

DOI: 10.3901/JME.2022.07.075

# 蛇形机器人：仿生机理、结构驱动和建模控制<sup>\*</sup>

张军豪<sup>1,2</sup> 陈英龙<sup>1,2,3</sup> 杨双喜<sup>1</sup> 王高贤<sup>1</sup> 杨昕宇<sup>1</sup> 弓永军<sup>1,2</sup>

(1. 大连海事大学船舶与海洋工程学院 大连 116026;

2. 大连海事大学辽宁省救助与打捞工程重点实验室 大连 116026;

3. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

**摘要：**蛇形机器人是一种能够模仿生物蛇运动的新型仿生机器人，由于它能像生物蛇一样实现“无肢运动”，因而被国际机器人业界称为“最富于现实感的机器人”。研究涉及材料学、仿生学、机械设计制造、传感技术等多学科交叉融合，在消防灭火、灾后救援、海底环境与管道探测、复杂环境作业、军事侦查等领域具有广阔应用前景，受到国内外学者及机构的广泛关注和研究。从蛇的生物特征、仿生原理、结构驱动、建模及控制等方面对蛇形机器人研究进行综述，按结构类型将蛇形机器人分为被动轮式、主动轮式、履带式、螺旋桨式和其他结构等；按驱动方式将蛇形机器人分为直流电机驱动、流体驱动、混合驱动和其他驱动等；以及目前常用于蛇形机器人的建模方法和控制策略。从中归纳和分析，得到蛇形机器人的关键研究问题包括材料升级、结构优化、柔性传感技术和自适应控制，其未来发展方向包括新型材料制备成型、高效结构设计加工、灵敏柔性传感技术、新型适合大变形的建模方法、自适应控制系统研发。

**关键词：**蛇形机器人；仿生机器人；结构驱动；建模控制

**中图分类号：**TG156

## Snake Robotics: Bionic Mechanism, Structure, Actuation, Modeling and Control

ZHANG Junhao<sup>1,2</sup> CHEN Yinglong<sup>1,2,3</sup> YANG Shuangxi<sup>1</sup> WANG Gaoxian<sup>1</sup>  
YANG Xinyu<sup>1</sup> GONG Yongjun<sup>1,2</sup>

(1. Naval Architecture and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

2. Key Laboratory of Rescue and Salvage Engineering Liaoning Province, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

3. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** The snake robot is a new type of bionic robot that can imitate the movement of a biological snake, which is called “the most realistic robot” by the international robotics industry because it can achieve “limbless movement” like a living creature. The research involves the cross-fertilization of materials science, bionics, mechanical design, and manufacturing, sensing technology and other disciplines, and has broad application prospects in firefighting, post-disaster rescue, undersea environment and pipeline detection, complex environment operation, military reconnaissance, and other fields, and has received extensive attention and research from scholars and institutions at home and abroad. The research on snake robots is reviewed in terms of biological characteristics of snakes, bionic principles, structural drive, modeling, and control. According to the structure type, snake robots are classified into passive wheel type, active wheel type, crawler type, propeller type and other structures; snake robots are classified into DC motor drive, fluid drive, hybrid drive and other drives according to the drive mode; and the modeling methods and control strategies commonly used for

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51905067, U1908228)、大连市科技创新基金重点学科重大项目(2020JJ25CY016)和流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金课题(GZKF-202112)资助项目。20210817 收到初稿，20220107 收到修改稿

snake robots at present and control strategies. The key research of snake robots include material upgrading, structure optimization, flexible sensing technology and adaptive control, and their future development directions include new material preparation and molding, efficient structure design and processing, sensitive and flexible sensing technology, new modeling methods suitable for large deformation, and adaptive control system development.

**Key words:** snake robot; bionic robot; structure drive; modeling control

## 0 前言

随着移动机器人技术的发展,蛇形机器人在地面救援、管道通道巡检、河道海底水下侦查和复杂环境作业等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。自 20 世纪 70 年代,蛇形机器人的设计与研发一直是机器人领域研究热点,各国科研人员设计了许多新型蛇形机器人。日本东京工业大学 HIROSE 等在 1972 年首先提出蛇形机器人的概念和设计方案,后续开发了 10 多种不同类型的蛇形机器人<sup>[3-6]</sup>;卡内基梅隆大学 CHOSSET 等专注于设计关节结构,并制造了几代蛇形机器人<sup>[7-9]</sup>;挪威科技大学 PETTERSEN 等研制了多代陆地、海洋和两栖蛇形机器人,且 Eelume 系列的机器人已完成产学研相结合<sup>[10-12]</sup>。

蛇形机器人的发展涉及仿生学、材料科学和机器人学。目前,在复合材料、机器人建模与仿真、传感与控制、跨学科应用等领域都面临着诸多挑战。本文从蛇类生物特征和仿生机理、结构设计和驱动方式、建模与控制等方面论述了蛇形机器人的研究现状,并分析讨论了蛇形机器人研究难点、存在的问题和未来可能的发展趋势。

## 1 生物特征和仿生机理

### 1.1 身体结构

蛇类的身体结构主要由椎骨、肋骨和头骨组成,如图 1a 所示,肋骨附着在椎骨周围以保护内部器官和组织,椎骨贯穿蛇的身体从头部连接到尾部。脊髓在椎骨内部,主要功能是通过大脑和身体其他部位之间传递神经信号<sup>[13]</sup>。相邻的椎骨彼此相连形成铰链式结构,如图 1b 所示,可以完成有限的相对旋转,绕垂直轴可转动  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ,绕水平轴轻微旋转,然而椎骨的数量约为 130~500 个,所有沿着身体方向的转动角度总和很大,使蛇在运动时具有极佳的灵活性<sup>[14]</sup>。蛇类的肌肉骨骼系统极其复杂,蛇类的脊椎骨肌肉中有一部分横跨数十个椎骨,这部分肌肉沿身体的两侧呈对角线排列,末端附着在肋骨,利用肌肉的伸展和收缩周期性地改变身形,从而推

进自身的运动<sup>[15]</sup>。陆地蛇类可通过多种方式运动,包括通过身体的蜿蜒波动,通过腹部的单侧收缩或拉伸,将身体折叠成手风琴式运动以及将身体蜷缩成螺旋状运动<sup>[16]</sup>。KANO 等阐明了多关节肌肉在蛇类运动中的作用机制<sup>[17]</sup>。INOUE 等基于 CT 成像和解剖学研究蛇类多种运动方式的内在机理<sup>[18]</sup>。ASTLEY 等基于工程力学理论分析蛇类多关节肌肉的铰接结构,仿真结果与蛇类的生物结构数据高度吻合<sup>[15]</sup>。

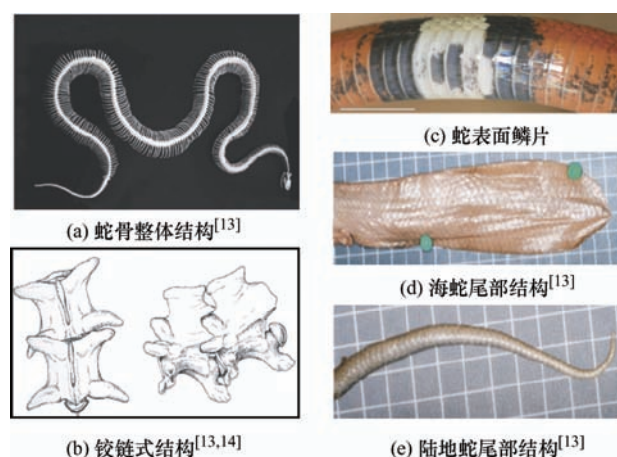


图 1 蛇的生物特征

### 1.2 运动步态

蛇类会根据环境改变它们的运动步态,GRAY 等研究了草蛇的运动,并将其陆地运动分为蜿蜒运动(图 2a),手风琴状运动(图 2b),直线运动(图 2c),侧向波动(图 2d)等四种不同的步态<sup>[19]</sup>。HIROSE 等基于侧滑约束假设(即运动时没有侧向移动)建立了运动学模型,并提出了著名的蛇类蜿蜒步态的 Serpenoid 曲线。此外,MARTINEZ 研究了外部因素对蛇类运动学建模的影响,如地面摩擦和温度等<sup>[20]</sup>。MA 等提出了另一种蜿蜒步态的数学模型,称为 Serpentine 曲线,采集蛇运动时的肌电信号来确定身体的形态,结果表明,Serpentine 曲线比 Serpenoid 曲线具有更高的模拟效果<sup>[21]</sup>。JAYNE 等利用肌电信号采集和全局摄像系统研究蛇在陆地和水中多步态运动时的肌肉活动,综合分析蛇类在多种步态中的运动表现<sup>[22-23]</sup>。MOON 等基于蛇类蜿蜒步态的物理原理和肌肉活动模式,进一步探讨了肌

肉活动产生弯曲和推进的力学机理<sup>[24]</sup>。MARVI 等研究了蛇的手风琴式步态和直线步态, 以及在沙质斜坡上的步态变换规律并解释了每一种步态的生物学原理, 讨论了在蛇形机器人中的应用前景<sup>[25-26]</sup>。GONG 等讨论了生物蛇类如何协调全身以实现敏捷运动并提出提高蛇形机器人性能算法, 即提取生物蛇运动的参数化轨迹数据, 利用控制算法在蛇形机器人中产生等效运动<sup>[27]</sup>。

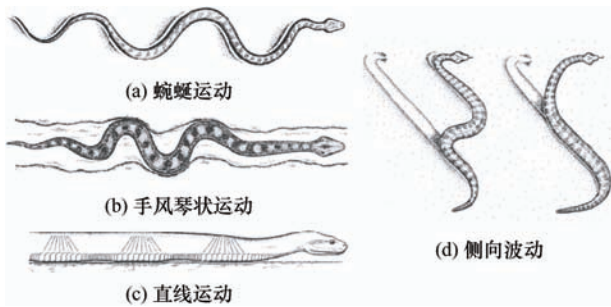


图 2 蛇的运动步态<sup>[19]</sup>

### 1.3 仿生理理

陆地蛇类的身体完全被鳞片覆盖, 如图 1c 所示, 当蛇在坚硬或狭窄的环境中运动时, 鳞片会保护皮肤免受割伤和撕裂, 运动过程中鳞片与地面会产生相互摩擦力<sup>[28-29]</sup>。HU 等对鳞片摩擦特性的实验研究表明, 沿身体切向的摩擦系数远小于法线方向<sup>[30]</sup>。LILJEBACK 等对蛇运动产生的各向同性和各向异性摩擦力的研究表明, 各向同性摩擦对蛇类运动的影响较小, 因此, 目前对陆地蛇形机器人而言, 大多将这种各向异性摩擦特性作为控制设计的基本理论<sup>[28]</sup>。CHANGO 等提出蛇类独特的摩擦特性给蛇形机器人运动带来的启发, 并在地毯、非均质混凝土和均质混凝土等不同环境表面测试了直线、蜿蜒和侧向波动步态<sup>[31]</sup>。此外, 蛇类可以控制鳞片的伸展改变摩擦效应, MARVI 等研究了生物蛇的摩擦特性, 发现蛇类可以巧妙的使摩擦系数翻倍以适应不同地形, 从而增加了运动的稳定性<sup>[32]</sup>。

水蛇或海蛇的种类繁多, 大多数海蛇身体扁平, 表皮鳞片排列稀疏又或像鳗鱼或鳐鱼一样光滑。水中环境不同于陆地环境, 在水中没有足够的支撑和摩擦, 其最重要的运动器官是背腹扁平状的桨状尾鳍, 如图 1d 所示, 可在高密度的水介质中提供推进力, 而陆地蛇的尾部为尖细状, 见图 1e, 主要为了减少与地面的摩擦<sup>[13]</sup>。SANDERS 等利用谱系分子系统和骨骼断层扫描重建了海蛇尾鳍的三维模型, 研究表明, 尾鳍增强了海蛇在水中的机动性, 尤其在迅速俯冲、游动等加速运动表现更为明

显<sup>[13]</sup>。KELASIDI 等研究了被动尾鳍推进的仿生水下蛇形机器人路径跟踪问题, 可大大增加机器人的游动速度<sup>[33]</sup>。

综上, 根据生活环境的差异, 导致陆地蛇和海蛇的运动步态和结构特征有明显的差异, 即陆地蛇表皮被鳞片覆盖, 依靠蠕动身体鳞片产生摩擦力运动; 海蛇表皮鳞片稀疏或光滑, 依靠尾鳍摇摆运动。因此, 蛇形机器人的仿生理理也不同, 陆地蛇形机器人应着重考虑如何设计合适的结构利用摩擦力, 而水下蛇形机器人应重点考虑与水介质的相互作用力。

## 2 蛇形机器人结构和驱动

### 2.1 结构设计

蛇形机器人具有模块化的身体结构, 一般由三个及以上相同或相似的模块组成。根据蛇形机器人身体架构, 可分为五类: 被动轮结构; 主动轮结构; 履带结构; 螺旋桨结构; 其他结构, 本节分别对每种结构的蛇形机器人举例并详细分析。

#### 2.1.1 被动轮结构

被动轮结构指的是通过在机器人上安装无动力的轮子, 以减少与地面的摩擦。HIROSE 等在 1972 年提出的蛇形机器人 ACM III 是被动轮结构<sup>[6]</sup>, 如图 3a 所示, 在每个模块底部放置一对轮子, 方向与机器人的切线方向一致, 因此, 切向的摩擦系数很低, 而法向的摩擦系数很高, 大大提高运动灵活性。后来, HIROSE 等在 ACM III 的基础上改进升级的机器人为 ACM-R3, 如图 3b 所示, 相对于 ACM III, ACM-R3 的所有模块侧面都装有大于身体截面的轮子, 可完成三维运动, 可翻滚越过障碍物, 也可实现无线控制<sup>[34]</sup>。机器人模块设计成壳状, 内部包括电源和传感器等组件, 两端都有正交的旋转轴。运动模式除了蜿蜒步态, ACM-R3 还可展现侧向翻滚和侧向波动步态。ACM-R5 是 HIROSE 等设计的一种两栖蛇形机器人<sup>[35]</sup>, 如图 3c、3d 所示。机器人模块之间的关节由万向节和波纹管组成, 万向节模拟蛇的骨骼, 波纹管模拟外皮和鳞片, 万向节在两个轴的连接处有一个被动扭转接头, 以防止与波纹管的机械干扰。该机器人由九个模块组成, 模块周围装有桨叶和被动轮, 可通过波动产生推进力, 该机器人还能进行急转弯, 在水中自由游动, 因此, 无论在地面还是水中都获得了灵活运动的能力。后来, HIROSE 等陆续开发的 ACM-R7 为无轮结构<sup>[36]</sup>, ACM-R8 为主动轮结构<sup>[37]</sup>。





图 3 ACM 系列蛇形机器人

Wheeko 和 Kulko 蛇形机器人是由挪威科技大学 LILJEBACK 等研制的球形模块机器人<sup>[38-39]</sup>, 如图 4a、4b 所示, 两机器人内部驱动结构是相同的, 区别在于它们的外部结构, 模块都可做二自由度运动。Wheeko 的关节模块配备了被动轮, 以赋予机器人在平面运动时的各向异性摩擦特性, 而 Kulko 是无轮结构, 关节模块由接触力传感器和球形外壳覆盖, 使机器人有一个光滑的外表面, 从而允许在非结构化环境中滑行运动。



图 4 球状模块蛇形机器人

CRESPI 等提出了一系列两栖蛇形机器人 AmphiBot I ~ IV 能够像海蛇或鳗鱼一样在水中游动, 也可以像地面上的蛇蜿蜒运动<sup>[40-44]</sup>。此外, 简单的模块化设计使得组装和拆卸非常容易, 如果一个模块出现故障, 无需修复及更换, 也不会影响机器人的运动。其中, AmphiBot I 和 AmphiBot II 装有被动轮以减小与地面的摩擦力, 见图 5a、5b。AmphiBot I 一共有 8 个模块, 每个模块都做了防水处理, 可单自由度运动, 长度为 70 mm, 截面尺寸

为 55 mm×33 mm, 模块内装有 0.75 W 直流电机和一组齿轮减速器, 电机扭矩为 1.2 Nm, 齿轮的输出轴连接到电位计和下一个模块, 每个关节可以达到大约 0.3 Hz 的最大振荡频率, 速度达到 35 mm/s。与 AmphiBot I 相比, AmphiBot II 同样由 8 个模块组成, 模块内包含电子元件, 配备了中枢模式发生器(Central pattern generator, CPG), 通过内部信号收发器无线通信, 所以 AmphiBot II 没有外部线缆。此外, 电机扭矩增加了 3.5 倍, 电机命令由运行在微控制器上的中央模式生成器直接在机器人中生成, 因此无需在外部计算机上运行控制器。每个模块底部放置了一个检测电路, 用于检测和定位任何泄漏, 当检测到有水时, 电路中固定在模块顶部的 LED 灯会闪烁, 发出漏水警报。在速度试验中, AmphiBot II 最大移动速度为 400 mm/s, 最大游动速度为每秒 230 mm/s。AmphiBot III 和 AmphiBot IV 为无轮结构, 见图 5c-5d, 主要应用于水下的平面运动, 两机器人尾部均装有一个尾鳍装置。AmphiBot III 机器人的密度略高于 1.0 kg/m<sup>3</sup>, 因此机器人在水面下方游动, 每个模块质心低于其几何中心, 在运动时可保持垂直稳定性。AmphiBot IV 在 AmphiBot III 的基础上进一步升级, 可用于水下数据采集、遥感探测和污染泄漏范围测绘, 在节约能源、控制、导航和通信等方面都进行了重要调整。因此, AmphiBot IV 具有更强的续航能力、远距离的通信能力以及多功能的环境感知能力。

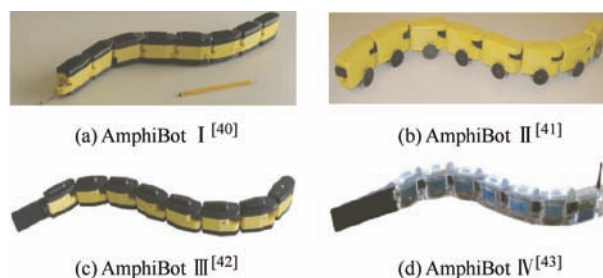


图 5 AmphiBot 系列蛇形机器人

LUO 等研发出了全硅橡胶制成的软机器人<sup>[45-49]</sup>, 如图 6a 所示, 这种蛇形机器人在前进的曲率波动方面具有显著优势, 减少了气动弯曲段的数量, 具有安全的环境交互和自适应交互能力。该机器人底部装有被动轮, 外部包括流体管道、电气系统和动力源, 能够在 5 psi 的压力下以大约 20 mm/s 的速度移动。第二代软蛇形机器人见图 6b, 采用了优化的弯曲执行器, 当使用外部管道提供压缩空气时, 它的移动速度比第一代快 10 倍, 底部依然装有被动轮。为了实现完全自主的控制, 第三代软蛇机

机器人集成了电气设备和流体的嵌入式控制原件以及分布式电磁阀, 见图 6c, 曲率传感器装在每个软弯曲段, 用于实时测量姿态。第四代软蛇机器人是一种具有柔性曲率传感器的模块化软移动机器人, 见图 6d, 与第三代相比, 该机器人能够完成比第三代更复杂的任务且软弯曲模块具有更强的耐久性。

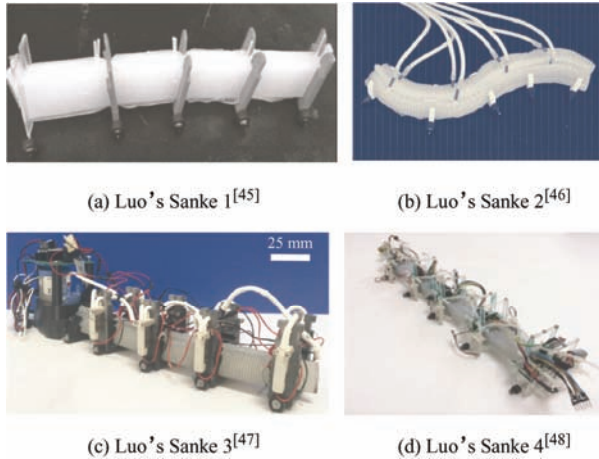


图 6 LUO 等研制的软体蛇形机器人系列

此外, 被动轮结构机器人还包括沈自所研究的 Perambulator 系列<sup>[50-51]</sup>和日本岐阜大学研究的滑板式蛇形机器人<sup>[52]</sup>等。

被动轮结构的蛇形机器人是应用最早且应用最为广泛, 也是最贴近生物蛇蜿蜒运动步态的结构。被动轮结构可有效减少与地面的摩擦, 架构相对简单, 提高机器人的运动效率, 但是, 正因无动力轮结构使机器人很难在斜坡或崎岖的地形中行进。为了增加蛇形机器人的运动环境, 出现了动力式的主动轮结构。

### 2.1.2 主动轮结构

蛇形机器人的第二种主要结构是利用主动驱动轮为机器人提供动力。在 ACM-R3 设计成功的基础上, HIROSE 等开发了一个由马达驱动的主动轮结构 ACM-R4 蛇形机器人<sup>[53]</sup>, 如图 7a 所示, 该机器人采用与 ACM-R3 相同的基本架构, 由 8 个模块组成, 每个模块都有一个运动自由度。ACM-R4 总长度为 1 100 mm, 横截面为 135 mm×135 mm, 重量为 9.5 kg, 关节由最大扭矩为 20 Nm 的电机驱动。ACM-R4 机器人具有以下特点: 具有 3D 运动能力; 关节的运动范围变大; 主动轮与关节轴方向相同; 防水和防尘。该机器人已试验可在 240 mm 宽的通道中直角转弯并爬上 400 mm 高的台阶, 可在泥水中连续运行 3 小时。

KLAASSEN 等发现蛇在直线运动期间, 主要推进力来自腹部的数百个前后移动的鳞片, 基于此提

出了模仿了蛇类直线运动的 GMD-Snake2 机器人<sup>[54]</sup>, 见图 7b, 由六个关节模块和一个头部模块组成, 该机器人的直径为 180 mm, 长度为 1 500 mm, 质量是 15 kg。GMD-Snake2 的每个模块外装有 12 个由小型电机驱动电动轮, 每个关节由三个马达控制, 该机器人还配备了一系列传感器, 包括 6 个红外距离传感器、3 个扭矩传感器、1 个倾斜传感器、每个部分的 2 个角度传感器和 1 个摄像机。

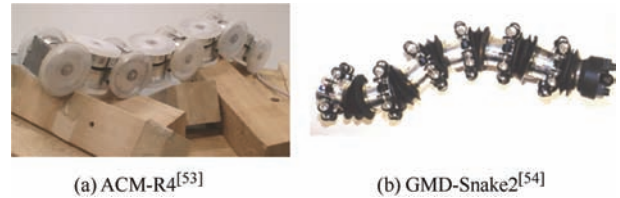


图 7 主动轮结构代表性蛇形机器人

其他的主动轮结构的蛇形机器人还有 HIROSE 等研究的 Koryu-II 机器人<sup>[55]</sup>, 挪威科技大学的机器蛇<sup>[56]</sup>。

主动轮结构的主要优点是不需要大量的模块就能够模拟蛇形运动, 或无需模拟蛇类蜿蜒运动步态便能直线运动, 同时, 主动轮结构可使机器人在非光滑地形运动。虽然主动轮结构增加了机器人的自由度和灵活性, 但也增加了控制复杂性, 使机器人必须主动控制这些额外的自由度, 并在全局运动时与其他驱动关节协调控制。

### 2.1.3 履带结构

除了上述的轮式结构, 履带结构是蛇形机器人另一主要应用结构。BORENSTEIN 等提出履带结构的 OmniTread 系列蛇形机器人<sup>[57-59]</sup>, 如图 8a、8b 所示。OmniTread 8 由 4 个 2 自由度模块组成, 机器人的推进采用了履带式, 为了增大与环境的接触面积, 履带覆盖了模块的 4 个面, 最大限度地提高推进效率, 此外, 使用波纹管作为各模块之间的弯曲关节, 波纹管提高机器人的灵活性, 使机器人更好地适应地形, 以最大限度地提高牵引力。OmniTread 8 每个模块的尺寸为 200 mm×185 mm×185 mm, 质量 13.6 kg, 由 70 W 直流电机驱动, 实验表明该机器人能够实现 530 mm 的最小转弯半径, 能够爬上超过其长度的 36 % 和高度的 240 % 的石堆, 最大前进速度为 100 mm/s。OmniTread 4 是 OmniTread 8 的升级版, 如此命名是因为 OmniTread 4 可以通过最小直径为 4 英寸的洞, 而 OmniTread 8 只能通过不小于 8 英寸的。OmniTread 4 除了体积和质量更小之外, 在设计上也有其他改进, 比如无线缆。OmniTread 8 需要连接线缆为波纹管 and 马达提供压



压缩空气和电力, OmniTread 4 自带压缩气罐和电池, 该机器人还能够通过使用电动微型离合器, 在不需要履带的情况下, 选择性地将部分履带卸下以减少电力消耗。和 OmniTread 8 一样, OmniTread 4 在多种地形, 如砂砾、泥土、斜坡和光滑地面上测试, 最大前进速度 150 mm/s。

ZHANG 等提出一种新型可重构的模块化 JL-I 蛇形机器人<sup>[60]</sup>, 如图 8c 所示, 该机器人由三个模块组成, 每个模块类似坦克状且装有履带, 模块之间通过球形接头连接, 使机器人适应不同地形或拆分成三个小模块同时执行任务。实验表明该机器人能够爬楼梯和穿越缝隙。

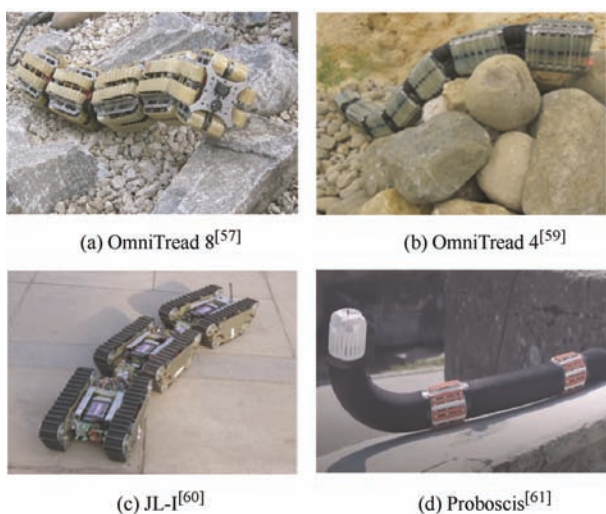


图 8 履带结构代表性蛇形机器人

最近, TAUBNER 等提出 Proboscis robot 救援蛇形机器人<sup>[61]</sup>, 如图 8d 所示, 该机器人最大长度为 15 m, 最大直径仅为 10 cm, 由爬行模块、弯曲关节和头部导航模块组成, 爬行模块装有动力履带, 弯曲关节由 3 根气动波纹管组成, 头部导航模块内置摄像机、扬声器、麦克风等设备, 可以穿过狭窄的缝隙, 为受难者提供水和药品, 使救援人员可以与他们建立视觉和听觉联系。

此外, 天津大学谢同雨等研制的管道蛇形机器人<sup>[62]</sup>、京都大学 OSUKA 等开发 MOIRA 和 MOIRA-II 机器人<sup>[63-64]</sup>同样采用了履带式结构。

履带结构的蛇形机器人优势在于除了可在更加崎岖的环境中运动, 还可钻入狭窄非结构化的受限空间。在面对地震等自然灾害, 潜入废墟中寻找遇难者是非常困难和危险的, 能在这种恶劣环境中运动且通过摄像机和麦克风找到遇难者的救援机器人具有重要的研究价值。将履带应用到蛇形机器人中, 使其能够在废墟中的狭窄区域中穿行, 定位和评估伤亡状况, 并使救援人员能够在短时间内更有效地

救援。

#### 2.1.4 螺旋桨结构

螺旋桨结构仅见应用于水下, 是目前水下蛇形机器人的特有结构。挪威科技大学 LILJEBACK 等提出 Mamba 蛇形机器人<sup>[65-66]</sup>, 如图 9a 所示, 它是一个模块化、可重构、防水的机器人, 该机器人的亮点是能够测量沿其身体方向的环境接触力, 这是通过内置在关节模块内部的力/力矩传感器实现, 每个模块具有 1 个运动自由度。Mamba 的长度为 89 mm, 质量仅为 310 g, 关节最大扭矩为 2.3 Nm, 关节最大转速为 429 °/s。Mamba 是 LILJEBACK 等提出的第一代可拆卸螺旋桨结构的水下蛇形机器人, 可实现陆地水下两栖运动, 第二代多组螺旋桨的机器人名为 Eelume 机器人<sup>[67]</sup>, 如图 9b 所示, Eelume 被设计为可永久存放于水下, 是海底检查, 维护和修理的重要工具, 其细长和柔性的身体可以远距离传输, 达到传统的水下机器人 ROV 和 AUV 无法到达的狭小区域。传感器和作业工具可以在机器人模块化身体安装, 即使在海洋强流中, 机器人也可实现精确悬停和作业, 机器人的一端可以连接固定设备上, 另一端可以进行检查和作业任务。第三代机器人 EELY500 由挪威 SINTEF 研究所和挪威科技大学共同推出<sup>[68]</sup>, 如图 9c 所示, EELY500 调整了螺旋桨的数量和位姿, 提高了机动性, 并使用更强大的电池, 更高的数据容量, 已于 2020 年 6 月在挪威特隆赫姆峡湾 1181 英尺深处海试。

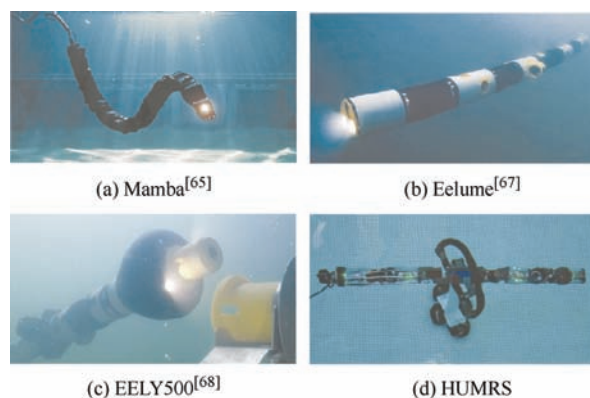


图 9 螺旋桨结构代表性蛇形机器人

卡内基梅隆大学 CHOSET 等在 2021 年提出新型水下机器人 HUMRS, 如图 9d 所示, 与挪威科技大学研究的机器人不同之处在于, HUMRS 完全将螺旋桨置于身体内部, 这使得该机器人可通过更狭窄的区域, 该机器人的研究目标用于协助国防部检查船舶、潜艇和其他水下基础设施的损坏情况, 或作为日常维护的工具, 检查水下管路损坏或堵塞, 检查海底石油钻机等。

螺旋桨作为水下航行器的重要推进部件, 相对于依靠自身摆动的尾鳍式机器人, 螺旋桨结构的蛇形机器人具有更高的游动效率、更便于控制且可悬停于水下作业。受制于螺旋桨结构的局限性, 机器人很难在水草茂盛, 杂质较多的水域运动。

### 2.1.5 其他结构

被动轮结构、主动轮结构、履带结构和螺旋桨结构都是在机器人身上安装额外的推进或非推进装置, 即轮子、履带和螺旋桨, 其他结构主要指依靠机器人自身与外界环境的交互产生推进作用, 比如与地面的摩擦或水下的摆动, 与生物蛇的运动原理一致, 因此, 此类结构的蛇形机器人最具仿生意义。

挪威科技大学 LILJEBACK 等基于移动消防概念开发了 Anna Konda 蛇形机器人<sup>[69]</sup>, 如图 10a 所示, 它可以爬进燃烧的建筑物并自行灭火。该机器人的设计方法是在消防软管上安装液压驱动器, 使其能够像生物蛇一样移动, 机器人移动所需的能量以加压水的形式存在于消防软管中, 因此, 水实际上有三种功能: 灭火(用水灭火); 冷却(用水冷却机器人); 液压驱动(用加压水移动机器人的关节), 该机器人是目前唯一的纯水液压蛇形机器人。

HIROSE 等提出的 Slim Slime Robot 系列蛇形机器人<sup>[70-72]</sup>, 如图 10b 所示, 该机器人由串联模块组成, 气动执行器驱动, 能做空间三维运动。三个柔性气动波纹管和一个主管组成了机器人每个模块的执行系统, 压缩空气从主管通过内置在波纹管的进口阀, 使波纹管伸缩或锁定长度, 因此, 模块可以向任何方向弯曲。

DEVARAKONDA 等研制名为 Neelbot-1.1 的水下蛇形机器人<sup>[73]</sup>, 如图 10c 所示, 该机器人是一个 20 节段的机器人, 由 19 个伺服驱动器驱动, 长度为 1.35 m, 直径为 55 mm, 外层裹有乳胶防水皮。研究人员分析了控制机器人运动深度的三种不同方法: 平面外推力、头部使用箔片和头部/尾部的浮力控制, 并最终确定头部或尾部的浮力调解是控制深度的最佳方法。



图 10 其他结构类型的蛇形机器人

卡内基梅隆大学仿生实验室 CHOSSET 等研制的 Modsnake 系列蛇形机器人<sup>[7, 74-75]</sup>, 见图 11a, 该

系列机器人致力于开发多样新颖的运动步态, 实验表明已经能够模仿多种生物步态, 如: 尺蠖式运动、侧向波动、螺旋爬升、翻滚、游泳、沿管内壁支撑爬升、爬树、转弯等。该系列最新款的机器人名为 Gerasefire, 如图 11b 所示, 研究人员提出“超级伺服”的控制方法, 即在机器人模块内安装监测多组电流和温度的传感器, 通信总线和可编程微控制器等组件的在机器人的关节进行循环输入。

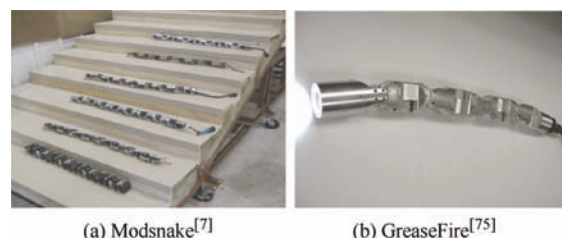


图 11 Modsnake 系列蛇形机器人

此外, 其他结构的蛇形机器人还包括一些特殊形式, 如滑翔式水下蛇形机器人<sup>[76-77]</sup>, 全软体的爬行机器人<sup>[49, 78-79]</sup>, 微型蛇形机器人<sup>[80]</sup>等。

## 2.2 驱动方式

蛇形机器人具有灵活运动能力, 其运动能力在很大程度上依赖于驱动器的类型, 而蛇形机器人驱动方式取决于许多因素, 如运动表面的粗糙度、通过的区域最小尺寸, 以及其他一些因素, 如防水、防尘、高温条件等。在本节中, 重点讲述目前蛇形机器人常用的驱动方式并总结对应驱动的优缺点。

### 2.2.1 直流电机驱动

目前, 大多数蛇形机器人中主要的驱动器是直流电机, 连接齿轮系或机械连杆, 即可驱动关节带动机器人模块弯曲或旋转。蛇形机器人的设计准则是通过控制多个关节旋转来模拟生物蛇的蜿蜒运动, 直流电机是比较简单的驱动方式, 在蛇形机器人的模块设计中得到了广泛的应用。蛇形机器人 ACM-III 通过直流电机连接齿轮系, 编码器和电路板, 利用具有高减速比的齿轮传动实现精确的角度控制和扭矩控制<sup>[6]</sup>。如果在单个模块上获得两个或三个自由度, 需要使用更多的电机和更复杂的机械结构, 例如, 蛇形机器人 Snoopy 在一个模块中使用了两个马达<sup>[81]</sup>。此外, 直流伺服电机更高的响应速度、精度和频率, 许多学者使用直流伺服电机驱动, 包括挪威科技大学研制的 Wheeko 机器人<sup>[12]</sup>(模块内部的电机布置见图 11a)和 Mamba 机器人<sup>[65]</sup>(图 11b)、洛桑联邦理工学院的 AmphiBot 系列<sup>[40, 82]</sup>(图 11c)、卡内基梅隆大学的 Modsnake 系列<sup>[7]</sup>(图 11d)、沈自所的 Perambulator 系列<sup>[50, 83]</sup>(图 11e)和东京工业大学



的 ACM-R5 机器人<sup>[35]</sup>(图 11f)等。

对于直流电机驱动的蛇形机器人而言,优点是可实现关节的大弯曲范围,电机的控制相对容易且精度高,结构简单,可得到转角反馈值。因此,无论是陆地环境或水下环境都是目前应用最广泛的驱动方式。电机驱动的缺点是电机的输出力矩有限,传动过程有机械摩擦损耗,由于电机自身的体积难以使机器人微型化。三维运动的蛇形机器人需要多自由度系统,对电机有一定的数量要求,可采用平行放置或垂直放置等方式减小布置空间。

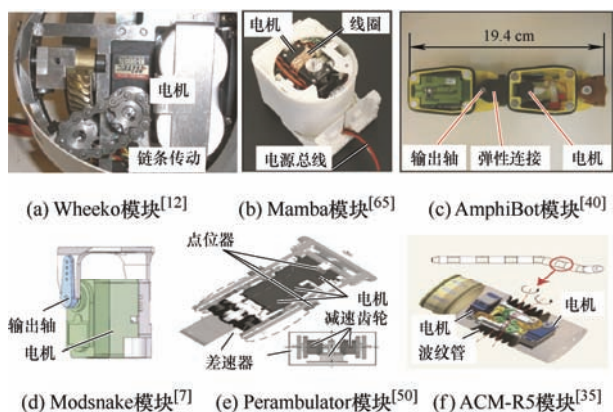


图 12 直流电机驱动模块

## 2.2.2 流体驱动

蛇形机器人中流体驱动的主要类型是气动, OHNO 等人提出由气动执行器、阀、位移传感器和体内微处理器组成的三自由度气动蛇形机器人<sup>[70]</sup>。最近, ZHANG 等提出了一种基于气压驱动模块化蛇形机器人<sup>[84]</sup>,由软体弯曲关节和刚性连接段组成。QI 等提出了一种新型气动软蛇形机器人<sup>[85]</sup>,该机器人可以在复杂和狭窄的环境中蜿蜒前进,此外,前文所提 LUO 等提出的全软体蛇形机器人系列同样采用气压驱动<sup>[49]</sup>,模块见图 13a, 13b, BRANYAN 等提出的类似的软蛇形机器人模块<sup>[86]</sup>见图 13c。HIROSE 等提出的 Slim Slime Robot 机器人<sup>[70]</sup>,为每个模块设计了一个气动鞍状波纹管,以产生更高的扭矩,能够成功地在倾斜管道中进行运动。与气动执行器的结构类似,液压驱动也被用于蛇形机器人的设计,例如, DATE 等提出了一种由液压驱动和控制的蛇形机器人推进方法<sup>[87]</sup>; LILJEBACK 等研制的纯水液压驱动的 Anna Konda 蛇形机器人<sup>[69]</sup>。ZHANG 等研究基于变刚度驱动器的蛇形机器人自适应刚度控制和运动优化,即通过控制驱动器周围的磁流变液来改变其刚度<sup>[88]</sup>。

气动模块的优点是力传比高,输出力与输入流体压力呈线性关系,结构简单且制作成本低。气压驱动的蛇形机器人模块可以更容易地实现三自由度

运动,且体积小于直流电机模块,如 HeartLander 微型内窥镜移动机器人的直径只有 8 mm。然而,气动模块的弯曲范围较小,使机器人的运动范围受到限制。此外,相对直流电机驱动模块,控制精度低,响应时间慢。

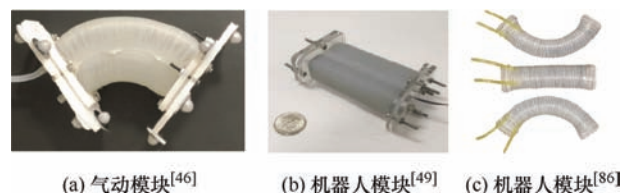


图 13 气压驱动的机器人模块

## 2.2.3 混合驱动

蛇形机器人的混合驱动的主要是直流电机与气动的组合。在每个模块中,直流电机驱动多个执行器以提供向前推进力,气动执行器连接两个模块以控制它们之间的连接刚度和弯曲角度。正如前文所述,机器人 OmniTread-8 和 OmniTread-4 由直流电机驱动的履带模块和气压驱动的弯曲关节模块组成,可更流畅地在碎石、泥土、斜坡和光滑表面等多地形中移动<sup>[89]</sup>。此外,京都大学的 OSUKA 等人开发了移动检查蛇形机器人 MOIRA 和 MOIRA-II,具有与 OmniTread 类似的结构特征<sup>[64]</sup>。对于水下蛇形机器人而言,电机驱动关节配合螺旋桨驱动推进可极大提高机器人的游动效率,如前文所提卡内基梅隆大学的 HUMRS,挪威科技大学的 Mamba,和 EELY500 机器人<sup>[65,67]</sup>,电动关节搭配螺旋桨驱动可控制机器人前进、浮潜或悬停等多种状态。

混合驱动方式有刚度可控和推进效率高等优点。蛇形机器人模块表面与外界环境有较大的接触面积,电动大大增加推进效果,可在多种复杂的地形或水下得到最大的推进力,气动可灵活控制关节弯曲以实现地形自适应。因此,混合驱动的蛇形机器人运动效率高于单一气动或直流电机驱动。缺点是结构复杂,外形笨重,且自由度低。

## 2.2.4 其他驱动

除了以上三种常用的驱动方式,部分学者研究了基于人工肌肉驱动的蛇形机器人, MA 等提出基于肌腱驱动的 Arm-I 蛇形机械臂<sup>[90]</sup>, SIMAAN 等提出肌腱驱动的用于微创手术的蛇形机器人<sup>[91]</sup>; AHMED 等提出了一种由电话性聚合物的智能材料驱动的柔性蛇形机器人<sup>[92]</sup>,通电控制机器人的运动; RACIOPPO 等提出了一种由模块化耦合机构组成的绳索驱动蛇形机器人<sup>[93]</sup>; STEFANINI 等提出的鳗鱼状水下机器人<sup>[94]</sup>,具有蛇类的蜿蜒运动能力,驱动系统是基于磁铁相互作用的新型肌肉。



### 3 蛇形机器人建模与控制

#### 3.1 建模方法

建立准确的运动学模型对于机器人的设计和运动控制都是十分重要的, 蛇形机器人的运动形式大多是仿生蛇类的步态, 对蛇形机器人的运动学和动力学建模, 首先应研究蛇类的运动学规律, 具体见 1.2 运动步态。然而, 目前对蛇形机器人的建模和控制没有形成标准的分类, 本节主要介绍对蛇形机器人的运动学和动力学建模的常用方法。

对于运动学而言, MA 等根据蛇形机器人的关节角度和模块长度<sup>[21]</sup>, 可解决平面二维运动学问题, 但是对于空间三维运动的建模很难实现, 相比之下, D-H 法基于递归思想系统地描述机器人运动学<sup>[95]</sup>, 可更好地解决蛇形机器人三维运动问题。对于更复杂的运动学建模, CHIRIKJIAN 等提出的骨干曲线法重点描述蛇形机器人整体的螺旋侧移运动<sup>[96]</sup>。NANSI 等阐明了蛇形机器人模型的奇异性分析<sup>[97]</sup>, 该模型将所有设计参数定义为任意变量, 如模块长度和被动轮的位置。TANAKA 等人得出了蛇形机器人奇异构型的必要和充分条件<sup>[98]</sup>, 并提出了机器人的形态控制方法, 该方法可以保持头部位置和方向, 避免关节限制和自我碰撞。LIPTAK 等基于纤维束理论建立了一个具有起伏运动的非整体运动系统模型<sup>[99]</sup>。

在刚体动力学中, 拉格朗日法和牛顿欧拉法是常用的建模方法, 对于蛇形机器人而言也不例外。牛顿欧拉法被认为是研究机器人的运动与输入扭矩的关系, 而拉格朗日法适合描述机器人随时间变化的广义位置。在两种方法中, 蛇形机器人始终被视为一个整体, 并使用包含系统能量的拉格朗日函数进行建模, 因此, PRAUTSCH 等根据拉格朗日方程建立了轮式蛇形机器人的通用动力学模型<sup>[100]</sup>。MA 等采用牛顿欧拉方程建立了具有各向异性摩擦特性的蛇形机器人二维动力学模型<sup>[101]</sup>, 摩擦模型包括静态库仑摩擦力和动态库仑摩擦力。SATO 等开发基于牛顿欧拉动力学模型的蛇形机器人速度和航向控制算法<sup>[102]</sup>, 该算法是根据各模块的线性和非线性运动来独立计算, 各模块之间通过构成双边约束力的关节来连接。TRANSETH 等提出基于牛顿欧拉法与集值力法相结合的非光滑二维动力学模型<sup>[103]</sup>。此外, PETTERSEN 等提出了一个二维

平面上的水下蛇形机器人的动力学模型, 其中包括附加效应器(螺旋桨)作用于每个模块的额外推进力<sup>[104]</sup>。在三维动力学建模方面, TANAKA 等提出了一个蛇形机器人的三维动力学模型<sup>[105]</sup>, 该模型描述了机器人接地的轮式身体部分和抬起的头部模块。DATE 等将蛇形机器人假设为能够在任意点产生弯矩的零厚度连续体<sup>[106]</sup>, 在简化的接触条件下, 可极大提高求解效率, 该方法适用于由较少数量模块组成的铰接机器人。

在路径规划研究方面, ITANI 等解决了平面蛇形机器人的非完整约束运动规划问题<sup>[107]</sup>。LI 等提出了一种基于浸入边界法(IB-LBM)的多蛇形机器人在流体环境下的协同避障算法, 该算法可以使多个蛇形机器人在改进的 Serpenoid 曲线函数的控制下避开流体中的不同障碍物<sup>[108]</sup>。最近, JIANG 等首次在蛇形机器人上应用神经形态视觉传感器和脉冲神经网络, 实现管道内的目标跟踪, 且机器人具有一定的自主运动能力<sup>[109]</sup>。

以上文献表明, 现有的大多数蛇形机器人模型考虑了平面运动, 这些模型的主要区别在于机器人特性假设, 如: 纯平面运动与完全三维运动、具有非完整约束链接与具有各向异性摩擦特性链接、离散链接等。然而, 蛇形机器人在非平面环境中的运动模型非常有限, 在更贴近实际环境中的模型更是寥寥无几。因此, 未来需要对杂乱环境中蛇形机器人运动学和动力学模型进行更多深入研究。

#### 3.2 控制策略

蛇形机器人最具有研究价值之处在于受限环境中的地形适应性运动, 机器人柔软细长的身体可以完美地接触地形轮廓, 根据接触点位置获得支撑力。因此, 许多学者开发自适应控制算法应用于蛇形机器人, 自适应控制是实现关节角度跟踪和控制方向的一种控制方法。MUKHERJEE 等提出了一种基于滑模控制的方法来解决平面蛇形机器人的速度跟踪和头部角度控制的问题<sup>[110]</sup>。MOHAMMADI 等研究了一种平面蛇形机器人的控制方法<sup>[111]</sup>, 使蛇形机器人的质心收敛于期望的路径, 并以期望的速度穿过该路径。此外, 随着蛇形机器人研究的逐步深入, 研究人员提出了多种分散控制方法来实现蛇形机器人的自主控制<sup>[112]</sup>, 分别提出了蛇形机器人各种地形轮廓自适应控制方法的局部自适应机制, 这对于研究蛇形机器人在约束环境下的高适应性具有重要意义。为了产生自适应运动, 部分学者使用遗传算法

或强化学习<sup>[113-114]</sup>, 可以帮助机器人收集感官信息, 分析机器人的内部状态和周围的激励, 并学习适当的反应, 学习过程结束后, 机器人会根据环境自动调整自己的运动方式或步态, 处于自动控制状态。

LILJEBACK 等研究了地面的粘性摩擦对蛇形机器人可控性的影响<sup>[115]</sup>, 当黏性摩擦力均匀时, 蛇形机器人的受控能力有限, 而当黏性摩擦力各向异性时, 蛇形机器人的受控能力很好。SATO 等提出了一种能够适应斜坡倾角变化的 CPG 模型<sup>[116]</sup>, 可使蛇形机器人在各种摩擦和斜坡地形上具有良好的实时适应性。

当蛇形机器人面对无法绕过只能攀爬的障碍时, 需要新的控制算法, NILSSON 等将攀爬分为自由攀爬和辅助攀爬两类<sup>[117]</sup>, 自由攀爬是指机器人从水平位置爬升到垂直位置的过程, 除了自己的关节, 不使用任何支撑或其他工具, 辅助攀爬指蛇形机器人的前端模块抬起, 允许在障碍物上取得依靠攀爬。BROWN 等开发了一种名为 Millibot Train 的蛇形机器人<sup>[118]</sup>, 它可以爬上接近机器人长度一半的垂直台阶, 且可以通过自适应运动从一个位置远距离地移动到另一个位置。FU 等开发了一种蛇形机器人, 能够快速稳定地爬上其体长三分之一的台阶<sup>[119]</sup>。为了爬上圆柱体, 蛇形机器人须紧紧地盘绕在圆柱体上, 以获得足够的摩擦力, 并采用侧向滚动步态来向上移动。KAMEGAWA 等研究了机器人的螺旋角与摩擦力成正比的关系<sup>[120]</sup>。最近, WANG 等分析了蛇形机器人在攀爬过程中的平衡原理<sup>[121]</sup>, 提出了一种基于 Serpentine 曲线的蛇形机器人转弯策略。对于水下蛇形机器人的控制而言, MCISAAC 等基于鳗鱼/海蛇运动提出了直线和曲线轨迹的控制方法<sup>[122]</sup>。KELASIDI 等设计了一种用于水下蛇形机器人直线路径控制的路径跟踪控制器<sup>[66]</sup>。

作者认为蛇形机器人未来的控制设计应该基于可分析的数学模型和完备的控制技术, 以上文献表明, 仿真分析和简单实验是目前控制策略研究的常用方法, 然而, 基于模型的控制器设计是一个重大挑战。而且, 由于蛇形机器人的多自由度会导致动力学模型非常复杂, 如果考虑来自非结构化环境的接触力, 模型变得更加复杂。

目前的运动学、动力学建模都只适用于理想的情况, 模型的精确度与复杂度还无法令人满意, 控制效果远达不到预期目标。因此, 研究一种有效、

精确的建模和控制方法是目前蛇形机器人亟待突破的一个重要方向。

## 4 关键问题与发展趋势

综上, 国内外的典型蛇形机器人的总结见表 1, 主要包括研究单位、驱动、结构、运动模式等方面。蛇形机器人的研究整体而言仍处于起步阶段, 许多问题还未被解决, 或需要进一步探讨和研究, 包括材料选择、结构设计、传感技术和建模控制等。蛇形机器人研究的关键问题与发展趋势主要体现如下。

(1) 材料选择: 除常规金属材料外, 研究人员提出的新材料主要有: 可变刚度智能材料<sup>[123]</sup>、橡胶弹簧阻尼材料<sup>[124]</sup>以及刚性材料与软材料复合<sup>[85, 125]</sup>。目前阶段, 各种新材料的开发, 也为蛇形机器人的驱动装置提供了更多选择, 这些驱动装置具有传统电机驱动所没有的优点, 例如, 超弹体人工肌肉具有响应快、运行安静、无需防水、可同时用作传感器、易于小型化等优点<sup>[126-127]</sup>; 形状记忆合金具有温度敏感性、高频响应连续、集成度高等特点<sup>[128]</sup>。但是, 由于这些新材料的特性, 使蛇形机器人的模型建立和运动控制增加了一定的复杂性。所以, 对于新型材料的开发探索是推动蛇形机器人进步的关键技术之一。

(2) 结构设计: 为了增加运动的可靠性, 降低机器人的开发成本, 简单的机械结构是蛇形机器人研究的必要条件<sup>[129-130]</sup>, 而整体质量是结构设计的前提, 为了使蛇形机器人能够在复杂非结构化的环境中运动, 设计一个轻型、鲁棒性的运动机构尤为重要, 这意味着强度与质量的比值有一个下限, 作者认为研究这一比例最大化的蛇形机器人是一个必须解决的重要设计挑战。此外, 为了实现机器人在凹凸地面或水下暗流涌动的环境中运动的稳定性, 需要特殊的柔性关节来连接各模块, 柔性关节和组合关节的设计也是蛇形机器人结构设计的重要内容。蛇形机器人的防尘和防水技术也是需要解决的重要的设计内容<sup>[131]</sup>。可重构结构具有通用性强、性价比高、自恢复能力强等特点, 可重构蛇形机器人不仅可以产生多种步态, 还可以借助多个传感器以复杂的方式对环境刺激做出反应且能够调整不同的运动模式以适应不同的地形<sup>[132]</sup>, 然而现阶段可重构的蛇形机器人极少。



表 1 国内外典型蛇形机器人性能对比表

机器人名称	研究单位	结构形式	驱动方式	运动模式	文献序号
ACM-III	东京工业大学	被动轮	直流电机	平面运动, 蜿蜒爬行	[6]
ACM-R3	东京工业大学	被动轮	直流电机	空间运动, 蜿蜒爬行、侧向翻滚、侧向波动	[34]
ACM-R4	东京工业大学	主动轮	直流电机	空间运动, 蜿蜒爬行、直角转弯、垂直爬行	[53]
ACM-R5	东京工业大学	被动轮	直流电机, 正齿轮箱	空间运动, 蜿蜒爬行、蜿蜒游动	[35]
Wheeko	挪威科技大学	被动轮, 球形模块	直流电机, 蜗轮	平面运动, 蜿蜒爬行、侧向翻滚、侧向波动、可抬头	[38]
Kulko	挪威科技大学	其他结构, 球形模块	直流电机, 蜗轮	平面运动, 蜿蜒爬行、侧向翻滚、侧向波动、接触避障	[39]
AmphiBot I/II	瑞士洛桑联邦理工学院	被动轮	直流电机	平面运动, 蜿蜒爬行、旋转、直线爬行、蜿蜒游动	[40, 41]
AmphiBot III/IV	瑞士洛桑联邦理工学院	其他结构, 尾鳍	直流电机	平面运动, 蜿蜒爬行、旋转、直线爬行、蜿蜒游动	[42, 43]
GMD-Snake2	德国国家信息技术研究中心	主动轮	直流电机	平面运动, 直线运动、侧向波动、可抬头	[54]
Ming Luo's Snake	美国伍斯特理工学院	被动轮	气压驱动, 电磁阀	平面运动, 蜿蜒爬行、直线运动	[45-47]
OmniTread-8/4	美国密歇根大学	履带式, 气动关节	直流电机, 气压驱动	空间运动, 直线运动、穿洞、跨越缝隙, 垂直爬行	[57, 59]
Proboscis robot	苏黎世联邦理工学院	履带式, 气动弯曲模块	直流电机, 气压驱动	空间运动, 直线运动、穿洞、跨越缝隙, 垂直爬行	[61]
JL-I	德国汉堡大学	履带式	直流电机	空间运动, 直线运动、穿洞、跨越缝隙	[60]
Mamba	挪威科技大学	其他结构	直流电机	空间运动, 蜿蜒爬行、蜿蜒游动	[65]
Eelume	挪威科技大学	螺旋桨式	直流电机、螺旋桨驱动	空间运动, 直线游动、蜿蜒游动、水中悬停、一端固定、穿越管道和狭窄地形	[67]
EEELY500	挪威科技大学	螺旋桨式	直流电机、螺旋桨驱动	空间运动, 直线游动、蜿蜒游动、水中悬停, 一端固定、穿越管道和狭窄地形	[68]
HUMRS	美国卡内基梅隆大学	螺旋桨式	直流电机、螺旋桨驱动	空间运动, 直线游动, 蜿蜒游动, 灵活避障	—
Anna Konda	挪威科技工业研究院	其他结构	水压驱动	平面运动, 蜿蜒爬行、可抬头、喷水灭火	[69, 133]
Slim Slime Robot	东京工业大学	其他结构	气压驱动	平面运动, 蜿蜒爬行、直线爬行、尺蠖运动、侧向翻滚	[70, 72]
Modsnake	美国卡内基梅隆大学	其他结构	直流电机	空间运动, 尺蠖式运动、侧向波动、螺旋爬升、翻滚、游泳、转弯	[7, 8]
MOIRA I/II	日本京都大学	履带式, 气动弯曲模块	直流电机, 气压驱动	空间运动, 直线运动、穿洞、跨越缝隙, 垂直爬行	[64, 134]
Snoopy	美国卡内基梅隆大学	其他结构	直流电机, 锥齿轮、蜗轮	固定在移动平台, 空间运动	[81]
Perambulator-II/III	中科院沈阳自动化研究所	被动轮	直流电机, 锥齿轮	空间运动, 蜿蜒爬行, 蜿蜒游动, 侧向翻滚	[50]
滑翔蛇形机器人	中科院沈阳自动化研究所	平面翼、尾翼	直流电机, 锥齿轮	空间运动, 水下滑翔、转弯	[76]

(3) 传感技术：在移动机器人的研究领域，局部路径规划有重要意义，要求环境感知能力非常重要，这表明机器人应该实现与环境的交互，增强环境的适应性<sup>[135]</sup>。蛇形机器人在未来的应用一定是未

知和非结构化的环境中，因此，感知环境并相应地调整身体以适应环境的能力至关重要。然而，基于环境感知和体态适应的相关研究作者目前尚未查到。对于高自由度的蛇形机器人而言，柔性电子元

器件及传感器设备的开发显得十分重要,目前市面上电子元器件及传感器设备大部分属于刚性体,无法很好地跟随蛇形机器人灵活的身体进行变形并有效地检测出机器人的精确变形和受力<sup>[136]</sup>。柔性传感技术目前仍然处于起步阶段,开发高性能、精度高、稳定性好的柔性传感器是一个重要的研究方向,同时也是促进蛇形机器人进步的关键技术之一。

(4) 建模控制: 现有的蛇形机器人模型大部分是研究陆地平面运动或局部三维运动,在实际应用的环境中,目前的研究成果是非常有限的。蛇形机器人有多个自由度,可利用身体的灵活性实现多样化运动步态,并能根据环境状况及时调整步态,然而,由于其动力学复杂,包括欠驱动特性、高度非线性和环境不确定性等,导致蛇形机器人很难获得高效的运动能力和环境适应性。在未来的应用中,需要对未知和复杂环境下的自适应控制进行更多的研究,而提高蛇形机器人的环境适应性,需要解决步态生成、步态特征分析和步态应用等关键问题。目前关于水下蛇形机器人的建模控制研究尚不完善,作者基于辽宁省救助与打捞重点实验室平台,将着力解决水下蛇形机器人的三维空间运动建模及基于模型的动力学控制问题,进而研究面向水下狭窄空间的人机协同作业等一系列问题。

综上,蛇形机器人的关键问题主要包括材料升级、结构优化、柔性传感技术和自适应控制等;其未来可能的发展方向包括新型材料制备成型、高效结构设计加工、灵敏柔性传感技术、新型适合大变形的建模方法、自适应控制系统研发等。

## 5 结论

蛇形机器人是移动机器人领域的一个重要分支,拓展了传统机器人的研究方向和应用领域,其研究涉及材料学、仿生、机械设计和制造、传感器技术等多学科交叉融合。目前关于蛇形机器人的研究主要集中在近几年,尚处于起步阶段,并引起国内外诸多学者及研究机构的广泛关注,其主要驱动方式包括直流电机、流体驱动、混合驱动以及其他驱动方式,如线驱动、人工肌肉驱动、形状记忆合金驱动等;主要结构包括被动轮、主动轮、履带结构、螺旋桨结构以及无额外推进装置的其他结构;从建模和控制上看,主要集中于平面运动学建模,完全的三维模型仍然较少,其模型始终不够精确,自适应控制能力仍不成熟等。蛇形机器人目前发展中的关键性问题和主要技术集中在材料升级、结构

优化、柔性传感技术和自适应控制等方面。此外,新型材料制备成型、高效结构设计加工、灵敏柔性传感技术、新型适合大变形的建模方法、自适应控制系统研发是其未来可能的发展方向。

蛇形机器人在消防灭火、灾后救援、海底环境与管道探测、复杂环境作业、医疗护理、军事侦查等领域具有广阔应用前景,其发展为移动机器人应用、仿生研究等提供参考和技术支持。蛇形机器人的研究才刚刚起步,其未知领域充满可能性和挑战,这正是其魅力所在。

## 参 考 文 献

- [1] LIU J, TONG Y, LIU J. Review of snake robots in constrained environments[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 141: 103785.
- [2] ABDULSHAHEED A G. A review on snake robot locomotion, modelling, and controlling in challenging environment[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2020, 17(2-3): 558-569.
- [3] HIROSE S, YAMADA H. Snake-like robots [Tutorial] [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, 16(1): 88-98.
- [4] HIROSE S. Machine design of mobile snake-like robots[J]. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2010, 28(2): 151-155.
- [5] HIROSE S. Super mechano-system: New perspective for versatile robotic system[C]// *Experimental Robotics VII. Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001: 249-258.
- [6] HIROSE S. Biologically inspired robots: SnakeLike locomotors and manipulators[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [7] WRIGHT C, JOHNSON A, PECK A, et al. Design of a modular snake robot[C]// 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA: IEEE, 2007: 2609-2614.
- [8] WRIGHT C, BUCHAN A, BROWN B, et al. Design and architecture of the unified modular snake robot[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 2012: 4347-4354.
- [9] WALKER I D, CHOSSET H, CHIRIKJIAN G S. Snake-like and continuum robots[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [10] LILJEBCK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL, et al. A review on modelling, implementation, and control of



- snake robots[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2012, 60(1): 29-40.
- [11] KELASIDI E, LILJEBCK P, PETTERSEN K Y, et al. Innovation in underwater robots: Biologically inspired swimming snake robots[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(1): 44-62.
- [12] LILJEBACK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL O, et al. A hybrid model of obstacle-aided snake robot locomotion[C]// 2010 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Anchorage, USA: IEEE, 2010: 675-682.
- [13] SANDERS K L. Independent innovation in the evolution of paddle-shaped tails in viviparous sea snakes (Elapidae: hydrophiinae)[J]. *Integrative & Comparative Biology*, 2012, 52(2): 311.
- [14] ARAI M, TANAKA Y, HIROSE S, et al. Development of "Souryu-IV" and "Souryu-V": "Serially connected crawler vehicles for in-rubble searching operations: Research articles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 25(1-2): 31-65.
- [15] ASTLEY H C. The biomechanics of multi-articular muscle-tendon systems in snakes[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2020, 60(1): 140-155.
- [16] HU D L, NIRODY J, SCOTT T, et al. From the cover: The mechanics of slithering locomotion[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(25): 10081-10085.
- [17] KANO T, SATO T, KOBAYASHI R, et al. Efficient undulating locomotion driven by a decentralized control that fully exploits multi-articular muscles[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, AMAM. 2011: 69-70.
- [18] INOUE K, NAKAMURA K, SUZUKI M, et al. Biological system models reproducing snakes' musculoskeletal system[C]// 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2010: 2383-2388.
- [19] GRAY J. The mechanism of locomotion in snakes[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1946, 23(2): 101-120.
- [20] MARTINEZ S, CORTES J, BULLO F. Motion planning and control problems for underactuated robots[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [21] MA S. Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robots[C]// 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, USA: IEEE, 1999: 3007-3013.
- [22] JAYNE B C. Muscular mechanisms of snake locomotion: An electromyographic study of lateral undulation of the Florida banded water snake (*Nerodia fasciata*) and the yellow rat snake (*Elaphe obsoleta*)[J]. *Journal of Morphology*, 1988, 197(2): 159-81.
- [23] JAYNE B C. Muscular mechanisms of snake locomotion: An electromyographic study of the sidewinding and concertina modes of *Crotalus cerastes*, *Nerodia fasciata* and *Elaphe obsoleta*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1988, 140: 1-33.
- [24] MOON B R, GANS C. Kinematics, muscular activity and propulsion in gopher snakes[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(Pt 19)(19): 2669-2684.
- [25] MARVI H, BRIDGES J, HU D L. Snakes mimic earthworms: Propulsion using rectilinear travelling waves[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, 10(84): 20130188.
- [26] MARVI H, GONG C, GRAVISH N, et al. Sidewinding with minimal slip: Snake and robot ascent of sandy slopes[J]. *Science*, 2014, 346: 224-229.
- [27] GONG, CHAOHUI, TRAVERS, et al. Kinematic gait synthesis for snake robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35, 100-113.
- [28] LILJEBÄCK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL Ø, et al. Snake robots: Modelling, mechatronics, and control[M]. London: Springer, 2013.
- [29] BRANYAN C, HATTON R L, MENGUC Y. Snake-inspired kirigami skin for lateral undulation of a soft snake robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2), 1728-1733.
- [30] HU D L, NIRODY J, SCOTT T, et al. The mechanics of slithering locomotion[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(25): 10081-10085.
- [31] CHANGO A H, VELA P A. Evaluation of bio-inspired scales on locomotion performance of snake-like robots[J]. *Robotica*, 2019, 37(8): 1-18.
- [32] MARVI H, HU D L. Friction enhancement in concertina locomotion of snakes[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2012, 9(76): 3067-3080.
- [33] KELASIDI E, PETTERSEN K Y, KOHL A M, et al. An experimental investigation of path following for an underwater snake robot with a caudal fin[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 11182-11190.
- [34] MORI M, HIROSE S. Three-dimensional serpentine

- motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002: 829-834.
- [35] YAMADA H, CHIGISAKI S, MORI M, et al. Development of amphibious snake-like robot ACM-R5[C]// Proceedings of 36th International Symposium On Robotics, Tokyo, Japan, 2005: 433-440.
- [36] OHASHI T, YAMADA H, HIROSE S. Loop forming snake-like robot ACM-R7 and its Serpentine Oval control[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2010: 413-418.
- [37] YAMADA, HIROYA, KOMURA, et al. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel[J]. *Advanced Robotics the International Journal of the Robotics Society of Japan*, 2015, 29(17): 1081-1094.
- [38] LILJEBCK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL Y, et al. Development of a mechanical snake robot for motion across planar surfaces[M]. Springer London, 2013.
- [39] LILJEBÄCK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL Ø, et al. Development of a mechanical snake robot for obstacle-aided locomotion[M]. Springer London 2013.
- [40] CRESPI A, BADERTSCHER A, GUIGNARD A, et al. *AmphiBot I: An amphibious snake-like robot*[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 50(4): 163-175.
- [41] CRESPI A, IJSPEERT A, POLYTECHNIQUE F E. *AmphiBot II: An amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator*[J]. *Color Research & Application*, 2006, 27(2): 130-135.
- [42] CRESPI A, BADERTSCHER A, GUIGNARD A, et al. Swimming and crawling with an amphibious snake robot[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 3024-3028.
- [43] POREZ M, BOYER F, IJSPEERT A J. Improved Lighthill fish swimming model for bio-inspired robots - Modelling, computational aspects and experimental comparisons[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(10): 1322-1341.
- [44] AVENASH R, SANGHOI K, SAI YOSHITHA G, et al. Multimodal smart amphibot for environment monitoring[C]// 2016 IEEE Annual India Conference (INDICON). Bangalore, India: IEEE, 2016: 1-6.
- [45] LUO M, PAN Y, SKORINA E H, et al. Slithering towards autonomy: A self-contained soft robotic snake platform with integrated curvature sensing[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(5): 055001.
- [46] MING L, AGHELI M, ONAL C D. Theoretical modeling and experimental analysis of a pressure-operated soft robotic snake[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(2): 136-146.
- [47] MING L, PAN Y, TAO W, et al. DETC2015/47515 refined theoretical modeling of a new-generation pressure-operated soft snake[C]// Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Boston, USA: ASME, 2015: V05CT08A023.
- [48] QIN Y, WAN Z, SUN Y, et al. Design, fabrication and experimental analysis of a 3-D soft robotic snake[C]// 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Livorno, Italy: IEEE, 2018: 77-82.
- [49] YAN R, LUO M, WAN Z, et al. OriSnake: Design, fabrication and experimental analysis of a 3-D origami snake robot[J]. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2018, 3(3): 1993-1999.
- [50] ZHANG Y, SHEN M, BAI L, et al. Development of a 3D snake-like robot: Perambulator-II[C]// Proceedings of the 2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2007: 117-122.
- [51] XIANG H, CHEN C, YE C. Analysis of articulated mobile robots for the urban search and rescue[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 303(306): 1641-1646.
- [52] ITO S, NIWA K, SUGIURA S, et al. An autonomous mobile robot with passive wheels propelled by a single motor[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 122: 103310.
- [53] YAMADA H, HIROSE S. Development of practical 3-dimensional active cord mechanism ACM-R4[J]. *Journal of Robotics & Mechatronics*, 2006, 18(3): 305-311.
- [54] KLAASSEN B, PAAP K L. GMD-SNAKE2: A snake-like robot driven by wheels and a method for motion control[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. Detroit, Michigan: IEEE, 1999: 3014-3019.
- [55] FUKUSHIMA E F, HIROSE S. An efficient steering control formulation for the articulated body mobile robot "KR-II"[J]. *Autonomous Robots*, 1996, 3(1): 7-18.
- [56] KYRIAKOPOULOS K J, MIGADIS G, SARRIGEORGIDIS K. The NTUA snake: Design, planar kinematics, and motion planning[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1999, 16(1): 37-72.
- [57] BORENSTEIN J, HANSEN M, BORRELL A. The



- OmniTread OT-4 serpentine robot 1 – design and performance[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(7), 601-621.
- [58] BORENSTEIN J, BORRELL A. The OmniTread OT-4 serpentine robot[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, USA: IEEE, 2008: 1766-1767.
- [59] BORENSTEIN J, HANSEN M, BORRELL A. The OmniTread OT-4 serpentine robot[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 24(7): 60- 621.
- [60] ZHANG H, WANG W, DENG Z, et al. A novel reconfigurable robot for urban search and rescue[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2008, 3(4): 359-366.
- [61] HADZIC A, ADZIC A, BRAUN B, et al. Proboscis search & rescue. Worm-like softrobot for search and rescue missions. focusproject, final report[Z]. ETH Zurich, 2018.
- [62] 谢同雨, 李清, 丁煜文, 等. 多模块蛇形管道打磨机器人的设计与分析[J]. *机器人*, 2020, 42(6): 14.  
XIE Tongyu, LI Qing, DING Yuwen, et al. Design and analysis of a multi-module snake shaped pipeline grinding robot[J]. *ROBOT*, 2020, 42(6): 14.
- [63] OSUKA K, KITAJIMA H. Development of mobile inspection robot for rescue activities : Moira[C]// *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, USA: IEEE, 2003: 3373-3377.
- [64] HARAGUCHI R, OSUKA K, MAKITA S, et al. The development of the mobile inspection robot for rescue activity , MOIRA2[C]// *International Conference on Advanced Robotics*, Seattle, USA: IEEE, 2005: 498-505.
- [65] LILJEBÄCK P, STAVDAHL Ø, PETTERSEN K Y, et al, Mamba - A waterproof snake robot with tactile sensing[C]// *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, USA: IEEE, 2014: 294-301.
- [66] KELASIDI E, LILJEBACK P, PETTERSEN K Y, et al. Innovation in underwater robots: Biologically inspired swimming snake robots[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(1): 44-62.
- [67] LILJEBÄCK P, MILLS R. Eelume: A flexible and subsea resident IMR vehicle[C]// *OCEANS 2017*, Aberdeen, UK: IEEE, 2017: 1-4.
- [68] KANG S, YU J, ZHANG J, et al. Development of multibody marine robots: A review[J]. *Ieee Access*, 2020, 8: 21178-21195.
- [69] LILJEBACK P, STAVDAHL O, BEITNES A. SnakeFighter - development of a water hydraulic fire fighting snake robot[C]// *2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore: IEEE, 2006: 1-6.
- [70] OHNO H, HIROSE S. Study on slime robot (proposal of slime robot and design of slim slime robot)[C]// *2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*, Takamatsu, Japan: IEEE 2000: 2218-2223.
- [71] OHNO H, HIROSE S. Design of slim slime robot and its gait of locomotion[C]// *2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Maui, USA: IEEE, 2001: 707-715.
- [72] OHNO H, HIROSE S. Pneumatically-driven active cord mechanism “slim slime robot”[J]. *Journal of robotics and mechatronics*, 2014, 26(1 TN.149): 105-106.
- [73] DEVARAKONDA N S. Hydrodynamics of an anguilliform swimming motion using morison’s equation[D]. Louisiana: University of New Orleans Press, 2018.
- [74] ENNER F, ROLLINSON D, CHOSET H. Simplified motion modeling for snake robots[C]// *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, USA: IEEE, 2012: 4216-4221.
- [75] FERWORN A, WRIGHT C, TRAN J, et al. Choset, dog and snake marsupial cooperation for urban search and rescue deployment[C]// *2012 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, College Station, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [76] 张晓路, 李斌, 常健, 等. 水下滑翔蛇形机器人滑翔控制的强化学习方法[J]. *机器人*, 2019, 41(3): 334-342.  
ZHANG Xiaolu, LI Bin, CHANG Jian, et al. A reinforcement learning method for gliding control of underwater gliding snake-like robot[J]. *Robot*, 2019, 41(3): 334-342.
- [77] 陈恩志, 常健, 李斌, 等. 采用干扰观测器的水下滑翔蛇形机器人纵倾运动控制[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(1): 184-192.  
CHEN Enzhi, CHANG Jian, LI Jian, et al. Control for pitch motion of underwater gliding snake-like robot based on disturbance observer[J]. *Journal of Xi’an Jiaotong University*, 2020, 54(1): 184-192.
- [78] 唐术锋, 梁威, 吕德稳, 等. 基于 SMA 驱动的弯曲单元体及蛇形软体机器人: 中国, CN201910760272.4[P]. 2019-12-20.  
TANG Shufeng, LIANG Wei, LU Dewen, et al. Bending

- cell and snake-shaped soft robot based on SMA drive: China, CN201910760272.4[P]. 2019-12-20.
- [79] 向红标, 李岩, 巴简程, 等. 磁控微型软体爬行机器人运动特性[J]. 机械工程学报, 56(17): 39-47.
- XIANG Hongbiao, LI Yan, BA Jiancheng, et al. Motion characteristics of magnetic control micro-soft crawling robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 56(17): 39-47.
- [80] WAKIMOTO S, NAKAJIMA J, TAKATA M, et al. A micro snake-like robot for small pipe inspection[C]// 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 303-308.
- [81] WOLF A. A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA: IEEE, 2003: 2889-2895.
- [82] HOPKINS J K, SPRANKLIN B W, GUPTA S K. A survey of snake-inspired robot designs[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2009, 4(2): 021001.
- [83] SHUMEI YU, SHUGEN MA, BIN LI, et al. An amphibious snake-like robot with terrestrial and aquatic gaits[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China: IEEE, 2011: 2960-2961.
- [84] ZHANG J, CHEN Y, YANG S, et al. Dynamic modeling and analysis of underwater swimming snake robot with soft joint[C]// The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece: ISOPE, 2021: I-21-1152.
- [85] QI X, SHI H, PINTO T, et al. A novel pneumatic soft snake robot using traveling-wave locomotion in constrained environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 1610-1617.
- [86] BRANYAN C. Soft snake robots: Mechanical design and geometric gait implementation[C]// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Macau, Macao: IEEE, 2017: 282-289.
- [87] DATE H, TAKITA Y. Adaptive locomotion of a snake like robot based on curvature derivatives[C]// 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, USA: IEEE, 2007: 3554-3559.
- [88] ZHANG D, YUAN H, CAO Z. Environmental adaptive control of a snake-like robot with variable stiffness actuators[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(3): 745-751.
- [89] BORENSTEIN J, HANSEN M, BORRELL A. The OmniTread OT - 4 serpentine robot—design and performance [J]. Journal of Field Robotics, 2007, 24(7): 601-621.
- [90] MA S, LAN G, TANABE Y, et al. A serpentine robot based on 3 DOF coupled-driven joint[C]// 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China: IEEE, 2004: 70-75.
- [91] HILLEL A T, KAPOOR A, SIMAAN N, et al. Applications of Robotics for Laryngeal Surgery[J]. Otolaryngologic Clinics of North America, 2008, 41(4): 781-791.
- [92] AHMED M, BILLAH M M. Smart material-actuated flexible tendon-based snake robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(3): 1-10.
- [93] RACIOPPO P, BEN-TZVI P. Design and control of a cable-driven articulated modular snake robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 893-901.
- [94] STEFANINI C, OROFINO S, MANFREDI L, et al. A novel autonomous, bioinspired swimming robot developed by neuroscientists and bioengineers[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(2): 025001.
- [95] LILJEBACK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL O, et al. Experimental investigation of obstacle-aided locomotion with a snake robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(4): 792-800.
- [96] CHIRIKJIAN G S, BURDICK J W. A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1994, 10(3): 343-54.
- [97] NANSAI S, IWASE M, ITOH H. Generalized singularity analysis of snake-like robot[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1873.
- [98] TAKEMORI T, TANAKA M, MATSUNO F. Gait design for a snake robot by connecting curve segments and experimental demonstration[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018(5): 1-8.
- [99] LIPTAK T, VIRGALA I, FRANKOVSKY P, et al. A geometric approach to modeling of four- and five-link planar snake-like robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(5): 1-9.
- [100] PRAUTSCH P, MITA T. Control and analysis of the gait of snake robots[C]// IEEE International Conference on Control Applications, Kohala Coast, USA: IEEE, 1999: 502-507.
- [101] MA S, TADOKORO N. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot on a slope[J]. Advanced Robotics,

- 2001, 15(2): 205-224.
- [102] SATO M, FUKAYA M, IWASAKI T. Serpentine locomotion with robotic snakes[J]. IEEE control Systems, 2002, 22(1): 64-81.
- [103] TRANSETH A A, LEINE R I, GLOCKER C, et al. Snake robot obstacle-aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(1): 88-104.
- [104] PETTERSEN K Y. Snake robots[J]. Annual Reviews in Control, 2017, 44: 19-44.
- [105] TANAKA M, TADAKUMA K, NAKAJIMA M, et al. Task-space control of articulated mobile robots with a soft gripper for operations[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 35(1): 1-12.
- [106] DATE H, TAKITA Y. An electricity-free snake-like propulsion mechanism driven and controlled by fluids[C]// 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, USA: IEEE, 2009: 3637-3642.
- [107] ITANI O, SHAMMAS E. Motion planning for redundant multi-bodied planar kinematic snake robots[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 104(4): 1-16.
- [108] DLA B, HD B, ZP B, et al. Collaborative obstacle avoidance algorithm of multiple bionic snake robots in fluid based on IB-LBM[J]. ISA Transactions, 2021.
- [109] JIANG Z, BING Z, HUANG K, et al. Retina-based pipe-like object tracking implemented through spiking neural network on a snake robot[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2019, 13(29): 1-11.
- [110] MUKHERJEE J, ROY S, KAR I N, et al. A double layered artificial delay based approach for maneuvering control of planar snake robot[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2018, 141(4): 1-10.
- [111] MOHAMMADI A, REZAPOUR E, MAGGIORE M, et al. Maneuvering control of planar snake robots using virtual holonomic constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3): 884-899.
- [112] TAKESHI K, AKIO I. Decoding decentralized control mechanism underlying adaptive and versatile locomotion of snakes[J]. Integrative and Comparative Biology, 2020, 60(1): 232-247.
- [113] BING Z, LEMKE C, CHENG L, et al. Energy-efficient and damage-recovery slithering gait design for a snake-like robot based on reinforcement learning and inverse reinforcement learning[J]. Neural Networks, 2020, 129(3): 323-333.
- [114] BING Z, LEMKE C, MORIN F O, et al. Perception-action coupling target tracking control for a snake robot via reinforcement learning[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2020, 14(20): 1-13.
- [115] LILJEBÄCK P, PETTERSEN K Y, STAVDAHL Ø, et al. Controllability analysis of planar snake robots influenced by viscous ground friction[C]// 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, USA: IEEE, 2009: 3615-3622.
- [116] SATO T, KANO T, ISHIGURO A. On the applicability of the decentralized control mechanism extracted from the true slime mold: A robotic case study with a serpentine robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2011, 6(2): 026006.
- [117] NILSSON M. Snake robot-free climbing[J]. IEEE Control Systems, 1998, 18(1): 21-26.
- [118] BROWN H B, WEGHE J, BERERTON C A, et al. Millibot trains for enhanced mobility[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 452-461.
- [119] FU Q, GART S W, MITCHEL T W, et al. Lateral oscillation and body compliance help snakes and snake robots stably traverse large, smooth obstacles[J]. Integrative and Comparative Biology, 2020, 60(1): 171.
- [120] KAMEGAWA T, HARADA T, GOFUKU A. Realization of cylinder climbing locomotion with helical form by a snake robot with passive wheels[C]// 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009: 3067-3072.
- [121] WANG C, PENG Y, LI D, et al. Turning strategy of snake-like robot based on serpenoid curve under cloud assisted smart conditions[J]. Cluster Computing, 2017, 22: 13041-13053.
- [122] MCISAAC K A, OSTROWSKI J P. Motion planning for anguilliform locomotion[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 637-652.
- [123] HYOUNG, RYEO, CHOI, et al. Biomimetic soft actuator: design, modeling, control, and applications[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(5): 581-593.
- [124] LASCHI C, CIANCHETTI M. Soft robotics: New perspectives for robot bodyware and control[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2014, 2(3): 1-5.
- [125] CAO Y, LIU Y, CHEN Y, et al. A novel slithering locomotion mechanism for a snake-like soft robot[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2016, 99:



- 304-320.
- [126] CHEN Y, ZHANG J, GONG Y. Utilizing anisotropic fabrics composites for high-strength soft manipulator integrating soft gripper[J]. IEEE Access, 2019, 7: 127416-127426.
- [127] 王琦珑, 王伟, 郝大贤, 等. 编织型气动人工肌肉迟滞现象建模与应用[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 73-80.
- WANG Qilong, WANG Wei, HAO Daxian, YUN Chao. Hysteresis modeling and application of mckibben pneumatic artificial muscles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 73-80.
- [128] YANG Y, ZHANG M, LI D, et al. Graphene - based light - driven soft robot with snake - inspired concertina and serpentine locomotion[J]. Advanced Materials Technologies, 2018, 1800366: 1-6.
- [129] QIANG R, WU J, YAO Y A. Design and analysis of a multi-legged robot with pitch adjustive units[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(3): 239-255.
- [130] AN W, WEI J, LU X, et al. Geometric design-based dimensional synthesis of a novel metamorphic multi-fingered hand with maximal workspace[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(3): 224-238.
- [131] 高琴, 王哲龙, 胡卫建, 等. 一种蛇形机器人蜿蜒运动的实现及环境适应性研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(2): 203-208.
- GAO Qin, WANG Zhelong, HU Weijian, et al. Research on the realization and environmental adaptability of a snake-like robot winding motion[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(2): 203-208.
- [132] LIU Jinguo. Survey on research and development of reconfigurable modular robots[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(8): 1-21.
- [133] LILJEBACK P, STAVDAHL O, BEITNES A. SnakeFighter-development of a water hydraulic fire fighting snake robot[C]// 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore: IEEE, 2006: 1-6.
- [134] OSUKA K, KITAJIMA H. Development of mobile inspection robot for rescue activities: MOIRA[C]// 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA: IEEE, 2003: 3373-3377.
- [135] 徐鹏, 丁亮, 高海波, 等. 考虑足地作用的足式机器人环境表征与路径规划[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 21-33.
- XU Peng, DING Liang, GAO Haibo, et al. Environmental characterization and path planning for legged robots considering foot-terrain interaction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 21-33.
- [136] 余震, 张晨阳, 余静娴. 面接触传感技术及其应用研究现状及展望[J]. 现代制造工程, 2020(6): 143-151.
- YU Zhen, ZHANG Chenyang, YU Jingxian. Surface contact sensing technology and its research status[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(6): 143-151.
- 
- 作者简介: 张军豪, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为蛇形机器人。  
E-mail: dmuzjh@163.com
- 陈英龙(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为软体机器人、流体传动控制与蛇形机器人。  
E-mail: chenyinglong@dlmu.edu.cn