

液压驱动四足仿生机器人 理论、技术与实现

李贻斌 荣学文 李 彬 著



科学出版社

液压驱动四足仿生机器人 理论、技术与实现

李贻斌 荣学文 李 彬 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是山东大学机器人研究中心在四足机器人领域多年研究成果的总结,系统介绍了液压驱动四足仿生机器人的基本理论和主要关键技术。主要内容包括:四足仿生机器人的概述;四足仿生机器人的机构设计;四足仿生机器人的运动学和动力学建模;四足仿生机器人的静步态规划与控制;四足仿生机器人的动步态规划与控制;四足仿生机器人的环境感知、识别与导航;四足仿生机器人的机载液压动力系统设计;四足仿生机器人的控制系统设计;四足仿生机器人的主动柔顺运动控制;四足仿生机器人的物理样机集成与实验验证。

本书可供从事腿足式机器人研究的科研人员、相关专业的研究生或高年级本科生阅读,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压驱动四足仿生机器人理论、技术与实现 / 李贻斌, 荣学文, 李彬著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-058852-4

I. ①液… II. ①李… ②荣… ③李… III. ①仿生机器人
IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第214280号

责任编辑: 王 哲 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张: 19 1/4 插页: 10

字数: 390 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自然界中，陆生大型动物基本上都是四足形式，四足动物在适应复杂地形、运动灵活性和负载能力方面具有巨大优势。在腿足式机器人研究领域，综合其机构复杂度和稳定性，四足机器人是一种较优的选择。因此，以四足哺乳动物为仿生对象，构造具有大负载能力、高动态性和强复杂环境适应性的四足机器人一直是机器人领域的研究热点。

在四足机器人发展的初始阶段，主要采用电池+电机形式的驱动方式，基于该驱动方式的四足机器人能量密度小、动态特性差，在对复杂地形的适应性、负载能力和持续工作能力等方面表现不尽如人意。近十年来，随着制造技术的快速发展和液压元器件的进一步微型化，国际上掀起了基于生物仿生和高功率密度液压驱动四足机器人的研究热潮。在美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)资助下，2006年以来，美国波士顿动力公司(Boston Dynamics)先后发布了BigDog、LS3、Spot等多款基于液压驱动的四足机器人，展示了良好的野外移动能力、地形适应能力和抗扰能力。上述四足机器人的巨大成功在国际机器人界引起了极大轰动，包括我国在内的多个国家快速提出了相关科技计划，掀起了高性能液压驱动仿生机器人的研究热潮，并已研制出多台机器人样机，如意大利的HyQ、韩国的JINPOOG等四足仿生机器人。

自2011年起，在国家863计划主题项目“高性能四足仿生机器人”的支持下，山东大学、国防科技大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学和北京理工大学分别组成研究团队，开展了液压驱动四足仿生机器人的研究工作，并研制出了各自的液压驱动四足仿生机器人样机，均表现出了比传统电驱动四足机器人更强的动态性能和更好的负重能力，为我国高性能腿足仿生机器人的实用化研究奠定了较好的理论基础。

自2009年起，山东大学开始从事液压驱动四足机器人物理平台的研发，迄今为止已开发出3代液压驱动四足机器人，在机器人仿生机构设计、机载液动力系统、动态稳定控制和系统集成等方面积累了丰富的理论、方法和技术手段。本书以山东大学机器人研究中心自主研发的高性能液压驱动四足仿生机器人SCalf-II为研究对象，详细阐述了四足仿生机器人运动学和动力学建模方法、仿生步态规划与稳定运动控制、复杂非结构环境中的机器人-环境交互、环境感知与人员跟随、高功率密度机载液动力系统设计等方面的内容，初步建立起高性能四足仿生机器人的基础理论体系。并通过虚拟样机仿真和机器人样机实验，验证相关理论和技术的可

行性和有效性,为多足机器人的发展提供重要的基础理论和关键技术支撑。全书内容分述如下。

第1章阐述了四足仿生机器人的研究现状,并指出了当前四足机器人发展中需要解决的关键技术和未来的发展趋势。

第2章分析了四足机器人的常用拓扑结构,并给出了SCalf-II机器人机构的详细设计方案。

第3章阐述了四足机器人的运动学和动力学建模与分析方法,推导了四足机器人单腿正运动学和逆运动学方程,基于拉格朗日方法和牛顿-欧拉方法的单腿动力学方程,为后续机器人的运动控制提供了相应的理论基础。

第4章阐述了机器人的静步态规划与控制方法,包括步态规划概念、四足机器人稳定性、连续静步态规划、非连续静步态规划、连续自由步态和使用静步态时的动力学控制方法。

第5章阐述了机器人的基于虚拟模型的动步态规划与控制方法。

第6章阐述了机器人的基于解耦控制的动步态规划与控制方法。

第7章阐述了四足机器人环境感知、识别与导航方法,包括环境感知系统、地形识别与路径优化算法研究、领航员识别与跟随算法研究。

第8章阐述了四足机器人机载液压动力系统设计方法,包括机载液压动力系统的参数计算、系统集成和发动机转速控制。

第9章阐述了四足机器人的控制系统设计,主要介绍了集中式控制和分布式控制这两种架构,并对其性能进行了对比。

第10章阐述了机器人单腿主动柔顺运动控制方法,包括液压驱动器建模与伺服控制算法、单腿柔顺控制算法和单腿主动柔顺控制实验。

第11章阐述了四足机器人物理样机的集成和在不同地面环境与工况下的实验验证。

全书由山东大学机器人研究中心的李贻斌教授负责总体策划,研究中心的四足机器人课题组人员荣学文、张国腾、柴汇、山东大学博士后孟健、山东科技大学的张帅帅和齐鲁工业大学的李彬、张慧参与撰写,李彬、荣学文最后整理完成。其中,第1章由李贻斌、李彬撰写,第2章由李彬、荣学文、华子森撰写,第3章由李彬、柴汇、张国腾撰写,第4章由张帅帅撰写,第5章由张国腾撰写,第6章由孟健撰写,第7章由张慧撰写,第8章由荣学文、李彬撰写,第9章由孟健撰写,第10章由张国腾撰写,第11章由荣学文、李彬撰写。本书所述理论和技术成果是在国家自然科学基金重点项目(编号61233014、U1613223)和面上项目(编号61773226)、国家863计划项目“高性能四足仿生机器人关键技术研究”(编号2011AA041001)和“面向野外环境的四足仿生机器人实用技术研发”(编号2015AA042201)的资助下完成的。山东大学机器人研究中心在液压驱动四足机器人研究初期,得到了山东

大学的大力资助，以及山东交通学院阮久宏教授的热情鼓励和积极帮助，在此表示衷心感谢！研究中心的丁超、杨琨、陈腾、辛亚先等博士研究生在 SCalf-II 机器人建模、仿真和物理样机实验中也做了大量工作，在此一并感谢。

限于作者水平，书中难免存在不足之处，恳请广大读者和专家指正！

作 者

2018年6月于济南

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 四足仿生机器人研究现状	1
1.2 电驱动四足仿生机器人	2
1.3 液压驱动四足仿生机器人	7
1.4 四足仿生机器人关键技术和发展趋势	10
1.4.1 四足机器人的关键技术	11
1.4.2 四足机器人的发展趋势	12
参考文献	13
第 2 章 四足机器人拓扑结构分析与机构设计	17
2.1 四足机器人的拓扑结构	17
2.2 SCalf-II 液压驱动四足机器人的机构设计	18
2.2.1 机器人躯干的设计	19
2.2.2 机器人腿关节的设计	19
2.2.3 带弹簧缓冲的机器人小腿机构设计	21
2.2.4 液压伺服油缸的设计	22
2.2.5 SCalf-II 四足机器人仿生机构	23
参考文献	24
第 3 章 运动学与动力学分析	25
3.1 四足机器人运动学建模	25
3.1.1 SCalf-II 四足机器人 D-H 坐标系	26
3.1.2 连杆变换通式	27
3.1.3 SCalf-II 四足机器人正向运动学模型	28
3.1.4 SCalf-II 四足机器人逆向运动学模型	31
3.2 四足机器人动力学建模	33
3.2.1 拉格朗日方法	33
3.2.2 牛顿-欧拉方法	38
参考文献	44

第 4 章 静步态规划与控制	46
4.1 静步态规划概念	46
4.2 四足机器人步态稳定性	47
4.3 连续静步态规划	50
4.3.1 四足机器人的迈步顺序	50
4.3.2 四足机器人重心轨迹规划	53
4.3.3 摆动足轨迹规划	60
4.3.4 实验与数据分析	64
4.4 非连续静步态规划	68
4.4.1 四足机器人的迈步顺序	70
4.4.2 四足机器人姿态调整规划	70
4.4.3 四足机器人重心轨迹规划	72
4.4.4 摆动足轨迹规划	75
4.4.5 实验与数据分析	80
4.5 连续自由步态	83
4.5.1 四足机器人的迈步顺序	85
4.5.2 四足机器人重心轨迹规划	86
4.5.3 四足机器人最优落足点的选择	91
4.5.4 摆动足摆动曲线规划	96
4.5.5 连续自由步态的步态流程图	96
4.5.6 实验与数据分析	97
参考文献	100
第 5 章 基于虚拟模型的动步态规划方法	105
5.1 引言	105
5.2 四足机器人模型	107
5.3 支撑相虚拟模型控制	109
5.3.1 躯干-支撑腿模型	109
5.3.2 躯干运动控制	111
5.4 摆动相虚拟模型控制	112
5.4.1 摆动足运动轨迹规划	112
5.4.2 摆动腿运动控制	114
5.5 Trot 步态控制器设计	115
5.6 虚拟模型控制实验验证	116

5.6.1	平地行走实验	117
5.6.2	不平坦地面行走实验	118
5.6.3	侧向冲击实验	120
5.7	具有四足腾空相的虚拟模型动步态规划	122
5.7.1	Flight Trot 模型简化与控制	122
5.7.2	基于 Levenberg-Marquardt 方法的机器人侧向运动速度控制	124
5.7.3	摆动腿动作规划	125
5.7.4	机器人运动控制	126
5.7.5	步态切换	127
5.7.6	具有腾空相虚拟模型控制实验验证	128
	参考文献	132
第 6 章	基于解耦控制的动步态规划方法	136
6.1	引言	136
6.2	四足机器人平面内全方位移动控制方法	137
6.2.1	四足机器人前进时的足端轨迹规划	137
6.2.2	基于 Trot 步态的四足机器人全方位移动控制方法	138
6.2.3	基于足端运动速度估计的步程计设计	141
6.2.4	实验验证	141
6.3	四足机器人斜坡移动控制方法	143
6.3.1	四足机器人的姿态控制与支撑位置调整策略	143
6.3.2	实验验证	147
	参考文献	150
第 7 章	四足机器人环境感知、识别与导航	152
7.1	四足机器人环境感知系统	152
7.1.1	四足机器人环境感知现状	152
7.1.2	激光测距系统	154
7.1.3	单目视觉系统	158
7.1.4	TOF 相机系统	160
7.2	四足机器人环境感知传感器校正与数据融合	162
7.2.1	传感器校正及融合原理	163
7.2.2	单目相机与激光扫描仪联合标定	168
7.2.3	TOF 相机校正实验	171

7.2.4	单目相机与激光扫描仪联合标定实验	176
7.3	四足机器人地形识别与路径规划算法研究	178
7.3.1	地图创建与地形识别	179
7.3.2	A*算法及其改进算法原理	185
7.3.3	改进的 A*算法	188
7.3.4	路径平滑	199
7.3.5	地形识别实验	200
7.3.6	IA*算法仿真	200
7.3.7	EA*算法仿真	205
7.4	四足机器人领航员识别与跟随实现	206
7.4.1	移动机器人人员识别现状	207
7.4.2	采用激光扫描仪的领航员识别实验	209
7.4.3	四足机器人目标跟随仿真	211
7.4.4	四足机器人目标跟随实验	214
	参考文献	215
第 8 章	四足机器人机载液压动力系统设计	222
8.1	引言	222
8.2	SCalf-II 机器人液压系统原理设计	223
8.3	机载液压动力系统参数的设计	225
8.3.1	机器人伺服油缸位移与关节变量之间的变换	225
8.3.2	关节驱动力计算	228
8.3.3	液压动力系统流量的设计	234
8.3.4	蓄能器容积的设计	237
8.4	机载液压动力系统的集成	238
8.5	发动机-液压泵转速的匹配与控制	239
8.5.1	发动机-液压泵转速匹配	239
8.5.2	发动机-液压泵转速控制	240
8.5.3	发动机-液压伺服控制器设计	241
8.6	SCalf-II 机器人运行实验	243
	参考文献	245
第 9 章	四足机器人控制系统设计	247
9.1	引言	247

9.2	四足机器人控制系统的设计和实现	247
9.2.1	四足机器人集中式控制系统设计	248
9.2.2	四足机器人分布式控制系统设计	249
9.3	四足机器人控制方法实验验证与性能分析	250
9.3.1	实时性对比	251
9.3.2	CPU 占用率对比	252
9.3.3	机器人行走测试	254
	参考文献	254
第 10 章	液压驱动机器人主动柔顺运动控制	256
10.1	引言	256
10.2	单腿测试平台控制系统概述	256
10.2.1	控制系统硬件电路设计	257
10.2.2	控制系统软件设计	265
10.3	液压伺服油缸建模	268
10.3.1	液压力建模	269
10.3.2	摩擦力建模	270
10.3.3	液压伺服油缸输出力模型	271
10.3.4	关节输出扭矩控制	271
10.4	单腿主动柔顺控制	274
10.5	单腿主动柔顺控制实验	276
10.5.1	单腿柔顺实验	276
10.5.2	自由下落实验	278
10.5.3	连续弹跳实验	279
	参考文献	281
第 11 章	液压驱动四足机器人的实验验证	282
11.1	引言	282
11.2	SCalf-I 机器人的集成	282
11.3	SCalf-I 机器人的实验验证	283
11.4	SCalf-II 机器人的集成	284
11.5	SCalf-II 机器人的实验验证	286
11.5.1	控制系统架构	286
11.5.2	发动机-泵转速控制实验	287

11.5.3	复杂地形环境适应性能测试	287
11.5.4	最快步行速度测试	288
11.5.5	加速控制性能测试	288
11.5.6	雪地、草地环境的适应性能测试	288
11.5.7	负重能力测试	289
11.6	SCalf-II 机器人的升级改造和实验	289
结束语		296
彩图		

第1章 绪 论

1.1 四足仿生机器人研究现状

在地面移动机器人研究领域，腿足式机器人具有较强的复杂环境适应能力和运动灵活性，综合腿足式机器人的机构复杂度、运动灵活性和稳定性，四足机器人是一种较优的选择^[1]。从中国古代传说中的“木牛流马”到国外19世纪由Rygg设计的“机械马”，人类一直未放弃对四足行走机器的探索。近代随着科技的发展，国内外许多研究机构对四足机器人系统进行了大量的研究，研制出了各式各样的四足机器人。

四足机器人主要有三种驱动方式：电驱动、气压驱动和液压驱动。电驱动装置由于具有成熟的技术和低廉的价格，是机器人领域最常用的驱动方式，但较小的功率密度限制了机器人的负重能力、动态性和续航能力。气压驱动采用压缩空气作为介质传递动力，具有无污染、成本低和被动柔顺等显著优点，但其较小的功率密度和较大的气源装置不宜用于四足仿生机器人。

液压驱动是通过工作在大约21MPa(有些系统最高可以达到70MPa)的液压油来传递运动和动力的，从而使得液压驱动装置具有很高功率密度和快速响应能力。与电驱动系统相比较，液压驱动系统具有如下优点：(1)功率/质量比大，使机器人负重能力强；(2)可采用内燃机驱动，添加燃料方便，续航能力长；(3)更快速的动态响应能力，有利于机器人的稳定；(4)更好的速度刚性，其动态特性受负载变化的影响更小；(5)关节驱动功率分配更方便，可以将系统驱动功率在极短时间内集中提供给指定关节，满足机器人特殊动作驱动的要求；(6)液压作动器布置容易，使机器人腿部结构更加简单、紧凑。液压驱动技术的发展趋势是小型化、高带宽、机电液高度集成、数字驱动，并易于接入各种自动控制系统。随着性能指标的提高和高频响伺服阀技术的逐渐成熟，液压驱动技术在一些中小功率的机械设备和移动机器人上获得了越来越多的应用，很多科研人员开发出了一些具有高动态特性和大负载能力的基于液压驱动的四足机器人^[2]。

本章主要介绍电驱动和液压驱动四足仿生机器人的发展现状，并引出四足机器人当前的关键实现技术和未来的发展趋势。

1.2 电驱动四足仿生机器人

1968 年, McGhee 和 Frank 创作出第一台完全用电脑控制的步行机器 Phony Pony(图 1.1), 该四足移动机器人每条腿有 2 个自由度, 能实现简单的爬行运动^[3]。

20 世纪 80 年代初期, Kimura 在 1984~1986 年研制出了 Collie-1 电驱动四足机器人(图 1.2), 并于 1986~1988 年期间研发了 Collie-2 四足机器人, 在较小的运动速度下, 实现了四足机器人的稳定性、最大速度、能量消耗指标的优化和动步态的行走及转换^[4]。

Hirose 为了提高步行机器人的环境适应能力, 研制了 TITAN-IV 型四足机器人(图 1.3), 该机器人采用智能控制方法, 利用姿态传感器和触觉传感器, 可以实时产生具有地形适应能力的运动步态^[5]。

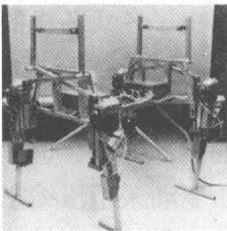


图 1.1 Phony Pony

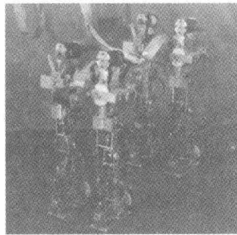


图 1.2 Collie-1

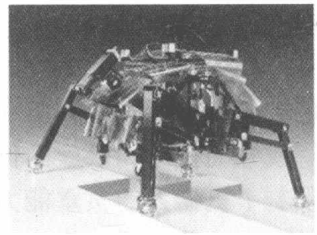


图 1.3 TITAN-IV

德国的 Dillmann 和他的团队多年来致力于研究复杂性的足式机器人的行走策略, 并且延伸到对足式哺乳动物的运动研究, 开发了基于振荡器的步态生成器、基于腿部轨迹学习的行走策略等多种研究方法, 并研制了四足机器人实验平台 BISAM(图 1.4)^[6]。瑞典皇家理工学院在 2000 年左右研制了 WARP1 四足仿生机器人(图 1.5), 目的是研究四足移动机器人在复杂环境下的自主行走, 实现静态和动态行走^[7]。

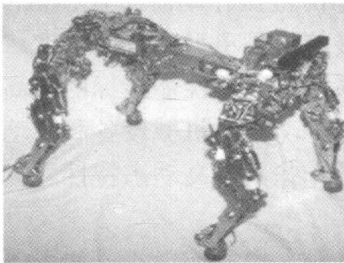


图 1.4 BISAM

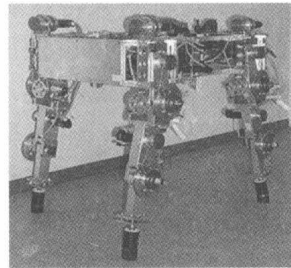


图 1.5 WARP1

日本电气通信大学 1999 年启动了基于中枢模式发生器(Center Pattern Generator,

CPG)控制、具有动态步行能力的 Patrush 系列机器人(图 1.6)的研制^[8]; 以 Patrush 机器人为基础, 进一步开发了 Tekken 系列小型仿狗四足机器人(图 1.7), 该机器人采用了和 Patrush 基本相同的控制算法, 但是在膝关节处采用了一种弹簧结构来提高能量的利用效率^[9]。2009 年则启动了具有 16 个自由度的 Kotetsu 四足机器人(图 1.8)的研制^[10]。

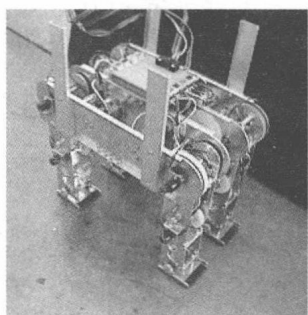


图 1.6 Patrush-II

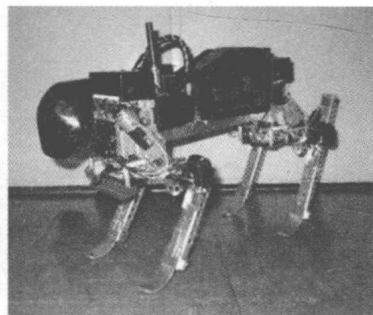


图 1.7 Tekken

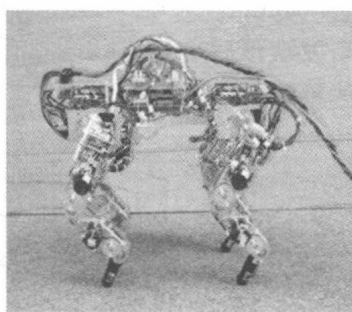


图 1.8 Kotetsu

日本大阪大学在 2002 年左右开发了 PONY 仿马四足机器人(图 1.9)^[11]。美国俄亥俄州立大学和斯坦福大学在 2001 年左右联合研制了 KOLT 机器人(图 1.10)^[12]等。西班牙科学研究理事会工业自动化研究所研发了 SILO4^[13] (四足运动系统的西班牙语简写), 如图 1.11 所示。该机器人的尺寸为 310mm×310mm×310mm, 总重约 18kg, 具有尺寸小、质量小、易于控制的特点, 能够跨越 250mm 的障碍, 在负重 15kg 的情况下, 能够以 1.5m/min 的速度向前运动, 且能够以自由步态通过复杂地形。

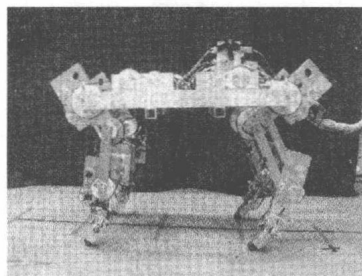


图 1.9 PONY

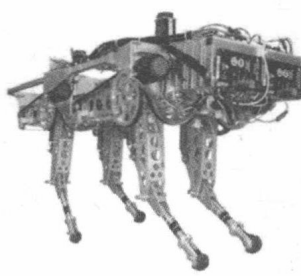


图 1.10 KOLT

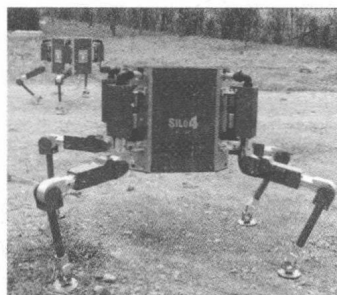


图 1.11 SILO4

2012 年, 日本东芝公司发布了一款可用于探索日本福岛核电站放射性区域的四足机器人^[14](图 1.12)。该机器人高 106.6cm, 重 65kg, 能搬运总重 20kg 的重物, 行走最高时速为 2km/h, 可连续工作 2h。机器人能够在斜坡上行进, 也可以自由地上下 22cm 以下的台阶。躯干上装有机械臂, 可以拉吊物体, 也可以利用机械臂实现翻倒后的自行站立。为研究足式机器人在极端复杂地形下的行走控制策略, 美国

波士顿动力公司研发了 LittleDog 四足机器人平台^[15], 如图 1.13 所示。LittleDog 长 340mm, 宽 185mm, 每条腿包括髋关节前摆、髋关节侧摆和膝关节前摆 3 个自由度, 关节处装有位移传感器, 机器人内部还集成了惯性传感模块和力传感器。LittleDog 采用电池驱动, 在平坦地面上最快前进速度可达 25cm/s。2012 年, 瑞士联邦理工学院研制了基于串联弹性驱动的四足机器人 StarlETH^[16], 如图 1.14 所示。StarlETH 长 710mm, 宽 640mm, 高 580mm, 自重 23kg, 最大负载 25kg。机器人可以从 0.5m 高度跌落后平稳着陆, 具有抗侧向冲击能力, 并在跑步机上实现了对角小跑步态快速越障行走。

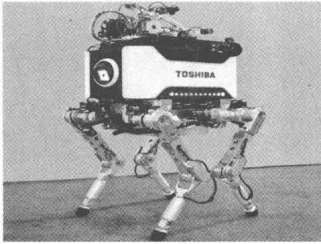


图 1.12 东芝公司的四足机器人



图 1.13 LittleDog

麻省理工学院(MIT)仿生机器人实验室自 2009 年开始开发了一款名为 MIT Cheetah 的四足机器人^[17], 如图 1.15 所示。该样机公布于 2012 年, 机器人自重约 33kg, 最高速度可达 22km/h。该机器人效率极高, COT(Cost of Transport)达到了 0.51, 与同等重量的动物耗能量处于同一水平。随后, 麻省理工学院仿生机器人实验室开发的新版 Cheetah 机器人——Cheetah v2 诞生, 如图 1.16 所示, 新版 Cheetah 机器人的外形较第一代有了很大改变, 该机器人高大约 90cm, 宽 45cm, 相当于身高的一半, 能使用激光雷达自动探测障碍并跳过较高的障碍物。在奔跑过程中, 机器人能够自主调整步长确定起跳位置, 并精确计算腿部推力以顺利跳过障碍, 能在 8km/h 奔跑时跳过高约 45cm 的障碍。

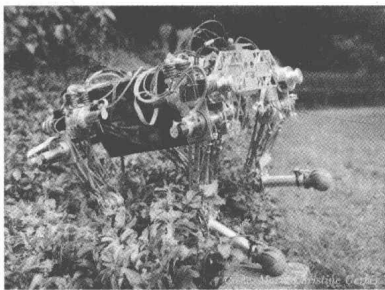


图 1.14 StarlETH

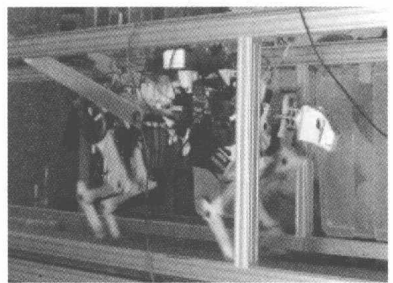


图 1.15 MIT Cheetah

2016 年, 波士顿动力公司又发布了纯电驱动四足机器人 Spotmini, 如图 1.17 所

示, 该四足机器人可以较好地适应家居室内环境, 可以爬楼梯, 跌倒后可以自主站立恢复平衡, 利用安装在躯干上的机械臂可以拿东西等, 进一步提高了电驱动四足机器人的性能^[18]。

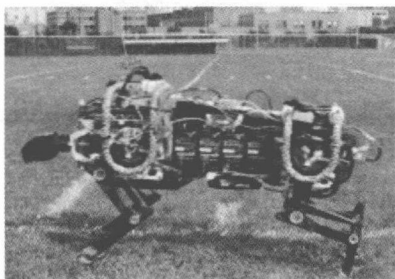


图 1.16 MIT Cheetah v2

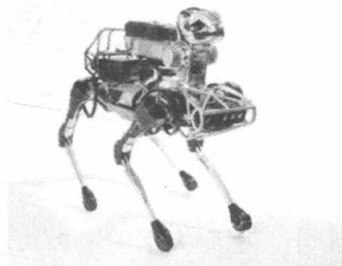


图 1.17 Spotmini

国内最早研制四足仿生机器人的是上海交通大学的马培逊教授。以马培逊为主的研究人员自 20 世纪 80 年代就开展了四足机器人静态、动态步行的系列研究, 1997 年, 上海交通大学开发了 JTUWM-III^[19]四足机器人, 如图 1.18 所示。该机器人每条腿具有 3 个主动关节和 1 个被动关节连接的圆形足底。

2002 年, 清华大学的郑浩峻和张秀丽博士模仿哺乳动物的运动机理, 研制了 BIOSBOT^[20]四足机器人(图 1.19), 并开展了基于中枢模式发生器的四足机器人运动控制研究, 在机器人平台上验证了相应的步态规划方法。基于 CPG 控制, 该机器人能够以静步态在水平或小角度倾斜地面上行进, 并具有一定的越障能力。

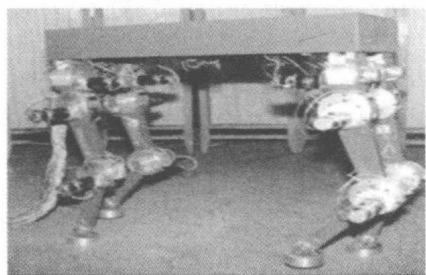


图 1.18 JTUWM-III

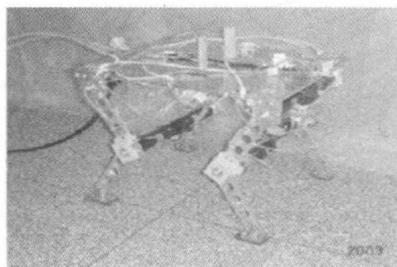


图 1.19 BIOSBOT

2007~2008 年, 西北工业大学报道了其研制的四足机器人, 如图 1.20 所示^[21]。中国科学院自动化研究所研制了较大型的电动四足机器人 FROG-I(图 1.21), 并实现了室外运行实验^[22]。2013 年, 北京交通大学张秀丽开发了一台具有腰部柔顺的四足机器人^[23], 如图 1.22 所示。为增加运动的柔顺性, 机器人的腰部安装有一个柔性关节。该机器人具有 8 个主动关节, 大腿和小腿长度分别为 120mm 和 125mm, 总体尺寸为 500mm×320mm×300mm, 机体采用轻质的铝合金材料, 总重量约为 6.0kg。