科学通报 2024 年 第 69 卷 第 17 期: 2380 ~ 2400
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

仿生爬壁机器人: 研究基础、关键技术及发展预测

裴香丽, 刘书豪, 师瑞卓, 魏安民, 吴志伟, 戴振东*

南京航空航天大学机电学院, 仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016

* 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2023-07-24 收稿, 2023-12-08 修回, 2023-12-12 接受, 2023-12-13 网络版发表
国家自然科学基金(62233008)资助

摘要 爬壁机器人是移动机器人的重要分支, 能代替人工在高危、狭小、恶劣等环境工作. 研制仿生爬壁机器人从筛选具有优异攀爬能力的动物, 研究其运动行为、机体结构、附着能力、感知控制的规律入手, 凝练爬壁机器人设计准则, 发展灵活、轻质、微型、适应性广的移动机器人, 为航空、航天、救援等提供必要的装备. 这类研究受到基础科学、工程技术和产业应用等领域专家的广泛关注. 本文梳理仿生爬壁机器人研究的现状, 总结典型攀爬动物的运动行为、附着机制, 归纳爬壁机器人的附着方式、移动机构和运动控制等方面的关键技术, 分析仿生爬壁机器人附着和移动方式的特点, 给出已有爬壁机器人的仿生度, 并展望仿生爬壁机器人的核心问题和发展趋势, 为未来仿生爬壁机器人的发展提供参考意见.

关键词 仿生爬壁机器人, 仿生附着机理, 移动方式, 控制方法

在数亿年的生存竞争中, 动物进化出与环境适应且优异的运动、感知、防御、逃逸等能力, 使它们在对应环境下展现出机器设备不可比拟的优越之处, 其运动系统的精巧、灵敏、高效、可靠和抗干扰性令人惊叹不已, 为人类研制新一代机器人技术提供了新的思路和生物模板[1]. 越来越多的研究者通过观察、分析动物的攀爬、黏附等特殊技能, 理解其结构和工作原理, 模仿动物的结构机构, 并与工程需求深度融合, 以实现特定的功能, 解决工程问题, 取得了重要成果[2].

仿生学通过揭示生物系统的结构功能、能量转换、信息控制、感知导航等优异性能背后的科学原理建立模型, 为开发新的技术设备提供新原理、新方法和新途径[3,4]. 仿生机器人是动物行为学与机器人跨学科交叉的新领域, 动物运动行为研究为仿生机器人的研究提供技术创新的新思路, 使机器人结构更优、功能更强、感知更精、运动更好、能耗更低、能效更高. 同时, 仿生机器人又为理解动物运动的内在规律提供了一条新的途径. 自然界中动物的爬壁机理主要有钩爪抓附(如猫、浣熊、东方绢金龟等)、干黏附(壁虎、蜘蛛等)和湿黏附(蝾螈、树蛙等)[5]. 通过模仿这些动物的黏附结构与爬壁机理, 研制仿生附着结构, 开发能可靠运动的仿生爬壁机器人, 已成为发展高性能壁面移动机器人的重要途径.

1966年, 日本研制出第一台负压吸附的爬壁机器人[6], 此后基于负压吸附[6,7]、磁吸附[8,9]、静电吸附[10]等原理的爬壁机器人得到了迅速发展. 由于此类爬壁机器人能耗较高, 需要外接能源维持附着, 导致机器人比较笨重、噪音较大. 2004年, 美国研发出仿生干黏附爬壁机器人[11], 掀起了基于仿生附着机制的爬壁机器人研究热潮. 与传统附着方式相比, 仿生附着适应性强, 能量需求较低, 易实现小型化, 有望在航空航天、灾后搜救、船舶工程和石油化工等领域发挥重大

引用格式: 裴香丽, 刘书豪, 师瑞卓, 等. 仿生爬壁机器人: 研究基础、关键技术及发展预测. 科学通报, 2024, 69: 2380–2400
Pei X L, Liu S H, Shi R Z, et al. Biomimetic wall-climbing robots: Research foundation, key technologies and development forecasts (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 2380–2400, doi: 10.1360/TB-2023-0735

© 2023《中国科学》杂志社

作用[5].

关于爬壁机器人的综述文献[1~4]展示了此类研究的丰富内涵, 但从仿生视角的分析较少. 鉴于仿生爬壁机器人研究涉及学科多、应用领域广, 本文从仿生爬壁机器人的设计灵感出发, 围绕其研究基础、关键技术和工业应用3个板块开展梳理和总结, 期待通过分析, 阐述仿生爬壁机器人的仿生度, 指出不同仿生附着方式、移动方式及其组合的优缺点, 剖析其应用前景. 本文的总体架构如图1所示.

1 爬壁机器人的生物模板

很多动物展现出惊人的攀爬能力, 为人类开发攀爬设备提供了难得的模板. 以不同攀爬方式的典型动物为参照, 研究其攀爬行为, 揭示内在机理, 是仿生爬壁机器人研究的生物学基础. 目前已知动物的附着机制有干黏附、湿黏附、钩爪锁合及多机制协同.

1.1 干黏附攀爬

许多动物, 如壁虎、苍蝇、蜘蛛和很多甲虫, 依靠刚毛结构的黏附器官实现对表面的黏附. 此类黏附以大壁虎为代表, 其体重最大可达150 g, 体长超过30 cm, 可在天花板等任意壁面以1 m/s的速度自由爬行[12], 是干黏附爬行的杰出代表. 其黏附原理争论了数千年, 人们曾提出摩擦、静电、毛细、机械锁合等是壁虎黏附的主要机制[13]. 2000年, Autumn等人[14]用微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)力传感器测量出壁虎脚趾单根离体刚毛的黏附力和摩擦力, 并于2002年揭示了黏附力主要来源于刚毛末端纳米纤维与接触面间的分子间作用力——范德华力[15], 目前该机制得到广泛认同.

结构上, 壁虎脚趾的趾腹上都规律地排布着弧形褶皱的皮瓣, 皮瓣上生长着100多微米长、数微米直径、主要成分为蛋白质的刚毛(图2(a)). 这些刚毛大约每平方毫米5000根, 并在其末端进一步分裂成压舌板状纳米结构, 使接触面积最大化[14~16], 由此形成了壁虎层次分明、划分精细的黏附系统(图2(b)). 壁虎在实际运动过程中, 刚毛尖端的压舌板状纳米纤维与爬行壁面接触, 产生分子间作用力, 即范德华力, 使壁虎能在各种角度和各种材质的表面上稳定运动.

除此之外, 研究还发现了壁虎干黏附脚掌的独特优势: 由于黏附力主要源于分子间力, 分子间力普遍存在于物质之间而不受环境干扰[20], 因此壁虎脚掌几乎可在任何材质的壁面上产生黏附作用. 壁虎脚掌的刚毛具有高长径比、逐层分叉的特殊结构, 使其能很好地适应粗糙或光滑的壁面[21]. 刚毛材料由含多种氨基酸(主要为甘氨酸)的β-角蛋白构成(图S1), 其中大部分基团带正电荷[22,23], 具有良好的疏水性和较低的表面能, 使黏附效果对灰尘和湿润度的鲁棒性强[24]. 特别地, 壁虎脚掌具有良好的黏脱附可控性, 黏压比(黏附力/预压力)约为6~40[25], 壁虎可通过增大切向拖拽力, 有效提高刚毛的法向黏附力, 使其黏附更牢靠, 通过减小切向拖拽力将单根刚毛脱附所需要的法向力最小降至0左右[25], 使其轻松脱附且不会造成躯干失稳. 此外, 壁虎刚毛黏附具有自锁特性, 使壁虎以极低的能耗长时间黏附在墙面[26].

壁虎黏附系统依靠范德华力, 具有各向异性、强黏附及易脱附性、黏脱附可控、抗自黏和自清洁等独特优势, 是仿生攀爬机器人的优良仿生对象.

1.2 湿黏附攀爬

还有许多动物, 如昆虫(蚂蚁、蝗虫、螽斯)和两栖动物(树蛙、蝾螈)等, 也具有在垂直面和倒置面上攀爬运动的能力[17,18,27~30]. 起初人们猜测这种吸附力来源于机械锁合、摩擦或静电, 但深入研究发现, 这类动物的黏附力源于毛细力, 需要液体参与, 故称为湿黏附. 结构上, 湿黏附的脚垫为光滑表皮垫且有分泌液[31,32].

如图2(c)所示, 在宏观尺度下, 这些动物的足垫表面看似十分光滑, 但在微观尺度下却有所不同, 均呈现出若干形状不规则的结构单元[17,18,27~30], 如螽斯为六边形[17], 树蛙为五边形[18], 各个单元之间被沟槽分开. 不同动物的结构单元, 其接触形状也存在差异, 可分为平面、凹面、凸面和环形. 研究表明[33], 环形接触相较于其他接触形状, 在基底疏水条件下能够减少斥力的同时, 增大表面张力, 从而加强黏附力. 并且, 它们的足垫柔软可变形, 以便适应不同的表面形貌, 增大接触面, 提高黏附作用. 此外, 它们足垫的表皮细胞能根据接触面粗糙程度的不同, 分泌质量、体积不等的黏液, 而足垫表面的微观结构可帮助黏液向四周扩散, 从而使足垫与接触面间迅速形成一层微米级甚至纳米级的均匀黏液薄膜. 薄膜产生的表面张力与毛细力提供动物壁面运动所需的黏附力[32]. 这类动物的黏附机制涉及腺体的分泌物, 因而被称为湿黏附, 但它们的分泌液并没有很强的黏附性[31].

动物的湿黏附模型[32,34,35]如图2(d)所示, 矩形区域

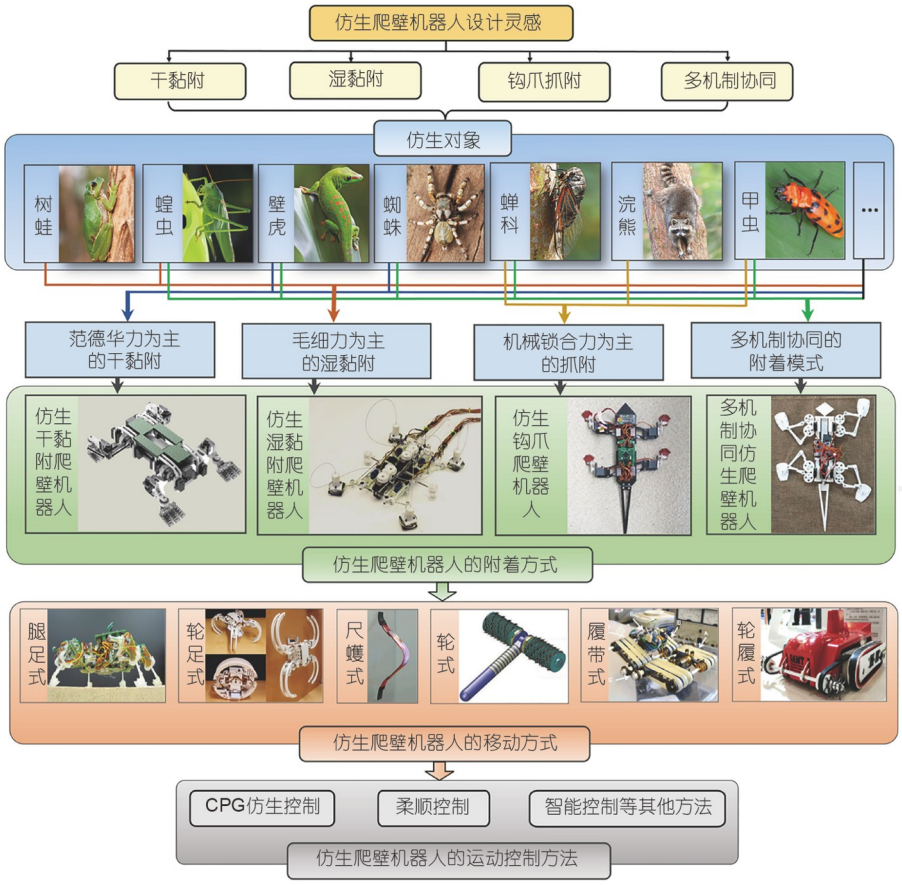


图 1 (网络版彩色)仿生爬壁机器人的主要研究内容
Figure 1 (Color online) The main research content of biomimetic wall-climbing robots

表示昆虫的光滑足垫，其与壁面的接触面为圆(半径为R)，分泌的黏液在足垫与壁面间形成液体桥，产生爬壁所需的黏附力. 液体桥与足垫和壁面的接触角分别为θ_1和θ_2，液体桥的高度(黏液薄膜的厚度)为h. 显然，接触角随着厚度h的减小而减小. 在此模型中，液体体积恒定，当足垫被拉动或挤压时，液体桥会收缩或膨胀. 假设足垫与壁面间未发生相对滑动，则静止时作用于足垫的法向黏附力F_{wet}由两部分组成: 一部分是液体与空气间的压力差，即毛细力F_{cf}作用; 另一部分是足垫末端沿液体外围的表面张力F_{st}的轴向分量作用[33,34]，如式(1)所示:

$$F_{\mathrm{wet}} = F_{\mathrm{cf}} + F_{\mathrm{st}} = -\pi r_{\mathrm{wet}}^2 \Delta P + 2\pi r_{\mathrm{wet}} \gamma \cos\theta_1, \tag{1}$$

其中，r_{wet}表示液体桥的有效接触半径，γ为液体的表面张力系数，$\Delta P = \gamma(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)/h$表示半月板内外的压降，与杨-拉普拉斯方程给出的液体轮廓有关[32]. 当γ一定时，已知θ_1和θ_2随h的减小而减小，显然ΔP随着厚度h的减小而增大. 由式(1)可知，若r_{wet}足够大，h足够小，或γ较大，都能够产生可观的黏附力. 基于上述理论，自重仅0.49 mN的蚂蚁能产生47 mN(相当于自重100倍)的黏附力[34].

1.3 钩爪抓附攀爬

大自然中能够“飞檐走壁”的动物，除了借助刚毛型干黏附脚垫和光滑湿黏附足垫以外，还可以依靠躯干上的爪刺或钩状结构(图2(e))在各种不规则的粗糙壁面上行走觅食. 并且，这种爪刺或钩状结构在动物体上十分常见，几乎所有的成年昆虫在足跗节末端都具有钩爪结构[36,37]，即使是以干黏附为主的壁虎和湿黏附为主的蝗虫，在面临一些粗糙壁面或负平面时，也会利用钩爪抓附接触面辅助攀爬运动[38~40].

动物的钩爪抓附可以分为直接刺入型和机械锁合型两类. 猫、浣熊和豹纹守宫等体型较大的动物通过爪刺直接刺入树干等接触表面的方式[12,41]，产生较大

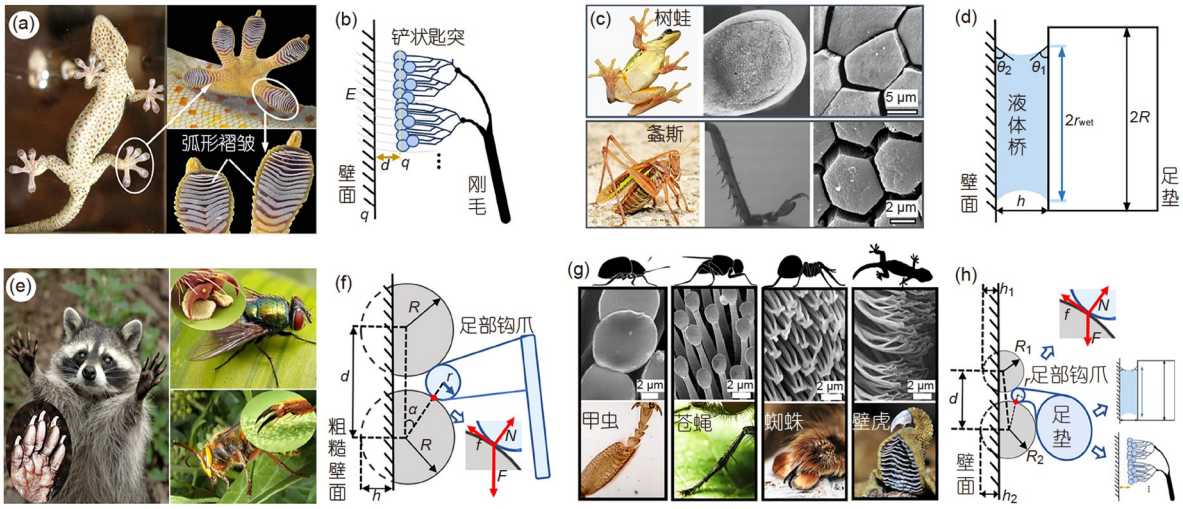


图 2 (网络版彩色)自然界的攀爬现象. (a) 壁虎干黏附脚掌; (b) 干黏附模型; (c) 动物湿黏附脚垫[17,18], Copyright © 2006 the Royal Society; (d) 湿黏附模型; (e) 动物钩爪结构; (f) 抓附模型; (g) 动物的黏附与钩爪协同现象[19], Copyright © 2003 the National Academy of Sciences of the USA; (h) 协同作用模型

Figure 2 (Color online) Climbing phenomena in nature. (a) The dry adhesive foot of gecko; (b) dry adhesion model; (c) the wet adhesive foot of animals[17,18], Copyright © 2006 the Royal Society; (d) wet adhesion model; (e) the claw and hook-like structures in animals; (f) grasping model; (g) the synergistic phenomenon of adhesion and hook claw in animals[19], Copyright © 2003 the National Academy of Sciences of the USA; (h) collaborative model

的附着力, 而其他昆虫, 如东方绢金龟等金龟科甲虫和蝉科成虫通常利用足跗节末端的微细爪刺与接触表面的微小凹坑和凸起形成机械锁合[37,39,40], 以获得足够的附着力, 保证自身能够在所爬行壁面上稳定停留与灵活移动.

为理解动物钩爪与表面粗糙结构间的相互作用关系, 研究者分析了金龟科甲虫钩爪的强度以及钩爪在不同砂纸表面表现出抓附性能的差异, 建立了钩爪与壁面基质接触的理论模型[38,42,43], 如图2(f)所示. 他们系统描述了不同爪径、锥角、尖端半径以及抓取角、接触角、脱离角和壁面粗糙度等对钩爪锁合形成过程的影响, 并且根据爪刺强度、爪刺尖端对壁面凹凸的相对尺寸以及摩擦系数计算了每根爪刺的最大载荷, 最终表明钩爪和基底凹凸的接触几何是动物粗糙面附着的主要限制因素[42].

根据钩爪与壁面的接触模型(图2(f))可知, 能否可靠抓附与壁面颗粒的相对尺寸大小紧密相关. 对此, Ji等人[43]研究了半径为1、2、5和10 mm爪尖的抓附效果. 结果表明, 当钩爪产生有效附着时, 爪的最大尖端尺寸相对于基底的颗粒尺寸(r/R)仅取决于凸颗粒的嵌入深度与颗粒尺寸的比值(h/R)和爪与接触面间的最大静摩擦系数(μ_{max})[42], 而且有效接触面积随爪尖半径的增加而减小, 即爪尖尺寸越大, 壁面和钩爪的有效接触面积越小, 动物有效附着的可能性越低[42]. 因此, 仿生钩爪的尺寸需根据实际壁面粗糙度情况合理设置.

1.4 多机制协同攀爬

已有研究表明[19,44], 黏附力大小与粗糙度变化呈负相关, 粗糙度越低, 黏附力越大. 而粗糙度较大则有利于钩爪形成较大的锁合力. 另一方面, 自然环境错综复杂, 表面材质多种多样, 表面粗糙度千变万化, 单一的附着方式很难适应表面的各种粗糙度. 为此, 多数爬壁动物演化出多机制、多器官协同的附着方式, 以保证动物在各种粗糙表面上均能够实现可靠附着和自如爬行[44].

如图2(g)所示, 甲虫、苍蝇、蜘蛛、壁虎等动物不仅有黏附器官, 在足部末端还长有形状各异的钩爪[44]. 对壁虎、蜘蛛、苍蝇等动物运动与附着的观察研究发现, 在相对光滑的垂直亚克力表面运动时, 它们主要依靠足端的刚毛型足垫附着; 在相对粗糙的垂直织物表面运动时, 钩爪发挥主要作用. 同样地, 对部分甲虫运动与附着的观察研究发现, 在垂直有机玻璃面和水平摆放的有机玻璃下表面(负平面)爬行时, 其附着主要依靠足端的光滑湿黏附足垫, 而换成粗糙的泡沫表面时, 则主要依靠足跗节末端的钩爪附着. 由此可见, 自然界中的绝大部分攀爬现象都是机械锁合与黏附协同作用

的结果(图2(h)). 随着接触面材质与粗糙度变化, 钩爪与足垫产生的附着力占比将随之变化, 使动物获得的总附着力总是大于各种单一附着方式产生的力, 从而保证动物能够很好地适应环境.

总而言之, 自然界丰富的动物原型为人类开发能可靠运行于垂直壁面和倒置平面的机器人提供了无限创新启示, 充分理解并领悟动物攀爬现象与其内在机制, 可为研究仿生爬壁机器人奠定基础.

2 仿生爬壁机器人的附着与移动方式

2.1 文献调研及分析

仿生爬壁机器人是一个多学科交叉的领域. 随着动物附着机制的逐渐明晰, 美国、加拿大、韩国、中国等国家陆续开发出各种仿生爬壁机器人, 已取得许多引人注目的进展(图3(b)). 通过对Google Scholar、Web of Science、Library of Congress和中国知网等文献数据库进行搜索(截至2023年5月)及二次人工校对, 以“vertical climbing”“biomimetic climbing robot”“dry adhesive robot”“wet adhesive robot”“clawed climbing robot”等为关键词, 从中筛选得到有关仿生附着爬壁机器人的论文(图3(a)). 论文总数尚不多, 但论文数量呈现增长趋势. 随着仿生学发展与机器人时代的到来, 仿生爬壁机器人在附着机制、移动方式、运动控制等方面将更加多样, 促进仿生爬壁机器人向微小型化、高智能化、高可靠性过渡.

2.2 仿生爬壁机器人的附着方式

附着性能决定了爬壁机器人的安全性和运动可靠性[1,2]. 自然界许多动物具备与环境表面形成有效附着的体表接触器官和结构, 如壁虎刚毛垫、树蛙光滑垫、蝗虫钩爪等, 使它们能在光滑或粗糙的各种斜度的表面上自如运动, 即三维空间无障碍运动(three dimensional-terrain obstacle free, TDOF)[45]. 人们在理解典型动物附着机制的基础上, 开发了基于不同仿生附着机理的爬壁机器人.

2.2.1 仿生干黏附爬壁机器人

基于范德华力的干黏附爬壁机器人采用类壁虎的黏附方式. 在2003~2013年间, 国内外相继开发出各种干黏附爬壁机器人[46~48], 如Stickybot[49]、Gecko-bot[50]、Tankbot[51]、MultiTank[52,53]、Waalbot[54,55]、Abigaille[56~58]、Mini-Whegs[59]、CLASH[60]等, 壁虎黏附机制的解释为新一代干黏附爬壁机器人的研制奠定了基础.

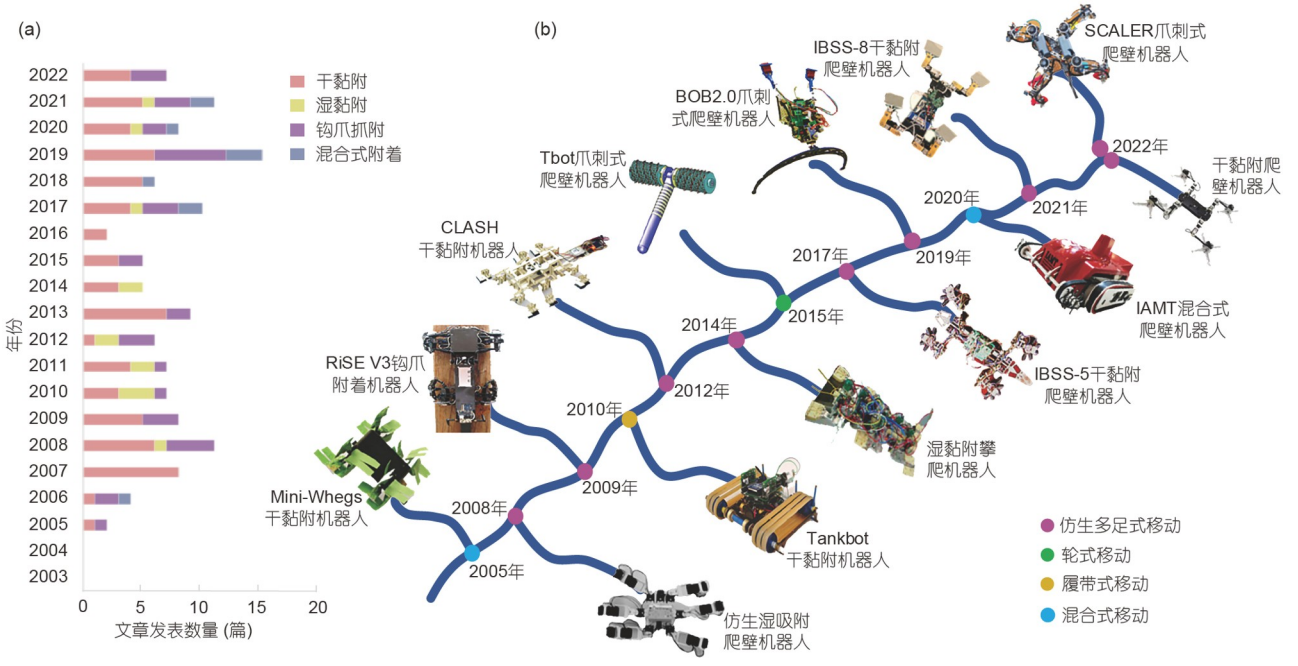


图 3 (网络版彩色)过去20年仿生爬壁机器人研究进展. (a) 研究论文的数量及附着方式分布; (b) 代表性研究工作进展

Figure 3 (Color online) Research advances of biomimetic wall-climbing robots in the past 20 years. (a) Number and adhesion types distribution of published research articles; (b) the progress of representative research work

2014年, Henrey等人[58]研发了Abigaille-III, 黏附材料使用双层干黏合剂, 最终Abigaille-III成功在垂直壁面上完成约4 h的连续攀爬. 同年, Simon等人[61]提出了一种可用于国际空间站(International Space Station, ISS)的壁虎式机器人ACROBOT, 它的合成壁虎垫脚掌由两层结构组成: 悬浮层用于补偿微小错位, 定向黏合层与表面接触产生范德华力黏附. 其中, 定向黏合层由一排80 μm高的定向偏置柔顺楔块组成, 楔块具有定向蘑菇状尖端. 通过施加剪切力, 楔块弯曲增加实际接触面积, 实现黏附力的最大化. 在没有剪切载荷的情况下, 只有楔形尖端接触, 黏附力接近于0.

2015年, Hawkes等人[62]采用玻璃纤维和聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)胶黏剂作为黏附脚垫材料, 设计了仅有9 g重的爬壁机器人Climber. 2016年, Liu等人[63]开发了面向各种曲率表面的垂直攀爬机器人AnyClimb, 通过8个扁平干黏合剂制成的脚垫附着在表面上. 2017年, Ko等人[64]提出了爬墙和天花板的四足机器人UNIclimb, 脚上有蘑菇状的干黏附垫. 2018年, Liu和Seo[65]再次推出可跨越大型障碍物的AnyClimb-II. 相较于Anyclimb-I, Anyclimb-II重量减轻, 黏附方式仍使用干弹性体VytaFlex-10(V-10, Smooth-on Inc.)制造的黏性脚垫. 这种脚垫可帮助机器人附着在不同粗糙度的材料上(木材、玻璃、丙烯酸等), 但随着使用次数的增加, 脚垫受到灰尘等污染, 会使附着力下降, 因此V-10脚垫在每次实验前都需要用酒精清洗干净.

2019年, Dharmawan等人[66]使用PDMS和3M丙烯酸胶带(very high bond, VHB)制作双层壁虎启发黏合剂, 作为机器人脚垫, 设计了Orion仿生爬壁机器人. 同年, Tang等人[67]用硅橡胶制作微结构黏附垫, 研发了一种空间桁架爬行机器人. 2020年, Liu等人[68]将V-10弹性体作为干黏附材料, 研发了连杆式干黏附爬壁机器人, 其外形与Unver和Sitti[46]提出的十六足爬壁机器人类似. 2021年, Srisuchinnawong等人[69]将带有蘑菇状微结构材料的纤维黏合垫用于他们开发的无尾壁虎机器人, 通过开展步态实验与避障实验充分验证了仿生干黏附脚垫的实际应用效果.

戴振东团队[70~73]多年来从事仿壁虎机器人的研究工作, 推出了仿生结构与材料防护(Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, IBSS)系列仿壁虎机器人. 2021年, 他们推出的IBSS-8仿壁虎机器人脚垫采用聚乙烯硅氧烷(polyvinyl siloxane, PVS)制成的黏附材料, 仿壁虎刚毛, 可稳定黏附在光滑表面, 脚掌上表面由聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)制成, 经测试, IBSS-8可以在90°墙面稳定爬行[71]. 2022年, 他们采用干黏附材料实现了仿壁虎机器人在柔性基底上的黏附运动[72]. 2023年, 基于干黏附的混驱爬壁机器人成功用于弧面攀爬[73].

表1总结了上述典型仿生干黏附爬壁机器人的性能参数. 可见, 基于范德华力的干黏附爬壁机器人主要模仿壁虎等动物的刚毛脚垫, 采用压敏黏合剂(pressure sensitive adhesives, PSA)、弹性体(V-10)和合成纤维状干胶等材料制作爬壁机器人的黏附脚掌. 这种仿壁虎的干黏附方式不过度依赖接触面材料或大气压力, 可以在各种表面攀爬, 尤其适合在太空真空中使用. 但已有仿生黏附材料均需较大预压力才能得到较高黏附力, 黏压比约为1[74], 并且黏附性能会随着使用时间延长、受接触面灰尘和污垢的污染而退化, 须清洗以恢复其黏附力. 这也是目前制备机器人黏附脚掌使用的黏附材料存在的普遍问题.

2.2.2 仿生湿黏附爬壁机器人

受树蛙等动物足垫分泌黏液产生黏附力的启发, 基于毛细力的湿黏附爬壁机器人研究得到快速发展. 何斌团队[32,75~78]研制了多种湿黏附仿生爬壁机器人, 先后采用硅胶、硫化硅橡胶高分子聚合物和热塑性弹性体(thermoplastic elastomer, TPE)作为湿黏附足垫材料, 通过模塑、电铸、软光刻等技术制备湿黏附足垫, 利用湿黏附足垫开发攀爬机器人. 这类机器人的主要不足是需要分泌模块, 保证产生湿黏附所需的润湿环境, 并缺乏自清洁模块, 保证足垫受污染后的自清洁和黏附力, 不太适用于户外环境.

2012年, Wiltsie等人[79]探索了基于磁流变液的湿黏附爬壁机器人, 通过实验分析了用于机器人的新型磁流变液的黏附效应, 最终机器人实现了垂直壁面和负平面的稳定黏附. 但这种方法存在一个潜在缺点: 液体可能沉积在基材表面, 留下运动装置存在的证据或使基材沾染油.

在昆虫湿黏附机制方面, 国内外研究者已经对蚂蚁、树蛙等动物足垫进行了深入研究, 且开发了部分基于湿黏附原理的爬壁机器人, 可以将其工作范围进一步延伸到湿滑的接触表面上. 然而, 实际上应用湿黏附原理的爬壁机器人还相对较少, 原因在于湿黏附需要额外补充黏液, 涉及储存、分泌、扩散问题, 还需要选择适当浓度的黏液以产生较薄的液体膜, 从而获得

表 1 典型仿生干黏附爬壁机器人的性能参数[a)]

Table 1 Performance parameters of a typical biomimetic dry adhesive wall-climbing robot

典型机器人	黏附材料	移动机构	控制方法	黏附力 (N)	速度 (cm/s)	负载 (g)	质量 (g)	尺寸 (cm^3)	攀爬表面	壁面过渡
Stickybot[49]	DPS	腿足、四足	力控制	19.2~	4	NA	370	60×20×6	玻璃、瓷砖、丙烯酸	否
Geckobot[50]	PDMS	腿足、四足	反馈控制	NA	1	NA	100	19×11×4	丙烯酸表面	否
Tankbot[51]	V-10	履带、两个	NA	NA	12	100	60	23×14×1.5	玻璃、丙烯酸、木材	否
MultiTank[52]	V-10	履带、4个	反馈控制	NA	6	500	180	18×18×5	丙烯酸表面	是
Waalbot-Ⅰ[54]	V-10	轮足、两轮	反馈控制	NA	6	0	69	13×12.3×5	丙烯酸表面	是
Waalbot-Ⅱ[55]	DMFA	轮足、两轮	反馈控制	NA	5	100	85	9.56×9×3.7	油漆墙、木门	是
Abigaille-Ⅰ[56]	PDMS	腿足、六足	反馈控制	NA	NA	NA	131	NA	光滑塑料表面	否
Abigaille-Ⅱ[57]	PDMS	腿足、六足	反馈控制	NA	0.1	NA	260	9×9×5.6	平坦表面、墙壁	是
Abigaille-Ⅲ[58]	PDMS	腿足、六足	PID控制	NA	0.044	NA	643.6	20×21×9	光滑白板、墙壁	是
Mini-Whegs[59]	PVS	轮足、四轮	反馈控制	NA	5.8	NA	87	8.9×5.4×3	玻璃、聚苯乙烯	是
CLASH[60]	PDMS	腿足、六足	NA	6~	15	NA	19	10×10×2	丙烯酸表面	否
ACROBOT[61]	V-60	腿足、四足	反馈控制	NA	0.15	200	323	18×15×3.5	光滑表面	是
Climber[62]	PDMS	腿足、四足	NA	12	1.8	1400	9	3×2.5×2	光滑表面	否
AnyClimb[63]	V-10	腿足、四足	NA	NA	0.83	160	142	20×11.4×6	丙烯酸表面	否
AnyClimb-Ⅱ[65]	V-10	腿足、四足	开环控制	NA	2	NA	138	14×12.7×4.9	光滑玻璃表面	否
UNIclimb[64]	PDMS	腿足、四足	NA	10.4	0.1	NA	363	23×20×5.5	丙烯酸表面	否
Orion[66]	PDMS+3M VHB	轮足、两轮	NA	NA	3	NA	71.5	NA	丙烯酸表面	NA
Truss crawling Robot[67]	DPS	腿足、六足	反馈控制	NA	9.4	NA	NA	45×40×40	光滑表面、圆柱面	NA
Linkage-type Robot[68]	V-10	腿足、八足	NA	NA	1.33	760	260	22.6×11×9.2	玻璃表面	NA
Tailless Gecko Robot[69]	PVS	腿足、四足	CPG	NA	0.4	NA	1900	51×34×10	玻璃表面	否
IBSS-8[71]	PVS	腿足、四足	在线变阻抗	396~	0.6	NA	1980	44×26×4.5	丙烯酸表面	否

a) “NA”表示参数不详; “~”表示参数根据比例尺及文中数据估算所得; DPS: Directional polymer stalks, 定向聚合物杆; PDMS: Polydimethylsiloxane, 聚二甲基硅氧烷; V-10: VytaFlex-10, V-10弹性体; DMFA: Dry micro-fiber adhesive, 微纤维干黏剂; PVS: Polyvinyl siloxane, 聚乙烯硅氧烷; V-60: VytaFlex-60, V-60弹性体; 3M VHB: 3M very high bond, 3M丙烯酸泡绵胶带

较大的足垫吸附力, 这些问题增加了仿生爬壁机器人的重量和系统设计的难度.

2.2.3 仿生钩爪爬壁机器人

基于机械锁合的钩爪爬壁机器人是仿生爬壁机器人领域的又一细分方向. 早期的钩爪爬壁机器人包括Spinybot[80,81]、Screenbot[82]、RiSE[83~85]、LEMUR IIB[86]和DynoClimber[87]等. 近年来, Tbot[37]、Dracobot[88]、SCARAB[89]、Scorpio[90]、BOB2.0[91]和SCALER[92]等新一代钩爪爬壁机器人也被相继报道.

2015年, Liu等人[37]提出一种爪刺轮式爬壁机器人Tbot, 整体由选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)尼龙2200制成. 在机器人两个爪刺轮上, 沿宽度方向分别有16列爪刺阵列, 每列有4组刺, 每根微型爪刺约1 mm长, 由一次性针灸针制成, 针杆直径200 μm, 针尖半径30~60 μm. 最终, Tbot实现了10 cm/s的倾斜砖墙攀爬和20 cm/s的垂直织锦表面攀爬. 同年, Wang等人[88]、Miller和Clark[89]分别提出了基于壁虎启发式GPL模型(Gecko inspired model with one Pendular waist and four active axil Legs)的钩爪机器人Dracobot和地面/壁面移动机器人SCARAB, 验证了钩爪攀爬方式.

2017年, Yanagida等人[90]受蜘蛛启发, 设计出Scorpio机器人, 该机器人既能滚动、爬行, 又能利用末端钩爪爬墙, 为未来城市侦察提供了可能. 2018年, Ji等人[43]在爬壁机器人上应用带爪柔性垫, 获得了机器人在粗

糙表面上的高度适用性. 机器人的每个带爪柔性垫由10个长脚趾组成, 每个脚趾以放射状分开, 保证脚趾互不干涉的同时增加爪子钩到粗糙表面的概率.

2019年, Brown等人[91]提出了一种带有微型爪刺腕关节的爬壁机器人BOB2.0. 同年, 刘彦伟等人[93]在东方绢金龟的启发下提出了一种仿生爪刺式爬壁机器人, 爪刺足由尼龙粉末PA2200(ESO)通过选择性激光烧结技术打印而成, 爪刺为直径0.18 mm的针灸针. 实验表明, 单个爪刺足在120目砂纸墙面上可稳定承载100 g的砝码.

2020年, Shirai等人[94]介绍了一种具有"三指"抓爪的爬壁机器人, 该机器人包含6个分布在躯干周围的"三指"微刺抓爪, 每个抓爪的每根"手指"包括25个机器针的微刺单元, 针尖直径0.93 mm, 由碳钢制成. 运动实验表明, 该"三指"抓爪爬壁机器人具备良好的抓握能力. 2021年, 毛晨曦等人[95]研究了一种爪刺式飞行爬壁机器人, 利用柔性碳纤维杆和柔性绳组合机构以及爪刺结构, 实现了爪刺对壁面的自适应抓附与脱离. 2022年, Tanaka等人[92]介绍了一款爬壁机器人SCALER, 配备有刚性双指夹持器GOAT. 该夹持器末端是由弹簧加载的钩爪单元, 每个单元由50个直径0.93 mm的爪刺组成, 每个爪刺由一个5 mN/mm的弹簧加载. 钩爪单元的倾角保证爪刺能以最佳角度接近壁面, 又能快速分离.

表2总结了上述典型仿生钩爪爬壁机器人的性能参数. 基于机械锁合的钩爪爬壁机器人模仿动物抓附结构, 为机器人附着提供了又一重要的实现方式. 目前科学家们已经研发了多款应用动物钩爪机理的爬壁机器人, 其中RiSE V3、CLASH和Screebot等采用刚性钩爪. 然而, 刚性钩爪的磨损与不可逆损坏对于爬壁机器人是致命的, 虽然Spinybot II、RiSE V2等已经利用先进加工技术在刚性钩爪的基础上增加了柔性部件, 但制作工艺较复杂.

2.2.4 多机制协同的爬壁机器人

动物附着器官的多机制协同启发人们开发多机制协同附着的仿生爬壁机器人, 将不同附着方式结合, 提高爬壁机器人的附着安全性和壁面适应性.

2019~2020年, Bian等人[96]和Liu等人[97]先后开发了两套多模式爬壁机器人, 第一套将干黏附和负压吸附结合, 第二套在前者的基础上增加了柔性爪刺轮仿生结构. 通过机构构型综合规律, 提出了"抓取、附着、吸附"组合力模式的爬壁机器人, 以期适应更多类型的壁面. 2021年, Bian等人[98]再次推出能适应粗糙面和光滑面的新一代爬壁机器人, 在粗糙表面附着时采

表 2 典型仿生钩爪爬壁机器人的性能参数[a)]

Table 2 Performance parameters of a typical biomimetic hook claw wall-climbing robot

典型机器人	钩爪结构	移动机构	控制方法	抓附力 (N)	速度 (cm/s)	负载 (g)	质量 (g)	尺寸 (cm^3)	攀爬表面	壁面过渡
Spinybot[80]	刚柔耦合	腿足、六足	开环位置控制	NA	NA	NA	400	NA	墙面、岩石表面	否
Spinybot-Ⅱ[81]	刚柔耦合	腿足、六足	开环位置控制	7.8~	2.3	400	400	58×30×4	墙面、岩石表面	否
Screenbot[82]	刚性	腿足、六足	开环位置控制	2.4~	1	NA	126	12.7×14×2.2	金属丝网	否
RISE[83]	刚性	腿足、六足	力反馈控制	120~	15	1500	3000	50×35×10~	墙面、树木	是
RISE-Ⅱ[84]	刚性	腿足、六足	NA	NA	NA	NA	NA	NA	墙面、树木	是
RISE-Ⅲ[85]	刚性	腿足、四足	PD控制	120~	21	NA	5 400	70×35×15~	墙面、树木、木制电线杆	是
LEMUR IIB[86]	刚性	腿足、四足	反馈控制	560~	NA	NA	10000	NA	岩石表面	是
DynoClimber[87]	刚性	腿足、两足	自激控制	NA	66	NA	2600	40×11.6×7	铺地毯的墙面	NA
Tbot[37]	刚柔耦合	轮式、两轮	NA	NA	10	NA	32	12×11×3.2	墙面、珍珠棉表面	是
Dracobot[88]	刚性	腿足、四足	闭环控制	NA	10	NA	560	25.3×28.5×1.48	粗布表面	否
SCARAB[89]	刚性	腿足、四足	PID控制	NA	67	NA	2100	38×35×23	铺地毯的墙面	否
Scorpio[90]	刚性	重构、四足/单轮	自适应控制	NA	NA	NA	350	10.5×10.5×4	玻璃墙	否
BOB2.0[91]	刚性	腿足、两足	力反馈控制	NA	19	NA	300	NA	墙面、铺地毯的墙面	NA
SCALER[92]	刚性	腿足、四足	导纳+MPC控制	NA	0.58	3400	6300	NA	抱石墙、天花板	否

a) "NA"表示参数不详; "~"表示参数根据比例尺及文中数据估算所得

用受蝉启发的仿生钩爪结构，仿生钩爪组装在机器人的4个脚掌上，单个钩爪的长度为18 mm. 当在光滑表面附着时, 采用受壁虎启发的仿生干黏附方式, 仿生刚毛阵列由PDMS材料通过光刻技术制造而成. 实验表明，仿生抓附和仿生黏附在布、石头和玻璃表面均能实现良好的攀爬. 但该机器人目前的问题是在爬布面时会导致布面轻微受损，在爬石面时会使自身爪刺轻微受损.

基于多机制协同作用的仿生爬壁机器人将干黏附、湿黏附、钩爪抓附等附着方式相结合，以实现黏附力的最大化，提高爬壁机器人的负载能力. 并且，这种多机制协同附着的仿生爬壁机器人既能用于粗糙面，又能用于光滑面, 实际应用场景更加广泛.

2.3 仿生爬壁机器人的运动机构

运动机构是制约仿生爬壁机器人性能的关键因素. 目前学者们已经开发出具有不同移动机构与运动特性的仿生爬壁机器人. 从仿生学角度, 仿生爬壁机器人按照移动方式的不同可划分为仿生多足式、仿生尺蠖式和其他移动方式三类.

2.3.1 仿生多足式移动

自然界多数动物通过与躯干连接的腿足结构灵活移动，腿足式移动具有移动灵活、地形适应能力强等特点. 近年来, 多数仿生爬壁机器人都采用腿足式移动机构. 2014年, Bryant等人[99]设计了一款双足攀爬机器人系统，通过无线电控制器控制每条腿的两个自由度. 2015年，Choi等人[100]受蟑螂启发，介绍了一种小尺度爬行机器人. 该机器人具有6只柔顺的爪刺足，采用三脚步态保持机器人运动过程中的稳定性. 2021年, Bian等人[101]受天牛和壁虎启发，设计了一款四足爬壁机器人. 该机器人躯干左右两侧的腿可在0°~120°之间灵活变动, 因此它可以折叠身体适应不同直径的接触面, 可用于不同管径的设备检测.

腿足式仿生爬壁机器人与爬壁动物的结构相似, 能够灵活地改变步态，实现壁面过渡、转弯、越障等任务, 是仿生爬壁机器人应用最广泛的移动方式. 机器人的腿足个数中, 四足、六足和八足最常见, 足数目越多，越适合重载和慢速运动. 六足和八足与四足相比, 对于多地形适应性更强，相应地步态规划与运动控制更复杂，四足在保证最简稳定支撑的情况下有效简化了结构设计与运动控制方面的工作，但牺牲了一部分对地形的适应能力与越障能力. 因此, 在腿足式仿生爬壁机器人的设计过程中，需结合使用场景确定最佳腿足数目.

轮足式仿生爬壁机器人通常在保留腿足机构的同时增加轮式移动方式. 早期国内外报道的Mini-Whegs[59]、Waalbot II[55]等均通过旋转轮腿上的被动顺应脚实现垂直表面的攀爬, 不同的是, Mini-Whegs具备4个对称分布的旋转轮腿, 而Waalbot II只有两个分布在躯干两侧的旋转轮腿. 2013年, Liu等人[102]和Chanchlani等人[103]分别提出兼具轮腿移动机构的仿生爬壁机器人LWbot和半自主爬墙机器人Intelligent Climber. 其中, LWbot由一个被动轮和两组腿组成, 腿上装有改进的切比雪夫四连杆机构和柔性爪刺足, 通过脚尖的“D”形轨迹, 使微型爪刺穿透和拉离表面. Intelligent Climber由4个覆盖着砂纸的超级摩擦轮和交叉铝腿组成，与Waalbot相比，Intelligent Climber更适合石膏墙等粗糙表面[103]. 此外, 2017年, Yanagida等人[90]提出的Scorpio机器人是一种可重构的仿生爬壁机器人，通过独特的构型设计使机器人具备不同的运动特性，能根据地形感知改变自身运动为四足步进或旋转前进. Dharmawan等人[66]在2019年推出的Orion，其轮腿形式与Mini-Whegs类似, 整体构型与Waalbot II相仿, 均由两组相同的轮腿和一个尾巴组成. 2020年，徐杰等人[104]设计了与Mini-Whegs构型相仿的Climber-XV机器人，实现了玻璃、光滑塑料板和光滑铝合金等竖直表面的爬行. 轮足式仿生爬壁机器人由于其结构的复杂性和控制的繁琐性, 目前在仿生爬壁机器人领域并不常见.

2.3.2 仿生尺蠖式移动

尺蠖是一种典型的“Ω”式点动动物, 这类动物由于躯体柔软无力, 爬行过程独具特色. 尺蠖式仿生爬壁机器人将仿生附着方式和尺蠖式移动方式有机结合实现附着和爬行.

2015年, Hawkes等人[62]采用单个驱动器实现Climber机器人的尺蠖式单向直线移动，通过两个黏附垫交替运动实现3 mm/s的垂直壁面爬行. 同年, Lee等人[105]开发了带有3个钩爪的微型尺蠖机器人，通过交替地展收躯干向前运动. 2020年, Wang等人[106]设计了尺蠖式机器人Geca-Robot，采用三角形PDMS微柱阵列作为干黏附脚, 石墨烯-PDMS复合材料作为机器人肌肉, 利用石墨烯的光热效应驱动肌肉实现尺蠖式步态. 2022年, Wu等人[107]为他们的柔性攀爬机器人设计了独特的黏附脚垫，通过外部磁场驱动实现软体变形和可控黏附. 2023年, Sun等人[108]利用生物学原理的协同作用, 设计

制造了GeiwBot机器人, 该机器人通过磁场辅助的光驱动策略控制, 模拟尺蠖的周期性身体变形实现攀爬. 同年, Hu等人[109]开发了名为Smcbot的软体模块化攀爬机器人, 该机器人基于软体模块和可更换的足部模块组装而成. 软体模块通过两个形状记忆合金丝制成的软驱动器提供大规模伸缩运动和高输出负载. 5种类型的足部模块(电磁吸附足、负压吸附足、软体足、干黏附足和微型爪刺足)使机器人在各种表面上表现出强大的适应性和运动能力.

尺蠖式仿生爬壁机器人多为小尺度的软体机器人, 通常由前后两个附着脚垫与一个柔性躯干组成, 通过控制柔性躯干模拟尺蠖的大变形运动实现仿尺蠖步态. 这类机器人的驱动方式有别于其他刚性仿生爬壁机器人常用的电机驱动方式, 由于其微小型化的设计, 电机驱动的性能随体积减小迅速下降, 且传动系统复杂导致结构复杂、重量加大而难以适用于小尺度的尺蠖式仿生爬壁机器人. 现有尺蠖式仿生爬壁机器人的驱动方式主要包括基于材料变形的智能材料驱动和其他特殊驱动. 目前如形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)、形状记忆聚合物(shape memory polymers, SMPs)、水凝胶(hydrogels)、液晶弹性体(liquid crystal elastomers, LCEs)、磁性软材料(magnetic soft materials, MSMs)等智能材料驱动方式已经得到较为广泛的应用. 其他特殊驱动方式主要包括电磁驱动、光驱动和磁场辅助下的光驱动等.

2.3.3 *其他移动方式*

传统的轮式爬壁机器人常采用磁吸轮作为轮子材料, 而轮式仿生爬壁机器人将仿生附着方式与轮式移动机制相结合, 提高机器人移动效率. 2015年, Liu等人[37]开发的Tbot通过两侧的爪刺轮实现运动. 与腿式机器人相比, 其爬升速度明显提高, 且可实现地面到墙面的快速过渡, 但Tbot使用的爪刺由于其爪尖半径太大, 对一些光滑表面如油漆内壁等, 无法实现有效抓取[37]. 轮式移动效率高, 在相对平坦的表面上优势显著, 但要求表面平整无障碍, 且由于其接触面积有限, 不太适合攀爬, 在仿生爬壁机器人中并未得到广泛应用.

传统的履带式爬壁机器人多采用永磁铁或电磁铁等制备磁吸履带, 这对磁铁设计要求较高且机器人只能用于能被磁铁吸引的铁质金属表面. 履带式仿生爬壁机器人用仿生黏附材料制备黏附履带. 早期Sitti团队[51]研发的Tankbot是履带式仿生爬壁机器人的典型代表. 此后, Sitti团队[52,53]利用V-10弹性体作为干黏附材料, 制作了双黏附履带, 开发了MultiTank机器人. 与Tankbot相比, MultiTank有两套黏附履带, 具备壁面过渡能力. 2020年, Liu等人[97]设计了黏附式履带用于仿生爬壁机器人, 并推导出机器人履带不打滑的条件方程, 实现了机器人在垂直墙面的上下移动. 履带式仿生爬壁机器人相较传统的磁吸履带爬壁机器人, 采用黏附材料制备履带, 拓宽了履带的应用场景. 此外, 履带能减小机器人对接触面单位面积的压力, 增加牵引能力, 便于爬坡和行驶不平或松软泥泞的表面.

轮履混合式移动, 即将轮式和履带式这两种单一移动方式结合. 在仿生爬壁机器人中, 轮履混合的移动方式较少应用. 2020年, Liu等人[110]针对多壁面攀爬需求, 在他们研发的黏附履带仿生爬壁机器人前后端分别增加了4个爪刺轮, 通过样机实验证明, 增加爪刺轮后, 机器人可以爬上垂直的石灰墙、粗砂纸墙等相对粗糙的壁面, 但当壁面粗糙度变化较大时, 机器人很难完成壁面任务. 轮履式仿生爬壁机器人能在一定程度上提高运动安全性和多壁面适应性, 但多种移动方式的混合通常会导致结构设计更加复杂, 对机器人的运动控制要求也更高.

综上所述, 仿生腿足式移动具有很好的灵活性和对崎岖路面的适应性, 由于其立足点是离散的点, 可以在可能到达的区域内选择最优支撑点, 传统的轮式和履带式移动方式必须面临最坏地形上几乎所有的点. 此外, 腿足式移动方式还具有主动隔振能力, 尽管表面高低不平, 机身的运动仍然可以保持平稳. 还有研究发现[111], 地球上有近一半的陆地表面并不适合传统的轮式或履带式机构行走, 但是一般的多足动物却能在这些地方行动自如[111], 显然, 动物的腿足移动方式在这样的环境下具有独特优势, 因此在仿生爬壁机器人领域得到了广泛模仿和应用.

3 仿生爬壁机器人的运动控制

运动控制系统是仿生爬壁机器人完成既定动作的核心和灵魂所在, 决定了机器人的运动轨迹、动作方式、工作时间、工作步骤和工作状态等. 一套优秀的运动控制系统通常具备稳定性好、响应速度快和控制精度高等特点[2]. 目前, 针对仿生爬壁机器人的运动控制方法从仿生理念出发, 将其概括为中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)仿生控制、柔顺控制及其他控制方法.

3.1 CPG仿生控制

动物通过低级神经系统中枢模式发生器CPG控制自身产生跑、走、跳、呼吸、心跳等节律运动，为人类研究相似的仿生控制方法提供了灵感：基于CPG的仿生控制模仿动物中枢神经系统结构，构造出多个神经震荡器，组成CPG神经元网络，通过协调各个振荡器之间的相互联系，使CPG神经元网络生成不同幅值和相位的节律信号，从而控制机器人关节产生稳定的节律运动[112]．CPG控制作为一种生物学运动控制机制，目前已被应用于许多地面移动机器人的研究中，近年来，CPG仿生控制在仿生爬壁机器人领域得到了部分应用.

2019和2021年，Srisuchinnawong等人[69,113]先后提出了基于CPG的神经控制方法和模块化神经控制方法(modular neural control, MNC)，用于仿生干黏附爬壁机器人的步态适应和避障. 通过这种方法，机器人可自动调整步态、避开障碍物．2022年，Shao等人[114]针对Nyxbot设计了一套带有外部反馈的神经控制方法，实现了机器人斜坡攀爬时身体高度的自适应．2023年，Wang等人[73]为增强机器人的攀爬能力，开发了一套模块化神经控制框架，通过其中的迟滞适应模块实现气驱脚掌与电驱关节的相位协调，使机器人足部黏附面积比传统算法增加了285%，具有更高的黏附可靠性. 现有研究中CPG的构造方法各有不同，但都是由神经振荡器组成的神经元网络．一个神经振荡器对应控制一个关节运动，各个神经振荡器间彼此相互联系，状态相互影响．通过建立神经振荡器之间的联系模式，使CPG产生控制机器人稳定运动的关节节律信号．通过调节参数，使CPG网络在状态空间生成各种形状的极限环，获得不同的耦合关系.

不同于传统单周期规划得到的运动，CPG仿生控制产生的运动具有连续性．CPG本身的非线性及状态极限环的存在使系统具有一定的鲁棒性，使被控对象能从任一随机状态进入稳定运行. 此外，CPG网络通过内部各个功能单元之间的耦合产生自组织特性，具有均化误差、协调多个自由度的作用．与柔顺控制相比，CPG控制不需要复杂的数学计算和分析，方法相对简单，适应性强，不需要机器人模型，但其缺乏严格的理论基础，导致稳定性分析困难，且CPG方法中涉及多种参数的关联机制，实际应用时需结合动物运动资料或优化算法确定控制参数.

3.2 柔顺控制

柔顺控制方法是移动机器人领域的一种经典控制方法[112]．实现机器人柔顺性的途径主要有两种：一是被动柔顺，借助一些辅助的柔顺机构如弹簧、阻尼等实现缓冲，吸收或储存接触时产生的多余能量，使机器人与壁面接触时能对接触力产生自然顺从的效果[112]．二是主动柔顺，机器人利用力反馈信息采取柔顺控制策略以主动控制接触力，保证机器人与壁面的友好接触[112]．通常弹簧、阻尼等被动柔顺机构专用性强、适应能力不足、使用范围局限，且被动柔顺机构本身并不具备控制能力，无法使机器人本身产生对力的反应动作，同时给机器人控制带来困难，尤其是既需要控制力又需要严格控制定位的场合更为突出，故主动柔顺控制逐渐占据主要地位，在仿生爬壁机器人领域得到了部分应用.

在仿生干黏附爬壁机器人控制中，Geckobot采用开环位置控制策略，实现了机器人足部的主动柔顺脱附[50]．Stickybot采取主动柔顺的力控策略，通过分布式力控制确保应力均匀分布在各个脚趾，避免瞬态力和较大的脱附力传递到躯干产生机体震颤等负面影响[115]．为提高脱附效率，Stickybot III改用肌腱式脚掌设计方案，结合开环运动控制策略，改进足端轨迹，最终实现了移动速度由4 cm/s提升至6 cm/s[49]．CLASH机器人同样采用开环运动控制策略[60]．2016年报道的Anyclimb既控制机器人足端的预压力使其主动适应各种曲面，又借助本身的被动柔顺结构适应各类弧面，最终Anyclimb顺利完成了攀爬和载荷测试[63,65]．在仿生湿黏附爬壁机器人控制中，何斌等人[76]根据Saridis分级递阶智能控制思想，提出湿吸仿生爬壁机器人的分层控制系统，在总控层引入基于位置的阻抗控制实现机器人末端的柔顺性，在管理层完成步态规划，在执行层计算各关节电机的运动角度并通过传感器实时检测各关节的运行情况，这种控制方法有利于机器人控制系统的模块化应用和扩展.

仿生爬壁机器人的运动控制以开环步态为主，已初步实现了机器人的柔顺性．然而，机器人的柔顺控制是一项综合性技术，多数尚处于理论研究阶段，技术实现正处于摸索阶段，需要进一步结合实际需求开展针对性验证．随着计算机技术与智能控制理论飞速发展，仿生爬壁机器人的柔顺控制也将得到进一步发展.

3.3 其他控制方法

在仿生爬壁机器人的控制中，还有一些并不常见的其他方法，如Lynch等人[87,116]提出了目标导向的自激控制器应用于钩爪机器人DynoClimber，并给出了稳定性证明. 该方法无需任何额外的内部时钟或参考信号即可产生腿的周期性运动，且能够编码最优功率输出，无需被控系统的参数知识. 最终实验比较发现，这种自激控制器能显著提高机器人的爬壁速度，与CPG仿生控制器相比，机器人的腿部运动速度提高了20%，最高速度达66 cm/s[116].

随着机器人研究逐渐进入智能化阶段，如模型预测控制(model predictive control, MPC)、虚拟模型控制(virtual model control, VMC)、基于零力矩点(zero moment point, ZMP)的静态稳定控制和基于零空间的全身控制(whole body control, WBC)等方法已在地面移动机器人中取得了充分实践与应用，且获得了不错的效果[117~122]，但在仿生爬壁机器人领域还相对空白. 因此，将这些控制方法推广应用至仿生爬壁机器人，有望进一步提升仿生爬壁机器人的运动性能. 在此基础上，与路径规划、传感、信息融合以及通讯等技术结合，发展数据驱动的智能控制方法，可促进仿生爬壁机器人的高智能化.

4 仿生爬壁机器人的工程化

4.1 关键技术

分析爬壁机器人的发展瓶颈，可见附着、环境感知、步态规划和行为控制是其核心技术，学习动物的对应策略是启发仿生爬壁机器人设计的重要途径. 图4从关键技术出发，对本文综述的仿生爬壁机器人按照仿生程度进行划分，可见较低仿生程度的爬壁机器人实现了壁虎、蝗虫等动物壁面附着机理的仿生，使机器人具备壁面探索能力. 由图4可知，国内外大部分仿生爬壁机器人仿生程度居中，即同时模仿动物的附着与移动方式，使机器人运动更灵活. 近年来，还有较少仿生爬壁机器人实现了附着机理、移动方式和感知控制3个层面较高程度的仿生，使机器人更智能.

壁虎能够“飞檐走壁”，离不开其出色的刚毛黏附脚掌、灵活的四肢与尾巴以及卓越的调控方法. 同样地，仿生爬壁机器人要在壁面上稳定可靠而又高效地工作，附着、驱动及步态、感知和控制缺一不可. 表S1总结了仿生爬壁机器人的关键技术，按照仿生附着方式、移动方式和控制方法分类并给出了每种类型的优缺点、适应场景与典型代表. 对比发现，不同的附着和移动方式各有优势和不足，在实际应用中需根据场景作出选择，结合硬件设计相应的运动控制策略，以实现机器人在垂直表面，甚至负平面的稳定黏附运动.

移动机构和附着方式的不同组合将赋予机器人不同的机动性，二者相辅相成，相互影响. 表S2将本文介绍的爬壁机器人研究按移动机构和仿生附着方式分类，总结如下.

(1) 机器人的移动方式中，腿足式应用最广泛，其次是轮足式，然后是尺蠖式. 采用腿足式移动的仿生爬壁机器人主要与仿壁虎刚毛的干黏附方式和仿动物钩爪的抓附方式两种附着机制配合，这种组合接近动物的运动机构，可更多借鉴动物的运动步态及受力规律. 部分机器人将仿树蛙湿黏附与腿足式移动结合，这部分研究主要集中在黏液浓度、黏液薄膜面积等对足端附着力的影响上，尚未得到推广使用. 基于尺蠖式移动的仿生爬壁机器人中，仿生干黏附应用较多. 而轮式和履带式移动机构通过干黏附和爪刺抓附达到附着目的，尚未出现将仿生湿黏附与传统履带式或轮履式移动方式相结合的仿生爬壁机器人.

(2) 机器人的仿生附着方式中，仿壁虎刚毛的干黏附和仿蝗虫钩爪的抓附，这两种仿生附着方式的应用研究相对成熟. 也有部分机器人已经实现了仿生黏附与抓附结合，提出了“黏附-抓附”协同附着方式，使仿生爬壁机器人能够适应各种粗糙或光滑的壁面，应用场景更加广泛.

4.2 设计要点

结合表S2可知，腿足式干黏附/抓附仿生爬壁机器人是应用较多的构型. 这类机器人的整体设计思路基于典型攀爬动物身体的结构形状、运动模式、附着机制和生物力学原理，通过简化得到机器人的运动构型及多足协调的仿生步态规划(图5). 由此作为机器人设计的仿生学依据，再结合实际应用、功能和软硬件约束，明确设计输入并确定机器人的附着形式，完成机器人整体的结构和策略规划(外形、结构、传感、供能、驱动、控制和预期移动步态等)，同时考虑现代智能控制元素与仿生机体功能特征的融合，最终形成具备智能特性的腿足式仿生爬壁机器人，对其关键设计要点归纳如下.



图 4 (网络版彩色)仿生爬壁机器人仿生程度的发展
Figure 4 (Color online) The development of biomimetic degree of biomimetic wall-climbing robots

(1) 本体系统设计. 腿足式仿生爬壁机器人的本体系统主要包括主体(躯干)、移动系统(腿足)、附着系统(脚垫)以及控制系统(大脑). 其中, 躯干常设计为无自由度的纯刚性结构或有自由度的柔性脊柱结构; 腿足系统可借鉴动物的腿足构造和各足节的长度比例并结合应用约束确定机器人的腿足数目、关节自由度数、关节活动范围和腿部构造方式; 附着系统是机器人立面作业的前提, 其设计至关重要, 需根据作业面的粗糙度及材质特征确定其附着形式为干黏附、抓附或黏-抓附协同, 进而结合动物黏附器官的结构特点, 设计黏附面积合理、爪刺分布恰当的仿生附着脚掌; 控制系统设计在本体系统设计阶段, 需结合驱动器、电机和传感器等电力元件的供电及信号传输要求, 完成控制硬件的电路设计与电气功能测试. 此外, 供电系统作为机器人的能量来源, 需结合使用需求选择电池、线缆或太阳能供电. 总而言之, 机器人本体系统设计是一项综合性任务, 从功能性角度出发, 结合质量、负载、体积及工作时长要求, 完成硬件选型与各子系统的耦合设计是其主要设计思路.

(2) 步态规划与行为控制. 爬壁机器人主要用于代替人工完成困难、危险且枯燥的工作, 实际应用场景常含有凸起、凹坑、台阶和裂缝等各种障碍. 因此, 这部分关键在于如何对机器人进行合理的步态规划与行为控制, 使其具备可靠附着、轻松脱附与自主调控能力. 对于机器人的步态规划, 参考四足和六足动物的运动过程, 四足以三角(图5(d))和对角步态(图5(e))实现慢速和快速运动, 六足通过两组腿(三足为一组)的交替运动前进(图5(c)). 对于机器人的行为控制, 为实现其可靠附着, 可通过本体搭载的力传感器或触觉传感器等感知足底接触状态, 在控制框架中引入触地检测机制, 构建触觉信号与机器人接触状态的映射模型, 辅助机器人及时调整腿部行为; 为实现机器人的轻松脱附, 可控制黏附垫的剥离角度或调整质心破坏锁合模式辅助脱离, 并结合阻抗控制、导纳控制等主动柔顺控制方法使机器人对外界表现出柔顺性, 减小脱附冲击; 为实现机器人行为的自主调控, 可通过机身搭载的视觉传感器或激光雷达感知周围环境信息和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)感知姿态信息, 将多源感知信息融合、处理并及时反馈给控制系统, 辅助控制系统根据反馈及算法作出决策, 调整机器人的方向、附着、步伐及姿态等, 提高其自主性.

通过全面的本体系统设计与合理的步态规划与行为控制, 腿足式仿生爬壁机器人已在特定的实验室场景取得了良好的实验效果, 如攀爬垂直的玻璃、砖墙、木材、岩石、布料表面及丙烯酸、亚克力表面等, 表现出较高的附着性和稳定性, 为仿生爬壁机器人的实际应用奠定了基础.

4.3 应用前景

仿生爬壁机器人因具备有效的壁面附着与移动特性, 可作为移动平台搭载探测、维护、采集、清洁等设备完成/辅助完成立面作业任务, 可在安全反恐、航

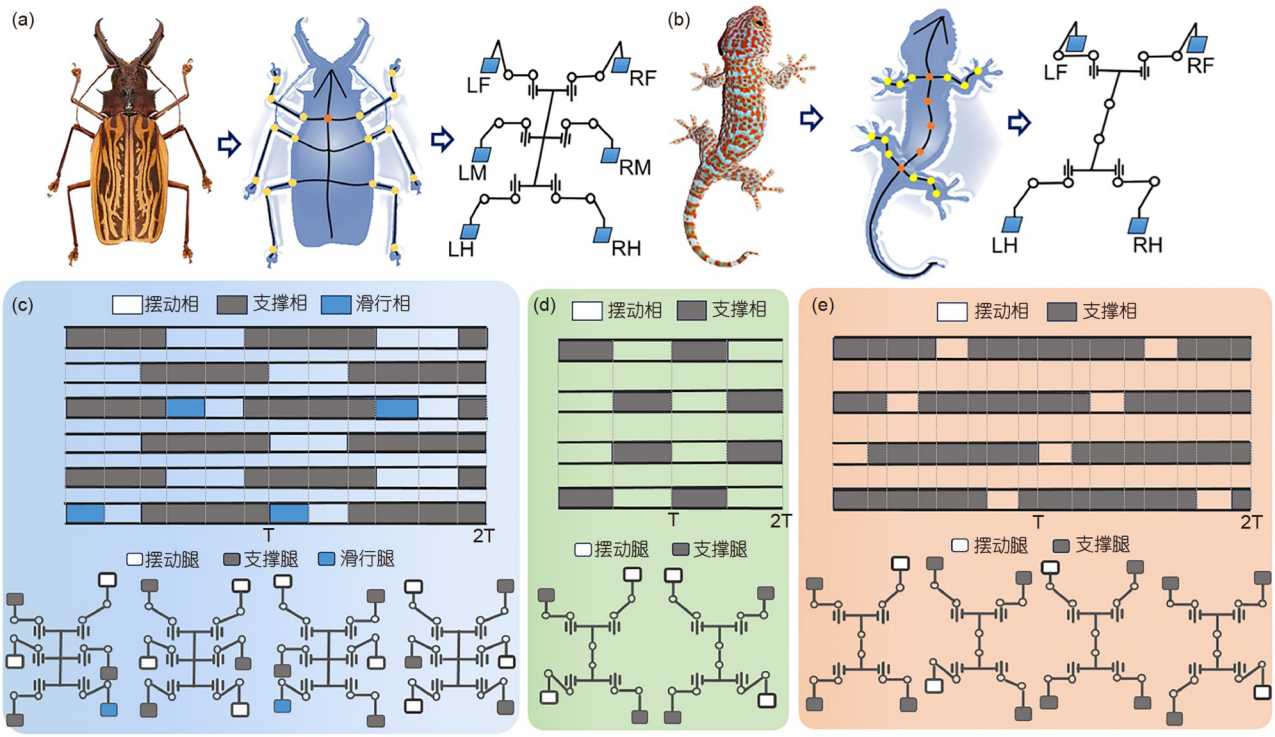


图 5 (网络版彩色)仿生爬壁机器人的仿生设计依据. (a) 甲虫及其仿生构型; (b) 壁虎及其仿生构型; (c) 甲虫的运动相位图及示意图; (d) 壁虎的对角步态相位图及示意图; (e) 壁虎的三角步态相位图及示意图

Figure 5 (Color online) Bionic design basis for biomimetic wall-climbing robots. (a) Beetle and its biomimetic configuration; (b) gecko and its biomimetic configuration; (c) the phase diagram and schematic diagram of beetles movement; (d) phase diagram and schematic diagram of the diagonal gait of geckos; (e) phase diagram and schematic diagram of the triangular gait of geckos

空航天、民事应用等领域发挥重大作用.

(1) 安全反恐. 仿生爬壁机器人可用于高处侦察和反恐防暴等任务. 例如, 机器人可携带雷达、相机等设备爬上高层建筑或树木顶部, 探测敌方位置和活动情况并实时传回基地, 为我方传递情报以便实施精准打击. 当军事作战区为野外非结构场景时, 腿足式仿生爬壁机器人因其灵活性与避越障能力, 成为最佳选择. 当作战区为城市街区场景时, 轮式仿生爬壁机器人由于移动速度快, 表现出明显的优势.

(2) 航空航天. 随着2022年中国天宫空间站建设完成, 空间站的运维和功能保持需求日益迫切, 由于真空、失重条件使传统爬壁机器人应用受限, 仿生爬壁机器人崭露头角, 可用于航天器的舱外巡检、定期维护、燃料加注和远端部件(如柔性太阳能板等)检测等. 例如, 可以使机器人携带工具和设备运动至太阳能板远端进行检测、排故和维修, 提高航天器的可靠性和使用寿命. 通常航天器舱外包含把手、舷窗、舱门和机械臂、太阳能板等设备的固定基座等, 轮式和履带式移动在这种障碍物尺寸不一、分布随机的场景下移动速度受限且转弯困难, 应用腿足式移动能够很好地解决这些问题. 由于空天领域对设备可靠性的严格要求, 降低机器人的脱附风险, 保证可靠的黏附是仿生爬壁机器人实现空天领域应用的关键问题.

(3) 民用领域. 仿生爬壁机器人有望弥补传统爬壁机器人在部分领域的应用空白, 如医疗服务方面, 微型尺蠖式软体仿生爬壁机器人可用于肠道检查、靶向药物运输等任务, 改善治疗效果; 工业检测维护方面, 小型化的仿生爬壁机器人可用于狭小空间的探测, 为人类带来更多便利和效益.

5 爬壁机器人的未来发展

5.1 仿生基础清晰化、多元化

自然界的攀爬动物种类繁多, 为仿生爬壁机器人研究提供了丰富的动物原型. 目前基于范德华力的干黏附机制已得到广泛认可, 但对于刚毛β-角蛋白基团

带电荷使其接触过程产生摩擦电的揭示较少[123]. 通过开展壁虎刚毛摩擦电荷的测量实验, 可明确摩擦电黏附力和范德华黏附力的定量关系, 从而拓展范德华力新机制, 建立一种含外电场力增强范德华力效应的新机制, 由此作为新的理论基础指导仿生爬壁机器人的黏附设计. 此外, 除关注攀爬动物的附着机制和运动模式等典型特征外, 动物脊柱、尾巴的结构形态和生物力学特性等还有待深入研究, 尤其是壁虎在运动过程中脊柱随步态的变化规律. 因此, 通过标记点观察壁虎等攀爬动物在平面、立面、负平面运动及壁面过渡时的脊柱变化, 探究动物柔性脊柱与腿部协同运动的机理, 可从多个维度指引仿生爬壁机器人的构型设计.

5.2 附着方式模块化、协同化

各种单一的仿生附着方式适应场景不同, 也存在各自的问题, 如干黏附对灰尘敏感, 湿黏附缺乏自清洁, 抓附成功率较低等. 未来从黏附材料制备方面, 可选择更加坚硬疏水的材料如聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)、聚乙烯(polyethylene, PE)、聚二甲基硅氧烷等, 并考虑引入其他有机基团如乙基、苯基等, 提高材料对灰尘及高温辐射的耐受性. 在抓附机构设计方面, 可考虑柔性部件对机器人性能的影响, 进行刚柔一体化的仿生设计, 提高抓附可靠性. 此外, 随着动物附着机制逐步被揭示及多场景应用需求日益迫切, 传统附着方式与仿生附着方式的协同化与功能的集成化是未来仿生爬壁机器人附着技术的主要发展方向: 一方面, 将不同附着方式组合, 实现协同黏附; 另一方面, 采用模块化的设计思路实现仿生爬壁机器人附着功能的集成, 通过更换脚掌模块适应不同场景, 提高机器人系统的复用性和可扩展性, 降低开发和维护成本.

5.3 驱动方式多样化、智能化

当前用于仿生爬壁机器人的主要驱动方式为电机驱动. 电机驱动可直接或间接驱动执行机构使机器人运动, 具有响应快、精度高、可控性强等优势, 但电机驱动经常需要配合减速器、编码器使用. 电机驱动由于其质量和体积限制, 难以适用于仿生爬壁机器人小型化和轻量化的设计需求. 因此, 基于新材料、新工艺开发的新型微驱动器未来在仿生爬壁机器人领域将得到更加广泛的应用, 如SMA、SMPs和MSMs等智能材料驱动, 利用外界物理场(光、热、磁、电等)的变化获取驱动力, 具有质量轻、能量密度高等显著优势, 非常利于爬壁机器人的轻量化和小型化设计.

5.4 移动机构多模态、可重构

仿生爬壁机器人的移动机构多种多样, 从仿生学角度可分为仿生移动方式(腿足式、轮足式、尺蠖式)和其他传统移动方式(轮式、履带式和轮履式). 其中, 各种单一的移动机构各具优势且适应场景不同. 现有的仿生爬壁机器人多数只具备某一种移动机构, 尽管少数爬壁机器人同时具备轮履或轮足等两种及以上移动机构, 但它们的应用仍然受限, 根本原因是这类机器人只有一种运动模态, 即只能以纯旋转(轮)或纯步进(足)等固定的单一模式前进. 相比之下, 地面移动机器人经过长足的发展已经实现了不同运动模态的良好结合, 如可滚动可行走的四轮足机器人, 为未来在仿生爬壁机器人领域开发组合移动机构实现壁面运动模态切换提供了新的研究范式. 再者, 动态可重构的变胞设计通过自组装快速切换构型是未来实现仿生爬壁机器人多运动模态的一个重要发展方向.

5.5 感知控制一体化、自主化

CPG控制已使机器人产生类似动物的节律运动, 但与动物本身的协调控制能力相比相差甚远, 且动物还具备对外部环境的感知与决策能力, 因此未来仿生爬壁机器人对外部环境的多源信息感知、信息融合处理、稳定性和鲁棒性等方面都有很大的发展空间. 近年来, 随着微纳技术、数字补偿技术和网络化技术的发展, 基于各种物理、化学和生物的效应与定律, 开发具有新原理、新效应的新型传感器是实现仿生爬壁机器人感知控制一体化的重要途径. 此外, 目前仿生爬壁机器人的控制集中在实现机器人的基本运动功能如前进、后退、转弯等, 与地面机器人控制方法的“百花齐放”相比, 仿生爬壁机器人的控制方法略显单一, 未来进一步关注仿生爬壁机器人的运动细节, 如何从控制角度帮助机器人实现“黏得好、脱得稳”是一个值得探究的问题. 随着人工智能技术的发展, 机器学习、深度学习、强化学习等数据驱动模型成为控制的关键技术, 为实现仿生爬壁机器人的高智能化带来了更多的可能性和机会.

5.6 应用发展工程化、实用化

当前仿生爬壁机器人由于载荷能力和工作时间相对有限, 壁面脱附风险相对较高, 缺乏统一的物理接口

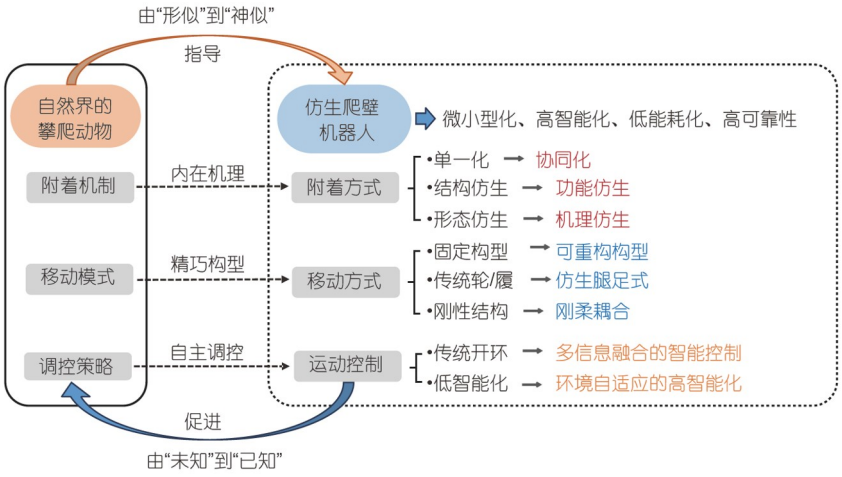


图 6 (网络版彩色)仿生爬壁机器人的未来发展
Figure 6 (Color online) The future development of biomimetic wall-climbing robots

和控制接口搭载辅助设备完成作业，导致其实际应用受限. 为尽快突破仿生爬壁机器人的应用瓶颈, 需从实际需求出发，同生物领域、材料领域、控制领域等多领域学者协同合作，着力攻克具体场景下的应用难点和痛点，在相对独立的领域内将其作用发挥至极限将是未来仿生爬壁机器人走向应用的主要趋势. 随着爬壁机器人仿生度提高与应用的发展，未来仿生学将再次焕发生机. 一方面, 作为渠道持续不断地向各种自然科学和技术科学输送资料和营养，指导仿生爬壁机器人由“形似”向“神似”过渡. 另一方面，这样的仿生过程把对生命的探索和实践应用结合，促进生物学由“未知”到“已知”, 由“已知”到“了然”的跨越(图6).

参考文献

1 Fang G, Cheng J. Advances in climbing robots for vertical structures in the past decade: A review. Biomimetics, 2023, 8: 47
2 Fang Y, Wang S, Bi Q, et al. Design and technical development of wall-climbing robots: A review. J Bionic Eng, 2022, 19: 877–901
3 Chattopadhyay P, Ghoshal S K. Adhesion technologies of bio-inspired climbing robots: A survey. Int J Robot Autom, 2018, 33: 654–661
4 Ma J L, Peng J, Guo Y J, et al. Research status and development trend of wall climbing robot (in Chinese). J Mech Eng, 2023, 59: 11–28 [马吉良, 彭军, 郭艳婕, 等. 爬壁机器人研究现状及发展趋势. 机械工程学报, 2023, 59: 11–28]
5 Kang M, Sun K, Seong M, et al. Applications of bioinspired reversible dry and wet adhesives: A review. Front Mech Eng, 2021, 7: 1–4
6 Nishi A, Wakasugi Y, Watanabe K. Design of a robot capable of moving on a vertical wall. Adv Robot, 1986, 1: 33–45
7 Xu S, He B, Hu H. Research on kinematics and stability of a bionic wall-climbing hexapod robot. Appl Bionics Biomech, 2019, 2019: 6146214
8 Gao S, Hou R, Li J, et al. Magnetic field analysis and structure design of a new magnetic wheel for wall-climbing robot. J Supercond Nov Magn, 2021, 35: 529–537
9 Hong S, Um Y, Park J, et al. Agile and versatile climbing on ferromagnetic surfaces with a quadrupedal robot. Sci Robot, 2022, 7: eadd1017
10 de Rivaz S D, Goldberg B, Doshi N, et al. Inverted and vertical climbing of a quadrupedal microrobot using electroadhesion. Sci Robot, 2018, 3: eaau3038
11 Menon C, Murphy M, Sitti M, et al. Gecko inspired surface climbing robots. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. New York: IEEE, 2004. 431–436
12 Zaaf A, Van Damme R, Herrel A, et al. Spatio-temporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko. J Exp Biol, 2001, 204: 1233–1246
13 Guo C, Sun J R, Ge Y B, et al. Biomechanism of adhesion in gecko setae. Sci China Life Sci, 2012, 55: 181–187
14 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. Nature, 2000, 405: 681–685
15 Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99: 12252–12256
16 Autumn K, Gravish N. Gecko adhesion: Evolutionary nanotechnology. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2008, 366: 1575–1590
17 Gorb S, Scherge M. Biological microtribology: Anisotropy in frictional forces of orthopteran attachment pads reflects the ultrastructure of a

highly deformable material. Proc R Soc Lond B, 2015, 267: 1239–1244
18 Federle W, Barnes W J P, Baumgartner W, et al. Wet but not slippery: Boundary friction in tree frog adhesive toe pads. J R Soc Interface, 2006, 3: 689–697
19 Arzt E, Gorb S, Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. Proc Natl Acad Sci USA, 2003, 100: 10603–10606
20 Israelachivili J N. Intermolecular and Surface Forces. 3rd ed. New York: Academic Press, 2011
21 Gillies A G, Henry A, Lin H, et al. Gecko toe and lamellar shear adhesion on macroscopic, engineered rough surfaces. J Exp Biol, 2014, 217: 283–289
22 Alibardi L. Immunolocalization of specific keratin associated beta-proteins (beta-keratins) in the adhesive setae of Gekko gecko. Tissue Cell, 2013, 45: 231–240
23 Wang B, Yang W, McKittrick J, et al. Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. Prog Mater Sci, 2016, 76: 229–318
24 Hansen W R, Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102: 385–389
25 Dai Z, Wang Z, Ji A. Dynamics of gecko locomotion: A force-measuring array to measure 3D reaction forces. J Exp Biol, 2011, 214: 703–708
26 Autumn K, Puthoff J. Properties, Principles, and Parameters of the Gecko Adhesive System. Cham: Springer, 2016
27 Clemente C J, Federle W. Pushing versus pulling: Division of labour between tarsal attachment pads in cockroaches. Proc Biol Sci, 2008, 275: 1329–1336
28 Dai Z D, Gorb S. Contact mechanics of pad of grasshopper (Insecta: ORTHOPTERA) by finite element methods. Chin Sci Bull, 2009, 54: 549–555
29 Langowski J K A, Dodou D, van Assenbergh P, et al. Design of tree-frog-inspired adhesives. Integr Comp Biol, 2020, 60: 906–918
30 Huang W, Wang X. Biomimetic design of elastomer surface pattern for friction control under wet conditions. Bioinspir Biomim, 2013, 8: 046001
31 Zhou Q, He B, Yue J G. Source of attachment forces of ants and the secretion effect (in Chinese). Chin J Theor Appl Mech, 2007, 39: 428–432 [周群, 何斌, 岳继光. 蚂蚁的吸附力来源及其分泌液作用. 力学学报, 2007, 39: 428–432]
32 Li M H, He B, Qin H Y, et al. A wet adhesion inspired biomimetic pad with direction dependence and adaptability (in Chinese). Chin Sci Bull, 2011, 56: 1935–1941 [黎明和, 何斌, 秦海燕, 等. 具有黏附方向性及自适应性的仿生湿吸足垫研究. 科学通报, 2011, 56: 529–535]
33 Su Y W, Ji B H, Huang Y G, et al. Study on the influence of contact shape on biological wet adhesion (in Chinese). In: The 14th Academic Annual Meeting of Beijing Mechanics Society, 2008 [苏业旺, 季葆华, 黄永刚, 等. 接触形状对生物湿黏附影响的研究. 见: 北京力学会第14届学术年会, 2008]
34 Federle W. An integrative study of insect adhesion: Mechanics and wet adhesion of pretarsal pads in ants. Integr Comp Biol, 2002, 42: 1100–1106
35 Qian J, Gao H. Scaling effects of wet adhesion in biological attachment systems. Acta Biomater, 2006, 2: 51–58
36 Bußhardt P, Kunze D, Gorb S N. Interlocking-based attachment during locomotion in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae). Sci Rep, 2014, 4: 6998
37 Liu Y, Sun S, Wu X, et al. A wheeled wall-climbing robot with bio-inspired spine mechanisms. J Bionic Eng, 2015, 12: 17–28
38 Provancher W R, Clark J E, Geisler B, et al. Towards penetration-based clawed climbing. In: 7th International Conference on Climbing and Walking Robots, 2005. 961–970
39 Han L, Wang Z, Ji A, et al. Grip and detachment of locusts on inverted sandpaper substrates. Bioinspir Biomim, 2011, 6: 046005
40 Wang L X, Zhou Q, Xu S Y. Role of locust Locusta migratoria manilensis claws and pads in attaching to substrates. Chin Sci Bull, 2010, 56: 789–795
41 Niu Q, Zhao J, Liang L, et al. Dynamic vertical climbing mechanism of Chinese Dragon-Li cats based on the linear inverted pendulum model. J Bionic Eng, 2022, 20: 136–145
42 Dai Z, Gorb S N, Schwarz U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae). J Exp Biol, 2002, 205: 2479–2488
43 Ji A, Zhao Z, Manoonpong P, et al. A bio-inspired climbing robot with flexible pads and claws. J Bionic Eng, 2018, 15: 368–378
44 Song Y, Dai Z, Wang Z, et al. The synergy between the insect-inspired claws and adhesive pads increases the attachment ability on various rough surfaces. Sci Rep, 2016, 6: 26219
45 Dai Z D, Sun J R. Locomotion system and its biomimetics of geckos (in Chinese). In: 2005 Academic Seminar and Member Representative Conference of the Chinese Herpetological Society, 2005. 375–381 [戴振东, 孙久荣. 壁虎运动系统及其运动仿生. 见: 中国动物学会两栖爬行学分会2005年学术研讨会暨会员代表大会, 2005. 375–381]
46 Unver O, Sitti M. A miniature ceiling walking robot with flat tacky elastomeric footpads. In: 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2009. 2276–2281
47 Peyvandi A, Soroushian P, Lu J. A new self-loading locomotion mechanism for wall climbing robots employing biomimetic adhesives. J Bionic Eng, 2013, 10: 12–18

48 Wang L, Graber L, Iida F. Large-payload climbing in complex vertical environments using thermoplastic adhesive bonds. IEEE Trans Robot, 2013, 29: 863–874

49 Hawkes E W, Ulmen J, Esparza N, et al. Scaling walls applying dry adhesives to the real world. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2011. 5100–5106

50 Unver O, Ali Uneri A A, Sitti M. Geckobot: A gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2006. 2329–2335

51 Unver O, Sitti M. Tankbot: A palm-size, tank-like climbing robot using soft elastomer adhesive treads. Int J Robot Res, 2010, 29: 1761–1777

52 Seo T W, Sitti M. Tank-like module-based climbing robot using passive compliant joints. IEEE ASME Trans Mechatron, 2013, 18: 397–408

53 Lee G, Kim H, Seo K, et al. Series of multilinked caterpillar track-type climbing robots. J Field Robot, 2016, 33: 737–750

54 Murphy M P, Sitti M. Waalbot: An agile small-scale wall-climbing robot utilizing dry elastomer adhesives. IEEE ASME Trans Mechatron, 2007, 12: 330–338

55 Murphy M P, Kute C, Mengüç Y, et al. Waalbot II: Adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives. Int J Robot Res, 2010, 30: 118–133

56 Menon C, Li Y, Sameoto D, et al. Abigaille-I: Towards the development of a spider-inspired climbing robot for space use. In: Proceedings of the IEEE RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. New York: IEEE, 2008. 384–389

57 Li Y, Ahmed A, Sameoto D, et al. Abigaille II: Toward the development of a spider-inspired climbing robot. Robotica, 2011, 30: 79–89

58 Henrey M, Ahmed A, Boscariol P, et al. Abigaille-III: A versatile, bioinspired hexapod for scaling smooth vertical surfaces. J Bionic Eng, 2014, 11: 1–17

59 Daltorio K A, Gorb S, Peressadko A, et al. Microstructured polymer adhesive feet for climbing robots. MRS Bull, 2007, 32: 504–508

60 Birkmeyer P, Gillies A G, Fearin R S. Dynamic climbing of near-vertical smooth surfaces. In: 25th IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2012. 286–292

61 Simon K, Nick W, Hai-Jun S, et al. Inchworm style gecko adhesive climbing robot. In: 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2014. 2319–2324

62 Hawkes E W, Christensen D L, Cutkosky M R. Vertical dry adhesive climbing with a 100× bodyweight payload. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2015. 3762–3769

63 Liu Y, Kim H G, Seo T W. AnyClimb: A new wall-climbing robotic platform for various curvatures. IEEE ASME Trans Mechatron, 2016, 21: 1812–1821

64 Ko H, Yi H, Jeong H E. Wall and ceiling climbing quadruped robot with superior water repellency manufactured using 3D printing (UNIclimb). Int J Precis Eng Manuf-Green Technol, 2017, 4: 273–280

65 Liu Y, Seo T W. AnyClimb-II: Dry-adhesive linkage-type climbing robot for uneven vertical surfaces. Mech Mach Theory, 2018, 124: 197–210

66 Dharmawan A G, Xavier P, Hariri H H, et al. Design, modeling, and experimentation of a bio-inspired miniature climbing robot with bilayer dry adhesives. J Mech Robot, 2019, 11: 020902

67 Tang T, Hou X, Xiao Y, et al. Research on motion characteristics of space truss-crawling robot. Int J Adv Robot Syst, 2019, 16: 1729881418821578

68 Liu Y, Lim B, Lee J W, et al. Steerable dry-adhesive linkage-type wall-climbing robot. Mech Mach Theory, 2020, 153: 103987

69 Srisuchinnawong A, Wang B, Shao D, et al. Modular neural control for gait adaptation and obstacle avoidance of a tailless gecko robot. J Intell Robot Syst, 2021, 101: 27

70 Wang Z, Wang Z, Dai Z, et al. Bio-inspired adhesive footpad for legged robot climbing under reduced gravity: Multiple Toes facilitate stable attachment. Appl Sci, 2018, 8: 114

71 Wang B, Xiong X, Duan J, et al. Compliant detachment of wall-climbing robot unaffected by adhesion state. Appl Sci, 2021, 11: 5860

72 Yu Z, Fu J, Ji Y, et al. Design of a variable stiffness gecko-inspired foot and adhesion performance test on flexible surface. Biomimetics, 2022, 7: 125

73 Wang B, Wang Z, Song Y, et al. A neural coordination strategy for attachment and detachment of a climbing robot inspired by gecko locomotion. Cyborg Bionic Syst, 2023, 4: 0008

74 Qu L, Dai L. Gecko-foot-mimetic aligned single-walled carbon nanotube dry adhesives with unique electrical and thermal properties. Adv Mater, 2007, 19: 3844–3849

75 Li B, He B, Su Y Q. Design of hexapod bionic robot on wet adhesion (in Chinese). J Huazhong Univ Sci Technol (Nat Sci Ed), 2008, 36(S1): 210–212 [李斌, 何斌, 苏永清. 湿吸型仿生六足机器人的设计. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(S1): 210–212]

76 He B, Zhou Y M, Li M H, et al. Control system design and realization of wet adhesion wall-climbing bio-robot (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci), 2010, 38: 1813–1817, 1827 [何斌, 周艳敏, 黎明和, 等. 湿吸仿生爬壁机器人分层控制系统, 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38: 1813–1817, 1827]

77 Li M H, He B, Yue J G, et al. Wet adhesion mechanism and its application to bionic wall-climbing robot (in Chinese). Robot, 2010, 32: 577–585 [黎明和, 何斌, 岳继光, 等. 湿吸附机理及其在仿生爬壁机器人中的应用. 机器人, 2010, 32: 577–585]
78 He B, Wang Z, Li M, et al. Wet adhesion inspired bionic climbing robot. IEEE ASME Trans Mechatron, 2014, 19: 312–320
79 Wiltsie N, Lanzetta M, Iagnemma K. A controllably adhesive climbing robot using magnetorheological fluid. In: 2012 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications, 2012. 91–96
80 Asbeck A T, Sangbae K, McClung A. Climbing walls with microspines. In: Proceedings of the 2006 Conference on International Robotics and Automation, 2006. 4315–4317
81 Kim S, Asbeck A T, Cutkosky M R, et al. SpinybotII: Climbing hard walls with compliant microspines. In: 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005. 601–606
82 Wile G D, Daltorio K A, Diller E D, et al. Screenbot: Walking inverted using distributed inward gripping. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. 1513–1518
83 Gerhart G R, Saunders A, Shoemaker C M, et al. The RiSE climbing robot: Body and leg design. In: Proceedings of the Conference on Unmanned Systems Technology VIII, 2006. 623017
84 Spenko M J, Haynes G C, Saunders J A, et al. Biologically inspired climbing with a hexapedal robot. J Field Robot, 2008, 25: 223–242
85 Haynes G C, Khripin A, Lynch G, et al. Rapid pole climbing with a quadrupedal robot. In: 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. 2767–2772
86 Parness A, Frost M, Thatte N, et al. Gravity-independent rock-climbing robot and a sample acquisition tool with microspine grippers. J Field Robot, 2013, 30: 897–915
87 Lynch G A, Clark J E, Lin P C, et al. A bioinspired dynamical vertical climbing robot. Int J Robot Res, 2012, 31: 974–996
88 Wang W, Li X, Wu S, et al. Effects of pendular waist on gecko's climbing: Dynamic gait, analytical model and bio-inspired robot. J Bionic Eng, 2017, 14: 191–201
89 Miller B D, Clark J E. Towards highly-tuned mobility in multiple domains with a dynamical legged platform. Bioinspir Biomim, 2015, 10: 046001
90 Yanagida T, Elara Mohan R, Pathmakumar T, et al. Design and implementation of a shape shifting rolling–crawling–wall-climbing robot. Appl Sci, 2017, 7: 342
91 Brown J M, Austin M P, Miller B D, et al. Evidence for multiple dynamic climbing gait families. Bioinspir Biomim, 2019, 14: 036001
92 Tanaka Y, Shirai Y, Lin X, et al. Scaler: A tough versatile quadruped free-climber robot. In: 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2022. 5632–5639
93 Liu Y W, Liu S W, Mei T, et al. Design and analysis of a bio-inspired tracked wall-climbing robot with spines (in Chinese). Robot, 2019, 41: 526–533 [刘彦伟, 刘三娃, 梅涛, 等. 一种仿生爪刺式履带爬壁机器人设计与分析. 机器人, 2019, 41: 526–533]
94 Shirai Y, Lin X, Tanaka Y, et al. Risk-aware motion planning for a limbed robot with stochastic gripping forces using nonlinear programming. IEEE Robot Autom Lett, 2020, 5: 4994–5001
95 Mao C X, Shen Y N. Bionics mechanism and system design of a spine-type flying and wall-climbing robot (in Chinese). Robot, 2021, 43: 246–256 [毛晨曦, 沈煜年. 爪刺式飞行爬壁机器人的仿生机理与系统设计. 机器人, 2021, 43: 246–256]
96 Bian S, Xie D, Wei Y, et al. A wall climbing robot arm capable of adapting to multiple contact wall surfaces. In: 12th International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2019. 97–109
97 Liu J, Xu L, Xu J, et al. Analysis and optimization of the wall-climbing robot with an adsorption system and adhesive belts. Int J Adv Robot Syst, 2020, 17: 1729881420926409
98 Bian S, Xu F, Wei Y, et al. A novel type of wall-climbing robot with a gear transmission system arm and adhere mechanism inspired by cicada and gecko. Appl Sci, 2021, 11: 4137
99 Bryant M, Fitzgerald J, Miller S, et al. Climbing robot actuated by meso-hydraulic artificial muscles. In: Conference on Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2014. 90570H
100 Choi H, Jung G, Cho K. Design of a milli-scale, biomimetic platform for climbing on a rough surface. In: Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, 2015. 2205–2210
101 Bian S, Wei Y, Xu F, et al. A four-legged wall-climbing robot with spines and miniature setae array inspired by longicorn and gecko. J Bionic Eng, 2021, 18: 292–305
102 Liu Y, Sun S, Wu X, et al. A leg-wheel wall-climbing robot utilizing bio-inspired spine feet. In: Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2013. 1819–1824
103 Chanchlani R, Swami S K R, Agarwal R, et al. Intelligent Climber: A wireless wall-climbing robot utilizing vacuum suction and sand paper. In: Texas Instruments India Educators' Conference, 2013. 271–276
104 Xu J, Ji A H, Hu J. Adhesive mechanism and application research of a roller-adhering wall-climbing robot (in Chinese). Mach Des Res, 2020, 36:

25–31 [徐杰, 吉爱红, 胡捷. 滚轮黏附式爬壁机器人的附着机理及应用试验研究. 机械设计与研究, 2020, 36: 25–31]
105 Lee K, Kim Y, Paik J K, et al. Clawed miniature inchworm robot driven by electromagnetic oscillatory actuator. J Bionic Eng, 2015, 12: 519–526
106 Wang X, Yang B, Tan D, et al. Bioinspired footed soft robot with unidirectional all-terrain mobility. Mater Today, 2020, 35: 42–49
107 Wu Y, Dong X, Kim J, et al. Wireless soft millirobots for climbing three-dimensional surfaces in confined spaces. Sci Adv, 2022, 8: eabn3431
108 Sun J, Bauman L, Yu L, et al. Gecko-and-inchworm-inspired untethered soft robot for climbing on walls and ceilings. Cell Rpts Phys Sci, 2023, 4: 101241
109 Hu Q, Dong E, Sun D. Soft modular climbing robots. IEEE Trans Robot, 2023, 39: 399–416
110 Liu J, Xu L, Xu J, et al. Design, modeling and experimentation of a biomimetic wall-climbing robot for multiple surfaces. J Bionic Eng, 2020, 17: 523–538
111 Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. In: Proceedings of the 17th World Congress. Seoul: The International Federation of Automatic Control, 2008. 10822–10825
112 Chen G R. Research on walking control strategy for static and dynamic gait of a quadruped robot (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018 [陈光荣. 四足机器人静动步态行走控制策略研究. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2018]
113 Srisuchinnawong A, Shao D H, Ngamkajornwiwat P, et al. Neural control for gait ggeneration and adaptation of a gecko robot. In: Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Robotics, 2019. 468–473
114 Shao D, Wang Z, Ji A, et al. A gecko-inspired robot with CPG-based neural control for locomotion and body height adaptation. Bioinspir Biomim, 2022, 17: 036008
115 Kim S, Spenko M, Trujillo S, et al. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. IEEE Trans Robot, 2008, 24: 65–74
116 Lynch G A, Clark J E, Koditschek D. A self-exciting controller for high-speed vertical running. In: Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2009. 631–638
117 Carlo J D, Wensing P M, Katz B, et al. Dynamic locomotion in the MIT Cheetah 3 through convex model predictive control. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2018. 7440–7447
118 Chignoli M, Kim D, Stanger-Jones E, et al. The MIT humanoid robot: Design, motion planning, and control for acrobatic behaviors. In: Proceedings of the 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2020). New York: IEEE, 2021. 1–8
119 Katz B, Carlo J D, Kim S. Mini Cheetah a platform for pushing the limits of dynamic quadruped control. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2019. 6295–6301
120 Lee J, Hwangbo J, Wellhausen L, et al. Learning quadrupedal locomotion over challenging terrain. Sci Robot, 2020, 5: eabc5986
121 Focchi M, del Prete A, Havoutis I, et al. High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots. Auton Robot, 2016, 41: 259–272
122 Li X, Zhang X, Niu J, et al. A stable walking strategy of quadruped robot based on ZMP in trotting gait. In: Proceeding of the 19th IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2022: 858-863
123 Izadi H, Stewart K M E, Penlidis A. Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion. J R Soc Interface, 2014, 11: 0371

补充材料

图S1 壁虎脚底刚毛的β-角蛋白示意图
表S1 仿生爬壁机器人的关键技术与适应场景总结
表S2 仿生爬壁机器人不同附着与移动方式的组合

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “仿生爬壁机器人: 研究基础、关键技术及发展预测”

Biomimetic wall-climbing robots: Research foundation, key technologies and development forecasts

Xiangli Pei, Shuhao Liu, Ruizhuo Shi, Anmin Wei, Zhiwei Wu & Zhendong Dai*

Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
* Corresponding author, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

With the advancement of technology and social development, there is an increasing demand for working in high-risk and extremely harsh environments such as confined spaces, high altitudes, and vertical surfaces, etc. Traditional manual operations carry numerous risks in these environments, making it urgent to develop a wall-climbing robot that can replace human labor. With its characteristics of light weight, compact size, and wide applicability, a biomimetic wall-climbing robot has become an effective solution to address this issue. Biomimetic wall-climbing robots are an important branch in the field of wall-climbing robots. By mimicking the attachment methods of animals such as geckos, tree frogs, and cicadas, and combining them with appropriate locomotion mechanisms and motion control strategies, these robots can achieve flexible movement on vertical surfaces and even inverted planes. These biomimetic robots have natural and significant advantages in terms of environmental adaptability, maneuverability, and energy supply for locomotion. Compared to traditional wall-climbing robots that rely on magnetic, and vacuum adhesion, biomimetic wall-climbing robots are not strictly limited by surface materials and can adapt to various materials and surface types, such as rough/smooth and planar/curved surfaces. They hold significant theoretical and application values. The research was highly integrated with animal biomimicry and machine intelligence, involving biology, bionics, mechatronics and communication technology, and is a frontier area of multidisciplinary integration. These robots are expected to perform tasks that are not possible for humans or traditional wall-climbing robots. It can be used in the aerospace field for spacecraft inspection, maintenance, and other tasks. In the field of disaster rescue, it can conduct search and rescue operations in hazardous buildings or underground spaces. In the industrial field, it can be widely used for environmental surveys and detection of enclosed and narrow spaces. In scientific research, it can serve as a research tool to explore the mysteries of biological adhesion and regulation.

In this paper, we elucidate the climbing phenomena in nature, and briefly summarize the intrinsic adhesion mechanisms of dry adhesion, wet adhesion, clawed attachment and synergistic adhesion of typical animals. Departing from the three key technologies of biomimetic adhesion mechanisms, locomotion mechanisms, and motion control methods for biomimetic wall-climbing robots, a systematic overview of the significant research achievements in biomimetic wall-climbing robots over the past two decades is provided. On this basis, we categorize and analyze adhesion and locomotion methods of biomimetic wall-climbing robots, as well as the future development of different combinations. Furthermore, an evaluation of the degree of biomimicry in existing biomimetic wall-climbing robots is conducted from a bionic perspective, and conclusions are drawn. Last but not least, to effectively play the role of biomimetic wall-climbing robots and meet the needs of practical applications, the paper outlines a framework for future research on biomimetic wall-climbing robots based on the bottlenecks in robots adhesive technology and summarizes and analyzes the future development for biomimetic wall-climbing robots from six aspects, including research on the influence of other mechanisms such as frictional electricity on animal adhesion; the transition of biomimetic attachment design from singularity to collaboration and modularity; the application of intelligent material driving methods with multiple physical fields; the dynamic reconstruction and rigid flexible coupling locomotion mechanism design; the highly intelligent control method that integrates environmental awareness, autonomous decision-making, and multi-information fusion and the engineering and practical application prospects of biomimetic wall climbing robots, which provides a reference for future technical improvement and performance enhancement for the biomimetic wall-climbing robots.

biomimetic wall-climbing robot, biomimetic adhesion mechanism, locomotion mechanism, control method

doi: 10.1360/TB-2023-0735