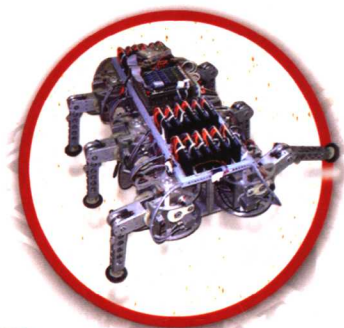


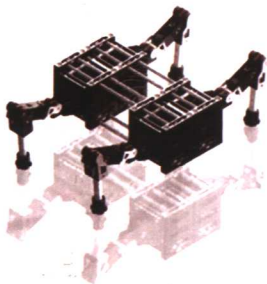
多足步行机器人 运动规划与控制

(研究成果获教育部提名国家科学技术奖自然科学一等奖)

Motion Planning and
Control of
Multilegged
Walking Robots



◎ 陈学东 孙 翊 贾文川 / 著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

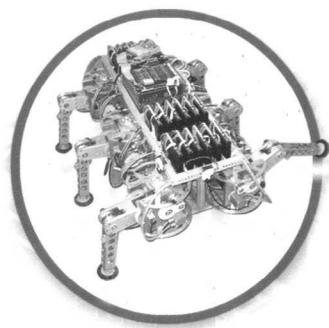
TP242

56

多足步行机器人 运动规划与控制

◎ 陈学东 孙 翊 贾文川 / 著

Motion Planning and
Control of
Multilegged
Walking Robots



华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

多足步行机器人运动规划与控制/陈学东 孙 翊 贾文川 著
武汉:华中科技大学出版社,2006年6月

ISBN 7-5609-3718-7

- I. 多…
- II. ①陈… ②孙… ③贾…
- III. 机器人-运动规划-控制
- IV. TP242

多足步行机器人运动规划与控制 陈学东 孙翊 贾文川 著

策划编辑:黎秋萍

责任编辑:钟 珊

责任校对:刘 竣

封面设计:刘 卉

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:880×1230 1/32

印张:12.5 插页:2

字数:286 000

版次:2006年6月第1版

印次:2006年6月第1次印刷

定价:24.80元

ISBN 7-5609-3718-7/TP·605

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书针对多足步行机器人的机构特点,从多足步行运动学基础、多足步行步态生成方法、机器人运动控制与实现等方面介绍了这类机器人运动规划与控制的基础理论和基本方法。

本书的内容主要包括:多足步行机器人正运动学和逆运动学的解析求解方法;多足步行机器人动力学模型及脚力优化分配的计算方法;多足步行机器人静态稳定性的数学描述及计算方法;多足步行机器人基本步态的生成方法;多足步行机器人的空间测算定位方法、环境识别及分类方法、自适应导向控制方法;多足步行机器人仿生控制的基本原理与系统设计方法;多足步行机器人运动控制系统的设计实例及基本实验结果等。

智能机器人技术正在突飞猛进地发展,其理论研究也如星星之火,可以燎原。本书既可作为从事机器人技术研究和应用的科研人员的参考书,又可作为高等院校相关专业的研究生教材。

序

多足步行机器人是一种具有冗余驱动、多支链、时变拓扑运动机构的特种机器人，其运动规划与控制是富有挑战性的课题，其中许多基础理论和技术问题亟待解决，是机器人领域的一个重要研究方向，也是国内外广大研究人员关注的研究热点之一。陈学东博士自1997年起，在多足步行机器人的运动学建模、多足步行稳定性的实时计算、多足步态自动生成与控制、多足步行机器人的脚力规划、多足步行机器人的环境识别及自适应导向、多足步行机器人的仿生控制以及新型多足步行机器人的研究与开发等方面开展了大量和深入的研究工作，取得了显著和系统性的研究成果。应该说他们的这些研究工作得到了国内外同行的公认，从而获得了教育部提名国家科学技术奖自然科学一等奖。

陈博士的这本专著从多足步行的基础理论、基本运动控制技术、控制体系结构与实现等方面系统地介绍了他们的研究工作。显然，如果不十分熟悉前人的工作，如果没有扎实的理论功底，如果没有活跃的创新思维能力，如果没有持久和勤奋的努力，就很难做出这一系列突出的研究成果。这本专著无疑为我国相关机器人领域的研究添了砖、加了瓦，有助于推动我国机器人技术及其研究的发展。陈学东博士正值壮年，从他的身上我看到了我国机器人技术研究后继有人、发展有望，对此，我倍感欣慰。当然，技术的发展是无止境的，希望陈学东博士继续努力，在机器人研究方面做出更大的贡献。

中国科学院院士
华中科技大学教授

熊有伦

2006年2月于喻园

前 言

自 20 世纪 80 年代机器人学开拓者、美国著名机器人学家 R.B.McGhee 等人开始研究四足步行机器人以来,多足步行机器人的研究一直是众多学者关注的热点和难点,其研究状况正如加拿大著名机器人学家 J.Angles 教授指出的“步行机器人的基础理论研究步伐要远滞后于它的技术开发步伐”。之所以这么说是因为,虽然研究人员纷纷研制开发了各种多足步行机器人的实验模型或原理样机,但实现这类机器人智能化运动的一些基础科学问题并没有得到根本的解决,如针对具有冗余驱动、多支链、时变拓扑机构的多足步行机器人的运动规划与控制问题即是其中之一。

笔者 1997 留学日本,开始从事多足步行机器人运动规划与控制的研究,针对多足步行运动学、多足步行稳定性、多足步态生成及导向控制等问题开展了系列研究工作,提出了四足步行机器人正运动学解析求解方法、一种新的四足步行机器人静态稳定性的数学描述和计算方法、四足步行机器人脚力优化分配的计算方法、四足步行机器人全方位步态的生成算法,以及四足步行机器人自适应导向控制方法等。

2001 年回国后,笔者受国家 863 计划和国家自然科学基金的资助,继续开展了具有腿/臂融合、可重构多足步行机器人的研究,先后研制了具有我国自主知识产权的“4+2”多足步行机器人和 MiniQuad 多足步行机器人,对多足步行机器人的运动规划与控制,以及机器人腿/臂功能融合和模块化实现的控制体系及其设计进行了研究,并初步研究了多足步行机器人仿生运动控制原理和方法,取得了一些研究成果。应该说,我们在多足步行机器人运动规划与控制方面的研究得到了国内外同行的认同,主要成果不仅在国内权威期刊如 Trans. of the ASME、IEEE/ASME Trans. on Mechatronics、

J. of Robotic System、J. of Intelligent of Robotic Systems、《机械工程学报》等上发表，还获得 2005 年教育部提名国家科学技术奖自然科学一等奖。

多足步行机器人的研究方兴未艾，其技术距实用化还有相当的距离。笔者所开展的工作尚是初步的和尝试性的，还有大量的研究工作需要大家共同去做。希望本书的出版发行能起到抛砖引玉的作用，同时也敬请读者及同行对本书中的缺点和不当之处批评指正。

本书第 0、1~5、7、9 章由陈学东撰写，第 6 章和第 8 章分别由贾文川和孙翊撰写；全书由陈学东统稿。

最后，笔者衷心感谢国家 863 计划和国家自然科学基金的资助，感谢日本导师渡边桂吾教授的指导和帮助，感谢华中科技大学机械科学与工程学院提供的研究平台，感谢华中科技大学出版社的大力支持和帮助。同时，笔者还要感谢研究生曾理湛、郭鸿勋、苏军、田文罡、周明浩、李志鑫、雷金、鲍秀兰、郭合忠、谢德东等同学在本书资料整理、图表绘制、打印等方面所付出的辛勤劳动。

陈学东

2005 年 12 月于喻家山

目 录

0 绪论	(1)
0.1 多足步行机器人的潜在用途	(1)
0.2 多足步行机器人的发展概况	(4)
0.3 多足步行机器人运动规划与控制的研究现状	(11)
0.3.1 关于多足步行机器人的步态生成方法研究	(11)
0.3.2 关于多足步行机器人的步态控制方法研究	(12)
0.3.3 关于多足步行机器人的脚力分配研究	(13)
0.3.4 多足步行机器人运动控制中的几个关键技术	(15)
0.4 本书的目的和体系结构	(17)
0.4.1 本书目的	(17)
0.4.2 本书体系结构	(18)
1 多足步行机器人的运动学计算	(21)
1.1 引言	(21)
1.2 多足步行机器人机构特征	(22)
1.3 站立腿的运动学计算	(23)
1.3.1 齐次变换	(24)
1.3.2 站立腿的逆运动学计算	(31)
1.4 摆动腿的运动学计算	(37)
1.5 多足步行机器人的运动学计算	(39)
1.5.1 多足步行机器人的逆运动学计算	(40)
1.5.2 多足步行机器人的正运动学计算	(43)
1.6 多足步行机器人的速度和加速度计算	(60)
1.6.1 旋转矩阵的导数	(60)

1.6.2	多足步行机器人步行速度计算	(62)
1.6.3	多足步行机器人步行加速度计算	(71)
1.7	本章小结	(73)
2	多足步行机器人动力学及脚力规划	(74)
2.1	引言	(74)
2.2	多足步行机器人的动力学模型	(75)
2.2.1	完整约束方程	(76)
2.2.2	关节空间运动变换	(77)
2.2.3	多足步行机器人的动力学模型	(78)
2.3	机器人脚力分配问题的提出	(78)
2.3.1	关节驱动的约束分析	(81)
2.3.2	摩擦及有效接触的约束分析	(83)
2.4	线性规划方法	(84)
2.5	优化的平方规划方法	(88)
2.5.1	约束条件的等效和简化	(89)
2.5.2	优化目标函数	(91)
2.6	实例仿真分析	(95)
2.7	本章小结	(98)
3	多足步行机器人静态稳定性计算	(99)
3.1	引言	(99)
3.2	静态稳定性及其一般描述	(100)
3.2.1	静态稳定性的直接判断	(100)
3.2.2	静态稳定性的对角线原理	(102)
3.3	新型静态稳定性的计算方法	(103)
3.3.1	静态稳定性区域的定义	(103)
3.3.2	静态稳定性的数学描述	(105)
3.3.3	静态稳定性的简化计算方法	(109)
3.4	静态稳定性分析的具体运用	(111)
3.5	本章小结	(113)

4	多足步行机器人步态生成方法	(114)
4.1	引言	(114)
4.2	步态的相关定义	(115)
4.3	多足步行机器人平动步态生成方法	(117)
4.3.1	临界方向角	(117)
4.3.2	腿的摆动顺序	(119)
4.3.3	最大步幅	(122)
4.3.4	腿的摆动轨迹	(126)
4.4	定点转动步态的算法	(129)
4.4.1	腿的摆动顺序	(129)
4.4.2	最大转动角	(131)
4.5	多足步行机器人的步态生成与控制实例	(131)
4.5.1	平动步态生成结果	(132)
4.5.2	定点转弯步态生成结果	(135)
4.5.3	步态控制实现	(138)
4.6	多足步行机器人步态生成实例分析	(140)
4.6.1	四足步行机器人平动步态	(140)
4.6.2	四足步行机器人定点转弯步态	(144)
4.6.3	六足步行机器人步态	(146)
4.7	本章小结	(150)
5	多足步行机器人的测算定位及环境识别与导向控制	(151)
5.1	引言	(151)
5.2	多足步行机器人的测算定位	(151)
5.2.1	TITAN-VIII机器人平动爬行时的测算定位	(152)
5.2.2	TITAN-VIII机器人一般步态爬行时的 测算定位	(156)
5.3	多足步行机器人的环境识别及分类	(158)
5.3.1	环境的定义	(158)
5.3.2	环境的类别	(159)

- 5.3.3 环境的分类及识别 (162)
 - 5.3.3.1 基于 ART-II 网络的数学模型 (162)
 - 5.3.3.2 神经网络的训练 (165)
 - 5.3.3.3 基于 ART-II 的环境识别器 (171)
- 5.4 多足步行机器人的自适应导向控制算法 (172)
 - 5.4.1 自适应模糊控制策略 (172)
 - 5.4.2 适于自适应模糊控制的环境识别器 (174)
 - 5.4.3 模糊推理 (174)
 - 5.4.3.1 模糊化 (175)
 - 5.4.3.2 自适应模糊规则库 (177)
 - 5.4.3.3 去模糊 (181)
 - 5.4.4 导向控制算法 (183)
 - 5.4.5 机器人导向控制仿真 (183)
- 5.5 本章小结 (185)
- 6 多足步行机器人仿生控制原理与方法 (186)
 - 6.1 引言 (186)
 - 6.2 多足动物的思维与行为特征 (187)
 - 6.2.1 多足动物的生命特征 (187)
 - 6.2.2 生命的控制行为方式 (189)
 - 6.2.3 多足动物控制行为的特征 (191)
 - 6.3 仿生式控制体系结构 (192)
 - 6.3.1 机器人控制体系结构的基本概念 (192)
 - 6.3.2 机器人控制体系结构的研究背景 (193)
 - 6.3.3 仿生式控制体系结构的思想原理 (196)
 - 6.3.4 仿生式控制体系结构的整体设计 (197)
 - 6.3.5 各行为控制层的具体实现 (202)
 - 6.3.5.1 趋性行为控制层的设计实现 (202)
 - 6.3.5.2 反射性行为控制层的设计实现 (202)
 - 6.3.5.3 本能式行为控制层的设计实现 (202)

6.3.5.4	慎思式行为控制层的设计实现	(205)
6.3.5.5	社会式行为控制层的设计实现	(206)
6.3.6	各行为层间的学习与进化	(206)
6.3.6.1	本代内的学习	(206)
6.3.6.2	多代间的进化	(207)
6.4	控制器软硬件协同设计方法	(207)
6.4.1	机器人系统协同设计概述	(208)
6.4.1.1	软硬件协同设计的概念	(208)
6.4.1.2	机器人系统软硬件协同设计流程	(210)
6.4.2	系统规范语言	(212)
6.4.3	系统模型的建立	(214)
6.4.4	软硬件规划	(215)
6.4.5	软硬件自动组合技术	(216)
6.4.6	软硬件协同模拟	(217)
6.5	仿生式体系结构控制器设计	(217)
6.5.1	概念模型到控制器物理模型的映射关系	(217)
6.5.2	仿生式体系结构控制器物理模型	(218)
6.5.3	行为生成模块的设计	(220)
6.5.3.1	统一存储体系的规划	(220)
6.5.3.2	图形显示与输入系统的设计	(222)
6.5.3.3	主控系统的设计	(223)
6.5.4	信息交流模块的设计	(224)
6.5.4.1	USB 通信模块及协议设计	(225)
6.5.4.2	CAN 通信模块及协议设计	(227)
6.5.4.3	802.11b 无线通信模块及协议设计	(229)
6.5.4.4	RS232 串行通信模块及协议设计	(231)
6.5.5	信息感知模块的设计	(232)
6.5.5.1	视觉传感系统的设计	(232)
6.5.5.2	听觉传感系统的设计	(234)

6.5.5.3	接近觉传感器组件的设计	(237)
6.5.5.4	触觉传感器组件的设计	(237)
6.5.5.5	力觉传感器组件的设计	(238)
6.5.5.6	信息融合中心的设计	(239)
6.5.6	关节驱动模块的设计	(240)
6.5.7	遥控系统的设计	(242)
6.5.8	系统整体封装设计	(243)
6.5.9	控制器应用软件开发包(SDK)	(245)
6.6	多足步行机器人仿生控制应用仿真	(246)
6.7	本章小结	(250)
7	“4+2”多足步行机器人控制系统	(251)
7.1	引言	(251)
7.2	机器人的机构和运动特点	(251)
7.3	控制系统的设计要求	(252)
7.4	机器人控制系统的结构	(253)
7.4.1	控制系统的硬件配置	(254)
7.4.2	下位机的软件结构	(257)
7.5	多足步行机器人多关节协调控制	(258)
7.5.1	伺服系统结构	(258)
7.5.2	关节运动插补算法	(260)
7.5.3	控制参数调整的理论分析	(265)
7.5.4	伺服参数的调整和设置	(266)
7.5.4.1	控制器的参数设置	(266)
7.5.4.2	驱动器的参数设置	(268)
7.5.5	实验和误差分析	(269)
7.6	信息采集与处理	(270)
7.6.1	信息采集	(270)
7.6.1.1	A/D卡的设置和信号采集	(271)
7.6.1.2	I/O卡的设置和信号采集	(274)

7.6.2	信息处理	(275)
7.7	上、下位机的通信	(277)
7.7.1	通信信号线的连接方式	(277)
7.7.2	数据链路层的约定	(278)
7.7.3	应用层的约定	(278)
7.7.4	软件实现	(281)
7.7.4.1	通信中断初始化	(282)
7.7.4.2	通信中断服务程序	(282)
7.7.4.3	通信主程序	(284)
7.8	“4+2”多足步行机器人人机交互界面	(284)
7.8.1	机器人人机交互界面设计方法	(284)
7.8.2	机器人人机交互界面功能	(286)
7.8.3	机器人步态仿真程序设计	(288)
7.8.4	“4+2”多足步行机器人步态数据通信软件 设计	(289)
7.8.5	“4+2”多足步行机器人通信可靠性分析	(291)
7.9	本章小结	(293)
8	MiniQuad 步行机器人控制系统	(294)
8.1	引言	(294)
8.2	系统设计方案	(294)
8.2.1	MiniQuad 步行机器人机构特征	(294)
8.2.2	控制系统设计要求	(297)
8.2.3	设计思路	(298)
8.2.4	方案论证与比较	(301)
8.2.4.1	PC 机与机身控制器之间数据总线的 方案选择	(301)
8.2.4.2	机身内通信总线的方案选择	(301)
8.2.4.3	机身控制器的设计方案论证与选择	(303)
8.2.4.4	足单元控制器的设计方案论证与选择	(305)

8.2.4.5	关节控制器的设计方案论证与选择	(305)
8.2.4.6	电源系统的设计方案论证与选择	(306)
8.2.5	系统组成	(306)
8.3	硬件实现	(308)
8.3.1	机身控制器	(308)
8.3.1.1	USB 接口电路设计	(308)
8.3.1.2	CAN 接口电路设计	(316)
8.3.1.3	RS232 接口电路设计	(321)
8.3.1.4	显示部分电路设计	(326)
8.3.1.5	电源和滤波电路设计	(327)
8.3.1.6	复位电路设计	(327)
8.3.2	关节控制器	(328)
8.3.2.1	接口电路设计	(328)
8.3.2.2	伺服电动机控制模块电路设计	(329)
8.4	软件实现	(332)
8.4.1	关节控制器软件的通信协议设计	(332)
8.4.2	关节控制器软件的程序流程设计	(333)
8.4.3	机身控制器软件的通信协议设计	(335)
8.4.4	机身控制器软件的程序流程设计	(336)
8.5	本章小结	(337)
9	多足步行机器人运动控制实验	(339)
9.1	引言	(339)
9.2	多足步行机器人正运动学验证实验	(339)
9.3	TITAN-VIII机器人的基本步态实验	(342)
9.4	“4+2”多足步行机器人的基本步态实验	(345)
9.5	多足步行机器人的路径跟踪实验	(350)
9.6	多足步行机器人的导向控制	(355)
	参考文献	(359)

多足步行机器人是模仿多足动物运动形式的特种机器人，是一种足式移动机构。所谓多足一般指四足及其以上，常见的多足步行机器人包括四足步行机器人、六足步行机器人、八足步行机器人等。该类机器人能够在复杂的非结构环境中稳定地行走，可以代替人完成许多危险作业，所以，在占地球陆地总面积 90%以上的各种非结构环境中，多足步行机器人的应用前景是不言而喻的。长期以来，多足步行机器人技术一直是国内外机器人领域研究的热点之一，虽然自 20 世纪 60 年代后期以来，国内外许多学者研究开发了多种机器人实验模型或原理样机，但总体而言，以多足步行机器人目前的基础技术，还难以支持这类机器人的大规模实际应用。

0.1 多足步行机器人的潜在用途

随着多足步行机器人技术的不断成熟与完善，这类机器人将在国民经济和国防建设等许多行业有着越来越广泛的应用。仅就单一的移动功能而言，多足步行机器人能够完成在各种非结构环境中的运输任务，如崎岖路面上的运输、建筑物内的搬运(包括有台阶的场合)等。特别是近些年来，国内外不少学者研究了新型多足步行机器人，并不断开发多足步行机器人的作业功能，如此一来，多足步行机器人不仅仅是移动平台，而且还是一种功能装备，在众多行业中有着许多潜在的应用前景。

1. 军事应用

现有的军事运输车辆在泥泞、沼泽、崎岖地域受到极大的限制, 研究开发能够适应这些恶劣环境的运输工具已成为一种迫切的需要。此外, 现代化的战争对机器人在军事进攻、探测、侦察等方面都有迫切的需求。长期以来, 美国等发达国家一直在开展这方面的研究工作, 如美国在 20 世纪 80 年代研制了用于军事运输的六足步行机器人(ASV), 后来又研制了一种多功能六足步行机器人, 可搬运枪支弹药及其他军事用品。近年来, 扫雷机器人、侦察机器人、攻击机器人等都是各军事大国竞相研究的重要内容。例如, 美国宾夕法尼亚大学正在研制用机械狗探测地雷, 日本千叶大学、东京工业大学等也正在研究开发用于探雷作业的多足步行机器人等。

2. 矿山开采

国外 20 世纪 60 年代就在矿山露天开采和剥离作业中采用了采矿机器人——大型足式斗铲, 但当时这些开采机器人的足式机构还不具备足够的步行机动性和灵活性。随着多足步行机器人基础技术的突破, 采用多足移动机构的开采设备将能在地形更复杂、地势更陡峭的作业面进行露天开采作业。此外, 在陡峭的深井矿山开采中, 轮式或履带式坑道车难以发挥作用, 而足式坑道车则可以大显身手。

3. 核能工业

机器人在核能工业中的应用早为人们所公认, 因为核燃料的处理、反应堆的管理与维护、放射性材料的运送、核废料的处理、突发事故的处理等都需由机器人完成。目前这类工作大多是由轮式移动机器人或轮/足混合机构机器人来完成的。但就对机器人的功能和性能要求而言, 多功能的多足步行机器人将在这种危险场合取代轮式机器人, 特别是具有多吸附脚爬行功能的探测和操作机器人更是其他机器人所望尘莫及的。

4. 星球表面探测

人类一直在努力探索宇宙, 其中星球表面环境、星球表面矿物成分及星球地貌探测等都是当前亟待进行的科学研究工作, 机器人