

熊有伦 等 编著

机器人学

机械工业出版社

机 器 人 学

熊有伦 丁汉 刘恩沧 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书系统地介绍了机器人的基础理论和关键技术。主要内容包括：机器人的机构、位姿的描述和齐次变换、运动学、动力学、轨迹生成、线性与非线性控制、力的控制和混合控制、冗余度机器人、协调控制、自适应控制、编程语言和离线编程等。本书反映了机器人学在规划、控制和编程方面近期取得的成果。此外，还附有习题和编程练习，指出了进一步研究的问题。本书可供自动化技术、机械、计算机应用等学科的大学生、研究生及从事机器人研究工作的科技人员使用。

机 器 人 学

熊有伦 丁汉 刘恩沧 编著

责任编辑：林 松 版式设计：霍永明

封面设计：姚 毅 责任校对：逢 琴

责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张22¹/₂·字数549千字

1993年10月北京第1版·1993年10月北京第1次印刷

印数 0 001—1 200·定价：30.00元

ISBN 7-111-03558-5/TP·175

前 言

机器人学是一门迅速发展的综合性的前沿学科。其特点之一是综合、交叉，涉及的领域广泛；另一特点是发展迅速、日新月异，尚待研究的问题层出不穷。因此一个人要想精通机器人学所包含的全部内容是不可能的。本书的目的在于尽量系统地阐明机器人学的技术要点，同时反映机器人学在规划、控制和编程方面近期取得的部分成果。

本书共分十五章。第一章：绪论介绍机器人的发展，机器人学的研究范围和进展，有待解决的若干问题；第二章至第七章较系统地介绍刚体的空间描述、齐次变换、操作臂、手腕和手爪机构、运动学、动力学、静力和变形。还突出了这方面近期的研究进展，如机器人操作臂的奇异性、各向同性、运动灵巧性指标、衡量机器人动力学性能的各项指标和动力学优化。第八章：轨迹规划主要讨论在关节空间和操作空间的规划方法、利用驱动函数和四元数的插补方法，并介绍有关无碰撞路径规划的若干进展，如C——空间方法，势函数方法，也阐明了我们利用J——函数方法进行碰撞探测和路径规划方面的一些结果。第九章：位置控制着重介绍控制规律分解和系统综合方法，操作臂的PID调节器的设计和计算机控制结构，指出操作臂动力学方程的非线性、多变量、强耦合和位置时变所引起的控制方面的困难。说明计算力矩控制、运动速度分解、运动加速度分解、运动力分解控制的效果。第十章：力和顺应控制介绍了约束空间和任务空间，位置—力混合控制和阻抗控制，主动顺应和被动顺应。第十一章：冗余度机器人反映我们在这方面研究的若干结果，包括冗余度机器人的规划、灵巧性控制、避免碰撞、奇异性的避免和动力学最优控制。第十二章：协调控制研究双臂协调和多指协调、运动学约束、主—从协调控制、多关节多手指抓取的关节空间、接触空间和形位空间的映射关系、抓取的封闭性和可操作性、度量指标等。第十三章：自适应控制详细评述了机器人自适应控制的研究进展，介绍模型参考自适应，自校正、自适应扰动控制，变结构滑动控制等。第十四章：机器人语言介绍机器人语言总体结构和主要组成部分，VAL语言和AL语言，并给出编程实例。第十五章：离线编程是近年来机器人应用工程的关键技术，可以看成是语言编程与图形仿真的结合产物。本章介绍离线编程系统的总体结构，九个模块和我们开发的基于微机的机器人离线编程系统HOLPS及其应用。

本书得到中国科学院机器人学开放研究实验室的赞助，在此表示感谢。在完成本书有关的课题研究中还得到国家自然科学基金和国家教委博士点基金的赞助，在此也表示感谢。

我们根据多年来的科研与教学实践，编写过程中力求使本书既成为教学用书，又成为作为研究的引导。本书各章之后列出有关的参考文献，在前十章还附有习题，便于读者深入研究有关问题。本书第一章、第三章至第九章、第十二章和第十三章由熊有伦执笔，第十一章、第十四章和第十五章由丁汉执笔，第二章和第十章由刘恩沧执笔，最后由熊有伦修改定稿。杨文玉、秦志强、赵东波和熊蔡华同志校对了初稿，杨文玉同志还对第十四章作了补充，在此深表感谢。本书的完成和本科研组的其他同志的支持和帮助是分不开的，因此本书的出版包含了许多人的劳动和智慧。限于作者的经验与水平，书中存在的缺点和错误一定不少，希望读者批评指正。

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
§1-1 机器人与自动化	1
§1-2 机器人的应用范围	3
§1-3 机器人学的研究方向	5
§1-4 工业机器人的设计、控制和编程	9
参考文献	12
第二章 机器人的机构	13
§2-1 操作臂的坐标形式与外形结构	13
§2-2 手腕的传动与结构	15
§2-3 手爪的型式和机构	17
§2-4 机器人结构的基本要求	20
参考文献	22
习题	23
第三章 位姿描述和齐次变换	24
§3-1 概述	24
§3-2 刚体位姿的描述	24
§3-3 点的映射	26
§3-4 齐次坐标和齐次变换	28
§3-5 运动算子	30
§3-6 变换矩阵的运算	32
§3-7 变换方程	35
§3-8 欧拉角与RPY角	36
§3-9 旋转变换通式	40
§3-10 位姿的综合	45
§3-11 计算的复杂性	46
§3-12 自由矢量的变换	47
参考文献	48
习题	48
第四章 操作臂运动学	54
§4-1 绪言	54
§4-2 连杆参数和关节变量	54
§4-3 连杆坐标系	58
§4-4 连杆变换和运动学方程	59
§4-5 XHK5140换刀机械手的 运动学方程	60
§4-6 PUMA560机器人的运动学方程	65

§4-7 运动学反解	70
§4-8 PUMA560机器人的运动学反解	70
§4-9 三轴相交时的封闭解	74
§4-10 反解的存在性和唯一性	76
§4-11 驱动空间、关节空间和 操作空间	79
§4-12 坐标系的规定	81
参考文献	82
习题	83
第五章 微分运动与雅可比	87
§5-1 引例	87
§5-2 微分转动与角速度	88
§5-3 微分运动矢量与广义速度	91
§5-4 微分运动的等价坐标变换	93
§5-5 雅可比矩阵	97
§5-6 XHK5140换刀机械手的 雅可比矩阵	104
§5-7 PUMA560机器人的雅可比矩阵	103
§5-8 逆雅可比矩阵和奇异性	106
§5-9 操作臂的灵巧度	113
参考文献	114
习题	114
第六章 静力与变形	118
§6-1 绪言	118
§6-2 连杆的受力和平衡方程	118
§6-3 等效关节力和力雅可比	124
§6-4 对偶关系	127
§6-5 力和力矩的坐标变换	122
§6-6 确定负荷质量的方法	124
§6-7 刚度和柔度	126
§6-8 柔度矩阵的主变换	128
参考文献	129
习题	129
第七章 操作臂动力学	131
§7-1 引言	131
§7-2 拉格朗日动力学	132
§7-3 惯性张量和惯性矩阵	135

§7-4 操作臂的拉格朗日方程	139	习题	251
§7-5 连杆运动的传递	143	第十一章 冗余度机器人	253
§7-6 牛顿-欧拉递推动力学方程	147	§11-1 冗余度、冗余空间和奇异状态	253
§7-7 关节空间与操作空间动力学	151	§11-2 冗余度机器人的逆运动学	254
§7-8 动力学性能指标	153	§11-3 改善灵活性的规划	255
§7-9 动力学优化设计	155	§11-4 障碍物的躲避	260
参考文献	159	§11-5 最佳动力学性能的规划	263
习题	161	§11-6 动力学控制	268
第八章 轨迹规划	163	参考文献	272
§8-1 引言	163	第十二章 协调控制	275
§8-2 轨迹规划的一般性问题	163	§12-1 概述	275
§8-3 关节空间规划方法	165	§12-2 双臂协调运动的约束关系	275
§8-4 笛卡尔空间规划方法	174	§12-3 双臂协调的关节力矩计算	280
§8-5 利用四元数进行直线轨迹规划	181	§12-4 多指手爪的运动分析	284
§8-6 笛卡尔空间规划的几何问题	185	§12-5 多指手爪的抓取规划和 协调控制	289
§8-7 轨迹的实时生成	186	参考文献	294
§8-8 基于动态模型的轨迹规划	188	第十三章 自适应控制	295
§8-9 无碰撞路径规划	189	§13-1 引言	295
参考文献	195	§13-2 模型参考自适应控制(MRAC)	295
习题	196	§13-3 自校正自适应控制(STAC)	299
第九章 操作臂的轨迹控制	199	§13-4 自适应扰动控制	301
§9-1 前言	199	§13-5 PD自适应控制	303
§9-2 二阶线性系统控制规律的分解	200	§13-6 自适应鲁棒性联合控制	308
§9-3 单关节的建模和控制	205	§13-7 直角坐标空间自适应控制	309
§9-4 操作臂的非线性控制	213	§13-8 自适应阻抗控制	312
§9-5 操作臂的多关节控制	217	§13-9 自学习控制	316
§9-6 实际问题	219	参考文献	318
§9-7 工业机器人的控制系统	221	第十四章 机器人语言	320
§9-8 PUMA560控制器的结构	223	§14-1 机器人语言的发展概况	320
§9-9 分解运动控制	225	§14-2 机器人语言的分类	321
§9-10 基于直角坐标的控制	231	§14-3 机器人语言的结构	322
§9-11 李亚普诺夫(Ляпунов) 稳定性分析	233	§14-4 VAL语言	325
参考文献	236	§14-5 AL语言	330
习题	237	§14-6 机器人语言特有的问题	337
第十章 机器人的力控制	241	参考文献	338
§10-1 概述	241	第十五章 离线编程系统	339
§10-2 约束运动与约束坐标系	242	§15-1 离线编程系统的一般要求	340
§10-3 力的控制	244	§15-2 离线编程系统的主要组成部分	340
§10-4 位置/力混合控制	246	§15-3 离线编程系统应用举例	349
§10-5 顺应控制和阻抗控制	249	参考文献	351
参考文献	251		

第一章 绪 论

人类在探索客观世界的同时，也在探索其自身。近年来，人类加紧对南极的考查，登上月球，建立空间站、观测火星和其他星球，研究人类的生存环境；另一方面，人类也在加速对于自身的研究，包括：生物工程、遗传工程、蛋白质的合成、人造心脏、器官移植、人工智能、神经网络、专家系统、语音识别等。机器人则是人类幻想已久的与自身功能相似的机器人和装置。我国早在公元前几百年的远古时代就有关于机器人的传说。例如，公元前九百多年西周时，有一名巧匠偃师，做了一个“千变万化，惟意所适”的机器人。此外，早在两千多年前，我国就出现了指南车；公元618~907年间，四川能工巧匠杨行廉制作的能走会动的“木僧”，江苏马待封制作的“酒山”等都是具有某些功能的机器人。在我国民间流传十分广泛的三国诸葛亮制做的木牛流马，也是一种栩栩如生的移动机器人。瑞士钟表匠德罗斯父子于公元1768~1772年间设计制造出三个类似真人的机器人——写字偶人、绘图偶人和弹琴偶人。

这些传说、幻想和实践到了本世纪得到充分的发展。捷克和斯洛伐克作家K Capek于1920年在他的剧本“罗沙姆万能机器人公司RUR”中，塑造了只会劳动不会思维的机器人形象，机器人初次登上舞台，机器人“Robot”这一词也相继出现在英语和其他语言的词典中。1950年，Asimov在他的科学幻想小说《我是机器人》中提出了机器人三原则：

- 1) 机器人不伤害人；
- 2) 机器人服从与原则1) 不矛盾的指令；
- 3) 机器人在与原则1) 和2) 不矛盾的情况下，维护自身的存在。

本世纪50年代是机器人幻想小说最盛行的时代。各种各样的机器人形象出现在银幕上、广播中和青少年的脑海中，产生了一定的社会效果，反映了生产发展的需要和科学技术发展的趋势。第一台商用工业机器人Unimate于1961年问世之后，各类机器人得到不同程度的发展。

§1-1 机器人与自动化

现代所说的机器人大多是指工业机器人，它是和自动化紧密联系在一起。工业机器人和计算机辅助设计(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，以及产品更新换代的需要，希望制造系统具有柔性，所谓柔性自动化是指具有可编程功能的，能适应多种任务要求的，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1-1所示为带视觉系统的NC搬运机器人的工作情况。

工业机器人的产生也和遥控机械手有联系，所谓遥控机械手是指人类不能到达的工作环

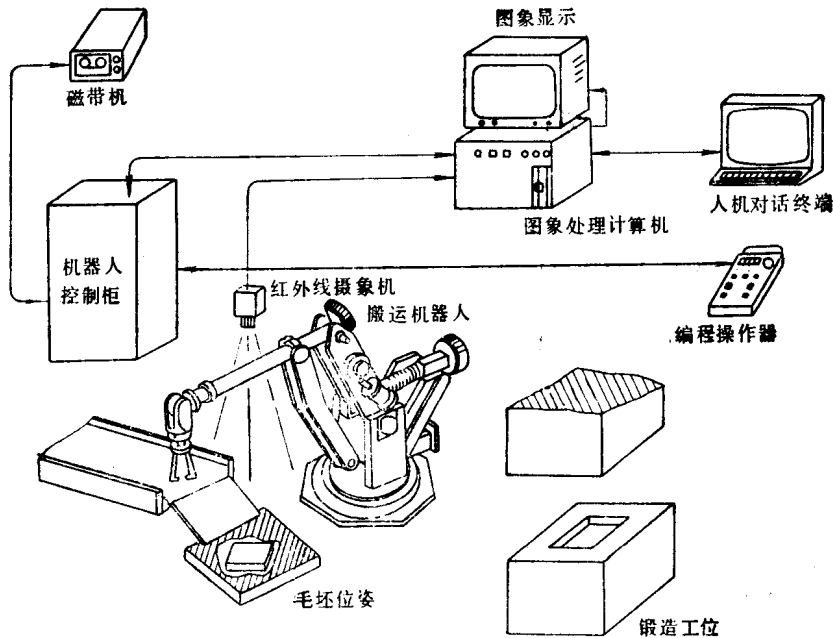


图1-1 带视觉系统的NC搬运机器人

境(如有放射性材料的环境、深海、空间)中工作的主—从式机械手。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1-2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6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,使得操作臂能够复现人臂的运动,并且具有较大的活动空间和灵活性,满足现代制造系统的需要。

现代工业机器人在结构形式上与人臂和遥控机械手相似,控制原理则是基于数控(NC)和遥控的概念。因此,现代工业机器人可以看成是“数控操作臂”,其中操作人员直接操作的主臂由计算机数控装置所代替。

由此可见,数控机床和遥控机械手的结合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,特别对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

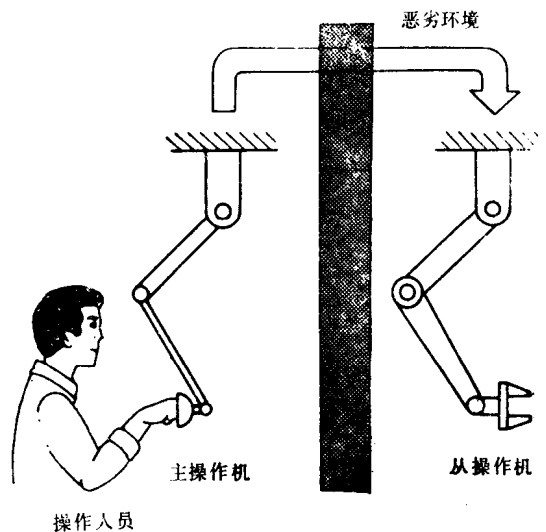


图1-2 主—从式机械手

工作，能满足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通过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，和重载高精作业的机床完全两样，由于，操作臂的串连开式结构，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，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，需要建立有效的分析方法来分析理解操作臂的位移和运动学性能。操作臂运动学是机器人研究的一个重要方面。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。

操作臂动力学非常复杂，是一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。每个关节的运动受到其它关节运动的影响，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。

机器人与NC机床不同，机器人作业要与周围设备相互作用。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往往没有预先规定。因此需要开发有效的手段和装置，用以识别工件位置并将其坐标信息与其它外设和机器进行通信。

机器人和主-从式机械手也不相同，前者是个自治系统；而后者实质上是个手控系统，操作人员进行决策和进行操作。操作人员理解给定的任务，制定相应的策略，规划操作顺序。根据他本人的经验和知识，采用有效的方法达到操作的目的。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，调整或修正控制作用以达到预期的结果。因而操作人员是控制回路的一个主要部分。如果我们在控制回路中排除操作人员，则所有规划和控制指令均由机器本身自动生成，预先规定好操作顺序，生成每步运动指令和代码，以便使机器人本身能够理解和执行规定的任务。为此，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，机器人为了监视本身的运动状态，为了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1-1所示的红外摄象机）和触觉等，分别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。

§1-2 机器人的应用范围

在机器人这一总的范畴内，除了在制造业中应用的工业机器人（操作臂）之外，还有名目繁多的各类机器人，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

现在使用的工业机器人大都缺乏智能，精度不高，完成的作业任务比较简单。图1-3列出各种工业机器人所占的比例，以上料、下料、搬运、喷涂和点焊最多；据市场分析预测，到90年代中期，对于精密的装配和检验机器人的需求量有所增加，这类机器人带有外部传感

器，如视觉和力觉，能实现细微操作。

图1-4列出各种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就得到了广泛的应用，今后仍然是工业机器人的主要用户。不过工业机器人在其他制造行业的应用将会增加。

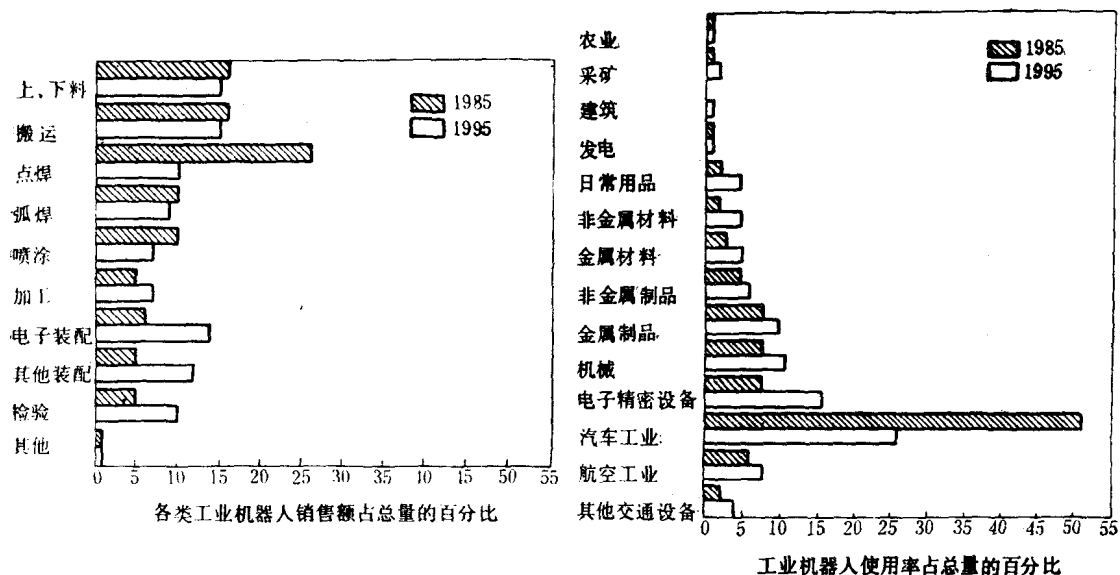


图1-3 美国各类工业机器人销售额所占百分比
(加工包括划线、钻孔和磨削等)

图1-4 美国各种行业使用机器人所占百分比

二、极限环境作业机器人

机器人代替人类工作，最能发挥其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、深海和宇宙空间等极限（恶劣）环境将成为机器人活跃的场所。用于核能领域的机器人与机械工业中的机器人不同，目的是能在放射性的环境中，安全、高效地进行检修和处理放射性物质。在宇宙空间或深海等特殊环境下完成安装和检修作业，在高层建筑或油田进行消防火灾，救助人命等都属于极限作业机器人。从1983年开始，日本通产省工技院开始对极限作业机器人的有关技术进行研究和开发。美国在宇宙探测中也把这类机器人列入研制的内容，航天飞机用的操作臂已经成功地用来进行接收和发射任务。

为了完成这些极限作业，机器人技术尚待解决的问题很多。一般认为极限作业的机器人大多属于第三代机器人技术研究的范围，应具备某些智能。

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，带有位置、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。

第二代机器人不仅具有内部传感器，还利用外部传感器搜索外部环境和对象的有关信息，利用这些信息来改变行动，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处理器技术。

第一代和第二代机器人的主要应用领域是制造业，如果考虑在采矿、建筑、农林、原子能、宇航、海洋开发、排险救灾等方面的应用，目前还有许多有待解决的技术问题，还有许

多课题值得深入探索。

图1-5所示是工业机器人的原理图。每个关节都由直流伺服电机（或交流伺服电机等）驱动，用微处理器控制，具有示教再现的功能，并且，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，计算机可进行插补坐标变换和运动学反解，算出关节角度，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，途中各点坐标均由计算机算出，以缩短示教时间。

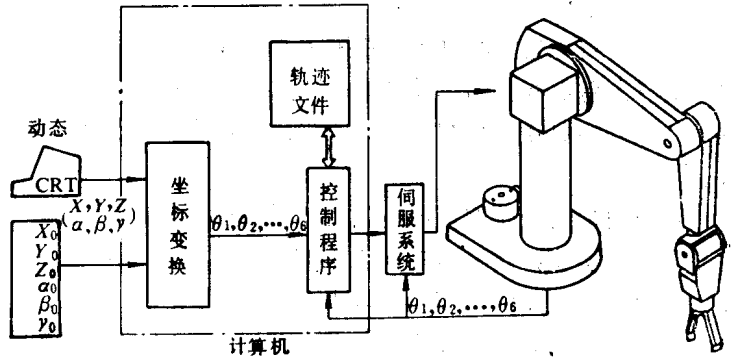


图1-5 工业机器人原理图

三、医疗福利机器人

利用机器人技术对患有先天疾病、慢性病或因意外事故失去的人体机能进行补偿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；护理机器人和导盲犬等属于后者，又称为福利机器人。

动力假肢的研究要达到以下三个目的：

(1) 设计和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，与人的感觉相似的触觉传感器，力觉传感器，研究合适的材料等。

(2) 实现对人肢体动作的控制。分析人的动作，并用机械来实现这些动作；探索连杆机构控制的一般理论，来达到预期控制效果。

(3) 人一机信息传递方法的研究，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。

机器人开始走向“第三产业”，如商业中心、办公室自动化、旅客服务和家务劳动等。

§1-3 机器人学的研究方向

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“怎么做？”。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；人一机通信机能——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”，而是一种“认知—适应”的方式。自律式进行操作。

著名机器人和人工智能专家Brady教授在他所编的“机器人科学”一书的序言中^[8],总结了机器人学当前面临的30个难题,涉及的领域十分广泛,从传感器、视觉、机动性、设计、控制、典型操作、推理、几何推理和系统集成等九个方面论述了开发、使用和研究先进机器人的关键问题。并指出机器人学的研究方向。

一、传感技术

通常,结构光的探测距离范围是0~2m;而电磁探测范围在50~100m以外。但是,工厂移动机器人需要探测的范围是2~10m,这种探测距离的传感器至今尚未实用化。此外,触觉传感器的灵敏度和精度也还不能达到使用要求。因此,应该大力研究和发展各类传感技术。

传感器的另一研究问题是建立传感器的模型,制定选择传感器的指导原则。对于传感器提供信息的类型,传感器的误差分布和故障特征也要进行建模。传感器的模型可分为定量模型(如Durrant Whyte的Gaussian概率模型)和定性模型。

传感器的不确定性和提供信息的局限性使得传感器控制成为难题。由于许多传感器,如力传感器、触觉传感器和某些视觉传感器,只能反映对象的局部信息。传感器布置在空间各处,以不同速率获取的不同信息需按所记录的结果和目标给予解释。要实时对于传感器控制,已往的串行硬件速度太慢,开始采用平行处理结构。基于Transputer处理器的MIMD对于实现传感器的集成、融合和组合是很有利的,但是尚未实际应用。

二、视觉

应用光学与许多启发知识有关,其中包括光源和摄像机的布置、不同波长和极化状态的成象效果,常常依赖于经验确定。

图象角点提供更加丰富的视觉信息,并且造成紧约束,因此角点和紧约束位置称为感觉的本原。感觉产生的过程中随立体效果,运动、轮廓形状和亮度而不同。因而存在如下问题:精确的信息模型或特征约束模型;稳健的本原计算技术;约束与空间分布本原相结合的机理。

视觉的另外两个研究方向是:基于模型的视觉和动态视觉。

形状信息的表示随目的的不同有多种,对于物体的识别、检验、抓取和在静物环境中的导航而言,用多面体来近似,但是多面体表示对于自动装配规划仍有局限性。其他的表示方法包括使用显式几何规则:平移、反射、回转、对称、表面间断、局部几何和拓朴表面特征。另一种表示方法是将形状逐次分解成部分表示。应根据所达到的目的选取其中一种表示方法。

三、机动性

移动机器人涉及许多问题,例如与传感器集成、动态传感器和视觉、传感器控制、导航和系统集成等有关。因而多传感器、多功能的移动小车的硬件和软件结构是个尚未解决的关键问题。

先进的自律引导小车需采用高频带的控制器。带有推广的非线性卡尔曼滤波器EKF,适应多个传感器所提供的环境信息的要求。

步行机器人的步态是行走的关键,这是个多维的操纵控制问题,首先要用传感器探测地面的机械性质,并且给出感知的表示,实时决策脚应站的位置,使之运动稳定、提供牵引力和支撑力。行走的姿态应使所消耗的能量最小。

四、设计

有关头部、梢关节和手指的设计, Jacobson提出的执行器模型和参数设计方法, Asada的广义惯性椭球(GIE)和Salisbury的抓取稳定性等概念是针对机器人操作臂、手爪和腿的设计和评定分析方法。为了建立一种普遍性、概括性强的设计理论, Roth提出的约束方程有一定代表性。但是, 对于头部(装有视觉)、手指(特别是梢关节)和腿部(膝关节)的设计仍然是极大的难题。目前我们还不知道膝关节应该具备何种几何形状。膝关节设计是实现主动倒摆、机器人行走、复杂控制和动力学优化等领域的交点。

驱动装置和机械电子学设计仍是机器人的一个关键, 由于驱动装置太笨、控制困难、响应慢、功率不足, 加上传动机构的间隙, 关节中的摩擦等因素大大阻碍了高性能操作臂的开发。直接驱动机器人(DDR)的出现对于机器人的发展有很大推动作用。但是, DDR也有缺点, 例如输出力矩波动很大, 限制了控制性能的提高。此外, 形状记忆合金上的微型静电电机阵列也在试用阶段。

综合控制和机械结构是机械电子学的基本思想。把计算机藏在电机内部, 改变EPROM和软件来改变电机的速度和力矩特征, 提高控制效果。

近来在机器人的结构中开始采用并行机构、柔性臂和机器人世界的概念。机器人操作臂大都是串联的开式运动链。Asada论述了并行机构的某些优点。在分析四足机器人和并行直接驱动手时也都应用这种观点。

柔性臂的研究十分活跃, 它动作敏捷、灵巧、负载重量比大, 但对3个自由度或多个自由度柔性臂的控制是个难题。

Scheimann把由传感器、驱动器、夹持器统统集成在一起的系统称为机器人世界, 其整体设计应该面向机器人本身的需要, 而不是人为的将零件硬并凑在一起。

五、控制

对控制的研究着重在两个方面: 控制移动机器人和多指手的多处理器结构; 现代控制技术及其评估。由于系统的集成、动力学的递推算法等要求, 提出了多微机控制结构。

现代控制技术的实验评估显得十分重要。现代控制技术在机器人中的应用仍然停留在仿真阶段。虽然仿真对发展新的控制算法十分重要, 但是真实世界是难仿真的, 例如用高斯噪声模型只是实际情况的一种近似, 有时近似程度很差。因此, 实验评估十分重要。对于控制系统设计而言, 现代控制理论是否适用于机器人必需进行实验评估, 例如:

- 1) 在线参数估计对于自校正适应控制十分重要;
- 2) 计算力矩控制, 用关节力传感器进行单个关节力控制;
- 3) 多输入多输出(MIMO)控制, 目前所采用的是把多关节之间的交叉耦合力矩简单看成扰动, 另一种办法是把关节2和3当成2输入2输出系统, 还没有把多变量控制技术用于机器人。

六、典型类操作

带推理要求的操作叫作典型类操作。尚待研究的有:

- 1) 冲击型的, 如攻螺纹、捶击、落锤和劈开;
- 2) 扭转型的, 如车螺纹、旋压和钻孔。

当然, 还有其他尚待研究的问题。此外, 复杂的几何形状, 如L形零件, T形截面都增加了问题的难度。

RCC机构用来实现两种顺应动作, 在倒角处实现滑动和纯滚动顺应。因而RCC在倒角

孔的操作中将推和旋两种动作融合在一起。旋转轴线和推的方向垂直。如何将Mason提出的不同的表示方法结合起来建立握紧过程的表示方法尚不清楚。

被动顺应具有快速的优点，但是，带有传感器的主动顺应的适应性更广，因为更换控制算法（软件）比变换机械结构容易得多。新一代的RCC机构带有力控装置，使得这种机构的应用范围十分广泛。

过程的定性模型或定性推理的思想对于零件的推压、抓取和定向的自动规划十分重要，因此Mason强调操作的表示方法。

七、推理

智能规划方面的早期工作集中在静态理想化的玩具世界中对简单任务进行离线规划。这些只代表真实环境中的规划、建模和推理的高度抽象，提出了许多问题并进行了研究。如框架问题，递阶规划的必要性，表示相关和约束的必要性等。规划方面的研究最近出现了好的转机。例如：

- 1) 时间紧迫事件的临时规划，特别是研究规划与经典控制之间的关系。
- 2) 对于不确定性问题的规划，基于传感器的规划。
- 3) 应急规划和应变功能等。

尽管有了好的转机，待研究的问题还很多。定性推理近年来有很快的进展，定性推理系统仅用于表示简单物体，在实际问题中的运用，如在生产工程中的应用还十分有限。

形状的表达最初是由计算机视觉发展起来的，并用在几何推理和路径规划。然而，机器人的推理系统大都忽视几何表示，大多数用多面体近似。运动和动力学的几何和符号表示仍是我們进行环境推理的中心环节。

从设计到生产形成一个闭合回路，将制造技巧转化成一门科学是近年来研究的一个重要课题。最近AI的研究目的在于使设计和生产之间形成闭合回路。

八、几何推理

有关装配的知识大体可分两类：

- 1) 几何和动力学一般性知识；
- 2) 实际装配有关的知识。

这是发展实用的装配系统必不可少的，也是对人工智能的挑战。

Lozano-Perez和Taylor对精运动关键问题进行了研究，机器人学越来越多地涉及到受控碰撞问题。这不仅给设计、控制，也给推断提出了许多课题，特别是精运动规划和碰撞检测。

已经深入地研究了道路寻找的几何问题，Camcron为碰撞检测提出了一个完整的快速算法来判断两个复杂形体是否会搭接，如果在一个未经特别挑选的，公认的装配方案中能够迅速识别那些关键点并就其碰撞问题作出判断，那么这种技术对于路径规划和装配规划都是有用的。如何证明这种方法的可行性是一个尚未解决的问题，更一般地，列出有普遍重要意义的几何推理（推断）任务将是一个重要课题。

九、系统集成

从软件工程的角度来看，异步软件的结构种类问题尚未解决，即对于给定的方案，采用何种软件结构最合理？有些方案已试用面向对象的编程；另一些方案则对共用数据结构提供信号保护；还有些方案使用过程通信集（基于CSP-Occam-Transputer模型，Ada模型或C的平行版本）。对于机器人系统，当前还不知道如何评定软件结构的合理性，也不知道所应遵

循的设计原则。

Albus于1988年开始研究大系统分布控制和分布递阶结构。在工作单元中协调工作的一些处理器需要快速通信,另一些处理器,除报警和意外情况之外,可以采用较慢的通讯节拍。从异步软件结构向网络硬件结构的映射是机器人学面临的难题之一。

以上列举了建立机器人科学当前需要解决的问题。显然,任何人要掌握和精通机器人学全部领域是不可能的。因此,通常把机器人学分成四个有关的领域:操作臂、行走、计算机视觉和人工智能。本书讨论操作臂(也称工业机器人)的设计、控制和编程。

§1-4 工业机器人的设计、控制和编程

工业机器人(操作臂)作为一门学科是力学、控制、计算机科学和电子工程等领域相互交叉和渗透的结果。机械工程是研究机器人运动学、动力学、静力和变形的基础;为了描述机器人和操作臂的空间运动,必须采用相应的数学工具;控制理论是设计控制系统,提供有效算法,实现预期运动和力操作的手段;电气和电子工程用来解决传感器的设计,建立机器人与环境的相互联系;计算机科学不仅是机器人实现可编程功能的基础,也是机器人智能化的中心环节。本书主要阐明工业机器人的基础理论和相关技术,包括力学、控制和编程。

一、机器人操作臂的机构和空间描述

工业机器人(亦称操作臂)一般是由一系列连杆由旋转关节或移动关节相连接的开式运动链,一端装在固定的支座上(基座);另一端自由,安装手爪、工具,实现各种操作。关节的作用是使它连接的两连杆产生相对运动。图1-6所示为两种典型的工业机器人。由图中可以看出,都有6个自由度,其中前3个自由度决定手腕的位置,后3个自由度决定手腕的姿态。本书第二章简要介绍操作臂的外形结构和坐标系、手腕、手爪的驱动方式和结构。

为了描述组成操作臂的各连杆之间的相对位置和姿态(简称位姿),在每个连杆上固接一个坐标系;同样,为了描述机器人与环境之间的位姿关系,在工件和工作台上也固接了相应的坐标系,然后描述这些坐标系之间的位姿关系。第三章讨论位姿的空间描述和变换方法。我们采用 4×4 的齐次变换矩阵来描述任意两个坐标系之间的相对位置和姿态,表示任意物体从一坐标系向另一坐标系变换的关系。建立相应的数学方法。在第八章简单介绍四元数的描述方法。

二、操作臂运动学、动力学、静力和变形

若把操作臂的连杆都近似地当成刚体,则相邻两连杆坐标系之间的位姿关系用连杆变换矩阵来表示。操作臂运动学则讨论手臂末端执行器的位姿与关节变量之间的关系。操作臂运动学有两个基本问题:正向运动学和逆向运动学。第四章将详细讨论这两个问题,首先应用Denavit-Hartenberg方法规定连杆坐标系、连杆参数和关节变量,推导连杆变换矩阵和操作臂的运动学方程,建立工具坐标系相对于参考坐标系的位姿与关节变量之间的函数关系——正向运动学。然后求解逆向运动学,即根据给定的工具位姿求解相应的关节变量。由于运动学方程是非线性方程组,其解往往难以写成封闭的形式,可能出现无解的情况,也可能出现多重解的情况。最常用的逆向运动学问题的求解方法有矩阵代数法、迭代法和几何法等。

微分运动关系是研究速度传递、静力传递、变形和动力学的先导。本书第五章讨论操作臂的微分运动和雅可比。雅可比表示从各关节速度到末端操作速度的广义传动比,是度量操

作臂的运动学、动力学性能的重要指标。求雅可比矩阵的方法可多种，如：矢量叉乘法；微分移动和转动方法；运动递推法和力的递推法等。利用雅可比矩阵可以判别操作臂的奇异形位和度量操作臂的灵巧性。

当操作臂的末端与环境接触，产生相互作用时，作用力（矩）与关节力（矩）之间的关系可用力雅可比来衡量。实际上，力雅可比与运动雅可比相互转置。第六章讨论了力的递推公式和力雅可比的另一种求法。

操作臂的受力和变形之间的关系是非常复杂的，第六章我们将其简化为线性模型，用操作臂的刚度矩阵和柔度矩阵来表示。

操作臂动力学研究各关节驱动力（矩）与终端操作器的位置，速度和加速度之间的关系。本书第七章阐述建立动力学方程的 Lagrange 方法和 Newton-Euler 方法。操作臂的动力学方程十分复杂，不仅与操作臂的形位有关，还和连杆的质量分布、连杆的结构、关节间的摩擦等有关。操作臂的动力学方程有多种形式：关节空间、操作空间和状态空间的形式。研究操作臂动力学的目的的一方面是为机器人控制提供精确的动力学模型，计算驱动力（矩）函数、实现前馈补偿；另一方面是为了仿真，根据关节力（矩）计算相应的加速度。第七章我们还讨论了操作臂的动力学性能指标及其优化方法。定义高速性能指标、加速性能指标和综合性能指标、机器人动力学优化的方法。

三、操作臂的轨迹规划和运动控制

机器人操作臂在运动之前，需要明确是否一定要沿特定的路径（即路径约束）运动，还要明确在运动过程中是否会与障碍物相碰（障碍物约束）。如果对运动的路径没有特殊的要求，则通常使每个关节的运动按指定的平滑时间函数，同时从起点运动到终点；如果一定要

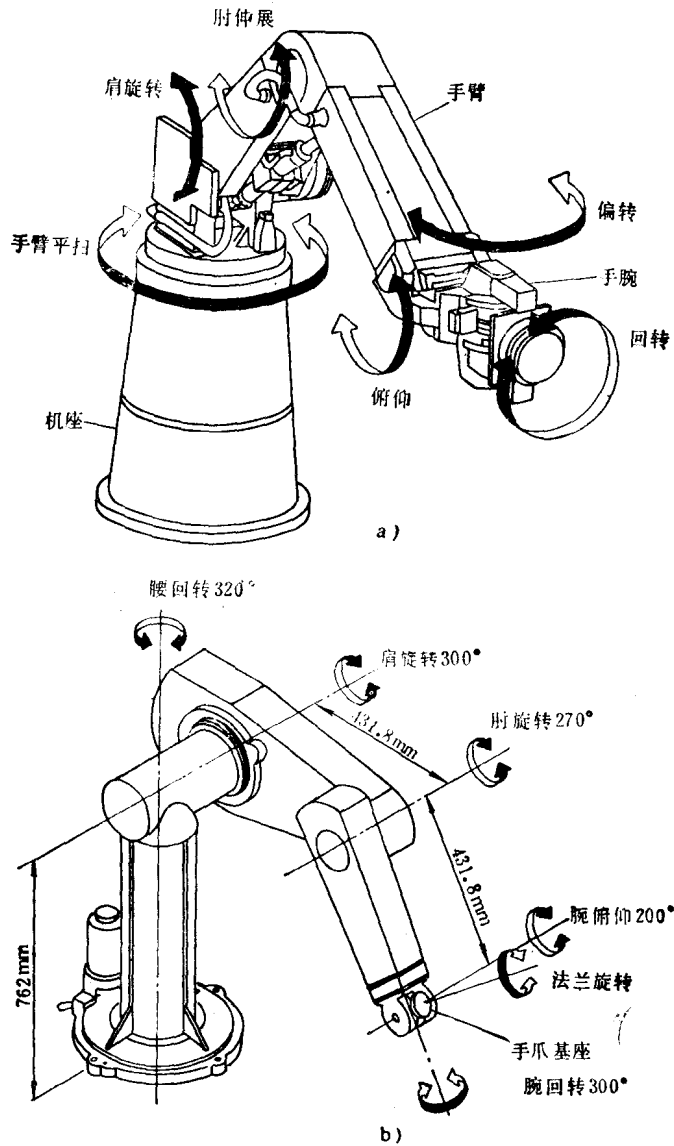


图1-6 两种工业机器人
a) Cincinnati Milacron公司的T³机器人 b) PUMA560系列机器人

沿特定的路径,那么轨迹规划器应利用多项式插补或逼近预期的路径,生成一系列时基“控制结点”。本书第八章讨论了关节空间和直角坐标空间轨迹插值的方法和路径的实时生成方法,并评述了在无碰撞路径规划方面的若干进展。

轨迹控制的目的在于精确地实现所规划的运动。运动控制包括:建立操作臂的动力学模型(第七章);根据所建模型确定控制规律或策略,以达到预期的系统响应和性能。第九章讨论控制规律的分解和相应的控制方案。实用的工业机器人的控制系统是把每个关节当成单输入单输出的关节伺服机构来处理。由于忽略了关节之间的耦合,忽略了操作臂运动形态变化的影响,不能适当地模拟出动力学的变化特征。实际上,受控系统的参数变化有时相当大,足以使通常的反馈控制规律失效。其结果,降低了伺服响应的速度和系统的阻尼,限制了末端执行器的精度和速度,限制了操作臂的作业能力,低速时还会产生颤震。为了提高系统的性能,需要建立更有效的动力学模型,采用更先进的控制方法,采用专用的计算机结构与并行处理技术。

对于装配机器人和加工机器人,操作臂末端与零件的工作表面接触时,接触力的作用不能忽略,因此力的控制具有重要的实际意义。力控制是对位置控制的补充,当操作臂末端自由时,只有位置控制可言;然而,若末端受到自然约束(与工件接触)时,某些方向的运动受到限制,则在这些受限的运动方向上只能施加力的控制。第十章将讨论力的控制、位置/力混合控制和阻抗控制。

冗余度机器人是指在完成某一特定任务时具有多余自由度的机器人操作臂。冗余度对于提高机器人的灵巧性,改善动态品质,避开奇异状态和躲避障碍物都十分有利,近年来引起广泛的重视。第十一章将讨论冗余度机器人的规划和控制。

人类通常使用双臂(双手)操作工具,进行作业。如:双臂把主轴装配到主轴箱内,双臂将螺钉旋入螺母内,双臂(双指)使用剪刀等作业。两臂协调操作时,形成闭式链,同时受到运动约束和力的约束,如何对此进行规划和控制?将在第十二章进行讨论。多指协调操作与双臂协调虽然相似,也有不同之处。多指操作物体的过程中应保证与物体保持接触,闭式链的回路数目通常多于一个。并且还要满足力封闭性条件。

机器人操作臂是个高度非线性、强耦合,位姿时变的多变量系统,仅用PID反馈控制往往难以取得很好的控制效果。理想的情况是在基于模型控制的基础上,增添自适应控制规律。现在提出的自适应方案很多,有模型参考自适应、自校正自适应控制、自适应摄动控制、自适应阻抗控制等。第十三章介绍各种自适应控制规律和有关算法、系统分析和设计。

四、机器人编程语言和离线编程

仅仅将机器人制造出来,安装在生产环境中,往往并不能取得预期的效果,为了提高使用水平,机器人的编程是一个关键问题。机器人的编程方式有:

- 1) 示教编程 包括手把手示教和示教盒示教;
- 2) 机器人语言编程;
- 3) 离线编程。

示教编程最简单,也是当前工业机器人广泛使用的一种编程方式,但是示教编程存在许多缺点和局限性,例如占用机动时间,依赖于工人的技术水平,有些环境和工序示教困难。因此机器人语言编程和离线编程得到很大发展。

机器人编程语言是用户与机器人之间的接口,关键在于:编程人员怎样方便地描述