

Mc
Graw
Hill
Education

“十二五”国家重点图书出版规划项目
机器人先进技术与研究应用系列

翻译版

机器人学导论

Introduction to Robotics



◎ Subir Kumar Saha 著
◎ 付宜利 张松源 译

Mc
Graw
Hill
Education



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

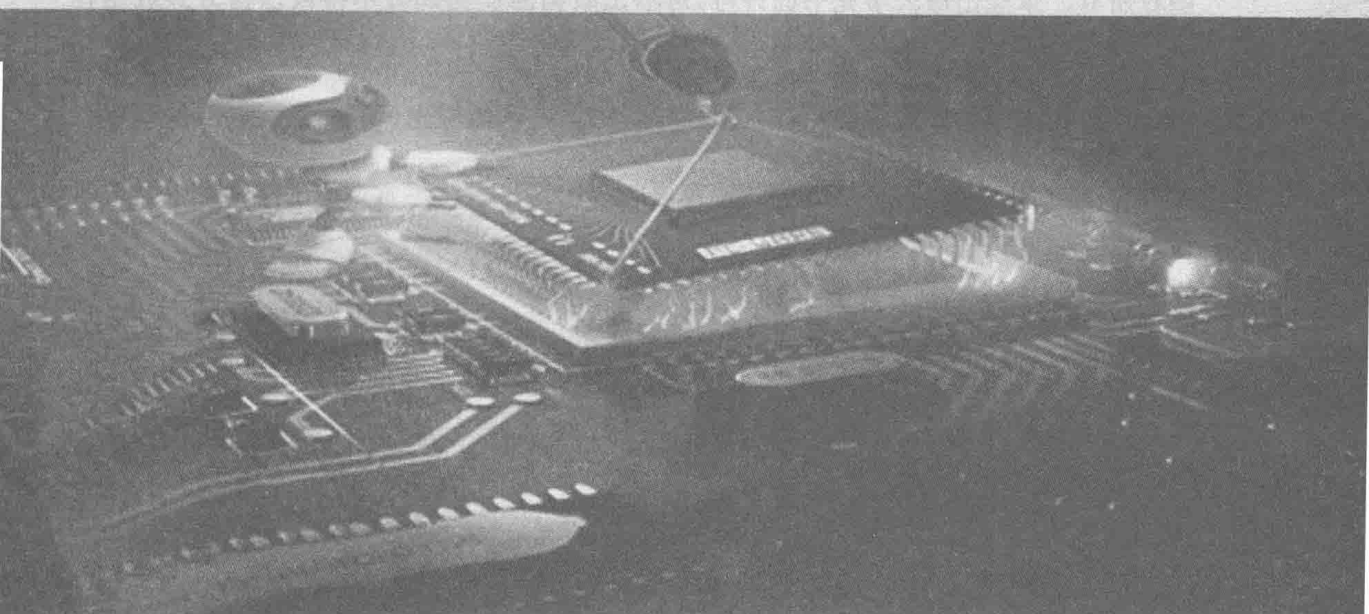
Mc
Graw
Hill
Education

“十二五”国家重点图书出版规划项目
机器人先进技术与研究应用系列

翻译版

机器人学导论

Introduction to Robotics



© Subir Kumar Saha 著
© 付宜利 张松源 译



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

黑版贸审字 08 - 2017 - 049 号

Subir Kumar Saha

Introduction to Robotics

978 - 0 - 07 - 066900 - 0

Copyright © 2008 by McGraw - Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Harbin Institute of Technology Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2017 by McGraw - Hill Education and Harbin Institute of Technology Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和哈尔滨工业大学出版社有限公司合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区)销售。

版权© 2017 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与哈尔滨工业大学出版社有限公司所有。

本书封面贴有 McGraw - Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

机器人学导论/(印)苏比尔·库马·萨哈(Subir Kumar Saha)著;
付宜利,张松源译. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.4

书名原文:Introduction to Robotics

ISBN 978 - 7 - 5603 - 6395 - 0

I. ①机… II. ①尚… ②付… ③张… III. ①机器人学—
高等学校—教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 001586 号

策划编辑 王桂芝 张 荣

责任编辑 刘 瑶

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 390 千字

版 次 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 6395 - 0

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

机器人先进技术与研究应用系列

编 审 委 员 会

名誉主任 蔡鹤皋

主 任 邓宗全

副 主 任 刘 宏 赵 杰 孙立宁

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 亮	王乐锋	王立可	王 扬	付宜利	朴松昊
朱延河	纪军红	刘云辉	刘伊威	刘 宇	刘延杰
刘英想	刘荣强	刘彦武	杜志江	李立毅	李满天
李瑞峰	杨大鹏	杨立军	杨利芳	吴伟国	陈维山
张立宪	张永安	邹继斌	尚 静	岳洪浩	金弘哲
金明河	郑 萍	孟庆虎	赵立军	赵京东	荣伟彬
胡平安	段广仁	姜 力	徐文福	高会军	高海波
郭 伟	陶建国	韩俊伟	董 为	谢宗武	谢 晖
樊绍巍					

序

机器人技术是涉及机械电子、驱动、传感、控制、通信和计算机等学科的综合性高新技术,是光、机、电、软一体化研发制造的典型代表。随着科学技术的发展,机器人的智能水平越来越高,由此推动了机器人产业的快速发展。目前,机器人已经广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、医疗卫生行业、橡胶及塑料行业、食品行业、物流和制造业等诸多领域,同时也越来越多地应用于航天、军事、公共服务、极端及特种环境下。机器人的研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志,是推进传统产业改造升级和结构调整的重要支撑。

习近平总书记在2014年6月9日两院院士大会上,对机器人发展前景进行了预测和肯定,他指出:我国将成为全球最大的机器人市场,我们不仅要把我国机器人水平提高上去,而且要尽可能多地占领市场。习总书记的讲话极大地激励了广大工程技术人员研发机器人的热情,预示着我国将掀起机器人技术创新发展的新一轮浪潮。

随着中国人口红利的消失,以及用工成本的提高,企业对自动化升级的需求越来越迫切,“机器换人”的计划正在大面积推广,2014年中国已经成为世界年采购机器人数量最多的国家,更是成为全球最大的机器人市场。为了反映和总结我国机器人研究的成果,满足机器人技术开发科研人员的需求,我们撰写了《机器人先进技术与研究应用系列》著作。

本系列图书总结、分析了国内外机器人技术的最新研究成果和发展趋势,主要基于哈尔滨工业大学在机器人技术领域的研究成果撰写而成。系列图书的许多作者为国内机器人研究领域的知名专家和学者,本着“立足基础,注重实践应用;科学统筹,突出创新特色”的原则,不仅注重机器人相关基础理论的系统阐述,而且更加突出机器人前沿技术的研究和总结。本系列图书重点涉及空间机器人技术、工业机器人技术、智能服务机器人技术、医疗机器人技术、特种机器人技术、机器人自动化装备、智能机器人人机交互技术、微纳机器人技术等方向,既可作为机器人技术研发人员的技术参考书,也可作为机器人相关专业学生的教材和教学参考书。

相信本系列图书的出版,必将对我国机器人技术领域研发人才的培养和机器人技术的快速提高起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2016年5月

译者序

随着机器人技术的普及,机器人在工业、农业、医疗、教育、生活、交通、物流、海洋、航天、救灾、军事等方面都获得了大量应用。目前,中国机器人产业还处于孕育期,而美国、日本等发达国家的机器人产业已处于智能化时期。因此,为我国培养更多机器人方面的人才至关重要。由工信部、国家发改委和财政部联合发布的《机器人产业发展规划(2016~2020年)》中强调:机器人既是先进制造业的关键支撑装备,也是改善人类生活方式的重要切入点。无论是在制造环境下应用的工业机器人,还是在非制造环境下应用的服务机器人,其研发及产业化应用是衡量一个国家科技创新、高端制造发展水平的重要标志。

国内外已有多所高校开设了机器人方面的课程。机器人学是一门高度学科交叉的前沿学科,它包含控制论、机械电子、计算机、材料和仿生等。编写本书的目的就是为从事机器人学习的学生及工程技术人员提供一本有价值的学习和参考用书。

本书最初由印度的 Subir Kumar Saha 教授编写,由麦格劳-希尔出版社出版,在国外是一本畅销书。本书内容丰富,安排巧妙,以读者易于接受的方式解释繁杂的概念和理论,特别是通过案例和习题,理论联系实际地讨论机器人系统,激发读者的学习兴趣,有助于读者由浅入深地掌握相关知识。

《机器人学导论》共 11 章:第 1、2 章介绍机器人的用途和分类;第 3、4 章介绍机器人驱动器与传感器;第 5~8 章分别介绍机器人的空间变换、运动学、静力学等内容;第 9 章介绍机器人的控制原理;第 10 章介绍机器人的运动规划;第 11 章介绍驱动机器人的硬件和软件。全书由哈尔滨工业大学付宜利教授和张松源博士翻译校稿。

由于译校者水平有限,本书难免有疏漏及不妥之处,恳请广大读者批评指正。

译者

2017 年 4 月

前 言

在科幻电影和小说中对机器人进行的详尽描述,引起了很多年轻人对机器人学的兴趣。从20世纪60年代开始,机器人主要用于工业领域,特别是在焊接车体的汽车领域。直至今日机器人的主要使用者仍然是汽车巨头。同时,机器人在医疗手术、采矿和空间探索甚至在家中照顾老人方面也得到越来越多的应用。

《机器人学导论》旨在掌握如何设计、搭建和使机器人工作的潜在概念。市场上已有很多相关书籍,其中有专门针对机器人分析的(如运动学、动力学、控制等)著作,也有针对机器人特定应用下可行性研究的著作,如机器人的采购、经济效益等。在本科教学中,学生同时接触机器人的分析和应用是很有必要的,因此需要一本能同时将这两方面都讲清楚的书。

本书主要用于机械电气工程和计算机科学专业的本科学生学习机器人学,同时也适用于硕士和博士学习机器人运动学、动力学和控制的高级课程。本书提供的材料还适用于没有接触过机器人学的实践工程师来使用、维护,甚至是设计机器人。事实上,本书中的众多例子和习题很适合学生准备机器人学的考试。

本书与其他同期的机器人学书相比具有以下特点:

(1)内容连贯。内容的安排是为了让学生能够有逻辑地抓住要点,例如当我们接触新事物的时候,会很好奇它的外形和功能,因此在第1、2章中介绍了不同机器人的用途及分类。

(2)符合人们对机器人的认知过程。在了解了机器人的用途后,人们会对机器人的组成感兴趣。因此在第3、4章中介绍了驱动器和传感器。在学习了机器人结构和组成之后,人们会很自然地想知道机器人是如何移动的,是什么力导致它运动,因此需要了解机器人的位置变换,运动学、静力学和动力学,这些内容分别在5~8章中阐述。第9章阐述了机器人的控制原理。当机器人准备实际运用时,用户需要决定如何针对一个特定的任务来控制机器人的动作,因此,机器人的运动规划在第10章中得到阐述。最后在第11章中讲述了驱动机器人的硬件和软件。

(3)每章后附有基于网络/MATLAB的习题和课后习题。这些习题会帮助学生与国际上机器人学发生的事件保持同步,同时也从实践上熟悉如何使用数学概念来解决实际问题。

整本书的组织结构如下:

第1章:绪论 本章依据机器人的应用领域和规模等分种类介绍。

第2章:串联机器人 本章阐述了串联机器人分类的方法。

第3章:驱动器 本章介绍了不同的驱动器,例如气动、液压和电气驱动器及其如何选择。

第4章:传感器 传感器作为机器人系统的重要部件在本章讲述。

第 5 章：空间变换 本章定义了机器人的结构，介绍了机器人姿态的数学描述以及末端执行器的位置、姿态与 DH 参数。

第 6 章：运动学 本章是机器人设计和控制的基础。和笛卡尔坐标有关的末端执行器关节坐标方程在本章中推导。

第 7 章：静力学 当机器人移动得足够慢时，只需考虑施加在机器人上的力而无须考虑力所产生的运动，这就是静力学。

第 8 章：动力学 动力学有助于机器人系统的控制和虚拟实现。本章对欧拉—拉格朗日方程以及牛顿—欧拉方程等方法进行了推导。

第 9 章：控制 线性控制，P、PD、PID 控制规则，稳定性分析等在本章中阐述。

第 10 章：运动规划 运动规划的几个方面在本章中提及。关节和基于笛卡尔空间的路径规划方程在本章节中进行推导。

第 11 章：机器人用计算机 一旦算法被开发，将这些算法在电子硬件中实现是很重要的。因此不同的机器人程序例如 ACL 等在本章进行了介绍。

附录 A：数学基础 介绍了很多关于线性代数、控制理论和其他一些知识，以便使读者理解第 5~9 章的表达式。

附录 B：MATLAB 的使用 介绍了 MATLAB 软件的使用方法。

参考文献 包括本书中用到的各种书籍、论文和其他一些资源。

Subir Kumar Saha

2008 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 机器人的概念	3
1.3 机器人的用途	6
本章小结	9
课后习题	9
基于网络的习题	9
第 2 章 串联机器人	10
2.1 机器人子系统	11
2.2 按应用场合划分机器人	17
2.3 按坐标划分机器人	17
2.4 按驱动系统划分机器人	21
2.5 按控制方法划分机器人	21
2.6 按编程方法划分机器人	22
本章小结	22
课后习题	22
基于网络的习题	22
第 3 章 驱动器	23
3.1 气动驱动器	24
3.2 液压驱动器	26
3.3 电动驱动器	28
3.4 发电机的选型	36
本章小结	37
课后习题	37
基于网络的习题	38
第 4 章 传感器	39
4.1 传感器的分类	39
4.2 内置传感器	39
4.3 外置传感器	46
4.4 视觉系统	49
4.5 传感器的选型	53
本章小结	55
课后习题	55
基于网络的习题	56

第 5 章 空间变换	57
5.1 机器人体系结构	57
5.2 刚体的姿态	62
5.3 坐标变换	70
5.4 DH 参数	75
本章小结	82
课后习题	82
基于网络的习题	84
第 6 章 运动学	85
6.1 位置正解分析	85
6.2 位置反解分析	92
6.3 速度分析:雅可比矩阵	98
6.4 连杆速度	100
6.5 雅可比矩阵的计算	101
6.6 利用解耦的自然正交补(DeNOC)的雅可比矩阵*	105
6.7 奇异性	107
6.8 加速度分析	108
本章小结	109
课后习题	109
基于网络的习题	109
第 7 章 静力学	110
7.1 力和力矩平衡	110
7.2 递归计算	112
7.3 等价关节扭矩	114
7.4 静力学中的雅可比矩阵	118
7.5 力椭圆	121
本章小结	121
课后习题	122
基于网络的习题	122
第 8 章 动力学	123
8.1 惯性特性	123
8.2 欧拉-拉格朗日运动方程	129
8.3 牛顿-欧拉方程	136
8.4 递归式牛顿-欧拉算法	139
8.5 动力学算法	147
本章小结	153
课后习题	153
基于网络的习题	154
基于 MATLAB 的习题	154

第 9 章 控制	155
9.1 控制技术	156
9.2 二阶线性系统	156
9.3 反馈控制	160
9.4 反馈控制系统的性能	164
9.5 机器人关节	166
9.6 关节控制器	170
9.7 非线性轨迹控制	174
9.8 状态空间及控制	177
9.9 稳定性	181
9.10 笛卡尔和力控制	183
本章小结	185
课后习题	185
基于 MATLAB 的习题	186
第 10 章 运动规划	187
10.1 关节空间轨迹规划	187
10.2 笛卡尔空间轨迹规划	192
10.3 位置和方向轨迹	195
10.4 点到点的轨迹规划	199
10.5 连续路径生成	203
本章小结	209
课后习题	209
基于 MATLAB 的习题	209
第 11 章 机器人用计算机	211
11.1 运算速度	211
11.2 硬件要求	213
11.3 控制要求	215
11.4 机器人编程	217
11.5 硬件体系结构	224
本章小结	226
课后习题	226
基于网络的习题	226
附录 A 数学基础	227
附录 B MATLAB 的使用	233
参考文献	237

第 1 章 绪 论

机器人在高强度、高危险性的工作中具有突出的能力,使得“机器人学”与当今工程类学科紧密相连。机器人只有致力于将人类劳动力从令人厌烦的、不快的、危险的和精密的工作中解放出来,才具有实际意义。通常,设计机器人的初衷是为了协助人类劳动力。实际上,机器人在大多数场合下的反应不如人类敏捷,但它能长时间工作而不知疲倦。所以,在大规模生产中,使用机器人可提高生产力。另外,即使当今最先进的机器人的智能性与人类的智能性相比仍相距甚远。因此,对机器人意义的真正理解是学习机器人课程的前提,否则是错误的、不明智的。

1.1 引 言

机器人的原型最早可溯源至 3 000 年前远古时代的印度机械象传说(Fuller, 1999),但“ROBOT”一词的首次使用则是在 1921 年,出现在捷克作家 Karel Capek 创作的戏剧《罗素姆万能机器人》中。在该剧中,一家虚构的机械生物厂商设计了机器人代替工人,一开始机器人被认为是人类的进化产物,因为它们的工作效率高,而且没有情感,只会埋头苦干,不会惹麻烦。最终它们背叛了主人,灭绝了人类,只留下一个人用于生产更多的机器人(Dorf, 1988)。“机器人准则”在机器人的复仇行动中不幸丢失。

对机器人的敌意现在仍然存在,机器人将使大量工人失业已经成为该领域发展的阻力。然而在 20 世纪 40 年代,艾萨克·阿西莫夫在其科幻小说中把机器人想象成人类的帮手,并为机器人制订了 3 条基本准则,这些准则通常被称为“机器人准则”。

机器人准则如下:

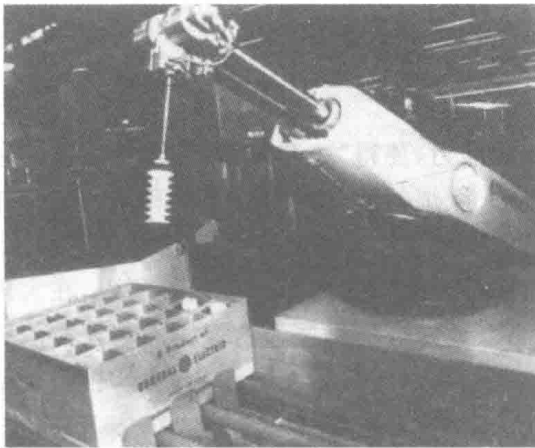
- (1)第一条准则,机器人不得伤害人类,或坐视人类受到伤害。
- (2)第二条准则,除非违背第一条准则,否则机器人必须服从人类的命令。
- (3)第三条准则,在不违背第一条及第二条准则的条件下,机器人必须保护自己。

第四条准则后来由 Fuller(1999)添加如下:

- (4)第四条准则,机器人可从事人类的工作,前提是不会因此使工人失业。

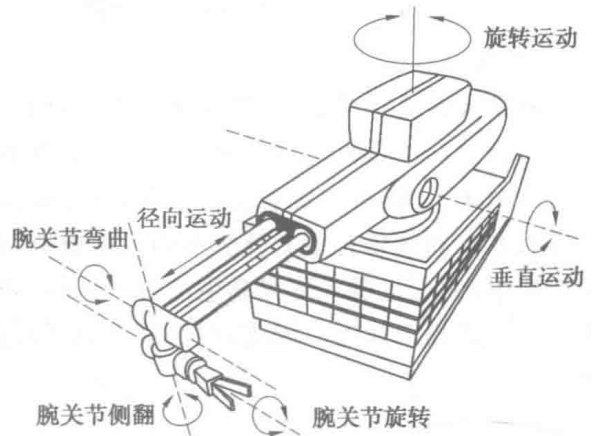
为使这些准则约束机器人,人们做了不懈的努力,但并没有规范方法可实施。例如军事机器人,其功能性质决定了它的设计企图打破这些准则约束。现今的大多数工业机器人工作在那些对人类而言相当危险、难以忍受的工作环境中。例如,特殊的机器人手爪可以夹持温度很高或者很低的物体,而人类的手则做不到。20 世纪 50 年代,Joseph F. Engelberger 受 Asimov 的有关机器人著作的启发,试图设计一款工业机器人。他与 George C. Devol 于 1958 年在美国创办了 Unimation 机器人公司。然而直至 1961 年,美国新泽西的通用汽车自动化工厂才首次安装了该公司的尤尼梅特(Unimate)机器人。该机器人是一个压铸件自动码垛机,将通红的车把手等类似汽车零件扔进冷却液,并由输送带送至工人进行修边、抛

光。它的独特功能在于它利用钢制电枢做夹持器，避免了工人接触刚刚由钢水成型的汽车零件。它拥有 5 个自由度(Degree of Freedom, DOF)，但在一些应用场合中需要 6 个自由度。图 1.1 所示是一台具有 6 个自由度的尤尼梅特机器人原形及其结构简图。



(a) 尤尼梅特机器人原形

(<http://www.robothalloffame.org/unimate.html>)

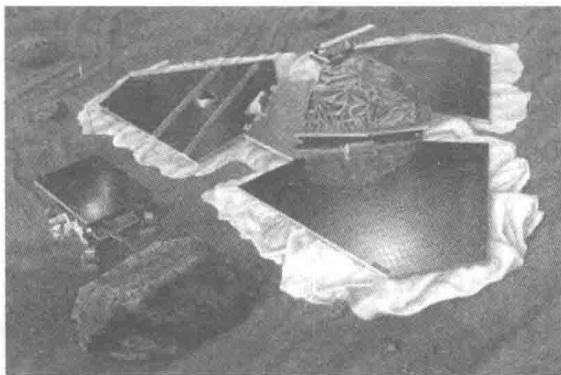


(b) 尤尼梅特机器人结构简图(Critchlow, 1985)

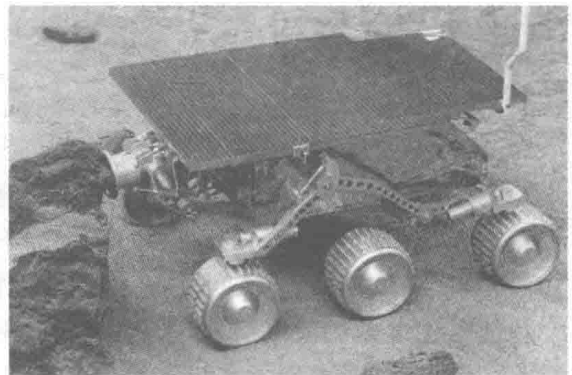
图 1.1 尤尼梅特机器人的原型及其结构简图

在通用电气公司的工厂里，尤尼梅特机器人可以说只是一个机械臂，主要负责拾起并放下零件。

从此，机器人向众多方向发展进化，其使用领域从焊接、喷漆、装配、夹具加载与卸载、监测、农业、护理、医学手术、军事、安全、机床等发展到深海与太空探测。但机器人的主要应用场所仍然是焊接领域(约 25%)和装配领域(约 33%)。最新的机器人系列是 1997 年 7 月 4 日在火星登陆的探索者号着陆器(图 1.2(a))和旅行者号微型探测车(图 1.2(b))。它们由美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开发。



(a) 探索者号着陆器



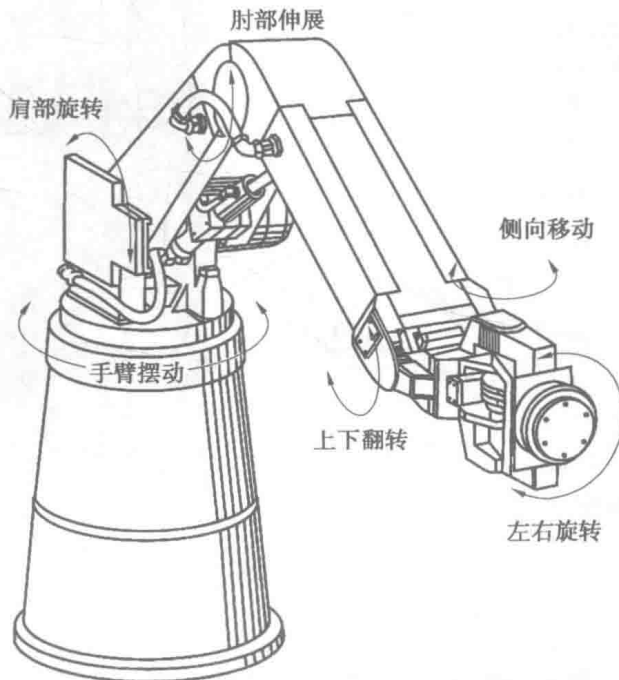
(b) 旅行者号微型探测车

图 1.2 探索者号着陆器和旅行者号微型探测车

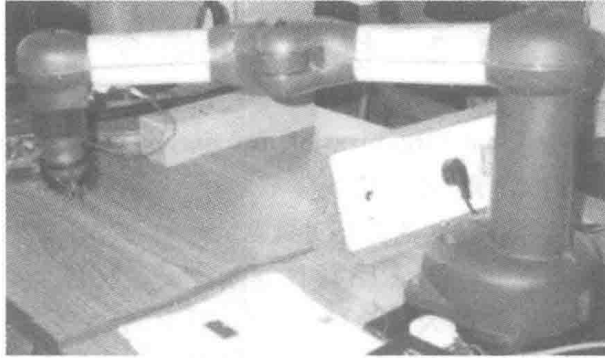
1.2 机器人的概念

国际标准组织(International Organization for Standardization, ISO)对机器人的定义是:一个可编程、多功能的操作臂,可以给要完成的不同任务编制各种动作,还可以移动材料、零件、工具及特殊装置。同时,其他协会对机器人也有许多不同的定义。例如,美国机器人所(Robotic Industries Association, RIA)、日本工业机器人协会(Japan Industrial Robot Association, JIRA)、英国工业机器人协会(Britain Robot Association, BRA)等都对机器人有自己的定义。总体来说,机器人的各种定义有两个共同点,即可编程性和功能多样性。

机器人可分为工业机器人和非工业机器人(或称为特殊用途机器人)。图 1.3(a)是由美国辛辛那提·米拉克龙(Milacron)公司制造的一台典型的工业机器人,图 1.3(b)是来自印度的一台用于轻工业领域的拾取机器人。严格来讲,只有当操作臂受计算机控制时,它才称为机器人。在学习“机器人学”的过程中,类似图 1.3 所示的操作臂都认为受计算机控制,所以可以认为它也是机器人。工业机器人通常适用于那些无技术含量或者技术含量低的工种,如焊接、喷漆及机械加工等。与此相反,特殊用途机器人在非传统工业环境下使用。例如,航天器上附带的串联机器人用于对故障卫星的回收或维修后重新发射,它们就可以认为是特殊用途机器人。图 1.2(b)所示的旅行者号微型探测器也可认为是特殊用途机器人。其余的特殊用途机器人可分为自动导引车、步行机器人和并联机器人等。



(a) 辛辛那提·米拉克龙公司制造的典型工业机器人(T3) (Koivo, 1989)

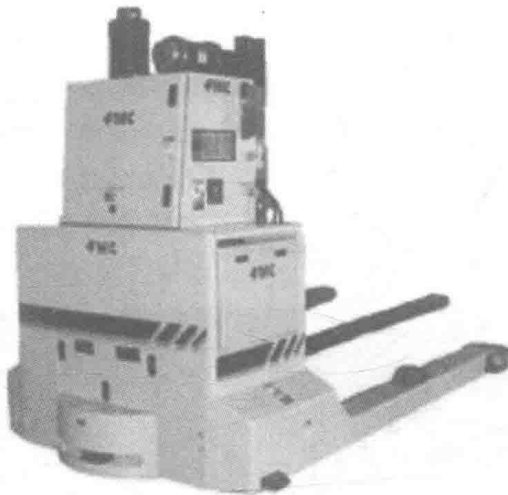


(b) 来自印度的拾取机器人

图 1.3 工业机器人

1. 自动导引车 (AGVs)

车间内经常采用自动导引车移动机器人搬运物料。图 1.4 为自动导引车的应用实例。这类机器人通常沿着地上的导引线行驶,有的甚至不需要导引线。图 1.5 所示的麦卡姆轮式自动导引车还具有全方位行驶等其他特征。图中,自动导引车采用具有 3 个自由度的麦卡姆轮(万向轮),与汽车和无人搬运车上使用的传统的带有 2 个自由度的轮子不同,该车可实现侧向行驶。自动导引车也在医院护理、安全等领域使用。



(a) 车体



(b) 组装车门悬架

图 1.4 自动导引车的应用实例

2. 步行机器人

俄亥俄州立大学 6 足步行机器人(图 1.6)可以像人类一样行走。步行机器人通常应用于军事、海洋探索和崎岖地形等。

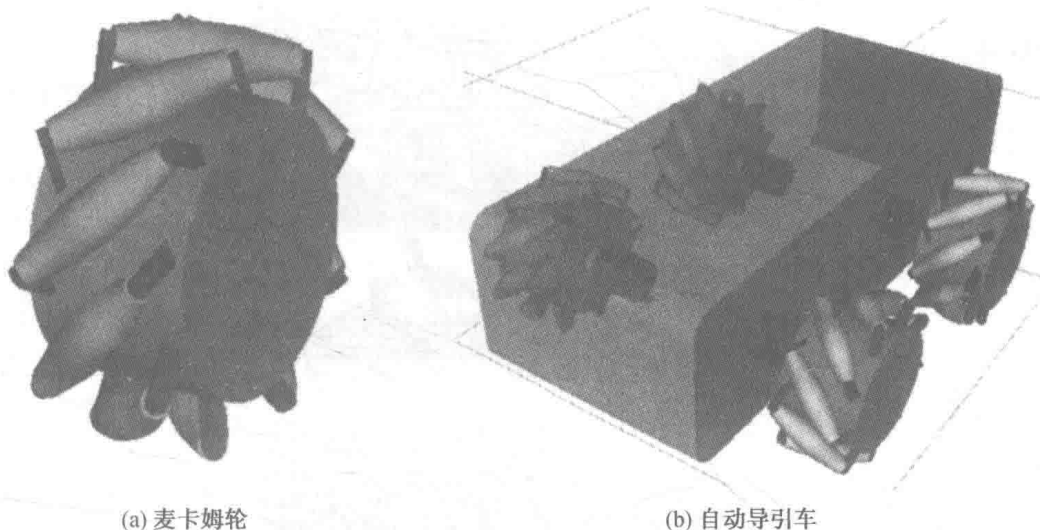


图 1.5 麦卡姆轮式自动导引车(Angeles,2003)

3. 并联机器人

并联机器人与图 1.1 或图 1.3 所示的串联结构的工业机器人不同,其机构是并联的。从这个意义上讲,步行机器人也是并联机器人。如图 1.7 所示,使用 6 组杆件控制其上平台的飞行模拟器是一个用于训练飞行员的并联机器人。这类机器人也用于机床加工,或作为医疗机器人用来减少医生手在外科手术中的抖动。图 1.8 所示是一台并联铣床机器人。

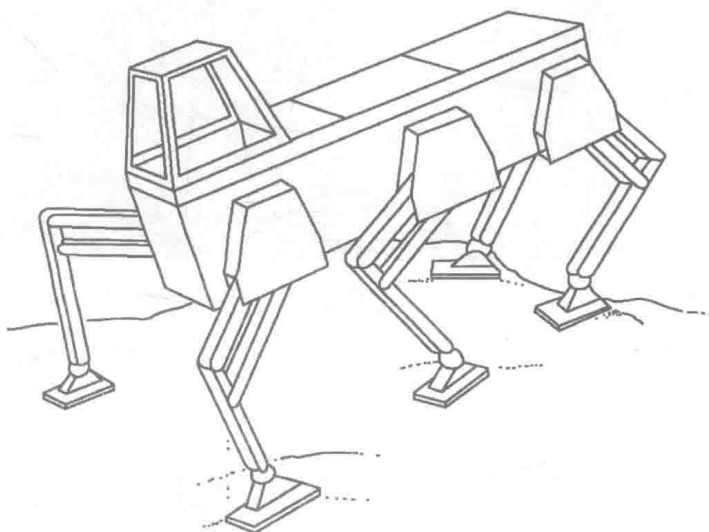


图 1.6 俄亥俄州立大学 6 足步行机器人(Todd,1985)

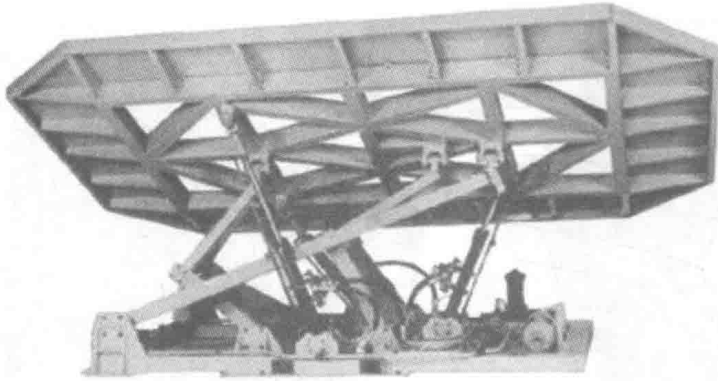


图 1.7 用于飞行训练的并联机器人(<http://biostavart.tripod.com>)

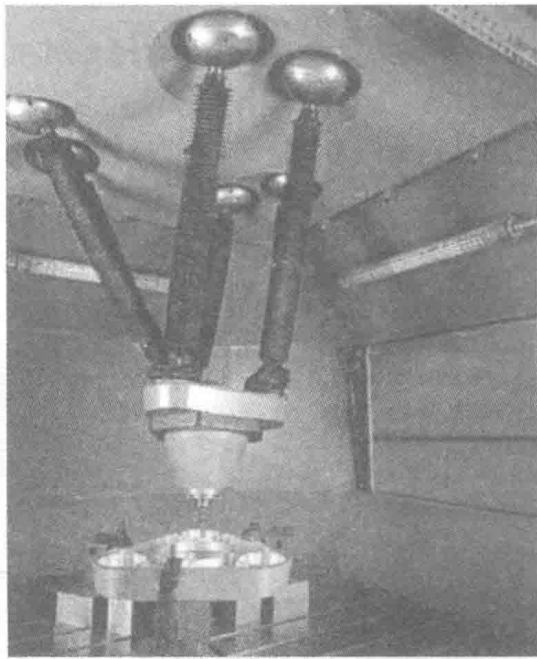


图 1.8 并联铣床机器人(<http://biosavart.tripod.com/hexapod.htm#HISTORY>)

本书仅对图 1.1 和图 1.3 中所示的典型工业机器人进行分析。通过学习,读者可自行对自动导引车、并联机器人等其余机器人进行分析。

1.3 机器人的用途

无论是工业机器人还是非工业机器人,运转速度和效率都不如专用自动化机器高。然而,通过重新示教或编程,它们能执行许多不同类型的任务。而专用自动化机器,包括数控加工系统,只能执行十分有限的任务类型。可编程程度的高低正是机器人与数控加工系统等专用机器的差别。然而,二者之间并没有国际认可的可辨识界限。这就带来一个问题:在执行某一具体任务时,应该选择工人、机器人还是专用机器呢?这个问题并没有一个简单明了的答案。一般来讲,可从几个主要方面考虑机器人的选用场合。

选用机器人的经验准则如下: