

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.03.002

昆虫级微型爬行机器人的研究综述

曾潇丰, 尹灿辉, 刘青, 吴宇列, 肖定邦

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 爬行作为动物的一种有节律的运动行为, 众多学者对其潜在机理的研究已经持续了一百多年。随着计算机集成技术、材料科学、空气动力学、微纳制造与人工智能技术的不断进步, 对仿生爬行机器人的研究正朝着微型化和智能化的方向发展。本文对昆虫级微型爬行机器人的前沿动态发展进行了综合评述, 并结合当前发展态势给出了微型爬行机器人未来发展的建设性意见。首先介绍了微型爬行机器人的研究背景和基本概念, 对微型爬行机器人的运动机理和稳定性判据进行了简单分析。然后分析了微型爬行机器人的驱动方式并比较了各种微型爬行机器人的性能。最后, 从供能、制造和设计 3 方面对微型爬行机器人的关键技术进行了总结, 探讨了微型爬行机器人研究面临的问题, 并提出了微型爬行机器人未来的应用前景和发展方向。

关键词: 微型爬行机器人; 步态; 动力学模型; 驱动器

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)03-0387-20

Review on Insect Sized Micro Crawling Robots

ZENG Xiaofeng, YIN Canhui, LIU Qing, WU Yulie, XIAO Dingbang

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Crawling is a rhythmic locomotor behavior of animals, and its underlying mechanisms has been studied by many scholars for over a hundred years. With the continuous progress of computer integration technology, materials science, aerodynamics, micro-nano manufacturing, and artificial intelligence technology, the research on bionic crawling robots is developing towards miniaturization and intelligence. This paper provides a comprehensive review on the cutting-edge dynamic development of insect level micro crawling robots, and provides constructive suggestions for the future development of micro crawling robots based on the current development trend. First, the research background and basic concepts of micro crawling robots are introduced, and the motion mechanism and stability criteria of micro crawling robots are briefly analyzed. Second, the driving methods of micro crawling robots are analyzed and the performance of various micro crawling robots is compared. Finally, the key technologies of micro crawling robots are summarized from three aspects: Energy supply, manufacturing, and design. The problems faced in the research of micro crawling robots are discussed, and the future application prospects and development directions of micro crawling robots are proposed.

Key words: micro crawling robot; gait; dynamical model; actuator

基金项目: 国防基础科研资助计划(JCKY2023210C002)。

收稿日期: 2024-04-22; **修订日期:** 2024-05-20

作者简介: 吴宇列, 男, 研究员, 博士生导师, 中国微米纳米技术学会理事, 主要研究领域为机电系统、微纳机器人。先后主持和参与国家和军队重要科研项目 20 余项, 出版微机电、机构学、光学及精密工程等领域学术专著和教材 6 部。在国内外本专业重要学术期刊发表 SCI 学术论文 40 多篇, 获得国家发明专利 30 余项。获得军队科技进步一等奖 1 项、湖南省科技进步一等奖 1 项。

通信作者: 吴宇列, E-mail: ylwu@nudt.edu.cn。

引用格式: 曾潇丰, 尹灿辉, 刘青, 等. 昆虫级微型爬行机器人的研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 387-406. ZENG Xiaofeng, YIN Canhui, LIU Qing, et al. Review on insect sized micro crawling robots[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(3): 387-406.

仿生机器人是模仿动物运动方式的机器人,因其特有的运动能力和应用潜力,近年来逐渐成为研究的热点。自然界中的动物经过上万年甚至上亿年的进化,保留了适应多种环境的外形结构以及运动方式^[1]。基于仿生学,对特定动物在某一方面突出功能的研究已经创造出了很多可以取代人类在恶劣复杂环境中的仿生机器人。其中爬行机器人是一种模仿各种爬行动物运动的机器人,大的如鳄鱼、壁虎,小的如蟑螂、蚂蚁等,因其具有复杂环境的运动和通过能力,目前已成为仿生机器人研究的重要分支。

按照尺寸进行分类,爬行机器人可以分为大(>10 m)、中(1~10 m)、微(1 mm~1 m)和纳(<1 mm)4种尺度。其中,昆虫级微型爬行机器人是指尺寸与一般的昆虫相似,具有多足爬行运动能力的微型机器人。与常规尺寸机器人相比(例如机械狗、人形机器人等),由于其体积小、结构简单、运动灵巧且制造成本低,非常适合军用探测和民用搜救等场景。高度的可操控性、稳健的运动以及复杂表面适应能力让微型机器人可以通过极其狭小的空间,或者是在恶劣的环境中进行探索工作。由于需要的功率较低,昆虫级微型爬行机器人可以充分利用环境中的能源,如光、热、磁和振动等。此外,由于较小的自身尺寸降低了制造成本,因此这也使得大规模制造和集群作战成为可能。

在微型爬行机器人领域,研究人员已经开展了大量研究,大多数相关工作集中在微米至厘米的尺度区间。针对微型机器人,美国国防部高级研究计划局在2018年宣布启动新的短程独立微机器人平台计划^[2-3],该计划针对灾难恢复和高风险环境开发昆虫级(最小到毫米)机器人,主要用于搜索和救援任务。目前,以哈佛大学、加州大学和清华大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学等为代表的国内外高校已研制出多种昆虫级微型爬行机器人样机。

本文主要对昆虫级微型爬行机器人的相关研究情况进行综述。首先概述了微型爬行机器人的特点、应用与主要类型;然后对不同驱动器类型的微型爬行机器人的发展现状进行了分析;进一步,讨论了微型爬行机器人的关键技术,包括驱动、供能、控制感知以及结构设计等方面;最后提出了微型爬行机器人未来的发展展望。

1 昆虫级微型爬行机器人的特点与类型

1.1 基本结构

昆虫是指具有多足的节肢动物,一般具有体积

小、运动灵活和感知灵敏等特点,还能在复杂、崎岖的地面上运动。因此,目前大多数微型爬行机器人都参考自然界中的爬行昆虫进行设计,如甲虫、蟑螂、螳螂和蚂蚁等。按照常规分类,昆虫级微型爬行机器人的基本结构分为驱动器、躯体和腿部运动机构(可以分为双足、三足、四足、六足或多足)、供能系统和控制器,如图1所示。

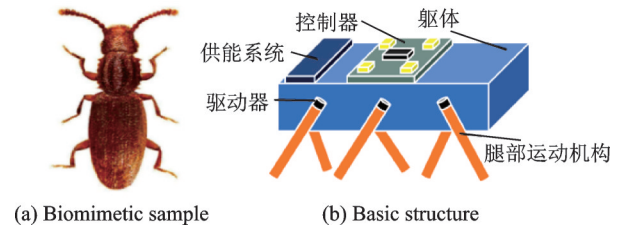


图1 微型爬行机器人的仿生对象与基本结构

Fig.1 Biomimetic samples and basic structures of micro crawling robots

1.2 运动机理与动力学建模

1.2.1 微型爬行机器人的运动机理

昆虫因为其特殊的生理构造,在爬行时具有高度的稳定性和较强的抗干扰能力,十分适合作为模仿对象研制微型爬行机器人。

目前众多微型爬行机器人都以四足或六足昆虫的步态行走为蓝本进行研制^[4-7]。如图2(a)所示,六足微型爬行机器人的足部一般分成两侧布置,每侧3条,行走的时候不可能同时迈六足或一侧的足,否则身体将会悬空甚至摔倒。所以一般会将六足分成两组,第1组由1、4、5足组成,另一组由2、3、6组成。每爬一步就抬起并迈动其中一组足,另外一组足则停止进行支撑,这样整体就被稳定的三角形结构支撑。当迈动的一组足落地后作为支点带动身体往前。如图2(b)所示,和六足微型爬行机器人类似,四足微型爬行机器人的足部一般也分成两侧布置,每侧两条。虽然四足的稳定性并不如六足,但是并不妨碍机器人的慢速准静态运动。主要原因是可以通过步态设计防止机器人重心落在静态稳定的支撑区域之外。四足运动时一般迈动其中1足,其余3足支撑或者迈动对侧的一组足,另一组对侧的足支撑,以落地足为支点,迈足向前,落地足向反方向运动将身体向前推动。这样重心

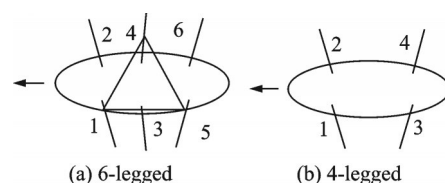


图2 6足与4足微型爬行机器人基本步态

Fig.2 Basic gait of 6-legged and 4-legged micro crawling robots

落在了迈动的腿上,然后再重复前一组的动作形成周期性运动。因此,微型爬行机器人一般由一组足的前足向前伸出,利用摩擦力或者钩爪等与地面或物体表面接触起到拉动整体的作用,另一组足是为了让整体向前行进则反向用力,俗称“蹬腿”。由于两组足一般交替运动,所以一般呈“之”字形的爬行轨迹。上述为六足与四足微型爬行机器人的基本步态-Crawling步态,此外还有诸如Trot(对角腿运动)、Pace(左右侧腿运动)、Bound(前后侧腿运动)等步态。

1.2.2 微型爬行机器人的动力学建模

为实现微型爬行机器人的设计、分析、仿真和实际控制,需要建立比较准确的动力学模型。不同类型的微型爬行机器人的结构不同,其动力学建模方法和模型也不相同。目前,机器人主要使用牛顿欧拉矢量力学方法和基于拉格朗日方程的分析力学方法进行动力学建模。这两种方法适用于解决自由度较少的简单刚体系统,但是对于复杂的刚体系统,随着自由度的增加,方程数目会急剧增加,计算量增大。虽然可以利用算力强大的计算机编程求解出动力学方程组,但是需要合适的数值积分方法和编写相应的程序。如果能在动力学建模的同时就考虑其计算问题,并且在建模过程中考虑其建模和求解的通用性,就能较好地解决此问题,其中比较著名的方法有凯恩法、变分法、维登伯格法和旋量法等。

(1) 牛顿-欧拉法

牛顿-欧拉法以牛顿方程和欧拉方程这两个现代力学中的基础方程为依据,可以很好地描述刚体在力和力矩下的平动以及转动。单刚体动力学主要是解决平动和转动的建模问题,对于牛顿-欧拉方程中,牛顿方程主要是解决平动问题,即外部作用力 F 和加速度 a 之间的关系

$$F = ma \quad (1)$$

欧拉方程主要处理刚体的转动问题,其涉及刚体所受扭矩 N 、惯性张量 I 、角速度 ω 以及角加速度 $\dot{\omega}$

$$N = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \quad (2)$$

由于牛顿方程描述了平移刚体所受的外力、质量和质心加速度之间的关系,而欧拉方程描述了旋转刚体所受外力矩、角加速度、角速度和惯性张量之间的关系,因此可以使用牛顿-欧拉方程描述刚体的力、惯量和加速度之间的关系,建立刚体的动力学方程,此方法分析了系统中每个刚体的受力情况,因此物理意义明确,表达了系统完整的受力关系。

(2) 拉格朗日法

拉格朗日法是依据系统的能量来进行推导,对

于任意的机械系统来说,其拉格朗日函数被定义为系统的动能 K 和势能 P 之差,即为

$$L = K - P \quad (3)$$

拉格朗日法以系统的能量为基础建立动力学模型,在建模过程中不同于牛顿欧拉法,它可以避免内部刚体之间出现的作用力,简化了建模过程。但是其中的物理意义不明确,而且对于复杂系统,拉格朗日函数的微分运算将变得十分繁琐。

(3) 凯恩法

凯恩法建立在分析力学的基础上,受拉格朗日原理的启发,以广义速度为自变量,引入了偏速度、偏角速度、广义主动力和广义惯性力的定义,建立了代数方程形式的动力学方程。凯恩方法用广义速率和偏速度描述系统,凯恩方程表达式为

$$F^r + F^{*r} = 0 \quad (4)$$

式中 F^r 和 F^{*r} 分别为系统对第 r 广义速率的广义主动力和广义惯性力

$$\begin{cases} F^r = \sum_i F_i \cdot V_i^r + M_i \cdot \omega_i^r \\ F^{*r} = \sum_i F_i^* \cdot V_i^r + M_i^* \cdot \omega_i^r \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_i^r 与 ω_i^r 分别为 i 号刚体对 u_r 的偏速度和偏角速度; F_i 和 M_i 分别为作用于 i 号刚体的合外力和和外力矩; F_i^* 和 M_i^* 分别为 i 号刚体的惯性力和惯性力矩。

凯恩法的核心在于以广义速率描述系统的运动。对于非完整系统,方程的变量数为系统的自由度,不需要引入乘子和约束方程,可以直接给出微分形式的动力学方程。凯恩法同时具有分析力学和矢量力学的优点,既适用于非完整系统,也适用于完整系统。

(4) 罗伯特-维登伯格法

罗伯特-维登伯格法(Roberson-Wittenburg, R-W)法是一种分析多体系统动力学的普遍方法,也是第1个多体系统通用分析方法。罗伯特-维登伯格法将数学领域的图论引入多刚体系统动力学,利用关联矩阵和通路矩阵等工具描述系统的结构特征和连接关系,使动力学关系式的描述简单且适用于计算机编程。R-W法的基本动力学方程

$$A\ddot{q} = B \quad (6)$$

式中: A 为系统中各个刚体的广义质量, B 为系统的广义外力, q 为各个刚体的广义坐标。

基于罗伯特-维登伯格法的多刚体系统建模应用广泛,计算量小且易与编程,有较强的通用性。

(5) 高斯最小约束原理

高斯最小约束原理是多体系统动力学问题优化的重要原理之一,采用该方法可将多刚体系统的

动力学问题变为求拘束极值的问题^[8]。它不需要建立系统的动力学方程,而是以加速度为变量,直接利用系统在每个时刻的坐标和速度得出运动规律。因其对约束形式没有要求,所以可考察树系统、非树系统或单边约束的动力学问题,还可将动力学分析与系统优化相结合,解决带控制的多系统动力学问题。

由于微型爬行机器人大多为结构相对简单且自由度较低的简单刚体系统,因此主要使用拉格朗日法进行动力学建模。

哈佛大学利用拉格朗日法针对六足爬行机器人建立了如图3(a)所示的动力学模型^[9],先假设水平方向的运动与竖直方向的运动是解耦不相关的,定义每个单元节足端旋转角为 α_i ,机身旋转为 θ_i ,单元节的质量为 m ,转动惯量为 I_{cm} ,单元节上受到的水平分力矩为 τ_i ,腿长 L_{leg} 为足端与连接机构间的水平距离,机身宽度 w_b 为连接机构到单元节质心距离。另外假设连杆的质量为0,而其等效长度为 l_{eq} 。每个单元节有4个状态参数:足端旋转速度,足端角速度,单元节旋转速度,单元节角速度。引入常量 $c_{f,i} \in [-1, 1]$ 用来定义足端支撑状态或者摆动状态,并将每个足端的支点定义为 (x_i, y_i) 。在进行动力学分析时,假设整个系统的质量与惯量均集中于单元节上,则可建立如下的拉格朗日运动方程

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{cm} \dot{\theta}_i^2 + m(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) \quad (7)$$

式中: K 为机器人的动能, \dot{x}_i 与 \dot{y}_i 分别为单元节质心的前进速度和横向速度。并且它们与单元节的4个状态参数有以下关系

$$\dot{x} = -c_{f,i} L_{leg} \dot{\alpha}_i \sin \alpha_i + c_{f,i} w_b \dot{\theta}_i \sin \theta_i \quad (8)$$

$$\dot{y} = L_{leg} \dot{\alpha}_i + w_b \dot{\theta}_i \cos \theta_i \quad (9)$$

假设连杆间的连接为弹簧,则系统的拉格朗日量可写成

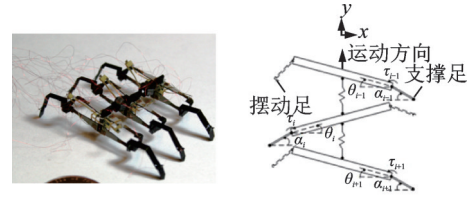
$$L = K - P_a - P_s \quad (10)$$

式中: P_a 为驱动器势能; P_s 为连杆间弹簧的总势能。

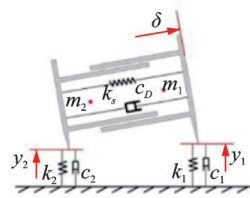
北京航空航天大学利用拉格朗日方程针对设计的四足机器人建立了如图3所示的模型^[10],将爬行模型分解为相对坐标系中的运动如图3(b)以及在绝对坐标系中的运动如图3(c),两坐标系的几何转换关系如式(11)所示。

$$\begin{cases} x_1 = x + \frac{k_m l_B + \delta}{2} \cos \alpha \\ y_1 = y + \frac{k_m l_B + \delta}{2} \sin \alpha \end{cases} \quad (11)$$

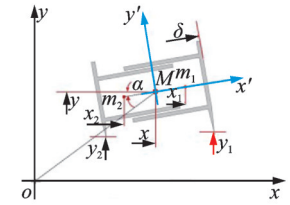
$$\begin{cases} x_2 = x - \frac{k_m l_B + \delta}{2} \cos \alpha \\ y_2 = y - \frac{k_m l_B + \delta}{2} \sin \alpha \end{cases} \quad (12)$$



(a) 6-legged model



(b) 4-legged relative coordinate system model



(c) 4-legged absolute coordinate system model

图3 爬行机器人动力学模型

Fig.3 Dynamic model of crawling robot

式中: δ 为机器人的位移; α 为机器人机身相对地面的倾角; k_m 为反映 m_1 、 m_2 与 m 之间距离的几何比例系数; l_B 为驱动器的长度。

机器人运动时系统的能量方程如下

$$T = \frac{1}{2} m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} J \dot{\alpha}^2 \quad (13)$$

设定 δ 、 α 、 x 和 y 四项坐标,系统的广义力矩阵可以表示如下

$$Q = \begin{bmatrix} F_m - F_K - F_C \\ F_{1r} r_{m1} - F_{1f} r_{m2} - F_{2r} r_{m3} + F_{2f} r_{m4} \\ (F_m - F_K - F_C) \cos \alpha - F_{1f} + F_{2f} \\ (F_m - F_K - F_C) \sin \alpha + F_{1r} + F_{2r} - (m_1 + m_2) g \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: F_m 为驱动力, F_K 为弹性恢复力; F_C 为阻尼力; F_{1r} 和 F_{2r} 分别为地面对前腿和后腿的支撑力; F_{1f} 和 F_{2f} 分别为前腿与后腿之间相对运动产生的摩擦力; r_{m1} 、 r_{m2} 、 r_{m3} 、 r_{m4} 分别为 F_{1r} 、 F_{2r} 、 F_{1f} 、 F_{2f} 的旋转半径,分别从式(15)获得。

$$\begin{cases} r_{m1} = \frac{l_B + \delta}{2} \cos \alpha + l_1 \sin \alpha \\ r_{m2} = -\frac{l_B + \delta}{2} \sin \alpha + l_1 \cos \alpha \\ r_{m3} = \frac{l_B + \delta}{2} \cos \alpha - l_2 \sin \alpha \\ r_{m4} = \frac{l_B + \delta}{2} \sin \alpha + l_2 \cos \alpha \end{cases} \quad (15)$$

该四足爬行机器人的动力学模型如下

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

可以由式(15)导出

$$M(\ddot{\delta}, \ddot{\alpha}, \ddot{x}, \ddot{y}) + C(\dot{\delta}, \dot{\alpha}, \dot{x}, \dot{y}) = Q(\delta, \alpha, x, y) \quad (17)$$

式中:系统的惯性矩阵 M 和一阶阻尼矩阵 C 为正定矩阵,表示如下

$$M = \begin{bmatrix} M(1,1) & 0 & M(1,3) & M(1,4) \\ 0 & M(2,2) & M(2,3) & M(2,4) \\ M(3,1) & M(3,2) & M(3,3) & 0 \\ M(4,1) & M(4,2) & 0 & M(4,4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C(1,3) & C(1,4) \\ 0 & C(2,2) & C(2,3) & C(2,4) \\ C(3,1) & C(3,2) & 0 & 0 \\ C(4,1) & C(4,2) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (19)$$

1.3 微型爬行机器人运动稳定性分析

微型爬行机器人的主要功能是实现稳定、持续的运动,需要具备在复杂的环境下保持平衡的能力,因此对微型爬行机器人稳定性的分析十分重要,如图4所示为机器人三维坐标示意图。目前学者们提出了多种衡量运动稳定性的判据,通常分为静态稳定性标准和动态稳定性标准。依据判定指标可以进一步将稳定性判据分为4类:基于距离、角度、能量和力的稳定性判据。

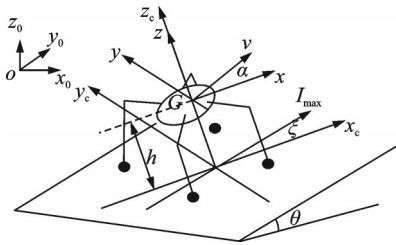


图4 机器人三维坐标示意图

Fig.4 Schematic diagram of robot three-dimensional coordinates

基于距离的稳定性标准关注重心投影与支撑多边形之间的距离。通过确定机器人重心的水平投影位置是否在机器人足端构成的支撑多面体内部来判断其稳定与否,并将重心的水平投影距支撑多边形的最短距离定义为稳定裕度(Stability margin, SM)。

$$S_{SM} = \min L_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中: n 为支撑腿的数量; L_i 为重心水平投影位置到支撑多边形第 i 边的距离。

基于角度的稳定性标准采用作用在重心上的合力矢与支撑多边形之间的角度作为衡量稳定性的标准。在这类稳定性标准中被广泛使用的是力角稳定裕度^[11](Force angle stability margin, FASM),当在重心上的合力矢 F_R 与竖直方向之间的角度 α 的乘积为零时系统被判定为不稳定,合力矢与最小角度的乘积即为FASM。

$$S_{FASM} = \|F_R\| \cdot \min(\alpha_i) \quad (21)$$

考虑到重心高度和机器人质量的影响,Hirose等^[12]和Garcia等^[13]分别将机器人绕支撑多边形边界发生侧翻的最小势能的能量稳定裕度(Energy stability margin, DESM)和考虑外力以及惯性负载影响下的动态能量稳定裕度(Dynamic energy stability margin, DESM)进行了标准化,提出了标准化能量稳定裕度(Normalized energy stability margin, NESM)和标准化动态能量稳定裕度(Normalized dynamic energy stability margin, NDESM)。

$$S_{NESM} = \frac{\min_i mg \Delta h_i}{mg} \quad (22)$$

$$S_{NDESM} = \frac{\min E_i}{mg} \quad (23)$$

式中: i 为支撑多边形作为倾覆轴的边; Δh_i 表示以 i 边倾覆时重心(Center of gravity, COG)高度的变化; E_i 表示 i 边的稳定性度量。

当机器人发生侧翻时,除了组成侧翻轴的支腿,其他支腿的足端力将变为零。基于力的稳定性标准通过考察机器人足端接触力的情况来判断机器人的稳定性。Agheli等^[14]提出了一个能够度量足端力稳定性的判据——足端力稳定裕度(Foot force stability margin, FFMSM),并基于此推导了适用于在线和实时控制器的改进足端力稳定裕度(Modified foot force stability margin, MFFSM)。

$$S_{FFSM} = \prod_{i=1}^n f_i / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \right)^n \quad (24)$$

$$S_{MFFSM} = S_{FFSM} \cdot \frac{\|P_i\|}{h_i} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (25)$$

式中: f_i 为第 i 个支撑腿足端力的竖直分量; h_i 为COG高度; P_i 为由重心位置指向重心在支撑面投影点到倾覆轴垂足的向量。

Agheli等^[15]对比了FASM、FFSM和MFFSM 3种方法,结果表明应根据机器人的应用场景采用合适的稳定判据来选择机器人的步态,否则可能会影响机器人的工作性能,尤其是在不规则地形上考虑惯性力和外力影响的情况下,不存在最优标准。

1.4 主要类型

昆虫级微型爬行机器人按照不同方式分类可以有不同的类型。

按照足的数量分类,可以分为:(1)两足微型爬行机器人,这种微型爬行机器人相对比较简单,只有前后两条腿,运动方式也比较简单,类似尺蠖的运动,前进或后退;(2)四足微型爬行机器人,这种机器人有4条腿,可以有较复杂的运动方式,类似于四足哺乳动物的行走方式,如狗、猫等;(3)六足

微型爬行机器人,这种机器人有6条腿,与六足昆虫的结构和运动方式保持一致,能够更稳定地行走和爬行;(4)多足微型爬行机器人,这种机器人有多于6条腿的数量,类似蜈蚣的运动方式,具有更强大的运动能力和环境适应性。

按照材料类型分类,可以分为:(1)刚性微型爬行机器人:这类微型爬行机器人通常由硬质结构材料和驱动器制成,具有较强的对地面的附着力和稳定性,适用于在复杂地形环境中进行探测和执行任务。(2)柔性微型爬行机器人:这类微型爬行机器人通过柔性材料或驱动器实现运动,具有较强的适应性和灵活性,可以在狭窄空间中移动和执行各种任务。

按照设计和功能分类,可以分为:(1)爬壁机器人:能够在垂直表面上爬行的机器人,通常通过吸盘、蜘蛛腿或其他机械结构实现。常用于巡检建筑物外墙或其他垂直表面的任务。(2)水下爬行机器人:能够在水下表面爬行的机器人,用于海洋勘测、水下管道维护等任务。(3)管道爬行机器人:专门设计用于在管道内爬行,常用于检测、清洁和维修管道。(4)地面爬行机器人:能够在硬质地表上爬行,比如岩石、砖瓦和混凝土等表面。通常用于探测和勘测山区、建筑物等复杂地形。

还可以按照所采用的驱动方式分类,可以分为:(1)电机驱动微型爬行机器人;(2)压电驱动微型爬行机器人;(3)形状记忆合金驱动微型爬行机器人;(4)介电弹性体驱动微型爬行机器人等几种类型。

2 昆虫级微型爬行机器人的研究进展

驱动器作为微型爬行机器人的关键组成部分直接决定着整体的性能。目前,主流的驱动器包括微电机、压电驱动器、形状记忆合金和介电弹性体等几种。本节将按照驱动器类型对各种昆虫级微型爬行机器人的研究进展进行介绍。

2.1 微电机驱动的微型爬行机器人

电机作为传统的驱动器,优点是结构和控制方案成熟,驱动功率大。但由于自身较大的尺寸,微电机驱动的微型机器人^[16-20]大多体积和质量较大,如表1所示。

2009年,加州大学伯克利分校研制了一款小巧轻便的微电机驱动自主微型爬行机器人DASH^[21],如图5(a)所示。DASH从生物力学中汲取灵感,采用六足伸开的姿势并使用交替的三脚交替步态实现动态开环水平运动,速度可达15倍

表1 微电机驱动微型爬行机器人对比

Table 1 Comparison of micro motor driven micro crawling robots

年份	微机器人名称	驱动器数量	质量/g	长度/cm	速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度/($\text{倍体长}\cdot\text{s}^{-1}$)
2009	DASH	1	16.2	10	150	15
2017	MiniAQ	4	23	12	7.8	0.65
2017	MiniAQ II	4	23	12	9.6	0.8
2017	C-Quad	4	38	10.3	27.81	2.7
2020	S-Quad	4	69	15	8.1	0.54
2020	SMoLBot	2~8	54	48	64.26	1.34
2024	GASR	1	1.2	2.5	2.83	1.1

体长/s。

2020年,比尔肯特大学研制了一款融合了折纸技术、软体机器人技术以及模块化设计的微型爬行机器人SMoLBot^[22],如图5(b)所示。SMoLBot身体由多个具有相同或者相似功能的模块组成,根据不同的应用场景,可以选择2个模块或者3个模块,模块和模块之间由柔性或者刚性的“仿生脊柱”(聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)材料)来连接。SMoLBot的模块化设计让制造方式变得简单快捷且价格低廉,当某一模块发生故障时可以方便地进行更换。每一个小模块包含一个“身体部分”和两条独立控制的“机械腿”,在身体内部囊括了小型控制板(Atmega-328P),两个直流电机(微型行星齿轮减速电机),一块微型电池(3.7 V, 150 mAh Li-Po 电池),以及两个机械锁扣结构。每一个模块的框架结构由“折纸设计”切割后组合而成。

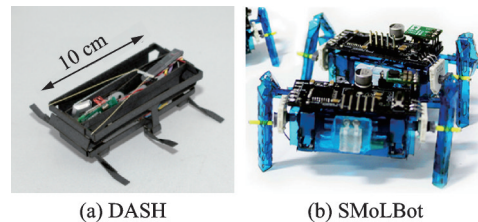


图5 加州大学和比尔肯特大学研制的爬行机器人

Fig.5 Crawling robots developed by University of California and University of Bilkent

比尔肯特大学开发了一款折纸机构组成的微型爬行机器人^[23-24](MiniAQ和MiniAQ II),其中二代为一代的改良款,具有更好的腿部机构、更长的步幅和更强的灵活性,如图6(a,b)所示。MiniAQ的运动机构采用四杆机构并引入了T形折叠以增加主体框架的弯曲刚度,使得杆件在运动过程中不会弯曲或扭曲且末端轨迹更近似于连续的椭圆以最大限度地提高与地面接触期间的横向运动并减少反弹,如图6(c)所示。MiniAQ约23 g,由4个独立的微电机驱动并连接至圆盘的中心,圆盘外

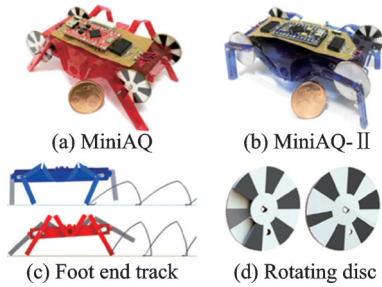


图 6 比尔肯特大学研制的 MiniAQ 爬行机器人

Fig.6 MiniAQ crawling robot developed by Birkent University

围的孔与微型机器人的腿部连接,如图 6(d)所示。通电时电机带动圆盘进行旋转,进而带动腿部运动。

C-Quad 和 S-Quad 是比尔肯特大学分别于 2017 年和 2020 年开发的两种四足微机器人^[25-26],如图 7 所示。和他们研发的 MiniAQ 类似,C-Quad 的腿部和躯体都是由一张聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene glycol terephthalate, PET) 片加工制造而成的,四腿分别由 4 个微电机驱动。C-Quad 不仅可以达到其 2.7 倍体长/s 的速度,它还可以进行原地转弯和攀爬超过其一般高度的障碍物。S-Quad 的躯体有一块柔性的印刷电路板 (Printed circuit board, PCB) 制成,上面集成了 4 个微电机、电源和控制器。电机直接连接的腿部由 PDMS 制成,尽管其运动性能不如 C-Quad,但是其柔性的躯体让它可以翻越 1.44 倍其高度的障碍物。

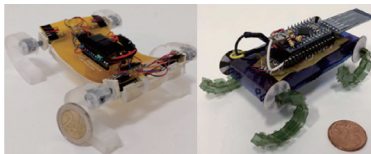


图 7 比尔肯特大学研制的 S-Quad 和 C-Quad 爬行机器人
Fig.7 S-Quad and C-Quad crawling robots developed by Birkent University

2024 年,哈尔滨工业大学采用了新颖的倾斜偏心电机和双腿结构研制了一款名为 GASR 的微型爬行机器人^[27],如图 8 所示。该机器人质量仅 1.2 g,使用一种类似海豹踱步跳动的全新驱动方法可以实现欠驱动下的直行、弧行和转向等灵活运动。

2.2 压电驱动器驱动的微爬行机器人

2.2.1 压电驱动器的基本原理与结构

压电陶瓷由于具有压电效应,并且响应速度快、驱动和位移大等特点被广泛应用于微型爬行机器人^[28-32],压电驱动器可以制造比微电机更小的微型机器人。如表 2 所示,目前,由于压电双晶片的

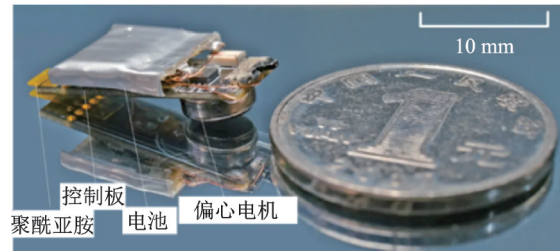


图 8 哈尔滨工业大学研制的 GASR 爬行机器人

Fig.8 GASR crawling robot developed by Harbin Institute of Technology

表 2 压电驱动微型爬行机器人对比

Table 2 Comparison of piezoelectric driven micro crawling robots

年份	微机器人名称	驱动器数量	质量/g	长度/cm	速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度/(倍体长 $\cdot\text{s}^{-1}$)
2008	HAMR I	3	0.09	1.7	0.1	0.06
2010	HAMR II	6	2	5.7	22.8	4
2011	HAMR III	9	1.7	4.7	4.3	0.91
2013	HAMR V P	6	1.27	4.38	44.2	10.1
2015	HAMR VI	8	1.41	4.51	47.8	10.6
2021	西工大三足爬行机器人	2	3.5	6.5	6.28	0.97
2023	西工大四足爬行机器人	2	21.6	14.8	6.5	0.44
2023	CLARI	8	2.59	3.4	2.8	0.82
2023	PiezoClimber	1	0.63	6	8.4	1.4

弹性程度和变形范围远高于压电贴片金属腿,因此多数采用压电双晶片作为驱动器。压电双晶片主要由压电陶瓷、碳纤维预浸料和玻璃纤维预浸料组成,如图 9(a, b)所示。根据锆钛酸铅 ($\text{PbZrO}_3\text{-Pb-TiO}_3$, PZT) 层的极化方向,致动器驱动器可以通过同步驱动或异步驱动配置为致动器通电,如图 9 (c) 所示。异步驱动包括两个与外部电极相连的单极驱动级,两者相位相差 180° 并与中央电极上的一个共同点相连接。同步驱动由施加在执行器上的一个恒定的高压偏置和一个连接在中央电极的单极驱动信号源组成。异步方式要求每 n 个压电双晶片要有 $2n$ 个驱动级,而同步驱动方式允许多个驱动机构之间共享一个高压偏置,因此这种方法可以实现每 n 个压电双晶片只需要 n 个驱动信号和一个高压偏置,结构较为紧凑。

2.2.2 压电驱动器的分析理论与方法

根据压电双晶片的 3 层结构特征,可以利用复合材料的层合板理论^[33]对其阻力进行分析^[34]。首先假设:(1) 压电陶瓷材料在横向为各向同性且没有压电剪切应力;(2) 每一层之间的连接是完美结合,即每层之间没有剪切应力;(3) 忽略温度变化对驱动器的影响;(4) 当驱动器的宽度比厚度大得多时,可以认为其处于平面应力状态。

根据层合板理论得到中性面的应变和曲率关

系为

$$\begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ k \end{bmatrix} = C_{6 \times 6} \begin{bmatrix} F^e \\ M^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F^p \\ M^p \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1}$$

式中： ϵ^0 和 k 分别为应变向量与曲率向量； A 、 B 、 D 分别为拉伸刚度矩阵、耦合刚度矩阵和弯曲刚度矩阵，均与材料及其几何尺寸有关； F^e 和 M^e 分别为单位宽度的外部力和力矩向量； F^p 和 M^p 分别为单位宽度的压电力和力矩向量； $C_{6 \times 6}$ 为过渡矩阵。

压电双晶片一般为悬臂梁式，布置如图9(d)所示，根据式(27)可得驱动器的位移与内部力和外加力矩的关系为

$$\frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} = P + C_{44} M_x(x)$$

$$P = C_{41} F_x^p + C_{42} F_y^p + C_{44} M_x^p + C_{45} M_y^p \quad (27)$$

式中： $M_x(x)$ 为单位宽度的外力矩； F_x^p 、 F_y^p 分别为单位宽度的 x 和 y 轴方向的压电力； M_x^p 、 M_y^p 分别为单位宽度的 x 和 y 轴方向的压电力矩。

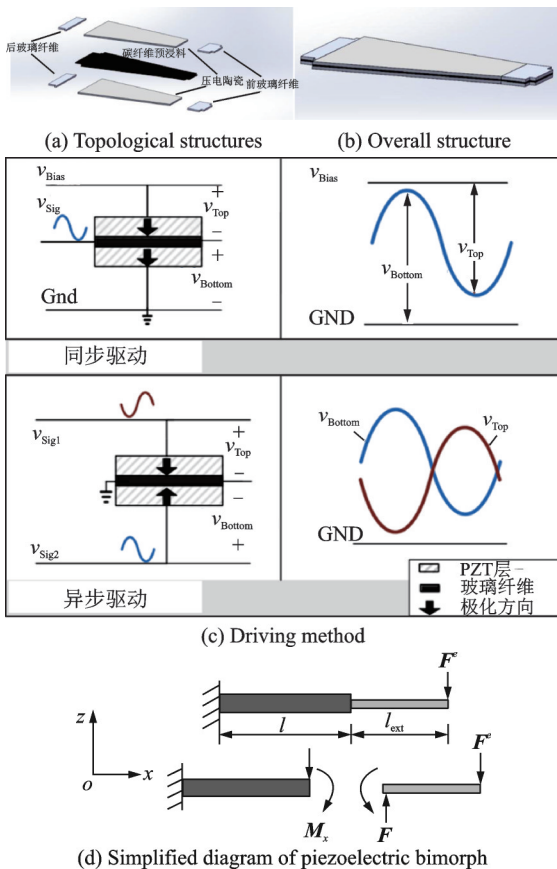


图9 压电双晶片

由式(28)可见，曲率包括两部分，一部分来自内部压电力作用，另一部分来自外部力作用，且

$$\frac{d^2 \delta_p(x)}{dx^2} = P, \quad \frac{d^2 \delta_e(x)}{dx^2} = C_{44} M_x(x) \quad (28)$$

式中： $\delta_p(x)$ 、 $\delta_e(x)$ 分别为由压电作用与外部力作用所产生的位移。

为了便于计算，分别定义：长度因子 $l_r = l_{ext}/l$ ；宽度因子 $w_r = w_0/w_{nom}$ ， w_{nom} 为名义宽度，表示 $x = l/2$ 时对应的宽度。考虑到延伸端，压电双晶片产生的位移为

$$\delta(l + l_{ext}) = \delta(l) + \left. \frac{d\delta(x)}{dx} \right|_{x=l} l_{ext} \quad (29)$$

则由压电作用而在压电双晶片末端产生的位移为

$$\delta_p(l + l_{ext}) = \frac{Pl^2}{2}(1 + 2l_r) \quad (30)$$

根据图9(d)所得外力矩为

$$M_x(x) = -\frac{F_e[l(1 + l_r) - x]}{w_{nom}\{[2(1 - w_r)/l]x + w_r\}} \quad (31)$$

由外力作用在 $x = l$ 位置所产生的位移为

$$\delta_f(l) = -\frac{C_{44} F_e l^3}{3w_{nom}} G_1$$

$$G_1 = \frac{6(w_r - 1)(-3 - 2l_r + 2w_r + 2w_r l_r)}{8(1 - w_r)^3} + \frac{3(w_r - 2)(-3 - 2l_r + w_r + 2w_r l_r) \times \ln[(2 - w_r)/w_r]}{8(1 - w_r)^3} \quad (32)$$

进而可得

$$\delta_f(l + l_{ext}) = -\frac{C_{44} F_e l^3}{3w_{nom}} G_2 G_2 = \frac{6(w_r - 1)(3 + 4l_r - 2w_r - 4w_r l_r)}{8(1 - w_r)^3} + \frac{3(w_r - 2)(-3 - 2l_r + w_r + 2w_r l_r) \times \ln[(2 - w_r)/w_r]}{8(1 - w_r)^3} \quad (33)$$

则驱动器末端的总位移为

$$\delta(l + l_{ext}) = \delta_f(l + l_{ext}) + \delta_p(l + l_{ext}) \quad (34)$$

当外力为0时，压电双晶片末端的位移为

$$\delta(l + l_{ext}) = Pl^2(1 + 2l_r)/2 \quad (35)$$

当 $\delta(l + l_{ext}) = 0$ 时，相当于压电双晶片的末端上下自由度被限制，可得阻力为

$$F_b = \frac{3Pw_{nom}}{2C_{44}l} GF_b \quad (36)$$

式中 $G_{F_b} = (1 + 2l_r)/G_2$ 。

2.2.3 典型的压电驱动微型爬行机器人

采用压电陶瓷驱动中最具代表性的哈佛大学Wood教授团队研制的HAMR爬行机器人。如图10所示，哈佛微型机器人实验室的研究重点是开发一组以昆虫为灵感能够穿越任何地形的2g以下微型爬行机器人。要实现这一目标，需要克服许

多工程挑战,首先是昆虫规模平台的设计和制造;传统的宏尺度组件和组装技术太大,微机电系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)工艺太耗时且成本高昂,并且不存在适用于低于 2 g 的机器人的用于电源和控制的完整的现成电子封装。因此,在研制机器人的各个方面都需要创新,包括机构设计、制造、驱动、控制和电子。目前,HAMR 系列的爬行机器人可以脱线进行自主运动包括跳跃、转向和越障等,甚至借助足部的仿生吸盘在物体表面移动。

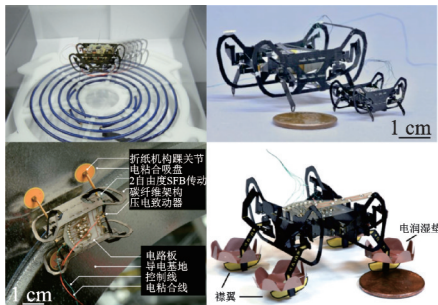


图 10 哈佛大学研制的 HAMR 爬行机器人
Fig.10 HAMR developed by Harvard University

HAMR 系列爬行机器人经过了多代的改进升级,如图 11 所示。2008 年,第一代的 HAMR I 为重 90 mg 的六足机器人^[35],长 17 mm,宽 23 mm。利用智能复合材料微结构制造技术制造的首款爬行机器人证明了制造具有昆虫形态和步态模式机器人的可行性。2010 年,在一代的基础上 HAMR II^[36]实现了在设计、制造和驱动上的改进。HAMR II 质量 2 g,长 5.7 cm,在 20 Hz 的驱动频率下以交替的三角步态移动速度可达到 4 倍体长/s。2011 年,HAMR III^[37]在机器人的“髌”关节处使用了优化的两自由度球形五连杆关节且集成了控制器和电池,可以实现 0.9 倍体长/s 的爬行速度,是当时能够自主运动的最小最轻的六足机器人。前几代的 HAMR 机器人主要解决毫米级机构的制造、驱动器和高电压供电的问题。2013 年,HAMR V^[38]受蟑螂启发,将腿的数量从 6 个减少为 4 个,这种减少部件数量的方式来提高 HAMR 的可制造

性和鲁棒性。2014 年,受弹出式书籍(Pop-up)制造方法的启发,改进的 HAMR VP^[39]可以实现快速、可重复组装。因为仿蟑螂的稳定身体结构和创新的球形五连杆放大机构,HAMR VP 可以在复杂崎岖的地形上以 10.1 倍体长/s 的速度高速运动且能够沿特定轨迹运动。2018 年的 HAMR F^[40]除了具备更稳定的可靠性外,还能实现自主的运动。HAMR F 长 4.5 cm,质量 2.8 g,速度可以达到 17.2 cm/s,相对于 HAMR VP 有 300% 的提升。除此之外,通过配备微型锂电池,HAMR F 摆脱了系带的束缚,在 25 mAh 的电量下运动 4~5 min。2020 年,最新版本的 HAMR Jr^[41]作为目前最小且最快的微爬行机器人之一,HAMR Jr 的设计及制造基本遵循其前身 HAMR-VI^[42],可以称为其缩小版本,但性能却有很大的提升。HAMR Jr 质量仅 0.32 g,但是却能背负 3.5 g 的质量,速度可以达到 13.91 倍体长/s(约 313 mm/s),不仅是最小的四足机器人,而且是最快的微型机器人之一。

除了在结构和性能上对机器人的迭代改进以外,哈佛大学还通过变换控制方式^[43]、改变足端等方式对 HAMR 机器人进行功能扩展,如图 10 所示。通过给 HAMR 的四足加装直径 1 cm 厚度 15 μm 的电湿润垫(Electrowetting panel,EWP)^[44],利用水的表面张力,在不丧失陆地行走能力的前提下可以实现机器人在水面和水底运动。两个以 HAMR 的腿足为中央支撑的由聚酰亚胺材料制作的被动襟翼。从龙虱身上获得灵感,让安装在微型机器人 4 条腿上的 4 对被动襟翼在水里产生不对称步态,从而产生向前或者向后的推力。具体做法就是,被动襟翼在向后运动时完全打开以产生推力,而在复位的过程中,襟翼收回以减小阻力。这种推进方式借助了水和被动襟翼的耦合现象,在没有主动发动装置的情况下实现了模仿龙虱的步态。相同的,在足底加装电吸附的吸盘^[45],HAMR 可实现倒置和垂直表面的可重复和可靠的爬升,大大提升了可达空间。

2021 年,西北工业大学研制了一款压电驱动的四足爬行机器人^[46],如图 12(a)所示。该机器人空载速度最大可达 62.8 mm/s,负载 2 g 时,机器人的峰值速度接近 53 mm/s。

2023 年,西北工业大学基于逆压电效应设计了一种由双压电片驱动的足腿一体化四足爬行机器人^[47],并设计了几种不同类型摩擦力的驱动足,如图 12(b)所示。

2023 年,科罗拉多大学博尔德分校设计了一款压电驱动名为 CLARI 的微机器人^[48],如图 12(c)所示。CLARI 由 8 个独立的压电驱动器驱动 4

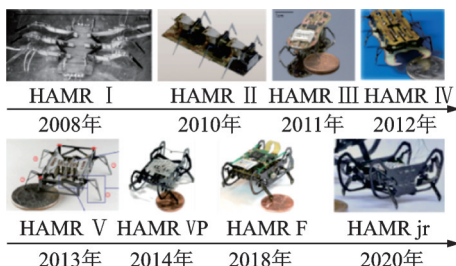


图 11 HAMR 爬行机器人发展历史
Fig.11 Development history of HAMR

条腿运动,整体为方形,四边各有一条腿。根据身体的受力情况,CLARI可以纵向和横向变形,通过身体的变形就可以在复杂的环境中移动。CLARI采用模块化设计,每条腿几乎相当于一个独立的机器人,有单独的电路板和执行器。这种模块化设计理论上可以使CLARI变成各种形状。

2023年,清华大学通过将一种带有倾斜微三棱柱结构的仿生足垫与柔性压电驱动薄膜匹配,开发了一种多功能且自适应的攀爬机器人,如图12(d)所示,并为其命名为PiezoClimber^[49]。PiezoClimber能够以1.4倍体长/s的速度在90°基底上完成快速攀爬,并在角度变化为60°的表面上完成自过渡攀爬,具备优秀的越障能力。在此基础上,他们设计并集成了压电驱动电路系统、负载携带结构和反馈控制单元^[50],实现了机器人在携带驱动电路与电源的情况下仍能保持较高转向敏捷性。

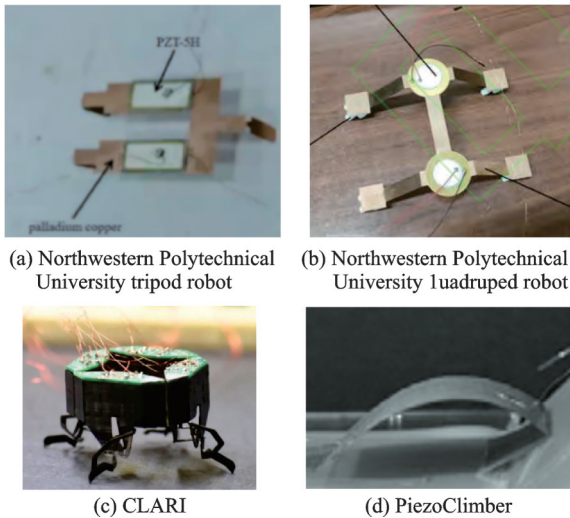


图12 压电驱动微型爬行机器人

Fig.12 Piezoelectric driven micro crawling robots

2.3 形状记忆合金驱动器

具有形状记忆效应(Shape memory effect, SME)的合金称为形状记忆合金(Shape memory alloys, SMA)。形状记忆合金的体积相对微电机和压电陶瓷的体积小很多,可以制造出微米尺度的机器人^[51-53]。但是其线性形变的能力较差(约8%)会导致微型机器人的运动能力大大降低,难以适应复杂的外部环境,如表3所示。

2008年,加州大学伯克利分校首次使用智能复合微结构工艺(Smart composite microstructure, SCM)制造了第一款全功能的名为RoACH的爬行机器人^[54],如图13(a)所示。该机器人重2.4 g,速度可达3 cm/s,集成了电源和控制板并由形状记忆合金驱动。

2020年,南加州大学研制了一款由形状记忆

表3 形状记忆合金驱动微型爬行机器人对比

Table 3 Comparison of shape memory alloy driven micro crawling robots

年份	微机器人名称	驱动器数量	质量/g	长度/cm	速度/(cm·s ⁻¹)	速度/(倍体长·s ⁻¹)
2008	RoACH	2	2.4	3	3	1
2017	MEMS microrobot	4	—	0.6	—	—
2020	SMALLBug/SMARTI	1/2	0.3/0.6	1.3	1.7/4.6	1.3/3.5
2023	北航爬行机器人	1	1.23	0.34	22.54	66.3

合金丝驱动名为SMALLBug的微机器人^[55],如图13(b)所示。该机器人长13 mm,重30 mg,可以在20 Hz的驱动频率下运动。其运动部分由薄形状记忆合金线和一个用作加载板簧的碳纤维片组成。这种配置能够使形状记忆合金材料发生高速热致相变以产生高频周期性驱动。后续在双足的SMALLBug基础上扩展成四足的SMARTI^[56],在闭环控制下可以实现46 mm/s的最大速度。

2023年,北京航空航天大学研制了一款微米尺度的由形状记忆合金驱动的微型爬行机器人^[10],如图13(c)所示。该机器人利用脉冲电弧产生的焦耳热达到较高的谐振频率,这种振动会产生腿部与地面之间的摩擦从而实现快速的爬行运动。该机器人可以在光滑的玻璃表面以66.3倍体长/s的速度爬行,也可以在粗糙的砂纸表面以39.3倍体长/s的速度爬行。

2023年,南京航空航天大学研发了一种基于形状记忆合金弹簧驱动柔性脊柱的仿壁虎机器人^[57],在整体结构和几何比例上均与大壁虎的身体特征非常相似,如图13(d)所示。该仿壁虎机器人共设有15个自由度(每条腿3个,脊柱3个)。该机器人的特别之处在于具有一根串联式铰链结构的柔性脊柱,由3个相同的子模块组成,每个子模

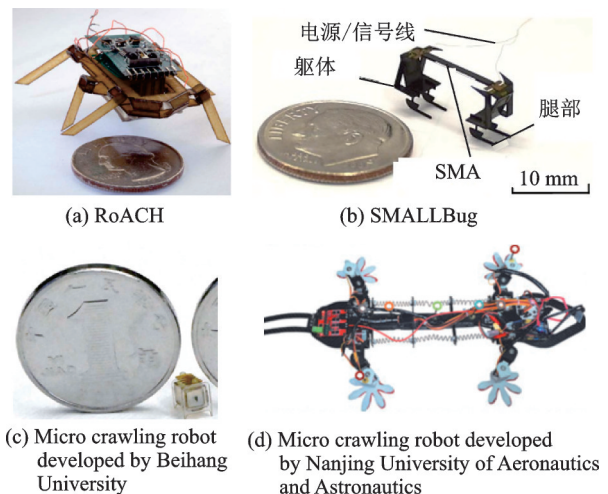


图13 SMA驱动微型爬行机器人

Fig.13 SMA driven micro crawling robot

块都设有一个转动关节。在柔性脊柱的设计中选择使用 SMA 弹簧作为驱动器,成对安装在柔性脊柱的两侧,利用电加热方式对其进行致动,并通过差动式设计驱动柔性脊柱的侧向偏转。

2.4 介电弹性体驱动器

介电弹性体(Dielectric elastomer, DE)是一种应用广泛的电活性材料之一,它具有响应快、噪声低、成本低、质量轻、变形大和能量密度高等优点。介电弹性体通常呈三层叠加式构造,即两层柔性电极中间夹有 DE 薄膜。当对 DE 薄膜施加电压时,如图 14,DE 薄膜的上下表面会积累相反电荷,电荷相互吸引形成静电力,挤压 DE 薄膜,而 DE 薄膜又可看成不可压缩材料(泊松比为 0.49,接近不可压缩材料的泊松比 0.5),加上单侧同性电荷又相互排斥,

因此 DE 薄膜最终表现为厚度变薄(z 方向),平面方向扩张。目前,介电弹性体材料的电致应变、能量密度和响应性等性能已经达到了与生物骨骼肌相当甚至超过的水平。因此,采用介电弹性体制造微型爬行机器人具有足够的优势^[58-61],如表 4 所示。

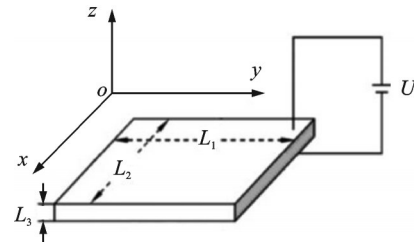


图 14 介电弹性体变形原理图

Fig.14 Principle diagram of dielectric elastomer deformation

表 4 介电弹性体驱动微型爬行机器人对比

Table 4 Comparison of micro crawling robots driven by dielectric elastomer

年份	微机器人名称	驱动器数量	质量/g	长度/cm	速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度/(倍体长 $\cdot\text{s}^{-1}$)
2019	DEAnsect	3	1	4	3	0.75
2019	Rollbot	1	—	8	—	—
2021	TENG-Bot	1	10.5	0.5	11	2.2
2023	北卡州立大学爬行机器人	2	—	0.05	0.075	1.5
2023	浙江大学与宁夏大学爬行机器人	1	0.45	1.5	6	4

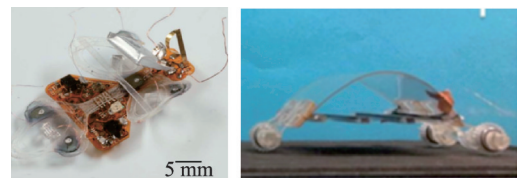
2019年,洛桑联邦理工学院开发了一种名叫 DEAnsect 的仿昆虫软体机器人^[62],如图 15(a)所示,长 40 mm,运动速度快(30 mm/s 有导线连线,12 mm/s 自带电源无线),超轻(1 g),动力来源于 3 个低压堆叠介电弹性体驱动器,工作电压为 450 V,频率响应超过 600 Hz。

2021年,西安交通大学开发了一种名叫 TENG-Bot 的单向介电弹性体驱动软体机器人^[64],如图 15(b)所示。它将介电弹性体的变形方向与机器人运动方向进行自由度上的一致,实现了高效的能量转换,产生的最大爬行速度为 110 mm(2.2 体长/s),有效载荷能力为 40 g。

2019年,加州理工学院研发了受折纸结构启发的 Rollbot 软机器人^[63],可以根据外部刺激移动和改变形状,如图 15(c)所示。Rollbot 以平板开始,大约长 8 cm,宽 4 cm,当放置在热表面上时会卷曲成五角形轮。具体为嵌入在腿部 5 个侧面中的每个侧面上的铰链在与热表面接触时折叠,推动腿部转向另一侧进行爬行。

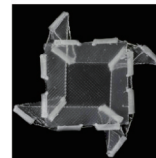
2023年,北卡罗来纳州立大学受到毛毛虫等软体动物启发设计出了具有双向运动的节能爬行机器人^[65],如图 15(d)所示。该爬行机器人通过在基于液晶弹性体的热双晶驱动器中对分布式、可编程的纳米银线加热器进行焦耳加热,最后实现前后运动。

2023年,宁夏大学与浙江大学合作开发了一种 3D 打印的可高频响应人造肌肉,并利用该人造肌肉,设计和制造了一种昆虫大小的软体机器人^[66],如图 15(e)所示。整个机器人仅长 15 mm,比硬币小,质量仅 450 mg,能够超快移动(4 倍体长/s,已报道介电弹性体驱动机器人中爬行最快)。该机器人可以在各种场地和复杂的路径上奔跑,在

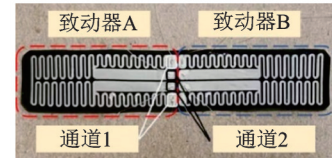


(a) DEAnsect

(b) TENG-Bot



(c) Rollbot



(d) Crawling robot developed by North Carolina State University



(e) Crawling robots developed by Zhejiang University and Ningxia University

图 15 介电弹性体驱动微型爬行机器人

Fig.15 Micro crawling robots driven by dielectric elastomer

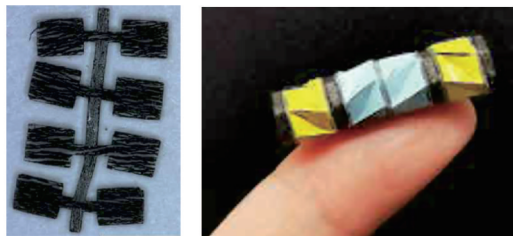
小管道内攀爬,可以实现机器人群体同时工作,并可以承受和感知反复的冲击,展示出较高的鲁棒性、良好的环境适应性和冲击感知能力。

2.5 其他驱动器驱动的微型爬行机器人

除了上述4种主流的驱动器以外,许多新驱动器也逐渐应用于微型爬行机器人上^[67-71]。

磁驱动材料多是将磁性粒子混入硅橡胶等软材料的复合材料。在磁场的作用下,磁性粒子可以被磁化,产生有效的磁化曲线,而磁化曲线的方向和幅值等也是可以改变的。当将磁响应材料制成的驱动器置入磁场中时,空间分布的磁场将和磁性粒子相互作用,使磁性粒子的磁场和空间磁场对齐,从而产生扭矩,导致收缩、伸长和弯曲等变形。通过改变驱动信号、磁化曲线、材料的形状和刚度等,可以设计出不同变形模态的驱动器。由于磁场可以穿透大范围的材料,并且可以实现无缆驱动,磁性驱动器是在狭小空间下作业的理想选择。

2019年,多伦多大学利用磁性材料和3D打印,研发出可控制的、只有几毫米大小的多足桨式爬行机器人^[72],如图16(a)所示,机器人可以在填充有硅油的微通道中的运动。2022年,斯坦福大学提出了一种基于磁驱动Kresling折纸结构的微型爬行机器人^[73],如图16(b)所示,通过分布式磁化设计和磁场控制,可以实现灵巧的导航,同时其各向异性和磁场可调的结构刚度特性保证了其有效的克服来自侧向的运动阻力。

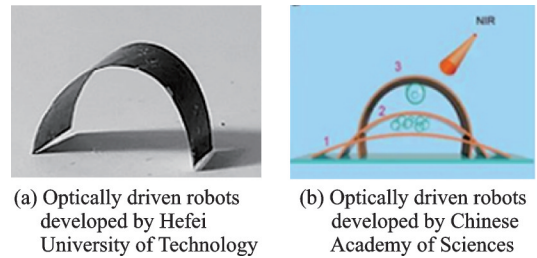


(a) Magnetic driven robot developed by University of Toronto (b) Magnetic driven robot developed by Stanford University

图16 磁驱动微型爬行机器人

与磁驱动类似,光驱动也具有可远程控制、响应迅速和微小型化等特点。光驱动材料通常是在硅胶、液晶弹性体等聚合物中添加对光比较敏感的填充物来形成,在光照的情况下,它们可以弯曲、收缩或者膨胀等,并且这些变形都是可逆的。改变光的波长、强度和照射时间等都可以影响这些驱动器的响应,从而对光驱动机器人编程,使它们实现期望的运动。2021年,合肥工业大学设计了一种基于共价桥接黑磷(Black phosphorus, BP)-碳纳米管(Carbon nanotubes, CNT)异质结构的无束缚软

光驱动器,在恒定光照射下具有自振荡和趋光运动。基于驱动器优良的驱动性能、可定制性和易于组装的特点,设计了具有自振荡的英寸虫状软机器人和仿生软机器人^[74],如图17(a)所示。2022年,中国科学院兰州化学物理研究所受弹涂鱼陆地爬行、液面游动和跳跃的启发,开发出一种内置多孔结构的多功能光驱动和多场景应用的仿生机器人^[75],如图17(b)所示。在光刺激下,由于受光热效应的影响薄膜周围液体表面张力变小,形成梯度张力,驱使薄膜向高表面张力区域移动,即马兰戈尼效应,驱动机器人可以在水面迅速游动。



(a) Optically driven robots developed by Hefei University of Technology (b) Optically driven robots developed by Chinese Academy of Sciences

图17 光驱动微型爬行机器人

3 微型爬行机器人的关键技术

微机器人的发展日新月异。实际应用下,微型爬行机器人通常需要考虑几个不同的关键技术,如图18所示的驱动、供能、制造和设计等。这些关键技术的目的都应集中在如何使微型爬行机器人性能与其应用环境相匹配。此外,每个关键技术的突破创新都有望显著促进微型爬行机器人的进一步发展。

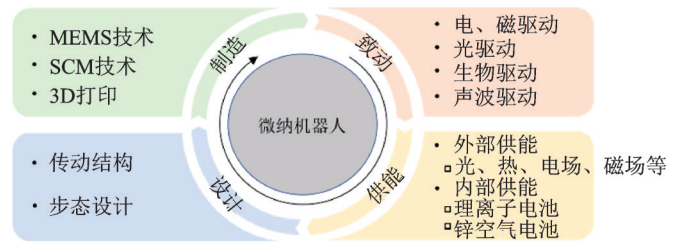


图18 微型爬行机器人关键技术

Fig.18 Key technologies of micro crawling robots

3.1 微型爬行机器人的能源及驱动技术

在微型爬行机器人领域,运动通常会受到系绳的限制,系绳可以是与电源的物理连接,也可以是处于指定场源或连接无线链路,例如磁场、声场、电场、化学环境和光。根据能源的驱动模式,微型爬行机器人的驱动与供能方式一般由电、磁、压电、光和热等实现,如表5所示。

电池因为液体电解质的高离子传导性而被广泛作为机器人脱绳的选择,但是需要确保其包装是

表5 微型爬行机器人的驱动与供能方式

Table 5 Driving and energy supply methods of micro crawling robots

驱动方式	特点	局限性
电	能量密度高 应变大 响应快	高驱动电压 寿命短 功率密度低
磁	结构简单 远程控制 无需内置能源	力传递滞后 磁场干扰环境
光	结构简单 远程控制 无需内置能源	力传递滞后 驱动力小
热	局部控制 变量量大	力传递滞后

坚固的以防止内部电解液泄漏,并保护组件免受外部影响。由于自动化程度、面临环境的不同会导致微型爬行机器人可能产生难以预测的耗电量,因此确定电池的精确能量需求十分困难。如果微型爬行机器人想要实现与蚂蚁等生物系统同等的功能及智能,所需要的能量会超过它们的十倍以上,这也意味着对能源输入的需求将大大增加。这种巨大的能源需求是当前微型爬行机器人系绳设计背后的驱动因素,也是微型爬行机器人能够实现完全自主所面临的最大挑战之一。微型爬行机器人的总体能源效率由其驱动器和电子器件的效率决定,通常在0.1~0.5。尽管提高驱动器的效率是释放脱线微型爬行机器人全部潜力的最直接方法,但是探索提高能源能量密度的方法会是更接近微型爬行机器人独立运行的一种途径。

大型机器人可以很容易地使用标准尺寸的电池,如圆柱形、棱柱形和袋状电池,以消除对系绳的需求,但将所有这些组件(包括电极、电解液和封装结构)集成到微型爬行机器人中是一个重大挑战。因此,轻便的纽扣电池和小型条状电池等紧凑型电池经常用于微型爬行机器人。上述传统的电池因为正负电极之间需要间隔一定的距离(100 μm左右)让电子可以通过电解质,这也是其物理的尺寸极限。薄膜电池电极的间隔则只需要几微米,加上阴极材料电沉积技术的出现也使得在薄膜电池厘米尺度上制造密集电极的可能性,因此集成薄膜电池将会是微型爬行机器人实现脱绳运动的有效途径。

总而言之,能源及驱动技术可极大影响机器人平台的移动性、承载能力和灵活性等性能,但是目前来说提高电池能量密度的研究进展比较缓慢,因此许多研究机构将目光转向了探寻新材料制造或者新能源供能的新驱动方式。

3.2 微型爬行机器人的制造技术

微型爬行机器人的制造技术决定了微型爬行机器人的成本和性能,主要有激光切割与装配、SCM、3D打印技术和MEMS技术等,如表6所示。

表6 微型爬行机器人的制造方式

Table 6 Manufacturing method of micro crawling robots

制造方式	特点	局限性
激光切割	微米级精度 操作简单 二维平面加工	无法完成复杂 三维结构加工
SCM技术	微米级精度 材料兼容性高 成本低	装配精度与一致性 低,操作复杂
3D打印	纳米级精度 操作简单 三维结构加工	制造时间长 单一材料
MEMS技术	纳米级精度 集成度高 大批量制造	成本高 加工条件严苛 材料单一

当考虑到制造毫米尺度的爬行机器人时,由于尺寸的关系(部分器件达到微米尺度),许多研究者会使用MEMS技术进行爬行机器人的制造。1999年,瑞典皇家理工学院利用MEMS技术制造并开发了第一款可批量制造的硅基微型爬行机器人^[76],该机器人由长度为0.5或1 mm的可运动硅腿阵列组成,如图19所示。该尺寸为15 mm×5 mm的微型机器人,可以实现6 mm/s的行走速度和2.5 g的承载能力。

在毫米尺度的微型仿生机器人技术中,碳纤维以其优异的材料结构特性成为了机器人基础材料的主要选择。因此对于机身框架等刚性零部件,大多使用薄碳纤维板进行加工制造。在微型爬行机器人的制造过程中,最重要同时也是对工艺要求最高的,就是柔性铰链的制造。柔性铰链是利用材料的变形产生位移的一种特殊运动副,用于提供绕轴作复杂运动的有限角位移,它具有常规铰链难以企及的微尺寸、无机械摩擦、无间隙、高灵敏度、高结构紧凑等优点,在微机电系统、仿生学、生物医学工程、精密机械和精密测量等对微尺度机械结构精度要求极高的领域中有着广泛的应用。柔性铰链的制造有着高效率、质量轻的技术要求,这对于减轻爬行机器人驱动器的负担有很大的帮助。哈佛大学的Wood等^[77]提出了一种复合型柔性铰链的设计与加工方案,该柔性铰链的结构为碳纤维-聚脂薄膜-碳纤维的三层材料层叠而成的“三明治”结构,如图20所示。利用SCM技术可以完成这种复

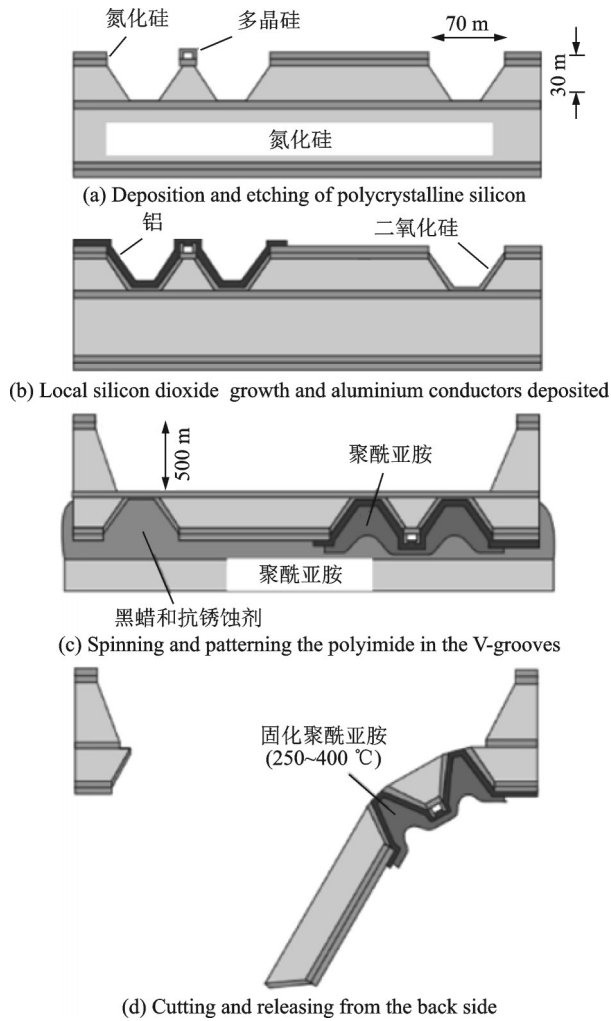


图19 MEMS技术加工过程
Fig.19 Manufacturing process of MEMS technology

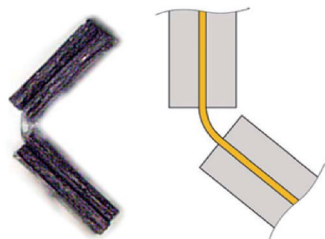


图20 柔性铰链结构原理示意图^[77]
Fig.20 Schematic diagram of flexible hinge structure principle^[77]

合型柔性铰链的加工。

SCM技术解决了MEMS技术的缺点和宏观机械加工技术的局限性,实现该技术不需要成本高昂的设备且整个工艺能在几个小时内完成。SCM技术最大的优势是可以对刚柔复合结构进行平面一体化加工,通过二维展开并三维折叠从而成型为特定的机械结构,利用这种工艺技术即可实现对厘米和毫米级结构的高精度大批量的加工制造。SCM技术通常使用高精度加工,高模量复合材料(如碳纤维)和薄膜聚合物(如聚酰亚胺)作为刚柔

复合结构。

柔性铰链的基本加工过程如图21所示,图21(a)将单片碳纤维板材结构固定于基板上;图21(b)利用高能脉冲激光对铰链部分进行材料去除;图21(c)将柔性薄膜粘接于加工完成的碳纤维板上;图21(d)切割柔性薄膜边缘;图21(e)将两块加工完成碳纤维板对接;图21(f)对接后进行热压;图21(g)释放后形成柔性铰链;

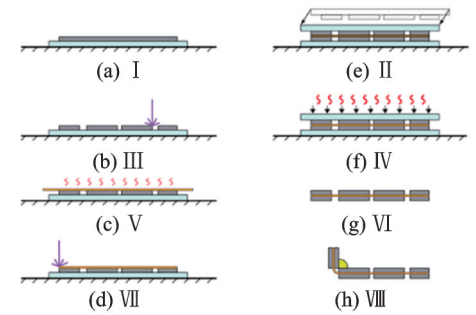


图21 柔性铰链制造过程

Fig.21 Flexible hinge manufacturing process

近年来,3D打印技术快速发展,通过3D打印能实现普通加工技术无法实现的结构,因此该技术可将电子元件和结构设计巧妙结合,打印出实现全部机器人功能的部件^[78-80]。2022年,加州大学洛杉矶分校利用3D打印超材料制造了一款能够实现自由行走、避障甚至跳跃的微型机器人^[81],如图22所示,这个3D打印的超材料微型机器人的尺寸仅有一枚硬币大小,大大简化了常规的运动系统,具有很高的集成度。不仅如此,该技术能把包括介电材料、压电材料和导电金属在内不同性质的材料一次性打印。这种3D打印的独特性在于,通过该技术可直接打印出电子元件(如驱动器、机器手臂),并且还具备材料自身的高频率响应(10 MHz)属性。

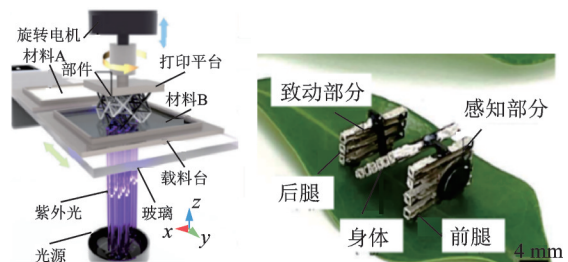


图22 3D打印技术制造过程
Fig.22 3D printing technology manufacturing process

3.3 微型爬行机器人的设计技术

3.3.1 四足微型爬行机器人设计

四足仿生微型爬行机器人的结构设计一般由仿生学指导,主要参考来自陆地的哺乳动物、爬行

动物的生理结构或运动方式。近年来,开发高性能、高环境适应性、高稳定性和高承载能力的四足爬行机器人已经成为了仿生机器人技术领域的主流研究方向。

HAMR 机器人经历了十多年的迭代升级,目前主要的驱动结构为压电片驱动的球面五杆机构^[38-39],如图 23 所示。当通交流电时,由于压电作用压电片开始上下摆动,然后将力与位移输入球面五杆机构,从而驱动腿部的摆动。通过控制电流的大小和方向,可以控制压电片的摆动方向,从而完成腿部的运动循环过程。

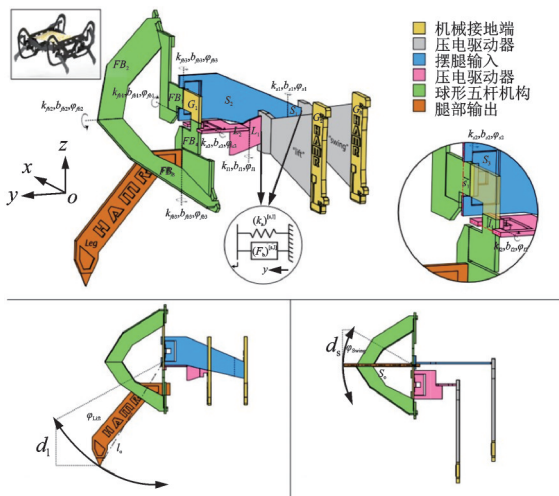


图 23 HAMR 爬行机器人的结构设计
Fig.23 Structural Design of HAMR

日本大学通过模仿昆虫的步态研发了几种微型爬行机器人^[82],其中最具代表性的如图 24(a)所示。该机器人的腿部为 4 条使用 MEMS 技术加工的硅片制成,并由 4 条 SMA 构成的人工肌肉驱动,如图 24(b)所示。MEMS microrobot 的腿部为两组四连杆机构相连,通过人工肌肉收缩和伸展的线性运动转化为腿的踏板式摆动。

3.3.2 六足微型爬行机器人设计

六足类的微型爬行机器人主要模仿六足类昆

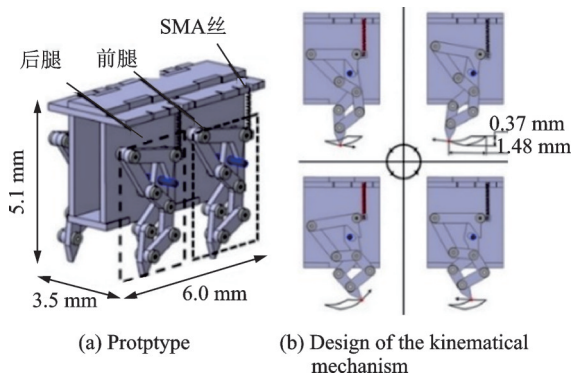


图 24 MEMS 爬行机器人的设计
Fig.24 Design of MEMS crawling robot

虫和节肢动物。六足微型爬行机器人具有很高的灵活性和很强的环境适应性,其冗余结构也确保了即使一条腿失去移动能力时剩余的腿部也能保持自身稳定行走。

如 2.3 节中所提到的由加州大学开发的 Roach 系列机器人,最新已经更新到 2018 年的第 5 代 LoadRoACH^[83]。LoadRoACH 使用如图 25(a)所示的复合结构,柔性的 PET 层允许弯曲运动。如图 25(b)所示的自定义变速器可以容易地维护或更换,与平面四连杆机构相比,其双曲柄设计提供了更有效的机械传递。特别的,设计的尾部可以提高其转向的机动性,如图 25(c,d)所示。

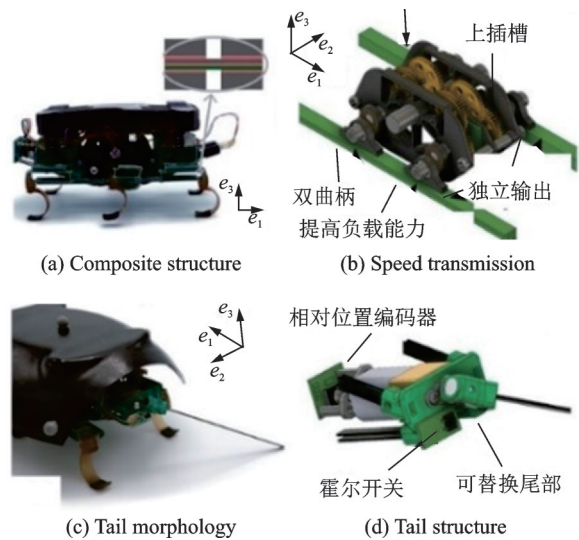


图 25 LoadRoACH 爬行机器人的结构设计
Fig.25 Design of the LoadRoACH

同样的,如 1.2 节中提到的由加州大学伯克利分校开发的 DASH 机器人也是六足结构。和 RoACH 系列机器人不同的是,DASH 机器人使用柔性铰链将动力从电机传递到腿部,其腿部的末端遵循类似圆形的轨迹。DASH 的关节运动学模型如图 26 所示,前视图(图 26(a))显示了腿部垂直方向的运动,每对腿在垂直方向上反向运动,俯视图

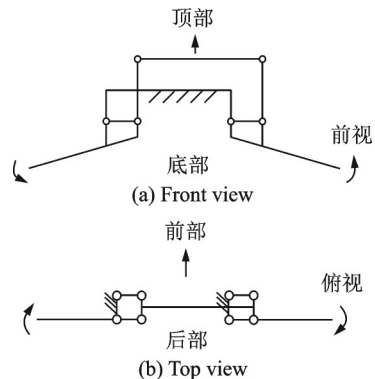


图 26 DASH 的结构设计
Fig.26 Design of DASH

(图26(b))显示了一对腿部的水平运动,四连杆机构带动其中一条腿向前运动的同时带动另外一条腿反向运动。

从以上微型爬行机器人可以看出,HAMR的性能比较优异,其中的关键因素是由其独特的球面四连杆机构决定的,球面四连杆结构可以有效地将压电片的振动转化为腿部运动。该运动结构的优越性为微机器人技术的进一步发展奠定了良好的基础。

3.4 微型爬行机器人的感知与控制技术

如何选择感知与控制方案取决于微型爬行机器人自身的材料、结构和预期实现的功能。与基于生物神经元的计算智能不同,在没有类人大脑的情况下,微型爬行机器人需要通过更好的感知模块和器件布置方式来减轻控制方面的负担。机载的控制系统通常将机械/电气电路与驱动器一起集成到驱动系统/机器人内部,以无线方式实现特定的功能。非机载的控制系统通常通过系绳或施加物理场的方式将控制部件与微型爬行机器人主体解耦,例如前文提到的需要系绳的微电机、压电驱动器等,以及需要通过施加光和磁场的驱动器等。得益于制造技术的发展,微型爬行机器人可以通过集成灵巧的机械结构和具有自主外部环境信息感知、检测、交互和决策能力的感知模块实现一定程度的感知决策功能。微爬行机器人的控制系统主要通过3种常见的途径实现:

(1)基于静态稳定的控制方法。通常,在对微型爬行机器人步态进行控制时,以协调腿部关节之间的运动为目的的步态轨迹规划显得尤为重要,保证机器人运动过程中的稳定通常以零力矩点(Zero moment point, ZMP)等静态稳定性判断依据来保证。ZMP准则可以提高四足机器人在行走时的动态平衡,但却是一种繁琐且不稳定的控制策略。

(2)基于动力学模型的控制方法。在当下对机器人的控制方法中,基于动力学模型的控制算法具有不可替代的作用。但因为微型爬行机器人的足端接触环境复杂,还受到阻断接触地面时瞬间接触力大小变化的影响,所以对微型爬行机器人建立精确的动力学模型难度较大。动力学模型控制方法有以下几种:①逆动力学控制,这种控制方法下要想得到较高的控制精度,对动力学方程的准确性提出了较高的要求,计算量较大,并且在行走过程中腿之间也会产生相互作用的干扰力,使实际控制较复杂;②虚拟模型控制,这种控制方法以在机器人腿部添加虚拟部件的方式,建立虚拟部件与关节输出力矩之间的关系;③基于生物动力学特性简化模型的控制方法,这是一种将动物的运动特点总结

成原理后应用到机器人的步态控制中,通过大量的观察,将得出的结论应用到实际控制中。

(3)基于生物所具有的神经性调节机制以及行为特性的控制方法。中枢模式发生器(Central pattern generators, CPG)是一种生物控制方法,不需要传感器反馈就能产生节律模式输出的神经网络。CPG主要特征有:①可以在无节律信号输入、无反馈信息及缺少高层控制命令的情况下产生稳定的节律信号;②通过相位滞后及相位锁定,可以产生多种稳定的相位关系,实现机器人多样的运动模式;③易于集成环境反馈信号,形成反馈控制系统;④结构简单,具有很强的鲁棒性和适应能力。CPG的这些特征与微型爬行机器人的运动特点相符合,常被用于节律运动的底层控制器,同时在CPG模型中耦合高层控制中心的控制命令及反馈信息,可以在线产生稳定、协调的节律信号,控制机体的节律运动。

4 微型爬行机器人未来展望

4.1 面临的问题

虽然微型爬行机器人在能源驱动、设计制造和控制等方面取得了一系列进展,但距离实际应用仍然有一定距离,主要面临以下技术挑战:

(1)微型爬行机器人需要全新的设计方案,当前的微型爬行机器人大多由驱动器直接驱动,并无设计方案,这限制了其运动效率和运动能力。

(2)具有设计方案的微爬行对仿生“功构一体”智能材料与结构的需求迫切。现有微型爬行机器人的材料和结构通常功能有限,为了增加其功能需要叠加使用,制造组装过程复杂。

(3)微型爬行机器人对高效率能源供给与转换方式提出了迫切需求,微型化对能源的能量密度以及转换效率都有比较高的要求,现有能源供给与转换方式难以满足此要求。

(4)微型爬行机器人对智能化感知与信息处理系统的集成化程度提出了苛刻要求,微型爬行机器人既需要集成智能信息处理算法的软件,又需要高度集成机械、能源、传感等多个模块的硬件,因此确定如何在微型机器人的尺寸和性能之间达成妥协是必须考虑的问题。

(5)微型爬行机器人的集群控制难以实现,目前由于绝大多数微型爬行机器人均不携带相关计算和信息交互载荷,因此难以实现微型爬行机器人之间或者与上位机的信息交互。

4.2 应用潜力

相比于传统无人运动平台,微型爬行机器人具

有体积微小、隐蔽性强等显著优点。目前,微型爬行机器人正朝着智能化、集成化、多功能化和低成本化的方向发展,开展微型爬行机器人的技术研究,具有以下几个方面的重大应用研究潜力:

(1)微型爬行机器人具有体积小、运动灵活且隐蔽性强等优异特性,这会极大提高其渗透侦察能力。同时,因为具备一定的承载能力,微型爬行机器人还具有携带不同设备或者物体的平台能力。

(2)微型爬行机器人应配备机载控制系统从而具备信息处理和决策能力,在没有人为干预的情况下自主应对和适应各种应用场景和环境。在过去的十年中,机器学习在不同领域都得到了广泛的研究和应用。鉴于其通用性,机器学习等技术有助于未来设计具有更智能控制系统的微型爬行机器人,用于实现自主控制和完成复杂任务。

(3)制造成本较低,容易集群化是微型爬行机器人的优势。通过将集群化、搭载不同传感器的微型爬行机器人投入战场或者需要智能检测的场所,并通过集群和协同控制,可以实现全方面实时的动态监测和决策。

(4)跨尺度、跨域微型机器人是未来微型机器人的重点研究方向。能够跨域的微型爬行机器人具备一般单域机器人无法执行任务的场景,提升了自身的综合作战能力。另外,微型爬行机器人可以与传统平台互补,提升无人平台的综合能力。

5 结 论

微型爬行机器人是微型机器人一个重要的分支,吸引了世界各地大量的研究人员。本文综述了微型爬行机器人的研究现状,分析了微型爬行机器人的关键技术,从能源驱动、制造技术和设计集成介绍和讨论了当前具有代表性的微型爬行机器人。最后,详细地介绍了目前微型爬行机器人所面临的一些问题,分析了其应用潜力并预测了未来的发展方向。微型爬行机器人具有广泛的应用前景,有望在未来具有重要的应用价值。随着技术的进步,许多可以制造出更小、更强大电子和机械部件的设备和方法的出现将有助于制造更多更强大的微型爬行机器人。

参考文献:

[1] 康荣杰,杨铨浩,杨名远,等.会思考的机器——机械智能[J].机械工程学报,2018,54(13):15-24.
KANG Rongjie, YANG Chenghao, YANG Mingyuan, et al. Machines which can think—Mechanical intelligence (MI)[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 15-24.

[2] RICHARD O H, EUGENE C. Future technology-driven revolutions in military operations. Results of a workshop: DB-110-ARPA, [R]. Santa Monica, CA: RAND Corp, 1994.

[3] 佚名.美国制定毫米级机器人计划应用于重大灾难搜救任务[J].机械制造,2018,56(8):63.
Anonymity. The United States has developed a millimeter scale robot program for major disaster search and rescue missions[J]. Machinery, 2018, 56(8): 63.

[4] 徐小云,颜国正,丁国清,等.微型六足仿生机器人及其三角步态的研究[J].光学精密工程,2002(4):392-396.
XU Xiaoyun, YAN Guozheng, DING Guoqing, et al. Research on miniature hexapod bio-robot and its tripod gait [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2002(4): 392-396.

[5] 贾伟超.微型爬行机器人的微驱动及结构设计[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
JIA Weichao. Micro drive and structural design of micro crawling robots[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.

[6] 田健鹏,曹乐,徐浩洋,等.基于Kimura神经元振荡器的六足仿生机器人步态控制研究[J].中国医学物理学杂志,2023,40(12):1540-1547.
TIAN Jianpeng, CAO Le, XU Haoyang, et al. Gait control for bio-inspired hexapod robot based on Kimura neural oscillator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2023, 40(12): 1540-1547.

[7] 杨泽玺.六足机器人步态控制算法研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
YANG Zexi. Research on gait control algorithm for hexapod robots[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[8] 姚文莉.基于广义坐标形式的高斯最小约束原理的多刚体系统动力学建模[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(4):708-712.
YAO Wenli. Dynamical modeling of multi-rigid-body system based on gauss principle of least constraint in generalized coordinates[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(4): 708-712.

[9] HOFFMAN K L, WOOD R J. Myriapod-like ambulation of a segmented microrobot[J]. Autonomous Robots, 2011, 31(1): 103-114.

[10] YUN R, QI M, LIU Z, et al. Modeling and testing of a fast-crawling millimeter-sized robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(9): 5862-5869.

[11] PAPADOPOULOS E, REY D A. The force-angle measure of tipover stability margin for mobile manipulators[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 33(1): 29-48.

[12] HIROSE S, TSUKAGOSHI H, YONEDA K. Nor-

- malized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain[C]//Proceedings of 2001 ICRA IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, South Korea: IEEE, 2001: 181-186.
- [13] GARCIA E, DE SANTOS P G. A new dynamic energy stability margin for walking machines[C]//Proceedings of International Conference on Advanced Robotics. Coimbra, Portugal:[s.n.], 2003: 1014-1019.
- [14] AGHELI M, NESTINGER S S. Adaptive mobile robotics[M]. [S.l.]: World Scientific, 2012: 417-424.
- [15] AGHELI M, NESTINGER S S. Force-based stability margin for multi-legged robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 83: 138-149.
- [16] VARTHOLOMEOS P, PAPAPOPOULOS E. Dynamics, design and simulation of a novel microrobotic platform employing vibration microactuators[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2006, 128(1): 122-133.
- [17] ZARROUK D, FEARING R S. 1STAR, A one-actuator steerable robot[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014: 2569.
- [18] RUBENSTEIN M, AHLER C, HOFF N, et al. Kilibot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(7): 966-975.
- [19] ZHOU J, SUZUKI M, TAKAHASHI R, et al. Development of a Δ -type mobile robot driven by three standing-wave-type piezoelectric ultrasonic motors[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6717-6723.
- [20] ZHANG Y, ZHU R, WU J, et al. SimoBot: An underactuated miniature robot driven by a single motor [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5748-5759.
- [21] BIRKMEYER P, PETERSON K, FEARING R S. DASH: A dynamic 16g hexapedal robot[C]//Proceedings of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St Louis, MO, USA: IEEE, 2009: 2683-2689.
- [22] MAHKAM N, BAKIR A, OZCAN O. Miniature modular legged robot with compliant backbones[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 3923-3930.
- [23] KARAKADIOGLU C, ASKARI M, OZCAN O. Design and operation of MinIAQ: An untethered foldable miniature quadruped with individually actuated legs [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, Germany: IEEE, 2017: 247-252.
- [24] ASKARI M, KARAKADIOGLU C, AYHAN F, et al. MinIAQ-II : A miniature foldable quadruped with an improved leg mechanism[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Macau, China: IEEE, 2017: 19-25.
- [25] GUC A F, KALIN M A I, KARAKADIOGLU C, et al. C-Quad: A miniature, foldable quadruped with C-shaped compliant legs[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Macau, China: IEEE, 2017: 26-31.
- [26] KALIN M A I, AYGUL C, TURKMEN A, et al. Design, fabrication, and locomotion analysis of an untethered miniature soft quadruped, SQuad[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 3854-3860.
- [27] TANG L, WANG C, MA S, et al. Multidirectional planar motion transmission on a single-motor actuated robot via microscopic galumphing[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(9): 2307738.
- [28] DHARMAWAN A G, HARIRI H H, SOH G S, et al. Design, analysis, and characterization of a two-legged miniature robot with piezoelectric-driven four-bar linkage[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2018, 10(2): 021003.
- [29] HARIRI H H, SOH G S, FOONG S, et al. A highly manoeuvrable and untethered under-actuated legged piezoelectric miniature robot[C]//Proceedings of the 43rd Mechanisms and Robotics Conference. Anaheim, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2019: V05BT07A004.
- [30] ROBLES-CUENCA D, RAMÍREZ-PALMA M R, RUIZ-DÍEZ V, et al. Miniature autonomous robot based on legged in-plane piezoelectric resonators with onboard power and control[J]. *Micromachines*, 2022, 13(11): 1815.
- [31] LIU Y, CHEN Y, FENG B, et al. S2 worm: A fast-moving untethered insect-scale robot with 2-DoF transmission mechanism[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 6758-6765.
- [32] CHEN E, YANG Y, LI M, et al. Bio-mimic, fast-moving, and flippable soft piezoelectric robots[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(20): 2300673.
- [33] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- SHEN Guanlin, HU Gengkai. *Mechanics of composite materials*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [34] 柴双双, 张卫平, 柯希俊, 等. 仿昆扑翼微飞行器中压电驱动器的性能参数分析[J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(5): 663-668.
- CHAI Shuangshuang, ZHANG Weiping, KE Xijun,

- et al. Piezoelectric actuators for insect-like flapping-wing micro aerial vehicle[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2015, 49(5): 663-668.
- [35] BAISCH A T, WOOD R J. *Robotics research*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 715-730.
- [36] BAISCH A T, SREETHARAN P S, WOOD R J. Biologically-inspired locomotion of a 2g hexapod robot [C]//*Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Taipei, China: IEEE, 2010: 5360-5365.
- [37] BAISCH A, HEIMLICH C, KARPELSON M, et al. HAMR3: An autonomous 1.7g ambulatory robot[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaat2874.
- [38] OZCAN O, BAISCH A T, WOOD R J. Design and feedback control of a biologically-inspired miniature quadruped[C]//*Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Tokyo: IEEE, 2013: 1438-1444.
- [39] BAISCH A T, OZCAN O, GOLDBERG B, et al. High speed locomotion for a quadrupedal microrobot [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(8): 1063-1082.
- [40] GOLDBERG B, ZUFFEREY R, DOSHI N, et al. Power and control autonomy for high-speed locomotion with an insect-scale legged robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(2): 987-993.
- [41] JAYARAM K, SHUM J, CASTELLANOS S, et al. Scaling down an insect-size microrobot, HAMR-VI into HAMR-Jr[C]//*Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Paris, France: IEEE, 2020: 10305-10311.
- [42] DOSHI N, GOLDBERG B, SAHAI R, et al. Model driven design for flexure-based Microrobots[C]//*Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 4119-4126.
- [43] KARPELSON M, WATERS B H, GOLDBERG B, et al. A wirelessly powered, biologically inspired ambulatory microrobot[C]//*Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China: IEEE, 2014: 2384-2391.
- [44] CHEN Y, DOSHI N, GOLDBERG B, et al. Controllable water surface to underwater transition through electrowetting in a hybrid terrestrial-aquatic microrobot [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2495.
- [45] DE RIVAZ S D, GOLDBERG B, DOSHI N, et al. Inverted and vertical climbing of a quadrupedal micro-robot using electroadhesion[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaau3038.
- [46] 高煜斐, 周生喜. 一种压电驱动的三足爬行机器人 [J]. *力学学报*, 2021, 53(12): 3354-3365.
- GAO Yufei, ZHOU Shengxi. A piezoelectric-driven three-legged crawling robot [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(12): 3354-3365.
- [47] 何世界, 吴医博, 周生喜. 一种谐振式压电爬行机器人的设计与实验[J]. *力学学报*, 2023, 55(9): 1983-1999.
- HE Shijie, WU Yibo, ZHOU Shengxi. Design and experiment of a resonant piezoelectric crawling robot [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(9): 1983-1999.
- [48] KABUTZ H, JAYARAM K. Design of CLARI: A miniature modular origami passive shape-morphing robot[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(12): 2300181.
- [49] ZHENG M, WANG D, ZHU D, et al. PiezoClimber: Versatile and self-transitional climbing soft robot with bioinspired highly directional footpads[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(6): 2308384.
- [50] MIAO Z, LIANG J, CHEN H, et al. Power autonomy and agility control of an untethered insect-scale soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(4): 749-759.
- [51] LIN H T, LEISK G G, TRIMMER B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(2): 026007.
- [52] DOROFTEI I, STIRBU B. Application of Ni-Ti shape memory alloy actuators in a walking micro-robot [J]. *Mechanics*, 2014, 20(1): 70-79.
- [53] HUANG X, KUMAR K, JAWED M K, et al. Highly dynamic shape memory alloy actuator for fast moving soft robots[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(4): 1800540.
- [54] HOOVER A M, STELTZ E, FEARING R S. RoACH: An autonomous 2.4g crawling hexapod robot [C]//*Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice: IEEE, 2008: 26-33.
- [55] NGUYEN X T, CALDERON A A, RIGO A, et al. SMALLBug: A 30-mg crawling robot driven by a high-frequency flexible sma microactuator[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6796-6803.
- [56] BENA R M, NGUYEN X T, CALDERON A A, et al. SMARTI: A 60-mg steerable robot driven by high-frequency shape-memory alloy actuation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 8173-8180.
- [57] QIU J, JI A, ZHU K, et al. A gecko-inspired robot with a flexible spine driven by shape memory alloy springs[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(4): 713-723.
- [58] CAO J, QIN L, LIU J, et al. Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 21:

- 9-16.
- [59] GU G, ZOU J, ZHAO R, et al. Soft wall-climbing robots [J]. *Science Robotics*, 2018, 2018, 3(25): eaat2874.
- [60] WU C, YAN H, CAI A, et al. A dielectric elastomer actuator-driven vibro-impact crawling robot[J]. *Micro-machines*, 2022, 13(10): 1660.
- [61] HAN Y, SHI B, XIE E, et al. A bio-inspired co-simulation crawling robot enabled by a carbon dot-doped dielectric elastomer.[J]. *Soft Matter*, 2024 (16): 3436-3447.
- [62] JI X, LIU X, CACUCCILO V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37): eaaz6451.
- [63] KOTIKIAN A, MCMAHAN C, DAVIDSON E C, et al. Untethered soft robotic matter with passive control of shape morphing and propulsion[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33): eaax7044.
- [64] SUN W, LI B, ZHANG F, et al. TENG-Bot: Triboelectric nanogenerator powered soft robot made of uni-directional dielectric elastomer[J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 106012.
- [65] WU S, HONG Y, ZHAO Y, et al. Caterpillar-inspired soft crawling robot with distributed programmable thermal actuation[J]. *Science Advances*, 2023, 9(12): eadf8014.
- [66] ZHU Y, LIU N, CHEN Z, et al. 3D-Printed high-frequency dielectric elastomer actuator toward insect-scale ultrafast soft robot[J]. *ACS Materials Letters*, 2023, 5(3): 704-714.
- [67] YANG X, CHANG L, PÉREZ-ARANCIBIA N O. An 88-milligram insect-scale autonomous crawling robot driven by a catalytic artificial muscle[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eaba0015.
- [68] LIU X, LIU Z, ZHU Y, et al. Moving mechanism of a high-speed insect-scale microrobot via electromagnetically induced vibration[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(3): 662-673.
- [69] ZHU Y, QIM, LIU Z, et al. A 5-mm untethered crawling robot via self-excited electrostatic vibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(2): 719-730.
- [70] MAO G, SCHILLER D, DANNINGER D, et al. Ultrafast small-scale soft electromagnetic robots[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4456.
- [71] LIU Z, ZHAN W, LIU X, et al. A wireless controlled robotic insect with ultrafast untethered running speeds [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 3815.
- [72] XU T, ZHANG J, SALEHIZADEH M, et al. Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(29): eaav4494.
- [73] ZE Q, WU S. Soft robotic origami crawler[J]. *Science Advances*, 2022, 8(13): eabm7834.
- [74] HU Y, JI Q, HUANG M, et al. Light-driven self-oscillating actuators with phototactic locomotion based on black phosphorus heterostructure[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(37): 20511-20517.
- [75] XIANG Y, LI B, LI B, et al. Toward a multifunctional light-driven biomimetic mudskipper-like robot for various application scenarios[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(17): 20291-20302.
- [76] EBEFORS T, MATTSSON J U, KÄLVESTEN E, et al. A walking silicon micro-robot[C]//*Proceedings of the 10th Int Conference on Solid-State Sensors and Actuators*. Sendai, Japan:[s.n.], 1999: 1202-1205.
- [77] WOOD R J, AVADHANULA S, SAHAI R, et al. Microrobot design using fiber reinforced composites[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(5): 052304.
- [78] CHEN D, ZHENG X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative poisson's ratios[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 9139.
- [79] CUI H, HENSLEIGH R, CHEN H, et al. Additive manufacturing and size-dependent mechanical properties of three-dimensional microarchitected, high-temperature ceramic metamaterials[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(3): 360-371.
- [80] CHEN Z, UM T I, BART-SMITH H. A novel fabrication of ionic polymer-metal composite membrane actuator capable of 3-dimensional kinematic motions[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 168(1): 131-139.
- [81] CUI H, YAO D, HENSLEIGH R, et al. Design and printing of proprioceptive three-dimensional architected robotic metamaterials[J]. *Science*, 2022, 376(6599): 1287-1293.
- [82] TANAKA D, UCHIUMI Y, KAWAMURA S, et al. Four-leg independent mechanism for MEMS micro-robot[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2017, 22(3): 380-384.
- [83] CASAREZ C S, FEARING R S. Steering of an underactuated legged robot through terrain contact with an active tail[C]//*Proceedings of 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, Spain: IEEE, 2018: 2739-2746.