

操作机器人 动力学与算法

[苏] E. II. 波波夫 等著



机械工业出版社

操作机器人动力学与算法

〔苏〕 E.П.波波夫 等著

遇立基 陈循介 译

李昌琪 校



机械工业出版社

本书是苏联近年来出版的《机器人技术的科学基础丛书》的一册。其主要内容是论述操作机器人执行机构动力学和运动控制算法,以及在控制过程中处理视觉信息的算法。

本书可供从事机械手和机器人研究、设计工作的科研人员 and 工程技术人员参考。对于在多刚体系统动力学、机构动力学和运动控制算法、图象识别与物景分析等方面有兴趣的读者,以及高等院校有关专业的师生亦有裨益。

МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ РОБОТЫ ДИНАМИКА И АЛГОРИТМЫ

Е. П. ПОПОВ А. Ф. ВЕРЕЩАГИН

С. Л. ЗЕНКЕВИЧ

МОСКВА «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1973

操作机器人动力学与算法

〔苏〕 Е. П. 波波夫 等著

遇立基·陈循介 译

李昌琪 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

北京市密云县 印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 12 · 字数 263 千字

1983 年 8 月北京第一版·1983 年 8 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,300 · 定价 1.85 元

*

统一书号: 15033·5485

译者序

机器人技术是一门新兴的技术学科，许多国家都在大力开展研究工作。由于电子计算机技术和现代控制理论的发展，目前机器人技术已经达到了一个新的水平，在我国也日益受到重视。近年来，有不少单位开展了这方面的工作，首先就遇到机器人执行机构动力学和运动控制算法以及控制系统的构成原理等一系列基本问题。为了适应这种需要，我们翻译了《操作机器人动力学与算法》这本书。

本书是苏联近年来出版的一套《机器人技术的科学基础丛书》的一册，内容比较丰富，层次分明，系统性强。第一篇主要介绍机器人广义的分类法、操作机器人的用途和结构，大致反映了机器人技术领域的概况。第二篇论述操作机器人执行机构的动力学和运动控制算法。对于数学模型的建立，着重介绍按极值问题处理的间接方法，着眼于应用数学规划理论和采用电子计算机的计算与控制技术，应用的数学工具主要是齐次座标及其变换的矩阵方法。在阐述人工智能的基本概念时，着重介绍了启发式程序和数理逻辑的谓词演算法，以及机器人控制系统按递阶控制结构的构成原理。第三篇介绍机器人图象识别和物景分析的原理。本书内容基本上反映了机器人技术在七十年代研究的主要方面。

译者分工是：陈循介译第一、二、八、九章，遇立基译第三、四、五、六、七章。李昌琪同志对全书译文做了仔细校正。对译文中错误及不当之处，恳请读者指正。

前 言

机器人技术是一门新的使人们的手工操作和智力活动向机械化、自动化发展的科学技术。

目前，操作机器人开始获得极其广泛的应用（按我们的观点，文献中所用的术语“机器人-操作机”是不恰当的，在本书中不用这个术语[⊖]）。操作机可视为操作机器人的一部分，也即看作是它的执行装置。

机器人技术的方法与构成现代机械化、自动化手段的传统方法的根本不同点在于它的万能性和多目的用途。这是由于具备了很发达的操作系统以及逐步接近于目前称之为“人工智能”的控制和感觉系统。

我们这一代人将亲眼看到为国民经济的各种需要而创建机器人技术系统的初期阶段。目前简直对所有工业部门，如对于从事深水作业与研究，对于在各种有害的或人根本不能到的条件下的操作，无人参与的采掘与矿井工作，在宇宙空间的活动，以及诸如此类的各个方面，采用操作机器人已经是非常迫切的任务。机器人技术还具有很大的社会意义。

同时，建立机器人技术系统不仅在技术上而且在科学上也是极其复杂的课题。直到目前，对机器人的实际需要与制作它的技术可能性相适应的条件才成熟了。

不同类型的机器人（包括工业机器人）已被制作出来并且正在运用。为使机器人技术进一步发展，还需要在最新成

⊖ 实际上本书仍有多处使用这个术语——译者注。

就的基础上进行更为综合性的科学与技术的研究工作，这种研究工作涉及人类知识的各种不同领域。

近几年来，虽然发表了大量科学论文，但有关机器人技术方面的书籍文献仍很缺乏。本书将阐述研究机器人复杂操作系统动力学的方法及其用数字计算机和模拟数字控制器模拟的问题，并阐述在机器人控制系统中信息处理的一些算法和控制系统的构成原理。

第一章介绍机器人的一般概念及其分类。第二章论述应用范围和操作系统的一般特点。

第三章是阐明后续各章中要运用的齐次座标及齐次变换方法的数学引论。

第四章专门论述适于多构件执行机构的高斯最小约束原理。

第五章在运用高斯原理的基础上使用特殊坐标系和最优化方法，描述和研究操作机器人多构件执行机构的力学。详细分析了在数字计算机上模拟具有任意自由度数和任意约束的操作系统动力学的方法。

第六章阐述机器人操作系统运动控制的算法。分析关于机构位置的正问题与逆问题的解，操作系统的运动规划以及非线性控制算法。然后论述通过对机器人位置的序列校正和运动的线性规划按速度矢量与力矢量的线性控制算法。

第七章论述研制人工智能机器人的方法。

第八章与第九章阐述处理视觉信息的算法，在操作机器人动作的控制过程中要运用视觉信息。介绍视觉信息的机器表述，物景分析，视觉信息分析程序的识别及其与控制程序的联系。

本书基本上是作者们自己在莫斯科包曼高等技术学院的

Ⅶ

研究成果，但在个别地方也利用了其他作者的著作，对此都做了相应的注明。

在本书的写作过程中，作者之间分工如下：E. II. 波波夫——第一、二章，A. Φ. 维列沙金——第三、四、五、六、七章，C. II. 渐凯维奇——第八、九章，另外 B. II. 格尼罗佐夫写了 § 6.3。

B. M. 波诺马廖夫教授在手稿付印前提出了宝贵意见，为此作者们深表谢忱。

目 录

前 言

第一篇 操作机器人的总分类和叙述

绪 论	1
第一章 定义和分类	2
§ 1.1 机器人的概念	3
§ 1.2 操作机器人的分类	8
第二章 操作机器人的用途和结构	13
§ 2.1 操作机器人的用途和使用范围	13
§ 2.2 操作机器人的执行机构	21
§ 2.3 操作机的驱动装置	28

第二篇 操作机器人执行机构 的动力学与运动控制

绪 论	32
第三章 齐次座标与变换	45
§ 3.1 齐次座标	46
§ 3.2 投影变换	54
第四章 机器人执行机构动力学中的高斯最小 约束原理	62
§ 4.1 高斯原理	63
§ 4.2 主动力	66
§ 4.3 机构构件的惯量	72
§ 4.4 对五类运动副机构的高斯原理	79

第五章 操作机器人执行机构的力学原理	88
§ 5.1 特殊坐标系	89
§ 5.2 广义力	96
§ 5.3 简单运动链的动力学	104
§ 5.4 操作机动力学与动态规划	112
§ 5.5 对偶方程组方法和电子计算机模拟	121
§ 5.6 动力学与控制	149
§ 5.7 执行机构的闭式运动方程	156
§ 5.8 执行机构动态分析和力分析的精确算法	158
第六章 运动控制算法	178
§ 6.1 机器人轨迹规划及非线性控制算法	183
§ 6.2 策略级线性控制算法	208
§ 6.3 根据动态规划法规划在广义座标空间的轨迹	228
第七章 具有人工智能的机器人	244
§ 7.1 实现人工智能的途径	248
§ 7.2 递阶控制	260

第三篇 视觉信息的分析算法及其在操作 机器人控制中的应用

绪 论	267
第八章 输入图象的预先简化方法	270
§ 8.1 视觉信息的机器表述	273
§ 8.2 亮度函数的微分和平滑算子	276
§ 8.3 轮廓点的分离	284
§ 8.4 轮廓的近似、轮廓线的修整	292
§ 8.5 轮廓图的描述方法	300
§ 8.6 分离轮廓的程序的组织	302
第九章 用轮廓图代表的物景分析	306

§ 9.1 节的几何学及其标记	306
§ 9.2 不矛盾物景说明的获得	312
§ 9.3 划分物体	322
§ 9.4 识别和决定组成物景的物体的空间位置	331
§ 9.5 视觉信息分析程序与控制程序的关系	346
参考文献	361
附录 俄汉词汇对照	371

第一篇 操作机器人 的总分类和叙述

绪 论

大家知道，术语“机器人”在文献中出现并不很久。但关于这种我们现在称它为机器人的人的机械助手的观念，在古代就已产生。引人注目的是，荷马在《叙事诗》中赋予他的“黄金的女仆”，即金属机器人以智慧（如我们现在所说的人工智能）及劳动的力量。但是，不仅在古代，而且在现代的幻想文学中，机器人都被描绘成人状的，即不仅其动作特性，而且其外貌亦与人相似。在科学和技术中，“机器人”一词用来表征新型的技术系统，它和人的外貌可以没有相似之处，但其动作在某种程度上却复现人的动作和智能机能。

创制机器人的实际目的，是用它来在社会的生产和研究活动中进行一些劳动，这些劳动对人来说，或者是很费力的（或在限定时间内简直不可能完成的），或者是沉重的、不愉快的、单调的、不需熟练技巧的、有害于健康的、对生命有危险的，以及正如人们所说的，在那些超出人们生活活动可能性范围之外的极端条件下的劳动（在水下深处、在宽广的宇宙中、在有瓦斯污染的矿井中、在原子装置中等等）。

这种新型的技术系统与一般传统的机械化和自动化方式的原则区别，在于它具有多目的用途、易于调整来完成各种不同的劳动作业和智能动作，其中包括在变化之中以及没有事先说明的情况下的作业。

机器人技术不能说是某种陈旧技术的改良。它是各种体

力劳动和脑力劳动机械化、自动化的崭新阶段。机器人技术给人类以新的、无可比拟的可能性来完成那些目前以任何其他现有的技术手段都无法实现的作业。

很早以前，很多能工巧匠及发明家就创造了其特性近似于机器人的玩偶和供消遣的装置。但是，只有现在，在社会物质和文明发展的现代水平上，在科学技术革命成就的基础上（计算技术，掌握新的物理的、化学的和生物的过程），在提高劳动强度时，在现实前提下才产生了发展工业的和特殊的机器人技术。在国民经济的许多实际使用中，机器人在经济上是合算的，并且具有重要的社会意义（如象作为消除人们单调、沉重和危险的手工劳动的手段，解决劳动力问题，在矿井和海洋深处实行无人参加的劳动等）。

各类机器人技术的发展远景是非常广阔的，特别是，如果考虑到那种事实，即当采用机器人技术时有可能使用新的、更有效得多的原理去组织工作并提出和解决以前用其他方法无法解决的新任务。

第一章 定义和分类

目前，还没有明确的“机器人”概念的定义。在不同的文献资料中和科学习惯中，对这个术语给予不同的意义。

在本章，详细地讨论操作机器人的分类。同时，还试图采用广义的“机器人”的概念，它包括不同的、可以意料到的机器人的种类。

进而，在第二章，谈到不同型式操作机器人的用途和使用范围，并对这些机器人的执行系统作简单的论述。对操作机的传动系统及其驱动装置作简要的介绍。

§ 1.1 机器人的概念

在文献中，遇到形式极其纷繁的机器人概念的定义。不过，机器人技术还如此年青，而且目前发展又如此迅速，以致所有具体的概念定义，均有冒很快即变成不完整的、有局限性的、不能包括新近出现的所有各种各样机器人的危险。

因此，适宜在总的定义上来谈论的只有一点：机器人是技术系统的一种类别，它可以其动作复现人的动作和智能机能。同时，机器人与传统的自动机(自动系统)的区别在于它有更大的万能性和多目的的用途，可以反复调整以执行不同的功能。

在广义上讲，执行人所固有的智能动作的计算和逻辑机系统都可属于机器人，例如：下象棋的机器、编写乐谱和诗的机器，以及自动翻译机、自动编书目机、运输代办处的自动售票机、带评价其效果的复杂系统或设施的自动设计机等等。机器人可充当自动驾驶仪，如果说与现时传统的自动驾驶仪有什么区别的话，那就是，它将“会”在复杂和不能预见的变化飞行情况下进行定向和作出决定，其本身能力接近于驾驶员的智能。

现在人们把这样一类信息搜索装置也划归机器人，例如：在海底寻找物体并确定它们的位置的自行走的或被拖曳的自动水声侦测仪。研究环境或个别物体特点的带有信息的智能处理元件或其本身行动能与外界被研究的特性相适应的任何自动装置一般都可称为机器人。

最后，目前应用最广泛的是各种形式的操作机器人即模仿人手在劳动中的动作的机器人。它们的分类在下面 § 1.2 节中叙述。但是，开始时可根据以上所述对机器人进行分类。

现将总分类列于表 1.1 中，并附以简要说明。

表1.1 机器人的总分类

分 类	型 式	变 型
A. 操作的	I. 自动的	1. 程序的 (第一代) 2. 适应的 (第二代) 3. 智能的 (第三代)
	II. 生物技术的	1. 指令的 2. 模仿的 3. 半自动的
	III. 交互的	1. 自动化的 2. 监视的 3. 对话的
B. 可 动的 (可移动的)	I. 步伐式的	1. 程序的 2. 生物技术的 3. 智能的
	II. 自动运动的	1. 程序的 2. 适应的 3. 智能的
	III. 外骨架的	1. 开放式的 2. 潜水衣式的 3. 跳跃式的
B. 信息的	I. 研究器	1. 连续的 2. 聚积的 3. 适应的
	II. 搜索器	1. 接触式的 2. 远距离被动的 3. 远距离主动的
	III. 测定器	1. 接触式的 2. 远距离被动的 3. 远距离主动的
Г. 创造性 游戏的	I. 设计者	1. 程序的 2. 交互的 3. 智能的
	II. 游戏的	1. 位置游戏 2. 动态游戏 3. 确定系统和措施的有效性
	III. 能构思的	1. 自动翻译机 2. 文摘器、书刊编目器、出纳器 3. 作曲机、有高度想像力的创作机

(续)

分 类	型 式	变 型
Ⅱ. 综合的	Ⅰ. 操作-信息的	1. 程序的 2. 生物技术的 3. 智能的
	Ⅱ. 可动操作的	1. 程序的 2. 生物技术的 3. 智能的
	Ⅲ. 不同机器人的综合	1. 程序的 2. 生物技术的 3. 智能的

可动的(可移动的)机器人的第一种型式包括: 步伐式系统(БI), 它或者能按预先规定的程序自动控制(БI.1); 或者由操作者远距离参加进行半自动控制(生物技术系统БI.2); 或者具有自动识别物体、积累经验和在外界不确定的或变化的条件下决定运动的人工智能元件(БI.3)。

自动运动系统(型式БII), 例如: 不同运动原理(车轮-步伐式的、履带式的、链条式的等)的水下的和星际的自动行走机器具有三种变型。第一种为按固定的给定运动程序进行程序控制的(БII.1)。第二种为适应控制的(БII.2)机器人, 能够感知周围物体, 并使自己的动作与不确定的环境相适应(如在遇到障碍物时)。第三种为具有人工智能元件的(БII.3), 即具有更多种的感知环境的、识别情况的及利用积累的经验(自学)自动决定自己的动作的手段。属于此类的还有上述具有适应性的或带人工智能元件的自动驾驶仪以及其他在不同环境中控制运动物体的类似系统。

有趣的是: 在荷马《叙事诗》中, 也有对自动机器人的生动的描写:

“有一次他准备好了二十个三脚架……

在三脚架的脚上，他安上了黄金的轮子，

以便他们自己滚到上帝的怀抱里，

以便自己回到家里，令人惊异”。

可动的（可移动的）机器人的个别型式是所谓外骨架的（BⅡ），它是人的四肢的增力器。其第一种变型为开放式的（BⅡ.1），它具有关节联结的直接与人体相联的机械构件的形式。人仅仅实现控制作用，不需特别的力，依靠自己的四肢行走。当完成沉重的工作、提升大的重物和在艰难的条件下步行时，全部的力承受在自身的机械四肢上。

这种型式的另一种变型为潜水衣式的外骨架（BⅡ.2），控制机构亦是这样的型式，但是装在潜水衣中（例如，潜水的）。

最后，第三种变型是跳跃式机构（BⅡ.3），它供人们逾越沟渠、草丛等。

然后在表中列有信息机器人类别，它已在上面用例子说明过。它本身包括三种变型的机器人。

对于不能直接观察及不允许人参与的环境和物体特性的《研究者》（BⅠ），它们可连续给出信息（BⅠ.1），可储存信息并根据呼唤给出信息（BⅠ.2）。它们也可以根据外界环境和物体被测出的特性使自己的动作和进一步的研究过程与外界环境相适应（BⅠ.3）。（这三种变型在表 1.1 中列出）。

信息机器人的下一个型式是《搜索器》（BⅡ），它包括能对有给定特性的对象物进行搜索的一些机器人。搜索可用接触方法来进行（BⅡ.1），或者远距离地进行，这时有两种方案：用被动的方法（BⅡ.2）和主动的方法（BⅡ.3），即：按

照有和没有本身的辐射来分。《测定器》型(BⅡ)信息机器人用于研究和确定带未知特性的对象物,也同样具有这些变型。

下面探讨创造性-游戏的机器人类别。它的第一种型式称为《设计者》(ΓI),用于复杂物体和系统的设计过程自动化及综合研究、试验的规划等等。它们的变型有:程序的(ΓI.1),交互的(ΓI.2)——有人参与与进行设计的机器交流,智能的(ΓI.3),即带有人工智能元件的自动式的。

第二种型式《游戏机器人》(ΓII)在极其不同的各种实际使用场合中具有用于位置的(ΓII.1)和动态的(ΓII.2)游戏的两种变型,并还可有根据与游戏环境有联系的各种准则去确定系统和措施的有效性的一类变型(ΓII.3)。

列于表中的第三种型式《能构思的机器人》(ΓIII)的变型,是很清楚的。

末了,在表中提出的最后一种类型为综合机器人,它是在一个系统中把上述不同种类机器人的特性结合起来。综合机器人的系统以及不同机器人的综合可以是非常先进的和各式各样的。它们可以具有统一的控制中心,即公共控制的机器人,它按照存储在其记忆装置中的任务并按照一定的算法指导其余的执行机器人的动作:操作的、移动的、信息的机器人等等。这些综合机器人可以用于生产车间中、仓库中、建筑工地上、在水下作业、在无人参与的地下矿井中工作时等等。此外,机器人可以与其他实现工作机械化、自动化的传统手段综合为一个统一的系统。

当然,所述机器人的总分类并不能说就是完善的了。其目的是想把近来从各种文献中涌现出来的有关机器人技术广泛领域的各种问题用比较系统的方法粗略地加以介绍。