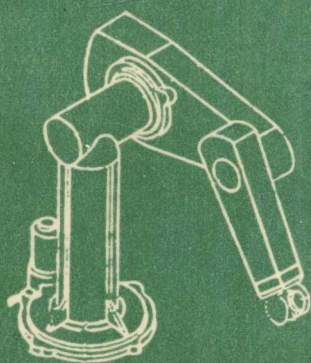


THE PRINCIPLES OF ROBOTICS

机器人原理

严学高 孟正大



东南大学出版社

机器人原理

严学高 孟正大

东南大学出版社

(苏)新登字第012号

内 容 简 介

本书是作者在参阅美国麻省理工学院 R.P. PAUL 编的“ROBOT MANIPULATOR”、H. ASADA, J.-J, E. SLO-TINE编的“ROBOT ANALYSIS and CONTROL”、斯坦福大学JOHN J. CRAIG编的“INTRODUCTION to ROBOTICS”、普渡与田纳西大学 K.S.FU, R.C.GONZALEZ, C.S.G. LEE编的“ROBOTICS”和密执安大学YORAM KOREN编的“ROBOTICS for ENGINEERS”等国外教材及有关论文的基础上,结合自身编辑“机器人技术”杂志和从事有关研究工作的体会,并经过八次对研究生的教学实践,反复修改而成。本教材力求有机地组织教学内容,将各技术领域与机器人相关的部分结合实际深入浅出地阐述,内容包括:空间变换、运动学、微分运动、动力学、轨迹设计、轨迹控制等。

全书共分七章,附有习题与实践内容,并有研究动向的介绍。本书可作为大学本科生及研究生机器人课程的教材,亦可供研究所、厂矿从事机器人领域工作或研究人员作参考。

机器人原理

严学高 孟正大

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 武进第三印刷厂印刷

开本850×1168毫米 1/32 印张12.5 字数302千字

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7—81023—633—4

TP·41

定价: 7.50元

责任编辑 雷家煜

序

人类进行各种生产活动，可看作为人作用于“自然界”的活动。人和“自然界”之间交互面，始终是技术进步的的生长点。我们经历了“徒手”-简单工具-机器等时期。随着技术进步，今天又进入了人-机器人-机器-自然界的新时期。

也许由于机器人的译名受到了人们的误解，特别是像我们这个有巨大人口的国家，往往有人提出还需要机器人吗？其实机器人是“进化了”的机器。今天的工业机器人，只不过是进行特定作业，并通过编程可以任意改变作业顺序的更灵活的机器。

随着市场竞争，产品从大批量向中小批量的过渡，随之要求生产线从“刚性”向“柔性”过渡，另一方面由于微电子技术的发展及机器人的研究、设计、制造工作者的巨大努力，机器人七十年代末开始在工业中得到应用，八十年代得到了全面推广，带来了巨大影响。今天除工业机器人外，各式各样的机器人也得到了发展，机器人已成为当代高技术注目的一项内容。

严学高及孟正大二位老师，积多年教学经验，集几本著名的机器人著作的精华，由浅入深编写了这本《机器人原理》，这是一本学习机器人很好的教材。我愿向有志于“机器人”事业的青年一代郑重地推荐此书。

蒋新松

1992年5月16日

前 言

智能机器人是生产与科学技术高度发展的产物，机器人学是一门跨学科的新兴学科，研究如何使机器或系统具有“思想、行动功能”[蒋新松1990]。它综合运用了机械、力学、数学、电气传动、计算机、自动控制，人工智能、传感器、计算机视觉等学科的最新成就。智能机器人的发展反过来给上述学科以巨大推动，所以，美国、日本等先进工业国家几乎没有一所大学不研究机器人。我国机器人的研究已进入七·五，八·五科技发展规划及863高技术规划。

自从1981年第一本机器人的经典著作，美国麻省理工学院Paul, R.P.的“Robot Manipulator”问世以来，机器人的新著不断涌现。至于论文更是不计其数。我们在八年教学中陆续使用了多本著名教材的有关部分，深感有必要把它们的优点加以综合，联系我们自己研制机器人及编辑《机器人技术》杂志的体会，融会贯通地、系统地、深入浅出地编写一本供大学生与研究生使用的教材。

本书着重阐明原理及计算方法。在绪论中介绍有关机器人的结构、指标、分类及其与现代生产、现代科学的关系。在第二章中吸取Craig (1986)与Paul (1981)，两书的观点讨论了齐次变换的三种用途及位置方位的各种表示方法。第三章用实例把代数解法[Paul, 1981]与几何解法[Craig, 1986]结合起来，阐述了简化解法(Pieper, 1968)，把六维化为两个三维来解[Asada and Slotine, 1986]。第四章分析微分运动，通过例子将微分分析法[Paul, 1981]与速度分析法[Asads and

Slotine, 1986]结合起来描述在T₀标架与机座标架中不同的雅可比阵及其相互转换。在第五章静力学与动力学的描述中注意了公式的物理概念,并用例题把基于拉格朗日方程的公式推导与牛顿欧拉法的迭代计算统一起来。第六章讲轨迹生成,融汇了多本教材[Paul, 1981; Koren 1980与Fu, Gonzaleg and Lee, 1987等]的有关内容说明点位控制与连续轨迹控制、关节插补与空间插补及插补器的构成。第七章阐述轨迹控制,首先介绍简单的工业用比例微分控制及前馈补偿方法[Paul, 1981],为了提高精度引入控制法则分解以补偿非线性与耦合[Craig, 1986];最后,从简化计算,提高控制速度及鲁棒性需要引入了滑模控制方法,并讨论了简化模型与跟踪误差的折衷问题[Asala and Slotine, 1986]。

为了适应不同专业学生的需要,本书取材比较广,考虑到有些内容与其它专业课会有某些交叉,因此根据不同专业需要,教学时可以有所侧重。如对机械类专业,第七章可以选讲一部份;对控制类专业,第二章到第五章中的内容不一定全部讲。

本课程涉及机、电、控制与计算机等不同领域,因而较难掌握。解决问题的办法,只有通过实践,学生通过作业练习和编程、控制机器人运动后才能深刻领会教材中的内容。安排一、二个大型作业是必要的,大型作业可根据不同专业的要求进行布置。如控制机器人进行点位运动或直线、圆周运动;按不同控制规律进行轨迹跟踪;在已有机器人语言及操作系统的基础上(如有进口的机器人及控制系统)编制某些智能程序。此外,在学生初步掌握内容的基础上由教师引导进行某些内容的讨论有利于深入理解及灵活应用所学的知识。

每章后面附有研究动向的介绍以利于拓宽学生思路,为进一步深入研究创造条件,这对研究生尤其必要。机器人正在迅

速发展，因此本课程的任务除了提供学生必要的基础与涉及一定的知识面外，还力求能引导学生成为这一新技术领域的开拓者。

本书由严学高编写第1、2、3、4、6、7章及1、6、7章习题，孟正大编写第5章及2、3、4、5章习题，全书由严学高统稿。研究生龚厚红、朱亦萍、王爱民为本书打印出版做了许多工作。最后，感谢史维、陈维南、金万敏为本书审校。

有关机器人智能部分见本书的姊妹篇“机器人智能”，该书即将出版。

由于时间仓促，学识水平有限，书中错误或不足之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编者

1991.10

目 录

第一章 绪 论

1.1 机器人的发展	(1)
1.2 机器人的基本结构	(4)
1.2.1 机器人的机械结构	(4)
1.2.2 关节驱动	(6)
1.2.3 计算机控制	(7)
1.2.4 感觉系统与通讯接口	(7)
1.3 工业机器人的指标	(8)
1.3.1 自由度	(8)
1.3.2 工作空间	(8)
1.3.3 工作速度	(10)
1.3.4 精度、重复精度与分辨率	(10)
1.4 机器人的分类	(11)
1.4.1 操作型机器人的基本结构分类	(12)
1.4.2 直接驱动与间接驱动	(13)
1.4.3 机器人按动力源分类	(14)
1.4.4 机器人按工作方式分类	(15)
1.4.5 机器人按示教方式分类	(15)
1.5 机器人与现代科学技术	(16)
1.5.1 机械方面	(16)
1.5.2 控制方面	(17)
1.6 机器人与现代生产	(19)
1.6.1 市场的需要	(19)

1.6.2 生产领域扩大的需要	(20)
1.6.3 提高生产率的需要	(20)
1.6.4 改善工作劳动条件的需要	(20)
1.6.5 机器人在生产中的应用	(21)
1.6.6 机器人与计算机综合制造系统CIMS.....	(21)
1.7 教材内容简介	(23)
1.8 本书所用符号简介	(24)

第二章 空间描述与变换

2.1 引言	(26)
2.2 坐标变换的概念	(26)
2.3 物体位置,方位与标架的描述	(32)
2.3.1 位置	(32)
2.3.2 方位	(33)
2.3.3 位姿及标架的描述	(34)
2.4 物体描述在不同标架间的变换——映象变换	(37)
2.4.1 映象的概念	(37)
2.4.2 映象的性质	(40)
2.5 在同一坐标中改变物体的位姿——变换算子	(41)
2.5.1 变换算子的概念	(41)
2.5.2 相对变换与绝对变换	(44)
2.5.3 变换算子的性质	(47)
2.6 齐次变换矩阵的三种作用	(49)
2.7 变换的演算	(50)
2.7.1 逆变换	(50)
2.7.2 变换方程式	(54)
2.8 位置的其他表示法	(59)
2.9.1 圆柱坐标	(59)

2.8.2 球坐标	(62)
2.9 方位的其他表示法	(63)
2.9.1 绕固定参考坐标轴旋转——绝对变换RPY	(63)
2.9.2 绕本身标架轴旋转——相对变换欧拉角	(65)
2.9.3 绕任意轴旋转	(67)
2.10 研究动向	(74)

第三章 运动学

3.1 引言	(75)
3.2 杆件、关节、标架及杆件变换的描述	(77)
3.2.1 机器人臂上的杆件、关节、标架及其序号	(77)
3.2.2 杆件的参数	(79)
3.2.3 杆件联接与关节参数	(79)
3.2.4 Denavit-Hartenberg 描述	(80)
3.3 建立运动学方程	(87)
3.3.1 Puma手计算实例	(88)
3.3.2 Stanford手计算实例	(90)
3.3.3 简化计算的考虑	(91)
3.4 运动学方程的可解性与重解	(93)
3.4.1 工作空间与解的存在性	(93)
3.4.2 少于6自由度的操作子空间	(95)
3.4.3 重解	(96)
3.4.4 可解性	(98)
3.5 解运动学方程的代数方法与几何方法	(99)
3.5.1 代数方法解运动学方程	(99)
3.5.2 几何方法解运动学方程	(105)
3.5.3 退化	(105)
3.5.4 三轴相交时的Picper解法	(106)
3.6 研究动向	(113)

第四章 微分运动与雅可比矩阵

4.1 引言	(114)
--------------	---------

4.2 瞬时运动的运动学模型	(114)
4.2.1 微分运动	(114)
4.2.2 微分转动的向量表示	(116)
4.2.3 微分运动在标架间的转换	(119)
4.2.4 速度的描述	(125)
4.3 雅可比矩阵	(128)
4.3.1 速度分析法求雅可比矩阵	(129)
4.3.2 微分分析法求雅可比矩阵	(136)
4.4 逆雅可比——瞬时运动学的逆问题	(142)
4.4.1 雅可比求逆——分解运动速率	(142)
4.4.2 冗余度	(145)
4.4.3 最优解	(146)
4.4.4 雅可比求逆的方法	(148)
4.5 研究动向	(153)

第五章 机器人静力学和动力学

5.1 引言	(155)
5.2 力学基础知识	(155)
5.2.1 速度、加速度合成定理	(155)
5.2.2 质心运动定理和欧拉方程	(161)
5.2.3 虚位移原理	(164)
5.2.4 拉格朗日方程	(167)
5.3 机器人静力学	(172)
5.3.1 力和力矩分析及传播	(172)
5.3.2 关节力矩	(174)
5.3.3 关节力矩与末点力	(178)
5.3.4 对偶性	(180)
5.4 拉格朗日方程	(182)
5.4.1 拉格朗日方程的推导	(183)
5.4.2 广义坐标的变换	(189)
5.4.3 实例	(191)

5.4.4 动力学方程的物理解释	(164)
5.5 牛顿-欧拉法	(199)
5.5.1 基本运动方程	(199)
5.5.2 封闭形式的动力学方程	(200)
5.5.3 迭代形式的牛顿-欧拉方程	(204)
5.5.4 关于自身标架的迭代方程	(212)
5.5.5 实例	(215)
5.6 研究动向	(222)

第六章 轨迹生成

6.1 引言	(224)
6.2 在线示教与离线编程	(229)
6.2.1 任务描述	(229)
6.2.2 建立变换方程	(230)
6.2.3 设定参考坐标	(232)
6.2.4 位姿矩阵的计算	(233)
6.2.5 用摄像机取数	(237)
6.2.6 离线编程	(237)
6.2.7 跟踪输送机	(240)
6.3 轨迹生成的一般考虑	(240)
6.3.1 插补的必要性	(240)
6.3.2 关节插补与空间插补	(241)
6.3.3 点位PTP控制与连续轨迹CP控制	(244)
6.3.4 插补器的基本结构	(252)
6.4 位置间运动的过渡	(257)
6.5 关节运动轨迹插补	(262)
6.5.1 不确切通过中间点的轨迹	(262)
6.5.2 确切通过中间点的轨迹	(263)
6.6 直角坐标空间运动轨迹插补	(267)
6.6.1 位置间工具及坐标系的转换	(267)
6.6.2 位置间运动	(270)
6.6.3 轨迹段间的过渡	(274)

6.7 研究动向	(282)
----------------	---------

第七章 轨迹控制

7.1 引言	(284)
7.2 PID位置控制	(288)
7.2.1 单杆机械手控制	(288)
7.2.2 稳定与不超调	(290)
7.2.3 刚度与伺服误差	(292)
7.2.4 PID控制	(300)
7.2.5 多杆机械手的控制	(302)
7.3 计算力矩控制	(303)
7.3.1 控制法则分解	(303)
7.3.2 多输入/输出控制系统	(310)
7.2.3 机械手的关节控制	(311)
7.3.4 机械手的直角坐标轨迹控制	(313)
7.3.5 控制方案实施中的一些具体问题	(315)
7.4 变结构控制	(317)
7.4.1 滑模控制的性质	(318)
7.4.2 用开关控制进行理想的跟踪	(325)
7.4.3 用连续控制规律逼近开关控制	(332)
7.4.4 机器人轨迹中的鲁棒控制	(339)
7.4.5 模型与性能的折衷	(345)
7.5 研究动向	(347)
习题	(349)
参考文献	(368)

第一章 绪 论

1.1 机器人的发展

对“机器人”这个词有过各种各样的理解。从简单的材料抓取装置到令人神往的与人相似的机器。工人、工程师、研究人员、直到作家，不同的人不同的时期，不同的国家对“机器人”的看法差距很大。这恰恰说明“机器人”本身正在迅速发展，从科学幻想到生产现实，它对社会各方面产生了巨大影响。早在1920年捷克作家 Karel Capek 在其剧本罗莎姆万能机器人 (Rossum's Universal Robots) 中把象人一样，能严格服从主人命令不知疲倦进行工作的机器叫 Robota (捷克文)，意为“强迫劳动者”。以后世界各国几乎都用了 Robot 这个词，近年来，描写机器人的作品越来越多，机器人已家喻户晓了。不过比起小说中的机器人来，工业机器人要逊色得多。人们普遍认为真正在工业上使用的机器人始于1954年，George C. Devol 研制了一台“程编关节传送装置”，它第一次用示教/再现的控制方式，装置的动作可以程编。进一步发展这概念，并把计算机与操作手联接起来的是 Unimation 公司，它于1959年制成第一台工业机器人，被称为第一代可程编的示教再现机器人。

工业机器人起源于两种技术——数控机床与遥控机械手。数控机床由存储的数据产生控制，这些数据包括位置坐标值，时钟讯号起停操作，分支控制的逻辑语句，整个操作序列及其

变化预先放在内存，因而执行不同任务时硬件可以不变。数控在现代制造工业的小批量生产中增加了生产系统的灵活性。遥控机械手是一种远距离执行任务的装置，它可以在人不能工作的环境中完成任务，如抓取放射性材料，在水下、在宇宙空间中工作。第一台主从机械手始于1948年，它包括用电驱动装的操作侧的机械臂（从机械手），和作控制杆用的另一台几何形状与之相似的机械臂（主机械手），它的每个关节有位置传感器，测量操作时的动作，产生位置信号。人操作主机械手产生的电信号送到从机械手，控制它重复主机械手的动作。主从手都有六个自由度，可在空间作任意的位置与方位，且能在一定空间范围内灵活动作。现代工业机器在人外形上保留遥控机械手与人臂相似的形状，但用数控的基本概念代替人操作，数控与遥控操作的融合，创造了崭新的工程领域，称为机器人学（Robotics）。与之相关的还有许多各不相同的前沿学科（详见1.5节），它们的发展对机器人起了促进作用。

工业上目前广泛应用的是示教/再现机器人，对于这种机器人，美国机器人研究院（ROBOT INSTITUTE of AMERICA）作了精确的定义：“机器人是可反复编程的多功能操作手，用于搬运材料、操纵工件、工具或专用装置，它通过各种程编的动作来完成不同的任务。”微型计算机的发展大大促进了机器人技术，在第一代示教/再现机器人上进一步应用了传感器反馈，显著增加了它的灵活性。1962年，H.A. Ernst开发了具有触觉传感的计算机控制的机械装置 MH-1，它能感觉方块，利用这信息，机械手不需要人的帮助便能把方块堆起来。这是机器人能适应环境的一个早期例子。其操作系统包括一台 ANL Modle-8 六个自由度的操作手，由 TX-0 计算机通过接口操作。后来又加上了视觉，这就出现了第二代带感觉的机器人，能适应变动的环境，执行给定的任务。

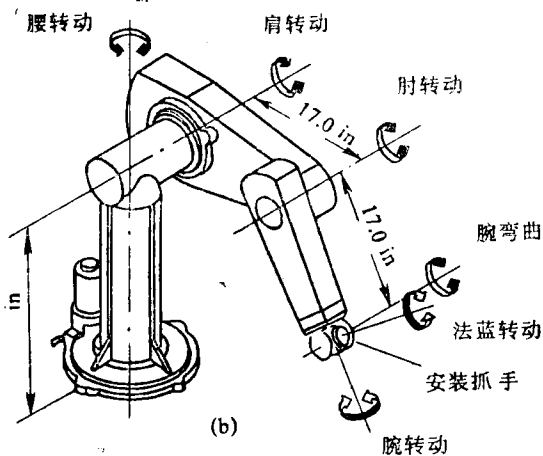
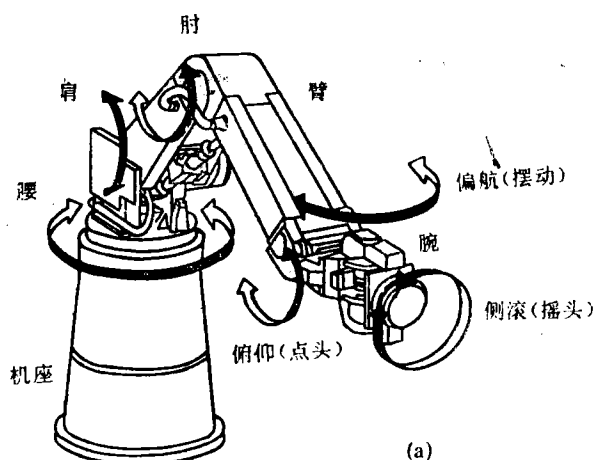


图 1.1 (a) Cincinnati Milacron T3 机器人臂
(b) PUMA 560 系列机器人

人工智能、现代控制理论等学科的发展使机器人技术提高到一个新的高度。70年代斯坦福研究院研制了一台可移动的机器人，它不仅能用电视摄像机来识别房间中的物体布置，而且可以根据指令的要求重新布置房间的物体，自己进行问题求解与路径规划，找最优的动作序列。它还有学习功能，能把改变着的现场位置记录下来作为进一步规划的依据。这已是第三代有高度适应能力，能理解指示、命令，感知环境，识别对象，有决策、推理、规划等功能的智能机器人了。

据统计，1980年第一代示教/再现可编程的机器人在世界上已进入普及阶段，1985年第二代有感觉的能自适应的机器人开始进入普及阶段，预计到2000年第三代智能机器人将进入普及阶段。

我国在50年开始搞固定动作机械手(行程开关控制)，60年开始搞数控机械手，70年代末开始搞机器人。目前，工业机器人与智能机器人已分别列入我国“七·五”“八·五”规划重点开发研究项目与高技术规划，受到各方面越来越多的重视。

1.2 机器人的基本结构

1.2.1 机器人的机械结构

机器人的机械结构随其应用的不同可分三大类。操作型——它类似人的手臂，可进行各种操作；移动型——它具有移动功能，有不同数量的轮子或腿；特种机器人——它的结构变化很大，如水下机器人要有一整套水下工作的机构，伐木机器人要有爬树的机构，而信息型机器人没有手脚，各不一致。本书着重讲操作型机器人，又称机器人操作手⁽¹⁾。

注(1)英文名为“Robot Manipulator”，这里“机器人”指具记忆，示教/再现的类人机械。“操作手”指它具有手臂一样的外形与动作，有时也简称机械手，但它与固定程序的机械手有本质不同。