



全国高技术重点图书·信息的获取与处理技术领域

国家自然科学基金资助项目
国家科委863高技术

机器人技术 及其应用

- 机器人的集成方法
- 自动机械设计
- 机器人应用

张福学 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
URL: <http://www.phei.com.cn>

TP24

449374

213

全国高技术重点图书·信息的获取与处理技术领域

国家自然科学基金
国家科委 863 高技术 资助项目

机器人技术及其应用

- 机器人的集成方法
- 自动机械设计
- 机器人应用

张福学 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

序

机器人技术从研究、开发到产业化的整个历史也只有半个世纪左右。50年代初在美国有了它的原型,60年代初即推出最初的商品,70年代以后,机器人和以机器人为核心的自动化设备在工业发达国家,尤其在日本,有了广泛的应用。特别是当机器人在汽车等制造业中得到广泛的推广应用之后,它的技术有了长足的进步。80年代,人们为了让机器人技术向各行各业扩展、应用,于是有了各式各样特种机器人的出现,比如,建筑、医用、水下以及军用机器人等等。与此同时,为了使机器人具有更强的功能,能做除简单和重复性以外的其他各类工作,以便能应用于更为广泛的领域,人们积极地开展了智能机器人以及其他高级机器人的研制工作,此项研究虽取得一定的进展,但至今大多仍处于探索阶段。这大体上是西方发达国家过去50年间机器人技术所走过的发展道路。我国机器人的研究与开发工作起步较早,曾经有过一些成果,但在产业化和应用上,一直步履维艰。就是说,对一个像我国这样的发展中国家,如何开展机器人技术的研究、开发和应用,以赶上世界先进水平,至今尚在探索之中,有待于进一步总结经验。改革开放以来,结合经济与工业发展的需要,我们在机器人的科学研究、技术开发、产业化和应用等各个层面上,都有了相应的国家计划,正全面地开展工作,并已取得不少成果和经验。这些实践,不管是成功的,还是不大成功的,都是宝贵的财富,都值得总结,以指导我国机器人技术今后的研究、开发与应用。

由于近年来机器人研究、开发和应用工程在我国的实施,我们有了自己的经验与体会,也增强了广大科技工作者对相关书籍和资料的关注与需求。因此,当前由我国科技人员自己动手来编写这类书籍很有必要,与国外同类书相比,它有可能更符合我国的国情,从而更容易满足我国读者的需要。

由于机器人种类多,涉及学科门类广,应用面宽,因此无论是关于机器人系统,还是机器人技术和应用等方面,要写好一部具有特色的书有较大的难度。困难在于选材,目前这方面的作法大体上有两类:一类属于全方位的介绍,这类书为了把有关的内容都写进去,每个部分都只好停留在一般性介绍上,其结果往往是缺少有深度和有特色的内容;另一类属专门性的,即根据机器人技术的门类、应用领域或者机器人种类的不同,选择其中的一个方面写出专著,如机器人控制、机器人传感器、军用机器人等等。这类书由于不得不花费精力去介绍相关领域的内容,往往难以突出机器人技术的特色。比如一部描述“机器人控制”的书,通常容易花费相当的篇幅去描述“自动控制”的一些内容,从而使它与一般“自动控制”的书雷同。因此如何克服上述的困难,是写好这一类书的关键。

张福学教授这部书的内容虽然涉及各个种类的机器人,但是以机械手为主,讨论的内容尽管面比较宽,但是以工程实践问题为主。其中包括机器人系统、以机器人为核心的自动机械和机器人应用3个部分,涉及机器人的工作原理、性能分析和设计方法,以及国内外实际机器人及其系统的介绍等。由于书中涉及机器人本体及其相关系统 and 应用等诸个方面,内容十分广泛。怎样在这样广泛的范围里写出深入的和有特色的内容?这是个关键。我以为作者注意到这个问题,并很好地体现在这本书中。比如,第6章“机器人系统的计算机设计”,作者不是花

许多篇幅去一般性地介绍计算机的硬件结构、操作系统和编程语言等,而是紧紧围绕机器人系统讲述它的相关问题。此外,对其中特有问题的重点加以讨论,如实时问题、机器人语言等。这些特点在其他章节中也都有所反映。另外,这本书资料比较充实,作者不仅收集了丰富的国外资料,对我国近年来在机器人研究、开发和应用上所取得的成果也有较充分的反映。以上这些都是本书的特点。它不仅对于从事机器人系统设计、开发和应用的学生和工程技术人员有很好的参考价值,而且对于那些希望了解机器人技术的其他领域的读者也有其参考意义。

张 钹
北京清华大学计算机系

前言

据联合国欧洲经济委员会(UN/ECE)与国际机器人联盟(IFR)共同编辑的世界工业机器人年鉴1997年版报道,自1996年以来世界工业用机器人每年增长13%,预计从1998年到2000年年平均增长超过15%。2000年,预计年上市131000台,累计运转台数接近100万台。由这些统计数字和预测可知,机器人市场潜力很大。

我国对机器人的研究与开发十分重视,在水下机器人等领域已达到国际先进水平。但和美、日等发达国家相比,在机器人产业化方面还有很大差距。作者结合多年从事机器人传感器研究与开发的体会,对收集到的国内外参考书和文献进行消化吸收,先后编著了《机器人学——智能机器人传感技术》(1996年电子工业出版社出版)及本书,目的在于促进我国机器人产业的发展。

在开展机器人传感器的研究与开发中,作者及其研究生先后获国家科委资助863高技术项目8项,国家自然科学基金委员会资助项目5项。在完成这些项目时,深感发展机器人的重要性,而机器人的智能化程度主要取决于传感器。《机器人学——智能机器人传感技术》和《机器人技术及其应用》融合了作者的科研成果和读书心得,希望这两本书对同行有借鉴之处。

中国科学院院士清华大学张钹教授为本书写了“序”,中国科学院自动化研究所原魁教授审校了全书。美国Temple大学电气工程系Richard D. Klafter教授,Drexel大学电气与计算机工程系Thomas A. Chmielewski和Mnemonics, Inc.的Michael Negin,同意无偿地在本书第一编中引用他们的专著—Robotic Engineering: An Integrated Approach。以色列Negev的BEN - GURION大学工程系教授Ben - Zion Sandler同意无偿地在本书第二编中引用其专著—Robotics: Designing the Mechanisms for Automated Machinery。另外,本书中还引用了许多国内外发表的反映作者在机器人领域所取得的成就的论文和专著。对以上国内外著名的机器人专家和从事机器人工作的同行所给予的真诚帮助和高尚学风,作者在此表示由衷的感谢!

航天工业总公司李耀宗教授和电子部26所刘一声高级工程师提供了部分译文。作者的多名博士和硕士研究生参与了本书的审校工作,其中缪旻认真地审校了全书。参与本书审校的还有田运志、范茂彦、宋宁、郝全景、张玉娥、李冠华、孙瑜、邱大坤、江浪、张榆、朱家兴、王金柱、王庆磊、王文钦、董帮华、王国强、徐倩、罗丁芳、叶宏、陈霞、常丽莉、乔建秀、张磊、张庆伟、王秀奎、欧国银、王海东、田秋玲、陈忠芬、邓鹏鹏、柳振良、徐丹、刘栋、胡志龙、吴浩、耿晓芳、刘悦、李志雄、许晓飞、刘影影等同志。对以上各位付出的辛勤劳动,作者在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中必有不少谬误,欢迎批评指正。

北京信息工程学院 张福学

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主 任：朱丽兰

副主任：刘杲 卢鸣谷

总干事：罗见龙 梁祥丰

委 员：(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	牛田佳	王守武	刘 仁	刘 杲
卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅	师昌绪	任新民
杨牧之	杨嘉墀	陈芳允	陈能宽	罗见龙	周炳琨
欧阳莲	张兆祺	张钰珍	张效祥	赵忠贤	顾孝诚
徐修存	谈德颜	龚 刚	梁祥丰		

《全国高技术重点图书·信息的获取与处理技术领域》

编审委员会

主任委员：陈芳允

委 员：汪成为 杨晨明 袁宝宗 邓又强

目 录

第一篇 机器人的集成方法 (1)

第一章 绪论 (1)

- 1.1 机器人的定义 (1)
- 1.2 机器人的发展史 (1)
- 1.3 机器人的分类 (6)
- 1.4 机器人的主要部件 (18)
- 1.5 固定式与柔性自动化 (19)
- 1.6 经济学问题 (21)
- 1.7 社会问题 (23)
- 1.8 技术发展水平的调查 (27)
- 1.9 机器人应用的现状与未来 (28)

第二章 机器人系统概述 (37)

- 2.1 机器人系统的基本部件 (37)
- 2.2 应用中的机器人系统 (40)
- 2.3 机器人系统的功能 (43)
- 2.4 机器人系统的规格 (45)

第三章 机械系统(构件、动力学和建模) (48)

- 3.1 基本概念 (48)
- 3.2 运动变换 (57)
- 3.3 实际机械构件的一些问题 (72)
- 3.4 机械系统的模拟试验 (80)
- 3.5 运动学链条(操纵装置) (87)
- 3.6 末端执行器 (91)
- 3.7 机械手的分辨率、重复性和精度 (96)
- 3.8 运动坐标系中遇到的作用力 (101)
- 3.9 机械手的拉格朗日分析法 (102)

第四章 机器人机构中执行器的控制 (105)

- 4.1 前言 (105)
- 4.2 位置伺服机构的闭环控制 (106)
- 4.3 摩擦力和重力的影响 (108)
- 4.4 频域特性研究 (115)
- 4.5 机器人关节的控制 (122)
- 4.6 步进电机 (129)
- 4.7 无刷直流电机 (144)
- 4.8 直接驱动式执行器 (147)
- 4.9 液压执行器 (149)
- 4.10 气动系统 (153)
- 4.11 伺服放大器 (154)

第五章 变换和运动学 (165)

- 5.1 概述 (165)
- 5.2 齐次坐标 (167)
- 5.3 参考坐标系 (177)
- 5.4 变换矩阵的一些特性 (183)
- 5.5 齐次变换和机械手 (185)
- 5.6 正向求解 (195)
- 5.7 逆向求解 (203)
- 5.8 运动的产生 (213)
- 5.9 雅可比矩阵 (219)
- 5.10 控制器结构 (225)

第六章 机器人系统的计算机设计 (228)

- 6.1 前言 (228)
- 6.2 结构 (228)
- 6.3 硬件设计 (231)
- 6.4 机器人应用中的计算元件 (232)
- 6.5 实时问题 (238)
- 6.6 机器人编程 (241)
- 6.7 路径设计 (253)
- 6.8 机器人计算机系统 (254)

第七章 设计实例 (258)

- 7.1 概述 (258)
- 7.2 机器人设计过程的详细说明 (259)
- 7.3 选择编码器 (269)
- 7.4 计算机结构和控制系统结构 (270)
- 7.5 蛋类包装的视觉系统 (270)

第二篇 机器人的自动机械设计

..... (274)

第八章 自动机械设计基础 (274)

- 8.1 自动制造系统的结构 (274)
- 8.2 机器人的智能水平和产品之间的关系 (278)
- 8.3 工艺过程设计 (280)
- 8.4 自动加工工艺 (284)
- 8.5 制造工艺的效率 (287)
- 8.6 运动学的设计 (290)

第九章 驱动的动力学分析 (295)

- 9.1 机械驱动 (295)
- 9.2 电磁驱动 (299)

9.3 电气驱动	(301)	15.3 步行式机器人	(464)
9.4 液压驱动	(308)	15.4 移动和步行机器人	(466)
9.5 气动驱动	(310)		
9.6 制动器	(315)	第三篇 机器人的应用	(475)
9.7 转动惯量可变系统的驱动	(317)	第十六章 核能领域中的机器人技术	(475)
第十章 自动机械的运动学和控制	(322)	16.1 适合机器人用的设施	(475)
10.1 位置函数	(322)	16.2 远距离操作的控制技术	(478)
10.2 凸轮轴	(326)	16.3 核能发电站机器人	(489)
10.3 主控器和放大器	(334)	第十七章 点焊和弧焊机器人	(494)
10.4 动态准确度	(343)	17.1 点焊机器人	(494)
10.5 有害振动的阻尼	(349)	17.2 弧焊机器人	(498)
10.6 自动振动的阻尼	(352)	17.3 瑞士和德国的焊接机器人	(502)
第十一章 传送装置	(357)	第十八章 喷漆机器人	(504)
11.1 一般原理	(357)	18.1 喷漆机器人的特点	(504)
11.2 直线结构的传送装置	(357)	18.2 喷漆机器人的软件	(505)
11.3 圆形结构的传送装置	(365)	18.3 喷漆机器人的硬件	(506)
11.4 振动传送装置	(369)	18.4 喷漆机器人举例	(506)
第十二章 进给和定向装置	(371)	第十九章 机械加工机器人	(509)
12.1 概述	(371)	19.1 引入机器人的目标	(509)
12.2 液体和粒状材料的进给	(371)	19.2 生产线引入机器人的基本设想	(509)
12.3 条、棒、线、带等材料的进给装置	(373)	19.3 引入机器人的注意事项	(510)
12.4 从料斗中进给排列有序的部件	(377)	19.4 机器人生产线的实际情况	(511)
12.5 从仓室进给部件	(381)	19.5 使生产线适应生产量剧增	(511)
12.6 部件定向排列的一般问题	(387)	第二十章 柔性制造系统和工业机器人	(514)
12.7 被动式定向排列	(391)	20.1 对象模型的选择及现状分析	(514)
12.8 主动式定向排列	(396)	20.2 系统基本组成	(515)
12.9 逻辑式定向排列	(400)	20.3 系统软件	(517)
12.10 非机械方法的定向排列	(401)	第二十一章 水下机器人	(518)
第十三章 功能系统和机构	(406)	21.1 深水机器人的研究进展	(518)
13.1 概述	(406)	21.2 德国 1100m 水下机器人	(521)
13.2 自动装配	(406)	21.3 英国水下机器人	(522)
13.3 特殊装配方法	(414)	21.4 日本万米水下机器人	(524)
13.4 检验系统	(417)	21.5 中国无缆水下机器人	(525)
13.5 其他机构	(422)	21.6 中国 6000m 水下机器人	(529)
第十四章 机械手	(426)	第二十二章 航天机器人	(530)
14.1 概述	(426)	22.1 空间机器人重力补偿系统	(530)
14.2 机械手的动力学	(430)	22.2 机器人空间运动的顺惯性轨迹	(535)
14.3 机械手的运动学	(438)	22.3 机器人大型空间装置(LSS)建造中的运动学设计	(540)
14.4 手爪	(448)	22.4 空间机械手用机器人模块的最佳选择	(544)
14.5 导向装置	(454)	第二十三章 军用机器人	(553)
第十五章 非工业机器人	(463)	23.1 美国地面军用机器人计划	(553)
15.1 移动式机器人	(463)		
15.2 外部骨架机器人	(464)		

23.2 美国地面军用遥控机器人研制状况	(555)	27.2 计算机辅助外科(CAS)	(611)
23.3 各国地面军用机器人研制状况	(558)	27.3 外科手术、诊断和治疗中的全机动机器人	(612)
23.4 战场机器人	(561)	27.4 安全问题	(613)
23.5 扫雷清障机器人	(566)	27.5 国际医疗外科机器人概况	(614)
23.6 处理爆炸物机器人	(569)	第二十八章 服务机器人	(619)
23.7 机器人卫兵 MDARS	(575)	28.1 概述	(619)
23.8 昆虫机器人	(577)	28.2 服务机器人的市场前景	(621)
23.9 消防机器人	(581)	28.3 汽车智能化自主系统	(622)
23.10 美军无人侦察机计划	(582)	28.4 清洗机器人	(628)
第二十四章 农业机器人	(584)	28.5 清扫机器人	(631)
24.1 发展农业机器人的必要性	(584)	28.6 割草机器人	(632)
24.2 农业机器人的种类	(585)	28.7 涂胶机器人单元	(633)
24.3 农业机器人的研究现状	(585)	28.8 水下疏浚机器人	(633)
24.4 挤奶机器人	(586)	28.9 搬运易损产品的气动手	(636)
第二十五章 食品加工机器人	(590)	28.10 汽车加油机器人	(636)
25.1 前言	(590)	28.11 日本机器人玩具	(637)
25.2 食品加工机器人的现状	(591)	28.12 导游机器人	(639)
25.3 初步切割自动化	(592)	28.13 快餐厅机器人	(640)
25.4 鱼类加工机器人	(593)	28.14 机器人木偶戏表演系统	(641)
25.5 家禽加工机器人	(594)	28.15 远程机器人联机服务	(644)
25.6 机器人系统的集成	(596)	28.16 机器人手	(644)
第二十六章 援助人类用的机器人技术	(597)	第二十九章 其他机器人	(646)
26.1 运动机能的代行系统	(597)	29.1 6腿步行机器人	(646)
26.2 感觉机能代行系统	(602)	29.2 建筑机器人	(653)
26.3 医疗福利机器人	(605)	29.3 爬壁机器人	(654)
26.4 极限作业机器人	(608)	29.4 类人机器人	(657)
第二十七章 医疗外科机器人	(611)	参考书和参考文献	(660)
27.1 前言	(611)		

第一篇 机器人的集成方法

第一章 绪 论

研究机器人学需要融会贯通许多门类的专业知识^[1]。例如,必须掌握几门工程技术及与其相关的物理学、经济学,乃至社会学的知识,才能对该领域真正深入了解。本章将概括地介绍机器人学,以非技术的描述方式提供有关的基本知识和素材。

1.1 机器人的定义

当人们首次听说“机器人”一词时,心头涌现出来的形象可能是一台可移动的双足装置,它类似人的模样,并能独立行动(即能思考)。乔治·卢卡斯(George Lucas)创造的电影《星球大战》中的 C3 - PO 就是这样一种机器人^[1],但是,它属于科学幻想小说和动画片。实际上,我们还不知道怎样研制出智慧和活动能力与其相当的机器人。其实,除非人工智能、计算机以及能量储存等领域取得突破性进展,我们很可能看不到近似于 C3 - PO 的机器人。本书仅论述工业机器人。

国际学术界至今没有对机器人作出统一的定义,专家们关于什么是机器人的说法往往各有侧重。我国学者对机器人的定义大同小异^[2,3],综合诸家的解释,概括各种机器人的性能,可认为机器人是具有如下功能的机器^[2]:

- (1) 动作机构具有类似于人或生物体某些器官(肢体、感官等)的功能;
- (2) 有通用性,工作种类多样,动作程序灵活易变;
- (3) 有一定程度的智能,如记忆、感知、推测、决策和学习等;
- (4) 有独立性,完整的机器人系统(机器)在工作中可以不依赖人的操纵。

1.2 机器人的发展史

Robot 一词在 1921 年首先由捷克剧作家、小说家和小品文作家卡列尔·卡佩克(Karel Capek)在其讽刺剧《R. U. R》(Rossums Universal Robots)中使用^[4]。这个词是捷克语词汇 Robot 的衍生,它的字面含义是“被奴役的劳动者”或“奴隶劳动者”。在他的剧中,卡佩克把 Robot 描绘成类似人类的机器,其工作特别努力。这种机器有手臂和大腿,在许多方面,与 1977 年的电影《星球大战》中的 C3 - PO 类似。现在的工业机器人外观极不像人,而与卡佩克的机器人共同点也极少。

虽然卡佩克把 Robot 一词推荐给全世界,但“机器人学”(Robotics)一词是伊塞克·亚西莫夫(Isaac Asimov)在他 1942 年首次出版的短篇小说《借口》(Runaround)一书中提出的。该著作由于首次提出所谓的“机器人学三原则”(三定律)而著称于世。该三原则是:

- (1) 机器人不得伤害人或由于故障而使人遭受不幸;
- (2) 机器人应执行人们所下达的指令,除非这些指令与第一定律相矛盾;
- (3) 机器人应能保护自己的生存,只要这种防护行为不与第一或第二定律相矛盾^[5]。

亚西莫夫还指出,人工智能领域的工作人员向他说明,在该领域技术发展中这三条定律应奉为指导原则。令人惊异的是可编程机器的概念的出现时间竟然可以上溯到 18 世纪的法国,如下一些发明家:布雄(Bouchon)、伐孔森(Vacaunson)、巴西勒(Basile)和法尔孔(Falcon)均发明过这样的机器。最为著名的是约塞夫·捷卡德(Joseph Jacquard)所开发的用穿孔卡片控制的织布机,该织布机在 1801 年前后大批投产。在 19 世纪 30 年代有一个美国人克利斯多弗·斯宾色(Christopher Spencer)制造了一种可编程车床,称为“automat”,能车削螺杆、螺母和齿轮。其所编程序及其要切削的外形是利用一组互换的凸轮导引器调整,而该导引器安装在旋转鼓轮的端部。

西瓦德·巴比特(Seward Babbitt)于 1892 年解决了从加热炉中取出热金属锭的问题。他开发了一种附有机动夹钳的转动式吊车,并取得专利权。1938~1939 年威拉德·波拉德(Willard Pollard)发明了一种带关节的机械臂,首次用于喷漆作业。德菲比斯公司(DeVilbiss Co.)的雇员哈罗德·罗斯仑德(Harold Roselund)也开发了一种类似的装置。

在第二次世界大战中开发出一种机器人式的机械手(遥控手或遥控系统),操作人员可以在安全距离搬运、处理放射性物质。二次大战结束时,称为“机器人之父”的乔治·德渥(George Devol)开发出一种磁性过程控制器,可用作控制设备的通用重放装置(playback device)。1946 年爱可特(Eckert)和毛启里(Mauchly)在麻省理工学院(MIT)制造了 ENIAC 电子数字积分计算机,这是第一台大型电子计算机。在麻省理工学院一台通用数字计算机(旋风型)解出了第一道题。一年后(1947 年)雷蒙德·格茨(Roymond Goetz)引进了一种伺服电动遥控操作装置,它使伺服随动装置按主导装置(即操作人员)的位置指令行动。可是,直到第二年,设计中都没有包括力的控制。力的控制指的是负载通过机械界面(接口)装置反向作用于主控装置,因而操作人员能感受到一定的触觉信号。1952 年麻省理工学院的伺服机械实验室研制出第一台数控机床。

人们公认“机器人时代”开始于 1954 年,那一年德渥取得附有重放记忆装置的第一台机械手专利权。该设备能执行从一点到另一点的受控运动(即点对点运动)。此外,德渥创造了“通用自动化”(Universal Automation,后来缩写为 Unimation)一词。五年后,普兰耐特公司(Planet Corp.)出售第一台工业用机器人。但是 1960 年德渥经过选择,将其最初的专利(总共将近 40 件)卖给康苏里德特柴油机公司(Condec),该公司实际上在新组建的子公司,即通用自动化股份有限公司(Unimation Inc.)开发出由尼马特型(Unimate)机器人。Unimate 机器人的设计将数控机床的重放特性与格茨研制的遥控机械手的伺服控制能力结合起来。两年后(1962 年),通用汽车公司(General Motors)在压铸件的一条装配线上,安装了第一台 Unimate 机器人。

60 年代中期,随着机器人学这一新领域的发展,在麻省理工学院、斯坦福大学、斯坦福研究所(SRI),以及苏格兰爱丁堡大学这样的理工学院中,出现了好几个研究中心,并出现了涉及人工智能的研究课题。1967 年通用电气公司生产出一种四腿搬运装置(根据国防部合同研制),该装置尚需一个操作人员同时控制附属部分。经验证,该方案因极难实现而废止。一年后,斯坦福研究所又演示一种“智能型”可移动机器人,它有某些视觉能力(使用电视摄像机),有一台光学测距仪和一些触觉传感器,如图 1.1 所示。该装置还有理解英语口语指令并迅速

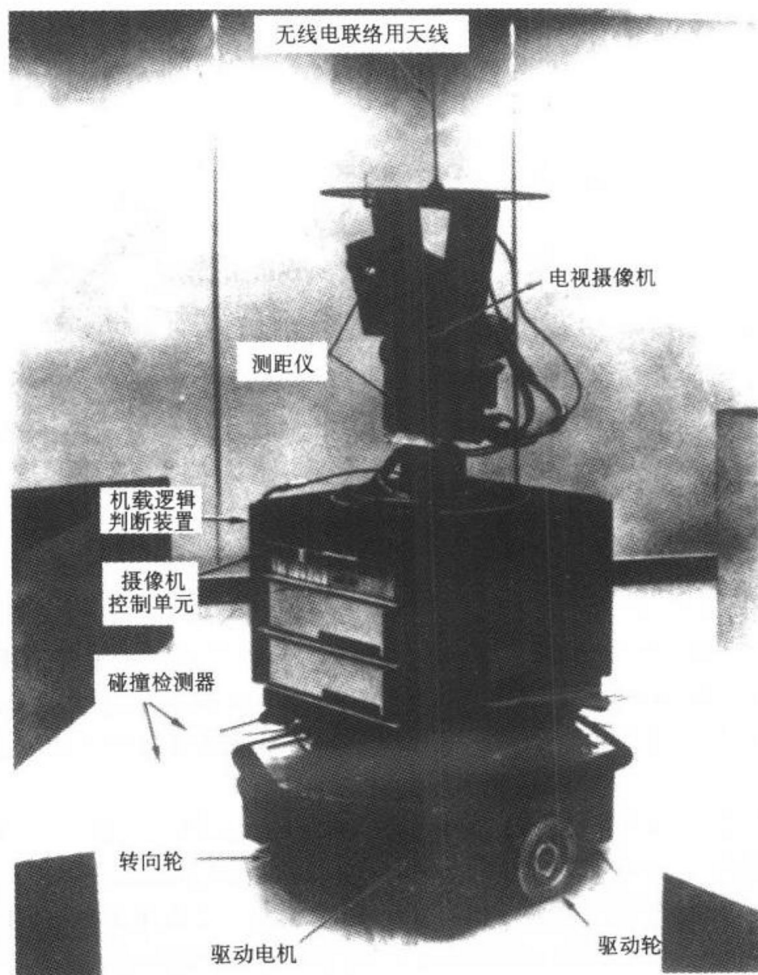


图 1.1 “跛子”机器人

作出反应的能力。由于它移动很不平稳,被人称为“跛子”。

机器人学界早期的改革家之一,维克多·申因曼(Victor Scheinman)1970年在斯坦福大学工作时,演示了一种计算机控制的机械手,该装置不用液压系统而用伺服电机操纵。这个六轴装置如图 1.2 所示,称之为申因曼或斯坦福手。它非常先进,技术很复杂,迄今还被许多研究中心使用。

1973年,辛辛纳提·米拉克隆公司(Cincinnati Milacron Corp.)的理查德·豪恩(Richard Hohn)制造了第一台小型计算机控制的工业机器人 T^[3],它是液压驱动的,能提升的有效负载达 100 磅(45.36kg)。申因曼认识到工业机器人需求的增长潜力,建立了自己的公司(Vicarm Inc),并在 1974 年推出第一台液压驱动和小型计算机控制的机械手。1976 年宇航局维金(Viking) I 和 II 着陆舱使用该公司的机械手来采集火星表面的样本。Vicarm Inc. 按海军的合同研制出第一台微处理器控制的机器人。这一年麻省理工学院的德拉泊实验室(MIT Draper Lab.)在机器人的工业应用上又有重大进展,发明了柔性机器人腕关节。这种设备可以用一刚性的机械手进行某些组装工作,即使机器人的工具与加工的部位间的定位关系严重不准,也可完成组装。

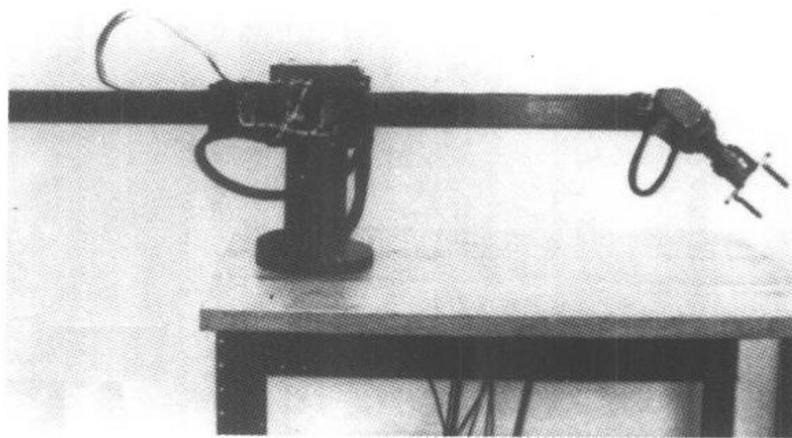


图 1.2 斯坦福手臂

1977 年斯坦福研究所研制出一种有效的机器人视觉系统,并在机床智能公司发展成商品。1978 年通用自动化公司按通用汽车公司的技术要求,发展了可编程通用装配机器(Programmable Universal Machine for Assembly, PUMA)。这种 5 轴(或 6 轴)机器人用伺服电机驱动,由许多微处理器控制。通用机械手的原型机采用申因曼在麻省理工学院研制出来的一种机械臂。

在 70 年代中期,机器人对于美国工业前途的重要性为人们所认识,这时美国标准局得到指示,要在 80 年代后期以前发展自动化制造研究机构(Automated Manufacturing Research Facility, AMRF)。该项工作进展顺利,标准局内的一个研究小组在詹姆斯·阿尔伯斯(James Albus)领导下,在机器人视觉和控制领域作出了巨大的有实用价值的贡献。80 年代在卡内基-梅隆大学(Carnegie - Mellon Uni.)建立了最大的机器人实验室,西屋公司(Westinghouse corp.)提供的启动资金大大帮助了该实验室的创建。这一年罗德岛大学(Univ. of Rhode)展示了机器人视觉系统的样机,该机能处理“料斗选择”的问题。利用罗德岛大学的技术,机器人就能拣拾杂乱堆放的棒料。目标识别系统公司(Object Recognition Systems, Inc.)经营销售该系统的改进型设备,并在 1982 年进行了展示。

1983 年奥德特克斯(Odetics)公司推出一台独特的六腿装置,这是移动式机器人领域又一重大发展。该装置是研究了人类和某些昆虫的步法而设计的,原来称之为类功能物(functionoid)。它有能力越过障碍物,并能提升重物,在静止状态下提升重物的重量为本身重量的 5.6 倍,而移动状态下则为本身重量的 2.3 倍。虽然实验用机是远距离操纵,但该公司目前正下功夫制造的是可用于核能工厂设施中的全自律单元机。这种设备的第二代产品称为奥德克斯(Odex) II,装有一个工业型机械手和手爪装置。早在 1984 年,法国北部和地中海香梯尔造船公司(Shipbuilding Co. of Chantiers du Nord et de la Mediterranee)成功地进行了船舶用移动式机器人的试验。它原用于清理大型船舶的侧面和底部,后被雷诺公司用于大型煤气储罐罐壁的涂漆作业。

1968 年日本川崎重工通用自动化公司获得机器人的生产许可权,此后机器人工业发展异常迅速,在 1971 年就建立了日本工业机器人协会(JIRA)。尽管美国在机器人方面有许多研究

活动,但美国机器人研究会(RIA,现称为机器人工业协会)1975 年才开始活动。约塞夫·F·恩格尔伯格(Joseph F. Engelberger)所编著的名为《机器人实务》(Robots In Practice)一书中披露的统计数字更为惊人^[6],在该书出版时(1980 年 9 月),作者统计出机器人制造厂的状况是:日本 9 家,欧洲 9 家,而美国只 4 家。美国从那时起也呈现出强劲的发展势头,根据美国机器人研究会粗略统计,美国有 28 家公司专门制造机器人。该书还指出,日本和欧洲的厂商也都有所增加,达 16 家之多。这表明,日本在较长的一段时间,机器人的工业应用已非常活跃。

据《晋书·舆服志》记载,1800 年前我国东汉时期的张衡就发明了“记里鼓车”。它每行一里,车上木人击鼓一下,十里击钟一次。记里鼓车将人工测距改为机械齿轮测距,从现代机械学的角度看,它是我国古代的测距机器人。记里鼓车的工作原理如图 1.3 所示。车中内部水平齿轮系 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 互相啮合,同时又和车轮中心齿轮 Z_0 垂直啮合,构成水平轮系和垂直轮系互相啮合的齿轮系。当车轮行程一里时,齿轮 Z_3 转一周,这时 Z_3 轮中心轴上的拨叉 1 拨动木偶击鼓一次,车轮前进 10 里时, Z_5 轮转一周,其中心轴上的拨叉 2 又拨动另一木偶击钟。若车轮直径为 5 尺,设圆周率为整数 3,则车轮转一周,行程为 πD ,即 $3 \times 5 = 15$ 尺。若转动 100 周,则前进 1500 尺,等于 1 华里。为了使车上两个木偶在一华里及十华里完成击打动作,齿轮 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 的齿数比应为 18:54:3:100:10:100。

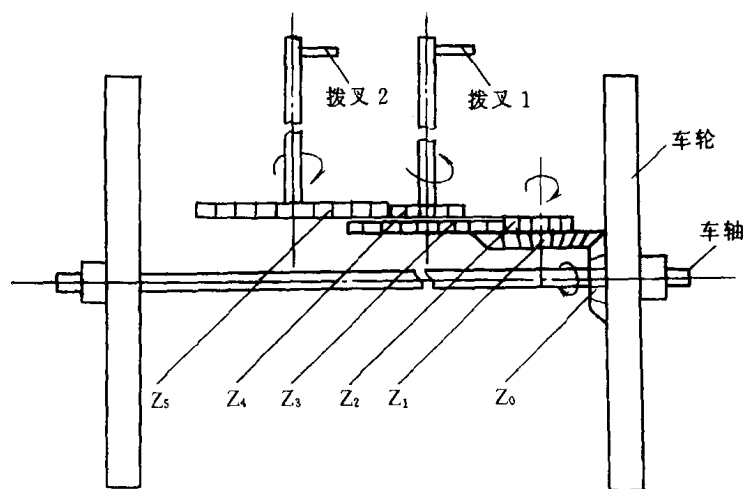


图 1.3 记里鼓车(我国古代的测距机器人)原理

当今在机器人高科技领域,我国跨入世界先进行列的是 6000m 水下机器人。中国科学院沈阳自动化研究所研制的这种机器人于 1995 年 9 月成功地完成了 6000m 深海试验,它由载体系统、控制系统、水声系统和收发系统构成。

它是一套能按预定航线航行,并能自动回避障碍,可进行 6000m 水下摄像、海底地热与剖面测量、水文物理测量和海底多金属结核丰度测定,能自动记录各种数据及其相应位置坐标的无人无缆水下机器人系统。

1.3 机器人的分类

机器人不是前述 C3 - PO 之类的模拟人体的装置,它有几个附件,能根据其外部传感器获取的信息作出判断并采取行动。威伯斯特(Webster)认为^[7]:“机器人是一台自动装置,它执行属于人类的功能,或者说,运用智慧进行工作,看起来几乎像真的人一样”。

这一定义并未道出机器人与一台工业设备有关的全部内容。美国机器人研究会进一步给出了更为完整的定义:“机器人是一种可重复编程且有多种功能的机械手。它通过可变化的运动程序来执行一系列任务,可用于搬材料、零部件、工具或特殊装置”。

显然,机器人应能自动运行,并有可编程存储器。

我们遵循恩格尔伯格的思路将工业机器人机械手加以分类,有两种分类方法:一是按设备的机械结构,二是按控制部件(即关节或轴)。我们先考虑一些并不是真正的机器人装置,虽然它们在各种宣传媒介中常被称为机器人。

1.3.1 类似机器人的装置

许多装置利用了机器人某些方面的技术,因而常被误称为机器人。实际上,恩格尔伯格把这些装置看作机器人的“近亲”。

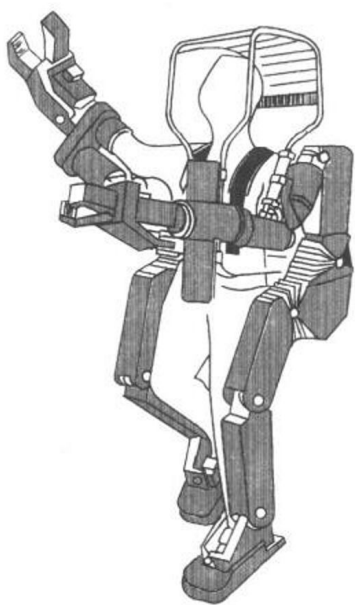


图 1.4 画家关于通用电气公司哈迪曼装置
(70 年代研制成功的外骨架机构)的构思

(1) 假肢 假肢常常被当作“机器人的臂”或“机器人的腿”。虽然它可采用液压或伺服电机传动机构,采取伺服控制器,并有机联杆机构,但它却没有自己的头脑,也不是可编程序的。在这一设备中产生行动的激励(称为“指令信号”)是来自人的头脑,随后通过许多神经传输到适当的附件,附件的电极感受到神经的激励信号(impulse)。这些激励信号靠专用计算机(装在假肢上)处理,然后控制假脚(或手)的运动。虽然为生产这种附件已进行了许多踏踏实实的研究工作,然而距离实现美国 70 年代受欢迎的电视系列片中所描述的概念,大概还有好多年。遗留下来尚待解决的许多难题中有这样一个问题,即如何可靠地提取来自附近的肌肉所产生的全部电流变化情况和加工用于控制失去的手足的低电平的神经激励信号。

(2) 外骨架机械(Exoskeletons) 如图 1.4 所示,围绕着人的四肢或人的整个外骨架有大量机械连动装置,它们使人的能力大为增加,但是,它仍不能独立行动,故不是机器人。事实上使用

一台外骨架机械时,由于所增加的力量和速度,操作者应极其小心。70 年代开发成功的通用电气(G.E.)公司的哈迪曼(Hardiman)装置便是一个实例。它利用液压驱动伺服装置,配备这台设备的工人能运送的负载可高达 1500 磅(680.40kg)。

(3) 遥控装置 这种装置可转动或移动离操作人员很远处的材料或工具。虽然它采用液压或伺服电机驱动器,一般也做到了闭环控制,但它仍不是机器人,因为它还要靠人来使整个控制回路闭合,由人来确定合适的位置和速度。在处理危及安全的物质(如放射性废弃物)时,这套设备特别有用,有人建议将其用于海底考察。现存的遥控机构装置的一个实例是宇宙飞船上安装的吊装机械臂(它被报纸误认为是机器人臂)。另一个实例是通用电气公司用的曼美特(Manmate,人之友)装置,如图 1.5 所示,它是 1967 年研制出来的。

图 1.5 示出通用电气公司曼美特(Manmate,人之友)型工业机械手,它用于器材搬运作业。它使用伺服装置来控制液压驱动器,并将力反馈到操作者的控制器。

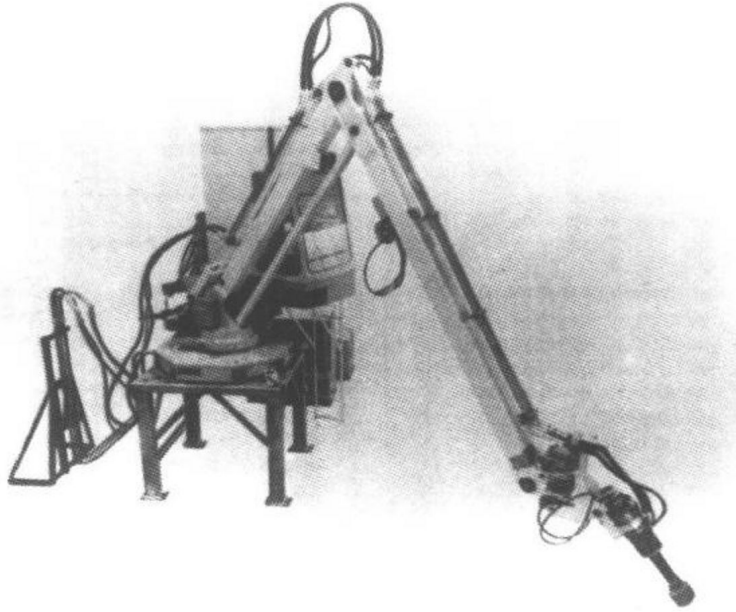


图 1.5 工业机械手

(4) 行走机构 它是模仿人类或动物,靠两条腿或四条腿行走的设备。虽然它的许多附属装置都可以是由极其复杂而精巧的连动装置集合而成,而且这些连动装置在闭环控制下以液压或电气方式驱动,但仍需一名操作人员执行操作任务(也就是说,决定所想去的方向,并使肢体协调动作以达到目的)。图 1.6 是通用电气公司的四腿运载工具的示意图,由于存在着严重的稳定性问题,该研制计划未能完成。

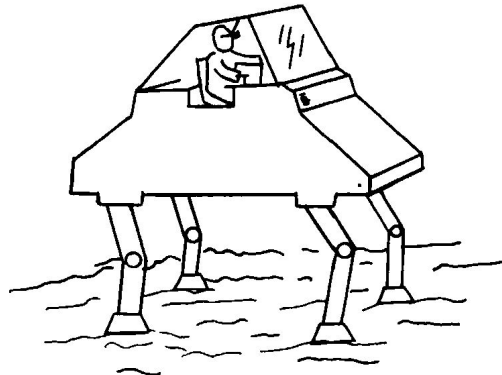


图 1.6 四腿行走机器

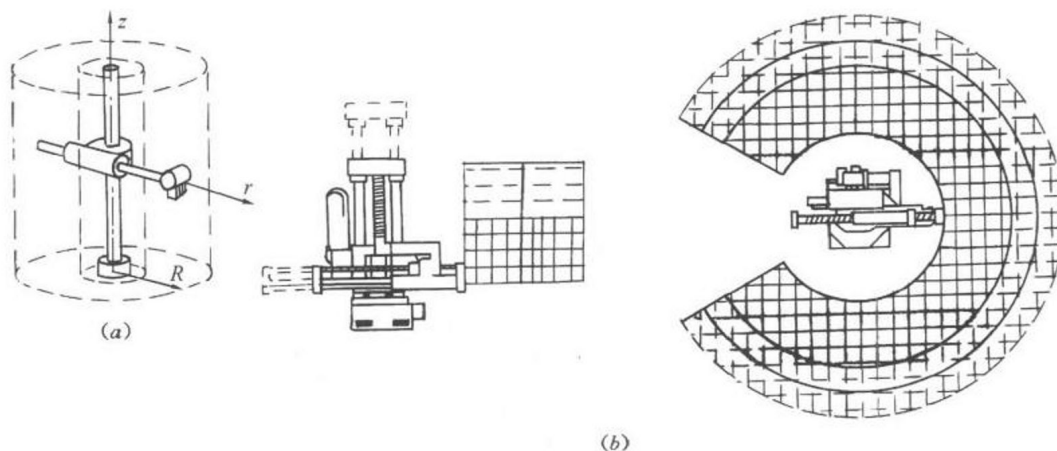
1.3.2 根据坐标系分类

虽然机器人机械手的结构差异很大,但所有机器人均能将一个部件移动到空间的某个点。装置的主要运动轴向一般有两三个自由度,由结实耐用的

关节(多半紧靠基座部位)构成。因而,大部分机器人按这些关节所用的坐标系又可分为四类,即柱坐标、球坐标、笛卡尔坐标和垂直多关节机器人。现简要论述每一类机器人。

一、柱坐标系机器人

当水平臂或杆架安装在一垂直柱上,而该柱又安装在一个旋转基座上,这种结构可称为柱坐标机器人,如图 1.7 所示。由图可见,手臂可伸出缩回(沿 r 方向),滑动架(拖板)可沿柱上下移动(沿 z 方向),水平臂和滑动架组合件可作为基座上的一个整件而旋转(绕 z 轴),一般不允许旋转 360° ,因为有液压、电气或气动联接机构或连线造成的各种约束。同样,根据机械上的要求,其伸出长度有一最小值和一最大值(即 R)。所以,总的体积或工作包络范围是圆柱体的一个部分。美国辛辛纳提·米拉克隆公司生产的这种机器人如图 1.8 所示。该机器人有 3 或 4 轴,电气伺服控制,可搬运的重量达 50kg。



(a) 机器人主要运动轴向的几何结构;(b) 机器人工作空间的垂直和顶面视图

图 1.7 柱坐标机器人

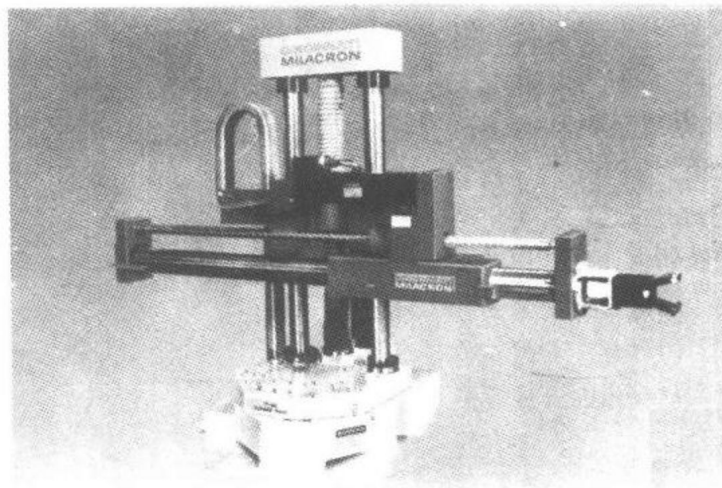


图 1.8 T3300 型柱坐标机器人

二、球坐标系机器人

若机器人机械手的形状类似于坦克炮塔,则可归属于球坐标机器人,如图 1.9 所示。其臂