

北京市科学技术委员会
科普专项资助

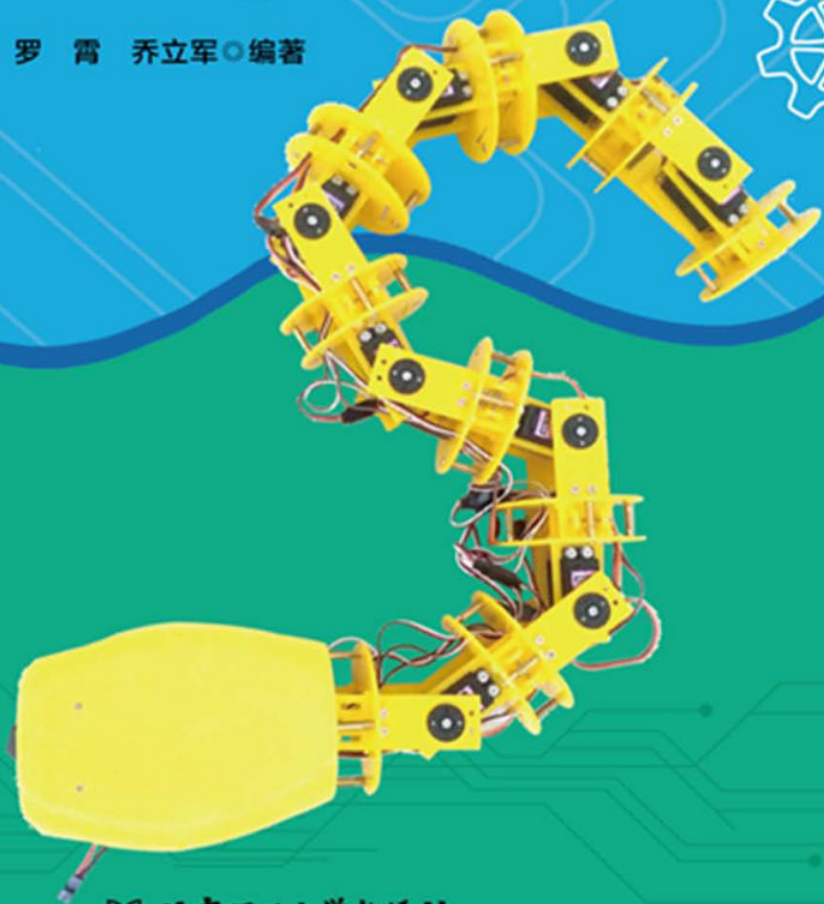
北京市科学技术委员会
科普专项经费资助



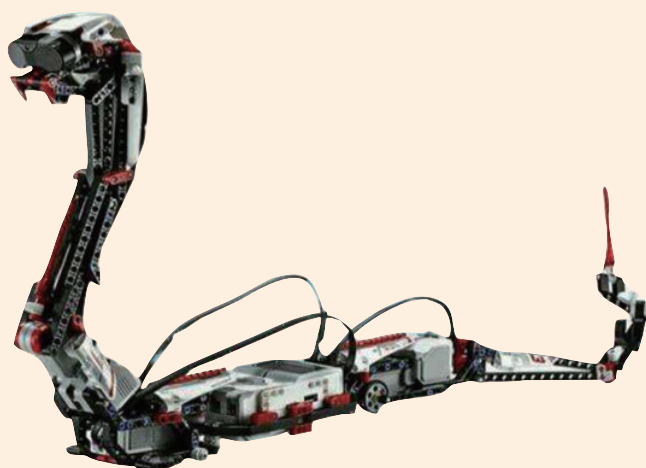
我的机器人创客教育系列

仿蛇机器人的 设计与制作

罗庆生 罗 霄 乔立军 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



我的机器人创客教育系列

仿蛇机器人的设计与制作

罗庆生 罗 霄 乔立军●编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

仿蛇机器人的设计与制作/罗庆生, 罗霄, 乔立军编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 7

(我的机器人创客教育系列)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7267 - 4

I. ①仿… II. ①罗… ②罗… ③乔… III. ①仿生机器人 - 设计 - 青少年读物②仿生机器人 - 制作 - 青少年读物 IV. ①TP242 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 142829 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 13.75

字 数 / 260 千字

版 次 / 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



序 言

青少年是祖国的未来，科学的希望。以我国广大青少年为对象，开展规范性、系统性、引领性、全局性的科技创新教育与实践活动，让广大青少年通过这些活动，将理论研究与实际应用结合，将动脑探索与动手实践结合，将课堂教学与社会体验结合，将知识传承与科技创新结合，使广大青少年能有效提升创新兴趣，熟悉创新方法，掌握创新技能，增长创新能力，成为我国新时代的科技创新后备人才，意义重大，影响深远。

在形形色色的青少年科技创新教育与实践活动中，机器人科普教育、科研探索、科技竞赛别具特色，作用显著。这是因为机器人是多学科、多专业、多技术的综合产物，融合了当今世界多种先进理念与高新技术。通过机器人科普教育、科研探索、科技竞赛，可以使广大青少年在机械技术、电子技术、计算机技术、传感器技术、智能决策技术、伺服控制技术等方面得到宝贵的学习与锻炼机会，能够有效加深青少年对科技创新的理解能力，并提高其实践水平，让他们尽早爱科学、爱创新。

了解机器人的基本概念，学习机器人的基本知识，掌握机器人的设计与制作技巧，提升机器人的展演水平与竞技能力，将使广大青少年走近我国科技创新的最前沿，激发青少年对于科技创新尤其是机器人创新的兴趣与爱好，挖掘青少年开展科技创新的潜力，夯实青少年成为创新型、复合型人才的理论与技术基础。

“我的机器人创客教育系列”丛书重点讲述了仿人、仿蛇、仿狗、仿鱼、

仿蛛、仿龟等六种机器人的设计与制作，之所以选择了这六种仿生机器人作为本套丛书的主题，是出于以下考虑：在仿生学一词频繁在科研领域亮相时，仿生机器人也逐步进入了人们的视野。由于当代机器人的应用领域已经从结构化环境下的定点作业，朝着航空航天、军事侦察、资源勘探、管线检测、防灾救险、疾病治疗等非结构化环境下的自主作业方向发展，原有的传统型机器人已不再能够满足人们在自身无法企及或难以掌控的未知环境中自主作业的要求，更加人性化和智能化的、具有一定自主能力、能够在非结构化的未知环境中作业的新型机器人已经被提上开发日程。为了使这一研制过程更为迅速、更为高效，人们将目光转向自然界的各种生物身上，力图通过有目的的学习和优化，将自然界生物特有的运动机理和行为方式，运用到新型仿生机器人的研发工作中去。

仿生机器人是一个庞大的机器人族群，从在空中自由飞翔的“蜂鸟机器人”和“蜻蜓机器人”，到在陆地恣意奔跑的“大狗机器人”和“猎豹机器人”，再到在水下尽情嬉戏的“企鹅机器人”和“金枪鱼机器人”；从肉眼几乎无法看清的“昆虫机器人”到可载人行走的“螳螂机器人”，现实世界中处处都可看见仿生机器人的身影，以往只有在科幻小说中出现的场景正在逐步与现实世界交汇。

仿生机器人的家族成员们拥有五花八门的外观形貌和千奇百怪的身体结构，它们通过不同的机械结构、步态规划、行动特点、反馈系统、控制方式和通信手段模拟着自然界中各种卓越的生物个体，同时又通过人类制造的计算机、传感器、控制器以及其他外部构件，诠释着自己来自实验室的特殊身份。如今，这支源于自然世界和科学世界混合编组的突击部队正信心满满，准备在人类生活中大显身手。

时至今日，仿生机器人已经成为家喻户晓的“大明星”，每一款造型新颖、构思巧妙、功能独特、性能卓异的仿生机器人自问世之时起都伴随着全世界的惊叹和掌声，仿生机器人技术的迅速发展对全球范围内的工业生产、太空探索、海洋研究，以及人类生活的方方面面产生越来越大的影响。在减轻人类劳动强度，提高工作效率，改变生产模式，把人从危险、恶劣、繁重、复杂的工作环境和作业任务中解放出来等方面，它们显示出极大的优越性。人们不再满足于在展示厅和实验室中看到机器人慢悠悠地来回走动，而是希望这些超能健儿们能够在更加复杂的环境中探索与工作。

北京理工大学特种机器人技术创新团队成立于2005年，是在罗庆生教授和韩宝玲教授带领下，长期不懈地走在特种机器人科技创新探索、科研任务攻关道路上，充满创新能量、奋斗不息的一支标兵团队。该创新团队的主要研究领域为光机电一体化特种机器人、工业机器人技术、机电伺服控制技

术、机电装置测试技术、传感探测技术和机电产品创新设计等。目前已研制出仿生六足爬行机器人、新型特种搜救机器人、多用途反恐防暴机器人、新型工业码垛机器人、新型轮腿式机器人、新型节肢机器人、新型工业焊接机械臂、陆空两栖作战任务组、外骨骼智能健身与康复机、“神行太保”多用途机器人、履带式壁面清洁机器人、小型仿人机器人、“仿豹”跑跳机器人、先进综合验证车、仿生乌贼飞行机器人、履带式变结构机器人、制导反狙击机器人、新型球笼飞行机器人等多种特种机器人。该团队在承研某部“十二五”重点项目——新型仿生液压四足机器人过程中，系统、全面、详尽、科学地开展了四足机器人结构设计技术研究、四足机器人动力驱动技术研究、四足机器人液压控制技术研究、四足机器人仿生步态技术研究、四足机器人传感探测技术研究、四足机器人系统控制技术研究、四足机器人器件集成技术研究、四足机器人操控装备技术研究，在有关液压四足机器人的仿生研究、机构设计、结构优化、机械加工、驱动传感、液压伺服、系统控制、人工智能、决策规划和模式识别等高精尖技术方面取得一系列创新与突破，从而为本套丛书的撰写提供了丰富的资料和坚实的基础。

本套丛书的主创人员在开发高性能、多用途仿生机器人方面具有丰富的研制经验和深厚的技术积累，由罗庆生、韩宝玲、罗霄撰写的专著《智能作战机器人》曾获“第五届中华优秀出版物奖图书奖”称号，这是我国出版物领域中的三大奖项之一，表明其在科技领域，尤其是在机器人领域中的实力与地位。

本丛书由罗庆生、罗霄担任主撰；蒋建锋、乔立军、王新达、陈禹含、郑凯林、李铭浩等人参与了本套丛书的研究与撰写工作，并担任各分册的主创人员。

在本套丛书的研究与写作过程中，得到了北京市教委、北京市科委等部门相关领导的极大关怀，得到了北京理工大学出版社的热情帮助，还得到了许多同仁的无私支持。值本书即将付印出版之际，谨向所有关心、帮助、支持过我们的领导、专家、同事、朋友表示衷心的感谢！

少年强则中国强，创新多则人才多。让机器人技术助圆我国广大青少年的“中国梦”！

作 者

2019年7月于北京



目 录

CONTENTS

第 1 章	我能像蛇一样在丛林里穿梭	1
1.1	给你讲讲我的历史	1
1.1.1	仿生机器蛇的诞生	1
1.1.2	仿蛇机器人的发展	4
1.1.3	仿生蛇的研究内容	13
1.2	我没有腿，但我超级能爬	14
1.2.1	蛇的蜿蜒运动	14
1.2.2	蛇的蠕动运动	14
1.2.3	蛇的直线运动	15
1.2.4	蛇的侧向运动	15
1.2.5	蛇的翻滚运动	16
1.2.6	蛇的攀爬运动	16
1.3	我的名字叫仿蛇机器人	17
第 2 章	我身体的由来	18
2.1	我的动力源	18
2.1.1	直流电机	19
2.1.2	舵机	21
2.1.3	为我选择合适的舵机	23

2.2 多彩的形态	26
2.2.1 蛇的基本结构	26
2.2.2 蛇关节的连接方式	27
2.2.3 关节连接的选择	30
2.3 灵活的身躯	30
2.3.1 主流加工生产工具	30
2.3.2 三维实体设计软件的应用	37
2.3.3 仿蛇机器人模块化设计方案	54
2.3.4 仿蛇机器人单关节的设计	55
2.3.5 辅助结构的设计	65
2.3.6 外购件的实体造型	68
2.3.7 仿蛇机器人的头部设计	76
2.3.8 仿生蛇模型的组装	81

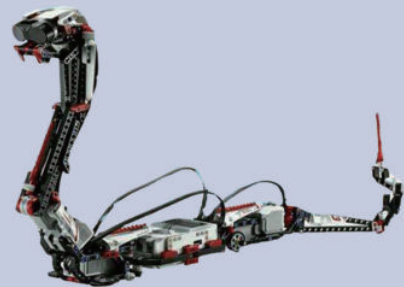
第3章 瞧瞧我的感官 88

3.1 我的眼睛有秘密	89
3.1.1 视觉系统	89
3.1.2 超声波测距传感器	95
3.2 我的触觉遍全身	99
3.2.1 温湿度传感器	99
3.2.2 红外线测距传感器	102
3.2.3 触觉传感器	104
3.3 身体内部隐形的器官	106
3.3.1 蛇类的相互通信	106
3.3.2 无形的能量源	110
3.3.3 定位系统	116
3.3.4 姿态检测模块	120

第4章 快把我制作出来吧 124

4.1 准备机器人组装的材料	125
4.1.1 组装仿蛇机器人的相关工具	125
4.1.2 激光切割零件的加工	130
4.1.3 购买零件的准备	154
4.2 帮我组装躯干	155
4.2.1 外购零件的组装	156

4.2.2 单个关节的装配	158
4.2.3 整体躯干的组装	160
4.3 拼到一起看一看	161
第5章 请你教我思考	163
5.1 我的大脑	164
5.1.1 控制器的选择	164
5.1.2 大脑工作的准备材料	169
5.2 动脑想一想	180
5.2.1 眼睛的控制（二极管）	180
5.2.2 舵机的测试	186
5.3 调整姿态，让我爬一爬	188
5.3.1 动脑思考爬行	188
5.3.2 请你帮我恢复初始的姿态	195
5.3.3 请你帮我选择爬行方式	197
5.3.4 请你对我进行控制	199
参考文献	202



第 1 章

我能像蛇一样在丛林里穿梭

本章首先来探讨一下国内外研究机构对仿蛇机器人的研发历史，然后对人们已经开发出的不同种类仿蛇机器人进行介绍，进而再对仿蛇机器人的发展方向进行分析，加深大家对仿蛇机器人的兴趣，掌握国内外仿蛇机器人的发展趋势，并指导学生在相关技术领域开展研究与探索；其次，对生物蛇的身体构造、运动方式、控制机理进行分析，启发青少年学生理论联系实际，动脑结合动手，设计仿蛇机器人合理的结构，并了解仿蛇机器人在运动控制过程中存在的难点和重点；最后，对本书撰写的主要意义和重点内容进行概况总结，方便学生从整体把握本书的内容。

1.1 给你讲讲我的历史

1.1.1 仿生机器蛇的诞生

随着科学技术的日益进步和人们生活水平的不断提高，机器人作为 20 世

仿蛇机器人的设计与制作

纪人类的伟大发明之一，已经逐步进入了日常的生产和生活领域，例如海洋勘探领域中的水下机器人（见图 1-1），太空探索领域中的火星探测车（见图 1-2），流水线上代替工人生产的工业机器人（见图 1-3）。现在研制的机器人与传统的机器人相比，发生了质的变化，不仅仅只是简单地把人类从繁重、危险、枯燥、重复的劳动中解放出来，而是它们越来越像“人”，具有了很高的智能（见图 1-4）。

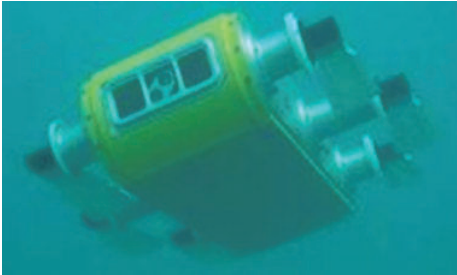


图 1-1 水下机器人



图 1-2 火星探测车



图 1-3 工业机器人



图 1-4 步行机器人

目前，人们对机器人的研究重点已经从在制造环境下使用的工业机器人转向在非结构环境下使用的自主作业机器人，例如星际探索机器人、军事侦察机器人、管道疏通机器人、疾病治疗机器人、抢险救灾机器人等的开发^[1]。为了提升机器人的工作能力和应用范围，科学家和工程师们纷纷把目光转向了自然界中形形色色的生物。地球上的各种生物种类难以详计，其数量更是难以尽数。每种生物个体在长期进化中形成了各自独特的生命体态。例如展翅高翔的鸟类、自在巡游的鱼类、尽展生命活力的昆虫等。同时，每个生物物种都可以适应自己所处的环境，并不停地向着完美的生命体系进化^[2]。于是将一些对人类颇有助益的生物特征与机器人功能需求相结合的方法就成为促进现代机器人技术不断创新的重要途径，各国的科学家和工程师们研制出许许多多性能独特的仿生机器人，其中就有仿鱼机器人、仿壁虎机器人、仿蛇机器人，等等。

仿生机器人的研究主要集中在以下两个方面：

一是为了仿造人类自身功能而研制的机器人，例如模仿人手功能研制的灵巧手（见图 1-5），这种灵巧手可以像人手一样灵巧、准确、可靠地抓取物品；模仿人脑功能研制的智能机器人，这种机器人具有感觉要素、思考要素和决策要素，可以实现自主运动。

二是模仿某些生物特质的仿生机器人，此类仿生机器人的研制难度并不亚于仿人机器人，例如能够在水里自由游动的仿鱼机器人（见图 1-6）、能够在多种地形下自由运动的仿狗机器人（见图 1-7）、能够在复杂环境中协同作业的仿蚁机器人（见图 1-8）等^[3-4]。

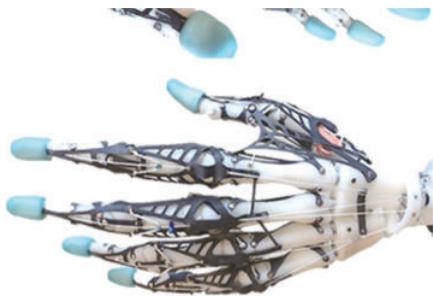


图 1-5 灵巧手



图 1-6 仿鱼机器人



图 1-7 仿狗机器人

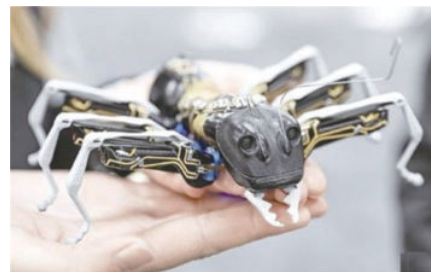


图 1-8 仿蚁机器人

通过对比各类生物的生存环境和运动特性，人们不难发现：蛇类的生存环境丰富多样，森林、沙漠、山地、平原、石堆、草丛、沼泽、湖泊都能见到蛇的踪影。蛇类的独特爬行方式使其在各种生态条件下都能随遇而安，且运动迅速自如，比如爬树、游水、钻洞、潜行、绕过障碍、穿越沙漠等^[3]。蛇的身体虽然只不过像一条华彩斑斓的绳子，但其功能极其强大，前行的时候可以当“腿脚”，尤其是在平坦地面爬行时更是行动如飞；攀爬的时候可以当“手

臂”，在不同树木间上下爬行、穿梭往来；在攫取东西的时候又可以当“手指”，准确无误、迅捷无比。蛇在复杂多变环境中的杰出适应能力引起众多学者的青睐，使得仿蛇机器人的研究与探索变得日益兴旺起来。

1.1.2 仿蛇机器人的发展

1. 国外仿蛇机器人的研究现状

国外对于仿蛇机器人的研制进行得较早，且已取得显著成果。1972年，日本东京工业大学 Hirose 教授率领的团队成功研制出第一台仿蛇机器人（名为 ACM，见图 1-9）。该机器人由 20 个关节构成，身長 2 m，重量 28 kg，可以实现平面内的螺旋运动。它利用躯干上每个关节的相互转动，使得整体按照特定曲线形式发生弯曲变化，产生向前的驱动力；同时在每节单元下装有两个从动轮，减少与地面的摩擦；通过从动轮获得不同的径向摩擦力和轴向摩擦力来实现机器人整体在地面上滑行，滑行的曲线为一条螺旋曲线，其速度可达 40 cm/s。

此后，Hirose 教授及其团队又研制出了仿蛇机器人 ACM-R3（见图 1-10）。该机器人由 20 个两两正交的体节组成，身長 1.8 m，重达 12 kg，每个关节自带电源，采用完全无线控制的方式。ACM-R3 的机械结构比较简单，体节上也安装着从动轮，通过每个关节的运动提供仿蛇机器人运动所需要的摩擦力，并可以实现直接单元驱动、侧面滚动、螺旋运动、S 曲线等各类运动形式，其最大的特点在于可以实现空间内的三维运动和各类复杂的动作。



图 1-9 ACM 仿蛇机器人



图 1-10 ACM-R3 仿蛇机器人

2005 年在日本的爱知世博会上，Hirose 及其团队又公布了一款仿蛇机器人 ACM-RS5，该机器人共有 9 个体节，身長 1.6 m，重量 6.5 kg，它是世界上第

一台水陆两栖仿蛇机器人（图 1-11）。ACM-RS5 每个模块内装有两个驱动器，每个关节专门设计了一对驱动伺服电机，通过齿轮系传动原理使其中一个电机控制关节偏航运动，另一个控制关节俯仰运动，并在关节处进行防水处理。因此，ACM-RS5 既可实现陆地上的蜿蜒、翻滚和侧向运动，又可实现水下的自由游动，其游动速度不小于 0.9 m/min 。在机器人的头部装有一个摄像头，凭借自身的无线传输功能，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，也可通过自身携带的聚合物锂电池进行自主供电。



图 1-11 ACM-RS5 仿蛇机器人

其后，Hirose 率领团队又研制了 ACM-S1、Slim Slime robot、Souryu-IV 等各类仿蛇机器人，其中 ACM-S1（见图 1-12）只有 3 个关节，长 0.9 m ，重 3.7 kg ，其内部使用了弹性杆驱动结构，通过三个绕轴均匀分布的螺旋杆共同控制各个单元的前进、扭转、旋转。Slim Slime robot（见图 1-13）由气动



图 1-12 ACM-S1 仿蛇机器人



图 1-13 Slim Slime robot

控制，共有 6 个关节，长 1.12 m ，重 12 kg ，关节内均匀分布三个波纹管，可以通过填充压缩空气使其伸长或缩短，以达到关节运动的效果；Souryu-IV（见图 1-14）是用于地震救援的，该机器人只有两个关节，长 1.12 m ，重 11.9 kg ，主要特点是采用了履带作为驱动装置，运动能力强，可以很好地转向和翻越障碍物。该团队最

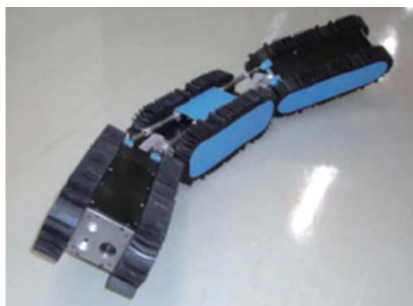


图 1-14 Souryu-IV

新研制开发出的仿蛇机器人为 ACM R7，该机器人的特点是可以将自身弯曲成一个环状，然后像轮子一样在草地上滚动^[8]。

1995 年，日本 NEC 公司的 Takanash 研制出了一条由刚性体关节（万向节）构成的仿蛇机器人（见图 1-15（a）），长 1.4 m，直径 42 mm，重 4.6 kg，它的每个关节均是一个细圆柱，可绕相邻单体做 360° 的球面旋转，因而能够实现三维空间运动^[9]。该机器人一共具有 6 个管状的连杆，并在身体两侧装了一些微型的金属托架以增加身体的稳定，它所使用的万向节与人们平时所用的十字万向节不同，无论输出轴和输入轴成何角度，其总能保持 1:1 的传动比。它被认为是在结构方面设计得最好的仿蛇机器人，但加工精度要求较高^[10]。由于刚性体连杆结构使其不能逼真模仿生物蛇的运动，其运动特性还不够理想。它主要应用于在危险情况下探查和在倒塌的建筑物中施行救援工作。

2017 年 6 月，日本东北大学发布了一款可以通过喷射空气抬高配备摄像头、穿越较高障碍物，并在废墟内部自由展开搜索的仿蛇机器人，其身体呈软管状，直径约 5 cm，全长约 8 m，重约 3 kg，如图 1-15（b）所示^[11]。该机器人采用了大量软性材料，混合了多种动力，穿越障碍物能力极强，通过前端部分向下喷射空气可使其头部抬高至最高 30 cm，除了可以越过有高低差异的地方，也可以对更广阔的范围进行观察。由于机器人身体直径很小，地震灾害中倒塌的废墟也能顺着孔洞钻进去，堪称救援领域的神器。



图 1-15 日本其他的仿蛇机器人

(a) 日本 NEC 公司研制的仿蛇机器人；(b) 日本东北大学研制的仿蛇机器人

20 世纪末，德国国家信息技术研究中心先后研制出了基于模块式结构和 CAN 总线的仿蛇机器人 GMD-Snake（见图 1-16）。

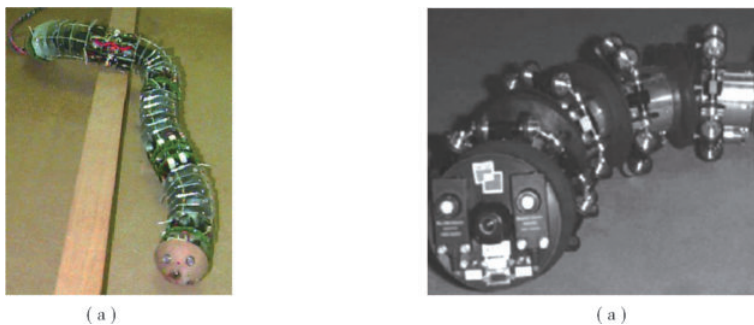


图 1-16 德国 GMD-Snake 仿蛇机器人

(a) GMD-Snake1; (b) GMD-Snake2

GMD-Snake1 直径约为 20 cm，主体结构为三维关节，每个关节装有 3 个电动机、6 个力矩传感器、6 个红外传感器；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。该机器人具有速度及位置闭环，能翻越简单障碍，其优点是在各个方向都能灵活运动，缺点是结构显得相当复杂，抬起时由于重力作用，关节将可能产生失控的扭曲。基于 GMD-Snake1 的前期研究成果，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都由圆柱形铝材制成，其关节与 GMD-Snake1 相同，通过两个电动机连接而成的万向节实现运动驱动，在壳体外侧安装一对小从动轮，可显著改善运动效果。

美国密歇根大学研制的 OmniTread OT-4 和 OmniTread OT-8 仿蛇机器人具有独特的结构（见图 1-17）。其中，OmniTread OT-4 是由 7 节躯干单元组成，每个单元具有不同的功能，具体情况如下：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覆时仍然具有足够的爬行能力；躯干单元之间采用二自由度的气动关节，利用气动驱动关节可实现机器人的俯仰和偏航运动。OmniTread OT-4 利用两块并联的 7.4 V \ 730 mAh 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 的不同之处在于它可实现无线操控，而 OmniTread OT-4 则需要有线操控。Omni-Tread 系列机器人采用脊柱结构，具有很强的翻越能力，能够适应丛林、戈壁、管道等崎岖环境。

美国学者 Uavin Miller 带领团队研制了 S 系列的仿蛇机器人，其中，S5 仿蛇机器人（见图 1-18 (a)）由 64 个伺服电机和 8 个伺服控制躯干单元组成，

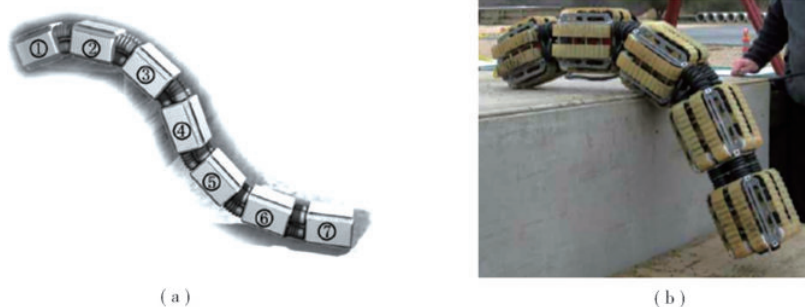


图 1-17 美国密歇根大学研制的 OmniTread 机器人
(a) OmniTread OT-4; (b) OmniTread OT-8

并由自身携带的 42 块聚合物锂电池进行供电。S5 躯干关节数量大、长径比小，所以在平面上进行蜿蜒运动时具有极为逼真的仿生效果。为实现距离检测、运动测量、图像采集、多向转动等功能，Uavin Miller 为最新款的 S7 仿蛇机器人（见图 1-18 (b)）集成了多种传感器，其运动功能得到进一步增强。

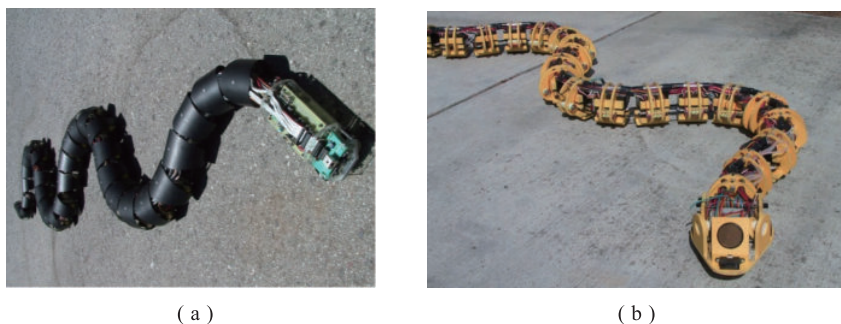


图 1-18 美国 Uavin Miller 团队开发的仿蛇机器人
(a) S5 仿蛇机器人; (b) S7 仿蛇机器人

美国卡内基梅隆大学的 Biorobotics Laboratory 实验室对仿蛇机器人有着长期的研究，其研究不但十分系统，而且非常深入，已经研究出了四款具有代表性的仿蛇机器人，是研究仿蛇机器人极具先进性的团队之一。Uncle Sam 是该实验室研制的一种可重构的仿蛇机器人（见图 1-19 (a)），全长为 94 cm，直径为 5.1 cm。设计时，充分考虑了尺寸、功耗和速度等因素对机器人步态控制的影响，因而该机器人具有结构节奏、运动灵活等特点，但其需要有线控制和外接电源。组成该机器人的每个模块均装有一个伺服电机，通过减速结构实现驱动杆的动力输出，驱动杆与连接杆正交设计，将两个模块进行连接后，水平方向的驱动杆可以实现偏航运动，垂直方向的驱动杆可以实现俯仰运动。这种模