

○ 高等学校教材 ○

芮延年 主编 徐绪炯 主审

JIQIREN JISHU

机器人技术

JIQI YINGYONG

及其应用



化学工业出版社

TP242/75

2008

高等学校教材

机器人技术及其应用

芮延年 主编

顾 军 许春山 王传洋 朱 伟 副主编

徐绪炯 主审

图书在版编目(CIP)数据

机器人技术及其应用 / 芮延年主编. — 北京: 化学工业出版社, 2008.2

ISBN 978-7-122-03748-1

Ⅰ. 机… Ⅱ. 芮… Ⅲ. 机器人技术—高等学校—教材

Ⅳ. TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第061058号

责任编辑: 顾 军
封面设计: 顾 军

责任编辑: 顾 军
封面设计: 顾 军

第1次印刷

出版发行: 化学工业出版社
社址: 北京市西城区百万庄大街28号
电话: (010) 66051888 (发行部)



化学工业出版社

· 北京 ·

定价: 29.80元

定价: 29.80元

在机器人技术快速发展的今天,作为一名现代工程师,理工科大学学生都有必要学习掌握一些机器人学方面的知识。特别是机电类专业的学生,机器人技术是必修课。

本书是根据教育部机械工程及自动化教学指导委员会的教改精神,以面向 21 世纪为指导思想编写的。

全书共分 8 章。第 1 章概论,第 2 章机器人的基本结构原理,第 3 章机器人运动学和动力学,第 4 章机器人传感器技术,第 5 章机器人驱动技术,第 6 章机器人控制技术,第 7 章机器人系统设计方法与实例,第 8 章机器人在不同领域的应用。本教材从机器人技术基础出发,由浅入深,图文并茂,系统地介绍了机器人技术原理、方法、应用及其发展趋势。

本书适合理工类专业本科生教学之用。如作为大专生教材可适当删减;作为研究生用书时,部分章节应适当加深,目录中有关 * 号的内容可作为拓展学生知识面内容。同时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

机器人技术及其应用/芮延年主编. —北京:化学工业出版社,2008.5
高等学校教材
ISBN 978-7-122-02748-1

I. 机… II. 芮… III. 机器人技术-高等学校-教材
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 061078 号

责任编辑:程树珍 陈 丽
责任校对:蒋 宇

文字编辑:闫 敏
装帧设计:周 遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 496 千字 2008 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.80 元

版权所有 违者必究

前 言

机器人学是一门高度交叉的前沿学科,是典型的机电一体化技术系统。它涉及机械学、电子工程学、计算机科学与工程、控制论与控制工程学、人工智能、生物学、人类学、社会学等众多领域。

在机器人技术快速发展的今天,作为一名现代工程师、理工科大学学生都有必要学习掌握一些机器人学方面的知识。特别是机电类专业的学生,机器人技术是必修课。

作者在多年从事机器人技术研究、教学和生产的过程中,深深感到需要有一本由浅入深、循序渐进、理论与应用相结合的教材。有鉴于此,编写了这本“机器人技术及其应用”。在教材内容的编排方面,充分考虑到初学者的困难和有一定机器人技术基础的读者的需求,同时,也充分考虑到当今机器人领域的研究和发展情况,力求反映当今国内外机器人技术的新进展。

全书共分8章。

第1章,概论。是本书的总纲,主要介绍了机器人的由来与发展、定义、分类及机器人技术的研究内容等。

第2章,机器人的基本结构原理。主要讲述工业机器人的组成,主要技术参数,人手臂作用机能初步分析及工业机器人的手部、手腕、手臂、机身、行走机构等原理结构和特点。

第3章,机器人运动学与动力学。先后介绍了齐次坐标与动系位姿矩阵、齐次变换等基本概念,在对机器人的位姿分析的基础上,较为深入地介绍了机器人运动学和动力学方程建立的方法与步骤。

第4章,机器人传感器技术。首先介绍了机器人常用传感器的分类、要求及选择,然后较为深入地介绍了机器人内部传感器和外部传感器原理等。

第5章,机器人驱动技术。先后介绍了机器人液压驱动、气压驱动、电气驱动和新型驱动技术原理及结构。

第6章,机器人控制技术。主要讲述工业机器人控制方式分类、机器人位置控制、运动轨迹规划、力(力矩)控制、智能控制技术及其应用等内容。

第7章,机器人系统设计方法与实例。首先介绍了机器人系统设计基本方法,在此基础上详细介绍了“昆山1号6轴机器人系统设计”和“MT-R智能型移动机器人设计”过程的方法与步骤。

第8章,机器人在不同领域中的应用。重点介绍了工业机器人、农业机器人、服务机器人、军用机器人、水下机器人、空间机器人、微型机器人和仿人机器人等在不同领域中的应用。

本书适合理工类专业本科生教学之用。如作为大专生教材可适当删减;作为研究生用书时,部分章节应适当加深。书中有关*号的内容可作为拓展学生知识面内容。

全书由芮延年主编,顾军、许春山、王传洋、朱伟副主编,徐绪炯先生主审,中国科学院闻邦椿院士在本书编写过程中提出了很多宝贵的意见。昆山华恒焊接有限公司、上海英集斯自动化有限公司为本书的编写提供了设计实例。在此表示衷心感谢。在编写过程中,我们参考并引用了大量有关机器人方面的论著、资料,限于篇幅,不能在文中一一列举,详见参考文献,在此一并对其作者致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中内容难免存在不足之处,我们恳请读者给予批评指正。最后我们对支持本书编写和出版的所有业者表示衷心的感谢。

作者

2008年3月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 机器人的发展史	1
1.2 机器人的定义	3
1.3 机器人的分类	3
1.4 机器人学的研究内容	8
习题	8
第 2 章 机器人的基本结构原理	9
2.1 机器人的基本构成	9
2.2 机器人主要技术参数	10
2.3 人的手臂作用机能初步分析	11
2.4 工业机器人机械结构组成	13
2.5 机器人的手腕	23
2.6 机器人的手臂	27
2.7 机器人的机身	36
2.8 机器人的行走机构	38
习题	45
第 3 章 机器人运动学和动力学	46
3.1 概述	46
3.2 齐次坐标与动系位姿矩阵	46
3.3 齐次变换	50
3.4 机器人操作机运动学方程的建立及求解	55
3.5 工业机器人运动学方程	58
3.6 工业机器人动力学	63
习题	70
第 4 章 机器人传感器技术	71
4.1 机器人常用传感器的分类	71
4.2 机器人传感器的要求与选择	72
4.3 内部传感器	73
4.4 机器人外部传感器	81
习题	99
第 5 章 机器人驱动技术	100
5.1 各种驱动方式的特点	100
5.2 电液伺服系统驱动	102
5.3 气压驱动系统	106
5.4 电气驱动	110
* 5.5 其它新型驱动器	127
习题	137

第 6 章 机器人控制技术	138
6.1 概述	138
6.2 工业机器人控制方式的分类	138
6.3 工业机器人位置控制	139
6.4 工业机器人的运动轨迹规划	144
* 6.5 力(力矩)控制技术	154
* 6.6 智能控制技术	158
习题	175
第 7 章 机器人系统设计方法与实例	176
7.1 概述	176
7.2 一般工业机器人系统设计	181
7.3 系统详细设计及实现	182
* 7.4 昆山 1 号机器人系统设计实例	184
* 7.5 MT-R 智能型移动机器人设计实例	216
习题	240
第 8 章 机器人在不同领域中的应用	241
8.1 概述	241
8.2 工业机器人	242
8.3 农业机器人	255
8.4 服务机器人	266
* 8.5 特种机器人	272
* 8.6 类人机器人	285
8.7 机器人技术发展趋势	288
习题	291
参考文献	292

第1章 概 论

本章重点：本章通过对机器人的由来与发展、定义、分类及机器人技术研究等内容的介绍，使读者首先对机器人技术有一个概括的认识与了解，为后序内容的学习奠定好基础。

1.1 机器人的发展史

机器人技术与系统作为 20 世纪人类最伟大的发明之一，自 20 世纪 60 年代初问世以来，经历 40 多年的发展已取得实质性的进步和成果。

在制造领域，目前世界上约有 150 多万台工业机器人正在各种生产现场工作。

在非制造领域，如服务机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、娱乐机器人等各种用途的特种机器人纷纷面世，并且正迅速地向着实用化迈进。

机器人的英文名词是 Robot，Robot 一词最早出现在 1920 年捷克作家卡雷尔·卡佩克（Karel Capek）所写的一个剧本中，这个剧本的名字为《Rossum's Universal Robots》，中文意思是“罗萨姆的万能机器人”。剧中的人造劳动者取名为 Robota，捷克语的意思是“苦力”、“奴隶”。英语的 Robot 一词就是由此而来的，以后世界各国都用 Robot 作为机器人的代名词。

机器人一词虽然出现得较晚，然而这一概念在人类的想象中却早已出现。制造机器人是机器人技术研究者、爱好者的梦想，代表了人类重塑自身、了解自身的一种强烈愿望。自古以来，就有不少科学家和杰出工匠制造出了具有人类特点或模拟动物特征的机器人雏形。西周时期，中国的能工巧匠偃师就研制出了能歌善舞的伶人，这是中国最早记载的具备机器人概念的文字资料。春秋后期，中国著名的木匠鲁班在机械方面也是一位发明家，据《墨经》记载，他曾经制造过一只木鸟，能在空中飞行“三日而不下”，体现了中国劳动人民的聪明才智。

东汉时代，著名科学家张衡不仅发明了地动仪、计里鼓车，而且发明了指南车，这些发明都是具有机器人构想的装置。计里鼓车每行进 1 里，车上的木人击鼓一下，每行 10 里，击钟一下；具有复杂轮系装置的指南车，车上木人运动始终指向南方，则该车无论左转右转、上坡下坡，指向始终不变，可谓精巧绝伦。

中国宋代科学家沈括在《梦溪笔谈》一书中，也记载有一个“自动木人抓老鼠”的故事，“该木人名钟馗，身高三尺，能左手扼鼠，右手持铁简毙之，动作灵巧”。

三国时期，蜀国丞相诸葛亮成功地制造了木牛流马，用其运送粮草，并用其中的机关“牛舌头”巧胜司马懿，被后人传为佳话。木牛流马虽已失传，但其明显具有机器人的结构和功能。

1662 年，日本的竹田近江利用钟表技术发明了自动机器玩偶，并在大阪的道顿堀演出。

1738 年，法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭，它会嘎嘎叫，会游泳和喝水，还会进食和排泄。瓦克逊的本意是想把生物的功能机械化以进行医学上的分析。

公元 1768~1774 年间，瑞士钟表匠德罗斯父子三人合作制造出三个像真人一样大小的机器人——写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人，其中的写字偶人如图 1-1 所示。它们是靠弹簧驱动，由凸轮控制的自动机器，至今还作为国宝保存在瑞士纳切尔市艺术和历史博物



图 1-1 18 世纪瑞士的写字偶人

馆内。

自 1920 年之后,机器人成为很多科幻电影、科幻小说的主人公。20 世纪 30 年代末纽约世界交易会上放映的德国电影《大都市》中的 Eleitro 步行机器人和机器狗 Spardo,20 世纪 70 年代拍摄的电影《星球大战》中的 C3P 机器人,使人们对机器人寄予很高的期望,而这些在当时的科学技术条件下是无法实现的。即使是现在,要造出有类似人的智慧、感情的机器人仍然是科学家的梦想和追求。

现代机器人的研究始于 20 世纪中期。第二次世界大战期间(1938~1945 年),由于核工业和军事工业的发展,研制了“遥控操纵器”(Teleoperator),主要用于放射性材料的生产和处理过程。1947 年,对这种较简单的机械装置进行了改进,采用电动伺服方式,使其从动部分能跟随主动部分运动,称为“主从机械手”(Master-Slave Manipulator)。

1949~1953 年,随着先进飞机制造的需要,美国麻省理工学院辐射实验室(MIT Radiation Laboratory)开始研制数控铣床。1953 年研制成功能按照模型轨迹做切削动作的多轴数控铣床。

1954 年,美国人乔治·德沃尔(George C. Devol)研制出第一台电子可编程序的工业机器人——可编程关节传送装置,它第一次使用示教再现的控制方式,并且在 20 世纪的后几十年中,得到惊人的发展。随后应运而生的数控技术和机械手,将工业机器人推上历史舞台,成为现代加工制造业的中坚力量。

1960 年美国“联合控制公司”(Consolidated Control)根据 Devol 的专利技术,研制出第一台真正意义上的工业机器人,并成立了 Unimation 公司,开始定型生产名为 Unimate 的工业机器人。两年后,美国“机床与铸造公司”(AMF)也生产了另一种可编程工业机器人 Versatran。

20 世纪 70 年代,机器人产业得到蓬勃发展,机器人技术发展成为专门学科,称为机器人学(Robotics)。机器人的应用领域进一步扩大,不同的应用场所,导致了各种坐标系、各种结构的机器人相继出现,大规模集成电路和计算机技术飞跃发展使机器人的控制性能大大提高,成本不断地下降。

20 世纪 80 年代,不同结构、不同控制方法和不同用途的工业机器人在工业发达国家真正进入了实用化的普及阶段。特别是随着传感器技术和智能技术的发展,开始进入智能机器人研究阶段。机器人视觉、触觉、力觉、听觉、接近觉等项目的研究和应用,大大地提高了机器人的适应能力,扩大了机器人的应用范围,促进了机器人的智能化进程。

目前,对全球机器人技术发展最有影响的国家应该是美国和日本。美国在机器人技术的综合研究水平上仍处于领先地位,而日本生产的机器人在数量、种类方面则居世界首位。机器人技术的发展推动了机器人学的建立,许多国家成立了机器人协会,美国、日本、英国、瑞典等国家设立了机器人学学位。

20 世纪 70 年代以来,许多大学开设了机器人课程,开展了机器人学的研究工作,美国的 MIT、PPI、Stanford、Carnegie-Mellon、Conell、Purdue、Univ of California 等大学都是研究机器人学富有成果的著名学府。随着机器人学的发展,相关的国际学术交流活动也日渐增多,目前最有影响的国际会议是 IEEE 每年举行的机器人学及自动化国际会议,此外,还有国际工业机器人会议(ISIR)和国际工业机器人技术会议(CIRT)等。出版的相关期刊有“Robot Today”、“Robotics Research”、“Robotics and Automation”等多种。

中国的机器人技术起步较晚,约于 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始。90 年代中期,

6000m 以下深水作业机器人试验成功, 以后的近 10 年中, 在步行机器人、精密装配机器人、多自由度关节机器人的研制等方面与国际先进水平的差距正在逐渐缩小, 其中有部分技术处于领先水平。

1.2 机器人的定义

虽然现在机器人已被广泛应用, 且越来越受到人们的重视, 而机器人这一名词却还没有一个统一、严格、准确的定义。不同国家、不同研究领域的学者给出的定义也不尽相同, 虽然定义的基本原则大体一致, 但是仍有较大区别。原因之一是机器人还在发展, 新的机型, 新的功能不断地涌现, 同时, 由于机器人涉及了人的概念, 成为一个难以回答的哲学问题, 就像机器人一词最早诞生于科幻小说之中一样, 人们对机器人充满了幻想。也许正是由于机器人定义的模糊, 才给了人们充分的想象和创造空间。

随着机器人技术的飞速发展和信息时代的到来, 机器人所涵盖的内容越来越丰富, 机器人的定义也不断地充实和创新。下面给出一些有代表性的定义。

① 国际标准化组织 (ISO) 的定义 机器人是一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机械手, 这种机械手具有几个轴, 能够借助可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置, 以执行种种任务。

② 美国国家标准局 (NBS) 的定义 机器人是一种能够进行编程并在自动控制下执行某些操作和移动作业任务的机械装置。

③ 美国机器人协会 (RIA) 的定义 机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用的装置, 通过可编程序动作来执行种种任务的、并具有编程能力的多功能机械手。

④ 日本工业机器人协会 (JIRA) 的定义 工业机器人是一种装备有记忆装置和末端执行器的、能够转动并通过自动完成各种移动来代替人类劳动的通用机器。

综上所述, 概括各种机器人的性能, 可以按以下特征来描述机器人:

- i. 机器人的动作机构具有类似于人或其它生物体某些器官 (肢体、感官等) 的功能;
- ii. 机器人具有通用性, 工作种类多样, 动作程序灵活易变, 是柔性加工主要组成部分;
- iii. 机器人具有不同程度的智能, 如记忆、感知、推理、决策、学习等;
- iv. 机器人具有独立性, 完整的机器人系统, 在工作中可以不依赖于人的干预。

1942 年, 科学家兼作家 Isaac Asimov 在 “Run around” 一书中首次提出了机器人三定律:

- 第一, 机器人必须不危害人类, 也不允许它眼看人将受害而袖手旁观;
- 第二, 机器人必须绝对服从人类, 除非这与第一原则矛盾;
- 第三, 机器人必须保护自身不受伤害, 除非这与第一或第二原则相矛盾。

1.3 机器人的分类

机器人的分类方法很多, 也相当复杂, 几乎没有一种分类可以满意地将各类机器人均包括在内, 目前多数的机器人是按各种特征、性能来进行分类的。

1.3.1 按照发展程度分类

按照从低级到高级的发展程度可分类如下。

① 第一代机器人 (first generation robots) 即可编程、示教再现工业机器人, 已进入商品化、实用化。

所谓示教,即由人教机器人运动的轨迹、停留点位、停留时间等。然后,机器人依照人教给他的行为、顺序和速度重复运动,即所谓的再现。示教可由操作员手把手地进行。例如,操作人员抓住机器人上的喷枪把喷涂时要走的位置走一遍,机器人记住了这一连串运动,然后机器人工作时自动重复这些运动,从而完成给定的喷涂工作,这种方式是手把手示教。但是,比较普遍的示教方式是通过控制面板完成的,即操作人员利用控制面板上的开关或键盘控制机器人一步一步地运动,机器人自动记录下每一步,然后重复。

② 第二代机器人(second generation robots) 装备有一定的传感装置,能获取作业环境、操作对象的简单信息,通过计算机处理、分析,能作出简单的推理,对动作进行反馈的机器人,通常称为低级智能机器人。

例如,焊缝自动跟踪技术。在机器人焊接的过程中,一般通过编程或示教方式先给出机器人的运动曲线,然后机器人携带焊枪按照这个曲线进行焊接。这就要求工件的一致性,也就是说工件被焊接的位置必须十分准确,否则,机器人行走的曲线和工件上的实际焊缝位置将产生偏差。在实际生产过程中,由于受热或其它原因,被焊工件易发生变形,因而,跟踪所要焊的焊缝是十分重要的。焊缝跟踪技术是通过机器人上传感器感知焊缝位置的,再通过反馈控制,机器人自动跟踪焊缝,从而对示教或编程的位置进行修正。即使实际焊缝相对于原始设定的位置有变化,机器人仍然可以很好地完成焊接工作。

③ 第三代机器人(third generation robots) 具有高度适应性的自治机器人。它具有多种感知功能,可进行复杂的逻辑思维、判断决策,在作业环境中独立行动。第三代机器人又称作高级智能机器人。

这类机器人带有多种传感器,使机器人可以知道其自身的状态,例如,在什么位置,自身的系统是否有故障等;可以通过装在机器人身上或者工作环境中的传感器感知外部的状态,例如,发现道路与危险地段,测出与协作机器的相对位置与距离以及相互作用力等。机器人能够根据得到的这些信息进行逻辑推理、判断、决策,在变化的内部状态与外部环境中,自主决定自身的行为,但是,在已应用的机器人中,机器人的自适应技术仍十分有限,高级智能机器人是今后研究发展的方向。

1.3.2 按照结构形态,负载能力和动作空间分类

按照结构形态,负载能力和动作空间可分类如下。

- ① 超大型机器人 负载能力为 1000kg 以上。
- ② 大型机器人 负载能力为 100~1000kg,作业空间为 10m² 以上。
- ③ 中型机器人 负载能力为 10~100kg,作业空间为 1~10m²。
- ④ 小型机器人 负载能力为 0.1~10kg,作业空间为 0.1~1m²。
- ⑤ 超小型机器人 负载能力为 0.1kg 以下,作业空间为 0.1m² 以下。

1.3.3 按照开发内容和目的分类

按照开发内容和目的可分为以下三类机器人。

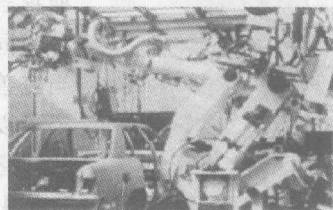
① 工业机器人(industrial robot) 也是一类机器人的总称。依据具体应用的不同,又常常以其主要用途命名。到现在为止应用最多的是焊接机器人,如图 1-2 所示,包括点焊(电阻焊)和电弧焊机器人,用途是实现自动的焊接作业;装配机器人,比较多地用于电子部件的装配;喷漆机器人,代替人进行喷漆作业;搬运、上下料、码垛机器人,它们的功能都是根据一定的速度和精度要求,将物品从一处运到另一处。另外,还可以列出很多,如将金属溶液浇到压铸机中的浇铸机器人等。应该说,并不是只有机器人可以完成这些工作,很多工作都可以用专门的机器完成。机器人的优点在于它可以通过程序的更改,方便迅速地改变工作内容或方式,来满足生产要求的变化。比如,改变焊缝轨迹,改变喷漆位置,变更装

配部件或位置等。所以随着对工业生产线的柔性要求越来越强,对各种机器人的需求也就越来越强烈。

② 操纵机器人 (teleoperator robot) 主要用于非工业生产的各种作业,又可分为服务机器人与特种作业机器人等。服务机器人通常是可移动的,在多数情况下,可由一个移动平台构成,平台上装有一只或几只手臂,代替或协助人完成为人类提供



(a) 焊接机器人



(b) 机器人汽车焊接生产线

图 1-2 焊接机器人及应用

服务和安全保障的各种工作,如墙壁清洗机器人,如图 1-3 所示。爬绳索机器人,如图 1-4 所示等。这些机器人都是根据某种特殊目的而设计的特种作业机器人,帮助人类完成一些高强度、高危险或人类无法完成的工作等。

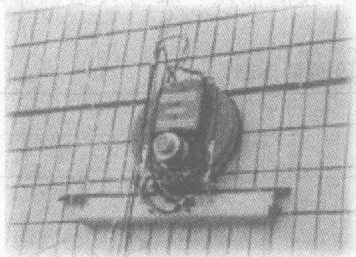


图 1-3 墙壁清洗机器人



图 1-4 爬绳索机器人

特种作业机器人主要包括水下机器人、空间机器人等。水下机器人,又称水下无人深潜器,如图 1-5 所示。它代替人在水下危险的环境中作业。人类借助潜水器潜入到大海之中探秘已有很长的历史,人类已可以利用深海潜水器潜入深海。然而,由于危险很大,而且费用极高,所以人类积极寻找可以代替人类进行危险作业的技术,水下机器人便成了十分受关注的发展方向。空间机器人,如图 1-6 所示。是指在大气层内和大气层外从事各种作业的机器人,包括在内层空间飞行并进行观测、可完成多种作业的飞行机器人,到外层空间其它星球上进行探测作业的星球探测机器人和在各种航天器里使用的机器人。

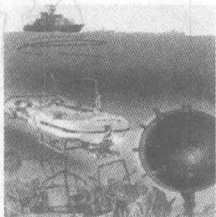


图 1-5 水下机器人

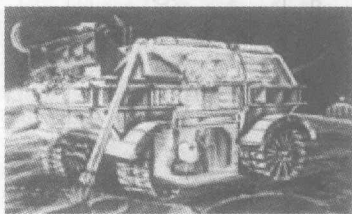


图 1-6 空间机器人

③ 智能机器人 (intelligent robot) 是具有多种由内、外部传感器组成的感觉系统,它不仅可以感知内部关节的运行速度、力的大小等参数,还可以通过外部传感器 (如视觉传感器、触觉传感器等),对外部环境信息进行感知、提取、处理并做出适当的决策,在结构或半结构化环境中自主完成某项任务,目前,智能机器人尚处于研究和发展阶段。2002 年,日本本田公司在东京展示了其最新研制的“Asimo”智能机器人,如图 1-7 所示。“Asimo”机器人高 1.2m,不仅可以行走、爬楼梯,识别各种各样的声音,还能够通过头部的照相机

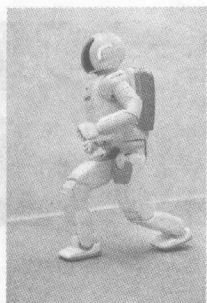


图 1-7 “Asimo”
智能机器人

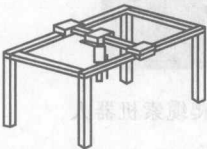
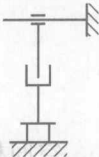
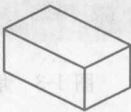
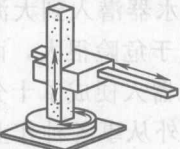
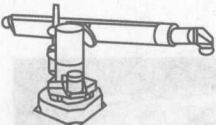
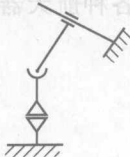
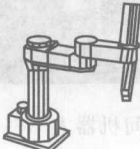
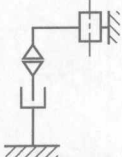
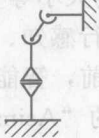
捕捉到的画面和事先设计好的程序识别人类的各種手势运动以及 10 种不同的脸型。“Asimo”以下肢运动为主，上肢为辅，腿部功能相当完善。它的控制以 ZMP 理论为基础实现了真三维空间的行走，步姿可以和人类相媲美。Asimo 的目标是进入家庭，为人类服务，因此，它的设计考虑了与人的友善和亲和。

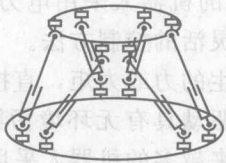
1.3.4 按机器人的结构形式和运动形态分类

通常机器人依据坐标形式和运动形态的不同可分为直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型、SCARA 型、关节坐标型、并联型等。常见工业机器人的结构形式和运动形态见表 1-1 所示。

① 直角坐标型机器人 这一类机器人其手部空间位置的改变是通过沿三个互相垂直轴线的移动来实现的，即沿着 X 轴的纵向移动，沿着 Y 轴的横向移动以及沿着 Z 轴的升降。该形式的机器人具有位置精度高，控制无耦合、简单，避障性好等特点，但是结构较庞大，动作范围小，灵活性差，难与其它机器人协调，且移动轴的结构较复杂，占地面积较大。

表 1-1 常见工业机器人结构形式及运动形态

机 器 人 原 理 机	关 节 轴	
	运 动 机 构	工 作 空 间
 直角坐标型机器人		
 圆柱坐标型机器人		
 球坐标型机器人		
 SCARA 型机器人		
 关节坐标型机器人		

机 器 人	关 节 轴	
原 理 机	运 动 机 构	工 作 空 间
 并联机器人		

② 圆柱坐标型机器人 这种机器人通过两个移动和一个转动实现手部空间位置的改变，机器人手臂的运动系由垂直立柱平面内的伸缩和沿立柱的升降两个直线运动及手臂绕立柱的转动复合而成。圆柱坐标型机器人的位置精度仅次于直角坐标型，其控制简单，避障性好，但是结构也较庞大，难与其它机器人协调工作，两个移动轴的设计较为复杂。

③ 球坐标型机器人 这类机器人手臂的运动由一个直线运动和两个转动所组成。即手臂沿 X 方向伸缩，绕 Y 轴俯仰和绕 Z 轴回转。这类机器人具有占地面积小、结构紧凑、重量较轻、位置精度尚可等特点，能与其它机器人协调工作，但是避障性差，存在着平衡问题，位置误差与臂长有关。

④ SCARA 型机器人 其手臂的前端结构采用在二维空间内能任意移动的自由度，所以，它具有垂直方向的刚性高、水平面内刚性低（柔顺性）的特征。但是在实际操作中主要不是由于它所具有这种特殊的柔顺性质，而是因为它更能简单地实现二维平面上的动作，因而在装配作业中普遍采用。

⑤ 关节坐标型机器人 主要由立柱、前臂和后臂组成。机器人的运动由前、后臂的俯仰及立柱的回转构成，其结构最紧凑，灵活性大，占地面积最小，工作空间最大，能与其它机器人协调工作，避障性好，但是位置精度较低，存在着平衡以及控制耦合问题，故比较复杂，这种机器人是目前应用最多的机器人之一。

⑥ 并联机构机器人 是一种新型结构的机器人，它通过各连杆的复合运动，给出末端的运动轨迹，以完成不同类型的作业。该结构的机器人特点在于刚性好，它可完成复杂曲面的加工，是数控机床一种新的结构形式，也是机器人功能的一种拓展，因此，也称为并联机床。其不足之处是控制复杂，工作范围比较小，精度也比数控机床低一些。

1.3.5 按控制方式分类

① 点位控制 按点位方式进行控制的机器人，其运动为空间点到点之间的直线运动，在作业过程中只控制几个特定工作点的位置，不对点与点之间的运动过程进行控制。在点位控制的机器人中，所能控制点数的多少取决于控制系统的复杂程度。

② 连续轨迹控制 按连续轨迹方式控制的机器人，其运动轨迹可以是空间的任意连续曲线。机器人在空间的整个运动过程都处于控制之下，能同时控制两个以上的运动轴，使得手部位置可沿任意形状的空间曲线运动，而手部的姿态也可以通过腕关节的运动得以控制，这对于焊接和喷涂作业是十分有利的。

1.3.6 按驱动方式分类

① 气力驱动式 机器人以压缩空气来驱动执行机构。这种驱动方式的优点是空气来源方便，动作迅速，结构简单，造价低；缺点是空气具有可压缩性，致使工作速度的稳定性较差，因气源压力一般只有 0.6MPa 左右，故此类机器人通常应用于抓举力要求较小的场合。

② 液力驱动式 相对于气力驱动来说，液力驱动的机器人具有大得多的抓举能力，抓

举力可高达 100kgf ($1\text{kgf}=9.80665\text{N}$) 以上。液力驱动式机器人具有结构紧凑, 传动平稳且动作灵敏等优点, 但是对密封的要求较高, 不宜在高温或低温的场合工作, 且制造精度要求高, 成本大。

③ 电力驱动式 目前越来越多的机器人采用电力驱动式, 这不仅是因为电动机品种众多可供选择, 更因为可以运用多种灵活的控制方法。

电力驱动是利用各种电动机产生的力或力矩, 直接或经过减速机构驱动机器人, 以获得所需的位置、速度、加速度。电力驱动具有无环境污染、易于控制、运动精度高、成本低、驱动效率高等优点, 因此, 现在越来越多的机器人采用电力驱动方式。

电力驱动又可分为步进电动机驱动、直流伺服电动机驱动、无刷伺服电动机驱动等。

④ 新型驱动方式 伴随着机器人技术的发展, 出现了利用新的工作原理制造的新型驱动器, 如静电驱动器、压电驱动器、形状记忆合金驱动器、人工肌肉及光驱动器等。

1.4 机器人学的研究内容

经历了 40 多年的发展, 机器人技术逐步形成了一门新的综合性学科——机器人学 (Robotics)。它包括有基础研究和应用研究两个方面, 主要研究内容有:

i. 机器人基础理论与方法的研究, 如运动学和动力学、作业与运动规划、控制和感知理论与技术、机器人智能理论等。

ii. 机器人设计理论与技术的研究, 如机器人机构分析和综合、机器人结构设计与优化、机器人关键器件设计、机器人仿真技术等。

iii. 机器人仿生学的研究, 如机器人的形态、结构、功能、能量转换、信息传递、控制和管理等特性和功能仿生理论与技术方法等。

iv. 机器人系统理论与技术的研究, 如多机器人系统理论、机器人语言与编程、机器人与人融合、机器人与其它机器系统的协调和交互等。

v. 机器人操作和移动理论与技术的研究, 如机器人装配技术、移动机器人运动与步态理论、移动机器人稳定性理论、移动操作机器人协调与控制理论等。

vi. 特种机器人的研究, 如水下机器人、空间机器人、军用机器人等的设计制造以及控制理论与技术等。

vii. 类人机器人的研究, 如类人机器人的形状与结构、传感与智能控制理论与方法等。

viii. 微机器人学的研究, 如微机器人的分析、设计、制造和控制等理论与技术方法等。

习 题

1. 机器人的英文名词是 Robot, Robot 一词最早是由谁提出来的? 我们的祖先对机器人都做过哪些贡献?

2. 机器人三定律对机器人做了哪些要求?

3. 简述第一代、第二代、第三代机器人的主要特征与区别。

4. 在使用过程中, 在位置精度要求较高、运动范围相对大的工作场合, 你认为选什么形式的机器人较合适? 对于要求占地面积小、活动范围大、运动灵活的工作场合, 你认为选什么形式的机器人较合适?

5. 简述机器人常有哪几种驱动方式, 各自优缺点是什么, 驱动发展的趋势是什么?

6. 你能否通过机器人学的研究内容所介绍的 6 个方面, 归纳哪些属于基础研究, 哪些属于应用研究?

第2章 机器人的基本结构原理

本章重点：本章介绍了工业机器人的基本构成，主要技术参数，人手臂作用机能，在此基础上对工业机器人的手部、手腕、手臂、机身、行走机构等原理及相关的结构设计进行了讨论，使读者对工业机器人有关空间机构有一个较为清楚的了解。

2.1 机器人的基本构成

机器人的工作原理是一个比较复杂的问题。简单地讲，机器人的原理就是模仿人的各种肢体动作、思维方式和控制决策能力。通常所说的工业机器人（操作机），实质上是一个拟人手臂的空间机构。

不同类型的机器人其机械、电气和控制结构千差万别，但是作为一个机器人系统，通常由三部分、六个子系统组成，如图 2-1 所示。这三部分是机械部分、传感部分、控制部分；六个子系统是驱动系统、机械系统、感知系统、人机交互系统、机器人-环境交互系统、控制系统等。

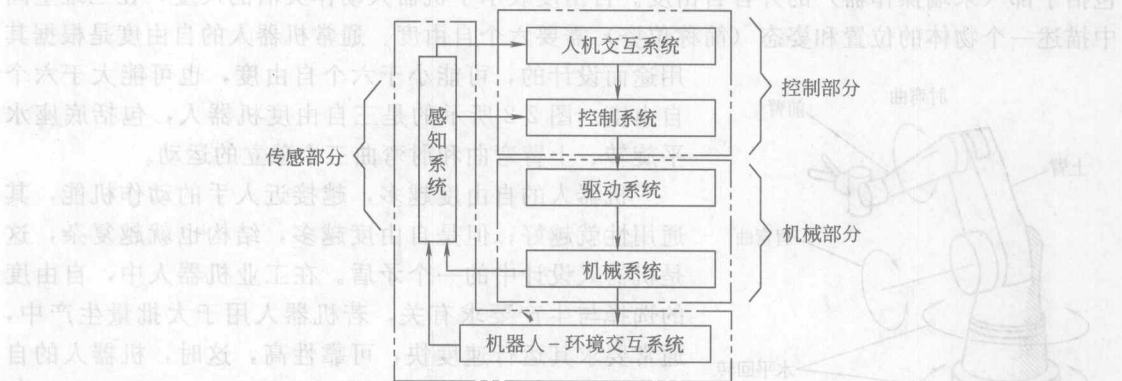


图 2-1 机器人的基本构成

① 机械部分 是由关节连在一起的许多机械连杆的集合体，形成开环运动学链系。连杆类似于人类的小臂、大臂等。关节通常又分为转动关节和移动关节，移动关节允许连杆作直线移动，转动关节仅允许连杆之间发生旋转运动。由关节-连杆结构所构成的机械结构一般有 3 个主要部件，即臂、腕和手，它们可在规定的范围上运动。

② 驱动系统 是使各种机械部件产生运动的装置。常规的驱动系统有气动传动、液压传动或电动传动，它们可以直接地与臂、腕或手上的机械连杆或关节连接在一起，也可以使用齿轮、带、链条等机械传动机构间接驱动。

③ 感知系统 由一个或多个传感器组成，用来获取内部和外部环境中的有用信息，通过这些信息确定机械部件各部分的运行轨迹、速度、位置和外部环境状态，使机械部件的各部分按预定程序或者工作需要进动作。传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化水平。

④ 控制系统 其任务是根据机器人的作业指令程序以及从传感器反馈回来的信号支配

机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。若机器人不具备信息反馈特征,则为开环控制系统;若具备信息反馈特征,则为闭环控制系统。根据控制原理,控制系统又可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运动的形式,控制系统还可分为点位控制和轨迹控制等。

⑤ 机器人-环境交互系统 是实现工业机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。工业机器人可与外部设备集成为一个功能单元,如加工制造单元、焊接单元、装配单元等,当然,也可以是多台机器人、多台机床或设备及多个零件存储装置等集成为一个执行复杂任务的功能单元。

⑥ 人机交互系统 是使操作人员参与机器人控制并与机器人进行联系的装置,例如,计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板及危险信号报警器等。归纳起来人机交互系统可分为两大类:指令给定装置和信息显示装置。

2.2 机器人主要技术参数

由于机器人的结构、用途和用户要求的不同,机器人的技术参数也不同。一般来说,机器人的技术参数主要包括自由度、工作范围、工作速度、承载能力、精度、驱动方式、控制方式等。

① 自由度 机器人的自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目,但是一般不包括手部(末端操作器)的开合自由度。自由度表示了机器人动作灵活的尺度,在三维空间中描述一个物体的位置和姿态(简称位姿)需要六个自由度。通常机器人的自由度是根据其用途而设计的,可能小于六个自由度,也可能大于六个自由度。图 2-2 所示的是三自由度机器人,包括底座水平旋转、上臂弯曲和肘弯曲三个独立的运动。

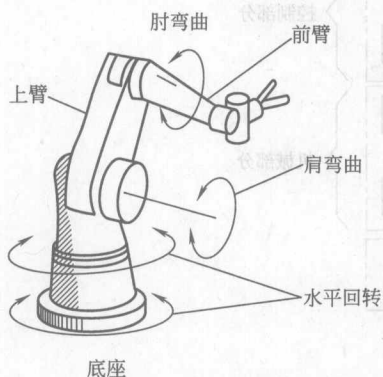


图 2-2 三自由度机器人简图

② 工作范围 机器人的工作范围是指机器人手臂或手部安装点所能达到的空间区域。因为手部末端操作器的尺寸和形状是多种多样的,为了真实反映机器人的特征参数,这里指不安装末端操作器时的工作区域。机器人工作范围的形状和大小十分重要,机器人在执行作业时可能会因为存在手部不能到达的作业死区而无法完成工作任务。机器人所具有的自由度数目及其组合决定其运动图形;而自由度的变化量(即直线运动的距离和回转角度的大小)则决定着运动图形的大小。图 2-3 显示了装配机器人的工作范围。

③ 工作速度 是指机器人在工作载荷条件下、匀速运动过程中,机械接口中心或工具中心点在单位时间内所移动的距离或转动的角度。说明书中一般提供了主要运动自由度的最大稳定速度,但是在实际应用中仅考虑最大稳定速度是不够的。这是因为运动循环包括加速启动,等速运行和减速制动三个过程。如果最大稳定速度高,允许的极限加速度小,则加减速

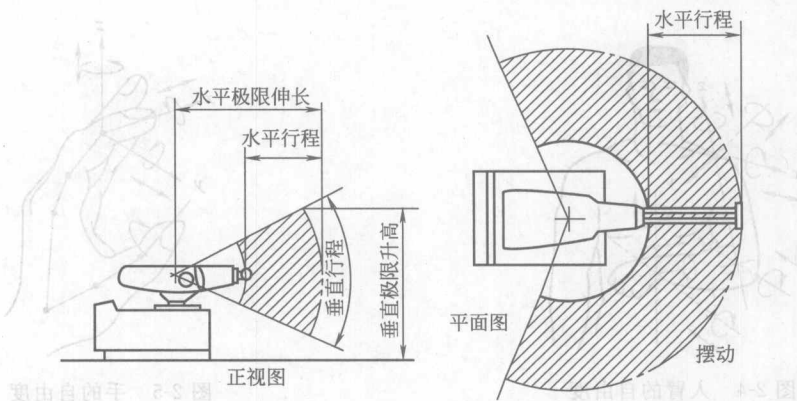


图 2-3 装配机器人的工作范围

速的时间就会长一些，即有效速度就要低一些；反之，如果最大稳定速度低，允许的极限加速度大，则加减速的时间就会短一些，这有利于有效速度的提高。但是如果加速或减速过快，有可能引起定位时超调或振荡加剧，使得到达目标位置后需要等待振荡衰减的时间增加，则也可能使有效速度反而降低。而且过大的加减速速度会导致惯性力加大，影响动作的平稳和精度。所以，在考虑机器人运动特性时，除了要注意最大稳定速度外，还应注意其最大允许的加减速速度。

④ 承载能力 是指机器人在工作范围内的任何位姿上所能承受的最大负载。通常可以用质量、力矩、惯性矩来表示。承载能力不仅决定于负载的质量，而且还与机器人运行的速度和加速度的大小和方向有关。一般低速运行时，承载能力大，为安全考虑，规定在高速运行时所能抓取的工件重量作为承载能力指标。

⑤ 定位精度、重复精度和分辨率 定位精度是指机器人手部实际到达位置与目标位置之间的差异。如果机器人重复执行某位置给定指令，它每次走过的距离并不相同，而是在一平均值附近变化，变化的幅度代表重复精度。分辨率是指机器人每根轴能够实现的最小移动距离或最小转动角度。

定位精度、重复精度和分辨率不一定相关，它们是根据机器人使用要求设计确定的，取决于机器人的机械精度与电气精度。

⑥ 驱动方式 是指机器人的动力源形式，主要有液压驱动、气压驱动和电力驱动等方式。

⑦ 控制方式 指机器人用于控制轴的方式，目前主要分为伺服控制和非伺服控制等。

2.3 人的手臂作用机能初步分析

人的上肢大体上可以分为大臂、小臂、手部三大部分。大臂通过肩关节与躯干相连接，大臂与小臂之间由肘关节相连，小臂与手之间通过腕关节相连接。手部由手掌与五个手指构成。如果从工程学的角度出发，将臂部从肩关节起到手腕关节的活动机能用自由度加以描述，则每个可看作刚体的部分，在空间都具有沿 x 、 y 、 z 轴的三个移动自由度，以及绕 x 、 y 、 z 轴的三个转动自由度，经关节连接后，就可将其表示为如图 2-4 所示。手部比臂部更为复杂，是一个具有 20 多个自由度的精巧机构，如图 2-5 所示。作为机器人的手臂，如果能设计得像人的上肢那样，具有 27 个自由度，无疑会具有很高的机能。但是，就目前的技术水平来说，还有许多问题有待于解决。