

764579

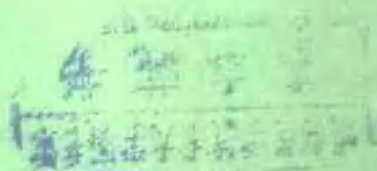
50818

11107

机器人机械手

— 数学 · 程序编制与控制

Richard P. Paul



西北电讯工程学院机器人研究中心

丛书出版说明

人工智能是一门利用计算的观点和方法来研究智能的学问。遗憾的是,由于智能为各种信息处理能力和信息表达能力的综合,目前还不可能对智能下一个确切的定义。

诚然,心理学、哲学、语言学及其相关学科为研究智能提供了各种途径和方法。然而就其大部分内容来讲,由于描述得太不完善和太模糊而不能用计算语言来实现。即使我们能从传统的研究中得到一些有用的概念、关系和定理,并且能从中证明智能是确实存在的,但为了全面地研究智能,我们还需要更多的知识。

人工智能为智能研究提供了一种新的方法和途径。其主要目的就是使计算机智能化,即使计算机更有用和能理解智能原理。显然,智能计算机是非常有用的。更重要的是人工智能力图用计算的观点和方法来研究智能,这就给智能的理论研究提供了一个全新的截然不同的基础。研究人工智能的大部人部认为这些理论能应用到任何智能信息处理单元,不论它是生物的或是固态的。

这里尚有一些值得注意的问题,任何一个能够成功模拟一小部分智能的程序都将是非常冗长和繁锁的。因而人工智能始终受到计算机技术发展的限制。其中所遇到的问题是如此困难 如此有趣,至使从事人工智能研究的人员都竭尽全力地为之而奋斗。这样,人工智能的思想得以源源不断地传送到计算机设计中,并且这种传送从没有衰减的迹象。

麻省理工学院出版社(MIT Press)出版这套《人工智能丛书》的目的就是向社会各方的专业技术人员和学生们的提供目前世界上各研究中心正在从事工作的详细情况

Patrick Henry Winston
Mike Brady

序 言

这本关于机器人机械手的书综合了下列领域的理论，即计算机绘图、运动学、动力学、控制和程序设计等。本书以教材的形式编写而成，可作为工程和计算机科学方面的本科生和研究生学习机器人学的教材。机器人学是一门新的、涉及面广的学科，它是在不断汇集其它学科理论的基础上发展起来的。本书在每一个方向仅提出一个论点。这些理论之所以被挑选出来是因为它们能够组合在一起形成一个解决机械手控制问题有效和一贯的方法。本书的大部分内容都是基础知识，但它们具有新的和不同的概念。动力学一章假定同学们能够接受动力学拉格朗日方程；控制一章运用了拉普拉斯变换；而最后一章程序设计假定同学们具有PASCAL语言知识。

本书是十年来机器人学研究成果的汇总。本书中所出现的内容大部分已被实验所证实，并在目前使用着的机器人机械手中获得应用。书中有些内容对过去机械手系统中的某些问题进行了澄清，并简化或补充了原来的理论。所有这些理论都是随着数字计算机的智能化而发展起来的。计算机的计算高速、精度和存储功能已使许多理论问题得到了解决。然而，随着大规模集成电路(VLSI)的出现，更多的精确计算问题将获得彻底解决。

本书是参予在伯杜大学四年来的讲课笔记，在麻省理工学院智能实验室的大力帮助下编写而成的。本书排印作者使用了Knuth's Tex系统。书中出现的许多理论是作者于斯坦福大学智能实验室的研究成果。作者感谢约翰·麦克卡西和杰里西·费尔得门，他们为作者进行研究工作提供了许多方便。作者感谢安太尔·珀杰西，力学一章是在他的工作基础上写成的。感谢波鲁斯·西马诺，他对大部分理论的发展起了重要作用。作者非常高兴由于米克·布拉迪和艾里克·歌利姆迪的

支持使书最后得以印刷。约翰·伯克，米克·布拉迪，威廉·费斯尔，托马斯·鲁亚诺——佩雷斯，约翰·鲁哈和布鲁斯·西马诺阅读了本书的部分原稿并订正了许多错误。余下的工作全由作者完成。米尔·保罗帮助了本书的再版和版式变化工作。

绪 论

本书讲述工业机器人机械手、编程及其上传感元件的相互作用。将详细讨论机器人机械手的编程和控制问题，对于象视觉这样的外部传感器，仅当它们和机械手发生联系时才加以讨论。为了全面地理解各章的内容，首先回顾一下工业机器人的发展及扩展其功能时所遇到的问题。

当代工业机器人起源于数控机床和远程操作器。远程操作器或遥控装置是一种允许操作人员在一定距离外能完成某一任务的装置。数控机床是一种根据切削数据的数字编码，自动完成工件加工的机床。

遥控装置是二次世界大战期间为处理放射性材料而研制的[Goertz]。操作者和放射性材料用一混凝土墙隔开，墙上有一个或几个可以观察到放射性材料的孔。这时，远程操作器用以代替操作人员的手。它内部装有一对夹子（从动件），外部装有两个手柄（主动件）。夹子和手柄有5-6自由度的机构联结在一起，为主动件和从动件提供任意的位置和方位。机构用来控制从动件再现主动件的运动。

1947年，第一台电伺服驱动远程操作器研制成功。从动件用伺服控制来跟踪主动件的位置。尽管操作人员能够观察到工作现场，但由于没有给操作人员提供任何力的信息，因而要求部件产生接触的工作难以完成。Goertz 转辟地叙述了远程操作手的功能和工作过程：

“通用机械手可用于搬运物体，推动连杆和把手，装配零件和作为操作双手。在所有这些操作中，当所希望的力及力矩施加到物体上之前，机械手必须与物体接触。当机械手与物体接触时会发生碰撞。操作过程基本上是由以下运动组成：消除不希望力引起的碰撞、施加期望的力和施加期望的运动。碰撞力应尽可能地小，其它不希望力也要尽可能地小。”

1948年，即当点位控制过程操作器研制成功一年以后，一种新型的远程操作器研制成功。在这种装置中，由夹子施加的力可以通过反馈来告诉操作者。同时，操作者又可以知道夹子在做什么动作。

1949年，由于需要研制新型飞机，这种飞机的零件是用机床加工出来的而不是用铆钉铆接的，空军发起了对数控铣床的研制[Rosenberg]。这项研究在于把前述的伺服技术与新近发展起来的数字计算机技术结合起来。待切削的形状以数字的形式存储在穿孔卡片上，然后伺服控制铣床根据卡片上的数字切削金属。MIT 辐射实验室于1953年研制出了这样的机器。

六十年代，George Devol研制出了第一台通用工业机械手[Engelberger]，这是一台将远程操作器的杆机构与数控铣床的伺服轴结合起来的设备。我们可以通过用手将机械手沿一系列点运动，这些点的位置以数字的形式存储起来，让该机械手完成任何简单的工作。动作的执行在于使伺服系统驱动机械手各关节轴，来再现这些位置。这些动作仅限于打开夹子或终端执行器，向终端设备提供信号和等待同步信号。该工业机械手：诸如拆卸铸模工件这样的搬运工作是很理想的。在拆卸铸模工件工作中，机械手的工作顺序是：抓起工件——把工件取出模子——把工件放到传送带上。相对于机械手而言，零件在每一位置都能实现精确定位。象数控(NC)铣床一样，该工业机械手的成功也依赖于高精度，可重复的数字伺服系统。机械手与其工作对象之间没有相互联系。如果铸模机移动位置，机械手就无法工作，这恰似在工件位置发生改变时，数控铣床不能工作一样。但倘若铸模机移动位置，可以对机械手重新示教。该工业机械手的成功之处在于它应用于任何工作位置确定的工作，其可靠性和位置可重复性增加其适应性。

1961年 MIT的Lincoln实验室完成了另一项设计[Ernst]。

在这台装置中，装有触觉传感器的远程操作器同眼臂和计算机连接起来。这时，指令机械手执行工作的是来自手端执行器的触觉反馈，而不是绝对位置反馈。尽管机械手的空间绝对位置能够计算出来，但没有采用，因为当时人们没有进行求解手位置的几何计算。相反，工作被定义为一系列可能接触的状态。就象缺少工作信息限制了位置控制工业机器人的功能一样，由于不知道物体位置的综合概念而限制了这种机械手的功能。

1963年，Roberts [Robots 63] 证明了通过对数字照相板图象处理，得到对组成图象的块状物体进行数学描述的可能性，方法是用齐次坐标变换来表述物体的位置和方位 [Roberts 65]。这项工作之所以重要，是基于下列两个因素：(1) 它证明了物体在照相板图象中进行识别和定位；(2) 它引入了齐次变换，并把齐次变换用作表述物体间相对位置和方位的数据结构。如果物体间的相对位置和方位用齐次变换表示，变换矩阵的乘积运算就建立了物体间的全部关系。第一章里学习齐次变换，本书中将用它来描述物体间、物体与机械手之间的相对位置和方位。

由于接触反馈精度低，速度慢，后来一般都用视觉传感作为输入装置。1967年，台地电视摄像机作输入装置的计算机已能实时地识别物体并确定其位置 [Wichman]。该机械手没有接触传感器，仅依赖于位置伺服关节轴。然而，齐次变换表示了终端执行器在笛卡儿坐标系的位置和方位，而不是表述为一系列非正交机械手关节之间的夹角。Pieper应用闭链理论解决了此问题，这样，机械手就可以在空间笛卡儿坐标内运动 [Pieper]。在第二章里，对于给定的输入，得到了求解终端执行机构在笛卡儿坐标系下的位置和方位的方位。位置和方位以齐次坐标表示。在第三章里，讨论逆问题的解法，即对于终端执行机构已知的机械手，求解其各关节的坐标。这个问题相当困难，需要

直观判断，仅当机械手比较简单，零件数目较少时才能得到解析解。可喜的是目前大部分工业机械手都是这种类型并且是可解的。

1970年，一台配有照相装置和机械手的计算机已能够适应各种场合的工作，同时，斯坦福大学成功地解决了“随机摄动问题”[Feldman]。其方法是将表面具有不同颜色的四个立方体堆放在一起，使得堆放体的每一面都具有不同的颜色。麻省理工学院现在有一这样的装置可供参观和复制。日本研制成功了一个手-眼系统，当给出装配图时，该系统可以装配块状工件。它首先观察装配图，存储观察到的数据，然后建立所要求的结构[Ejiri]。这一研究的潜在应用在于空间探测和工厂自动化。相应于这些目标，视觉研究的任务是识别区分零件和岩石这样很相似的东西，而机械手的研究方向则是产品装配。

利用视觉传感工作的机械手常需要进行小量动作调整。在第四章里，讨论当机械手需要做这些调整运动时，物体与机械手之间的微分关系。当机械手工作在随机场合时，如上述场合，直接把机械手从一个位置移到另一个位置就行不通了。因此引入了运动轨迹的概念。第五章首先以齐次坐标为基础，引入工作的基本形式，然后给出研究关节坐标和笛卡儿坐标这两种运动轨迹形式的理论和方法。由于引入了轨迹的概念，原先用于控制机械手的简单点位伺服系统就不能满足要求了。第六章讲述机械手动力学，这是第七章讨论机械手控制的基础。机械手动力学很难解，其中主要的问题是判别对机械手控制有重大影响的项。这里先用拉格朗日方程求得动力学方程，然后根据第四章得出的微分关系，简化结果方程以得到用符号形式表示的关键控制方程。为了使读者能对整分问题有清楚的认识，控制一章使用了古典控制方法。实际的机械手的控制通常都互不相同，因此这里所讲述的方法仅作为指导原则。

尽管视觉能有力地帮助机械手确定工件的位置，但它对于工件堆

放这要问题毫不益处。这时所需要的是力反馈。力反馈，如上所述在位置控制出现一年后就运用到远程操作器中。日本的 Inoue 研制出了驱动曲柄的机械手 [Inoue]。其方法是以恒定的力矩驱动机械手相应的关节，而不是象往常那样对关节轴进行点位伺服控制。斯坦福大学把 Inoue 方法应用到机械手系统中，该机械手在响应确定关节力矩于儿坐标系内依从方向的指令时，其各关节由计算机和力伺服装置自动选足，而不是靠点位伺服系统来完成 [Paul 72]。第八章讨论在不同坐标下，力和力矩与机械手关节力矩间的关系。第九章研究在使自由度与关节匹配的方法时，为装配提供依从运动的必要性 [Shimano]，利用这种方法，斯坦福大学设计出了一种叫做 WAVE 的语言。使用这种语言，工作就可以用笛卡儿坐标系里的符号，以及主要的力依从和抓取指令来表述 [Paul 77a]。1972 年，利用这种方法成功地组装了一台水泵 [Bolles]。WAVE 系统之所以重要，原因主要在于它第一次把力、触觉、视觉和位置反馈综合在一起考虑，并且用齐次变换的方法，表述它们在实际控制模型中的关系。

当在实验室进行这些研究时，工业机器人工业越来越趋向于对运动进行建模，并且试图用提高工作的方法来改善点位控制机器人的经济性。为了扩展机器人的工作范围，人们把更多的精力放在主机的设计上。Chamaraat Milacron 设计了第一台计算机控制机器人 [Hohn]。该机器人能够和传送带一起使用，传送带的位置由数字编码器确定。计算机用以提供从固定坐标系和动坐标系间的位置变换所需要的信息。

在第十章里讨论机械手编程语言。这里不研究用于机械手的特殊语言，而是把 PASCAL 语言作为机械手的控制语言，以弄清楚机械手编程的基本问题。计算机及其编程语言是工业机器人的基本组成部分，它们在力量通用传感器和一通用驱动装置之间用作逻辑、数字和位置变换接口。

计算机控制工业机器人才是真正的通用自动装置。这种机器人可以随时通过编程来满足不同工作的需要，并可以降低设计费用和减少用传统方法设计自动装置时所需要的工作量。它可以使产品生产自动化，其低成本特点又可以使小批量生产场合的自动化生产成为可能。这样的工业机器人今后将全面改变社会生产方式，象今天这样的简单重复性装配工作应由机器人来完成，而由人完成的将减少到最低程度。

参考文献

- Bolles, R. & Paul, R. P. The Use of Sensory Feedback in a Programmable Assembly System, The Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM-220, Oct. 1973.
- Ejiri, M., Uno, T., Yoda, H., et al. "A prototype Intelligent Robot That Assembles Objects from plane Drawings," *IEEE Trans Computers* C-21, 2 (Feb. 1972), 199-207
- Engelberger, J. F. *Robotics in practice*, IFS Publications Ltd, Kempston, England, 1980.
- Ernst, H. A. A Computer-Operated Mechanical Hand, Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1961.
- Feldman, J. et al. "The Use of Vision and Manipulation to Solve the Instant Insanity Puzzle," *proc. Second Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence*, London, England, 1971, 359-364.
- Goertz, R. C. "Manipulators Used for Handling Radioactive Materials," *Human Factors in Technology*, Chapter 27, edited by E. M. Bennett, McGraw-Hill, 1963.
- Hohn R. E. Application Flexibility of a Computer Controlled Industrial Robot, SME Technical paper, MR 76-603, 1976
- Inoue, H. "Computer Controlled Bilateral Manipulator," *Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineers* 14, 69 (1971), 199-207.
- Paul, R. P. Modeling, Trajectory Calculation and Sensing of a

Computer Controlled Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 177, 1972.

Paul, R. P. WAVE: A Model-Based Language for Manipulator Control. *The Industrial Robot* 4, 1 (March 1977), 10-17.

Pieper, D. L. The Kinematics of Manipulators Under Computer Control, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 72, 1968.

Roberts, L. G. Machine Perception of Three-Dimensional Solids, Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, Report No. 315, 1963.

Roberts, L. G. Homogeneous Matrix Representation and Manipulation of N-Dimensional Constructs, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Document No. MS1045, 1965.

Rosenberg, J. A. History of Numerical Control 1949-1972: The Technical Development, Transfer to Industry, and Assimilation, U.S.C. Information Sciences Institute, Marina del Rey, California Report No. ISI RR-72-3, 1972.

Shimano, B. E. The Kinematic Design and Force Control of Computer controlled Manipulators, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 313, 1978.

Wichman, M. W. The Use of optical Feedback in Computer Control of an Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory Stanford University, AIM 57, 1967.

出版说明

Richard P. Paul 所著 *Robot Manipulators* 一书系统地讨论了机器人机械手的有关理论，包括数学、力学、控制和程序设计等，是目前国外有影响的教科书。本书可作为研究生、高年级学生教材，也可供广大从事机器人机械手研制人员进修用。

考虑到目前的迫切需要，由机器人研究中心组织有关教师、研究生翻译审校本书，由学院情报资料室组织出版。

参加翻译的有张绳远同志（前言）、孙怀安同志（第一、二、三、六章）、王麟森同志（第四、五、八章）、李瑞棠同志（第七章）、常文戈同志（第九章）、李正根同志（第十章）。全书由王麟森同志和孙怀安同志负责名词统一和编辑工作。辛萍同志校对了第四章。最后由陈怀琛副教授、张以杰副教授和楊俊副教授分别进行了总校。

在教育翻译中，对原文中的许多错误作了校正，校正之处不再一一说明。由于出版期限短，错误之处请读者指正。

西北电讯工程学院 机器人研究中心
情报资料室

目 录

序言

概论

第一章	齐次变换	1-1~1-34
第二章	运动方程	2-1~2-22
第三章	运动方程的解	3-1~3-20
第四章	微分关系	4-1~4-36
第五章	运动轨迹	5-1~5-38
第六章	动力学	6-1~6-38
第七章	控制	7-1~7-20
第八章	静力	8-1~8-13
第九章	依从性	9-1~9-16
第十章	程序设计	10-1~10-33

第一章 齐次变换

1.1 前言

研究机器人的操作涉及到目标之间以及目标和机械手之间的关系。本章将拟定出描述这些关系所必需的表示法。类似的表示法问题已在计算机绘图领域中得到解决，它也必须描述目标之间的关系。齐次变换用于本领域中和计算机图象中 [Duda] [Roberts 63] [Roberts 65]。这些变换曾被丹奴维特 (Denavit) 用来描述连杆机构 [Denavit] 而 Pieper 用来描述机械手 [Pieper] [Paul 72] [Paul 77b]。

我们将首先定义向量和平面的标识符，然后引入关于它们的变换，这些变换主要包括移动和旋转，它们可以看成用来表示目标（包括机械手）的坐标系。我们也将引入反变换。较后的一节描述绕一个向量旋转的一般旋转变换。然后描述一个算法，以找出由任一给定的变换所代表的等效旋转轴和旋转角。关于延伸和比例变换的简洁的一节与透视变换一节同时引入。本章以变换方程一节结束。

1.2 标识符

在描述目标的相互关系时，将用到点、向量、平面和坐标系。点向量用小写黑体字母表示。平面用手写体字母表示，而坐标系则用大写黑体字母表示。例如

向量 $\mathbf{v}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}$

平面 $\mathcal{P}, \mathcal{Q}$

坐标系 $\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{CONV}$

我们将用点向量、平面和坐标系表示具有相应数值的变量，例如一个点向量具有三个笛卡儿坐标分量。

如果要相对于坐标系 $\mathbf{I}$ 描述空间中一点 P ，可用向量 $\mathbf{v}$ 而将其

写成 FV ，左上标表示所定义的坐标系。

我们可能也要相对于不同的坐标系，例如 H 来描述同一点 P ，可用向量 W 将其写成 HW 。

虽然两个向量 V 和 W 描述同一点，但是 V 和 W 可能是具有不同坐标分量的两个向量， $V \neq W$ 。同样存在这样的情况，一个向量 a 描述在任何一坐标系中3英尺的点

$${}^{F_1}a \quad {}^{F_2}a$$

在这种情况下，两个向量是等同的，但是描述了两个不同的点，通常若从上下文坐标是显而易见的，则左上标常常被省去。在许多情况下，向量的名称与所描述的目标的名称是相同的，例如一个销子的顶端可用一个相对于坐标系 $BASE$ 的向量 tip 来表示为

$${}^{BASE}tip$$

如果不从上下文可明显地看出所描述的向量是相对于 $BASE$ 的，则可简写成

$$tip$$

如果希望相对于另一坐标系来描述该点，例如 $HAND$ ，就必须利用另一向量来描述这个关系，如

$${}^{HAND}tv$$

${}^{HAND}tv$ 和 tip 都描述同一目标，但具有不同的数值。为了涉及坐标系、点、向量或平面的单独分量，可加下标以表示特殊的分量。例如向量 ${}^{HAND}tv$ 具有分量 ${}^{HAND}tv_x$ 、 ${}^{HAND}tv_y$ 、 ${}^{HAND}tv_z$ 。

1.3 向量

n 维空间中的目标的齐次坐标表示法是一个 $(n+1)$ 维的实体空间，它是一个特殊的透视投影就重新产生了一个 n 维空间。这也可以看作对于每一个向量又附加了一个额外的坐标，即一个比例系数，于是，

如果每一个分量（包括比例系数）乘以一个常数，所得的向量就具有相同的意义。

一个点向量

$$\mathbf{V} = a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k} \quad (1.1)$$

式中 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别为坐标轴 x 、 y 、 z 的单位向量，该向量用齐次坐标中的列阵表示为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= x/w \\ b &= y/w \\ c &= z/w \end{aligned} \quad (1.3)$$

这样，向量 $3\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + 5\mathbf{k}$ 可以表示为 $[3, 4, 5, 1]^T$ ，或 $[6, 8, 10, 2]^T$ 或 $[-30, -40, -50, -10]^T$ 等等。上标 T 表示行向量转置成列向量。在坐标原点的向量，即零向量，用 $[0, 0, 0, n]^T$ 表示，其中 n 是一个非零比例系数。向量 $[0, 0, 0, 0]^T$ 是不够的。例如 $[a, b, c, 0]^T$ 的向量代表一个在无穷远处的向量，用来表示方向，加上其值的有限向量都不以任何方式改变其值。

我们还将用到向量的点积和叉积。设有两个向量

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \\ \mathbf{b} &= b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k} \end{aligned} \quad (1.4)$$

定义向量的点积用“ $\cdot$ ”表示为

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \quad (1.5)$$

两个向量的点积是一个标量。叉积用“ $\times$ ”表示，是另一个向量，它垂直于两个向量所形成的平面，且由下式定义