

BIPED WALKING ROBOT

双足步行机器人

解仑 王志良 李敏嘉 / 编著



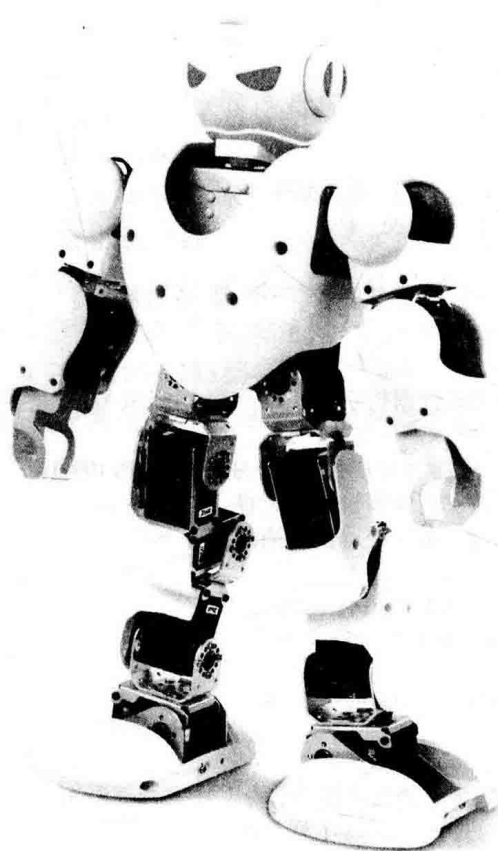
双足步行机器人代表着机器人研究应用领域的水平
本书包括双足步行机器人的发展和国内外动态、基础理论与方法、相关技术
实验平台、行为生成技术、情感化步态、12个典型实验

智能制造与装备制造业转型升级丛书

BIP ~~ROBOT~~ WALKING
ROBOT

双足步行机器人

解仑 王志良 李敏嘉 / 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书在介绍分析双足步行机器人的发展动态和相关理论、技术的基础上,着重通过实验操作的方法向读者讲述双足步行机器人的制作技术。在介绍双足步行机器人概况、理论与方法、相关技术、实验平台、动作生成器、情感化步态等内容之后,针对双足步行机器人设计了12个标准实验,这些实验都可以在基于作者自主研究开发的双足步行机器人平台上实际运行,并给出了所有的参考答案,以飨读者。

本书可以作为大学本科及专科学生、职业技术类学生和中学师生的机器人实验教学参考书,也适宜从事计算机、机械电子工程、自动化、智能科学、数字娱乐的科技人员阅读和研究。

图书在版编目(CIP)数据

双足步行机器人/解仑,王志良,李敏嘉编著. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2017.7
(智能制造与装备制造业转型升级丛书)
ISBN 978-7-111-57208-4

I. ①双… II. ①解…②王…③李… III. ①机器人
技术 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第146556号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:罗莉 责任编辑:翟天睿
责任印制:常天培 责任校对:胡艳萍
北京京丰印刷厂印刷
2017年7月第2版·第1次印刷
184mm×260mm·13.25印张·318千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-57208-4
定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

智能制造与装备制造业转型升级的重要技术基础与应用领域之一是机器人科学与技术，而双足步行机器人又代表着机器人研究应用领域的最高水平，是青少年学习掌握机器人技术的重要途径和手段，主要涉及人工智能、计算机硬件制作与软件控制、先进传感器技术等。如何更好地让青少年学习掌握这门技术，尤其是通过实验制作的方法，由浅入深地向读者传授双足步行机器人技术，是我们撰写这本书的最终目的。

本书以大学本科和专科学生、职业技术类学生和中学师生为主要读者对象，详细介绍双足步行机器人的制作技术与方法。全书共分为7章。第1章主要介绍双足步行机器人的发展过程和国内外研究动态；第2章介绍双足步行机器人的基础理论和方法；第3章介绍双足步行机器人的相关技术；第4章介绍双足步行机器人的实验平台；第5章介绍双足步行机器人的行为生成技术；第6章介绍双足机器人情感化步态；第7章介绍双足步行机器人的12个典型实验，并给出其参考答案。

本书由解仑、王志良、李敏嘉编著，制定主要内容、划分章节和统稿。其中第7章的12个实验都可以在基于作者研究开发的双足步行机器人平台上进行实际运行，读者只要具备我们的这种环境，按照书中的指引，就可以自己学习、动手做实验，最终真正掌握双足步行机器人的制作技术与方法。这是本书的特色所在。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持，在此表示诚挚的感谢，同时感谢国家自然科学基金（61672093，61432004）和国家重点研发计划重点专项课题（2016YFB1001404）的支持。作者可以免费提供书中相关实验的电子文档及程序。作者的电子信箱 E-mail: jiqiren_ustb@sohu.com，电话：010-62332641。

由于作者的水平有限，书中肯定有不少的缺点和疏漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言	
第1章 绪论 1	
1.1 机器人概述 1	
1.1.1 机器人发展史 1	
1.1.2 机器人的分类 2	
1.1.3 机器人的定义与三定律 3	
1.1.4 机器人技术发展动向 4	
1.1.5 类人机器人技术 4	
1.1.6 机器人系统理论 7	
1.1.6.1 机械系统 7	
1.1.6.2 人工心理 7	
1.1.6.3 智能控制 8	
1.1.6.4 人工生命 9	
1.1.7 双足步行机器人 9	
1.2 各国研究状况 10	
1.2.1 日本和韩国 10	
1.2.1.1 日本本田公司 10	
1.2.1.2 日本索尼公司 12	
1.2.1.3 其他 14	
1.2.1.4 日本机器人研究主要代表 人物 14	
1.2.1.5 韩国的机器人发展 16	
1.2.2 美国和欧洲 16	
1.3 国内研究状况 19	
1.4 其他相关技术 22	
1.5 相关参考资料 23	
1.5.1 学术会议和期刊 23	
1.5.2 网站 23	
1.6 小结 24	
参考文献 24	
第2章 双足步行机器人相关理论与 方法 25	
2.1 概述 25	
2.2 双足步行机器人相关理论与方法 的形成及发展 26	
2.2.1 稳定性与控制方法 26	
2.2.2 双足步行机器人行为发生方法 27	
2.2.3 人机接口方法 27	
2.2.3.1 人机接口方法的改进 30	
2.2.3.2 人机接口方法的发展趋势 31	
2.3 理论难点 33	
2.3.1 人工智能理论 33	
2.3.2 人工心理与人工情感 34	
2.3.3 遗传算法的应用 34	
2.3.4 基于仿生学原理的步态控制 35	
2.3.5 动力学模型 36	
2.3.5.1 动力学分析 37	
2.3.5.2 ZMP 稳定性判据 37	
2.3.6 人机交互的实现方法 39	
2.4 小结 40	
参考文献 40	
第3章 双足步行机器人的相关技术 42	
3.1 动作自动生成——行为数据库技术 42	
3.2 3D 虚拟仿真技术 42	
3.3 双足步行机器人建模的方法与技术 44	
3.3.1 ADAMS 建模方法 44	
3.3.2 模型的数据转换 44	
3.4 多智能体技术 45	
3.4.1 智能体通信技术 46	
3.4.1.1 通信方式 46	
3.4.1.2 通信语言 47	
3.4.1.3 通信模型 47	
3.4.1.4 通信服务器 47	
3.4.1.5 通信服务 48	
3.4.2 多智能体机器人系统的数据通信与 协调控制 48	
3.5 小结 49	
参考文献 49	
第4章 双足步行机器人实验平台 51	
4.1 双足步行机器人控制系统 52	
4.2 双足步行机器人的上位机软件 53	
4.2.1 初始化设定模块 53	
4.2.2 机器人的运行模式与通信协议 55	
4.2.3 双足步行机器人控制端软件 56	

4.2.4 多机器人控制	59	5.5 小结	84
4.3 总体设计架构	61	参考文献	84
4.4 小结	61	第6章 双足机器人情感化步态	86
参考文献	62	6.1 引言	86
第5章 双足步行机器人的行为生成		6.2 情感模型相关理论	86
技术	63	6.3 基于欧式空间的人工情感模型及 Ekman 情感理论	88
5.1 多智能体控制的实现	63	6.4 双足机器人步态情感模型的建立	89
5.1.1 多智能体的特点	63	6.5 基于情感的双足运动系统	92
5.1.2 多机器人动作协调设计及转化 程序的实现	64	参考文献	95
5.1.3 “千手观音”机器人多智能体 控制的实现	67	第7章 双足步行机器人技术的课程	
5.2 双足步行机器人的情感模型、行为决 策及情绪熵	71	实验	96
5.2.1 隐马尔可夫模型	71	实验一 典型 PIC 单片机控制芯片的编程 实验	96
5.2.2 情感模型及行为决策的设计	72	实验二 常用传感器实验	111
5.2.3 机器人情感转移控制的具体 实现	74	实验三 舵机控制实验	118
5.2.4 情绪熵的选取	75	实验四 机械结构设计与认识实验	127
5.3 双足步行机器人的语音控制	77	实验五 简单动作调试实验	133
5.3.1 语音在双足步行机器人控制平台 上的实现	77	实验六 动作数据编程实验	142
5.3.2 语音数据库的设计	80	实验七 上位机编程实验	150
5.4 双足步行机器人动作的设计	82	实验八 双足步行机器人串行口通信 实验	157
5.4.1 基于情感方面的动作设计	82	实验九 ZMP 实验	168
5.4.2 基于性格方面的动作设计	83	实验十 多智能体协调控制	177
		实验十一 复杂动作实验	184
		实验十二 语音控制程序实验	190

第1章 绪 论

1.1 机器人概述

1.1.1 机器人发展史

机器人的历史源远流长，早在我国的西周时期，一名叫做偃师的能工巧匠就造就了一个能歌善舞的伶人，这是有据可查的第一个“机器人”。在1800年前的汉朝，张衡造出了举世闻名的地动仪和计里鼓车。在三国时期的诸葛亮发明了木牛流马，用来运送粮草。在国外，公元前2世纪亚历山大时期，古希腊人造就出了“自动机”——以空气、水、蒸汽压力为动力的会动的雕像。这些都可以看做是广义上的机器人。

美国的德沃尔（George G. Devol）设想了一种可控制的机械手，他首先突破了对机器人的传统观点，提出机器人并不一定必须像人，但是必须能做一些人的工作。1954年，他依据这一想法设计制作了世界上第一台机器人实验装置，发表了《适用于重复作业的通用性工业机器人》一文，并获得了美国专利。

德沃尔将遥控操纵器的关节型连杆机构与数控机床的伺服轴连接在一起，预定的机械手动作一经编程输入后，机械等就可以离开人的辅助而独立运行。这种机器人也可以接受示教而完成各种简单任务。

1959年，英格伯格和德沃尔联手制造出第一台工业机器人。由英格伯格负责设计机器人的“手”“脚”“身体”，即机器人的机械部分和完成操作部分；由德沃尔设计机器人的“头脑”“神经系统”“肌肉系统”，即机器人的控制装置和驱动装置。它成为世界上第一台真正的实用工业机器人。

英格伯格在大学攻读伺服理论，这是一种研究运动机构如何才能更好地跟踪控制信号的理论。德沃尔曾于1946年发明了一种系统，可以“重演”所记录的机器的运动。1954年，德沃尔又获得可编程机械手专利，这种机械手臂按程序进行工作，可以根据不同的工作需要编制不同的程序，因此具有通用性和灵活性，英格伯格和德沃尔都在研究机器人，他们认为汽车工业最适于用机器人干活，因为汽车工业是用重型机器进行工作的，生产过程较为固定。

这种机器人外形有点像坦克炮塔，基座上有一个大机械臂，大臂可绕轴在基座上转动，大臂上又伸出一个小机械臂，它相对大臂可以伸出或缩回。小臂顶有一个腕子，可绕小臂转动，进行俯仰和侧摇。腕子前头是手，即操作器。这个机器人的功能和人手臂功能相似，如图1-1所示。

这是世界上第一台真正的实用工业机器人。此后英格伯格和德沃尔成立了“Unimation”公司，兴办了世界上第一家机器人制造工厂。第一批工业机器人被称为“尤尼梅特（UNIMATE）”，意思是“万能自动”。他们因此被称为机器人之父。1962年美国机械与铸造公司

也制造出工业机器人，称为“沃尔萨特兰（VERSTRAN）”，意思是“万能搬动”。“尤尼梅特”和“沃尔萨特兰”就成为世界上最早的、至今仍在使用的工业机器人。

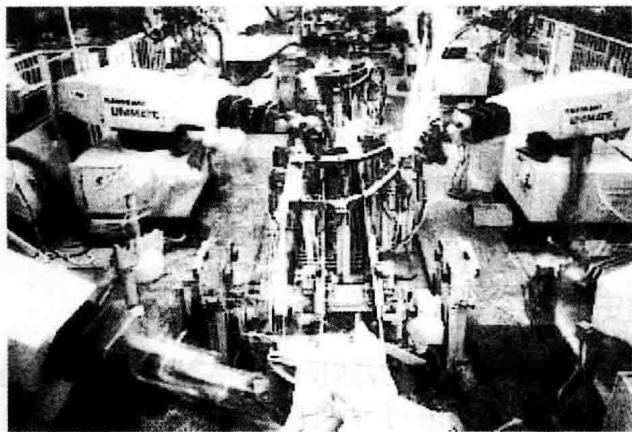


图 1-1 世界上第一台工业机器人“尤尼梅特”正在生产线上工作

英格伯格和德沃尔制造的工业机器人是第一代机器人，属于示教再现型，即人手把着机械手，把应当完成的任务做一遍，或者人用“示教控制盒”发出指令，让机器人的机械手臂运动，一步步完成它应当完成的各个动作。

1967 年日本川崎重工公司从美国购买了机器人的生产许可证，日本从此开始了对机器人制造和开发的热潮。

20 世纪 80 年代，计算机技术推动机器人技术的发展达到了新的水平。上到宇宙飞船，下至海洋开发都采用了机器人作业。机器人技术已成为高科技应用领域中的重要组成部分。

第二代是有感觉的机器人，它们对外界环境有一定感知能力，并具有听觉、视觉、触觉等功能。机器人工作时，根据感觉器官（传感器）获得的信息，灵活调整自己的工作状态，保证在适应环境的情况下完成工作。如：有触觉的机械手可轻松自如地抓取鸡蛋，具有嗅觉的机器人能分辨出不同饮料和酒类。

第三代机器人是智能机器人，它不仅具有感觉能力，而且还具有独立判断和行动的能力，并具有记忆、推理和决策的能力，因而能够完成更加复杂的动作。中央计算机控制手臂和行走装置，使机器人的手完成作业，脚完成移动，机器人能够用自然语言与人对话。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”，而是以一种“认知—适应”的方式自律地进行操作。

智能机器人在发生故障时，通过自诊断装置能自诊断出故障部位，并能自修复。今天，智能机器人的应用范围大大地扩展了，除工农业生产外，机器人还应用到各行各业，机器人已具备了人类的特点。机器人向着智能化、拟人化方向发展的道路是没有止境的。

1.1.2 机器人的分类

机器人按不同的分类方式可分为很多种，如按应用环境可分为工业机器人和特种机器人；按功能可分为操作型机器人、程控型机器人、示教再现型机器人、数控型机器人、感觉控制型机器人、适应控制型机器人、学习控制型机器人和智能机器人等。

关于机器人如何分类，国际上没有制定统一的标准，有的按功能分，有的按负载重量分，有的按控制方式分，有的按自由度分，有的按结构分，有的按应用环境分。我国的机器人专家从应用环境出发，将机器人分为两大类：工业机器人和特种机器人。所谓工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人。而特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人。包括服务机器人、水下机器人、娱乐机器人、军用机器人、农业机器人、探索机器人等。在特种机器人中，有些分支发展很快，有独立成体系的趋势，如服务机器人、水下机器人、军用机器人、操作机器人等。目前，国际上的机器人学者，从应用环境出发将机器人也分为两类：制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务性类人机器人，这和我国的分类是一致的。

1. 按照机器人从低级到高级的发展程度分类

(1) 第一代机器人 第一代机器人主要指只能以“示教—再现”方式工作的工业机器人。目前国际上商品化、实用化的机器人大都属于第一代机器人。

(2) 第二代机器人 第二代机器人是智能机器人。它具有多种感知功能，可进行复杂的逻辑思维、判断决策，在作业环境中独立行动。

(3) 第三代机器人 第三代机器人是未来机器人。

2. 按照开发内容和目的分类

按照开发内容和目的分类基本上有3类机器人：①工业机器人 (Industrial Robot)；②操纵型机器人 (Teleoperator Robot)；③智能机器人 (Intelligent Robot)。

3. 按照机器人的结构形式分类

机器人可分为关节型机器人和非关节型机器人。其中关节型机器人的机械本体部分一般为由各种关节串接起若干连杆组成的开链式机构。

1.1.3 机器人的定义与三定律

在科学界，科学家会给每一个科技术语一个明确的定义，机器人问世已有几十年了，但是对于机器人的定义仍然是仁者见仁，智者见智，没有一个统一的意见。原因之一是机器人还在发展，新的机型、新的功能不断涌现。根本原因主要是因为机器人涉及了人的概念，成为一个难以回答的哲学问题。

1886年法国作家利尔亚在他的小说《未来的夏娃》中将外表像人的机器起名为“安德罗丁”。1920年捷克作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《罗萨姆德万能机器人》。剧本中，卡佩克把捷克语“Robota”写成了“Robot”，该剧预告了机器人的发展对人类社会的悲剧性影响，引起了大家的广泛关注，被当成了机器人一词的起源。

在1967年日本召开了第一届机器人学术会议上，人们提出了两个有代表性的定义。一个是森政弘与合田周平提出的：“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机器半人性、自动性、奴隶性等7个特征的柔性机器”。从这一定义出发，森政弘又提出了自动性、智能性、个体性、半机器半人行、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；另一个是加藤一郎提出的具有如下3个条件的机器称为机器人：

具有脑、手、脚等三要素的个体；

具有非接触传感器（用眼、耳接受远方信息）和接触传感器；

具有平衡觉和固有觉得传感器。

1987年国际标准化组织 ISO 对工业机器人进行了定义：“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能，能完成各种作业的可编程操作机^[7]。”

我国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。”在研究和开发未知以及不确定环境下作业的机器人的过程中，人们逐步认识到机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技术的结合。

现代的机器人技术在不断地发展着，随着机器人的进化和人工智能的进步，这些定义都会得到不断的完善和发展，甚至有可能重新对机器人进行崭新的定义。

美国的艾萨克·阿西莫夫是一位化学家和有着世界声望的科普作家，他对科幻小说的最大贡献之一是“发明”了“机器人三定律”。三定律从逻辑学的角度对科幻小说中恣意妄为的机器人进行了行为规范，对今天的机器人研制也有着重要的指导意义。

机器人学三定律：

第一定律——机器人不得伤害人，也不得见人受到伤害而袖手旁观。

第二定律——机器人应服从人的一切命令，但不得违反第一定律。

第三定律——机器人应保护自身的安全，但不得违反第一、第二定律。

1.1.4 机器人技术发展动向

当前和今后的机器人技术正逐渐向着具有行走能力、对环境的自主性强、具有多种感觉（比如可以感觉形状、重量、硬度、温度和湿度等）能力的方向发展。

机器人也正在逐渐具有智能。美国贝尔科尔公司已成功地将神经网络装配在芯片上，其智能分析速度比普通计算机要快数千倍，能更好地完成识别语言和图像处理等工作。

目前，对机器人技术的发展有最重要影响的国家是美国和日本。美国在机器人技术的综合性水平上仍处于领先地位，日本生产的机器人数量和种类则居世界首位。

我国发展机器人技术起步于20世纪70年代末。1995年9月，6000m水下机器人试验成功。近年来，在步行机器人、精密装配机器人及多自由度关节型机器人研制等前沿领域内逐步缩短了与世界水平的差距。

机器人技术经数十年的发展，现已形成了一门综合性学科——机器人学（Robotics）。机器人学包括基础研究和应用研究两方面内容，主要研究领域有：①机械手设计；②机器人运动学、动力学和控制；③轨迹设计和规划；④机器人传感器；⑤机器人视觉；⑥机器人控制语言和离线编程；⑦机器人本体结构系统；⑧机器智能等。

1.1.5 类人机器人技术

现阶段，机器人的研究应用领域不断拓宽，其中类人机器人（也叫仿人机器人）的研究和应用尤其受到普遍关注，并成为智能机器人领域中最活跃的研究热点之一。

最早系统地研究人类和动物运动原理的是美国摄影师爱德华得·麦布里奇（Eadweard Muybridge），他发明了电影用的独特摄像机，即一组电动式触发照相机，并在1877年成功地拍摄了许多四足动物步行和奔跑的连续照片。后来，这种采用摄像机的方法又被乔治·德米尼（Georges Demeny）用来研究人类的步行运动。

真正全面、系统地开展类人机器人的研究是始于20世纪60年代。而类人机器人的重要基础研究内容，就是双足步行机器人技术。迄今，不仅形成了双足步行机器人一整套较为完善的理论体系，而且在一些国家，如日本、美国和俄罗斯等都已研制成功了能静态或动态步行的双足步行机器人样机。

早在20世纪50年代中期，美国通用电气公司就制造了一台名为“Hardiman”的步行车，但当时的驱动和伺服控制技术显然还不足以使Hardiman进入实用化阶段。

1968年，英国的Moshier R试制了一台名为“Rig”的操纵型双足步行机器人，它只有踝和髌两个关节，操作者靠力反馈感觉来保持机器人平衡，这种主从式的机械装置可算是双足步行机构的雏形。

真正的双足步行机器人是I. Kato在1971年试制的Wap3，它最大步幅为15mm，周期为45s，Wap3的研制成功，揭开了双足步行机器人的研究序幕。

1984年，日本的加藤实验室又推出了WL-9DR双足步行机器人。1984年，加藤在以前的研究基础上采用了踝关节力矩控制，使WL-10RD双足步行机器人实现了平稳的动态步行。1986年，加藤又推出了具有8个自由度的WL-12R双足步行机器人。

1971~1986年间，牛津大学的Witt等人曾制造和完善了一个双足步行机器人，在平地上走得非常好，步速为0.23m/s，功率消耗约为4W。

日本的J. Furusho研制了两个系列的能够动态步行的双足步行机构，从1981年开始，先后研制了Kenkyaku-1、Kenkyaku-2、BLR-G1和BLR-G2双足步行机器人。

日本的Kajita是日本另一步行机器人研究者。1990年，他研制成功了一台五连杆平面型双足步行机器人，实现了在不平地面上的稳定动态步行。

1986年，美籍华人郑元芳博士分别研制成功SD-1双足步行机器人和SD-2型双足步行机器人，成功地实现了地面上的前进、后退以及左、右侧行和动态步行。1990年，他首次提出了使双足步行机器人能够走斜坡的控制方案，并应用于SD-2双足步行机器人中获得成功实现。

1985年，美国的Hodgins和Raibert等人研制了一个用来进行奔跑运动和表演体操动作的平面型双足步行机器人。1986年，他们用这个机器人进行奔跑实验，着重研究奔跑过程中出现的弹射飞行状态。1988年和1990年，他们又用这个机器人进行了翻筋斗动作实验。Hodgins和Raibert研究这两种运动是因为它们含有丰富的动力学内容，尤其是两者都具有弹射飞行状态。

1986年，日本本田公司制定了第一个研制拟人机器人的计划，并于1996年11月展示了一个有两腿两臂的拟人机器人P2。本田公司在1997年10月又推出了世界领先的P3机器人，如图1-2所示。

我国从20世纪80年代中期才开始研究类人机器人，主要研究单位是国防科技大学和哈尔滨工业大学。

哈尔滨工业大学于1989年研制了一台类人机器人，重量为70kg，高度为110cm，

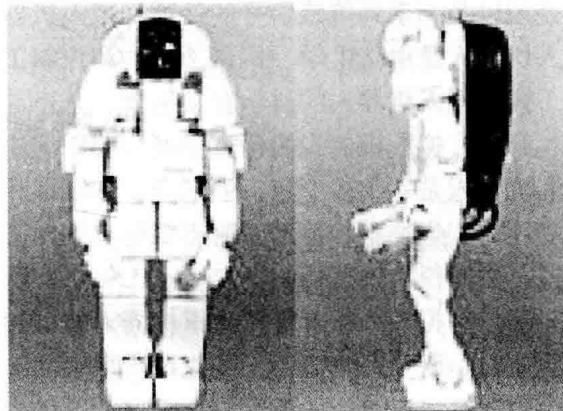


图1-2 本田P3双足步行机器人外观

有 10 个自由度，可以实现平面上的前进、左右侧行及上下楼梯的运动，步幅可达 45cm，步速 10 步/s，为静态步行。

国防科技大学在 1988 年成功研制了一台 KDW-I 平面型、6 自由度的双足步行机器人，能实现前进、后退和上下楼梯。1989 年，他们又成功研制了一台 KDW-II 空间运动型的双足步行机器人，实现了准动态步行，1995 年实现了动态步行。2000 年 11 月 29 日，他们成功研制出新型双足步行机器人。不仅能平地静态步行，而且能快速自如地动态步行；既能在已知环境中步行，也可在小偏差、不确定环境下行走，实现了多项关键技术突破，如图 1-3 所示。

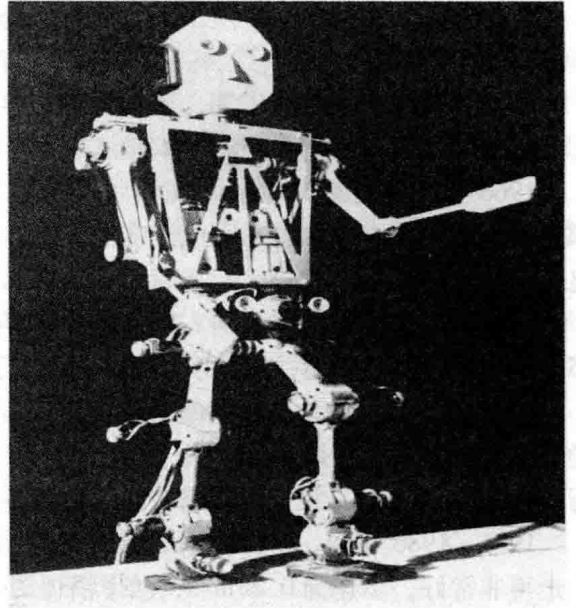


图 1-3 国防科技大学研制的双足步行机器人

世界著名机器人学专家、日本早稻田大学的加藤一郎教授^[1]说过：“机器人应当具有的最大特征之一是步行功能。”步行是人与大多数生物所具有的移动方式，其形式主要有双足步行、四足步行和六足步行。其中

双足步行是步行方式中自动化程度最高、最为复杂的系统，同时双足步行机器人也有着其他机器人不可比拟的优点：具有适应各种地面和较强的逾越障碍的能力；步行机器人的能耗通常低于轮式和履带式机器人，即能耗较小。随着对双足步行机器人的研究不断深入，无论是影视、科幻作品还是人们对机器人的第一意识，都把像人一样的机器人作为机器人研究的最高境界。机器人的研究者也一直把实现机器人的拟人行为作为梦寐以求的目标。拟人机器人是一种智能的、机动的、能满足用户多种需求的新型机器人，这种机器人具有人的外形和基本功能，易于与人共处，易于适应多变的活动环境。20 世纪 90 年代前后，双足机器人从一般性的拟人腿部行走上升到全方位的拟人机器人研究。拟人机器人除了腿部的行走功能外，还包括手、腰和头的功能，自由度比双足步行机器人成倍地增加，与此同时也带来了控制规划、动力学、运动学上更为复杂的问题。此外，还有电荷耦合器件（CCD）图像处理、语音处理以及一系列传感信号的处理。拟人机器人相对于双足机器人的研究，更为类似人类。拟人机器人是由仿生学、机械工程和控制工程等多学科相互融合而成的综合性学科。

研究拟人机器人的科学意义主要在于：

第一，拟人机器人的研究模型为控制理论应用及动力学问题的研究提供了广阔的天地。拟人机器人是一个多变量、强耦合、非线性和变结构的复杂动力学系统，其变姿态结构的小稳定性及产生稳定步行运动所需要解决的动态平衡问题，对于控制理论及动力学问题的研究来说，具有很大挑战。

第二，拟人机器人作为步行机器人的一种形式，是提高机器人机动性和节省能源的一条重要途径。研究拟人机器人的双足步行运动，揭示了双足类步行运动的机理及控制规律，研制一种连续稳定步行的拟人步行机器人，可为机器人操作提供灵活的操作平台，使其能够在恶劣的条件下工作。因此拟人机器人有着潜在的广阔应用前景。

拟人机器人研究集机械、电子、计算机、材料、传感器、控制技术、通信、人工智能、人工心理等多门科学于一体，代表着一个国家的高科技发展水平。从机器人技术和人工智能的研究现状来看，要完全实现高智能、高灵活性的拟人机器人还有很长的路要走，而且人类对自身也没有彻底了解，这些都限制了拟人机器人的发展。

1.1.6 机器人系统理论

1.1.6.1 机械系统

机械系统是由机械元素组成的，它可以是自然的，也可以是人造的。后者是我们要研究的对象。机器人的机械系统由以下几个子系统组成：①机械子系统，由刚体和弹性体组成；②传感系统；③执行系统；④控制器；⑤信息处理。此外，子系统之间的通信是通过接口进行的，接口的基本功能是把从一个部分传到另一个部分的信息解码。图 1-4 是典型机械系统的框图，系统的输入是事先确定的任务，它是由实时或离线给定的。前者在本质上看成是智能的，后者是可编程的机械。机器人的机械系统输出是通过传感器监测的实际任务（Actual Task）。传感器以反馈信号的形式传递作业信息并与事先设定的动作相比较，事先设定的任务与执行动作间的误差反馈给控制器，然后合成必要的校正信号。在机器人控制系统中，通过人来构成闭环控制的称为遥控机器人（Telemanipulator）。遥控机器人是人借助于复杂的传感器和显示装置进行控制的机械系统，操作者也就成了图 1-4 所示框图中的一个中心单元，根据显示的信息，操作者对校正信号调整，以完成所需要完成的动作。

我们必须明确，研究机器人机械系统，需要建立起一套运动的表示方法。我们用独立的杆件运动组合成机械系统，把这些杆件看成刚体。一般刚体的运动由平动和转动组成，通过一个坐标系和矢量代数计算距离和角度，并在此坐标系下描述矢量，但最终的结果与我们所选择的坐标系无关。最终得到的数学模型就是我们要找的机械系统运动的表示方法。这些数学表示方法一般包括：线性变换、刚体的旋转矩阵、坐标变换和齐次坐标建立、校正方法及各种方法的合成等。以上各种方法的具体概念及实现方法请参见相关文献。

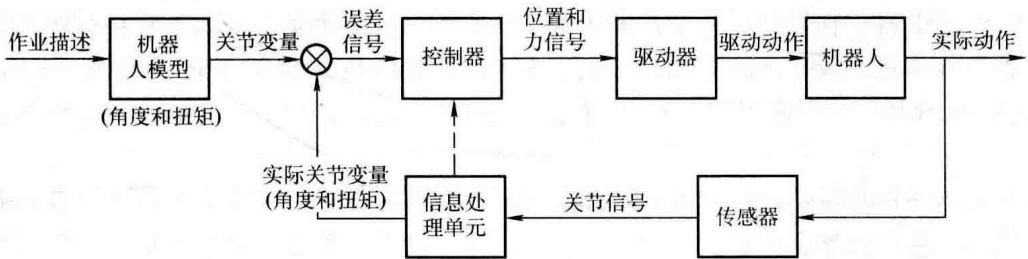


图 1-4 机器人机械系统框图

1.1.6.2 人工心理

用机器模拟人类心理行为（情感等）一直为人们所追求。目前，用机器模拟人类心理行为（情感等）的相关技术研究正在形成一种趋势，尤其以日本最为先进。近几年来，在日本科学技术界流行“感性工学（Kansei Engineering）”的新术语。由于这是一个新的领域，日本所取得的成果都是初步的，有许多问题亟待解决。比如，日本提出的“感性工学”的定义不清楚（现有 10 多种定义），其研究范围只是对准人类心理活动的一个方面——“感性”。王志良教授于 1999 年提出了一个全新的概念“人工心理”，并出现在国家自然科

学基金 2000 年度项目指南自动化学科中。其与人工智能的关系如图 1-5 所示。

人工心理理论，就是利用信息科学手段，对人的心理活动的更全面内容的再一次人工机器（计算机、模型算法）实现——人工心理学。它的应用前景是非常广泛的，如支持开发有情感、意识和智能的机器人；真正意义上的拟人机械研究；使控制理论更接近于人脑的控制模式。我们知道，已有的拟人控制理论主要就是维纳的“反馈”控制论和人工智能；这与人脑的控制模式还有很大差别，因为人脑控制模式是：感知觉 + 情感决定行为；而现有的控制系统决策不考虑也无法考虑情感的因素。人工心理应用的另一大领域是符合人性化的商品设计和市场开发。不夸张地说，人工心理理论是人工智能的高级阶段，是自动化乃至信息科学的全新研究领域，它的研究将会大大促进拟人控制理论、情感机器人、人性化的商品设计和市场开发等方面的进展，为最终营造一个人与人、人与机器和谐的社会环境作出贡献。

1.1.6.3 智能控制

智能控制 (Intelligent Control) 的概念由傅京逊于 1971 年提出，由美国的萨里迪斯 (Saridis) 等人在此基础上于 1977 年进一步提出了一种智能机器 (Intelligent Machine) 的统一结构框架。该结构现已被控制界普遍接受，它具有递阶分散智能与精度的特点，包括组织级 (Organization Level)、协调级 (Coordination Level) 和执行级或控制级 (Execution Level)，且各层次间遵循精度随智能降低而提高 (Increasing Precision with Decreasing Intelligence IPDI) 原则。

智能控制是随着被控对象的日益复杂，为适应其对环境依赖的不可侵害性而产生的。作为一门新兴的学科，它融合了包括神经生理学、心理学、运筹学、控制论和计算机科学的多学科思想和技术的成果。而对智能控制的研究，主要体现在对基于知识系统 (Knowledge Based System, KBS)、模糊逻辑 (Fuzzy Logic) 和人工神经网络 (Artificial Neural Network) 的研究。

机器人学 (Robotics) 是一门高度综合和交叉的新兴学科，它涉及的领域很多，诸如机械、电气、工艺、力学、传动、控制、通信、决策、生物、伦理等诸多方面。

1) 从控制角度看，其中最主要也是最基本的是机器人的运动学 (Kinematics) 和动力学 (Dynamics) 问题及相应的控制策略研究。

机器人运动学包括前向运动学 (Forward Kinematics) 和逆运动学 (Inverse Kinematics)，或分别称为运动学的正问题和逆问题。其中，前向运动学研究以机器人的各关节参数 (广义坐标) 来决定终端操作器 (End-effector) 的位型 (Position and Orientation)；而逆运动学则是研究由期望的终端操作器位型来得到各关节变量的过程。

机器人动力学问题主要包括两大类，即运动分析和力分析。运动分析研究由机器人连杆系的受力情况 (外力和关节驱动力) 决定各关节运动状况 (位置、速度和加速度)，进而通过运动学方法来最终获得终端操作器位置的过程和方法；而力分析则是研究由期望的机器人

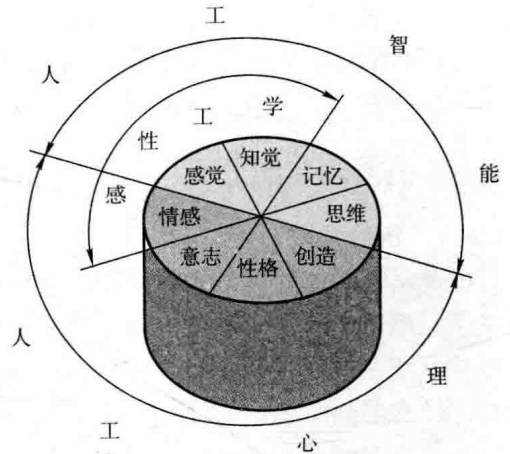


图 1-5 人工心理与人工智能的关系

各连杆的运动（位移、速度和加速度）得到需施加于各关节处的驱动力或力矩的方法和策略，即我们通常所说的控制综合问题。

2) 从智能角度看，随着机器人技术的迅速发展和自动化程序的进一步提高，对机器人的功能也提出了更高的要求，特别是需要各种具有不同程序智能的机器人。智能机器人已在自主系统和柔性加工系统中日益得到广泛的应用。自主机器人能够设定自己的目标，规划并执行自己的动作，使自己不断适应环境的变化。这些机器人智能程度的提高，离不开人工技术的发展，其中包括人工心理、人工智能、情感计算、人工生命等。

1.1.6.4 人工生命

20 世纪 60 年代，人们破译了遗传密码，70 年代遗传工程有了重大突破。很自然，生物学的下一个重要目标就是用人工的方法合成生命。然而，以现有生命物质为基础合成生命似乎前景并不乐观。那么，我们有没有其他办法创造生命呢？计算机科学的发展为我们提供了一条新的研究思路，即我们可以尝试在计算机或其他媒质中创造出新形式的生命。这就是 80 年代末 90 年代初在国际上兴起的一个新的研究领域——人工生命。人工生命概念一提出，吸引了众多学者参与到这一新兴的研究领域中。

人工生命是一项抽象地提取出控制生物现象的基本动态原理，并且通过物理媒介（如计算机）来模拟生命系统动态发展过程的研究工作。它涉及众多的学科领域，如生物科学、计算机科学、控制科学、系统科学、机器人科学、人工智能等。该项学科的建立一般被认为始于 1987 年在美国召开的第一次人工生命研讨会。

冯·诺伊曼也是人工科学的先驱。20 世纪 40 年代和 50 年代，他在数字计算机设计和人工智能领域做了很多开创性的工作。与图灵一样，他也试图用计算的方法揭示出生命最本质的方面。但与图灵关注生物的形态发生不同，他则试图描述生物自我繁殖的逻辑形式。在发现 DNA 和遗传密码好几年之前，他已认识到，任何自我繁殖系统的遗传物质，无论是自然的还是人工的，都必须具有两个不同的基本功能：一方面，它必须起到计算机程序的作用，是一种在繁衍下一代过程中能够运行的算法；另一方面，它必须起到被动数据的作用，是一个能够复制和传到下一代的描述。为了避免当时电子管计算机技术的限制，他提出了细胞自动机的设想：把一个长方形平面分成很多个网格，每一个格点表示一个细胞或系统的基元，每一个细胞都是一个很简单、很抽象的自动机，每个自动机每次处于一种状态，下一次的状况是由它周围细胞的状态和它自身的状态以及事先定义好的一组简单规则决定的。冯·诺伊曼证明，确实有一种能够自我繁殖的细胞自动机存在，虽然它复杂到了当时的计算机都不能模拟的程度。冯·诺伊曼的这项工作表明：一旦我们把自我繁衍看做是生命独特的特征，机器也能做到这一点。

1.1.7 双足步行机器人

步行是人与大多数动物所具有的移动方式，也是生物界步行方式中自动化程度最高、最为复杂的动作，它的完美实现必然要求机器人在结构设计方面产生巨大的变革和创新，从而有力地推动相关学科的发展。人类一直梦想着创造出和人类构造相似、能与人类合作的拟人机器人。而双足步行机器人是工程上少有的高阶、非线性、非完整约束、强耦合性的多自由度系统，这为机器人运动学、动力学以及控制理论的研究提供了一个理想的实验平台^[2]。

拟人机器人是一种具有人的外形，并能够效仿人体的某些物理功能、感知功能及社交能

力并能承袭人类的部分经验的机器人。当然，拟人机器人的研究目的不是企图制造以假乱真或替代人类的机械，而是要创造一种新型工具，它能在典型的日常环境中和人类交流，在更广泛的环境任务中扩展人类的能力。

双足步行机器人的发展也为人类假肢的发展提供了有力的理论、技术支持，同时也为服务、娱乐机器人的发展开辟了新的领域。随着机器人的工作环境和工作任务的复杂化，双足步行机器人因其体积相对较小、对非结构性环境具有较好的适应性、避障能力强、能耗小、移动盲区很小等优良的移动品质，格外引人注目。拟人机器人不仅具有双腿、双臂、头、眼、颈、腰等物理特征，还能模仿人类的视觉、触觉、语言，甚至情感等功能。这和能在特种环境下工作的服务机器人是有区别的。

另外，双足步行机器人的研究具有十分重大的科研、实用价值和意义，可以推动仿生学、人工智能、计算机图形学、通信等相关学科的发展。拟人机器人的研究是多学科的交叉、综合与提高。机械工程师、电子学家、计算机专家、机器人学家、人工智能专家、心理学家、物理学家、生物学家、认知学家、神经生物学家，甚至哲学家、语言学家和艺术家等都有参与其研究。

1.2 各国研究状况

据韩国一个经常更新的拟人机器人网站统计，目前世界各国有 85 个大型拟人机器人项目正在进行中，这些还不包括各国单就模拟身体单个部分的项目。科技部 863 自动化办公室的工作人员表示，目前所有的大型拟人机器人项目中，日本占有 37 项，美国占有 10 项，德国占 7 项，韩国占 7 项，英国占 4 项，中国占 5 项，瑞典占 2 项，澳大利亚、泰国、新加坡、保加利亚、伊朗、意大利、奥地利、俄罗斯等国各占有 1 项。从统计数字可看出日本的领先地位及其他各国的竞争实力^[3]。

1.2.1 日本和韩国

在日本所有的研究机构中，早稻田大学、东京工业大学、本田公司、索尼公司等研究机构成为双足步行机器人研究的主力。早稻田大学的双足机器人研究始于 1968 年，该大学的加藤一郎教授所领导的课题组相继研制了 WL 系列、WABIAN 系列双足步行机器人。最新的研究成果为 WL-16 和 WABIAN-2 双足步行机器人，可以在不平的地面上稳定行走^[4]。

在日本，除了各大学都热衷于研究拟人机器人外，公司的研发开始成为主力。许多过去与机器人技术毫不相关的公司都涉足拟人机器人的开发。原因主要有二：一是大公司利用公众对拟人机器人的高度兴趣，通过成功开发拟人机器人，宣传本公司的品牌；二是拟人机器人有一个很大的市场。研究单位或成群的发烧友迫切需要低价的仿人机器人整机平台或套装件。

1.2.1.1 日本本田公司

日本本田公司的仿人机器人工程开始于 1986 年。1986 年本田的 ASIMO 机器人实现了可以两条腿行走，成功地实现了双腿的交替移动。但是，每一步几乎要用 5s 的时间，它只能沿着直线以很慢的速度行走。第一个完全独立，依靠两条腿行走的拟人机器人诞生于 1997 年 9 月，身高：1600mm 体重：130kg。通过改换部件材料，以及将控制系统分散布置，降低了身高，减轻了体重。较小的尺寸更适宜在人们的生活环境中使用。

经过 10 年的秘密研究, P2 机器人^[8,9] 在 1996 年一经问世, 便令世人瞩目。P2 机器人是世界上第一个无缆拟人机器人, 它能走, 能上下台阶, 能推小车。P3 是 P2 的改进, 减小了尺寸 (重量由原来的 210kg 降为 130kg, 高度由 1800mm 降为 1600mm, 提高了步行能力。2002 年 12 月本田公司又推出了新型双足步行机器人阿西莫 ASIMO, 如图 1-6 所示。和“P3”相比, 它的体形更小、重量更轻, 并采用了新开发的智能实时灵活步行“i-Walkinga (Intelligent Realtime Flexible Walking) 技术”实现更加自由的步行。本田公司这个最新款的 ASIMO 智能拟人机器人主要有以下几个特点: ①基于认知技术的先进的交流能力。它能实现移动物体认知、位置/姿态认知、环境认知、声音认知和面部认知。②网络集成能力, 它能与用户网络系统相连完成用户指令, 还能通过互联网为主人的问题寻找答案。

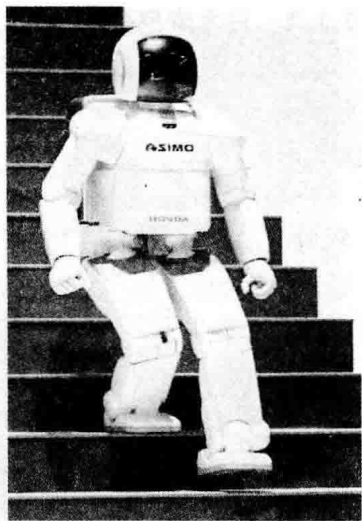


图 1-6 ASIMO 拟人机器人

2004 年 12 月 15 日本田公开了新一代 ASIMO 双足行走机器人, 提高了移动性能, 其目标是可在实际环境中快速判断情况、敏捷行动。通过利用上半身弯曲及扭曲的新姿态控制理论, 以及新开发的高速响应硬件, 加上可与慢跑媲美的动作, 实现了时速 3km 行走, 正常行走时速为 2.5km/h, 能实现跑动时速为 6km/h。其高度为 1.3m, 总重为 54kg, 具有 34 个自由度, 其中下肢 12 个自由度, 如图 1-7 所示。它采用与人一样自然行走的新姿态控制技术、自律连续移动技术, 以及可顺畅地与人同步动作的技术等。

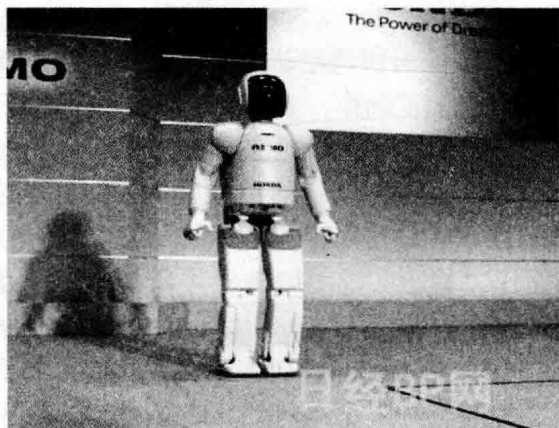


图 1-7 新一代“ASIMO”双足行走机器人

在连续移动方面, 它通过由地面传感器获得的周围信息, 以及在步行的同时对照事先存入的地图信息, 可对路线错误进行修正; 当检测到有障碍物时, 可凭借自己的判断而绕开; 同时, 通过头部的视觉传感器及新追加的手腕力觉传感器等, 可检测人的动作、接拿物品, 以及按照对方的动作节奏握手; 可以做出将脚迈向手部被推拉的方向等与人动作同步的动作。

2007 年 9 月 27 日, 本田公司主导开发的新版 ASIMO 机器人在西班牙巴塞罗那亮相。经过 7 年研发的新版 ASIMO 机器人身高为 1.2m, 体重为 43kg, 由移动电话控制, 能有以酷似