

并联式仿生机械腿运动学 及结构设计研究

程刚 罗勇 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

并联式仿生机械腿 运动学及结构设计研究

程 刚 罗 勇 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书研究了并联式仿生机械腿的运动学性能及相应结构设计。对满足此运动要求的并联机构构型进行综合,分析并联式仿生机械腿相应的运动学模型、奇异位形、几何误差及其标定、空间运动性能优化等运动学关键技术,设计研制了一台并联式仿生机械腿实验系统。

图书在版编目(CIP)数据

并联式仿生机械腿运动学及结构设计研究/程刚,罗勇著. —徐州:中国矿业大学出版社,2009.11

ISBN 978-7-5646-0516-2

I. 并… II. ①程…②罗… III. 仿生机器人—研究
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 199412 号

- 书 名 并联式仿生机械腿运动学及结构设计研究
著 者 程 刚 罗 勇
责任编辑 付继娟 张 岩
责任校对 杜锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 徐州中矿大印发科技有限公司排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 6.875 字数 177 千字
版次印次 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

并联机构具有模块化程度高、刚度质量比大、响应速度快以及适应性强等优点,本书选用一类两转动一平动并联机构作为矿井救灾机器人机械腿的核心部分。

运用互易螺旋理论综合得到各种满足两转动一平动运动要求的并联机构构型,进而得到一类支链仅存在一线矢力的并联机构构型;以 3—UCR 对称并联机构为例,结合主螺旋理论与虚拟机构理论对其瞬态运动特性进行了验证。

采用 Rodrigues 参数对以 3—RPS 对称并联机构为核心的并联式仿生机械腿进行运动学建模,并通过机构特有的几何特性建立约束方程组,经消元处理后建立了正运动学解析模型。运用牛顿—拉夫森定理分析了机构正运动学数值解,通过数值仿真验证了所建迭代模型的正确性。分析得到机构中动平台、各支链以及末端执行杆件相应的速度、加速度解析解,为之后的机构整体动力学分析提供了运动学基础。

建立了 3—RPS 对称并联机构的静力学平衡方程,基于 Grassmann 几何从空间几何本质上对机构可能出现的正运动学高秩奇异位形进行了研究,归纳得到各线簇秩对应的奇异位形,并通过数值仿真得到在运动空间内的各奇异轨迹。

运用矩阵全微分理论,建立了并联式仿生机械腿末端位姿的几何误差模型。通过对此模型的数值仿真,经过归一化可达工作空间内各误差来源,得到在统计意义下的灵敏度系数数学模型。通过逐次逼近迭代算法,建立了基于灵敏度系数的各运动副运动学参数的标定数学模型。

通过对 3—RPS 对称并联机构运动空间影响因素的仿真分析可知,加入末端杆件可有效增大机构末端运动空间。通过对机构全域条件数分析可知,在保证整体机构灵巧性的前提下,为了得到更大的运动空间,须使定、动平台运动副连接点结构比例系数在规定的范围内。

建立了以 PC 主机、多轴运动控制模块、运动空间综合评价模块为核心的系统控制结构,采用了先置轨迹规划为主、批量传递为辅的数据传递模式。测得单并联式仿生机械腿实验系统的运动极限位置,根据人类行走的基本步态,初步规划了机械腿的运动轨迹,并对实验系统的机械结构以及控制策略等方面提出了改进意见。

本书是在博士论文基础上编写而成的,导师葛世荣教授倾注了大量的心血。导师严谨唯实的科学精神、一丝不苟的治学态度、对科学真理的不懈追求、敏锐的创新思维、渊博的学识、高瞻远瞩的学术洞察力都是我事业和人生的崇高榜样,并将永远成为激励我克服困难、不断进取的精神动力。特别感谢瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)的 Sokolov 博士及其他关心、帮助过我的专家。最后,我要特别感谢我的家人多年来给我的关心、理解和支持,尤其要感谢我的妻子在生活上给予了我极大的帮助和无微不至的照顾。

并联机构的理论与实际应用没有串联机构成熟,仍有一些问题需以后深入探讨。本书的研究与分析难免有不完善之处,敬请专家、学者批评与指正。

作 者

2009 年 12 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 双足机器人研究现状	2
1.3 并联机构的研究难点	11
2 三自由度(2R1T)对称并联机构构型分析	18
2.1 引言	18
2.2 2R1T 对称并联机构构型综合	19
2.3 2R1T 对称并联机构瞬态运动学分析	30
2.4 本章小结	37
3 并联式仿生机械腿运动学分析	38
3.1 引言	38
3.2 拓扑结构描述	38
3.3 运动学位姿逆解分析	40
3.4 运动学位姿正解分析	44
3.5 运动学速度逆解分析	47
3.6 运动学速度正解分析	49
3.7 机构速度 Jacobi 矩阵分析	51
3.8 运动学位姿数值解分析	52
3.9 动平台速度与加速度分析	55
3.10 支链速度与加速度分析	58

3.11	末端执行杆件运动学分析	59
3.12	数值仿真	62
3.13	本章小结	74
4	并联式仿生机械腿正运动学奇异位形分析	75
4.1	引言	75
4.2	奇异位形拓扑分析描述	75
4.3	静力学分析	76
4.4	高秩奇异位形分析	81
4.5	本章小结	103
5	并联式仿生机械腿几何误差及其标定补偿分析	105
5.1	引言	105
5.2	误差建模分析	106
5.3	末端杆件位姿影响因素分析	112
5.4	灵敏度分析	119
5.5	运动学参数标定	123
5.6	本章小结	131
6	并联式仿生机械腿运动空间优化分析	133
6.1	引言	133
6.2	驱动杆干涉分析	133
6.3	运动空间分析	135
6.4	运动性能分析	143
6.5	本章小结	161
7	并联式仿生机械腿试制及测试	163
7.1	并联式仿生机械腿机械结构设计	163

目 录

7.2 并联式仿生机械腿控制系统设计	167
7.3 并联式仿生机械腿实验	170
7.4 实验系统改进意见	182
7.5 本章小结	183
8 全文总结	184
附录	189
A.1 动平台坐标原点 O' 角加速度表达式	189
A.2 末端运动执行杆件端点 E 加速度表达式	191
A.3 几何误差模型中矩阵 T 中各元素表达式	191
参考文献	195

1 绪 论

1.1 研究背景

随着国家经济的不断发展,能源需求量也迅速增加,煤炭作为国家能源的主要来源之一,其发展也变得越来越重要。但煤炭产量的增长也带来了相应的安全问题,我国煤矿事故死亡人数远超过世界其他产煤国家煤矿事故死亡人数的总和,这也使得减少煤矿事故以及完善灾后救援与探测工作变得更加迫切^[1]。

针对灾后救援工作,目前国内煤矿多通过救护队员深入到高危地带进行搜救,由于灾后矿井下爆炸性气体、粉尘浓度依然很高^[2],再次爆炸随时可能发生,而且井下巷道错综复杂,能见度低,这些因素都可能造成救护队员的伤亡^[3]。为了及时进行救护,减少不必要的损失,研制适应矿井灾后恶劣环境的救灾机器人被提出。这种机器人不但能代替救护队员的作用,而且对于某些救护队员无法深入救援的情况,可观测、分析并传输数据,机器人针对具体环境,制订救援方案。

目前,轮式、履带式移动机器人虽然扩大了人类的行走能力,但由于其行进时,轮子或履带连续接触地面,限制了运动环境。两足机器人则是支撑脚离散接触地面,可选择地面上任意点作为最佳支撑点^[4],而且可跨越一些较大的障碍物,更加适应灾后井下地面不平整、充满障碍物的恶劣环境,具有更好的机动性。

相对一般两足机器人腿部多采用的串联机构,并联机构由于其驱动副的选择不同,各支链不需分担机构承受的大部分载荷,因

此,并联机构具有高精度、高速以及承载能力大等优点,但并联机构也存在缺陷,即工作空间小、机构设计难以及运动分析与控制复杂等^[5-6]。由于并联机构的以上缺陷,现在部分并联机构研究倾向于少自由度并联机构,此类机构具有运动学求解较易、制造成本低等特点,所以少自由度并联机构应用于两足救灾机器人腿部机构具有其独特的优势。

目前,并联机构已在飞行模拟器、空间站对接、射电望远镜、强力承载装置、微操作器等方面得到深入研究与应用。但对于行走机构设计,很少有人涉及少自由度并联机构。然而,对于灾后井下恶劣环境,少自由度并联机构较之其他行走机构更加适宜,主要体现在:(1)具有更大的刚度,结构更加稳定;(2)承载能力强,运动惯性小;(3)位姿逆解求解较易,利于反馈控制;(4)可使机器人腿部机构更简单、紧凑,为下一步实现腿部模块化、系列化、标准化打下基础;(5)考虑到井下防爆因素,串联机构只能把电机放置在各关节驱动处,使得运动惯量较大、防爆设计较困难,而并联机构可把电机放置在定平台或者附近,有利于电机的整体防爆设计。

为此,开发适用于灾后井下恶劣环境的双足并联腿式机器人,研究保证其综合性能的关键技术,特别是结构设计及运动学性能分析,具有重要的理论意义和工程实用价值。

1.2 双足机器人研究现状

双足仿人步行机器人集机械、光学、电子学、计算机、检测和智能技术之大成,形成了一个多学科交叉的重要研究领域。由于其具有时变、强耦合和非线性的动力学特征,所以控制较复杂。目前,全世界大型仿人机器人项目有 70 多个,小型仿人机器人项目有 60 多个,其中日本最多,美国和欧洲次之,中国也有多家科研单位从事仿人机器人研究^[7]。

1.2.1 我国研究现状

(1) 国防科技大学

1988~1990年,分别研制了平面型双足机器人 KDW—I 和空间型双足机器人 KDW—II,并在 KDW—II 平台上增加两个垂直关节,形成了拥有 12 个自由度、具备转弯功能、全方位行走的 KDW—III 双足机器人。1995 年,实现了步长 0.2 m、周期 0.8 s 的动态行走,最大可爬斜坡角度为 13° 。2000 年,研制了我国首台仿人机器人“先行者”,可动态行走,适应于小偏差、不确定的环境^[8-9]。

(2) 北京理工大学

2002 年,仿人机器人 BHR—I 通过验收,具有 32 个自由度,步长 0.33 m,步速每小时 1 km,可根据自身力觉、平衡感等感知机器人自身的平衡状态和地面高度的变化,实现未知地面稳定行走,此机器人无外接电缆,将感知、控制、驱动、电源和机构集于一体^[10-12]。

(3) 上海交通大学

1999 年,推出了仿人机器人 SFHR,共有 24 个自由度,即:腿部有 12 个自由度、手臂有 10 个自由度、身体上有 2 个自由度,实现步长 0.1 m,周期 3.5 s 的运动。为了检测机器人姿态信息,本体上装有 2 个单轴陀螺和一个三轴倾斜计,并配备主动视觉系统^[13-14]。

(4) 哈尔滨工业大学

相继推出了 HIT—I 到 HIT—IV 系列机器人,前期类型较重、自由度较少,虽然能在平地上前进、左右侧行以及上下楼梯,实现步长 0.45 m、周期 10 s 的运动,IV 型机器人全身有 52 个自由度,运动速度与平衡性得到了很大改善^[15-17]。

国内目前大力支持仿人双足步行机器人研究,包括国家自然

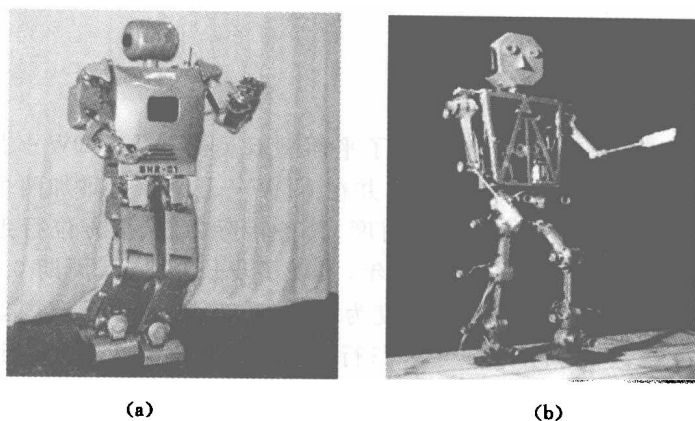


图 1-1 国内部分仿人双足机器人
(a) BHR-1 机器人;(b) Forthgoer 机器人

科学基金以及 863 计划重点项目,清华大学与南京航空航天大学也对双足步行机器人进行了研制^[18-19]。

1.2.2 日本研究现状

(1) 日本本田公司

从 1986 年至 1993 年先后研制了 E 系列试验样机,研究成功了步行稳定控制技术,包括地面反力控制、目标 ZMP 控制以及摆动腿落地位置控制技术。1993 年至 1997 年研究完全自主型仿人机器人 P 系列样机,其中 P2 是世界第一台自主型仿人机器人,高 1 820 mm,重 210 kg,30 个自由度,无线控制,速度达 3 km/h,动态行走,且能上下楼梯、推动物体。最新的 ASIMO 机器人有 26 个自由度,高 120 cm,重 42 kg,无线互联,实时识别姿态运动,采用了新开发的双足步行技术“ I — WALK”,具有预测运动控制功能,行走更加自由^[20-22]。

(2) 日本早稻田大学

日本早稻田大学以加藤一郎为首的实验室是世界上最早从工程角度研究仿人双足步行机器人的研究单位。1972年,推出了世界上第一台人形双足机器人 WL-5;1984年,推出了 WL-10RD,其上采用踝关节力矩控制技术,实现了平稳的周期 1.5 s、步长 40 cm 的动态步行,共 12 个自由度;1986年推出的 WL-12R 具有 8 个自由度,运用了躯体运动补偿下肢运动从而确保运动轨迹的综合设计方法;1997年,Yamaguchi 等人研制出直线型非线性弹簧机械 WAK-1 并应用于 WL-13,实现了刚度改变、步长 0.1 m、周期 7.68 s 的准动态步行;1999年,推出了 WABI-AN 完全仿人机器人,高 166.2 cm,重 107 kg,共 43 个自由度,能像人一样前进后退,控制装置全部置于机器人身上,行走控制方法除增加上肢运动外,与 WL-12、WL-13 一样,均采用协调控制综合方法。值得注意的是,最近研发了 WL-16 系列仿人双足机器人,其主要应用于载人平台,用于未来取代目前的轮椅,直接由电池驱动,高 1.28 m,可承载 60 kg,向前、向后、向侧面移动,随时调整姿态,同样在不平坦的路面上运动。WL-16 较之那种应用所谓“毛毛虫移动模式”的机器人更具优越性,其正常步长为 0.3 m,但将腿伸展分开可达到 1.36 m。WL-16 较之以前研发的机器人最大的不同之处是腿部行走机构的选择,它使用了刚度更大、更稳定的 6 自由度并联机构,从而使得行走更加平稳,在其改进型上,通过改变腿部与地面之间的接触机构以及采用“应变控制 (Compliance Control)”的控制策略,根据安装在脚掌上的 6 轴力传感器信息,使其脚部关节保持柔韧性,自动适应路面不平度可达 $\pm 20 \text{ mm}$ ^[23-36]。

(3) 日本东京大学

日本东京大学 Jouhou System Kougaka 实验室先后研制出 H 系列仿人双足步行机器人。其中 H5 仿人机器人共有 30 个自由度,其步态规划中充分考虑了动态平衡条件,通过采用遗传算法等

实现基本的保持动态稳定性的运动,然后在不同步态参数下利用视觉器信息进行实时线性组合以获得步态和 ZMP 轨迹参数。2000 年 6 月研制出 H6 仿人机器人共有 35 个自由度,高 1 370 mm,宽 590 mm,重 55 kg,采用无线以太网接入网络,完全自主。目前他们的最新型仿人机器人 H7 也已经研制成功,它可以动态地产生实时步态,已成功在 Kawada 工业机场进行了户外行走实验^[37]。

(4) 日本 HRP 项目

1998 年,日本通产省工业技术研究院启动了“与人协调共存的仿人机器人系统”国家级研究项目(HRP 项目)。主要由川田工业株式会社设计制作的 HRP—2 仿人机器人,高 154 cm,重 58 kg,具有 30 个自由度,并采用了对人柔和性的优化设计,实现了不平地面行走、翻倒控制与翻倒回复技术。相对于本田的 ASIMO,HRP—2 由于增加了 2 个自由度的腰部关节,其上体动作更灵活。其腕部有 6 个自由度,比 ASIMO 多一个,体积重量比相对 ASIMO 轻 35%,拥有高密度电源系统,更加“类人型”。目前 HRP 项目更致力于推广应用研究,已经实现了仿人机器人与人协作抬桌子、工作间隔板的装配等操作应用^[38-41]。

(5) 日本索尼公司

2000 年 10 月 Sony 公司首次展示了 4 个仿人机器人 SDR—3X,该机器人共有 24 个自由度,能够像人前后行走、转身、起立、单脚支撑,能够踢球和跳舞,并且基本实现了产品化。Sony 在 2002 年又展示了 SDR—4X,共有 38 个自由度,实现了实时统一适应控制、不平整斜坡步行、外力搅动下的姿态保持。SDR 系列机器人的推出使 Sony 公司在仿人机器人领域跻身于世界前列。2003 年 9 月, Sony 再推出 QRIO 仿人机器人,能够与人进行动作、语言交互,由于采用了将电机和控制电路一体化的智能驱动器以及机器人空中姿势的控制算法,使机器人动作更为流畅、自然,

成为世界首台会跑、跳的双足机器人^[42-44]。

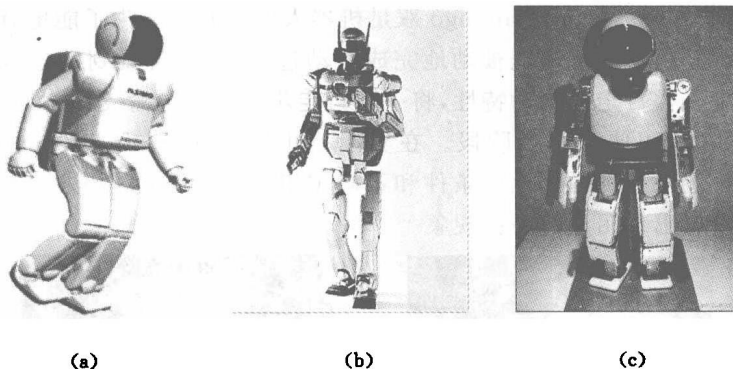


图 1-2 日本部分仿人双足机器人

(a) ASIMO 机器人; (b) HRP-2 机器人; (c) QRIO 机器人

1.2.3 欧美研究现状

(1) 法国 BIP 计划

该计划由法国 de Mecanique des Soloders de Poitiers 实验室和 INRIA 机构合作,共同开发一种能够适应未知外界条件的具有 15 个自由度的步行机器人系统。采用了复杂系统控制中广泛被采用的分层递阶控制结构,控制系统中最上层是全局规划层,根据传感器信息和一些初始条件获得步态规划用的参数;中间层根据特定的任务进行平滑行走步态的规划;控制层则根据中间层所发出的步态规划信号生成激励信号;最后反馈层用来处理突发事件。按照这些控制和规划方法可使双足机器人实现站立、行走、爬坡和上下楼梯等动作。其样机“欧洲 2000”已于 2000 年 4 月推出公开展示^[45-46]。

(2) 美国麻省理工学院

美国麻省理工学院的 G. A. Partt 和 J. E. Pratt 等人,提出

了虚模控制(Virtual Model Control-VMC)策略,并应用于 Spring Turkey 和 Spring Flamingo 双足机器人的控制中。为了能更有效地利用机械势能使腿被动地完成摆动过程,在步态规划的过程中参考人类行走的被动特性,将一个行走步态周期分为支撑、脚尖立地、摆动和伸直四个阶段。在实际行走实验中 Spring Flamingo 实现了在几种已知地面条件和不确定组合情况下的平滑过渡,中间没有出现明显的停顿现象^[47-48]。

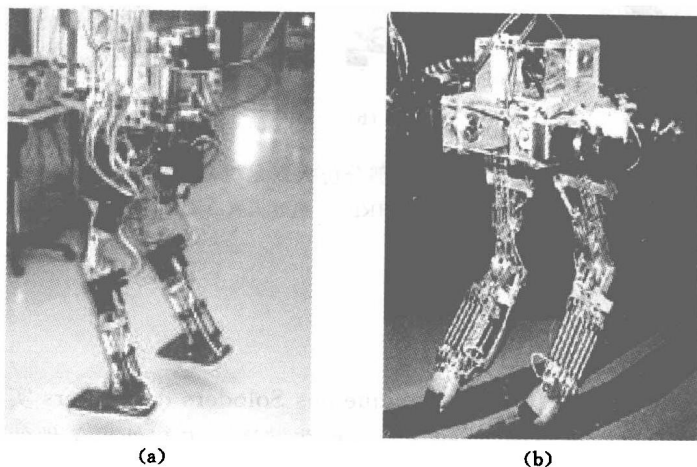


图 1-3 欧美部分仿人双足机器人

(a) BIP2000 机器人;(b) Spring Turkey 机器人

其他的欧美国家研究机构也进行了许多类似研究,例如:美国克莱姆森大学的郑元芳博士主持研制了 SD 系列的两种步行机器人;Hodgins 和 Raibert 等人研制了一种能翻筋斗的平面型双足步行机器人;加拿大的 Tad. McGeer 主要研究被动式双足步行机器人,仅靠初始动能或本身势能和惯性实现步行运动;研制成功的还有 Salford 大学的 Salford Lady, Illinois 大学的 Bejimeng, 德国 Honnover 大学的 BART, 荷兰 Delft 技术大学的 BAPS, 澳大利亚

Vienna Alexander Vogler 的 V-3 [49-51]。

1.2.4 研究现状分析

作为复杂的变结构空间机构,仿人机器人各个关节之间只有相互配合与协调才能实现拟人行走,这也使得各个关节自由度的选择非常重要。为了能使机器人在不规则平面上站立以及改变行走的方向,机器人髋部需要包括一个扭转自由度在内的 3 个自由度,踝部需要 2 个自由度,如果希望在不规则地面行走或上下台阶,则需增加一个踝关节的旋转自由度或者膝关节的旋转自由度。所以,一般认为腿部自由度配置是 7 个自由度。

表 1-1 仿人双足机器人下肢自由度配置

机器人名称	所属机构	机器人下肢自由度数目		
		腰部	膝盖	脚踝
PI-III、ASIMO	日本本田公司	3×2	1×2	2×2
Wabian RV1	日本早稻田大学	2×2	1×2	2×2
H5-H7	日本东京大学	3×2	1×2	2×2
HRP-2	日本通产省	3×2	1×2	2×2
SDR-4X	日本索尼公司	3×3	1×3	2×2
HOAP-1	日本富士通公司	3×2	1×2	2×2
M2	美国 MIT	3×2	1×2	2×2
BIP 2000	法国 INRIA	3×2	1×2	2×2
Johnnie	德国慕尼黑工业大学	3×2	1×2	2×2
RoboSapien	新加坡国立大学	3×2	1×2	2×2
THBIP-1	中国清华大学	3×2	1×2	2×2

综合上述国内外仿人双足机器人的发展状况可知,腿部行走机构一般采用串联方式进行运动学与动力学的分配、传递,腿部自