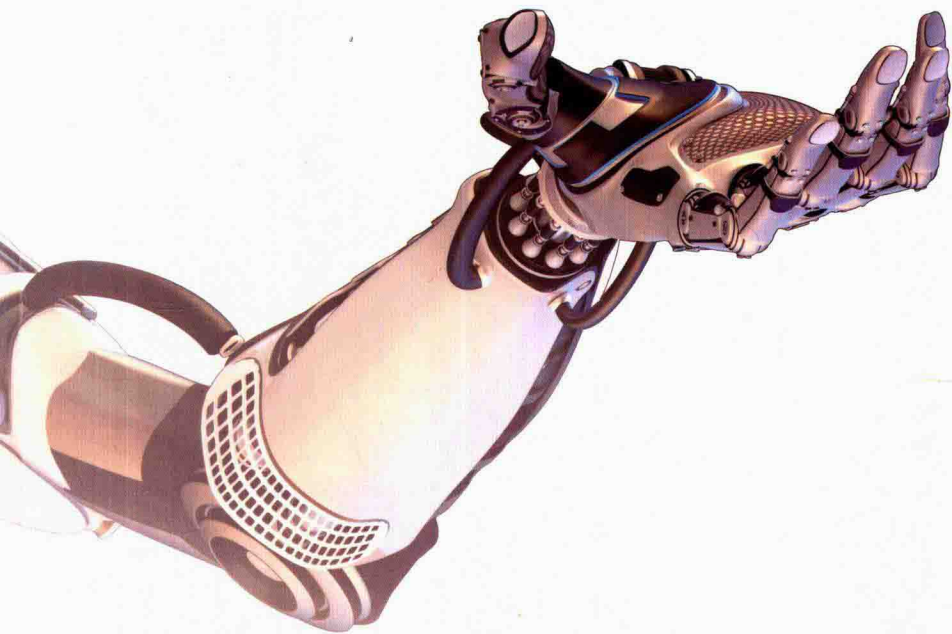


高等职业院校机电类“十三五”规划教材

R O B O T



◎ 龚仲华 夏怡 编著

# 工业机器人

## 技术

专业知识“必需、够用”，技术技能“实用、典型”

以 ABB、FANUC、安川、KUKA 等公司的典型产品为例讲解知识

技术先进、内容全面、案例丰富，理论联系实际，面向工程应用

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业院校

规划教材

R O U T E



# 工业机器人 技术

© 龚仲华 夏怡 编著

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

工业机器人技术 / 龚仲华, 夏怡编著. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2017. 5  
高等职业院校机电类“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-115-44627-5

I. ①工… II. ①龚… ②夏… III. ①工业机器人—  
高等职业教育—教材 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第004164号

## 内 容 提 要

本书从工业机器人的基础知识、结构与控制原理、应用技术三方面,介绍了机器人的产生、发展和分类概况,讲解了工业机器人的组成、特点、结构形态、技术性能等基础知识;详细阐述了垂直串联、SCARA、Delta 工业机器人的机械结构,谐波减速器、RV 减速器等核心部件的结构原理和安装维护要求,电气控制系统组成与功能等内容;并以安川机器人为例,系统介绍了工业机器人的命令与编程方法,手动、示教编程、再现运行以及控制系统应用设定的具体步骤。其中,机械传动系统和核心部件结构原理、电气控制系统组成与应用设定等内容是体现工业机器人技术特点、提高技术应用能力的关键,也是体现本书特色和实用性的重点。

本书选材典型、内容全面、案例丰富、理论联系实际、面向工程应用,可作为院校机电类专业通用教材或工业机器人专业的基础教材,也可供工业机器人设计、维修、操作、编程人员参考。

---

◆ 编 著 龚仲华 夏 怡

责任编辑 刘盛平

执行编辑 王丽美

责任印制 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 16.25

2017 年 5 月第 1 版

字数: 383 千字

2017 年 5 月河北第 1 次印刷

---

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)81052526 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第 8052 号



# 前 言

工业机器人是集机械、电子、控制、计算机等多学科先进技术于一体的机电一体化设备，被称为工业自动化的三大支持技术之一。随着社会的进步和劳动力成本的增加，机器人在我国的应用已越来越广，工业机器人技术课程在高等职业院校机电类人才培养中的重要性正在日益显现。

本书从应用型人才培养的实际要求出发，根据高等职业院校的高层次技术技能的教学要求，对工业机器人所涉及的基础知识、机械结构、核心部件、控制系统等进行全面、系统的介绍；对工业机器人的编程指令和编程方法，手动、示教编程、再现运行以及控制系统应用设定的应用技术进行了详细阐述。

全书分8章，主要内容包括工业机器人基础知识、结构与控制原理、应用技术三大部分。其中，机械传动系统和核心部件结构原理、电气控制系统组成与应用设定等内容是体现工业机器人技术特点、提高技术应用能力的关键，也是体现教材特色和实用性的重点。

基础知识部分（第1章和第2章）介绍了机器人的产生、发展和分类概况，讲解了工业机器人的组成、特点、结构形态、技术性能，还介绍了常用产品及应用等知识。

结构与控制原理部分（第3~5章）详细阐述了垂直串联、SCARA、Delta 工业机器人的机械组成部件及机械传动系统结构；对工业机器人的机械基础部件，以及谐波减速器、RV 减速器等核心部件的结构原理和安装维护要求进行了深入说明；对工业机器人电气控制系统的组成与功能进行了全面介绍。

应用技术部分（第6~8章）对工业机器人的程序结构与基本命令编程方法，手动、示教编程、再现运行操作步骤，以及控制系统应用设定等进行了详细阐述。

本书编写力求做到专业知识“必需、够用”，技术技能“实用、典型”；内容由浅入深、循序渐进、易教易学。每一章都编写有“本章小结”和“复习思考题”，以帮助学习者巩固和提高所学的知识，方便课堂教学和自学。

由于不同文献的中文翻译存在较大差异，为避免误解，除专业名词外，本书中的国外人名/公司/组织机构，统一采用“外文（简称、译名）”的表示方式。

本书编写参阅了安川公司、Harmonic Drive System、Nabtesco Corporation 及其他相关公司的技术资料，并得到了安川公司技术人员的大力支持与帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

2016年12月

$$a^x \sim x \cdot \ln a + 1 \quad (x \rightarrow 0)$$

张江涛

# 目 录

<b>第 1 章 工业机器人概述</b> ..... 1	<b>第 3 章 工业机器人机械结构</b> ..... 37
1.1 机器人的产生与发展..... 1	3.1 垂直串联机器人 ..... 37
1.1.1 机器人产生及定义..... 1	3.1.1 本体基本结构 ..... 37
1.1.2 机器人的发展..... 3	3.1.2 机身结构与传动系统..... 39
1.2 机器人的分类与概况..... 5	3.1.3 手腕的基本形式..... 41
1.2.1 机器人的分类..... 5	3.1.4 前驱 RBR 手腕结构..... 43
1.2.2 工业机器人概况 ..... 7	3.1.5 后驱 RBR 手腕结构..... 45
1.2.3 服务机器人简介 ..... 9	3.2 SCARA 及 Delta 机器人 ..... 50
1.3 工业机器人的发展与 应用..... 11	3.2.1 前驱 SCARA 结构..... 50
1.3.1 技术发展简史..... 11	3.2.2 后驱 SCARA 结构..... 52
1.3.2 主要产品与应用 ..... 12	3.2.3 Delta 结构简介 ..... 54
本章小结 ..... 14	3.3 工业机器人结构实例..... 55
复习思考题 ..... 15	3.3.1 MH6 机器人简介..... 55
<b>第 2 章 工业机器人组成与性能</b> ..... 17	3.3.2 基座和腰部结构..... 57
2.1 工业机器人的组成与特点 ..... 17	3.3.3 上/下臂结构..... 59
2.1.1 工业机器人的组成..... 17	3.3.4 手腕结构 ..... 62
2.1.2 工业机器人的特点..... 20	本章小结 ..... 66
2.2 工业机器人的结构形态 ..... 23	复习思考题 ..... 67
2.2.1 垂直串联机器人 ..... 23	<b>第 4 章 工业机器人核心部件</b> ..... 68
2.2.2 水平串联机器人 ..... 25	4.1 CRB 轴承及同步皮带 ..... 68
2.2.3 并联机器人 ..... 26	4.1.1 机械传动核心部件 ..... 68
2.3 工业机器人的技术性能 ..... 27	4.1.2 CRB 轴承及安装维护 ..... 70
2.3.1 主要技术参数..... 27	4.1.3 同步皮带及安装维护..... 72
2.3.2 工作范围与承载能力 ..... 29	4.2 谐波减速器及安装维护 ..... 75
2.3.3 自由度、速度及精度 ..... 32	4.2.1 结构与原理..... 75
本章小结 ..... 34	4.2.2 技术特点与常用产品..... 78
复习思考题 ..... 35	4.2.3 部件型减速器 ..... 82
	4.2.4 单元型减速器 ..... 85
	4.2.5 简易单元型减速器 ..... 88

4.2.6 齿轮箱型减速器	90	6.3 移动命令编程	150
4.3 RV 减速器及安装维护	93	6.3.1 命令格式与功能	150
4.3.1 结构与原理	93	6.3.2 编程要点	153
4.3.2 部件型减速器结构	98	6.4 输入/输出命令编程	155
4.3.3 齿轮箱型减速器结构	101	6.4.1 命令格式与功能	155
4.3.4 安装维护要求	104	6.4.2 编程要点	157
本章小结	108	6.5 程序控制命令编程	159
复习思考题	109	6.5.1 程序执行控制命令	159
<b>第 5 章 工业机器人控制系统</b>	112	6.5.2 程序转移命令	161
5.1 控制系统概述	112	6.6 工业机器人编程实例	163
5.1.1 系统组成与结构	112	本章小结	167
5.1.2 系统的使用条件	115	复习思考题	167
5.2 控制系统连接	116	<b>第 7 章 工业机器人操作</b>	170
5.2.1 电源连接	116	7.1 示教器及功能	170
5.2.2 信号连接	118	7.1.1 操作按钮	170
5.3 控制部件及功能	120	7.1.2 显示器	171
5.3.1 ON/OFF 单元	120	7.2 机器人手动操作	174
5.3.2 安全单元	122	7.2.1 开/关机与安全模式	174
5.3.3 I/O 单元	124	7.2.2 轴组与坐标系选择	178
5.3.4 电源与 IR 控制器	126	7.2.3 关节坐标系点动	179
5.4 伺服驱动器	128	7.2.4 其他坐标系点动	182
5.4.1 电源模块	128	7.2.5 工具的点动定向	184
5.4.2 伺服控制板	130	7.3 示教编程操作	187
5.4.3 逆变模块	132	7.3.1 程序创建和程序名	187
5.4.4 制动单元	134	7.3.2 移动命令示教	189
本章小结	135	7.3.3 作业命令的输入	192
复习思考题	136	7.4 命令编辑操作	196
<b>第 6 章 工业机器人编程</b>	138	7.4.1 移动命令编辑	196
6.1 程序与编程要素	138	7.4.2 其他命令的编辑	199
6.1.1 程序组成与特点	138	7.4.3 点重合与程序暂停	201
6.1.2 控制轴组与坐标系	141	7.5 程序再现运行	202
6.1.3 机器人的姿态	144	7.5.1 程序点检查与试运行	202
6.2 命令与分类	146	7.5.2 再现运行设定	204
6.2.1 基本命令及分类	146	7.5.3 再现运行操作	206
6.2.2 作业命令与作业文件	149	本章小结	208
		复习思考题	209

<b>第 8 章 控制系统应用设定</b> .....	212	8.3.2 TCP 点与坐标系设定	232
8.1 操作功能设定 .....	212	8.3.3 工具示教设定 .....	234
8.1.1 示教条件设定 .....	212	8.4 用户坐标系设定 .....	236
8.1.2 程序编辑设置 .....	215	8.4.1 用户坐标系创建 .....	236
8.1.3 再现运行设定 .....	217	8.4.2 用户坐标系示教 .....	238
8.2 机器人原点设定 .....	221	8.5 软件保护设定 .....	240
8.2.1 绝对原点设定 .....	221	8.5.1 软极限设定 .....	240
8.2.2 第二原点设定 .....	225	8.5.2 干涉保护区设定 .....	242
8.2.3 作业原点设定 .....	227	本章小结 .....	249
8.3 工具设定 .....	229	复习思考题 .....	250
8.3.1 工具文件编辑 .....	229		

# 第1章

## 工业机器人概述

### 1.1

#### 机器人的产生与发展

##### 1.1.1 机器人产生及定义

###### 1. 概念的出现

机器人 (Robot) 自从 1959 年问世以来, 由于它能够协助和代替人类完成那些重复、频繁、单调、长时间的工作, 或进行危险、恶劣环境下的作业, 因此其发展较迅速。随着人们对机器人研究的不断深入, 已逐步形成了 Robotics (机器人学) 这一新兴的综合性学科, 有人将机器人技术与数控技术、PLC 技术并称为工业自动化的三大支持技术。

机器人 (Robot) 一词源自于捷克著名剧作家 Karel Čapek (卡雷尔·恰佩克) 1921 年创作的剧本 *Rossumovi univerzální roboti* (《罗萨姆的万能机器人》, 简称 R.U.R), 由于 R.U.R 剧中的人造机器被取名为 Robota (捷克语, 即奴隶、苦力), 因此, 英文 Robot 一词开始代表机器人。

机器人概念一经出现, 首先引起了科幻小说家的广泛关注。自 20 世纪 20 年代起, 机器人成为很多科幻小说、电影的主人公, 如星球大战中的 C3P 等。科幻小说家的想象力是无限的。为了预防机器人可能引发的人类灾难, 1942 年, 美国科幻小说家 Isaac Asimov (艾萨克·阿西莫夫) 在 *I, Robot* 的第 4 个短篇 *Runaround* 中, 首次提出了“机器人学三原则”, 它被称为“现代机器人学的基石”, 这也是“机器人学 (Robotics)”这个名词在人类历史上的首度亮相。

机器人学三原则的主要内容如下。

原则 1: 机器人不能伤害人类, 或因其不作为而使人类受到伤害。

原则 2: 机器人必须执行人类的命令, 除非这些命令与原则 1 相抵触。



原则 3: 在不违背原则 1、原则 2 的前提下, 机器人应保护自身不受伤害。

到了 1985 年, Isaac Asimov 在机器人系列最后作品 *Robots and Empire* 中, 又补充了凌驾于“机器人学三原则”之上的“0 原则”, 即:

0 原则: 机器人必须保护人类的整体利益不受伤害, 其他 3 条原则都必须在这一前提下才能成立。

继 Isaac Asimov 之后, 其他科幻作家不断提出了对“机器人学三原则”的补充、修正意见, 但是, 这些大都是科幻小说家对想象中机器人所施加的限制; 实际上, “人类整体利益”等概念本身就是模糊的, 甚至连人类自己都搞不明白, 更不要说机器人了。因此, 目前人类的认识和科学技术, 实际上还远未达到制造科幻片中的机器人的水平; 制造出具有类似人类智慧、感情、思维的机器人, 仍属于科学家的梦想和追求。

## 2. 机器人的产生

现代机器人的研究起源于 20 世纪中叶的美国, 它从工业机器人的研究开始。

二战期间 (1938—1945), 由于军事、核工业的发展需要, 在原子能实验室的恶劣环境下, 需要有操作机械来代替人类进行放射性物质的处理。为此, 美国的 Argonne National Laboratory (阿尔贡国家实验室) 开发了一种遥控机械手 (Teleoperator)。接着, 在 1947 年, 又开发出了一种伺服控制的主-从机械手 (Master-Slave Manipulator), 这些都是工业机器人的雏形。

工业机器人的概念由美国发明家 George Devol (乔治·德沃尔) 最早提出, 他在 1954 年申请了专利, 并在 1961 年获得授权。1958 年, 美国著名的机器人专家 Joseph F. Engelberger (约瑟夫·恩格尔伯格) 建立了 Unimation 公司, 并利用 George Devol 的专利, 于 1959 年研制出了图 1.1-1 所示的世界上第一台真正意义上的工业机器人 Unimate, 开创了机器人发展的新纪元。

Joseph F. Engelberger 对世界机器人工业的发展作出了杰出的贡献, 被人们称为“机器人之父”。1983 年, 就在工业机器人销售日渐增长的情况下, 他又毅然地将 Unimation 公司出让给了美国 Westinghouse Electric Corporation 公司 (西屋电气, 又译威斯汀豪斯), 并创建了 TRC 公司, 前瞻性地开始了服务机器人的研发工作。

从 1968 年起, Unimation 公司先后将机器人的制造技术转让给了日本 KAWASAKI (川崎) 和英国 GKN 公司, 机器人开始在日本和欧洲得到了快速发展。据有关方面的统计, 目前世界上至少有 48 个国家在发展机器人, 其中的 25 个国家已在进行智能机器人开发, 美国、日本、德国、法国等都是机器人的研发和制造大国, 无论在基础研究方面还是产品研发、制造方面都居世界领先水平。

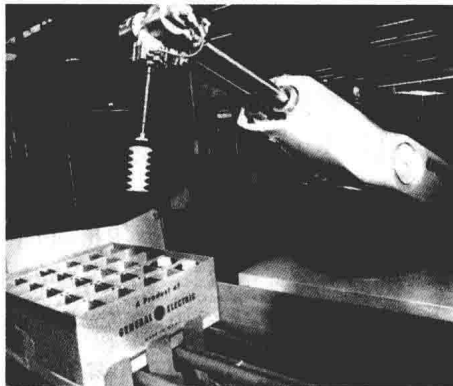


图 1.1-1 Unimate 工业机器人

## 3. 机器人的定义

由于机器人的应用领域众多、发展速度快, 加上它又涉及人类的有关概念, 因此, 对

于机器人，世界各国标准化机构，甚至同一国家的不同标准化机构，至今尚未形成一个统一、准确、世所公认的严格定义。

例如，欧美国家一般认为，机器人是一种“由计算机控制、可通过编程改变动作的多功能、自动化机械”。而日本作为机器人生产的大国，则将机器人分为“能够执行人体上肢（手和臂）类似动作”的工业机器人和“具有感觉和识别能力、并能够控制自身行为”的智能机器人两大类。

客观地说，欧美国家的机器人定义侧重于其控制方式和功能，其定义和现行的工业机器人较接近；而日本的机器人定义，关注的是机器人的结构和行为特性，且已经考虑到了现代智能机器人的发展需要，其定义更为准确。

作为参考，目前在相关资料中使用较多的机器人定义主要有以下几种。

(1) International Organization for Standardization (ISO, 国际标准化组织) 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，执行各种任务”。

(2) Japan Robot Association (JRA, 日本机器人协会) 将机器人分为工业机器人和智能机器人两大类，工业机器人是一种“能够执行人体上肢（手和臂）类似动作的多功能机器”；智能机器人是一种“具有感觉和识别能力，并能够控制自身行为的机器”。

(3) NBS (美国国家标准局) 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”。

(4) Robotics Industries Association (RIA, 美国机器人协会) 定义：机器人是一种“用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的，通过可编程的动作来执行各种任务的，具有编程能力的多功能机械手”。

(5) 我国 GB/T 12643 标准定义：工业机器人是一种“能够自动定位控制，可重复编程的，多功能的、多自由度的操作机，能搬运材料、零件或操持工具，用于完成各种作业”。

以上标准化机构及专门组织对机器人的定义，都是在特定时间所得出的结论，多偏重于工业机器人，但科学技术对未来是无限开放的，当代智能机器人无论在外观，还是功能、智能化程度等方面，都已超出了传统工业机器人的范畴。机器人正在源源不断地向人类活动的各个领域渗透，它所涵盖的内容越来越丰富，其应用领域和发展空间正在不断延伸和扩大，这也是机器人与其他自动化设备的重要区别。

## 1.1.2 机器人的发展

机器人最早用于工业领域，它主要用来协助人类完成重复、频繁、单调、长时间的工作，或在高温、粉尘、有毒、辐射、易燃、易爆等恶劣而危险环境下的作业。但是，随着社会进步、科学技术发展和智能化技术研究的深入，各式各样具有感知、决策、行动和交互能力，可适应不同领域特殊要求的智能机器人相继被研发，机器人已开始进入人们生产、生活的各个领域，并在其中某些领域逐步取代人类独立从事相关作业。根据机器人现有的技术水平，人们一般将机器人产品分为以下三代。

## 1. 第一代机器人

第一代机器人一般是指能通过离线编程或示教操作生成程序，并再现动作的机器人。第一代机器人所使用的技术和数控机床十分相似，它既可通过离线编制的程序控制机器人的运动；也可通过手动示教操作（数控机床称为 Teach in 操作），记录运动过程并生成程序，并进行再现运行。

第一代机器人的全部行为完全由人控制，它没有分析和推理能力，不能改变程序动作，无智能性，其控制以示教、再现为主，故又称示教再现机器人。第一代机器人现已实用和普及，图 1.1-2 所示的大多数工业机器人都属于第一代机器人。

## 2. 第二代机器人

第二代机器人装备有一定数量的传感器，它能获取作业环境、操作对象等的简单信息，并通过计算机的分析与处理，作出简单的推理，并适当调整自身的动作和行为。例如，在图 1.1-3 所示的探测机器人上，可通过所安装的摄像头及视觉传感系统，识别图像，判断和规划探测车的运动轨迹，它对外部环境具有了一定的适应能力。

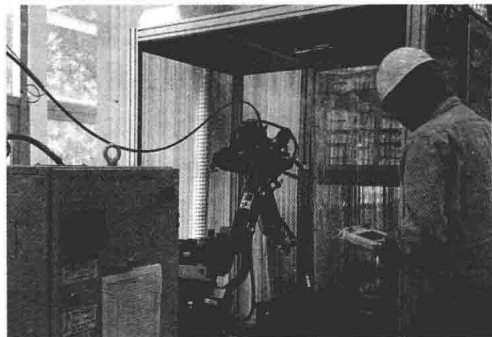


图 1.1-2 第一代机器人

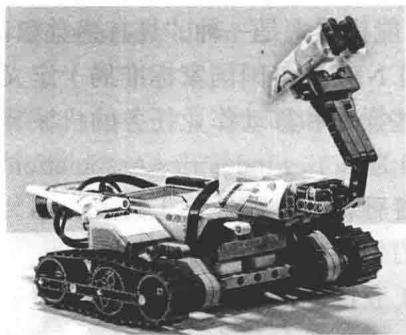


图 1.1-3 第二代机器人

第二代机器人已具备一定的感知和简单推理等能力，有一定程度上的智能，故又称感知机器人或低级智能机器人，当前使用的大多数服务机器人或多或少都已经具备第二代机器人的特征。

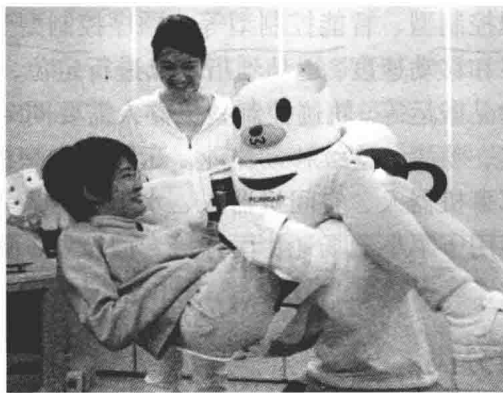
## 3. 第三代机器人

第三代机器人应具有高度的自适应能力，它有多种感知机能，可通过复杂的推理，作出判断和决策，自主决定机器人的行为，具有相当程度的智能，故称为智能机器人。第三代机器人目前主要用于家庭、个人服务及军事、航天等行业，总体尚处于实验和研究阶段，目前还只有美国、日本、德国等少数发达国家能掌握和应用。

例如，日本 HONDA（本田）公司最新研发的图 1.1-4（a）所示的 Asimo 机器人，不仅能实现跑步、爬楼梯、跳舞等动作，且还能进行踢球、倒饮料、打手语等简单智能动作。日本 Riken Institute（理化学研究所）最新研发的图 1.1-4（b）所示的 Robear 护理机器人，其肩部、关节等部位都安装有测力感应系统，可模拟人的怀抱感，它能够像人一样，柔和地将卧床者从床上扶起，或将坐着的人抱起，其样子亲切可爱、充满活力。



(a) Asimo 机器人



(b) Robear 机器人

图 1.1-4 第三代机器人

# 1.2

## 机器人的分类与概况

### 1.2.1 机器人的分类

机器人的分类方法很多,但由于人们观察问题的角度有所不同,直到今天,还没有一种分类方法能够满意地对机器人进行世所公认的分类。总体而言,通常的机器人分类方法主要有专业分类法和应用分类法两种,简介如下。

#### 1. 专业分类法

专业分类法一般是机器人设计、制造和使用厂家技术人员所使用的分类方法,其专业性较强,业外较少使用。目前,专业分类又可按机器人控制系统的技术水平、机械机构形态和运动控制方式 3 种方式进行分类。

(1) 按控制系统水平分类。根据机器人目前的控制系统技术水平,一般可分为前述的示教再现机器人(第一代)、感知机器人(第二代)、智能机器人(第三代)三类。第一代机器人已实用和普及,绝大多数工业机器人都属于第一代机器人;第二代机器人的技术已部分实用化;第三代机器人尚处于实验和研究阶段。

(2) 按机械结构形态分类。根据机器人现有的机械结构形态,有人将其分为圆柱坐标(Cylindrical Coordinate)、球坐标(Spherical Coordinate)、直角坐标(Cartesian Coordinate)及关节型(Articulated)、并联型(Parallel)等,以关节型机器人为常用。不同形态的机器人在外观、机械结构、控制要求、工作空间等方面均有较大的区别。例如,关节型机器人的动作类似人类手臂;而直角坐标及并联型机器人的外形和结构,则与数控机床十分类似等。有关工业机器人的结构形态,将在第 2 章进行详细阐述。

(3) 按运动控制方式分类。根据机器人的控制方式,有人将其分为顺序控制型、轨迹

控制型、远程控制型、智能控制型等。顺序控制型又称点位控制型，这种机器人只需要按照规定的次序和移动速度，运动到指定点进行定位，而不需要控制移动过程中的运动轨迹，它可以用于物品搬运等。轨迹控制型机器人需要同时控制移动轨迹、移动速度和运动终点，它可用于焊接、喷漆等连续移动作业。远程控制型机器人可实现无线遥控，故多用于特定的行业，如军事机器人、空间机器人、水下机器人等。智能控制型机器人就是前述的第三代机器人，多用于军事、场地、医疗等专门行业，智能型工业机器人目前尚未有实用化的产品。

## 2. 应用分类

应用分类是根据机器人应用环境（用途）进行分类的大众分类方法，其定义通俗，易为公众所接受。例如，日本分为工业机器人和智能机器人两类；我国则分为工业机器人和特种机器人两类等。然而，由于我们对机器人的智能性判别尚缺乏严格、科学的标准，工业机器人和特种机器人的界线也较难划分，因此，本书参照国际机器人联合会（IFR）的相关定义，根据机器人的应用环境，将机器人分为工业机器人和服务机器人两类；前者用于环境已知的工业领域；后者用于环境未知的服务领域。如进一步细分，目前常用的机器人，基本上可分为图 1.2-1 所示的几类。



图 1.2-1 机器人的分类

(1) 工业机器人。工业机器人（Industrial Robot, IR）是指在工业环境下应用的机器人，它是一种可编程的、多用途自动化设备。当前实用化的工业机器人以第一代示教再现机器人人居多，但部分工业机器人（如焊接、装配等）已能通过图像的识别、判断，来规划或探测途径，对外部环境具有了一定的适应能力，初步具备了第二代感知机器人的一些功能。

工业机器人可根据其用途和功能，分为加工、装配、搬运、包装 4 大类；在此基础上，

还可对每类进行细分。

(2) 服务机器人。服务机器人 (Service Robot, SR) 是服务于人类非生产性活动的机器人总称, 它在机器人中的比例高达 95% 以上。根据 IFR (国际机器人联合会) 的定义, 服务机器人是一种半自主或全自主工作的机械设备, 它能完成有益于人类的服务工作, 但不直接从事工业品的生产。

服务机器人的涵盖范围非常广, 简言之, 除工业生产用的机器人外, 其他所有的机器人都属于服务机器人的范畴。因此, 人们根据其用途, 将服务机器人分为个人/家庭服务机器人 (Personal/Domestic Robots) 和专业服务机器人 (Professional Service Robots) 两类, 在此基础上还可对每类进行细分。

以上两类产品研发、应用的简要情况如图 1.2-1 所示。

## 1.2.2 工业机器人概况

工业机器人 (Industrial Robot, IR) 是用于工业生产环境的机器人总称。用工业机器人替代人工操作, 不仅可保障人身安全、改善劳动环境、减轻劳动强度、提高劳动生产率, 而且还能够起到提高产品质量、节约原材料消耗及降低生产成本等多方面作用, 因而, 它在工业生产各领域的应用也越来越广泛。

工业机器人自 1959 年问世以来, 经过 50 多年的发展, 在性能和用途等方面都有了很大的变化; 现代工业机器人的结构越来越合理、控制越来越先进、功能越来越强大。根据工业机器人的功能与用途, 其主要产品大致可分为前述图 1.2-1 所示的加工、装配、搬运、包装 4 大类。

### 1. 加工机器人

加工机器人是直接用于工业产品加工作业的工业机器人, 常用的有金属材料焊接、切割、折弯、冲压、研磨、抛光等; 此外, 也有部分用于建筑、木材、石材、玻璃等行业的非金属材料切割、研磨、雕刻、抛光等加工作业。

焊接、切割、研磨、雕刻、抛光加工的环境通常较恶劣, 加工时所产生的强弧光、高温、烟尘、飞溅、电磁干扰等都有害于人体健康。这些行业采用机器人自动作业, 不仅可改善工作环境, 避免人体伤害; 而且还可自动连续工作, 提高工作效率和改善加工质量。

焊接机器人 (Welding Robot) 是目前工业机器人中产量最大、应用最广的产品, 被广泛用于汽车、铁路、航空航天、军工、冶金、电器等行业。自 1969 年美国 GM 公司 (通用汽车) 在美国 Lordstown 汽车组装生产线上装备首台汽车点焊机器人以来, 机器人焊接技术已日臻成熟, 通过机器人的自动化焊接作业, 可提高生产率、确保焊接质量、改善劳动环境, 它是当前工业机器人应用的重要方向之一。

材料切割是工业生产不可缺少的加工方式, 从传统的金属材料火焰切割、等离子切割、到可用于多种材料的激光切割加工都可通过机器人完成。目前, 薄板类材料的切割大多采用数控火焰切割机、数控等离子切割机和数控激光切割机等数控机床加工; 但异形、大型材料或船舶、车辆等大型废旧设备的切割已开始逐步使用工业机器人。

研磨、雕刻、抛光机器人主要用于汽车、摩托车、工程机械、家具建材、电子电气、

陶瓷卫浴等行业的表面处理。使用研磨、雕刻、抛光机器人不仅能使操作者远离高温、粉尘、有毒、易燃、易爆的工作环境，而且能够提高加工质量和生产效率。

## 2. 装配机器人

装配机器人（Assembly Robot）是将不同的零件或材料组合成组件或成品的工业机器人，常用的有组装和涂装 2 大类。

计算机（Computer）、通信（Communication）和消费性电子（Consumer Electronic）行业（简称 3C 行业）是目前组装机器人最大的应用市场。3C 行业是典型的劳动密集型产业，采用人工装配，不仅需要大量的员工，而且操作工人的工作高度重复、频繁，劳动强度极大，致使人工难以承受；此外，随着电子产品不断向轻薄化、精细化方向发展，产品对零部件装配的精细程度在日益提高，部分作业难度极大，致使人工已无法完成。

涂装类机器人用于部件或成品的油漆、喷涂等表面处理，这类处理通常含有影响人体健康的有害、有毒气体，采用机器人自动作业后，不仅可改善工作环境，避免有害、有毒气体的危害；而且还可自动连续工作，提高工作效率和改善加工质量。

## 3. 搬运机器人

搬运机器人（Transfer Robot）是从物体移动作业的工业机器人的总称，常用的主要有输送机器人和装卸机器人 2 大类。

工业生产中的输送机器人以无人搬运车（Automated Guided Vehicle, AGV）为主。AGV 具有自身的计算机控制系统和路径识别传感器，能够自动行走和定位停止，可广泛应用于机械、电子、纺织、卷烟、医疗、食品、造纸等行业的物品搬运和输送。在机械加工行业，AGV 大多用于无人化工厂、柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）的工件、刀具搬运、输送，它通常需要与自动化仓库、刀具中心及数控加工设备、柔性加工单元（Flexible Manufacturing Cell, FMC）的控制系统互连，以构成无人化工厂、柔性制造系统的自动化物流系统。

装卸机器人多用于机械加工设备的工件装卸（上下料），它通常和数控机床等自动化加工设备组合，构成柔性加工单元（FMC），成为无人化工厂、柔性制造系统（FMS）的一部分。装卸机器人还经常用于冲剪、锻压、铸造等设备的上下料，以替代人工完成高风险、高温等恶劣环境下的危险作业或繁重作业。

## 4. 包装机器人

包装机器人（Packaging Robot）是用于物品分类、成品包装、码垛的工业机器人，常用的主要有分拣、包装和码垛 3 类。

计算机、通信和消费性电子行业（3C 行业）和化工、食品、饮料、药品工业是包装机器人的主要应用领域。3C 行业的产品产量大、周转速度快，成品包装任务繁重；化工、食品、饮料、药品包装由于行业特殊性，人工作业涉及安全、卫生、清洁、防水、防菌等方面的问题。因此，都需要利用装配机器人，来完成物品的分拣、包装和码垛作业。

## 1.2.3 服务机器人简介

### 1. 基本情况

服务机器人是服务于人类非生产性活动的机器人总称。从控制要求、功能、特点等方面看,服务机器人与工业机器人的本质区别在于:工业机器人所处的工作环境在大多数情况下是已知的,因此,利用第一代机器人技术已可满足其要求;然而,服务机器人的工作环境在绝大多数场合是未知的,故都需要使用第二代、第三代机器人技术。从行为方式上看,服务机器人一般没有固定的活动范围和规定的动作行为,它需要有良好的自主感知、自主规划、自主行动和自主协同等方面的能力,因此,服务机器人较多地采用仿人或生物、车辆等结构形态。

早在1967年,在日本举办的第一届机器人学术会议上,人们就提出了两种描述服务技术人特点的代表性意见。一种意见认为服务机器人是一种“具有自动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、移动性、作业性、信息性、柔性、有限性等特征的自动化机器”;另一种意见认为具备如下3个条件的机器,可称为服务机器人:

- (1) 具有类似人类的脑、手、脚等功能要素;
- (2) 具有非接触和接触传感器;
- (3) 具有平衡觉和固有觉的传感器。

当然,鉴于当时的情况,以上定义都强调了服务机器人的“类人”含义,突出了由“脑”统一指挥、靠“手”进行作业、靠“脚”实现移动;通过非接触传感器和接触传感器,使机器人识别外界环境;利用平衡觉和固有觉等传感器感知本身状态等基本属性,但它对服务机器人的研发仍具有参考价值。

服务机器人的出现虽然晚于工业机器人,但由于它与人类进步、社会发展、公共安全等诸多重大问题息息相关,应用领域众多,市场广阔,因此,其发展非常迅速、潜力巨大。有国外专家预测,在不久的将来,服务机器人产业可能成为继汽车、计算机后的另一新兴产业。

在服务机器人中,个人/家用服务机器人(Personal/Domestic Robots)为大众化、低价位产品,其市场最大。在专业服务机器人中,涉及公共安全的军事机器人(Military Robot)、场地机器人(Field Robots)、医疗机器人的应用较广。

### 2. 个人/家用机器人

个人/家用服务机器人(Personal/Domestic Robots)泛指为人们日常生活服务的机器人,包括家庭作业、娱乐休闲、残障辅助、住宅安全等。个人/家用服务机器人是被人们普遍看好的未来最具发展潜力的新兴产业之一。

在个人/家用服务机器人中,以家庭作业和娱乐休闲机器人的产量为最大,两者占个人/家用服务机器人总量的90%以上;残障辅助、住宅安全机器人的普及率目前还较低,但市场前景被人们普遍看好。

家用清洁机器人是家庭作业机器人中最早被实用化和最成熟的产品之一。早在20世纪80年代,美国已经开始进行吸尘机器人的研究,iRobot等公司是目前家用服务机器人行业



公认的领先企业；德国的 Karcher 公司也是著名的家庭作业机器人生产商，它在 2006 年研发的 Rc3000 家用清洁机器人是世界上第一台能够自行完成所有家庭地面清洁工作的家用清洁机器人。在我国，由于家庭经济条件和发达国家的差距巨大，加上传统文化的影响，绝大多数家庭的作业服务目前还是由自己或家政服务人员承担，所使用的设备以传统工具和普通吸尘器、洗碗机等简单设备为主，家庭作业服务机器人的使用率非常低。

### 3. 专业服务机器人

专业服务机器人 (Professional Service Robots) 的涵盖范围非常广，简言之，除工业生产用的工业机器人和为人们日常生活服务的个人/家用机器人外，其他所有的机器人都属于专业服务机器人。在专业服务机器人中，军事、场地和医疗机器人是应用最广的产品，3 类产品的概况如下。

(1) 军事机器人。军事机器人 (Military Robot) 是为了军事目的而研制的自主、半自主式或遥控的智能化装备，它可用来帮助或替代军人，完成特定的战术或战略任务。军事机器人具备全方位、全天候的作战能力和极强的战场生存能力，可在超过人类承受能力的恶劣环境，或在遭到毒气、冲击波、热辐射等袭击时，继续进行工作；加上军事机器人也不存在人类的恐惧心理，可严格地服从命令、听从指挥，有利于指挥者对战局的掌控；在未来战争中，机器人战士完全可能成为军事行动中的主力军。

军事机器人的研发早在 20 世纪 60 年代就已经开始，产品已从第一代的遥控操作器，发展到了现在的第三代智能机器人。目前，世界各国的军用机器人已达上百个品种，其应用涵盖侦察、排雷、防化、进攻、防御及后勤保障等各个方面。用于监视、勘察、获取危险领域信息的无人驾驶飞行器 (UAV) 和地面车 (UGV)、具有强大运输功能和精密侦查设备的机器人武装战车 (ARV)、在战斗中担任补充作战物资的多功能后勤保障机器人 (MULE) 是当前军事机器人的主要产品。

美国的军事机器人 (Military Robot) 无论在基础技术研究、系统开发、生产配套方面，或是在技术转化、实战应用方面等都领先于其他国家，其产品已涵盖陆、海、空、天等诸多兵种，产品包括无人驾驶飞行器、无人地面车、机器人武装战车及多功能后勤保障机器人、机器人战士等多种。美国是目前全世界唯一具有综合开发、试验和实战应用能力的国家，Boston Dynamics (波士顿动力，现已被 Google 并购)、Lockheed Martin (洛克希德·马丁) 等公司均为世界闻名的军事机器人研发制造企业。此外，德国的智能地面无人作战平台、反水雷及反潜水下无人航行体的研究和应用；英国的战斗工程牵引车 (CET)、工程坦克 (FET)、排爆机器人的研究和应用；法国的警戒机器人和低空防御机器人、无人侦察车、野外快速巡逻机器人的研究和应用；以色列的机器人自主导航车、监视与巡逻系统、步兵城市作战用的手携式机器人的研究和应用等，也具有世界领先水平。

(2) 场地机器人。场地机器人 (Field Robots) 是除军事机器人外，其他可进行大范围作业的服务机器人的总称。场地机器人多用于科学研究和公共事业服务，如太空探测、水下作业、危险作业、消防救援、园林作业等。

美国的场地机器人研究始于 20 世纪 60 年代，其品已遍及空间、陆地和水下，从 1967 年的海盗号火星探测器，到 2003 年的 Spirit MER-A (勇气号) 和 Opportunity (机遇号) 火星探测器、2011 年的 Curiosity (好奇号) 核动力驱动的火星探测器，都无一例外地代表