

战强一编著

机器人学

机构、运动学、动力学
及运动规划

ROBOTICS

Mechanisms, Kinematics, Dynamics
and Motion Planning



清华大学出版社



机器人科学
与技术丛书



机器人学

机构、运动学、动力学及运动规划

战强◎编著
Zhan Qiang

ROBOTICS

Mechanisms, Kinematics, Dynamics
and Motion Planning



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了机器人学的基本理论与基础知识。全书共7章,包括机器人的发展简介、机器人机构、坐标变换、运动学、静力学、动力学和运动规划等内容。

本书是作者在使用十几年的讲义基础上吸收最新的研究成果编写而成的,涵盖了作者从事机器人教学近二十年的素材积累和理论理解。本书在写作上,力求理论阐述清楚,语言通俗易懂,理论与例题相结合,可作为机器人工程及相关专业本科生和研究生教材,也可以供从事机器人研究、开发和应用的科技人员学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机器人学:机构、运动学、动力学及运动规划/战强编著. —北京:清华大学出版社,2019
(机器人科学与技术丛书)

ISBN 978-7-302-52740-4

I. ①机… II. ①战… III. ①机器人学 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第067126号

责任编辑:盛东亮 钟志芳

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:11.5

字 数:276千字

版 次:2019年9月第1版

印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:49.00元

产品编号:082012-01

前言

PREFACE

20世纪90年代初,笔者作为大一新生,参观了哈尔滨工业大学机器人研究所,自此喜欢上了机器人,并在这个领域学习工作至今。机器人已由当初种类少、应用有限的阶段发展到了现在种类繁多、应用无处不在的新阶段。作为机器人发展过程的一个亲历者,也是一件很值得自豪的事情。

10年后笔者开始为北京航空航天大学(北航)机器人研究所的研究生主讲“机器人运动学”课程,该课程不久又增加了机器人动力学和运动规划的内容,改名为“机器人学”,笔者一直主讲至今。该课程已由一门学院选修课,变成了校级精品课,每年都有校外的同学来选修。在讲课的过程中,笔者通过学习参考国内外的著名教材,搜集机器人发展历程中的重要资料,编写例题及对重要理论进行推导证明等,逐渐形成了有北航特色的机器人学讲义。本书就是在这本讲义的基础上编写而成的。笔者自2015年开始筹划动笔,期间因忙于其他工作导致编写断断续续,今日终于成稿,内心如释重负。

本书共7章,涵盖了机器人的发展简史、发展现状、数学基础、机构、运动学、静力学、动力学和运动规划等机器人学的核心内容。第1章首先对机器人的定义做了介绍,然后分古代、近代、现代及国内四部分介绍了机器人的发展概况,接着介绍了机器人的基本概念和分类,最后介绍了机器人的主要研究方向。第2章对机器人的机构做了介绍,以机构的基础知识作为引导,介绍了机器人机构的分类、特点及机器人机构简图的画法,在此基础上对串联机器人和并联机器人的典型机构做了介绍,并给出了每种机构的简图。第3章介绍了机器人的位姿描述和坐标变换,这是机器人学的数学基础,首先介绍了机器人位置和姿态的数学描述方法,在此基础上介绍了点的坐标系平移、坐标系旋转及其综合的计算方法,然后介绍了齐次坐标、齐次变换、旋转变换通式及齐次变换通式等内容,最后介绍了机器人姿态的RPY角、欧拉角和四元数表示方法。第4章是本书的重点内容,首先介绍了机器人运动学的建模方法,重点介绍了改进的D-H建模方法,并提供多个例题,然后介绍了机器人运动学逆解的方法,包括数值解方法、解析解方法及雅可比方法,重点介绍了Paul反变换法和雅可比矩阵。第5章介绍了机器人静力学,首先介绍了机械臂连杆受力与关节平衡驱动力的计算方法,然后介绍了静力平衡方程、静力映射分析及静力学的逆问题,最后介绍了力与力矩的坐标变换方法。第6章介绍了机器人动力学,主要介绍了Lagrange动力学方法、Newton-Euler动力学方法及Kane动力学方法。第7章介绍了机器人的运动规划,首先介绍了机器人的路径规划,主要包括栅格法的全局路径规划方法和势场法的局部路径规划方法;然后介绍了机器人的轨迹规划,主要包括关节空间轨迹规划和操作空间轨迹规划;最后在关节空间的轨迹规划中介绍了直线插值函数、三次多项式插值函数及五次多项式插值函数,在操作空间的轨迹规划中主要介绍了直线轨迹规划和圆弧轨迹规划方法。在本书中,通过提供

证明、例题和对比分析等方式力求把知识和理论介绍清楚,说明白。

为了给本科生和研究生提供一本简明清楚的教材或参考书,笔者编写了本书。作为本科生的教材时,内容讲到第4章即可;作为研究生教材时,可通讲全书。此外,本书第1章含有大量机器人发展历史的内容介绍,也可以作为中小学生学习机器人的参考书。

本书是在参考了国内外著名教材的基础上编写而成,包括熊有伦院士的《机器人学》(1993版)、蔡自兴教授的《机器人学》(第2版)、Craig教授的 *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (Third Edition)。此外,还参考、引用了国内外发表的一些文章、图片及资料,在此深表感谢。

借此机会也向指导和帮助过笔者的前辈、导师、同事、同窗、好友表示感谢,特别感谢笔者的博士导师王树国教授、博士后导师张启先院士。

北航复杂机构与智能控制实验室的许钦桓、张印、田新扬、陈翔臻、王一凡、史洪燊等参与了本书的编写及校对工作,在此深表感谢。

由于笔者的经验水平有限,加之编写时间仓促,书中可能还有不足之处,希望得到大家的批评指正。

战 强

2019年1月

于北京航空航天大学

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人的定义	1
1.2 机器人的发展简介	3
1.2.1 古代关于机器人的记载	3
1.2.2 近代机器人的发展	4
1.2.3 现代机器人的发展	10
1.2.4 国内机器人的发展	16
1.3 机器人的专业术语	18
1.4 机器人的分类	23
1.5 机器人的主要研究方向	25
1.6 小结	25
参考文献	26
第 2 章 机器人机构	28
2.1 机构的基础知识	28
2.2 机器人机构分类	29
2.2.1 串联机器人机构	29
2.2.2 并联机器人机构	29
2.2.3 其他机器人机构	30
2.3 机器人机构简图画法	31
2.3.1 典型机器人机构的图形符号	31
2.3.2 其他机器人机构的简图画法	32
2.4 典型机器人机构介绍	33
2.4.1 串联机器人机构介绍	33
2.4.2 并联机器人机构介绍	38
2.5 小结	43
参考文献	43
第 3 章 机器人位姿的数学描述与坐标变换	45
3.1 引言	45
3.2 机器人位姿的数学描述	45
3.3 点的坐标变换	47
3.3.1 坐标系平移(姿态相同)	47

3.3.2	坐标系旋转(原点相同)	49
3.3.3	坐标变换综合(平移+旋转)	54
3.4	齐次坐标与齐次变换	55
3.4.1	齐次坐标	56
3.4.2	齐次变换	56
3.5	旋转变换通式	60
3.5.1	旋转矩阵通式	60
3.5.2	等效转轴与等效转角	62
3.6	齐次变换通式	64
3.7	机器人姿态的其他表示方法	65
3.7.1	RPY角	65
3.7.2	欧拉角	67
3.7.3	四元数	68
3.8	小结	71
	参考文献	71
	附录 绕固定坐标系的多个坐标轴转动的旋转矩阵计算	72
第4章	机器人运动学	73
4.1	引言	73
4.2	运动学建模方法	73
4.2.1	三角几何建模方法	74
4.2.2	D-H建模方法	75
4.3	运动学逆解方法	89
4.3.1	逆运动学的数值解方法	90
4.3.2	逆运动学的解析解方法	92
4.3.3	机器人运动学逆解的特性分析	98
4.3.4	逆运动学的雅可比方法	100
4.4	小结	111
	参考文献	112
	附录 Paul反变换法 MATLAB程序	112
第5章	机器人静力学	114
5.1	引言	114
5.2	机械臂连杆受力与关节平衡驱动力	115
5.2.1	机械臂连杆受力计算	115
5.2.2	关节平衡驱动力计算	116
5.3	静力平衡方程与静力映射分析	119
5.3.1	静力平衡方程	119
5.3.2	静力映射分析	121
5.4	静力学的逆问题	122
5.5	力与力矩的坐标变换	122
5.6	小结	124
	参考文献	124

第 6 章 机器人动力学	125
6.1 引言	125
6.2 Lagrange 动力学方法	126
6.2.1 Lagrange 动力学建模	126
6.2.2 Lagrange 动力学方程分析	129
6.3 Newton-Euler 动力学方法	132
6.3.1 惯性张量	132
6.3.2 Newton 方程与 Euler 方程	133
6.3.3 递推的 Newton-Euler 动力学方法	134
6.4 Kane 动力学方法	141
6.4.1 Kane 方法介绍	141
6.4.2 Kane 动力学方法应用举例	145
6.5 小结	147
参考文献	147
第 7 章 机器人的运动规划	148
7.1 引言	148
7.2 机器人的路径规划	148
7.2.1 全局路径规划	149
7.2.2 局部路径规划	154
7.3 机器人的轨迹规划	157
7.3.1 关节空间的轨迹规划	157
7.3.2 操作空间的轨迹规划	165
7.4 小结	172
参考文献	172

机器人学是一门新兴学科,仅有 80 余年的发展历史,如今已成为社会关注和科学研究的热点。了解机器人的发展历程及相关知识对于学习机器人技术大有裨益。本章首先介绍机器人的定义,以使读者能清楚地了解机器人是什么;然后介绍机器人的发展历程、机器人的专业术语及机器人的分类;最后介绍机器人的主要研究方向。

1.1 机器人的定义

目前,世界上有各种各样的机器人,有地上跑的,有天上飞的,有水中游的……,从太空到地面,从地面到水中,可以说机器人几乎无处不在。然而,什么是机器人?或者机器人的定义是什么呢?

“机器人”是 20 世纪出现的一个新名词。1920 年,捷克作家卡勒·恰佩克(Karel Čapek, 1890—1938 年,见图 1.1)发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》(*Rossum's Universal Robots*),在剧本中恰佩克由捷克语 Robota 创造出了 Robot 一词,意为“奴隶,苦力”,这就是“机器人”一词的来源。在该剧本中,机器人是人造的没有情感和思维,只会劳动的自动机器,但后来它们的制造程序发生改变,机器人变得像人一样有了爱恨情感,最终推翻了人类,把人类当成了奴隶。

迄今为止,不同的组织和学者为机器人给出了多个不同的定义。

1967 年在日本召开的第一届机器人学术会议上,专家们提出了两个具有代表性的机器人的定义。一个是森政弘与合田周平的定义,即“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性等 7 个特征的柔性机器”。从这一定义出发,森政弘又提出用自动性、智能性、个体性、半机械半人性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限性、移动性等 10 个特性来表示机器人的形象。另一个定义是加藤一郎提出的具有如下三个条件的机器被称为机器人:①具有脑、手、脚三要素的个体;②具有非接触传感器(用眼、耳获取远方信息)和接触传感器;③具有平衡觉和固有觉的传感器。

国际标准化组织(ISO)对机器人做出如下定义:“机器人是一种自动的、位置可控的、具



图 1.1 Karel Čapek^[1]

有可编程能力的多功能机械手,这种机械手有几个轴,能够借助可编程操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置,以执行各种任务”。

美国国家标准局(ANSI)对机器人的定义是“一种能够进行编程并在自动控制下执行某些操作和移动作业任务的机械装置”。

《大英百科全书》中关于机器人的定义是“机器人是一种可取代人工的自动操作机器,尽管其外表不像人或不能像人那样执行任务(Any automatically operated machine that replaces human effort, though it may not resemble human beings in appearance or perform functions in a humanlike manner——Encyclopaedia Britannica)”。

日本机器人协会将机器人定义为“一种具有感觉和识别能力,并能够控制自身行为的机器”。

中国有科学家对机器人的定义是“机器人是一种自动化的机器,所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力,如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力,是一种具有高度灵活性的自动化机器”。

随着机器人技术的飞速发展,机器人不断向各个领域拓展,机器人从外观上已脱离了最初仿人型机器人和工业机器人所具有的形状,其功能和智能化程度也大大增强。现在来看,过去的机器人定义一般只能描述一类或几类机器人,难以对所有类型的机器人进行准确定义,因此在新的时代,机器人的定义也需要不断地充实和完善。

为了便于理解,我们在此给出一个简单好记的机器人定义:**机器人是一种高度自动化、高度智能化的机器**。智能化是机器人区别于其他高度自动化机器(如多轴数控机床)的最重要特征。

需要说明的是,有些软件程序也被称为“机器人(Robot/Bot)”,是指某些能不间断地执行信息搜索比较任务的软件程序,主要用于搜索引擎。

关于机器人没有统一定义的问题,读者们大可不必为此担忧。众所周知,机器人一词最早诞生于科幻剧本中,它是人们结合自身提出的一种充满幻想的对象,而这种科幻对象往往缺乏具象,其描述上的弹性特别大,因此是很难完整定义和描述的。此外,现实中的机器人又随着科技的发展或新技术的出现,不断涌现出新的结构、新的功能和新的类型,而有些科技又是跨时代的,因此以前的机器人定义很难描述新机器人的特征。也许机器人永远不会有有一个统一的定义,但正是如此,才说明了机器人技术有无限的生命力和不断进步发展的空间。

工业机器人是目前应用最广泛的机器人,下面给两个工业机器人的定义,便于读者们理解。

(1) 工业机器人是一种设计用来搬运材料、零件、工具或特殊设备的可再编程的多功能操作臂,它能够通过可变的编程运动执行各种任务(Industrial Robot is a re-programmable, multifunctional manipulator designed to move materials, parts, tools, or specialized devices through variable programmed motions to perform a variety of tasks)。

(2) ISO 定义工业机器人是一种自动控制的、可再编程的多用途操作臂,一般有三个或以上的可编程关节(An industrial robot is defined by ISO as an automatically controlled, reprogrammable, multipurpose manipulator programmable in three or more axes)。

1.2 机器人的发展简介

本节主要从古代关于机器人的记载、近代机器人的发展、现代机器人的发展以及我国机器人的发展这四个方面来介绍机器人的发展历程。

1.2.1 古代关于机器人的记载

我国古代就有关于机器人或类机器人的记载。据《列子·汤问》记载,西周穆王时期(公元前 1023—957 年),能工巧匠偃师就用动物毛皮、木头、树脂、颜料制作出了酷似真人的木偶,能歌善舞,“千变万化,惟意所适。王以为实人也”,这是我国最早关于机器人的记载。

据《墨经》记载,春秋后期(公元前 507—444 年),我国著名的木匠鲁班制造了一只木鸟,能在空中飞行“三日不下”。

东汉时期,科学家张衡(公元 78—139 年)发明了计里鼓车和指南车。如图 1.2 所示,计里鼓车每行一里,车上木人击鼓一下,每行十里击钟一下。指南车具有复杂轮系装置,若车上木人运动起始指向南方,则该车无论如何运动,其指向始终不变,与指南针有异曲同工之妙。

三国时期,建兴九年至十二年(公元 231—234 年),蜀国丞相诸葛亮北伐中原时,为解决山路崎岖、运输军粮困难的问题,创造出了“木牛流马”。木牛流马不用吃草,其载重为“一岁粮”(约四百斤左右),每日行程为“特行者数十里,群行三十里”,为蜀国十万大军运送粮食。

在国外,公元前 2 世纪,亚历山大时代的古希腊人发明了最原始的机器人:一个以水、空气和蒸汽压力为动力的会动的雕像,它可以自己开门,还可以借助蒸汽唱歌。

1640 年,意大利人莱昂纳多·达芬奇(Leonardo DaVinci)设计了一个铠甲武士,如图 1.3 所示。该铠甲武士用齿轮和连杆作为传动装置,能够像人一样做各种动作,如挥动胳膊、坐下、起立、转动头部、开合下颌等。



图 1.2 计里鼓车^[2]

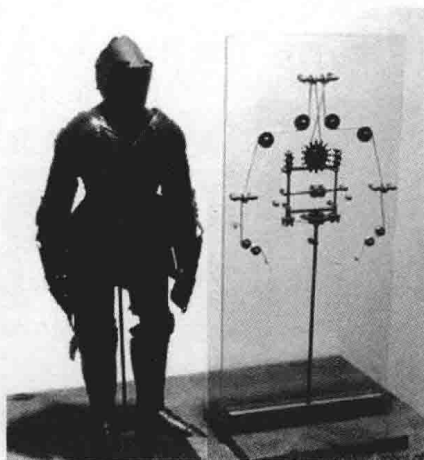


图 1.3 铠甲武士^[3]

1662 年,日本的竹田近江利用钟表技术发明了自动机器玩偶,并在大阪的道顿堀演出。1738 年,法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明一只机器鸭,能完成啄食、鸣叫、游泳等

动作。

1770年,瑞士钟表匠雅克·德罗(Jaquet Droz)父子制作了会写字、绘画、弹琴的三种人偶,如图1.4所示。这些人偶是利用齿轮传动和发条驱动原理制成的,制作精巧,动作逼真,宛如真人一般,在欧洲风靡一时。

1770年,英国著名钟表商Williamson向清朝乾隆皇帝进贡了一个铜镀金写字人钟,高231厘米,钟内有一个写字人偶,如图1.5所示,该人偶能用毛笔写出“八方向化,九土来王”的对联,且写字时人偶头部随之摆动,栩栩如生。目前该写字人钟存放于故宫钟表馆。



图 1.4 三种人偶^[4]



图 1.5 铜镀金写字人钟^[5]

1.2.2 近代机器人的发展

机器人的研究始于20世纪中期,其技术背景是计算机技术、控制理论、自动化技术的快速发展以及原子能的开发利用。

1939年,美国纽约世博会上展出了西屋电气公司制造的家用机器人Elektro,它由电缆供电,可以行走,会说77个字,甚至可以抽烟,虽然离真正干家务还差得很远,但它让人们机器人的认识变得更加具体。随着20世纪科技的飞速发展,西方发达国家感觉恰佩克描述的机器人很快就会出现,因此对机器人产生了极大的恐惧和不安。

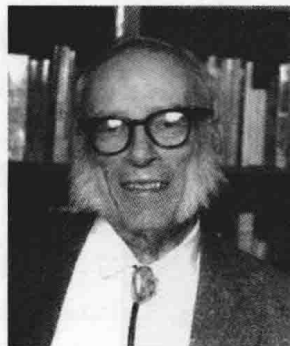


图 1.6 Isaac Asimov^[6]

1942年,科幻作家阿西莫夫(Isaac Asimov,1920—1992年,参见图1.6)在其科幻小说《Runaround》中提出了著名的“机器人学三原则(The Three laws of Robotics)”:

第一、机器人不得危害人类,也不能在人类受到伤害时袖手旁观(A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm);

第二、机器人必须服从人类的命令,但命令违反第一条原则时例外(A robot must obey the orders given it by human beings except where such orders would conflict with the First Law);

第三、在不违反第一条和第二条原则时,机器人必须保护自身不受伤害(A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law)。

上述三原则虽然只是科幻小说中的创造,但却成为机器人研究的伦理性纲领,机器人学

术界一直将这三原则作为机器人开发的准则。

自1946年世界上第一台通用计算机ENIAC问世以来,计算机技术取得了惊人的进步,向高速度、大容量、低价格的方向飞快发展。1948年,诺伯特·维纳(Norbert Wiener)出版了《控制论》(Cybernetics),阐述了机器中的通信和控制机能与人的神经、感觉机能的共同规律,率先提出了以计算机为核心的自动化工厂的概念。同时,制造业大批量生产的迫切需求推动了自动化技术的发展,其结果之一便是1952年MIT研制出世界首台数控机床。与数控机床相关的控制、机械零件的研究又为机器人的开发奠定了基础。

原子能实验室的恶劣环境需要某些具有操作功能的机械代替人处理屏蔽室内的放射性物质。在这一需求背景下,美国的橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)与阿尔贡国家实验室(Argonne National Laboratory)于1947年开发了遥控机械手,1948年又开发了机械式的主从机械手。主从机械手由同构的两个机械手组成,主手和从手由机械传动装置连接,主手由人操控,从手能同步完成主手相同的运动和操作。

1954年,美国发明家戴沃(George Charles Devol, 1912—2011年,见图1.7)提出了工业机器人的概念雏形 Programmed Article Transfer,命名为 Unimate,意思为通用自动化(Universal Automation),并申请了专利(U. S. Patent 2988237)。估计是该专利涉及的技术过于超前,直到1961年才被授权。

1955年,J. Denavit 和 R. S. Hartenberg 联合在《Applied Mechanics》期刊上发表了一篇名为 *A kinematic notation for low-pair mechanisms based on matrices* 的论文,用齐次变换矩阵描述两个相邻连杆坐标系间的空间位姿关系,为工业机器人的运动学建模提供了重要的理论基础,迄今该方法仍然被广泛采用。



图 1.7 George C. Devol^[7]

1959年,戴沃与合伙人约瑟夫·恩格尔伯格(Joseph Engelberger, 1925—2015年,见图1.8)成立了世界上第一家制造机器人的公司——Unimation,并联手制造出世界上第一台工业机器人 Unimate,如图1.9所示,开创了机器人发展的新纪元。由于恩格尔伯格在工业机器人的研发和宣传方面的巨大贡献,他被称为“工业机器人之父”,虽然世界上第一台工业机器人的发明人是戴沃。Unimate 机器人只有5个自由度,采用真空管控制、液压驱动。

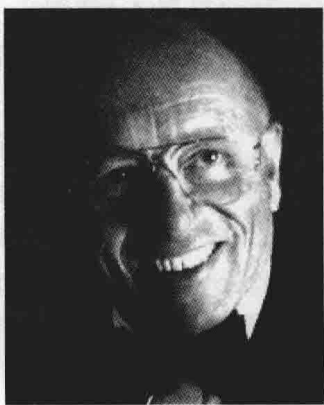


图 1.8 Joseph Engelberger^[8]



图 1.9 Unimate 机器人^[9]

1961年,Unimate 机器人被用在了通用汽车在新泽西州的 Inland Fisher Guide 工厂,用于将铸造的汽车门把手等热的铸件放入冷却池中,如图 1.10 所示,从而将工人从恶劣的工作环境中解放出来。

1962年,美国机械与铸造公司(American Machine and Foundry)推出第一台圆柱坐标机器人 Verstran,意思是“万能搬运”,如图 1.11 所示。同一年,6台 Verstran 搬运机器人被应用于美国坎顿(Canton)的福特汽车制造厂。该机器人也与 Unimate 机器人一样成为商业化的工业机器人,出口到世界各国。

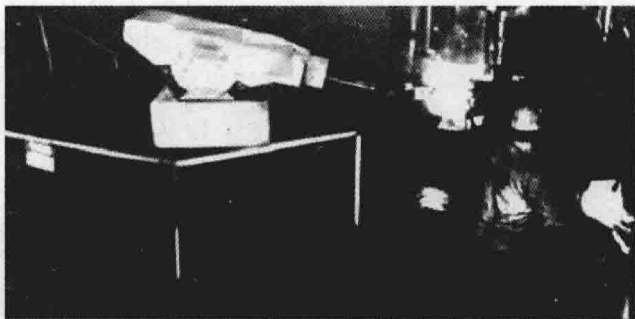


图 1.10 Unimate 机器人在通用汽车工厂^[10]

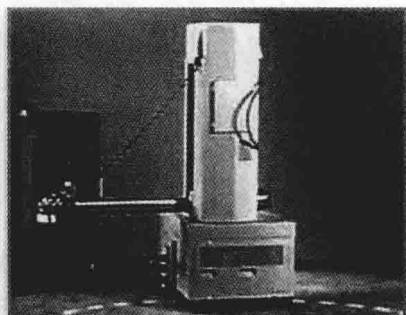


图 1.11 Verstran 圆柱坐标机器人^[11]

20世纪60年代中期开始,美国麻省理工学院(MIT)、斯坦福大学、英国爱丁堡大学等陆续成立了机器人实验室。美国开始研究第二代带传感器、有感知的机器人,并向人工智能领域进军。

1965年,MIT的L. G. Roberts演示了第一个具有视觉传感器、能识别与定位简单积木的机器人系统,他通过计算机程序从数字图像中提取出诸如立方体、楔形体、棱柱体等多面体的三维结构,并对物体形状及物体的空间关系进行描述。Roberts的研究工作开创了以了解三维场景为目的的三维立体机器视觉的研究。

1967年,日本成立了专门的机器人研究学会——人工手研究会,现改名为仿生机构研究会,同年召开了日本首届机器人学术会议。

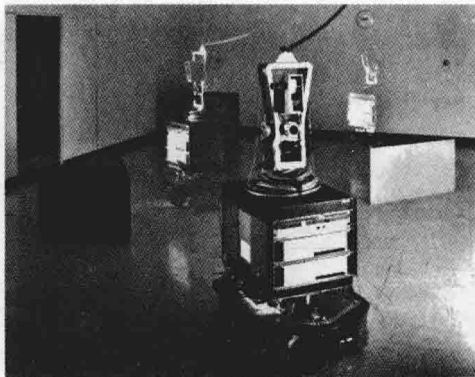


图 1.12 Shakey 机器人^[12]

1968年,美国斯坦福研究所(Stanford Research Institute)研发出机器人 Shakey,这是世界上首台采用了人工智能的移动机器人,如图 1.12 所示。它安装了摄像机、三角测距仪、碰撞传感器等,通过无线系统由两台计算机控制,能够自主进行感知、环境建模、行为规划,能自动寻找木箱并将其推到指定位置。但是,控制它的计算机体积庞大,运算速度慢,导致 Shakey 往往需要数小时来分析环境并规划运动路径。Shakey 被认为是世界上第一台智能机器人,由此拉开了第三代机器人研发的序幕。

1969年,通用汽车公司在 Lords-town 装配厂安装了首台 Unimation 点焊机器人,机器人的使用大大提高了生产效率,90%以上的车身焊接作业可通过机器人来自动完成。

1969年,挪威 Trallfa 公司(后被 ABB 公司收购)推出了第一个商业化应用的喷漆机器人,如图 1.13 所示。在 1967 年挪威劳动力短缺期间,该公司就曾使用机器人来喷涂独轮手推车(Wheelbarrows),第一款商用喷漆机器人就由此发展而来。

1969年,Unimation 公司与日本川崎重工(Kawasaki Heavy Industries)签订许可协议,在日本生产 Unimate 机器人,同年川崎重工成功开发出 Kawasaki-Unimate 2000 机器人,这是日本生产的第一台工业机器人,如图 1.14 所示。

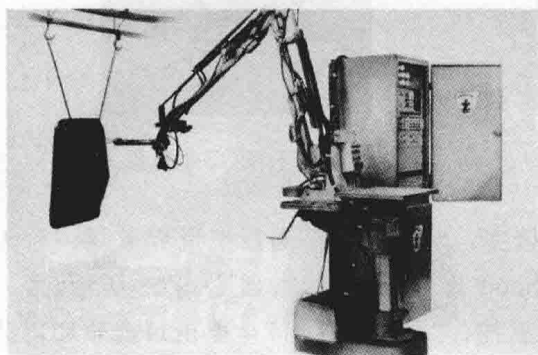


图 1.13 Trallfa 喷漆机器人^[13]

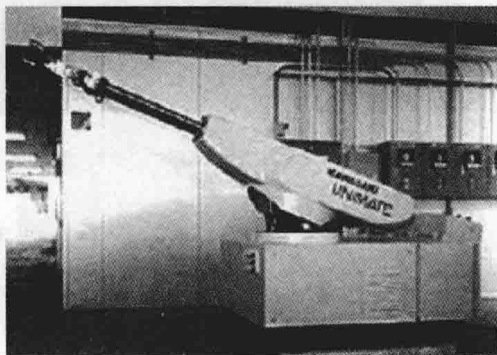


图 1.14 Kawasaki-Unimate 2000 机器人^[14]

1969年,斯坦福大学机械工程系学生 Victor Scheinman 设计出了 Stanford Arm,如图 1.15 所示,这是机器人发展历史上的第一个全电驱动的 6 轴机器人(5 轴转动,1 轴移动)。6 轴机器人的出现,使得跟踪空间中的任意路径成为可能,推动了机器人向更加复杂领域的应用,如装配、弧焊等。该机器人的出现是机器人,尤其是工业机器人发展历程上的里程碑性事件。

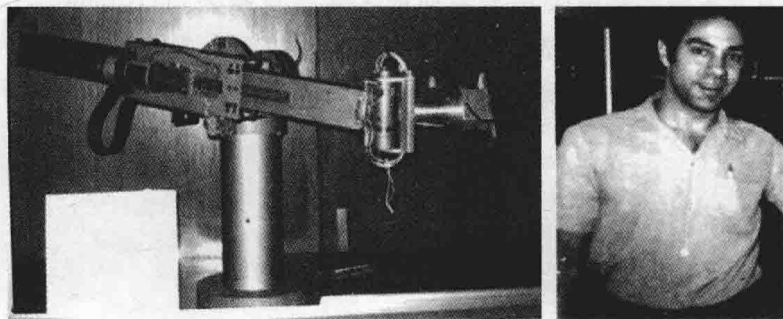
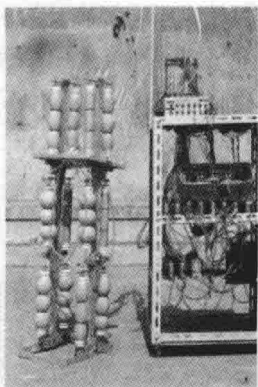
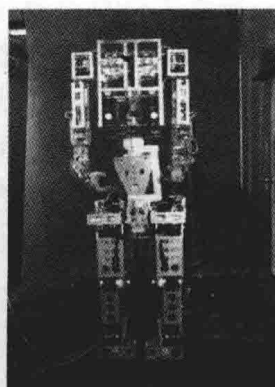


图 1.15 Stanford Arm^[15]与 Victor Scheinman

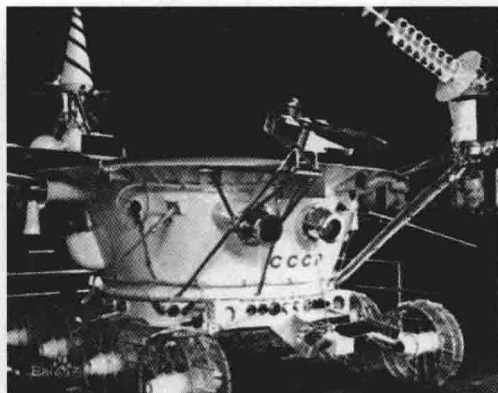
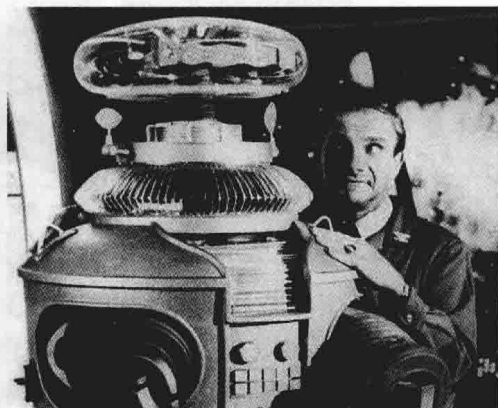
1969年,日本早稻田大学加藤一郎(Ichiro Kato)教授成功研发出第一台以双足行走的机器人 WAP-1,如图 1.16 所示。WAP-1 采用橡胶制成的人工肌肉作为驱动器,实现了双足在平面上的运动。1973年,加藤一郎又开发出世界上第一个全尺寸的仿人机器人 WABOT-1,如图 1.17 所示,该机器人有视觉和语音对话系统,能以日语与人对话,能搬运物品,其智力与一岁半儿童相当。加藤一郎作为仿人机器人的先驱,长期致力于仿人机器人研究,为仿人机器人的研究做出大量开创性的工作,被誉为“仿人机器人之父”。

图 1.16 WAP-1^[16]机器人与加藤一郎教授图 1.17 WABOT-1 机器人^[17]

1970年11月17日,苏联的“月球17号”(俄文:Луна-17)探测器把世界上第一台无人月球表面巡视机器人——“月球车1号”(Lunokhod 1)送到了月球,如图1.18所示,第一次实现了在地球上对另一个星球上机器人的远程遥控。“月球车1号”主要由仪器舱和自动行走底盘组成,重756kg,长2.2m,宽1.6m,高1.35m,由太阳能电池板和备用电池联合供电,由同位素热源保持系统温度,车上装有电视摄像机和多种环境科学测量仪器,可把拍摄的月面照片和测量结果发回地球。“月球车1号”由两列独立驱动的车轮(每列4个)实现在月面的运动,能转弯、倒退和爬上 30° 的斜坡,轮子直径0.51m。“月球车1号”在月球表面工作到1971年10月4日,总行程约10.54km。

1970年,在美国召开了第一届国际工业机器人学术会议。一年以后,机器人的研究得到迅速、广泛的普及。

1973年,美国著名机床制造公司辛辛那提·米拉克隆公司(Cincinnati Milacron Inc.)的理查德·豪恩制造了一台由小型计算机控制的工业机器人T3,如图1.19所示,它采用液压驱动,能提升的有效负载达45kg。

图 1.18 月球车1号^[18]图 1.19 T3 机器人^[19]

1973年,德国库卡公司(KUKA)研发出第一台工业机器人,命名为Famulus,如图1.20所示,这是世界上第一台电机驱动的6轴工业机器人。1973年全世界运行的工业机器人数量达到3000台。

1974年,瑞典通用电机公司 ASEA(ABB 公司的前身)开发出世界上第一台全电驱动、由微处理器控制的工业机器人 IRB 6,如图 1.21 所示,主要应用于工件取放和物料搬运。该机器人负载 6kg,使用英特尔 8 位微处理器控制,该微处理器的内存容量仅 16KB。

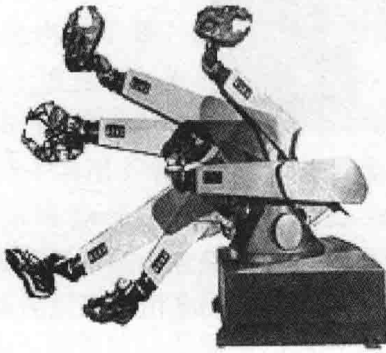


图 1.20 Famulus 机器人^[20]

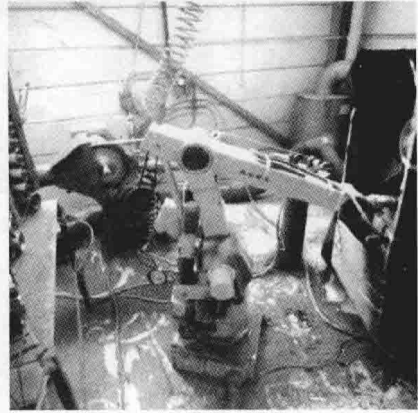


图 1.21 IRB 6 机器人^[21]

1975年,意大利的 Olivetti 公司开发出直角坐标机器人 SIGMA,如图 1.22 所示,它是一个应用于组装领域的工业机器人,在意大利一家组装厂安装运行。

1978年,日本山梨大学(University of Yamanashi)的牧野洋(Hiroshi Makino)教授发明了 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm) 机器人,意为选择柔性装配机械臂,如图 1.23 所示。1981年,Sankyo Seiki 公司和 Nitto Seiko 公司分别开发出了商业化的 SCARA 机器人产品。SCARA 机器人一般有 4 个自由度(3 个转动,1 个移动),特别适合于轻型物品的快速转移和装配。

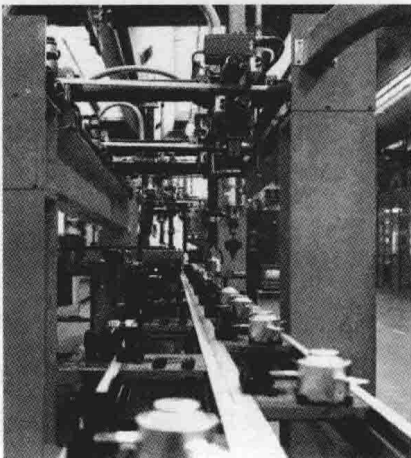


图 1.22 SIGMA 机器人^[22]



图 1.23 SCARA 机器人^[23]

1978年,美国 Unimation 公司推出由 Victor Scheinman 主持设计的通用工业机器人 PUMA(Programmable Universal Machine for Assembly),如图 1.24 所示,并应用于通用汽车装配线,这标志着工业机器人技术已经完全成熟。