

仿生蛇形 机器人技术

FANGSHENG SHEXING JIQIREN JISHU

苏中 张双彪 赵旭 刘福朝 连晓峰 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

仿生蛇形机器人技术

苏 中 张双彪 赵 旭 刘福朝 连晓峰 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书针对仿生蛇形机器人技术涉及的建模与控制、地图构建、路径规划、环境感知、系统集成及应用等进行了系统介绍。

全书共包括8章内容,分别介绍了仿生蛇形机器人的发展现状和关键技术,仿生蛇形机器人的设计思想、设计方案和具体结构设计,仿生蛇形机器人的运动学、动力学建模、运动控制方法和联合仿真技术,SLAM基本原理、常用方法和MiniSLAM算法,常用的路径规划算法和改进的A*算法,复合织物的基本特点、应用性能、结构与建模、工艺,控制系统的总体方案、硬件设计和软件设计,以及仿生蛇形机器人技术的相关应用。

本书主要面向从事仿生机器人研究和工程应用的科技人员,可作为机器人控制、传感器应用、系统集成等领域的科研和工程技术人员的参考书,也可供业余机器人爱好者及模型爱好者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

仿生蛇形机器人技术 / 苏中等著. —北京:国防工业出版社,2015.12

ISBN 978-7-118-10756-2

I. ①仿... II. ①苏... III. ①仿生机器人-研究
IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第313988号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12½ 字数 235千字

2015年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 56.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

PREFACE | 前言

仿生蛇形机器人技术涵盖了仿生学、机械学、运动学、动力学、控制决策、传感技术等多学科,是一种以多自由度机器人为对象,立足于机器人控制和传感器测量的工程技术。

仿生搜救蛇形机器人能够满足地震、火灾、核泄漏、战情侦查等极其危险环境下的工作要求,其多步态、强柔性、高隐蔽性和高适应能力的特点受到国内外科研人员的高度重视。近年来,随着对蛇形机器人的不断深入研究,国外已经成功研究了多种不同功能、不同特点的仿生蛇形机器人。同时,该类机器人立足于机器人控制和传感器测量技术,有利于复杂机构控制和定位定向的深入研究,促进微小、柔性传感器技术的快速发展。

本书共分8章,从机器人技术的机构设计到工程实际中的具体应用,详细介绍了仿生蛇形机器人从研发到应用的必经之路。第1章讲述了仿生蛇形机器人的发展现状和关键技术;第2章讲述了仿生蛇形机器人的设计思想、设计方案和具体结构设计;第3章讲述了仿生蛇形机器人的运动学和动力学建模、运动控制方法和联合仿真技术;第4章讲述了SLAM基本原理、常用方法和MiniSLAM算法;第5章讲述了常用的路径规划算法和改进的A*算法;第6章讲述了复合织物的基本特点、应用性能、结构与建模、工艺等;第7章讲述了控制系统的总体方案、硬件设计和软件设计;第8章讲述了仿生蛇形机器人技术的相关应用。

本书的第1、2章由苏中教授编写,第4、7章由张双彪编写,第5、6章由赵旭编写,第8章由刘福朝编写,第3章由连晓峰编写。本书的编写与出版得到国家自然科学基金(61261160497、61471046、61201417)、北京市科技计划课题(Z121100001612007)和北京市教委提升计划(TJSHG201310772025)的资助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不妥和疏漏之处,恳请专家、同仁和广大读者批评指正。

作者
2015. 10

CONTENTS | 目录

第1章 绪论	1
1.1 应用背景与意义	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 国外蛇形机器人	2
1.2.2 国内蛇形机器人	6
1.2.3 蛇形机器人分类	9
1.2.4 理论研究	10
1.2.5 蛇形机器人研究现状分析	13
1.3 关键技术	15
参考文献	17
第2章 仿生蛇形机器人的结构设计	20
2.1 机器人结构设计思想	20
2.1.1 生物蛇的身体结构分析	21
2.1.2 生物蛇的运动形式分析	22
2.2 机器人结构设计方案	24
2.2.1 移动机构方案	24
2.2.2 躯干关节设计方案	25
2.2.3 分体结构设计方案	26
2.2.4 变形结构设计方案	27
2.2.5 机器人驱动方案	29
2.3 UG 软件介绍	30
2.3.1 UG 软件的技术特点	31
2.3.2 UGCAD 主要功能模块	31
2.4 机器人整体结构设计	34
2.4.1 头、尾结构设计	34
2.4.2 躯干关节结构设计	34
2.4.3 分体结构设计	35

2.4.4	变形结构设计	36
2.4.5	整体结构装配	37
	参考文献	38
第3章	仿生蛇形机器人建模与控制	39
3.1	形态学模型	39
3.1.1	二维形态学模型	39
3.1.2	三维形态学模型	42
3.2	连杆结构的运动学模型	45
3.2.1	二维运动模型	45
3.2.2	三维运动学模型	46
3.3	动力学模型	49
3.3.1	常见的动力学建模方法	49
3.3.2	蛇形机器人动力学模型	51
3.4	运动控制方法	54
3.4.1	基于动力学的解耦控制方法	54
3.4.2	基于CPG理论的运动控制方法	58
3.5	运动联合仿真技术	63
3.5.1	ADAMS软件介绍	64
3.5.2	Matlab/Simulink软件介绍	65
3.5.3	虚拟样机动力学与控制集成仿真系统	66
3.5.4	蛇形机器人多运动步态仿真	68
	参考文献	73
第4章	仿生蛇形机器人SLAM技术	74
4.1	概述	75
4.2	搜救机器人数学模型	78
4.3	SLAM基本原理与常用方法	82
4.3.1	SLAM问题的建模	83
4.3.2	基于扩展卡尔曼滤波器的SLAM	84
4.3.3	基于粒子滤波器的SLAM	86
4.4	基于激光测距仪的MiniSLAM算法	89
4.4.1	MiniSLAM模型	90
4.4.2	MiniSLAM算法	91
4.5	仿生蛇形机器人在SLAM中的技术应用	94
4.5.1	结构环境下SLAM试验	94

4.5.2	模拟灾难搜救环境 SLAM 试验	95
	参考文献	96
第 5 章	仿生蛇形机器人路径规划	97
5.1	路径规划算法的研究现状	97
5.1.1	路径规划算法分类	97
5.1.2	最优路径评价标准	98
5.1.3	路径规划算法	98
5.2	搜救机器人路径规划算法研究	106
5.2.1	A* 算法	106
5.2.2	蚁群算法	111
5.2.3	融合算法	115
5.2.4	案例分析	120
5.3	改进的 A* 算法	125
5.3.1	复杂路况能量耗费仿真与结果分析	126
5.3.2	多关节机器人角度约束仿真与结果分析	127
5.3.3	案例分析	128
	参考文献	130
第 6 章	复合织物电子皮肤技术	131
6.1	导电材料	131
6.1.1	聚苯胺的导电机理	131
6.1.2	聚苯胺复合织物的应用	133
6.2	原位聚合法制备聚苯胺/纯棉复合织物	136
6.2.1	实验部分	136
6.2.2	结果与讨论	138
6.3	聚苯胺/纯棉复合织物的应用性能研究	144
6.3.1	聚苯胺复合织物的制备	144
6.3.2	撕破强力测试仪器及测试标准	144
6.3.3	“开关”性质	144
6.3.4	抗菌测试方法	145
6.4	复合织物电子皮肤技术与工艺研究	145
6.4.1	皮肤特性分析	146
6.4.2	裸线织物电路板设计	153
6.4.3	感知皮肤制作工艺	155
	参考文献	157

第 7 章 仿生蛇形机器人系统集成	159
7.1 系统总体设计	159
7.1.1 控制系统总体方案	159
7.1.2 通信方式	159
7.1.3 能源供给方式	161
7.2 硬件设计	162
7.2.1 主控制系统	162
7.2.2 惯性导航定位模块	162
7.2.3 运动控制器	165
7.2.4 环境感知模块	166
7.2.5 通信模块	166
7.3 软件设计	169
7.3.1 C#介绍	169
7.3.2 人机交互 APP 设计	170
7.3.3 数据通信软件	173
7.3.4 路径规划仿真软件	177
7.4 仿生蛇形机器人功能试验	178
参考文献	180
第 8 章 仿生蛇形机器人技术的应用	181
8.1 多自由度机械臂	181
8.1.1 工业方面	181
8.1.2 医疗方面	182
8.2 自主导航技术	183
8.2.1 无人车	184
8.2.2 AUV	184
8.2.3 UAV	185
8.3 仿生智能弹药	187
8.4 环境检测	188
8.5 家庭服务型机器人	190
8.6 新型智能装备	191
8.6.1 智能外骨骼	191
8.6.2 行人航位推算	192
参考文献	192

第 1 章

绪 论

1.1 应用背景与意义

目前地震、火灾、矿难等灾难发生频繁。例如,2008 年的汶川地震(图 1.1),2010 年的玉树地震,舟曲特大泥石流,上海高层建筑火灾,2011 年日本福岛地震、海啸与核污染,浙江温州的动车追尾事故等,这些灾难给人们带来了难以磨灭的精神创伤和巨大的经济损失。为尽量减少灾难引起的附带损失,在废墟环境下搜索幸存者并给予及时的医疗救助显得尤为重要。实践经验表明,超过 48h 后被困在废墟中的幸存者存活概率变得越来越低。面临地形复杂、随时有可能发生二次灾难的搜救环境,搜救人员在争分夺秒开展搜救工作的同时,不但无法高效探测掩埋的生命迹象,而且将自身安全陷于危险边缘。因此,研究用于灾后搜救的探测仪器和搜救装备,成为当今完善人类生活保障措施、促进社会科技发展的必然趋势。同时,科技部《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》中明确指出:“‘十二五’我国服务机器人亟需研制消防、地震等行业中代替抢险救援人员进入危险环境的专业应急救援和安全作业机器人,并在相关灾害事故中投入实战应用。”

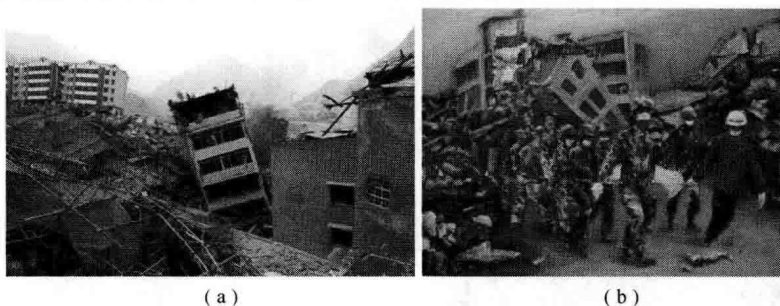


图 1.1 汶川地震及搜救

通常,灾难现场情况复杂,废墟中形成的狭小空间使搜救人员甚至搜救犬也无法进入。不过,随着科技的不断发展,仿生蛇形机器人作为新型可移动的柔性

机器人,以其多步态运动能力,能够适应复杂多变的环境,成为机器人领域的一个研究热点。经过多功能电子探测设备集成的蛇形机器人,能够替代搜救人员深入前方的未知搜救环境探测生命迹象,并且能够利用远程传输等功能,向后方救援中心汇报环境内部的实际情况,便于搜救人员制订准确的搜救方案。不仅如此,由于具有极强的环境适应能力,仿生蛇形机器人也可承担水域、核电站、井下、管道等多种环境的工作任务。因此,基于仿生蛇形机器人的研究工作,成为智能控制领域中极具潜力的一个研究分支。

1.2 研究现状

近几十年来,经过国内外学者不懈努力,对蛇形机器人的研究成果不但体现在理论上,而且也体现在本体样机的研制上,并结出了可喜硕果,国内外涌现出不同种类、不同功能的仿生蛇形机器人。这些机器人凭借不同的运动特点和功能,可适用于复杂、未知的工作环境。

1.2.1 国外蛇形机器人

蛇形机器人以其多运动步态、能够适应复杂多变环境的特点,在搜救机器人舞台上崭露头角。东京工业大学 Shigeo Hirose 提出了 Active Cord Mechanism 蛇形机器人,其率领的科研团队于 1972 年研制出世界上第一个命名为 ACM 的蛇形机器人^[1]。随着研究的深入,先后研制出具有代表性的 ACM - III、ACM - R2、ACM - R3 和 ACM - R4 等陆地蛇形机器人^[2,3],这些机器人已经从只能做简单的二维运动,发展到了适应凹凸不平的崎岖地面。为满足水下探测需要,该团队又研发了名为 ACM - R5 的水陆两栖蛇形机器人^[4],如图 1.2 所示。该机器人的关节设计了一对驱动伺服电动机,通过齿轮系统传动,可实现俯仰和偏航运动,如图 1.3 所示。在每节躯干单元的外侧,每隔 60°安装一个带有小从动轮的叶片,这样,在关节进行防水处理后,ACM - R5 既可实现陆上的蜿蜒、翻滚和侧



图 1.2 ACM - R5

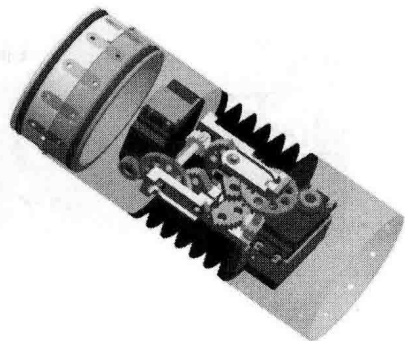


图 1.3 ACM - R5 的关节内部结构

向运动,又可水下自由游动,并且其游动速度不低于 0.9m/min。在机器人的头部装有一部摄像头,凭借自身的无限传输功能,可以将摄像头采集到的数据传输给上位机,以便进行数据处理。该蛇形机器人可通过尾部的电源接口实现有线供电,当进行水下作业时,还可通过自身携带的聚合物锂电池进行自主供电。

德国国家信息技术研究中心于 20 世纪末,先后研制出 GMD - Snake 和 GMD - Snake2,如图 1.4 和图 1.5 所示。GMD - Snake 头部带有用于探测障碍物的压力传感器和照明用的 LED 灯,各个关节装有可检测角度的弹簧触点装置,以及用于控制水平和垂直方向的驱动电机,该机器人能够完成平地爬行和越障爬行^[5]。

基于 GMD - Snake 功能和结构的研究,GMD - Snake2 的头部装有一个用于图像识别的摄像头,每节躯干单元的壳体由圆柱形铝材构成,其关节与 GMD - Snake 相同,通过两个电动机连接而成的万向节实现,如图 1.6 所示。在壳体外侧每隔 60°安装一对小从动轮,壳体内部装有能感知运动状态的加速度传感器,以及用于测量距离的机械 - 光学传感器。GMD - Snake 和 GMD - Snake2 需要外部提供 24V 电源^[6]。



图 1.4 GMD - Snake

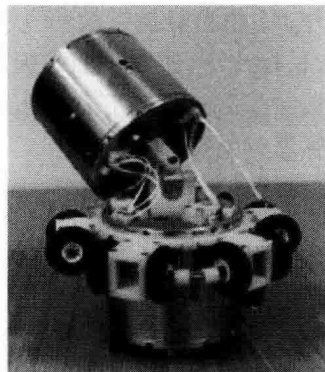


图 1.5 GMD - Snake 关节

美国密歇根大学研制的 OmniTread OT - 4 和 OmniTread OT - 8 蛇形机器人具有独特的结构,如图 1.7 所示,该系列机器人由 7 节躯干单元组成,每个单元具有各自的作用。单元①为有效载荷单元,单元②和单元⑥为空气压缩器,单元③和单元⑤为能源单元,单元④为驱动单元。在每个躯干单元外与地面接触的平面上分别装有一对履带,以保证机器人发生机体翻转时仍具有足够的爬行能力。躯干单元之间设计了气动二自由度的关节,利用气动驱动关节可实现 OmniTread 蛇形机器人的俯仰和偏航运动。OmniTread 蛇形机器人利用两块并联的 7.4V、730mAh 的聚合物锂电池作为驱动电源,安装在驱动电机两侧。OmniTread OT - 8 与 OmniTread OT - 4 不同之处在于可实现无线操控,可通过直径为 8in(1in = 2.54cm)的管道,而 OmniTread OT - 4 需要有线操控,仅能通过 4in 通

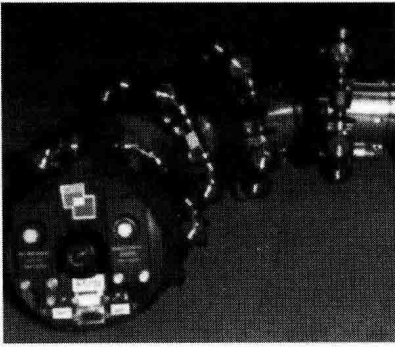


图 1.6 GMD - Snake2

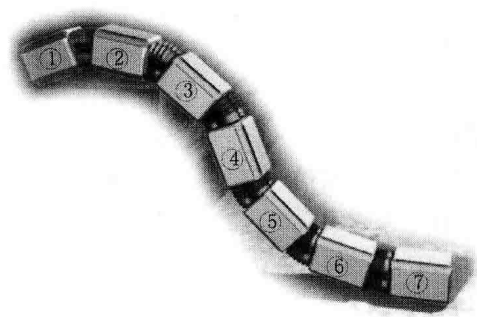


图 1.7 OmniTread 蛇形机器人结构

道。在脊柱结构内 OmniTread 机器人具有很强的翻越能力,能够适应丛林、戈壁、管道等崎岖环境,爬行速度可达到 $0.9\text{m}/\text{min}^{[7]}$ 。

美国 Gavin Miller 带领团队研制了 S 系列的蛇形机器人,其中, S5 蛇形机器人具有极高的仿生效果,如图 1.8 所示。该机器人由 64 个伺服电机和 8 个伺服控制躯干单元组成,每个单元的内部结构如图 1.9 所示,可见该结构仅能进行偏航运动。此外, S5 由自身携带的 42 块聚合物锂电池完成供电。由于 S5 的躯干关节数量大、长径比小,所以平面蜿蜒运动具有极高的仿生效果。为实现距离检测、运动测量、图像采集、转动等功能, Gavin Miller 对最新款的 S7 蛇形机器人集成了多种传感器,如图 1.10 所示。

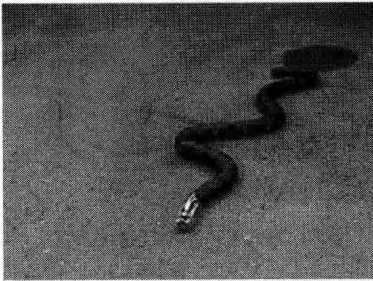


图 1.8 蛇形机器人 S5

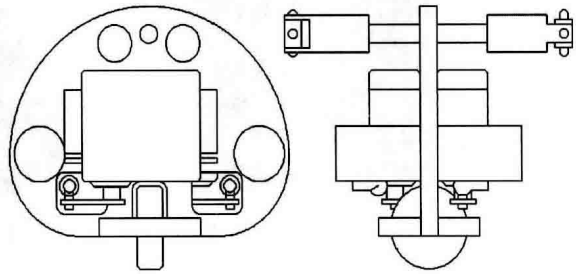


图 1.9 S5 蛇形机器人的躯干单元结构简图

美国卡耐基梅隆大学主要研究用于攀爬的模块化蛇形机器人,具有代表性的蛇形机器人为 Uncle Sam,如图 1.11 所示。该机器人研制考虑了尺寸、功耗和速度等因素对步态控制的影响,图 1.12 所示为单模块的结构示意图,机身全长为 94cm ,直径为 5.1cm 。每个模块装有一个伺服电机,通过减速结构实现驱动杆的动力输出,并且驱动杆与连接杆正交设计,将两个模块进行连接后,水平方向和铅垂方向的驱动杆可实现偏航运动。卡耐基梅隆大学模块化蛇形机器人采用螺旋步态实现向前爬行,具有很强的翻越能力,根据攀爬方式不同,分为内攀爬式和外攀爬式两种,二者均以自身和外部环境的摩擦作为力学约束条件,通过

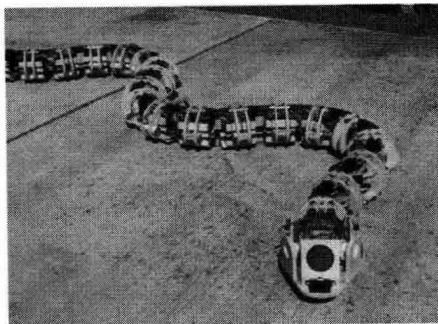


图 1.10 蛇形机器人 S7

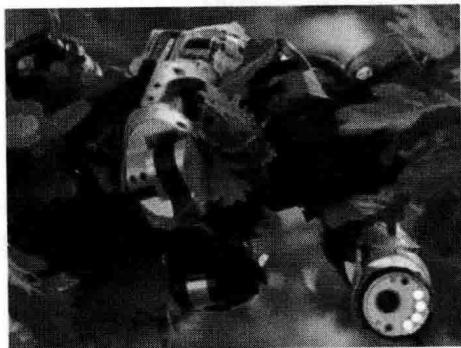


图 1.11 蛇形机器人 Uncle Sam

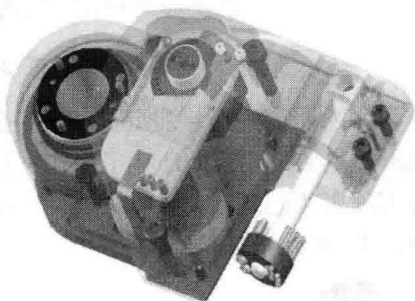


图 1.12 单模块的结构示意图

身体的运动,实现沿壁或杆(柱)体爬行,适用于在空间狭窄的管道、墙壁狭缝、杆(柱)体等环境爬行。该机器人结构具有运动灵活的特点,需要有线控制和外接电源^[8,9]。

卡内基梅隆大学协助研发了一种铂硅复合的皮肤,既能保护机器人机构,还能适应湿地、沙地、灌木丛等环境,进而研制了一种具有皮肤驱动能力的蛇形机器人(TSDS),通过控制皮肤向后运动,实现身体向前运动,如图 1.13 所示^[10]。



图 1.13 皮肤驱动的蛇形机器人 TSDS

挪威科技大学研发了用于火灾扑救的蛇形机器人 Anna Konda,其体型较大,躯干采用金属材料加工,装有 20 个液压马达,身长为 3m,总质量 75kg。该机器人头部带有两个灭火剂喷嘴,当火灾发生时,可对准火源进行扑救,如图 1.14 所示^[11]。

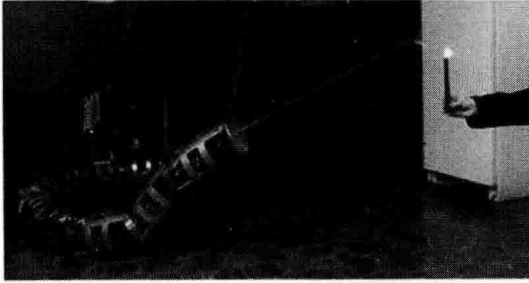


图 1.14 蛇形机器人 Anna Konda

为深入研究障碍辅助运动步态,挪威科技大学又研制了名为 Aiko 和 Kullo 的蛇形机器人,如图 1.15 和图 1.16 所示,尽管二者为无轮式的蛇形机器人,但均可实现多步态运动。Aiko 身长 1.5m,总质量 7kg,采用直流电机驱动,需外接电源供电,未携带任何传感器^[12,13]。

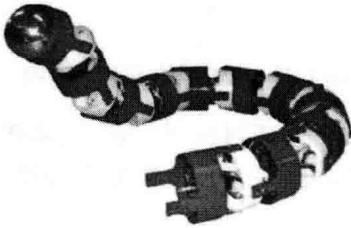


图 1.15 蛇形机器人 Aiko

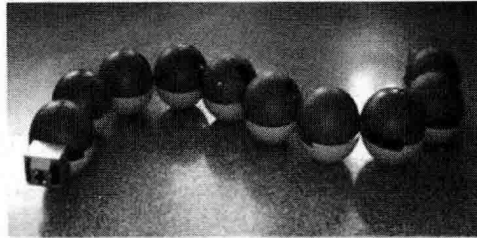


图 1.16 蛇形机器人 Kullo

而由 10 节躯干单元组成的 Kullo,每个单元均装有压力传感器,可感知机器人自身与外界的作用力。Kullo 的躯干单元具有光滑的球形外壳,包裹着一个环形和两个半环形的金属框架,通过两个输出轴为正交安装的伺服电机以及齿轮系统的传动装置,可实现水平方向的框架发生俯仰、铅垂方向的框架发生偏航运动,躯干单元的结构示意图如图 1.17 所示。

1.2.2 国内蛇形机器人

我国对蛇形机器人本体的研制稍晚于国外,但研发脚步逐渐赶上国外发展水平,近年来也取得了可喜成果。

中国科学院沈阳自动化研究所以马书根为核心的机器人研发团队,通过与日本合作,共同研制出具有代表性的蛇形机器人巡视者 II 和探查者 III,如图 1.18 和图 1.19 所示。

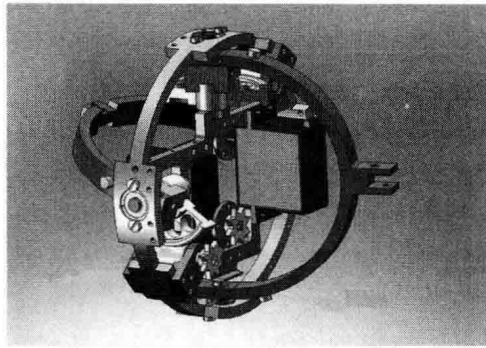


图 1.17 Kullo 躯干单元的结构示意图



图 1.18 巡视者 II



图 1.19 探查者 III

巡视者 II 由金属材质的躯干单元组成,全长约 1.2m,总质量 8kg,单元间通过特有的万向节链接,能够实现俯仰、偏航和滚转三轴转动,每节躯干单元周围装有“体轮”,可减小运动阻力、提高运动效率,其头部装有视觉传感器和 GPS 系统,用来辅助运动控制。此外,该机器人可自身携带电源,并可实现无线操控^[14]。

基于对巡视者 II 的研究,探查者 III 可实现水陆两栖复杂环境的运动,共由 9 节躯干单元组成,总长 1.17m,总质量 6.75kg。为适应水下环境,在躯干单元的径向每隔 45°安装一个带有从动轮的浆,而取代了“体轮”,并且在单元之间增加了防水密封装置。单元内采用两个伺服电机驱动,通过齿轮系统传动实现俯仰和偏航运动,单元结构如图 1.20 所示,当左右齿轮同向运动时发生俯仰运动,当左右齿轮进行相反方向运动时发生偏航运动^[15]。

上海交通大学研制的适合于攀爬的 CSR 机器人,全长约 1.5m,总质量约 2.7kg,由 15 个具有俯仰和滚转功能的躯干单元组成,外面包裹一层可增大接触力的胶带,如图 1.21 所示^[16]。

与其他类型机器人不同,该机器人的躯干单元两端可实现绕径向转动、中间可绕轴向转动、改变径向转动的角度,从而实现机器人能绕柱体攀爬。

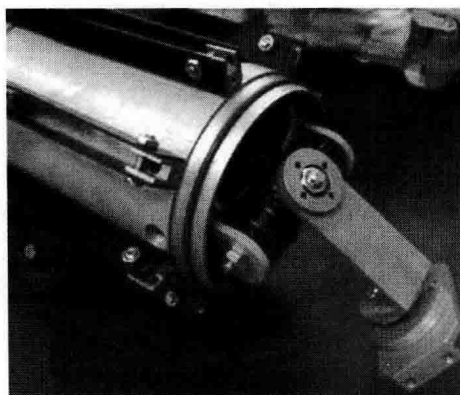


图 1.20 探查者Ⅲ的单元结构

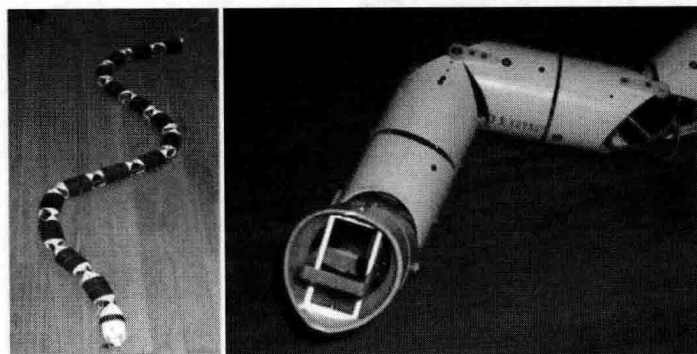


图 1.21 蛇形机器人 CSR 及其躯干单元

国防科技大学研制的蛇形机器人(简称 NUDT SR),总长 1.2m,总质量 1.8kg,可实现蜿蜒运动,最大前进速度可达 20m/min,其头部带有视频采集装置,如图 1.22 所示,然而目前关于该机器人的资料很少^[17]。

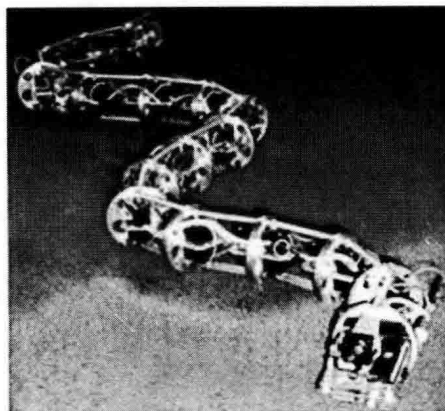


图 1.22 国防科技大学的蛇形机器人

1.2.3 蛇形机器人分类

国内外研制的蛇形机器人在结构上主要均有两大特点:一是连接机器人躯干单元的连接关节转动功能;二是机器人与外界接触的轮关节。

目前,蛇形机器人躯干单元均采用连杆式结构,躯干单元根据单轴转动、双轴转动和三轴转动的实现情况,可进行分类。将单轴转动的关节按照转动轴的平行安装,可称为单轴平行安装方式的单轴转动关节,可实现蛇形机器人的蜿蜒爬行和蠕动。而将单轴转动的关节按照转动轴的非共面正交安装,可称为非共面单轴正交安装方式的双轴转动关节,不仅能够实现蜿蜒爬行和鼓风琴运动,还能完成侧向运动和攀爬运动。还有一种将单轴转动的关节按照转动轴的共面正交安装,可称为共面轴正交安装方式的双轴转动关节,如CRS。还有一种双轴转动关节是通过齿轮系统设计,实现俯仰和偏航,如ACM-R5和Kullo等。三轴转动关节不但可以实现俯仰和偏航运动,还能够绕躯干单元的轴线方向进行转动,如GMD-Snake2,尽管由此结构组成的蛇形机器人能够实现三维运动,但对伺服电机的输出力矩要求很高,从而导致机器人的尺寸大、功耗大。

轮关节可分为主动轮和从动轮,主动轮能够提高爬行能力,从动轮是为满足机器人在蜿蜒运动时摩擦力的各向异性条件而设计。根据运动步态和功能的不同,蛇形机器人可以分为有从动轮结构和无从动轮结构。根据这两个特点,可以将前面所述蛇形机器人进行分类,如表1-1所列。

从步态实现的角度,可以对表1-1所列机器人作进一步划分,具体内容如表1-2所列。

表1-1 按结构对蛇形机器人分类

形式	单轴转动关节	双轴转动关节			三轴转动关节
		非共面单轴正交安装	共面单轴正交安装	齿轮系	
有从动轮	ACM-III、S5、S7	ACM-R2、 ACM-R3、 ACM-R4	—	—	GMD-Snake2
无从动轮	NUDT SR	Uncle Sam、 Aiko、DSTS	CSR	巡视者II、 探查者III ACM-R5、Kullo	GMD-Snake
主动轮	OmniTread-OT4 OmniTread-OT8	—	—	—	—