

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.035

一种用于足式爬壁机器人的机身姿态偏差修正方法

王昊宇,王炳诚,王周义,戴振东

(南京航空航天大学 航空航天机械结构力学及控制全国重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:针对腿部刚度较低的足式爬壁机器人在大倾角环境中出现的机身姿态偏差问题进行研究。在传统足式机器人模型的基础上建立腿部刚度拓展模型,提出一种无需添加额外传感器或执行器的机身姿态偏差修正策略,并使用仿壁虎机器人对所提出控制策略的有效性进行验证。实验表明:该文提出的策略显著提高了仿壁虎机器人在倒置面爬行的成功率和稳定性。

关键词:姿势偏差;足式爬壁机器人;低腿部刚度;控制策略

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0180-05

A Method for Correcting Body Posture Deviation in Legged Wall-Climbing Robots

WANG Haoyu, WANG Bingcheng, WANG Zhouyi, DAI Zhendong

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This study addresses the body posture deviation issue of legged wall-climbing robots with low leg stiffness when operating on steep inclined surfaces. Based on the conventional legged robot model, an extended model incorporating leg stiffness is established. A body posture deviation correction strategy that requires no additional sensors or actuators is proposed, and its effectiveness is validated using a gecko-inspired robot. Experimental results demonstrate that the proposed strategy significantly improves the success rate and stability of the gecko-inspired robot while climbing on inverted surfaces.

Keywords: posture deviation; legged wall-climbing robot; low leg stiffness; control strategy

0 引言

附着在目标表面上是足式爬壁机器人最基本的功能,在实际应用中最重要需求是能够与表面产生可靠的附着^[1],以及对于运动中扰动的适应性,如重力引起的坠落、步态相位交替的力冲击等。为了改善附着性能,目前已有学者针对附着器的结构^[2-4]、多机制耦合附着^[5-7]、弹性腕关节^[8-10]等方面做了研究。为了使这些末端执行器稳定附着在目标表面,末端执行器与目标表面的接触角度会有所限制。

接触角度的限制,可以依靠摆动腿的移动以及末端执行器的被动适应去弥补。但机器人在移动过程中由于结构的刚度差异、材料的固有缺陷、传动系统的随机误差、装配精度误差等,导致机器人运动姿态一致性降低,出现机身姿态偏差的问题。机身姿态偏差的问题对直立行走机器人来说并不是致命的^[11],因为它们可以依靠重力被动地稳定。然而对于攀爬 90°以上表面,即大倾角环

境下的攀爬机器人来说,机身姿态偏差问题使得末端执行器与爬行面的接触角度不利于产生可靠附着^[12],制约了机器人粘附攀爬能力和运动灵活性的提升,甚至导致失稳发生而坠落。特别是对于足式爬壁机器人,其对末端执行器与目标平面的接触姿态有着较高的要求,腿部形变是不能被忽视的。

本文针对足式爬壁机器人分析了腿部的变形,建立了腿部刚度增强模型,并进行了力学分析,进而提出一种减小足式爬壁机器人在大倾角表面爬行时机身姿态偏差的控制策略。

1 腿部刚度增强模型

1.1 运动学分析

在足式机器人的运动学分析中,通常将腿部的各个关节视为刚性构件,这种假设适用于中大型机器人,其腿部形变相对于整体尺寸较小,且所采用的控制方法对模型精度的要求并不高。然而对于微小型机器人来说,其轻量化和小型化的结

基金项目:国家自然科学基金项目(51975283);航空航天机械结构力学及控制全国重点实验室基金项目(1005-IZD2300225)

第一作者简介:王昊宇(1999—),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为空间仿生机器人,keepupy@outlook.com。

构设计导致腿部形变相对于整体尺寸较大,这使得在自身重力载荷下机身的姿态偏差程度较大。刚性连杆的运动学模型无法准确表示腿部连杆形变后机器人的足端位置。

因此本文考虑关节之间的连杆存在弹性形变,进行以下假设:1)假设连杆材质均匀;2)假设连杆只发生弯曲形变;3)假设连杆不发生屈曲现象。

由假设1)得出连杆中应力均匀分布。当机器人处于静力平衡时,可认为其腿部连杆一端固定,另一端为自由端。仅当连杆自由端受力时,结合假设2)得出,连杆可认为是悬臂梁。应注意,当连杆末端发生形变时,末端坐标系并非平移,而是随着末端平移且旋转。

挠度 ω 定义为杆件轴线在垂直于轴线方向的线位移,假设3)保证了挠度不会突变。截面转角 θ 定义为杆件的横截面对其原来位置转过的角。根据材料力学可得

$$\begin{cases} \omega = -\frac{fx^2}{6EI}(3l-x) \\ \tan\theta = \frac{d\omega}{dx} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为连杆自由端受到外力 F 垂直轴向的分力; x 为受力点到固定端的轴线距离; l 为连杆长度; E 为连杆材料的弹性模量; I 为连杆的惯性矩,坐标系位于连杆起始点如图1所示。将连杆自由端受到的外力沿坐标轴分解,分力垂直于 x 轴或 z 轴,可令 $x=l$,得到沿轴分力对应挠度为 $\omega = -\frac{fl^3}{3EI}$ 。

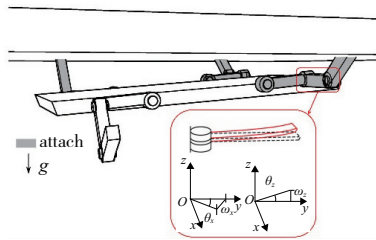


图1 腿部连杆形变示意图

可见 f 和 ω 成线性关系,因此可将连杆末端在 xOz 平面上的形变认为是 x 轴和 z 轴上形变的叠加。因此考虑关节之间连杆弯曲形变的腿部模型可用变换矩阵表述为

$$T = R_z(q_1) T_x(L_1) T_s(\theta_1, \omega_1) R_z(q_2) T_x(L_2) T_s(\theta_2, \omega_2) \cdots R_z(q_n) T_x(L_n) T_s(\theta_n, \omega_n) R_s(q_s) \quad (2)$$

式中: $T_s(\cdots)$ 为连杆弯曲形变的旋转平移变换矩阵; $\theta_n = (\theta_x, \theta_z)^T$ 为 x 轴和 z 轴上分力对应的截面

转角; $\omega_n = (\omega_x, \omega_z)^T$ 为 x 轴和 z 轴上分力对应的挠度。

腿部刚度拓展的机器人运动学模型也可以根据改进 Denavit-Hartenberg (DH) 参数方法建立参数表描述机器人杆件的 $i-1$ 坐标系和 i 坐标系之间的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}_i A$,改进 DH 方法避免了标准 DH 方法对于树形结构或含闭链的机器人建立杆坐标系时会产生歧义的情况。那么足端坐标系到肩关节坐标系的齐次变换矩阵为 ${}^0_n T = {}^0_1 A {}^1_2 A \cdots {}^{n-1}_n A$ 。根据位姿变换矩阵 ${}^0_n T$ 可以得到足端位姿 $\Gamma = (x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)^T$ 和该模型的运动学正解 $\Gamma = g(\omega, q, q_s)$,其中变量为挠度 $\omega = (\omega_{1x}, \omega_{1z}, \omega_{2x}, \omega_{2z}, \cdots, \omega_{nx}, \omega_{nz})^T$,主动旋转关节变量 $q = (q_1, q_2, \cdots, q_n)^T$,被动旋转关节变量 $q_s = (\varphi_{sx}, \varphi_{sy}, \varphi_{sz})^T$ 。

1.2 力学分析

足式爬壁机器人在爬壁时无飞奔等步态,需要保持每一个周期的支撑足都能稳定粘附,所以运行相对缓慢,近乎匀速,可以忽略科里奥利力和离心力。同时,由于腿部质量相对于机身质量较小,且腿部质量对于连杆的影响远小于机器人自身质量对应的足端力对于腿部连杆的影响,所以可以忽略腿部质量。足式机器人的腿部运动分为摆动相与支撑相,在忽略腿部质量的条件下,机器人机身受力情况只有在相位切换时会有较大变化。因此可认为爬壁机器人在腿部进行相位切换之外的时刻处于静态平衡,接下来对机器人进行静力学分析。

根据上一节建立的模型,假设机器人的关节存在微小的虚拟位移,即连杆形变 $\delta\omega$ 、主动旋转关节形变 δq 、被动旋转关节形变 δq_s ,沿着虚拟位移 $\delta\Gamma = J_\omega \delta\omega + J_q \delta q + J_{q_s} \delta q_s$ 施加于末端执行器的外力和力矩 $F = (f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z)^T$ 的虚功为 $F^T \delta\Gamma = F^T J_\omega \delta\omega + F^T J_q \delta q + F^T J_{q_s} \delta q_s$,其中 $J_\omega \in R^{6 \times 2n}$ 、 $J_q \in R^{6 \times n}$ 、 $J_{q_s} \in R^{6 \times 3}$ 分别为关于坐标 ω 、 q 、 q_s 的运动学雅可比矩阵;内力包含连杆形变力 $f_\omega \in R^{2n}$,主动旋转关节形变产生的力矩 $\tau_q \in R^n$,被动关节形变产生的力矩 $\tau_{q_s} \in R^3$,其虚功和为 $-(f_\omega^T \delta\omega + \tau_q^T \delta q + \tau_{q_s}^T \delta q_s)$ 。根据虚功原理,在静态平衡中,任何虚位移对应的所有力的总虚功等于0,所以得到平衡条件:

$$\begin{bmatrix} f_\omega \\ \tau_q \\ \tau_{q_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_\omega^T \\ J_q^T \\ J_{q_s}^T \end{bmatrix} F \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{f}_\omega = -\mathbf{K}_\omega \Delta \omega \\ \boldsymbol{\tau}_q = -\mathbf{K}_q \Delta q \\ \boldsymbol{\tau}_{qs} = -\mathbf{K}_{qs} \Delta q_s \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\Delta \omega, \Delta q, \Delta q_s$ 为受力后变量的增量。由式(1)力和挠度的关系可以计算形状规则且材质均匀的腿杆刚度 $\mathbf{K}_\omega$ 。

若式(4)中 $\mathbf{K}_{qs}, \mathbf{K}_q$ 所对应弹簧是非线性弹簧,当用反馈的方式去跟踪机身姿态时,由于形变后关节变量未知,需要迭代计算且含矩阵求逆,计算量较大。而当作用于机器人的外力已知时,可通过关节变量与外力关系直接求出形变后关节变量,用前馈的方式补偿掉外力对腿部产生的形变,从而矫正机身姿态,较之反馈控制能更加及时地进行控制,并且计算量相对较小。

当爬壁机器人足端与爬行面无滑动时,机身相对于爬行平面的姿态取决于所有支撑相足端相对于机身的位置,所以可将机身姿态矫正的问题转化为对支撑相足端位置补偿的问题。因此设定目标机身姿态等于设定支撑相足端到机器人肩关节位置,所以目标足端位置已知。足式爬壁机器人的脚不是点状脚,脚掌与平面接触时会产生力矩,但脚掌与踝关节的连接往往采用被动柔顺的机构,踝关节受到的力矩较小,不足以使腿部连杆发生形变,所以本文的分析忽略机器人足端受到的力矩。对处于目标机身姿态的机器人进行力学分析,可得到机器人的力平衡以及力矩平衡方程

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \mathbf{S}_i \mathbf{f}_{ci} + \mathbf{F}_{\text{CoM}} = \mathbf{0} \\ \sum_{i=1}^n (\mathbf{S}_i \mathbf{p}_{fci} + \mathbf{f}_{ci}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{f}_{ci} \in \mathbf{R}^3$ 为第 i 条腿的足端受力; $\mathbf{F}_{\text{CoM}} \in \mathbf{R}^3$ 为质心受到的所有力; $\mathbf{S}_i \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为筛选矩阵; 当第 i 条腿为支撑相时 $\mathbf{S}_i = \mathbf{I}$, 当第 i 条腿为摆动相时 $\mathbf{S}_i = \mathbf{0}$; n 为机器人腿的数量; $\mathbf{p}_{fci} \in \mathbf{R}^3$ 为第 i 条腿的足端到机器人质心的空间向量。由于机身处于准静态平衡,所以方程右侧为 $\mathbf{0}$ 。

这个系统有 6 个方程和 $k = 3m$ 个未知数, m 为处于支撑相的腿的数量,因此当 $m = 2$ 时方程有唯一解,当 $m > 2$ 时方程有无数解,此时需要引入额外的约束。

2 机身姿态偏差修正策略

在 1.2 节得到了机器人力平衡方程在支撑腿数量大于 2 时有无数解,因此加入足端力分配,使

用二次规划对足端力进行最优化求解,然后通过腿部刚度拓展模型得到目标足端位置的关节补偿量,进而输出目标关节变量。

将两个向量叉乘转化为矩阵与向量点乘的形式,如 $\mathbf{p}_{fci} \times \mathbf{f}_{ci} = [\mathbf{p}_{fci} \times] \mathbf{f}_{ci}$, $[\mathbf{p}_{fci} \times] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 表示 $\mathbf{p}_{fci}$ 的左叉乘矩阵,因此能将式(5)写成如下形式

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \cdots & \mathbf{I}_3 \\ [\mathbf{p}_{fci} \times] & \cdots & [\mathbf{p}_{fci} \times] \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{S}_n \end{bmatrix}}_f \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_n \end{bmatrix}}_f + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{CoM}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{F_c} = \mathbf{0} \quad (6)$$

根据上述公式的约束条件可以提出目标函数

$$\mathbf{f}^d = \underset{\mathbf{f} \in \mathbf{R}^k}{\text{argmin}} \{ (\mathbf{A}\mathbf{f} + \mathbf{F}_c)^T \mathbf{M} (\mathbf{A}\mathbf{f} + \mathbf{F}_c) + \alpha \mathbf{f}^T \mathbf{W} \mathbf{f} \} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{d} < \mathbf{f} < \bar{\mathbf{d}}$$

式中: $\mathbf{f}^T \mathbf{W} \mathbf{f}$ 为评价指标是足端合力时的成本函数,根据策略的侧重不同评价指标还可以是其他量,如足端力峰值,质心到爬行面距离等; $\mathbf{f}^d \in \mathbf{R}^3$ 为目标函数取值最小时的足端力,其中摆动腿足端力经筛选矩阵 $\mathbf{S}_i$ 后为 0; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{6 \times 3n}$ 为力和力矩相关矩阵; $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^{3n}$ 对应所有足端力; $\mathbf{F}_c = [\mathbf{F}_{\text{CoM}} \quad 0]^T \in \mathbf{R}^6$ 包含质心受到的外力; $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 和 $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为正定权重矩阵; $\mathbf{d} \in \mathbf{R}^n$, $\bar{\mathbf{d}} \in \mathbf{R}^n$ 分别为足端力的下界和上界; $\alpha \in \mathbf{R}$ 为二次正则项系数。二次正则项系数需要在二次规划时反复调节,过强的正则化会导致较大的跟踪误差,从而对机器人的平衡产生负面影响。

将式(7)化作二次函数的标准形式,通过二次规划可求出每条支撑腿所受的足端力,从而实现支撑腿的力分配。

当支撑腿的足端受力已知,目标足端位置已知,即可对单腿的形变参数和关节角度进行求解,从而求出控制角度,即机器人受腿部刚度影响前的足端位置和关节角度。方法为联立式(3)和式(4),得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_\omega \Delta \omega \\ \mathbf{K}_q \Delta q \\ \mathbf{K}_{qs} \Delta q_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_\omega^T \\ \mathbf{J}_q^T \\ \mathbf{J}_{qs}^T \end{bmatrix} \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (8)$$

受腿部刚度影响前,腿部连杆和被动关节无形变,主动旋转关节的初始角度,也即所求的控制角度为 q_0 ,由此可以表示目标关节变量为

$$\begin{bmatrix} \omega_t \\ q_t \\ q_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ q_0 + \Delta q \\ \Delta q_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

将目标关节变量代入到腿部刚度拓展模型的运动学公式 $\Gamma = g(\omega, q, q_s)$ 中即可求得 ω_i, q_i, q_0, q_s 。求解流程如图 2 所示。

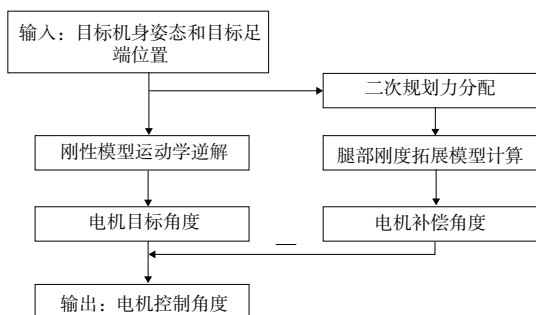


图2 修正策略流程图

脱附。EF-2 的每条腿有 3 个电机,肩关节由锥齿轮组成拥有两个自由度,负载电池的仿壁虎机器人 EF-2 的全部质量为 823.9 g,机身长 18 cm,宽 9 cm。

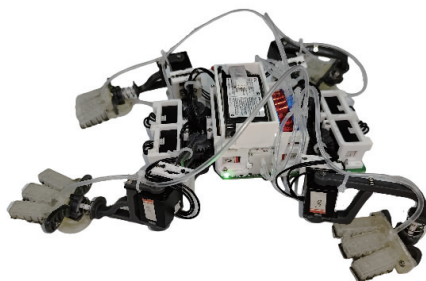


图3 仿壁虎机器人 EF-2

3 机器人爬壁实验

本文用来验证控制策略的平台为仿壁虎机器人 EF-2,如图 3 所示。该机器人使用柔性气动仿生黏附脚掌,脚掌底部的粘附阵列由聚乙烯硅氧烷(PVS)^[13]制成,该材料为各项同性粘附材料,它类似于壁虎刚毛,可以使脚垫稳定地粘附在光滑的表面上,脚趾的空腔设计可以通过气压变化模仿壁虎脚趾的蜷缩与外翻^[14],分别辅助粘附与

实验分为两组,都采用缓步步态在 180°倒置面爬行,即 4 条腿按顺序进入摆动相,同一时刻只有 1 条腿处于摆动相。两组实验只有控制策略不同,实验 A 不使用机身姿态偏差修正策略,实验 B 使用机身姿态偏差修正策略。每个实验中机器人都进行 10 次爬行,每次爬行 4 个周期,爬行速度设置为 4 mm/s。

两个实验中机器人在倒置面的爬行过程如图 4 所示,图中用直线作为机身俯仰角度的示意。

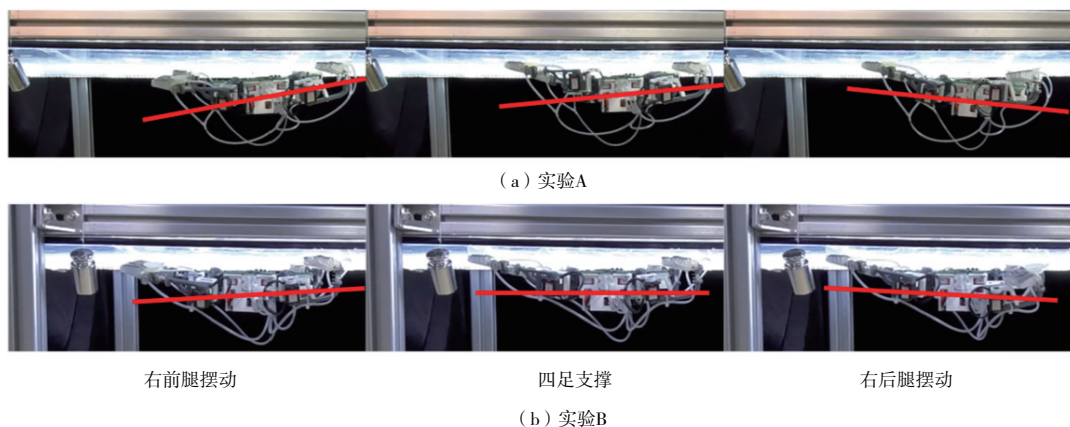


图4 机器人在倒置面的爬行过程

从宏观上可以清晰的观察到实验 B 中机器人的机身更稳定,爬行表现更好。实验 A 的爬行成功率为 10%,实验 B 的爬行成功率为 90%。

机器人的机身几何中心位置装有 IMU 用来采集机身姿态角数据,如图 5 所示。实验中设置的理想俯仰角、翻滚角和偏航角都为 0°,使用灰色直线在图 5 中标出。

从图 5 中可以看出未采取矫正措施

的实验 A 中机器人的俯仰角和翻滚角在每条腿摆动相开始与结束的时刻发生突变,而使用实验 B 的机身角度变化更小,整体趋近于平缓。两组实验中机器人的设置都为直线前进,从多个周期来看偏航角无累计误差,但在一个周期内因机身晃动,偏航角仍有波动,且两组实验波动幅度接近。实验 A 中机器人的俯仰角最大值为 4.460°,最小值为 -3.961°;翻滚角的最大值为 6.416°,最小值为 -4.680°。分析可得

在使用机身姿态偏差修正方法后,机器人俯仰角的峰峰值缩小 63%,翻滚角的峰峰值缩小 58%,使用机身姿态偏差修正方法的机器人姿态角变化范围更小。证明机身姿态偏差修正方法对于仿壁虎机器人可以提高倒置面爬行的成功率和稳定性。

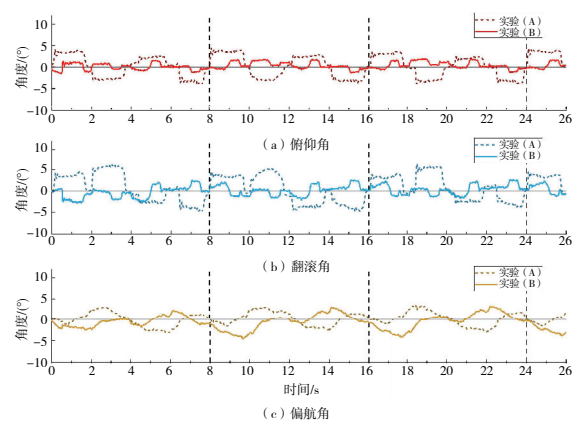


图5 机身姿态角

4 结语

本文针对足式爬壁机器人因腿部形变导致的机身姿态偏差问题进行研究,通过增加连杆形变量和旋转关节形变量建立了腿部刚度拓展模型;基于改进后的模型提出了机身姿态偏差修正方法。并通过实验验证了提出的方法可提高足式爬壁机器人在倒置面爬行的成功率和稳定性。该方法仅依靠位置控制即可完成,适用于有限载荷能力的小型足式爬壁机器人,机器人无需添加额外传感器或执行器,即可减小机身倾斜与晃动并提高附着能力,可为仿壁虎机器人的实际应用提供有力支持。

参考文献:

- [1] 李磊,杨幸,秦绪杰,等. 爬壁清洗机器人研究现状及发展趋势[J]. 机械制造与自动化,2023,52(1):1-6.
- [2] ZHANG R X, LATOMBE J C. Capuchin: a free-climbing robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(4): 194.
- [3] XIE D S, LIU J B, KANG R J, et al. Fully 3D-printed modular pipe-climbing robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 462-469.

- [4] YUE T Q, BLOOMFIELD-GADÉLHA H, ROSSITER J. Shape - conformable suction cups with controllable adaptive suction on complex surfaces[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(11): 7735-7742.
- [5] SONG S, DROTLEF D M, MAJIDI C, et al. Controllable load sharing for soft adhesive interfaces on three-dimensional surfaces[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(22): E4344-E4353.
- [6] WANG L W, WANG Z Y, WANG B C, et al. Reversible adhesive bio-toe with hierarchical structure inspired by gecko[J]. Biomimetics, 2023, 8(1): 40.
- [7] CHEN R. A gecko - inspired electroadhesive wall - climbing robot [J]. IEEE Potentials, 2015, 34(2): 15-19.
- [8] LI X S, BAI P P, LI X X, et al. Robust scalable reversible strong adhesion by gecko-inspired composite design[J]. Friction, 2022, 10(8): 1192-1207.
- [9] KRIENGKOMOL P, KAMIYAMA K, KOJIMA M, et al. New tripod walking method for legged inspection robot [C]// 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2016: 1078-1083.
- [10] WANG Z Y, DENG K B, BIAN Q Y, et al. A gecko-inspired robot employs scaling footpads to facilitate stable attachment [M]// Intelligent Robotics and Applications. ChamSpringer International Publishing, 2019: 38-47.
- [11] 赵杰亮,邢晋,牛群. 基于俯仰位姿调整的四足机器人爬坡运动策略[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 10-15, 22.
- [12] CHEN Y F, DOSHI N, WOOD R J. Inverted and inclined climbing using capillary adhesion in a quadrupedal insect-scale robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4820-4827.
- [13] GORB S, VARENBERG M, PERESSADKO A, et al. Biomimetic mushroom - shaped fibrillar adhesive microstructure [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2007, 4(13): 271-275.
- [14] 王周义. 大壁虎斜面运动力学、脚趾外翻脱附力学及其仿生研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

收稿日期: 2024-03-06