

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.007

## 基于形状记忆合金的仿壁虎柔性脚掌设计

冯鑫晟, 韩青非, 邱稼辉, 吉爱红

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:**壁虎通过脚掌独特的外翻机制可以迅速地在壁面实现黏附与脱附。本文通过对壁虎脚掌外翻脱附过程的仿生研究,模仿壁虎外翻脱附机理,以形状记忆合金丝为驱动器,设计仿壁虎柔性脚掌,开展力学分析与计算。基于形状记忆合金的驱动特性及仿壁虎机器人的运动步态,设计了仿壁虎柔性脚掌的控制策略。最后分析了脚趾有无外翻动作脱附时的受力情况,实验测试了柔性脚趾的弯曲与外翻脱附性能,验证了仿壁虎柔性脚掌设计的有效性和可行性。

**关键词:**壁虎仿生;形状记忆合金;柔性脚掌;外翻脱附

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2023)03-0427-10

## Design of Gecko-Like Flexible Feet Based on Shape Memory Alloy

FENG Xincheng, HAN Qingfei, QIU Jiahui, JI Aihong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:**Geckos can quickly adhere to and detach from the wall through the unique valgus mechanism of the soles of its feet. In this paper, by studying the bionics of the valgus desorption process of gecko's feet, the mechanism of gecko's valgus detachment is simulated, the shape memory alloy wire is used as the driver to design gecko's flexible feet, and the mechanical analysis and calculation are carried out. Based on the driving characteristics of shape memory alloys and the gait of gecko robots, a control strategy for imitating gecko flexible feet is designed. Finally, the force of the toes with or without valgus detachment is analyzed, the bending performance and valgus detachment performance of flexible toes are tested, and the effectiveness and feasibility of the design of the gecko-like flexible feet are verified.

**Key words:** gecko-like; shape memory alloy; flexible feet; valgus desorption

随着科技的进步,机器人被应用于各种场合以取代人类的工作,尤其在一些高危以及人力难以触及的环境,机器人有许多优势。生物的多样性也为机器人的设计提供了更多的参考样本<sup>[1]</sup>。科学家从研究生物着手,参考许多有益的生物特性,研制出仿生机器人,使其同时具备生物与机器人的双重特性。相对于普通的机器人,仿生机器人具有更好的适应性与灵活性,如模仿壁虎爬壁特性的仿壁虎爬壁机器人具有在不同材质、不同角度表面的爬行能力,在核工业、反恐防暴和航空航天等领域都有

着广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。

仿壁虎爬壁机器人的关键技术主要包括移动技术与附着技术。其中,壁面的附着方式有磁吸附<sup>[3-4]</sup>、钩爪抓附<sup>[5-7]</sup>、真空吸附<sup>[8-9]</sup>和仿生干黏附<sup>[10-11]</sup>等。仿生干黏附技术依托模仿壁虎刚毛黏附机理制作的黏附阵列实现黏附,对光滑表面有广泛的适用性,一直是壁面吸附技术的研究热点。南京航空航天大学唐义强等<sup>[12]</sup>模仿壁虎脚掌的刚毛结构,通过微纳技术制备了非对称纤维微纳结构的各向异性黏附材料阵列,具有黏附力大、易于脱附等

**基金项目:**国家自然科学基金委员会与德国科学基金会双边合作研究项目(重点国际(地区)合作研究项目)(51861135306)。

**收稿日期:**2022-08-30;**修订日期:**2022-11-09

**通信作者:**吉爱红,男,研究员,博士生导师,E-mail:meeahji@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**冯鑫晟,韩青非,邱稼辉,等.基于形状记忆合金的仿壁虎柔性脚掌设计[J].南京航空航天大学学报,2023,55(3):427-436. FENG Xincheng, HAN Qingfei, QIU Jiahui, et al. Design of gecko-like flexible feet based on shape memory alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3):427-436.

特点。在对黏附阵列的研究过程中发现,在一定范围内,黏附阵列的黏附能力会随着黏附时预压力的增加而增大。

关于壁虎脚掌的黏/脱附行为的仿生实现,Carlo等<sup>[13]</sup>提出了采用黏附阵列的仿壁虎机器人理想足部顺应性运动流程。国内外学者也研制了不同结构和不同驱动方式的脚掌结构。文献[14]研制了StickBot机器人,通过钢丝绳嵌入脚掌,实现脚掌的外翻或展平动作,其驱动力由电机提供,但由于制作脚掌的软聚氨酯材料易弯曲变形,因此无法提供足够的预压力。李冰<sup>[15]</sup>研制的仿壁虎柔性脚掌采用了多转动副连接,使用额外的舵机作为脚掌的驱动,因此增加了机器人结构的复杂性与质量。

传统的电机及气液驱动方式已很难同时满足仿壁虎机器人脚掌黏/脱附的动作与轻量化设计要求。形状记忆合金材料(Shape memory alloy, SMA)是通过相变产生位移与力的一种功能材料,对于温度诱导型记忆合金而言,仅需控制其温度至相变温度,形状记忆合金就会在低温马氏体状态和高温的奥氏体状态间产生形态的转变,这种形态转变的同时会伴随着位移与力的输出,因此作为驱动器被用于机器人和智能装备领域,具有能量密度高、承载能力强、响应快速和驱动无噪声等优点。

本文针对现有的仿壁虎机器人脚掌结构的不足,采用丝状记忆合金作为仿壁虎脚趾的驱动材料。脚趾的关节布置参考了壁虎真实脚趾的结构和指节的长度比例,由刚性的骨节和柔性的关节组成,采用弹簧钢片作为肌腱,帮助弯曲状态的脚趾恢复原态并在黏附时提供预压力。基于形状记忆合金丝的电阻特性,设计了仿壁虎柔性脚掌的控制方案,实现了仿壁虎脚趾的外翻展平动作及机器人协同控制。最终对柔性脚趾的弯曲和黏/脱性能进行测试,验证了设计的有效性和可行性。

## 1 仿壁虎柔性脚掌结构设计

仿壁虎机器人脚掌系统的主要动作是外翻脱附。本文首先对壁虎脚趾在光滑壁面上的脱附行为进行拍摄观察,高速摄像下壁虎脚趾的脱附过程如图1所示。由图1可以看出,壁虎脚趾的外翻动作主要集中在与壁面黏附的两段指节。图1(a)脚趾处于黏附状态;图1(b)脚趾开始脱附,即脚趾从足尖关节开始外翻;图1(c~e)中两段指节上的黏附阵列依次脱离;图1(f)脚趾完全与壁面分离。相对于直接撕脱,壁虎脚趾外翻的动作,使壁虎脚掌抬起时,黏附阵列与壁面的接触面积减少,进而减少脱附时壁虎腿部的发力。

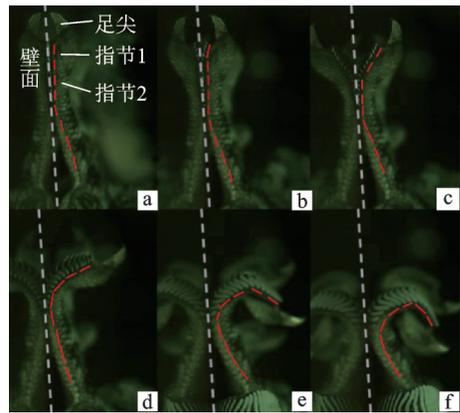


图1 光滑壁面壁虎脚趾外翻脱附过程图

Fig.1 Valgus detachment process of gecko toe on smooth wall

受自然界壁虎的结构与运动方式启发,本文设计的仿壁虎柔性脚掌也具有两节可以外翻的指节。柔性脚掌由脚掌骨架、弹簧钢片及记忆合金驱动丝等组成,由于采用形状记忆合金丝作为驱动材料,因此无需额外的驱动装置。脚掌的模型如图2所示。

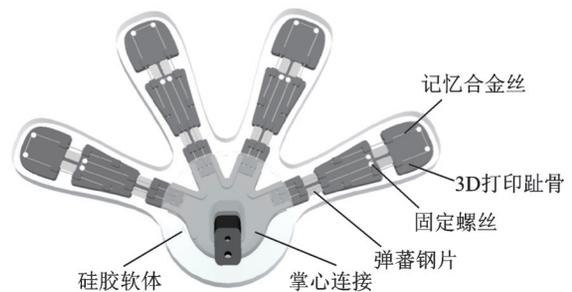


图2 柔性脚掌模型图

Fig.2 Model of flexible feet

脚掌结构中,每根脚趾都具有两个可以弯曲的关节,单个关节由两根记忆合金丝驱动。脚趾部分由3D打印的硬质指节和嵌入弹簧钢片的柔性关节组成。两个可弯曲关节允许驱动器获得与壁虎脚趾类似的弯曲行为。嵌入弹簧钢片可以在黏附时提供足够的预压力。工作时,记忆合金丝通电收缩驱动脚趾弯曲;断电后,记忆合金丝长度恢复,并依靠弹簧钢片的弹性实现脚掌的展平。图3为仿壁虎柔性脚掌单脚趾弯曲运动示意图。

柔性脚趾的驱动丝选用Ni-Ti基记忆合金丝,直径为0.15 mm,初步测试其最大收缩率为4.2%,密度为 $6.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,比热容为 $850 \text{ J/(kg}\cdot\text{C}^\circ)$ ,马氏体逆相变开始温度 $A_s$ 为 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,马氏体相变开始温度 $M_s$ 为 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,马氏体状态的弹性模量 $E_M$ 为 $23 \text{ GPa}$ ,奥氏体状态的弹性模量 $E_A$ 为 $78 \text{ GPa}$ 。制作的柔性脚趾,其单脚趾长70 mm,宽24 mm,厚度5 mm。

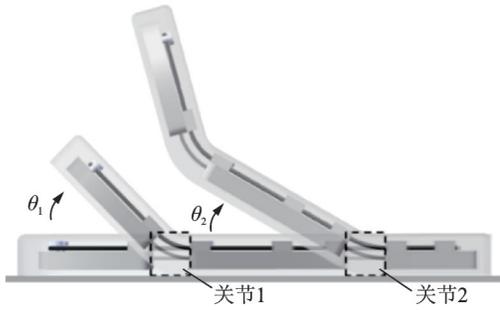


图 3 仿壁虎柔性脚趾单脚趾弯曲运动示意图

Fig.3 Schematic diagram of single toe bending motion of gecko inspired flexible toe

## 2 柔性脚趾力学模型

### 2.1 柔性脚趾弯曲模型

柔性脚趾结构的运动主要为平面弯曲运动,且弯曲发生在关节部分,脚趾的指节部分强度较高,不会发生弯曲。单个脚趾关节的运动示意如图 4 所示。

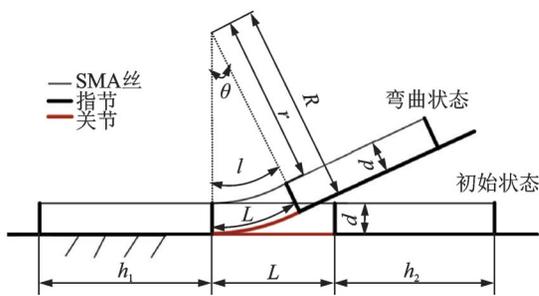


图 4 脚趾单关节弯曲示意图

Fig.4 Schematic diagram of single joint bending of toe

初始状态脚趾为平直状态,加热后脚趾关节呈弯曲状态,为了简化柔性脚趾驱动的运动学模型,作如下假设:

(1)脚趾驱动器弯曲限制在关节部分,且弯曲可近似为圆弧状,图中的  $R$  和  $r$  分别为脚趾关节和记忆合金丝在弯曲状态下的半径。

(2)变形是在一个方向上产生的,不包括剪切、扭转和轴向变形。

基于上述假设,由图 4 可知,驱动器从初始状态弯曲到  $\theta$  角度前后,记忆合金丝的缩短长度  $\Delta L$  即为关节处合金丝长度的变化量  $L - l$ ,其中  $l$  为弯曲后关节处记忆合金丝的长度,该弧长对应的半径为  $r$ , $L$  为关节处弹簧钢片的长度,弹簧钢片弯曲后半径为  $R$ ,可由弧长公式计算。又因变形由记忆合金的应变产生, $\Delta L$  可由合金丝的长度与应变率计算得出,因此柔性脚趾驱动器弯曲时满足

$$\begin{aligned} \Delta L &= (h_1 + h_2 + L)(\epsilon_0 - \epsilon) = \\ L - l &= \theta(R - r) = \theta d \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\theta$  为关节的弯曲角度; $d$  为记忆合金丝与弹簧钢片关节中心的距离; $h_1, h_2$  分别为指节长度; $\epsilon_0$  和  $\epsilon$  分别为记忆合金丝的最大残余应变和发生的应变。由式(1)可知,关节的弯曲角度  $\theta$  与记忆合金丝到关节的距离  $d$ 、记忆合金丝的总长度以及所选取记忆合金丝的应变率有关。

柔性脚趾弯曲力学模型的建立使用了准静态分析方法。记忆合金丝的本构模型使用经典的 Tanaka 模型<sup>[16]</sup>;当记忆合金丝驱动脚趾弯曲时,记忆合金丝相变产生的应力与柔性脚趾驱动器的弯曲力矩相平衡。计算弯矩时,外部包裹的硅胶材料的弹性模量远小于弹簧钢片,弯曲模型忽略了硅胶层的作用。

图 5 为弹簧钢片弯曲状态示意图。图 5 中,弹簧钢片的中心为中性层,弯曲时长度不变, $y$  为变形层与中性层的距离,因此柔性脚趾单关节的力矩可以表示为

$$M = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} E_G \kappa b_T y^2 dy = E_G b_T \delta^3 \kappa / 12 \quad (2)$$

式中: $E_G$  为脚趾关节的弹性模量; $\kappa$  为关节弯曲的曲率; $b_T$  和  $\delta$  分别为关节的宽度和厚度。

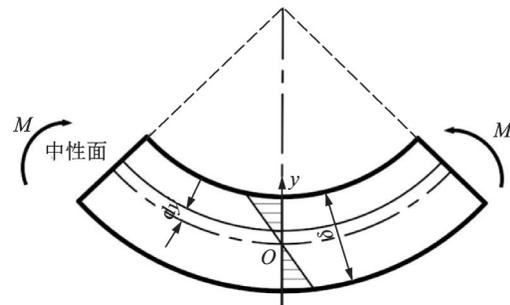


图 5 弹簧钢片弯曲示意图(曲率  $\kappa$ )

Fig.5 Schematic diagram of spring steel bending curvature  $\kappa$

因为不考虑轴向变形且弯曲近似为圆弧,弯曲后关节部分弹簧钢片的长度不变, $R$  为与其相对应的半径,结合式(1), $\kappa$  可以表示为

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{\theta}{L} = \frac{(h_1 + h_2 + L)(\epsilon_0 - \epsilon)}{dL} \quad (3)$$

因此,柔性脚趾驱动器的单关节记忆合金的应力  $\sigma$  可表示为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M}{dAN_{SMA}} = \frac{E_G b_T \delta^3 (h_1 + h_2 + L)(\epsilon_0 - \epsilon)}{12d^2 LAN_{SMA}} = \\ &\lambda(\epsilon_0 - \epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $A$  为记忆合金丝的横截面积; $N_{SMA}$  为指柔性脚趾驱动器的记忆合金丝的根数; $\lambda$  为定义的与应力相关的因子,即

$$\lambda = \frac{E_G b_T \delta^3 (h_1 + h_2 + L)}{12d^2 LAN_{SMA}} \quad (5)$$

合金丝通电加热的过程中,除了焦耳热外,记忆合金丝的表面还会以对流传热的形式向外部硅胶体散热,此外还有热辐射形式的散热与记忆合金丝相变所吸收的少量热量,因为后面两部分引起的热量变化远小于前两部分,为了简化计算,忽略后两种散热造成的热量变化。因此,由欧姆定律及热力学基本公式可知<sup>[17]</sup>,通过电压加热记忆合金丝的热平衡方程为

$$\rho c V \dot{T} = \frac{U^2}{R_{SMA}} - h A_L (T - T_0) \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为记忆合金丝的密度; $c$ 为记忆合金丝的比热容; $V$ 为记忆合金丝的体积; $U$ 为驱动电压; $R_{SMA}$ 为记忆合金丝电阻; $A_L$ 为记忆合金丝的表面积; $T$ 和 $T_0$ 分别为记忆合金丝的温度和室温; $h$ 为记忆合金丝与外层硅胶结构体的对流换热系数; $\dot{T}$ 为对温度求导。

断电冷却过程中,无外部电流的输入,平衡方程转变为

$$\rho c V \dot{T} = -h A_L (T - T_0) \quad (7)$$

图6为不同电压下,将记忆合金丝加热3 s后自然冷却到室温25 °C的温度随时间变化的曲线。

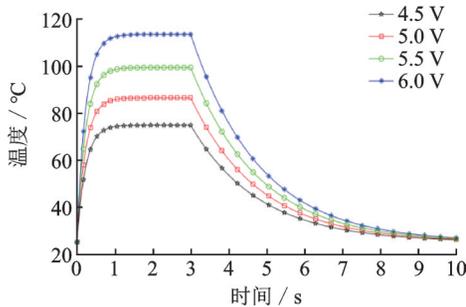


图6 不同电压驱动记忆合金丝的温度响应曲线

Fig.6 Temperature response curves of memory alloy wires driven by different voltages

由图6可知,当记忆合金丝通电加热后,温度迅速上升,随后上升的速度减慢直至达到最高温度,给定的驱动电压不同,记忆合金丝能达到的最高温度不同。

根据 Tanaka 模型<sup>[16]</sup>,记忆合金丝的本构方程可以表示为

$$\dot{\sigma} = E_{SMA} (\dot{\epsilon} - \epsilon_0 \dot{\xi}) \quad (8)$$

式中 $E_{SMA}$ 代表记忆合金丝的杨氏模量。相变过程中记忆合金的马氏体分数 $\xi$ 表示如下

$$\xi = \begin{cases} \frac{\xi_M}{2} \cos[a_A(T - A_s) + b_A \sigma] + \frac{\xi_M}{2} & \text{马氏体} \rightarrow \text{奥氏体} \\ \frac{1 - \xi_M}{2} \cos[a_M(T - M_f) + b_M \sigma] + \frac{1 - \xi_A}{2} & \text{奥氏体} \rightarrow \text{马氏体} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $a_A = \pi/(A_f - A_s)$ ,  $b_A = -a_A/C_A$ ,  $a_M = \pi/(M_s - M_f)$ ,  $b_M = -a_M/C_M$ 。  $A_s$ 、 $A_f$ 、 $M_s$ 、 $M_f$ 分别为记忆合金丝相变过程中的奥氏体相变与马氏体相变的起始温度与结束温度; $C_A$ 和 $C_M$ 分别代表应力对记忆合金奥氏体和马氏体温度的影响因子; $\xi_M$ 和 $\xi_A$ 为马氏体相变开始前和结束后的马氏体分数值。

由式(4、6、8、9)可推导出柔性脚掌弯曲模型

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon} \\ \dot{T} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{SMA}}{E_{SMA} + \lambda} \epsilon_0 \dot{\xi} \\ \frac{1}{\rho c V} \left( \frac{U^2}{R_{SMA}} - h A_L (T - T_0) \right) \\ \begin{cases} \lambda_{AT} \dot{T} - \lambda_{A\sigma} \lambda \dot{\epsilon} & \text{马氏体} \rightarrow \text{奥氏体} \\ \lambda_{MT} \dot{T} - \lambda_{M\sigma} \lambda \dot{\epsilon} & \text{奥氏体} \rightarrow \text{马氏体} \end{cases} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中

$$\lambda_{AT} = -\frac{\xi_M a_A}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]$$

$$\lambda_{A\sigma} = -\frac{\xi_M b_A}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma]$$

$$\lambda_{MT} = \frac{(\xi_A - 1) a_M}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M \sigma]$$

$$\lambda_{M\sigma} = \frac{(\xi_A - 1) b_M}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M \sigma]$$

## 2.2 脚掌黏附/外翻脱附力矩分析

本文所设计的柔性脚趾采用的黏附方式为仿生干黏附,其黏附机理为模仿壁虎脚趾的刚毛结构,通过微纳制造技术在材料表面形成微米级的刚毛黏附阵列,这种黏附阵列在与壁面进行黏附时,材料表面的“刚毛”结构与壁面的分子间的作用力——范德华力实现了“刚毛”阵列在壁面上的附着。根据材料的特性,黏附阵列的黏附效果与其黏附阶段的预压力有关,在合适的预压力下,黏附阵列可以获得更好的黏附能力。

柔性脚趾与壁面黏附或脱附时,其受力如图7所示。图中 $F_{SMA}$ 为记忆合金丝的拉力,由实验得出。该过程与壁虎脚趾外翻动作相似。脚趾下压过程中,弹簧钢片弯曲产生力矩使黏附阵列与壁面紧密贴合。脚趾黏附完成时,指节1、2与壁面贴

合,关节 2 的弯曲角度为  $\alpha$ ,此时关节 2 处弹簧钢片的弯曲力矩计算公式与式(2)类似,关节 2 弹簧钢片的曲率  $\kappa=\alpha/L$ , $M_T$  可以表示为

$$M_T = E_G b_T \delta^3 \kappa / 12 = E_G b_T \delta^3 \alpha / 12L \quad (11)$$

因为其他参数均为定值, $M_T$  的大小由弹簧钢片的厚度决定,因弹簧钢片弯矩产生的预压力的大小也由弹簧钢片的厚度决定。

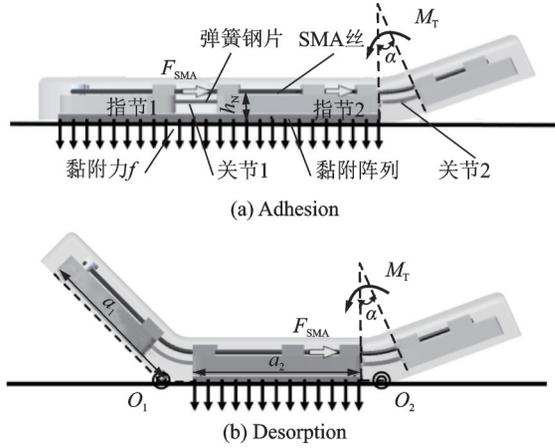


图 7 脚掌外翻受力示意图

Fig.7 Force diagram of adhesion and desorption of sole

柔性脚趾指节 1 在外翻脱附时,记忆合金拉动指节,此时指节处存在记忆合金收缩产生的力矩与黏附阵列产生的力矩。当记忆合金对指节产生的力矩大于黏附阵列对指节产生的力矩时,该指节与壁面脱离。

记忆合金丝拉动指节外翻时,产生的最大转矩  $M_{SMA}$  为

$$M_{SMA} = N_{SMA} F_{SMA} h_N \quad (12)$$

式中  $h_N$  为记忆合金丝到黏附阵列的距离。

假设弯曲时关节  $i$  两侧指节底面的交线为该关节的转动轴线  $O_i$ ,指节  $i$  底部与轴  $O_i$  距离为  $x$  的位置脱附时黏附阵列对  $O_i$  的转矩为

$$M_x = K b_N x dx \quad (13)$$

式中: $K$  为黏附阵列的黏附系数,表示单位面积黏附阵列可以产生的黏附力的大小; $b_N$  为  $x$  处脚趾黏附阵列的宽度。

指节  $i$  上黏附阵列对轴  $O_i$  产生的转矩为

$$M_{Ni} = \int_0^{a_i} K b_N x dx \quad (14)$$

式中  $a_i$  为黏附阵列的长度。

当  $M_{SMA} > M_{N1}$  时,指节 1 上的黏附阵列可与壁面脱离。

柔性脚趾指节 2 在外翻脱附时,记忆合金丝除了要克服黏附阵列产生的力矩外,还需要克服弹簧钢片弯曲产生的力矩,即  $M_{SMA} > M_{N2} + M_T$  时,指节 2 上的黏附阵列可与壁面脱离。

### 3 仿壁虎柔性脚掌控制系统设计

#### 3.1 硬件设计

柔性脚掌的结构设计使得仿壁虎脚掌可以完成黏附与脱附的动作,而控制系统的设计则决定了仿壁虎机器人的身体与脚掌能否协同工作实现稳定爬行。

整个控制系统的硬件结构如图 8 所示,系统主要包括电源稳压模块、单片机控制模块、驱动模块和采样模块。通过采集记忆合金丝两端电压的变化,监控记忆合金丝的变形状态,从而达到控制记忆合金丝变形的目的。整个系统通过红外遥控器控制,实现仿壁虎机器人的爬行运动。

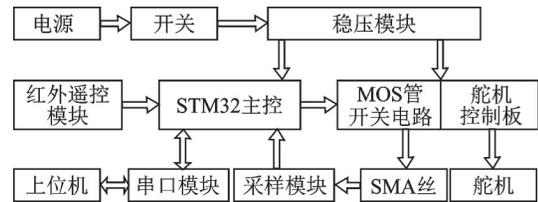


图 8 系统硬件结构框图

Fig.8 Block diagram of system hardware structure

硬件系统中,控制芯片采用 STM32F407 芯片,基于 ARM Cortex™-M4 内核。舵机控制板选用 16 路舵机控制板。使用 MOS 管模块,将 STM32 输出的脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)波控制信号与电源的加热电压隔离,且可通过调整输出 PWM 波的占空比,控制加载到记忆合金丝两端的等效电压。

#### 3.2 记忆合金加热控制策略

记忆合金的加热方式<sup>[18]</sup>主要分为外部加热和内部加热两种。其中外部加热如热空气加热和微波加热等,需要比较复杂的结构与设备,与仿壁虎机器人这种需要控制体积与灵活性的设计理念不合。内部加热是利用记忆合金丝具有较高电阻的特性,直接通过在记忆合金丝两端通电产生焦耳热来使记忆合金丝升温。

针对柔性脚掌的设计目的,因此在加热变形时需要满足以下几点要求:

- (1) 提供满足记忆合金相变的热量;
- (2) 尽可能短的变形时间;
- (3) 加热过程可控;
- (4) 加热装置的体积应尽量小;
- (5) 保证记忆合金丝的使用寿命。

为了达到上述要求,利用记忆合金的电阻特性设计控制策略。电阻特性是记忆合金在马氏体与奥氏体两种状态间转化的过程中,其内部晶体类型与组织形态的改变使其电阻值也发生相应的变化

的一种特性<sup>[19-20]</sup>,利用这种特性可以监控记忆合金丝的变形状态。控制柔性脚掌形变时,通过STM32输出可变占空比的PWM波经MOS管开关电路,控制外部电源的通断。变形完成后,STM32接收到记忆合金丝的电阻反馈信号,减少PWM输出占空比,使温度维持在相变温度上,此时脚趾处于稳定的变形状态。这样在实现较快的变形的同时,也能避免记忆合金丝过热导致性能衰退。图9为记忆合金电阻反馈控制的流程图。

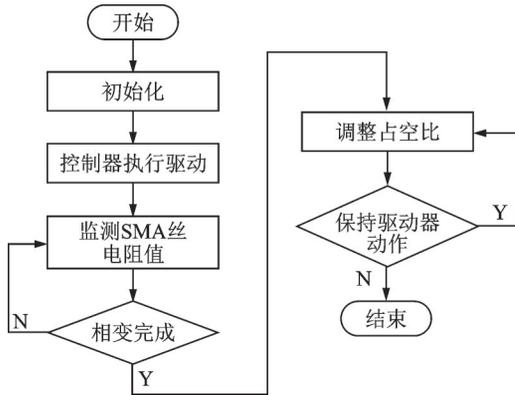


图9 记忆合金电阻反馈控制流程图

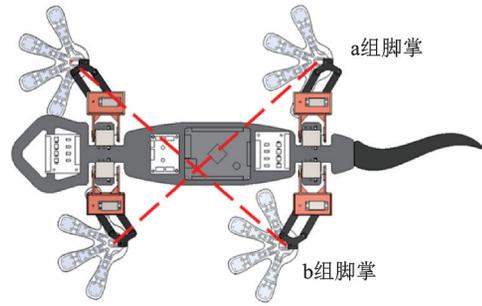
Fig.9 Control flow of SMA resistance feedback

### 3.3 仿生脚掌与机器人的协同控制

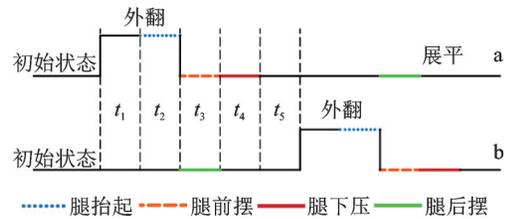
仿壁虎脚掌的变形需要与机器人的足部运动相协调。现有的研究对壁虎步态的分析已经十分详细。研究者通过对壁虎的爬行过程中腿部的关节位置进行标记,得出壁虎爬行时的基本步态为对角步态<sup>[21]</sup>,即壁虎在壁面爬行过程中,同一时刻使用处于对角线的两条腿作为支撑驱动身体前进,此时,处于同一对角线上的另外两条腿悬空向前摆动,这一组动作循环重复实现壁虎的前进。在此过程中壁虎的脚掌也在不断地进行附着与脱附的动作。

为了实现爬壁的功能,机器人的运动步态需要与仿壁虎柔性脚掌的动作相对应。机器人选用了与真实壁虎步态相同的对角步态设计,因此,对角线上的脚掌的动作是同步的,具有相同的时序,如图10所示。

初始状态时,机器人的4只脚掌均处于展平黏附状态。运动开始后,控制a组脚掌使其外翻脱附,并在 $t_1 \sim t_2$ 时间内一直维持外翻状态,b组的两只脚掌在 $t_1 \sim t_5$ 保持展平状态。 $t_2$ 阶段a组脚掌抬起,此时停止加热,使记忆合金丝有足够的时间实现冷却恢复, $t_3$ 阶段a组脚掌向前摆动,同时b组脚掌后摆驱动机器人整体前移, $t_4$ 阶段a组脚掌下压,并在 $t_5$ 阶段与壁面完成黏附。之后,两组脚掌的动作交换。通过两组脚掌的交替循环动作,使机器人实现对角步态向前/向上爬行。



(a) Gecko-like robot



(b) Sequence diagram

图10 脚掌外翻展平时序图

Fig.10 Sequence diagram of valgus and flattening of sole

## 4 柔性脚趾性能实验

### 4.1 柔性脚趾弯曲实验

柔性脚趾的变形能力是决定能否完成脚掌脱附动作的重要因素。设置多组测试对柔性脚趾系统的弯曲能力进行评估,测试参数包括响应时间、弯曲角度及脚趾恢复时间。通过实验,寻找合适的驱动电压,满足脚趾黏/脱附的要求。图11所示为测试脚趾弯曲的实验装置。

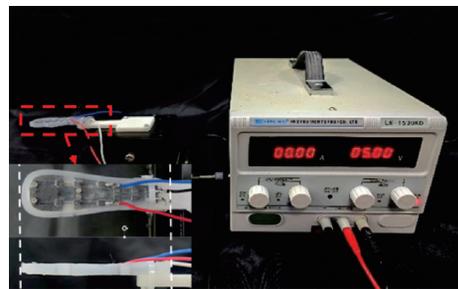


图11 脚趾弯曲测量装置

Fig.11 Measuring device for toe bending

将柔性脚趾的末端与水平平台固定,通过直流电源对记忆合金丝进行供电。实验时,摄像机对柔性脚趾的侧面进行拍摄,拍摄帧率为60帧/s。记录柔性脚趾从加热到冷却的全过程。

完成实验与拍摄后,在脚趾上选择合适的特征点进行跟踪。使用直接线性变换(Direct linear transformation, DLT)方法<sup>[22]</sup>得到特征点在整个过程中任意时刻的坐标,进而计算得出该时刻柔性脚趾弯曲的角度。

为研究电压对柔性脚趾弯曲角度与响应时间

的关系,实验选择了 4.5、5.0、5.5、6 V 这 4 种电压进行驱动测试。测试环境温度为室温 25 °C。柔性脚趾驱动时,弯曲角度随时间的变化如图 12 所示。

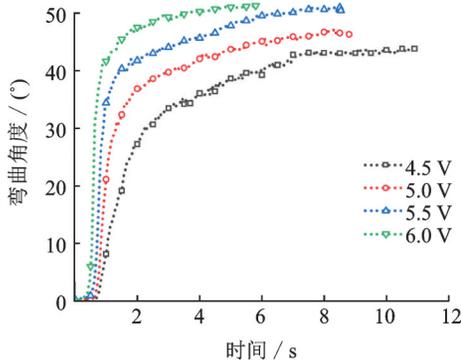


图 12 不同驱动电压下弯曲角度与驱动时间的关系

Fig.12 Relationship between bending angle and driving time under different driving voltages

由图 12 可知,柔性脚趾通电后,很快加热到相变开始温度,进入快速变形阶段,其变形速度与电压正相关,之后变形速度放缓,到达变形极限后弯曲角度趋于稳定。结合图 6 的温度响应曲线可知,通电后记忆合金丝的最高温度大于相变结束温度时,柔性脚趾的形变才能达到最大值,此时加大电压值仅会使弯曲速度加快。柔性脚趾的最大弯曲角度约为 50°,最大弯曲状态如图 13 所示。

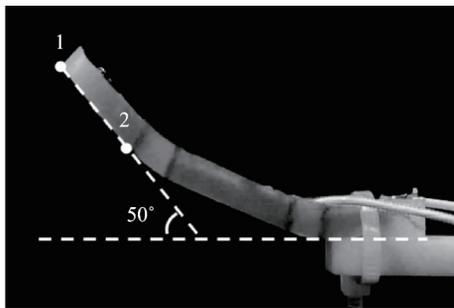


图 13 柔性脚趾样机最大弯曲状态

Fig.13 Maximum bending state of flexible toe prototype

机器人的运动需要脚趾进行周期性的运动,较高的电压虽然可以提高响应速度,但也会使冷却恢复时间增加。为确定合适的驱动电压,测试在室温下不同电压驱动脚趾达到最大弯曲角度的加热响应时间与冷却恢复时间,其结果如图 14 所示。其中  $t_{res}$  和  $t_{rec}$  分别为柔性脚趾的加热响应和冷却回复时间。

结合图 12~14 可知,在 4.5 V 和 5 V 电压的驱动下,脚趾需要较长的响应时间,平衡时达到的弯曲角度也较小,无法满足脚掌运动的时序要求。在 5.5 V 和 6 V 的电压驱动下,柔性脚趾均能较快地达到最大弯曲角度。但是在 6 V 电压下,记忆合金

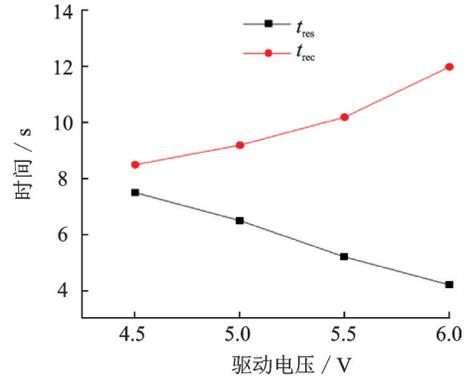


图 14 不同驱动电压下的响应与回复时间

Fig.14 Response and recovery time under different driving voltages

丝需要的恢复时间更长,导致弯曲和回复的整个过程时间更长,且由图 11 可知,5.5 V 的电压驱动下,柔性脚趾在到达 40° 的弯曲角度前,具有较快的弯曲响应速度,其速度放缓主要出现在 40°~50° 之间,即记忆合金丝即将相变结束的阶段,完成脱附任务的同时可以更加方便地对记忆合金丝进行控制。因此,驱动电压选择 5.5 V 比较合适。在 5.5 V 的驱动电压下,对柔性脚趾通电 6 s 后冷却,弯曲角度随时间变化的数据如图 15 所示。

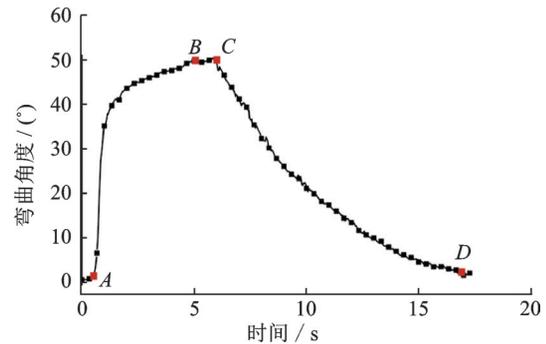


图 15 柔性脚趾弯曲角度变化实验曲线

Fig.15 Experimental curve of flexible toe bending angle

由图 15 可知,柔性脚趾从 A 点开始弯曲角度迅速增大,并在 B 点到达最大弯曲角度,在 C 点弯曲角度迅速减小,至 D 点到变形结束,柔性脚趾恢复到初始状态。图中的 A、B、C、D 四点分别对应马氏体逆相变的开始和结束温度以及马氏体相变的开始和结束温度。

#### 4.2 柔性脚趾脱附实验

通过实验测试基于记忆合金丝的仿壁虎柔性脚趾的外翻脱附能力,验证外翻动作对脱附能力的影响。实验平台如图 16 所示。测试时,柔性脚趾固定在二维线性移动平台上;二维力传感器水平固定在移动平台的底部,传感器测量方向与平台的移动方向相同,传感器顶部安装了亚克力板,作为柔

性脚趾的黏附面。实验时,可以控制移动平台带动柔性脚趾沿水平或垂直方向匀速移动。

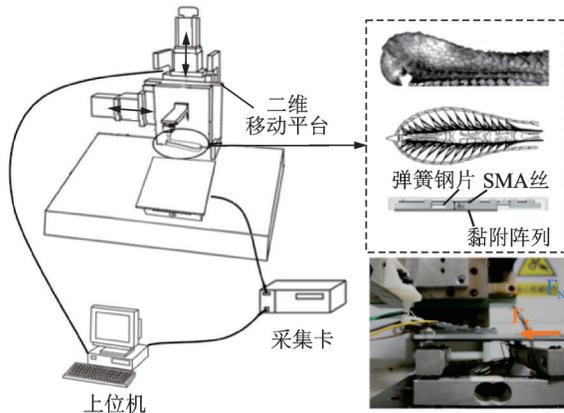


图16 柔性脚趾脱附力测试平台

Fig.16 Test platform of flexible toe detachment force

实验分别采用外翻脱附和直接撕脱两种不同方式测试柔性脚趾脱附过程中的受力情况。由于柔性脚趾的预压力由下压时弹簧钢片的弯曲力矩提供,指节2能否实现外翻脱附也与弹簧钢片的厚度相关,因此实验测试了嵌入0.1、0.15、0.2 mm厚度弹簧钢片的柔性脚趾在直接撕脱和使用记忆合金丝外翻脱附时的切向力 $F_T$ 与法向力 $F_N$ 。其中 $F_T$ 因黏/脱附过程中脚趾黏附层的侧向滑动产

生,对于直接撕脱试验,其大小一定程度上可以反应黏附阵列的黏附效果。下压过程中 $F_N$ 由弹簧钢片的弯矩 $M_T$ 产生,由式(11)可知,其大小由弹簧钢片的厚度与弯曲角度决定。外翻脱附时, $F_N$ 由记忆合金弯矩 $M_{SMA}$ ,弹簧钢片的弯矩 $M_T$ 等多个力矩产生,由2.2节对外翻脱附的力矩分析可知,外翻脱附过程中平衡状态下法向力 $F_N$ 满足

$$M_{SMA} = M_T + \int_0^{a_i} \frac{F_N}{a_i} x dx \quad (15)$$

实验时,先将柔性脚趾固定在二维移动平台上,设定脚趾的初始位置与亚克力板的夹角 $\alpha=10^\circ$ 。实验时移动平台从初始状态开始以1 mm/s的速度匀速下压至指节1、2与壁面贴合,预压完成后,分别使用直接撕脱和外翻脱附两种方式将脚趾从亚克力板剥离,其中直接撕脱依靠移动平台的上升实现脱附,随着平台的上升,脚趾从趾根处开始逐步与壁面剥离,此种方式剥离时记忆合金不参与脱附,脱离完全依靠移动平台上升对脚趾施加的外力作用,而外翻脱附时移动平台在下压完成后,便停止移动,依靠记忆合金的相变驱动柔性脚趾的外翻动作实现脱附。记录整个剥离过程中的受力,使用3种不同厚度弹簧钢片在直接撕脱和外翻脱附时受力的情况如图17所示。

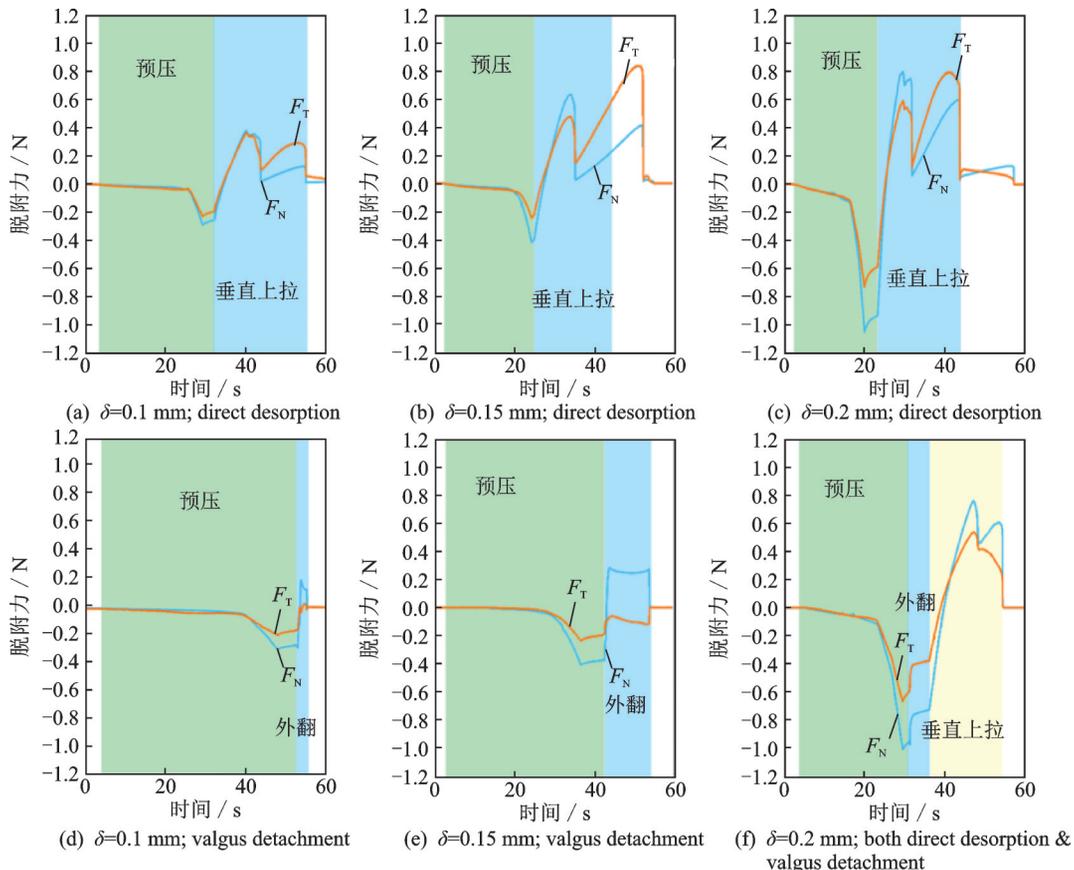


图17 采用不同厚度弹簧钢片的柔性脚趾直接撕脱和外翻脱附的受力曲线

Fig.17 Force curves of direct desorption and valgus detachment of flexible toes with different thickness of spring steel sheets

柔性脚趾驱动器中用于黏附的指节有两段,分别是脚趾指尖(指节1)与脚趾中段(指节2)。直接撕脱时,随着移动平台的上升,脚趾于指中段处开始撕脱,当指中段与亚克力板完全脱离后,指尖部分开始脱附,最终完全与壁面脱附,脱附时法向力会出现两个波峰,且脱附过程中,随着平台上升,脚趾受力逐渐增大,直至与壁面脱离。而在外翻脱附时,脚趾从趾尖到趾中依次外翻脱离,当趾尖脱附完成时趾中仍与壁面贴合,因此脱附法向力只会产生一个峰值,并且由于其脱附力由记忆合金丝提供,所以脱附过程中,脚趾受到的法向力在合金丝收缩后趋于稳定。

对比图17中各子图的预压阶段受力可知,预压角度相同时,使用较大厚度的弹簧钢片,可以产生更大的预压力,由于此时合金丝未参与动作, $F_N$ 仅与 $M_T$ 相关。由图17(a~c)可知,弹簧钢片厚度的增加所带来的预压力的提升使脚趾从壁面撕脱需要的切向力与法向力都相应增大,黏附效果更好。采用0.2 mm的弹簧钢片虽然对比采用0.15 mm弹簧钢片,在撕脱过程中趾中的脱附力更大,但是脚趾尖端脱附力却几乎没有变化,整体黏附能力提升不大。对比图17(a,d)与图17(b,e)可知与直接撕脱相比,使用外翻脱附的方式,无论是切向力还是法向力都显著地降低,且脱附不需要额外助力,仅依靠合金丝相变提供的转矩 $M_{SMA}$ 完成。对比图17(d,e,f)中采用了不同厚度弹簧钢片的外翻脱附实验结果,对应于不同的脱附状况。图17(d)中,脚趾使用0.1 mm的弹簧钢片,黏附力与弯曲力矩都较小,记忆合金驱动外翻脱附时, $M_{SMA}$ 增大过程中,到达2.2节分析中的脱附所需力矩,完成脱附行为。图17(e)中,脚趾使用0.15 mm的弹簧钢片,黏附力与弯曲力矩增大,外翻脱附时,记忆合金丝相变完成后,进入了相持阶段,最终完成了脱附。图17(e)中,脚趾使用0.2 mm的弹簧钢片,由于弹簧钢片的弯曲力矩过大,相变完成后, $F_N$ 仍为负值,仅记忆合金收缩提供的转矩无法完成指节2的脱附,需要依靠平台上升提供额外的脱附力,但外翻仍提供了一定的脱附力,脱离阶段相比直接撕脱产生的切向力更小。

实验结果表明,基于记忆合金丝驱动的仿壁虎脚趾可以实现黏/脱附动作,且脚趾外翻脱附受力小于直接撕脱受力。在选用0.15 mm的弹簧钢片时,综合黏附与脱附效果更好。

## 5 结 论

本文根据壁虎脚趾的外翻脱附原理,研制了基

于形状记忆合金丝的仿壁虎柔性脚掌,根据形状记忆合金丝的特性与仿壁虎机器人运动的要求,设计了脚掌的控制系统。通过实验验证了设计的仿壁虎柔性脚掌在光滑壁面上的黏/脱附能力,并通过对比分析不同驱动电压下柔性脚趾驱动器的响应时间、恢复时间和弯曲性能,选择了合适的驱动电源和弹簧钢片厚度。

本文设计的柔性脚掌可以提供足够的预压力。能够实现脚趾的自主外翻脱附,与直接撕脱相比,有效减少了脱附力,保证了仿壁虎机器人爬行的稳定,未来将进一步研究提高仿壁虎柔性脚掌的响应速度与脱附能力,从而提高仿壁虎机器人的爬行速度。

## 参考文献:

- [1] 王国彪,陈殿生,陈科位,等.仿生机器人研究现状与发展趋势[J].机械工程学报,2015,51(13):27-44.  
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44.
- [2] 吉爱红,戴振东,周来水.仿生机器人的研究进展[J].机器人,2005,27(3):284-288.  
JI Aihong, DAI Zhendong, ZHOU Laishui. Research development of bio-inspired robotics[J]. Robot, 2005, 27(3): 284-288.
- [3] KERMORGANT O. A magnetic climbing robot to perform autonomous welding in the shipbuilding industry[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 53: 178-186.
- [4] 吕志忠,汪维杰,陈金鹏,等.四足磁吸附爬壁机器人稳定性与动力学分析[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(3):429-435.  
LV Zhizhong, WANG Weijie, CHEN Jinpeng, et al. Stability and dynamics analysis of a four-legged magnetic adsorption wall-climbing robot[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(3): 429-435.
- [5] PARNES A, ABCOUWER N, FULLER C, et al. Lemur 3: A limbed climbing robot for extreme terrain mobility in space[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). [S.l.]: IEEE, 2017: 5467-5473.
- [6] 谢超.柔性钩爪盘形足式爬壁机器人仿生理与系统研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.  
XIE Chao. Study of quadruped wall-climbing robots with bioinspired flexible spiny feet featuring radial configuration[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [7] 江南.对抓钩爪式六足爬壁机器人[D].南京:南京航空航天大学,2018.

- JIANG Nan. A claws-paired hexapod climbing robot [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018.
- [8] FUJITA M, IKEDA S, FUJIMOTO T, et al. Development of universal vacuum gripper for wall-climbing robot[J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(6): 283-296.
- [9] ZHU H, GUAN Y, WU W, et al. Autonomous pose detection and alignment of suction modules of a biped wall-climbing robot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 20(2): 653-662.
- [10] WU X, WANG D, ZHAO A, et al. *Advanced mechatronics and MEMS devices*[M]. New York, NY: Springer, 2013: 179-191.
- [11] SAHAY R, LOW H Y, BAJI A, et al. A state-of-the-art review and analysis on the design of dry adhesion materials for applications such as climbing micro-robots[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(63): 50821-50832.
- [12] 唐义强, 姬科举, 戴振东. 脚状各向异性黏附材料制备及力学行为研究[C]//中国力学大会论文集. 杭州: 浙江大学, 2019: 2699-2705.  
TANG Yiqiang, JI Keju, DAI Zhendog. Preparation and mechanical behavior of foot-like anisotropic adhesive materials[C]// *Proceedings of the Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 2699-2705.
- [13] CARLO M, METIN S. A biomimetic climbing robot based on the gecko[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2006, 3(3): 115-125.
- [14] KIM S, SPENKO M, TRUJILLO S, et al. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(1): 65-74.
- [15] 李冰. 柔性仿壁虎机器人的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.  
LI Bing. Research on the compliant gecko inspired robot[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [16] TANAKA K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: One-dimensional tensile behavior[J]. *RES Mechanics*, 1986, 18: 251-263.
- [17] 王扬威, 兰博文, 刘凯, 等. 形状记忆合金丝驱动的柔性机械臂建模与实验[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(4): 628-634, 673.  
WANG Yangwei, LAN Bowen, LIU Kai, et al. Modeling and experiment of flexible manipulator actuated by shape memory alloy wire[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(4): 628-634, 673.
- [18] 沈丹平. 基于NiTi形状记忆合金的仿生灵巧手设计研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2019.  
SHEN Danping. Research on bionic dexterous finger based on niti shape memory alloy[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2019
- [19] CARBALLO M, PU Z J, WU K H. Variation of electrical resistance and the elastic modulus of shape memory alloys under different loading and temperature conditions[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(4): 557-565.
- [20] SONG G, MA N, LEE H J. Position estimation and control of SMA actuators based on electrical resistance measurement[J]. *Smart Structures and Systems*, 2007, 3(2): 189-200.
- [21] 成佳伟. 大壁虎运动步态与体态特征研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
CHEN Jiawei. Research on characteristics of gecko's gait and posture[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007.
- [22] HEDRICK T L. Software techniques for two-and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2008, 3(3): 034001.

(编辑: 陈珺)