

ROBOT

# 双足机器人 行走控制与优化

陈启军 刘成菊 著

Chen Qijun Liu Chengju

WALKING CONTROL AND  
OPTIMIZATION FOR  
BIPED ROBOTS

清华大学出版社

陈启军 刘成菊 著

Chen Qijun Liu Chengju

# 双足机器人 行走控制与优化

WALKING CONTROL AND  
OPTIMIZATION FOR BIPED ROBOTS

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书内容主要是针对双足机器人的运动规划和行为优化,共分7章。第1章介绍人类的行走进化史、双足机器人的发展历程以及行走控制研究现状;第2章阐述了双足机器人的运动学和动力学;从第3章开始以双足机器人NAO为例研究了双足机器人目前存在的一些挑战性的问题:包括第3章的全向行走;第4章研究了双足机器人的平衡技巧学习与优化方法,提出了一种基于异方差稀疏高斯过程模型的非参数落脚点补偿器方法;第5章研究了双足机器人固有约束下的实时全身运动规划;第6章主要解决了如何将中枢模式发生器机理应用到双足机器人来提高机器人行走的环境适应性;第7章初步探讨了基于被动原理的双足机器人动态行走。

本书是为广大从事机器人,特别是双足机器人方向研究的学者和青年科技人员所撰写的,也可供相关专业高年级本科生和研究生参考。

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

双足机器人行走控制与优化/陈启军,刘成菊著.--北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-43655-3

I. ①双… II. ①陈… ②刘… III. ①移动式机器人—研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第084687号

责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13 字 数:324千字

版 次:2016年9月第1版 印 次:2016年9月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:59.00元

# 前言

## FOREWORD

智能服务机器人对机器人的基本要求是机器人能够在人所处的环境中工作,使用人所使用的工具并能与人类和谐相处。在这一点上,双足机器人与轮式、履带式、多足等类型的机器人相比,具有更好的地面适应能力和灵活性。双足机器人若要在人类和自然环境中完成各种任务,其中最基本的一个生存能力便是灵活稳健的行走能力。只有具备了灵活稳健的行走能力,仿人机器人才能完成诸如端茶倒水、搬运重物及与人交互娱乐的任务,并能不确定干扰和各种意外情况下保证人类、自身和周围设备的安全。

整体来讲,目前的双足机器人行走控制主要基于编程机制,步态规划的研究主要集中在轨迹的离线规划,这种规划模式在一定程度上限制了步行的灵活性。自然界的生物经过长期与自然环境的磨合,形成了复杂的、适应各种外界环境的高性能结构特征或体表形态,这些结构特征或体表形态为仿生设计提供了包括宏观和微观的结构原型。对生物内在感知、控制与平衡机制的模仿将会成为机器人控制和智能研究的重要方向。针对这一研究方向,近些年我们一直坚持不懈地研究和探索,在双足行走方面取得了一些有益的积累和进展。回顾目前国内外的研究现状,感觉有必要较完整地针对双足机器人的行走问题,将研究团队近些年在该领域的研究思想、理论方法以及研究成果做一系统的整理和总结,所以撰写此书为同行学者提供研究和学习的参考,希望本书能引起更多的研究学者和青年科技人员对双足机器人的兴趣并进一步深入探索研究。如果达到这一目的,那么该书的出版就获得了成功。

本书的主要内容来自刘成菊、许涛、陈毅鸿、安康的博士学位论文,由陈启军、刘成菊汇总整理。本书第2章简要介绍双足机器人运动学、动力学方面基础知识。第3章研究双足机器人的全向行走轨迹规划方法。第4章研究借鉴人类本身鲁棒行走过程中的各种平衡技巧机理和技巧学习能力,克服目前机器人行走控制无法满足自然和人类生活环境应用的鲁棒性要求的问题,着重研究利用动态落脚点修改补偿机器人平衡的双足机器人主动平衡技巧。第5章研究如何实现符合固有约束下的双足机器人的实时运动控制,拟通过模仿、学习以及借鉴人类全身运动中的各种技巧机理和学习方法,克服目前机器人全身控制中无法满足自然和人类生活环境应用实时性要求的问题,实现双足机器人在不确定环境下的全身运动。第6章基于中枢模式发生器机理研究双足机器人的仿生控制方法。目前国内外的一些



研究表明,基于中枢模式发生机制设计的控制策略对外界环境的变化及干扰具有一定的自适应性。但对于双足机器人,如何将该机理的优越性应用到其行走控制中,是目前仿生控制的一个瓶颈问题。目前的研究多停留在模拟仿真阶段,或者仅对双足机器人的某些关节的节律运动进行控制。针对如何在双足机器人的行走控制中充分利用中枢模式发生机制的特点来提高机器人行走的环境适应性,我们提出了新颖的控制策略,较好地解决这一瓶颈问题,该机理在双足机器人行走控制中的优势得到充分体现。

本书的理论与实验成果是在国家自然科学基金项目“节律-技巧混合驱动的机器人行走机理研究及实验验证”(基金编号:60875057),“受CPG机理启发的两足机器人适应性行走控制方法研究和实验验证”(基金编号:61203344),“仿人机器人平衡技巧学习与优化研究及实验验证”(基金编号:61573260)等的支持下完成的,在此向国家自然科学基金委员会表示感谢。

限于作者的水平,书中难免存在疏漏和不足,恳请专家和读者谅解和指教。

陈启军

2016年5月于同济大学



# 目录

## CONTENTS

---

第 1 章 引言	1
1.1 人类行走进化史	1
1.2 机器人的发展历程	2
1.3 行走控制	8
1.4 内容安排	11
第 2 章 双足机器人的运动学和动力学	12
2.1 运动学	12
2.1.1 关节结构描述	12
2.1.2 几何运动学	15
2.1.3 微分运动学	17
2.2 动力学	22
2.2.1 连杆结构的动力学描述	22
2.2.2 动态稳定性	24
2.2.3 动力学模型	26
2.3 小结	27
第 3 章 全向行走轨迹规划	28
3.1 支撑脚运动轨迹	28
3.2 游脚运动轨迹	30
3.3 全向落脚规划	31
3.4 关节能耗优化	33
3.5 小结	37
第 4 章 平衡技巧	38
4.1 引言	38
4.2 基于落脚点补偿的平衡技巧	39
4.2.1 线性落脚点补偿	39
4.2.2 非参数落脚点补偿器模型	46

4.2.3	典型实验分析 .....	56
4.3	基于任务空间的平衡技巧 .....	61
4.3.1	任务空间运动控制 .....	62
4.3.2	解析动量补偿 .....	66
4.3.3	动态任务分配 .....	69
4.3.4	实验分析 .....	70
4.4	小结 .....	71
<b>第5章</b>	<b>固有约束下的全身运动规划 .....</b>	<b>72</b>
5.1	引言 .....	72
5.2	自碰撞约束与目标轨迹融合 .....	73
5.2.1	实时自碰撞检测 .....	74
5.2.2	包围体对筛选 .....	77
5.2.3	约束避免 .....	79
5.2.4	实验分析 .....	81
5.3	基于动量控制的运动规划 .....	85
5.3.1	动量控制算法 .....	86
5.3.2	末端轨迹规划 .....	87
5.3.3	实验分析 .....	88
5.4	带约束在线示教跟踪 .....	90
5.4.1	人体运动模型映射 .....	91
5.4.2	关节约束描述 .....	92
5.4.3	实验分析 .....	94
5.5	约束下的机器人工作空间求解 .....	98
5.5.1	固有约束描述 .....	99
5.5.2	蒙特卡洛法 .....	100
5.6	小结 .....	108
<b>第6章</b>	<b>仿生控制 .....</b>	<b>110</b>
6.1	引言 .....	110
6.2	中枢模式发生器(CPG) .....	112
6.2.1	工程模型 .....	112
6.2.2	Matsuoka 模型特性分析 .....	116
6.2.3	工程应用基本方法 .....	126
6.3	工作空间轨迹在线调制方法 .....	128
6.3.1	质心轨迹发生器 .....	130
6.3.2	游脚轨迹调制 .....	131
6.3.3	平地行走步态进化 .....	132
6.3.4	坡面环境适应性分析 .....	139
6.4	质心轨迹和游脚轨迹的在线生成与优化 .....	143
6.4.1	游脚轨迹在线生成 .....	143

6.4.2	环境适应性分析	145
6.4.3	步态参数优化	145
6.4.4	实验分析	147
6.5	小结	156
<b>第7章</b>	<b>基于被动原理的双足机器人动态行走</b>	<b>158</b>
7.1	被动步态描述与分析	158
7.1.1	模型概述	158
7.1.2	支撑足约束	159
7.1.3	足地碰撞	160
7.1.4	步态的周期性	161
7.1.5	步态的稳定性	164
7.2	最小能耗下的平地行走	167
7.2.1	模型分析	167
7.2.2	高效行走步态的求解	170
7.2.3	高效行走步态分析	172
7.3	小结	181
	参考文献	182



# 第 1 章

## 引言

### 1.1 人类行走进化史

双足直立行走是人类进化史上迈出的重要一步。几百万年以前,由于气候变化,森林面积缩减,草原逐渐取代了茂密的森林,生活在森林中的人类祖先来到了空旷的草原地区。由于草原充足的日照,四足行走时阳光直射和地面烘烤所产生的热量常常大于自身的新陈代谢,因此促使原始人类不得不采用直立双足行走方式,从而减少了地面的烘烤和阳光直射的面积<sup>[1,2]</sup>。此外,由于在草原地区生活,食物也大幅度减少,为了获得更多的食物,早期人类逐渐采用前肢取代嘴巴来搬运食物,这种腾出前肢的行为得到不断强化,最终进化为直立行走。近些年来,美国科学家通过实验发现直立行走比四肢行走更省能量<sup>[3]</sup>。由于黑猩猩在身体大小、骨骼特征方面与人类最为相仿,研究人员将人类和黑猩猩的行走进行对比,通过测量行走中耗费的能量发现人类双足直立行走所需要的能量仅是黑猩猩四肢行走的四分之一,节省了75%的能量。这主要是由于双足行走过程中身体在做以支撑脚为支点的倒立摆动,使得行走过程中消耗的大部分能量得以储存<sup>[4]</sup>。由于食物的缺乏,原始人类不得不走更远的路获得足够的食物,双足行走节省的能量使原始人类能够以更节能的方式运动和狩猎,并省下更多的食物,最终在生存竞争中占据优势,有更强的能力抢占地盘、繁育后代和发展智力<sup>[5]</sup>。

在行走进化的过程中,为了完成更加高效的行走,人类的身体结构和系统也不断地发展和完善。人类的下肢逐步变长、增粗,肌肉更加发达,足部拇指变粗,足弓变高;骨盆也从又长又细的浆状变成又宽又细的鞍形,用来支撑躯干的重量;脊柱由颈椎向下逐渐变粗,四个生理弯曲起到减轻震荡的作用;胸廓宽阔,质心后移,利于保持平衡<sup>[6]</sup>。此外,由于直立行走的运动状态复杂,运动空间自由度大,人类需要具有对运动和姿态敏感的感知能力。通过不断地进化,人类具有了感知运动状态变化的前庭系统,对维持人体姿态和完成复杂动作起

到了重要作用<sup>[7]</sup>。

随着直立行走的进化,人类在具有了越来越有利于双足行走身体结构和特征的同时,也发展出了能够针对不同环境的多样的步态。针对不同环境的运动行为,如觅食、逃避和迁徙等都具有一定的目的性,这些行为通过进化传递到下一代<sup>[8]</sup>。因此,进化迫使这些运动行为越来越有利于其本身的目的性。对于不同目的性的行走运动,有利于目的性的“最优”行走方式也不相同,如人类的球类比赛及动物的捕食过程中,机动性和速度是重要的指标;而相对来看,保持长时间的慢速运动在某些场合也非常重要<sup>[9-11]</sup>。在这些情况中,首先,需要保证行走运动的稳定,不翻倒;其次,在满足完成这些运动目的性的同时,通常需要考虑的是高能量效率,例如,生物能够以最快的运动速度到达某个目的位置,但往往生物仅采用能量效率最高的速度来完成这个任务。因此,在长期的进化过程中,人类逐渐发展出了能量效率高、步态自然、稳定的行走步态。

仿人机器人的研究及其各个领域的应用越来越受到人们的广泛关注,而机器人的双足行走问题是其中的重点研究课题之一,具有重要的学术意义和应用价值。人类行走的进化史为双足行走机器人的设计提供了良好的思路,使我们最终设计出类似人类身体结构和特征、并具有低能耗、稳定性强、步态自然、地面环境适应性强的双足行走机器人成为可能。

近些年来,智能服务机器人对机器人的基本要求是机器人能够在人所处的环境中工作,使用人所使用的工具并能与人类和谐相处。在这一点上,双足机器人与轮式、履带式、多足等类型的机器人相比,具有更好的地面适应能力和灵活性。双足机器人具有离散的地面接触点的特性,通过肢体的协调运动,既能够完成平地的行走,又可以实现上下楼梯、跨越和攀爬障碍物、穿过狭窄空间等复杂的行走任务。而要使双足机器人能够在日常环境中完成各种任务,除了要使其能感知、理解外界环境以及定位、导航外,更基本的是要求其能在安全、稳定、低能耗等指标下完成从当前位置到目标位置的移动,通过快速地改变运动姿态以绕开障碍物并在移动的同时完成搬运、推拉等行为。只有在机器人具备了优良的运动和行为规划功能后,才可能应用其在狭小或复杂的空间中在不触碰周围物体和人类的情况下完成目标任务。只有机器人达到更高的安全性才能为社会所接受,并在与人共处的情况下为人类服务。

研究机器人的行走机理同时还具有生物学上的意义,通过制造和控制模仿自然生物运动方式的机械结构有助于进一步理解人类行走的本质,进而利用行走的机理改善人类生活,例如帮助因事故或遗传而运动功能失常的病人进行运动训练和康复<sup>[12,13]</sup>,制造被称为“人工外骨骼”的机械机构<sup>[14-16]</sup>来增强人类的运动能力或帮助截肢病人和老年人重获行走能力。

## 1.2 机器人的发展历程

从机器人诞生到现在的飞速发展,机器人技术经历了一个长期的发展过程。在工业领域广泛使用机器人,不仅可以提高产品的质量与产量,而且可以将人类从恶劣的工作环境中解放出来,减轻劳动强度,提高劳动生产率。1954年美国人乔治·德沃尔制造出世界上第一台可编程的机械手,它可以按照不同的程序从事不同的工作,具有通用性和灵活性。1956年在达特茅斯会议上,马文·明斯基提出了他对智能机器的看法:智能机器“能够创建周围

环境的抽象模型,如果遇到问题,能够从抽象模型中寻找解决方法”,这个定义影响到以后30年智能机器人的研究方向。1959年德沃尔与约瑟夫·英格伯格联手制造出第一台工业机器人,随后,成立了世界上第一家机器人制造工厂 Unimation 公司。1961年,美国的 Consolidated Control Corp 和 AMF 公司联合制造了第一台实用的示教再现型工业机器人。1962年美国 AMF 公司生产出“VERSTRAN”,与 Unimation 公司生产的 Unimate 一样成为真正商业化的工业机器人,并出口到世界各国,掀起了全世界对机器人研究的热潮。1962年至1963年传感器的应用提高了机器人的可操作性。人们试着在机器人上安装各种各样的传感器,包括1961年恩斯特采用的触觉传感器,托莫维奇和博尼1962年在世界上最早的“灵巧手”上用到了压力传感器,而麦卡锡1963年则开始在机器人中加入视觉传感系统,并在1965年,帮助 MIT 推出了世界上第一个带有视觉传感器、能识别并定位积木的机器人系统。1965年约翰·霍普金斯大学应用物理实验室研制出 Beast 机器人,Beast 已经能通过声呐系统、光电管等装置,根据环境校正自己的位置。20世纪60年代中期开始,美国麻省理工学院、斯坦福大学、英国爱丁堡大学等陆续成立了机器人实验室,美国兴起研究第二代带传感器、“有感觉”的机器人,并向人工智能进发。1978年美国 Unimation 公司推出通用工业机器人 PUMA,这标志着工业机器人技术已经完全成熟<sup>[17]</sup>。到目前为止,世界上各国对工业机器人的研究已经历经四十几年的历程,日本、美国、法国、德国等的机器人产业日趋成熟和完善,逐渐形成了一批在国际上较有影响力的、知名的工业机器人公司,如日本的安川、OTC、松下、FANUC、川崎等,德国的 KUKA、CLOOS,瑞典的 ABB,意大利的 COMAU 及奥地利的 IGM 等<sup>[17]</sup>。目前,机器人在工业中主要用于焊接、喷涂、搬运以及装配,同时有向采矿、农业、物流、军事、服务业等其他应用领域扩展的趋势。

自从全世界首台由计算机控制的行走机器人被 MCGee 等在南加利福尼亚大学制造出来后,大量的足式机器人相继展现在了人们的面前。第一台由人手动操作的载人行走车在1968年由 Mosher 制造出来,为了帮助美军步兵在崎岖的地形搬运设备,通用电气公司制造一台叫做“行走卡车”的实验型四足机器人(见图1.1),该机器人由驾驶员通过脚踏板和操纵杆控制一个外部的液压驱动系统驱动。该机器人重达3000磅,并能实现每小时5英里的行走。

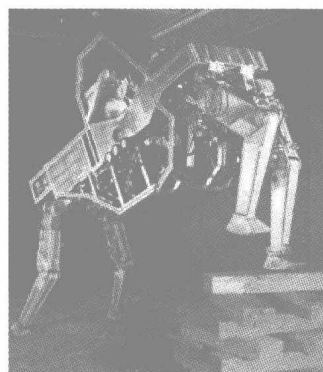


图 1.1 “行走卡车”四足机器人

在接下来的二十年中足式机器人得到了迅速发展,各种六足、四足和双足机器人相继诞生。Hirose 等于1978年研制出 ACMVI 蛇形机器人(见图1.2),并最终将其改造为 MOGURA 型工业机器臂<sup>[18,19]</sup>; Hirose 等又研制出 Titan 系列四足机器人<sup>[20-22]</sup>(见图1.3)。除了世界各大高校和研究所在不断的研究和改进足式机器人技术,许多公司和企业也同时参与到足式机器人的研制和开发中。1999年,日本 SONY 公司推出专供家庭娱乐的四足机器人 AIBO<sup>[23]</sup>(见图1.4),AIBO 可以说是迄今为止最受欢迎的娱乐型机器人,AIBO 全身20个自由度,并配备单目摄像头、红外测距、加速度、压力、温度等传感器,具有视觉、语言和自我学习功能。虽然由 SONY 公司自己设计的行走方法行走很慢,但经过多各高校和研究室的改进,其在水平地面上的行走速度可达40cm/s左右。事实上,AIBO 的真正成功之处不只在娱乐型机器

人市场的开创性,它还为诸多大学和研究所提供了一个廉价的四足机器人和人工智能研究平台。许多著名的研究成果,甚至全世界影响力最大的机器人足球比赛 RoboCup,都曾采用 AIBO 作为硬件平台。美国麻省理工学院的 Raibert 等于 1992 年成立了 Boston Dynamics 工程公司,专门致力于为美国军方提供足式机器人和相关产品研究。RHex<sup>[24]</sup>是由多个大学共同研制并由该公司制造的六足机器人,该机器人每条腿仅有一个自由度,利用其柔性腿的被动特性实现了不同地形下的快速行走<sup>[25]</sup>。RHex 可以在非常恶劣的地形上以 2.7m/s 速度跨越多种尺度障碍物<sup>[26]</sup>、爬越 45°斜坡并可以在水中游动。2005 年,该公司又研制成功 2.5ft 高 240lb 重的 BigDog 四足机器人<sup>[27]</sup>(见图 1.5),通过力和位姿控制,该四足机器人可以在崎岖的山岭、丛林和冰雪地面上行走,并能通过步伐调整抵抗未知的外部扰动。



图 1.2 ACMVI 蛇形机器人

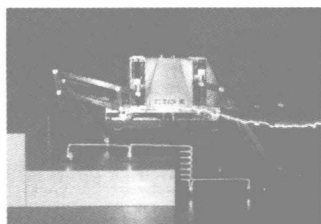


图 1.3 Titan 四足机器人



图 1.4 AIBO 四足机器人

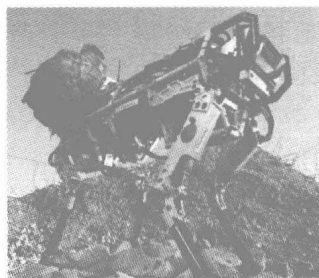


图 1.5 BigDog 四足机器人

日本很早便开始了对双足机器人的研究,1969 年 Kato 等制造出世界第一台双足步行机器人 WAP-1,该机器人由气动人工肌肉驱动并通过计算机连接对机器人进行控制;不过 WAP-1 的双足行走运动控制是通过“示教和回放”的方法实现的。Kato 等进而于 1973 年在日本早稻田大学研制出世界首台全身双足机器人 WABOT-1,并实现了静态双足行走。与 WAP-1 不同的是,WABOT-1 具备一套完整的肢体运动控制、机器视觉和交谈系统。WABOT-1 机器人研制成功后,日本早稻田大学双足机器人研究所又相继推出 WABOT 系列机器人。1981 年起,Furusho 推出了两个系列的双足行走机器人<sup>[28]</sup>,即五连杆平面运动机器人 Kenkyaku-1、Kenkyaku-2 和三维空间运动双足机器人 BLRG1、BLR-G2<sup>[29]</sup>,并提出了在驱动关节局部反馈作用下的近似降阶控制和分层递阶控制方法。Kenkyaku-1 可实现周期为 0.45s,速度为 0.7~0.8m/s 的稳定行走运动。Kenkyaku-2 在 Kenkyaku-1 基础上增加两个踝关节,实现了步长为 35~45cm 的行走运动。

1986 年,Zheng 等研制出美国第一台真正类人的双足行走机器人 SD-2<sup>[30,31]</sup>,该机器人具有 8 个自由度,行走步态控制采用神经网络和学习算法来完成,实现了平地的前进后退、

左右侧移,上下斜坡行走。1990年,Kajita等研制成功五连杆平面双足行走机器人Meltran<sup>[32,33]</sup>,并提出理想线性倒立摆模型和机器人的轨道能量守恒概念,该机器人由平行四边形连杆传动机构驱动小腿运动,实现了非平整地面上的0.2m/s的稳定行走运动。

自1986年开始,日本本田公司开始研发双足机器人<sup>[34]</sup>。1986年研制了第一台双足机器人E0,实现了每步5s的行走。通过不断地改进,1993年本田设计了人性化的P1型双足机器人(见图1.6)主要是对双足行走机器人进行基础性的研究工作;1996年12月又推出了P2型双足机器人,该机器人相对于P1型而言,更加拟人化,其身高182cm、重210kg,具有30个自由度,计算机、电池、发射器都集成在机器人身上,能以正常人的速度行走,并可以上20cm的台阶;本田公司采用合金连杆,谐波减速驱动,消除了传动背隙,设计上采用计算机辅助设计,使用有限元方法进行三维立体分析,这种开发方式成为了研制类人机器人的一种范本。1997年P2型机器人的改进版P3型问世;2000年本田公开了最早版本的ASIMO<sup>[35]</sup>,该机器人是迄今为止世界上最先进的双足机器人之一,其身高130cm,体重54kg,行走速度2.7km/h,直线奔跑速度为6km/h,奔跑过程中的滞空时间可达0.08s,背后安装的51.8V的高能量电池给机器人提供电能。此外,ASIMO还能够上下楼梯、转弯、避障,具备人脸识别、姿态和环境识别功能,能够完成蹲下拾取、与人协作搬运物品、操纵简单车辆的功能。

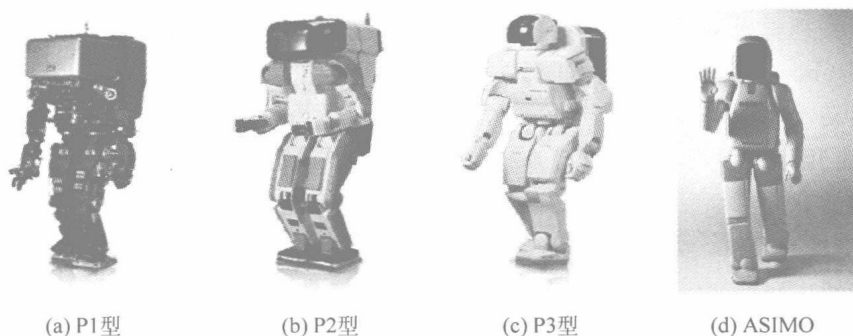


图 1.6 本田公司系列双足机器人

日本经济产业省从1998年开始组织与人协调共处的机器人系统研究项目HRP(Humanoid Robotics Project)。该组织的宗旨就是能开发与人共处同一空间并且能够和人一起协调工作的类人机器人。为此,他们推出了多款HRP系列机器人(见图1.7),其中著名的是HRP-2机器人<sup>[36]</sup>。它身高154cm,体重58kg,具有30个关节,并且每个关节都是独立控制,可以进行倒地并且起立动作,能够实现非平整路面上的稳定行走,最高速度可以达到2.5km/h;2005年研制的HRP-3机器人在HRP-2的基础上进行了机构和软件上的改进,其身高160cm,重68kg,最大行走速度超过2km/h,防尘防溅功能保证踝关节和电子设备在污染和潮湿环境中的正常运转<sup>[37,38]</sup>;最新推出的HRP-4C机器人<sup>[39]</sup>,在语音和视觉上获得重大突破,她采用人造肌肉与皮肤,可以通过视觉和语音识别人唱歌时的表情和声音,从而进行模仿,效果惟妙惟肖。

当大型类人机器人研究正受到全世界的普遍关注的时候,小型类人机器人的研制也开始拉开了序幕,而小型类人机器人的研究多以竞技娱乐为研究目的,通过这个竞技娱乐平台来体现技术的应用价值,同时对新的技术提出要求。这方面研究的代表作首推索尼公司,在

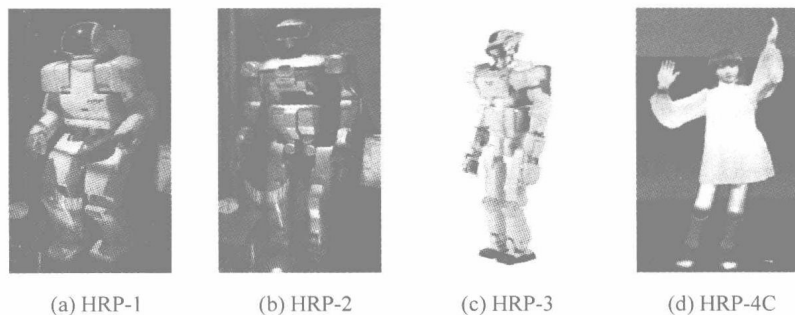


图 1.7 HRP 系列双足机器人

2000 年左右该公司推出了 SDR-3X 娱乐型双足机器人,该机器人高 50cm,重 5kg,能够以 0.25m/s 的速度前进后退,并随着音乐做出各种动作;随后索尼公司又研制了 SDR-4X;在 2003 年又将 SDR 系列机器人更名为 QRIO 机器人(见图 1.8(a))。QRIO 机器人高 58cm,重 6.5kg,具有 38 个自由度,跑步速度为 0.23m/s,在 2005 年成为世界第一款实现跑步运动的双足机器人,跑步时的滞空时间为 6ms,双脚跳跃时的滞空时间为 10ms<sup>[40,41]</sup>。

除了日本之外,其他国家也在类人机器人上进行了大量的研究。德国的慕尼黑科技大学设计了 Johnnie 仿人机器人(见图 1.8(b)),该款机器人身高 1.8m,重 40kg,具有 17 个自由度能够根据视觉导航系统进行路径规划,完成最高速度 2.4km/h 的行走<sup>[42]</sup>;2005 年西班牙 PAL Robotics 公司开发的 REEM-A 机器人(见图 1.8(c)),不仅可以下棋,还能完成双足行走运动<sup>[43]</sup>;诞生于 2008 年的 REEM-B 被设计为服务机器人,该机器人能自动学习周围环境,避开环境中障碍,完成行走任务;法国 Aldebaran Robotics 公司于 2005 年推出开源可编程的双足小型行走机器人 NAO<sup>[44]</sup>(见图 1.8(d)),该机器人高 58cm,重 4.3kg,具有 25 个自由度,能够完成行走、避障、视觉识别等功能,作为研究平台和教育器具广泛地应用于世界各所大学中;韩国 KIST 研究机构与三星电子合作在 2006 年研制出首款基于网络的双足机器人 Mahru(见图 1.9(a)),该机器人能够通过网络获得人工智能<sup>[45]</sup>;美国 Boston Dynamics 公司,专门致力于为美国军方提供足式机器人和相关产品研究。2005 年,该公司研制成功 2.5ft 高 240lb 的 BigDog 四足机器人<sup>[46]</sup>,继 2011 年推出双足机器人 PETMAN 后又推出了新款双足机器人 Atlas(见图 1.9(c)),该机器人在受到外界干扰的时候能够自行平衡,并能完成人类的各种动作<sup>[47]</sup>;2012 年 4 月,意大利的 Institute of Technology 设计出一款柔顺双足机器人 COMAN(见图 1.9(d)),该机器人在非平整路面上具有较好的行走能力<sup>[48]</sup>。

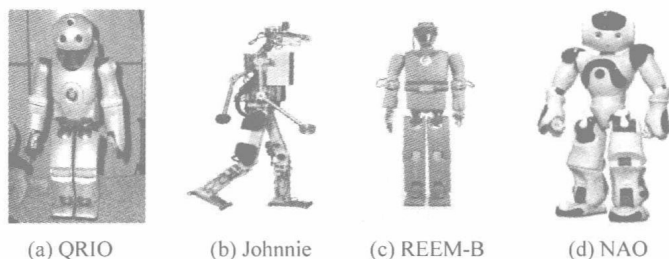


图 1.8 HRP 系列双足机器人



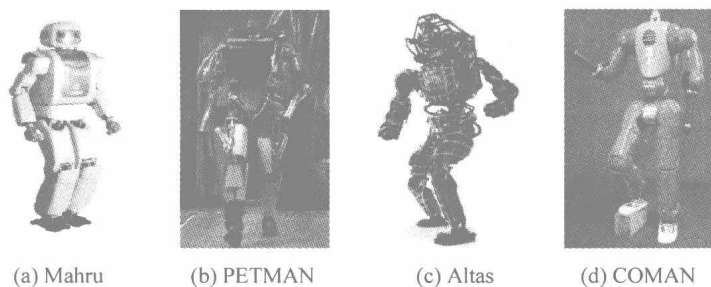


图 1.9 国外运动控制代表性双足机器人

McGeer 引入了自然周期行为的概念<sup>[49]</sup>。美国 Cornell 大学的 Ruina 教授研制的 Rangerv3(见图 1.10(a)),于 2011 年 5 月在没有更换电池的情况下独自持续行走了 65km,刷新机器人持续行走距离新的世界纪录; Delft 大学于 2005 年推出的机器人 Meta(见图 1.10(b)),高 1.1m,重 12kg,采用 Maxon 直流电机驱动髋关节和踝关节,能够实现速度范围 0.3~0.65m/s 的稳定行走及 3cm 高度的抗干扰能力<sup>[50]</sup>; MIT 的 Russ 等开发了基于被动动力学的双足机器人(见图 1.10(c)),它们的部分关节由电机驱动,实现了平面步行,而且能量效率和人类步行效率相当,这是目前可以平面步行的双足机器人达到的最高效率。这三个双足机器人的共同特点是简单的控制策略和巧妙的机械设计仅依靠重力和自身结构特性实现机器人的行走与运动<sup>[51]</sup>。

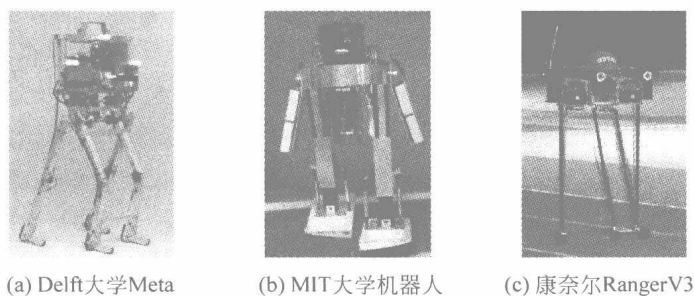


图 1.10 国外运动控制代表性被动式机器人

我国双足行走机器人的研究起步较晚,但是经过这些年的努力,已经取得了一系列成果。哈尔滨工业大学、国防科技大学、北京理工以及清华大学等在双足机器人的研制和研究方面取得了较大进展。哈尔滨工业大学自 1985 年开始研制 HIT 系列双足行走机器人,其中 HIT-III 型机器人能够实现步长 0.24m,每步 2.3s 的稳定行走,并能够实现前进、后退、上下楼梯等行走运动<sup>[56]</sup>。国防科技大学于 1988 年研制成功平面六自由度双足机器人 KDW-I,之后又推出空间运动型双足机器人 KDW-II 和 KDW-III,其中 KDW-III 能够实现步长 0.4m,每步 4s 的稳定行走<sup>[53]</sup>; 2000 年推出的“先行者”仿人机器人身高 1.4m,重 20kg,实现了平整地面的各种类人步态(见图 1.11(a)); 2003 年又研制成功第二代仿人机器人 Blackmann,该机器人身高 1.55m,体重 63kg,最大步幅 0.25m,行走速度超过 1.0km/h,实现了多种行走步态和动作。清华大学于 2002 年研制了仿人机器人 THBIP-I,该机器人身高 1.8m,体重 130kg,平地行走步长为 0.35m,每步 6s<sup>[54]</sup>。随后又推出身高 0.7m,体重 18kg 的仿人机器人 THBIP-II,该机器人共 24 个自由度,实现了步长 0.15m,速度 0.075m/s

的平地行走和稳定的踢球动作<sup>[55]</sup>。2006年9月又研制出平面欠驱动双足机器人 THBIP-III (见图 1.11(b)), 该机器人目前可实现步幅 0.13m, 每步 0.64s 的动态行走, 该机器人的设计目的是为研究大步幅动态步行稳定性判据与仿生控制策略等步行基础理论提供一个实验平台<sup>[56]</sup>。北京理工大学分别于 2002 年和 2006 年研制了 BHR-01 和 BHR-02 仿人机器人, 其中 BHR-01 机器人高 1.6m, 重 80kg, 步长 0.33m, 每步 1.2s, 能够根据自身的平衡状态和地面高度变化, 实现未知路面上的稳定行走<sup>[57]</sup>; BHR-02 机器人身高 1.6m, 重 63kg, 该机器人的研究主要侧重于动作的协调规划<sup>[58]</sup>。之后研制的 BHR-03 (见图 1.11(c)), 身高 1.65m, 体重 60kg, 行走速度能够达到 2km/h。具有视觉、听觉和力平衡检测能力的 BHR-03 能够实现屋外接电缆的直行、侧行、上下楼梯等运动功能, 并能实现对打太极、舞刀术等人体复杂动作的模仿<sup>[59]</sup>。

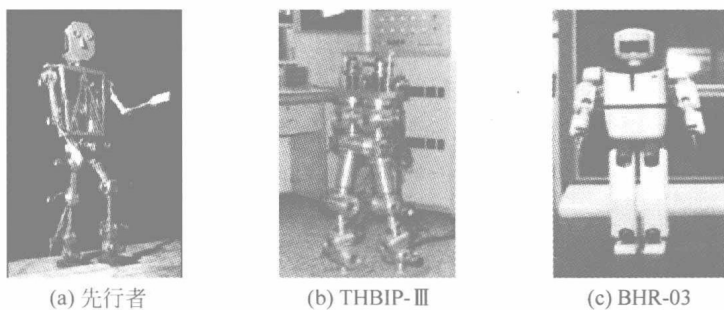


图 1.11 国内运动控制代表性双足机器人

### 1.3 行走控制

目前双足机器人的行走控制主要包括以下方法。

#### 1. 基于轨迹预规划的机器人行走控制方法

基于轨迹预规划的机器人行走控制方法是建立在双足机器人运动平衡精确的动力学和静力学分析基础上, 通过规划和控制的方法来实现双足机器人的行走。主要是采用“运动学(或动力学)分析-轨迹规划-控制”的思路, 首先对机器人本体进行建模, 然后根据环境情况人工规划得到机器人的最佳运动轨迹, 再利用反馈机制控制机器人实际运动与理想轨迹之间的偏差, 使机器人的运动尽可能趋近理想轨迹<sup>[60,61]</sup>。这一基于精确的运动学(或动力学分析)和现代控制理论的方法能够实现复杂、精确的运动控制, 该方法可追溯到 20 世纪 60 年代 McGhee 等人对静态稳定性指标和相应的静态行走控制的研究<sup>[62]</sup>。尽管利用当时的方法可以实现多足甚至四足机器人的行走、跨越障碍物等运动, 但基于静态稳定的行走运动异常缓慢, 很难具备实用价值。随后, 足式机器人的动态稳定行走能力越来越被重视。由 Vukobratovic 等人提出的 ZMP (Zero Moment Point)<sup>[63]</sup> 概念作为一种动态稳定性指标近年来逐渐广泛地应用于足式机器人的行走控制中。多数研究者试图通过规划关节或质心轨迹使机器人在执行时满足预先规划的 ZMP 轨迹或满足 ZMP 处于支撑平面内的约束, Takanishi<sup>[64]</sup> 和 Kagami<sup>[65]</sup> 通过 FFT 对 ZMP 参考轨迹进行变换, 在频域中对 ZMP 方程进行求解, 并通过 ZMP 反变换求得参考质心轨迹; Sugihara<sup>[66]</sup> 等人提出的通过预观测控制方法

和倒立摆简化动力学模型来计算符合 ZMP 参考轨迹的最优质心轨迹,该方法可以实现平坦、确定环境下足式机器人的全向行走。很多有名的机器人,如日本本田公司的 ASIMO、Sony 公司的 QRIO 以及日本的产业技术综合研究所的 HPR 系列的双足机器人都是应用该类方法实现机器人的行走控制的。然而,在实际应用中,一个最主要问题是足式机器人在行走时是半可控的,即机器人与地面的接触只能为机器人提供推力,且水平力受地面摩擦的限制,因而机器人并不总能保证精确跟踪参考轨迹。足式机器人的这种半可控问题逐渐被人们所重视:Wieber 等人定义了生存状态空间的概念<sup>[67]</sup>,并根据机器人当前状态在多种规划轨迹中进行切换; Czarnetzki<sup>[68]</sup>等人通过增加最优状态观测器的方法使得机器人对实时扰动进行响应并修改质心控制要求。但目前为止该问题并未很好的解决,一方面,该类方法归根结底仍旧是一种轨迹预规划方法,目前主要靠机器人自身的稳定裕量来抵御一些非常细小的扰动,一旦由地面不平或外部冲击引起的扰动略大,机器人就很容易摔倒;另一方面,由于基于动力学分析的轨迹规划非常复杂,机器人在该类方法控制下的较大障碍物的跨越能力并不理想;该类方法的另一个研究分支是利用数值搜索的方法寻找符合包括机器人动力学、地面摩擦因素、环境障碍物等多种约束下的机器人控制参考轨迹。由 Kuffner<sup>[69]</sup>等人提出的快速搜索树(RRT)方法可以在短时间内找到符合约束条件的机器人全身关节角参考轨迹,但该方法仍相对较慢,不能满足实时行走控制要求,并且属于开环运动规划。

## 2. 仿生控制方法

在对足式机器人的行走控制研究中,还有一类方法来源于神经生物学的研究。放眼自然界,生物体经过漫长的自然选择,逐步进化出适应环境的功能和行为。目前,通过对各种生物系统所具有的功能原理和作用机理进行工程模拟,并进一步工程应用的思路已经被认可。在自然界中,各种动物在复杂的环境中能行走自如,如果在设计机器人行走控制系统时,把目光投向自然界,通过分析动物行走的生理现象得到启示,对机器人行走控制的研究工作将是一个巨大的推动和帮助。动物的躯体运动分为反射运动、随意运动和模式运动。反射运动由外界刺激引起,运动形式固定、反应快捷,如膝跳反射;随意运动的运动形式比较复杂,受主观意识支配;模式运动是指运动型式固定的周期性运动,具有时空对称的表征,如走、跑。这三种运动形式并不是绝对独立的,动物的许多行为涉及多种运动形式。非结构环境下的机器人行走控制是目前的研究热点,考虑到这一点,工程上对动物运动的模拟是三种运动模式的综合,以模式运动为主,当地形条件或环境比较复杂时会有主观意识和反射的参与。这类运动模式具有规则的表现形式、高度稳定性和适应性,以人的行走为例,当人行走时,根本不用计算脚该抬起多高、该落到哪里;当走在湿滑的地面上时,我们会采用小步、缓慢前进;上坡时,我们会屈膝、弯腰。对人类来说,行走是一件非常简单的事情。为什么生物体会有如此协调的节律行为?生物学家认为,动物的节律行为可能是低级神经中枢的自激行为,由位于脊髓(脊椎动物)或胸腹神经节(无脊椎动物)中的中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)控制<sup>[70-72]</sup>。CPG 是由神经元构成的振荡网络,能够通过神经元之间的相互抑制产生稳定的相位互锁关系,并通过自激振荡激发躯体相关部位产生节律运动。CPG 中各神经元之间的突触连接具有可塑性,因而,CPG 网络可以表现出多种输出方式,控制动物实现不同的运动模式<sup>[73,74]</sup>。基于生物界的这种发现,Shik<sup>[75]</sup>、Cruse<sup>[76]</sup>、