定位, 垂直方向进行装配的作业。

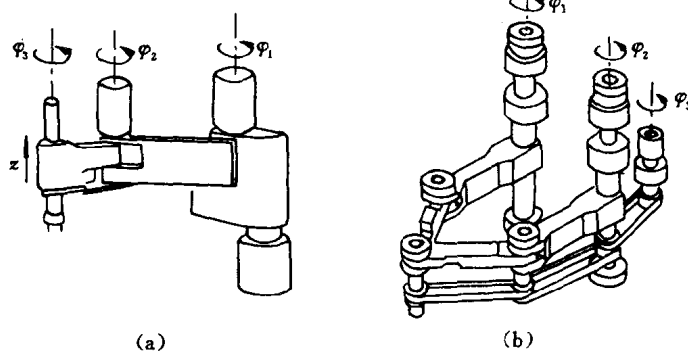


图 1-11 SCARA 机器人和 5 连杆式机器人

5. 关节式机器人

这类机器人由两个肩关节和一个肘关节进行定位, 由 2 个或 3 个腕关节进行定向。其中,