doi:10.3772/j.issn.1002 - 0470.2026.06.009

仿尺蠖爬壁机器人的曲面步态规划与 CPG 网络构建①

刘海军②* 王广慧* 吴善强③** 周 坤** 郑小飞** 冯伟博**

(*神华准格尔能源有限责任公司 鄂尔多斯 010300)

(**中国计量大学机电工程学院 杭州 310018)

摘 要 针对爬壁机器人在复杂曲面的运动规划难题,提出了一种基于自适应中央模式发生器(central pattern generator, CPG)的仿生步态规划方法,并以自然界尺蠖运动为启发,设计了一种5自由度双足爬壁机器人。首先,分析了机器人双足吸盘稳定吸附的条件,通过基于有监督学习方法和多个可调节 Hopf 振荡器的耦合,构建了机器人3个关节的 CPG 网络模型;通过学习机器人在平面翻转步态的角度与振幅初值以获得曲面翻转的 CPG 网络参数,再对曲面翻转步态的 CPG 网络映射的关节角度和幅值进行线上修改,以实现曲面翻转步态的规划;然后,利用 Matlab/Simulink 与 Adams 建立仿真模型,验证机器人能够适应不同曲率曲面上的翻转步态;最后,将机器人在真实曲面环境中进行翻转步态实验,实验与仿真结果一致,表明在机器人学习平面步态后,CPG 网络可将平面步态转换为曲面步态,验证了 CPG 在线调节步态规划方法的有效性。

关键词 爬壁机器人; 中枢模式发生器网络; 步态分析; 运动规划; 吸附条件

爬壁机器人能够在垂直或倾斜的壁面上完成作业任务[1],可在竖直壁面或高空开展勘察、清洁、喷涂[2]等高风险代替人工作业。爬壁机器人主要有足式、履带式和轮式3种移动方式,每种方式都有其独特的应用场合。

在以上3种类型中,足式结构紧凑、灵活度高,如西班牙团队研发了一款双足机器人 ROMA II[3-4],该机器人仅存在一个电机,采用欠驱动设计和4自由度组成,其末端由5对两两成对排列的真空吸盘组成,吸附能力高达 100 kg。但其仅具备4个自由度,在空间中行走不灵敏,且从地面翻转到天花板耗时较长。中科院沈阳自动化所研发了真空欠压式 Strider 爬壁机器人[5],并对机器人如何自主选择着落点、在交叉平面过渡运动以及在非光滑面上吸盘足的工况进行了研究,得出较为合适该工况的步态规划算法[6-7]。多足爬壁机器人具有较强的曲面适应能力,且灵活度高、适合使用中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)控制。本文以双足多自由度为研究对象,研究其曲面步态规划与 CPG 网络构建[8]。

在足式机器人领域,常采用耦合振荡器系统模型和联结模型。例如,Paolo 等人[9]利用双层神经网络控制六足果蝇的运动,但该方法神经网络结构复杂,步态的稳定性难以完全保证。而 Hopf 振荡器是一种非线性动力学系统,在周期性节律步态规划上表现出较好的效果。Righetti 等人[10]提出一种基于动态 Hebbian 学习机制,以任何周期输入的频率为变量,且不需任何信号处理,即可得到振荡器频率周期相同。该模型耦合的自适应 CPG 单元,CPG 的参数由系统动态调整,不需要外部优化就可以学习复杂周期输入的频率和相位关系[11]。Ludovic 和 Ijspeert[12]利用该自适应振荡器耦合的 CPG 网络,

① 浙江省"尖兵""领雁"研发攻关项目(2023C03186)资助。

② 男,1970年生,硕士,高级工程师;研究方向:发电厂锅炉燃烧控制;E-mail: 936914093@qq.com。

③ 联系人,E-mail: 08A0105102@cjlu.edu.cn。

(收稿日期:2025 - 07 - 07)

生成多维协调的周期轨迹,并将其应用于 Hoap-2 人形机器人的双足运动控制上。

本文基于自适应频率 Hopf 振荡器构成的 CPG 单元,针对目前爬壁机器人在曲面运动轨迹规划难以实现的问题,提出采用学习现有的平面运动步态和有监督的学习算法,实现机器人根据 CPG 模型信息输入的规划运动节律与运动模式生成新的适应曲面的步态。

1 爬壁机器人设计与分析

1.1 机构设计

从尺蠖爬行方式中受到启发,本文仿照尺蠖的运动特性开发了一种双吸盘 5 自由度爬壁机器人。尺蠖运动时通过身躯的弯曲与伸直实现向前、后爬行,双足有吸盘牢牢吸在树干上。根据尺蠖运动特性设计出来的机构具有较好的空间移动性能,能够满足复杂曲面环境下的全方位运动需求,其结构原型如图 1 所示。

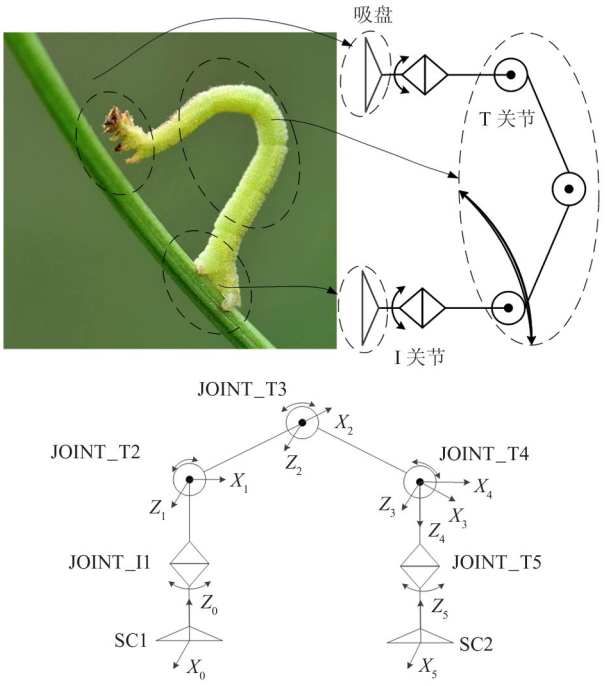


图 1 仿生爬壁机器人结构原型

关于机器人自由度的类型和数量,本文参考了文献[13 – 14]的工作进行确定。其中,文献[13]对爬杆类机器人自由度数量进行了分析。基于此,本文结合仿生设计本爬壁机器人,整体采用 5 自由度、5 个关节均为旋转关节。机器人整体设计成对称结构,其中,头尾关节 JOINT _ I1、JOINT _ I5 的轴线与机器人身躯的轴线一致,围绕吸盘中轴线做 360 °旋转运动;机器人身躯中间 3 个关节(JOINT _ T2、JOINT _ T3、JOINT _ T4)做摆动运动,其旋转轴线与机器人身躯呈垂直关系;机器人末端为吸盘(SC1、SC2),如尺蠖的两脚。

1.2 吸附方案设计

为提升爬壁机器人的吸附稳定性,其足部设计为吸盘组,吸盘组的构造由多个吸盘组成,其吸附性能与吸盘数量、分布形式和吸盘大小间距有密切关联[15 – 16]。根据三角形稳定吸附原理,将固定架设计成等边三角形,吸盘均布安装在 3 条边上,吸盘与固定架的链接为柔性铰链连接,如图 2 所示,吸盘的分布为 *C*1、*C*2 和 *C*3。

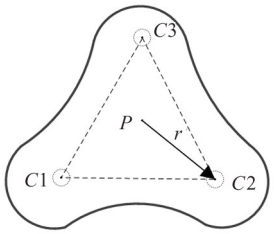


图 2 吸盘组结构图

吸盘组内的吸盘采用并联方式连接,连接气路中装有电磁阀和气压传感器。其工作原理是当压缩泵启动时,把吸盘内的空气抽走形成负压。电磁阀配合压力传感器,当压力传感器检测到吸盘内的负压达到设定的期望阈值时,则可认定为具备吸附强度;否则,吸盘足无法实现有效负压,吸附不成立。在松开吸盘时,只要压缩泵停止工作,同时打开电磁阀气路与外界空气相通,从而消除负压,完成吸附释放过程,吸盘足气路设计如图 3 所示。

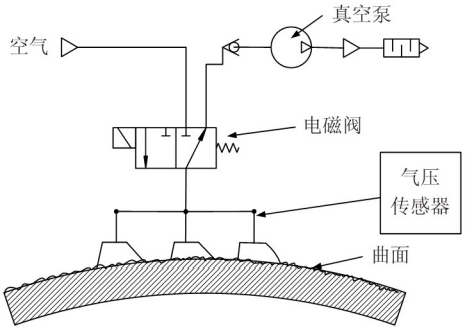


图 3 吸盘足气路设计

1.3　步态设计

根据尺蠖特性，设计了机器人 3 种基础步态：尺蠖步态、翻转步态和扭转步态。以翻转步态为例研究其攀爬过程如图 4 所示。

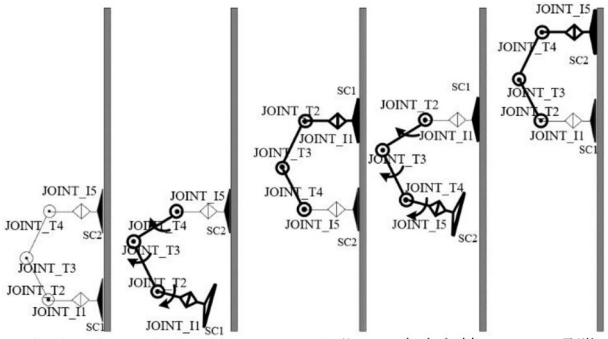
（1）初始位置，机器人上下吸盘 SC1、SC2 保持吸附。

（2）吸盘 SC2 保持夹持，机器人下端夹持器 SC1 松开夹爪，JOINT _ T2、JOINT _ T3、JOINT _ T4 关节作顺时针旋转运动，此时吸盘 SC1 向上翻转运动。

（3）吸盘 SC1 吸附并保持，吸盘 SC2 松开。

（4）吸盘 SC1 保持吸附，机器人吸盘 SC1 松开状态，JOINT _ T2、JOINT _ T3、JOINT _ T4 关节作顺时针旋转运动，此时吸盘 SC2 向上翻转运动。

（5）吸盘 SC2 吸附并保持，循环以上过程。



(a) 初始状态 (b) 向上翻转 (c) SC1 吸附 (d) 向上翻转 (e) SC2 吸附

图 4　翻转步态示意图

2　自适应 CPG 单元构建与分析

2.1　自适应频率振荡器模型

在外力 p 干扰下 Hopf 振荡器数学模型为[17]

$$\begin{cases}\dot{x} = (\mu - r^2)x - \omega y + \varepsilon p \\ \dot{y} = (\mu - r^2)y + \omega x\end{cases} \tag{1}$$

式中：x 和 y 分别为振荡器在相空间中的 2 个状态变量，代表振荡信号的正交分量，通过极坐标变换可得到幅值 r 和相位 ϕ；p 为外部扰动信号在 x 方向上的分量；$r^2 = \sqrt{x^2 + y^2}$；μ 是控制振荡器幅值的参数，且 $\mu > 0$；ω 是振荡器的固有频率；ε 是耦合强度。为了更好地分析振荡器的相位变化，采用极坐标表示：$x = r\cos\phi$，$y = r\sin\phi$，将这些代入微分方程组得到极坐标形式的系统方程，如式(2)所示。

$$\begin{cases}\dot{r} = (\mu - r^2)r + \varepsilon p\cos\phi \\ \dot{\phi} = \omega - \dfrac{\varepsilon}{r}p\sin\phi\end{cases} \tag{2}$$

极限环是一个存在于二维或更高维空间中的闭合曲线。在极限环上的相点，除了沿着极限环的方向进行运动外，其他方向的运动至少有 $n-1$ 个方向是平稳的。也就是说，系统的解在法线方向上发生变化，而在切线方向上则保持不变。为了分析极限环在切线方向 e_ϕ 和法线方向 e_r 方向上的稳定性，建立数学模型，如图 5 所示。$\boldsymbol{p}$ 向量为相空间中的扰动，其在切线 e_ϕ 和法线 e_r 上的投影分别为 p_ϕ 和 p_r。扰动关系为式(3)所示。

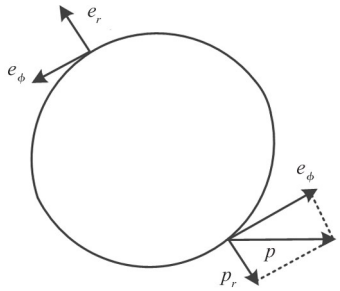


图 5　极限环坐标系的建立

$$p_\phi = \boldsymbol{p} \cdot e_\phi \tag{3}$$

式中：相点通过对 p_ϕ 加、减速的运动，可实现对振荡器频率的调整。因此，振荡器频率通过因子调节，其会逐渐接近扰动 p_ϕ 的频率。可得 Hopf 模型如式(5)所示。

根据式(2)的相位方程 $\dot{\phi} = \omega - \dfrac{\varepsilon}{r}p\sin\phi$ 如果让振荡器的频率 ω 自适应调节以消除相位误差，则令：

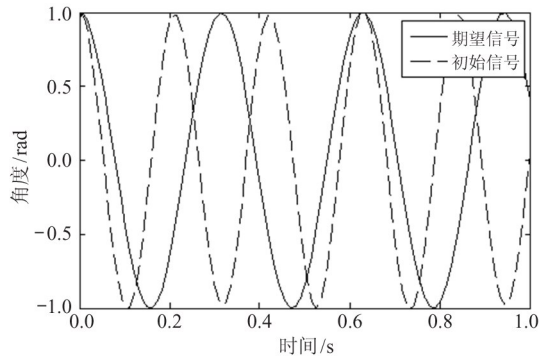
$$\dot{\omega} = -\varepsilon p\sin\phi \tag{5}$$

代入 $\sin\phi = \dfrac{y}{r}$ 得到：

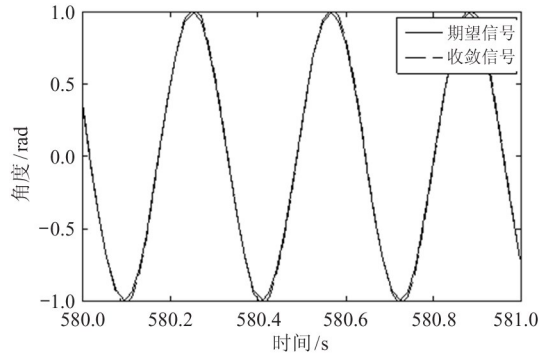
$$\dot{\omega} = -\varepsilon p\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{6}$$

ω 调整频率的速度受到 ε 的影响。在这一自适应学习规则下，设定输入扰动为 $p = \sin(20t)$，这是一个周期性的外部扰动信号。根据给定的初始条件 $\omega(0) = 30$，$x(0) = 1$，$y(0) = 0$，$u = 1$，$\varepsilon = 0.9$，自适应 Hopf 振荡器会根据外部扰动信号的频率逐步调整其频率。在仿真中，振荡器的频率会逐渐接近输入信号的频率，从而实现同步，自适应振荡器频率

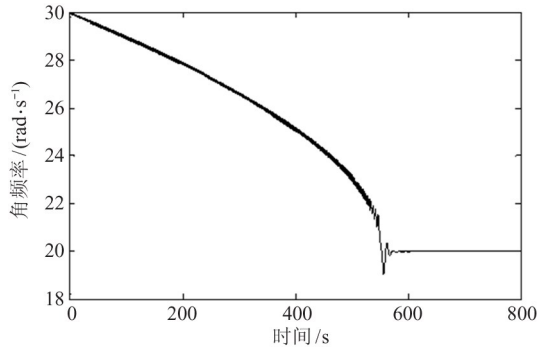
变化如图 6 所示。



(a) 初始信号与期望信号对比



(b) 收敛信号与期望信号对比



(c) 频率曲线

图 6　自适应振荡器频率变化过程

2.2　自适应 CPG 单元模型

复杂周期信号包含多个频率分量,自适应频率 Hopf 振荡器可调整频率接近某一分量,最终收敛至输入信号的频率。增加幅值学习变量后,网络可同时学习频率和幅值,并叠加生成目标信号。但单个振荡器易受干扰,通过振荡器间耦合可增强抗干扰能力。振荡器构成的 CPG 单元如图 7 所示,振荡器通过反馈控制逐步学习频率分量,并从输入中移除已学习的分量,随着学习推进,频率、幅值及相位逐渐收敛,学习误差显著降低。

CPG 模型基于多个耦合的振荡器,通过学习信号的周期和相位关系来产生预期的周期性信号。其数学模型的基本形式[18]为式(7)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_i = (\mu - r_i^2)x_i - \omega y_i + \varepsilon p + \tau \sin(R_i - \varphi_i) \\ \dot{y}_i = (\mu - r^2)y_i + \omega x_i \\ \dot{\omega} = -\varepsilon p \dfrac{y_i}{r_i} \\ \dot{\alpha}_i = \eta x_i p \\ \dot{\varphi}_0 = 0 \\ \dot{\varphi}_i = \sin(R_i - \mathrm{sgn}(x_i)\cos^{-1}(-\dfrac{y_i}{r_i}) - \varphi_i),\ \forall i \neq 0 \\ R_i = \dfrac{\omega_i}{\omega_0}\mathrm{sgn}(x_0)\cos^{-1}(-\dfrac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}) \\ p(t) = P_{\text{teach}}(t) - \sum_{i=0}^{N} \alpha_i x_i \end{cases} \tag{7}$$

式中:x_0 和 y_0 为其正交状态变量;ω_0 为其频率初值;η 为振幅学习率,用于控制幅值系数 α_i 的更新速度;τ 为强度因子;sgn 为符号函数;a_i 为振幅;φ_i 是各个振荡器之间的相位差,描述了每个 R_i 振荡器与其他振荡器的相位关系,是振荡器 i 与基准振荡器之间的相位关系;$P_{\text{teach}}(t)$ 是期望的输入周期信号,驱动模型学习并调整振荡器的行为;图 7 中 $P_{\text{learned}}(t)$ 是学习完的输出信号。

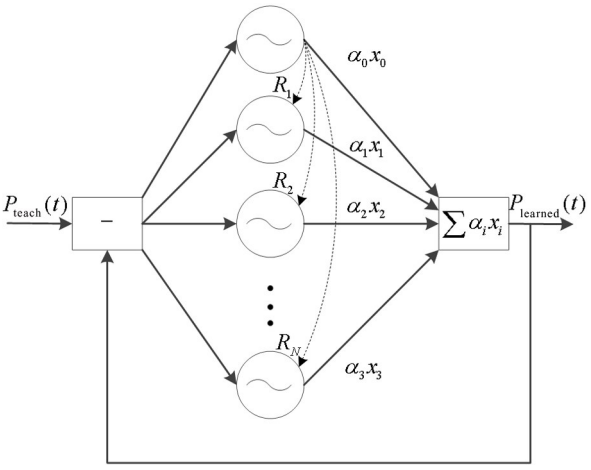


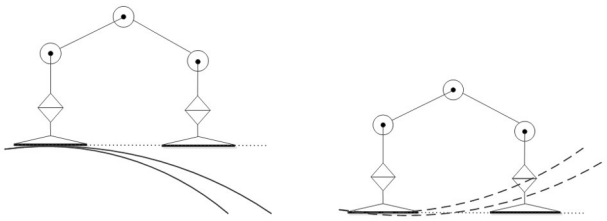
图 7　振荡器构成的 CPG 单元

3　CPG 曲面运动步态分析与生成

3.1　机器人曲面运动分析

通常机器人在曲面上作攀爬运动归结有:曲面

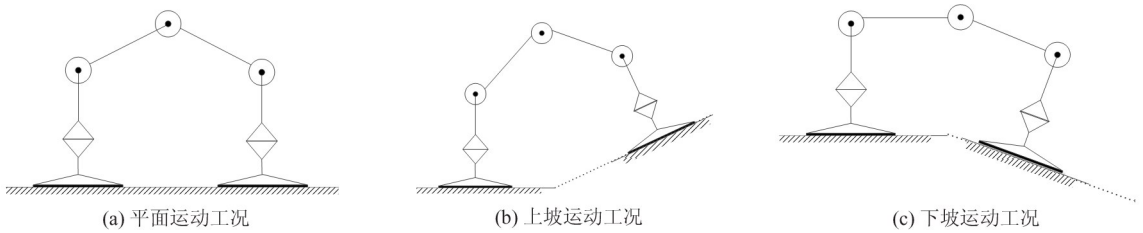
向上凸起和曲面向下凹陷的 2 种工况，如图 8 所示。



(a) 凸曲面运动工况　(b) 凹曲面运动工况

图 8　不同曲率的曲面运动工况

吸盘足具备曲面适应能力，为分析该特性，首先从平面运动入手，因为平面可视为曲率为 0 的特殊曲面。不管是图 8 的曲面运动，还是图 9 平面运动模式，根据仿生设计，机器人各关节结构均为对称形式，机构满足相应结构要求且呈周期性规律。图 10 可视为机器人在平面运动，机器人身躯呈固定角度。因此，可以将机器人步长设为固定，同理，球面运动可视为机器人足部夹角固定的平面间运动。



(a) 平面运动工况　(b) 上坡运动工况　(c) 下坡运动工况

图 9　平面运动不同工况

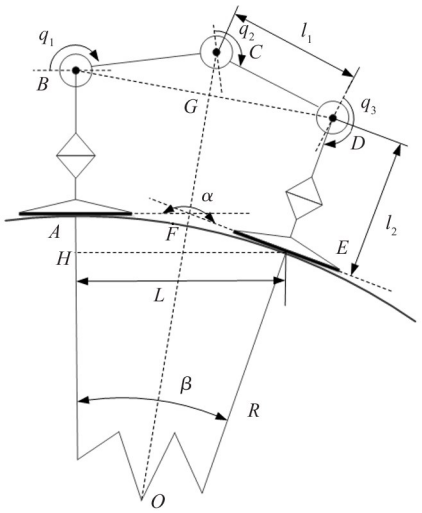


图 10　机器人自适应球面运动关系

由于机器人身躯与尺蠖运动相似，其关节受到一定限制，通常在凸曲面上运动的平面夹角范围为 0 ~ −90 °，在凹曲面上运动的夹角范围为 0 ~90 °。

当机器人在球面上爬行时，设机器人躯干的关节旋转角度范围为 q_1、q_2、q_3，躯干分为两段式记为 l_1 和 l_2。由于机器人躯干设计成对称结构，两端关节角度有 $q_1 = q_3$。设两足延长线的交点为 O，吸盘组延长线与曲面的切平面夹角为 α，当机器人关节固定角度其身躯长度为步长 L，机器人可自适应曲面的半径视为 R，定义 $\angle OCD = \theta_1$，$\angle CDO = \theta_2$，$\angle BOD = \beta$。根据机器人构型，得右边的几何约束。

根据机构对称性可得：

$$q_1 = q_3 = \frac{5}{2}\pi - \theta_2 \tag{8}$$

$$q_2 = \frac{5}{2}\pi - 2\theta_1 \tag{9}$$

由四边形 $BCDO$ 内角和为 2π，可得：

$$\beta = q_2 + 2q_3 - \frac{5}{2}\pi \tag{10}$$

在直角 ΔHOE 中，有：

$$L = R\sin\beta \tag{11}$$

根据 $DG = CD \cdot \sin\angle OCD = OD \cdot \sin\angle DOC$ 得到：

$$\angle DOC = \arcsin\frac{l_1\sin\theta_1}{R + l_2} \tag{12}$$

$$R = \frac{l_1\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - l_2 \tag{13}$$

当机器人从低曲率曲面移动到高曲率曲面时，角度 θ_1 和 θ_2 的范围为

$$\frac{\pi}{4} \leqslant \theta_1 \leqslant \frac{\pi}{2} \tag{14}$$

$$\frac{\pi}{2} \leqslant \theta_2 \leqslant \frac{3\pi}{4} \tag{15}$$

根据式(13)，球面半径 R 随 θ_1 和 θ_2 变化的规律如图 11 所示。

当机器人身躯右边 θ_1 固定时，能够适应的曲面半径R会随着θ_2变大而加大；同理，当θ_2固定时，R

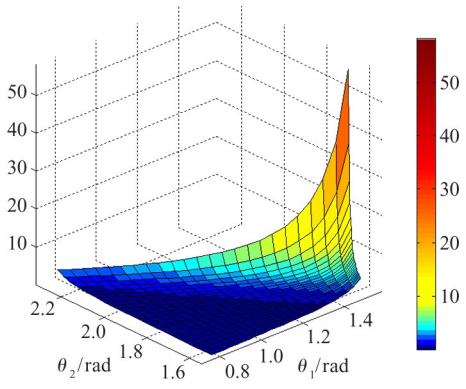


图 11　球面半径 R 随 θ_1 和 θ_2 变化关系

也会随 θ_1 加大而加大。当 $\theta_1 = \pi/4$, $\theta_2 = \pi/2$ 时,机器人能适应最小曲率半径为 $R = 25.5$ mm(假设吸盘足为质点),此时 $\alpha = 3\pi/2$。当 $\theta_1 = \pi/2$, $\theta_2 = \pi/2$ 时,此时为平面运动状态,曲率半径 $R \to \infty$,且 $\alpha = 0$,α 取值为 $0 \sim 3\pi/2$。在平面上较容易得出机器人步长范围为 $\sqrt{2}l_1 \leqslant L \leqslant 2l_1$。在球面上运动时,步长不确定,但是可计算出最大步长。

根据 θ_1 取值范围及几何关系:

$$\arcsin\frac{\sqrt{2}l_1}{2(R+l_2)} \leqslant \angle DOC \leqslant \arcsin\frac{l_1}{R+l_2} \tag{16}$$

步长限制为

$$\begin{cases} R \cdot \sin(2\arcsin\dfrac{\sqrt{2}l_1}{2(R+l_2)}) \leqslant L \\ L \leqslant R \cdot \sin(2\arcsin\dfrac{l_1}{R+l_2}) \end{cases} \tag{17}$$

当步长 L 增大时,夹角 $\angle BDO$ 逐渐减小,反之,夹角 $\angle BDO$ 增大。由于 L 是固定的,结合式(10)~式(13)解得 θ_1 和 θ_2。解得的值代入式(8)和式(9)求出满足机器人吸附条件的关节角度 q_1、q_2、q_3。

3.2　曲面翻转运动分析

机器人在曲率变化的曲面上运动十分复杂,涉及到动力学建模、路径规划、控制以及动态适应等多个方面。机器人在平面上运动的各参数较为容易获取,通过研究其运动规律,以映射出机器人在曲面上运动的关系。机器人以翻转步态为例,在步长固定的工况下进行分析。

根据上节分析,机器人在平面上的步长范围为 0.430 m$\leqslant L \leqslant$0.608 m。通过调查机器人爬行的曲面曲率半径,取半径 $R = 2.000$ m 较为合适。由式(17)推出此时步长为 0.382 m$\leqslant L \leqslant$0.538 m,在机器人躯干 $L_{躯干}$ 不变的情况下,设步长 $L = 0.484$ m。结合运动学模型分析机器人在平面和球面的运动关系。机器人关节角度随时间变化规律通过余弦曲线描述,定义为

$$q_i = \frac{h_i}{2}[1 - \cos(\frac{\pi t}{T_i} - \frac{\pi t_{0i}}{T_i})] + q_{0i} \tag{18}$$

式中:$h_i = q_{1i} - q_{0i}$,$T_i = t_{1i} - t_{0i}$。在时刻为 t_{1i}、t_{0i} 的关节角度可根据 q_{1i}、q_{0i} 运动学的逆解得出。

根据机器人构型,做一个翻转步态在平面上运动的周期为 8 s, $T_i = 4$ s。各关节旋转角度曲线如图 12 所示。

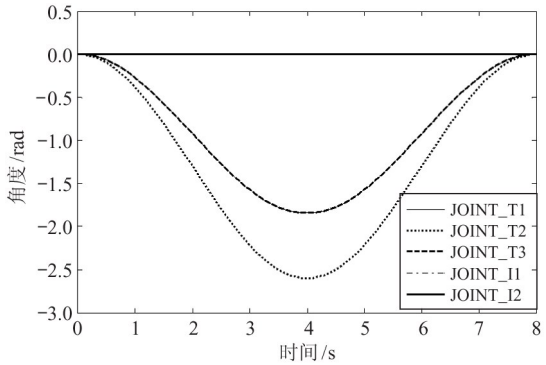


图 12　平面运动工况 J1 ~ J5 关节曲线

同理,在曲面作翻转步态运动时,各关节角度曲线如图 13 所示。

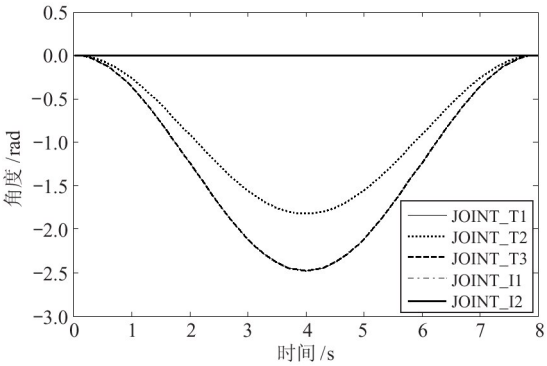


图 13　曲面运动工况 J1 ~ J5 关节曲线

由图 12 和图 13 可知,机器人两旋转关节 JOINT _ I1、JOINT _ I2 不参与工作,角度值不发生变化;和尺蠖运动时一致,只有机器人身躯的 3 个关节做摆动运动、3 个关节旋转时其轴线始终在一个平面内。

由于机器人对称结构设计 JOINT _ T1、JOINT _ T3 关节曲线相同，由图 12 和图 13 可看出 3 个关节的运动曲线均为余弦曲线规律。

3.3　翻转步态的 CPG 生成

通过上述运动分析可知，机器人在平面和曲面上的翻转步态运动中，关节角度曲线的周期相同，幅值成比例。利用自适应 CPG 单元学习机器人在平面上的关节角度曲线参数，并调整频率、幅值等参数，机器人能够在不同半径的球面上实现翻转运动，从而适应曲面的变化。翻转运动主要由 3 个 T 型关节的运动产生，本节采用 3 个耦合的 CPG 单元构成一个 CPG 网络，输出 3 个关节角度曲线。该 CPG 网络的结构如图 14 所示。

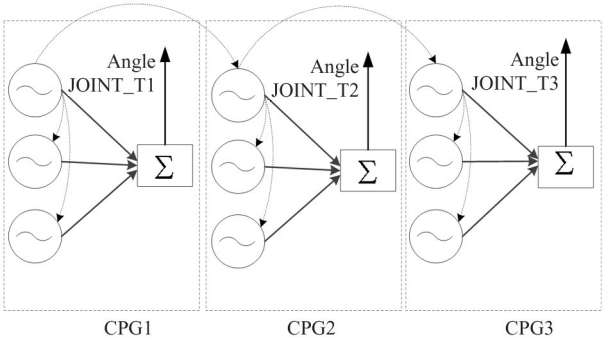


图 14　CPG 网络的构建

在图 14 中，3 个 CPG 单元组成 CPG 网络，1 个 CPG 单元由 3 个振荡器耦合，每 2 个 CPG 单元使用链式耦合，其中每个 CPG 单元第 1 个振荡器采用 Kuramoto 耦合方式进行相互作用。图 14 中，虚线连接表示各单元中 JOINT _ T1 和 JOINT _ T2、JOINT _ T2 和 JOINT _ T3 之间的相位耦合，从而实现关节角度输出的相位同步。

自适应 CPG 单元耦合模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_{i,1} = (\mu - r_{i,1}^2)x_{i,1} - \omega y_{i,1} + \varepsilon p + \tau \sin(R_{i,1} - \varphi_{i,1}) \\ \dot{\varphi}_{i,1} = \sin(\phi_{i-1,1} - \phi_{i,1} - \varphi_{i,1}) \end{cases} \tag{19}$$

式中：$\phi_{i,1}$ 为每组 CPG 单元之间的 Kuramoto 振荡器的相位差，$\phi_{i,1}$ 或 $\phi_{i-1,1}$ 为各振荡器的相位。

利用 Matlab 里面的 Simulink 模块搭建机器人 CPG 仿真模型。该模型用于实现机器人关节的协调控制，如图 15 所示。

使用 Matlab 搭建的 CPG 模型学习各关节角度 110 s 之后，各关节角度曲线相位差逐渐收敛为 0，达到期望值，如图 16 所示。

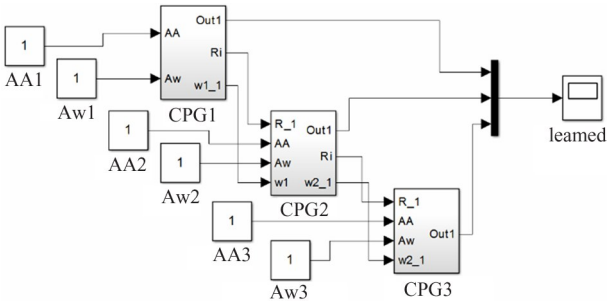


图 15　Simulink CPG 网络仿真模型

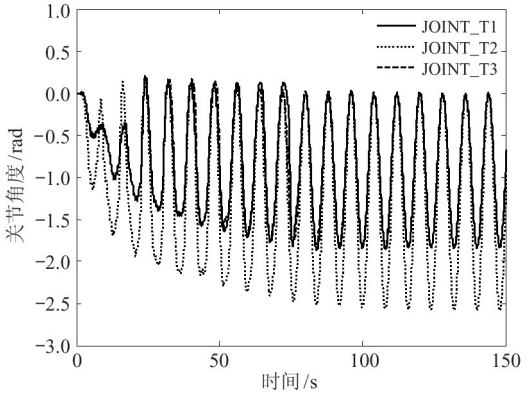


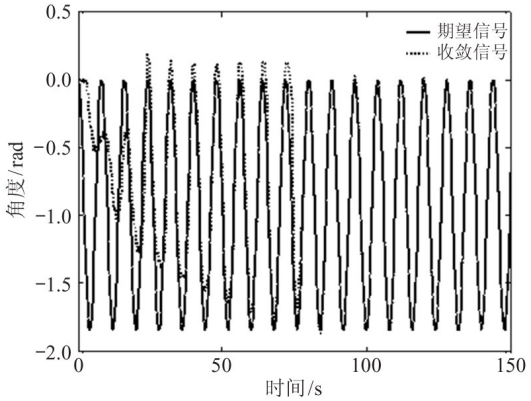
图 16　经过学习 110 s 后 3 个关节角度曲线

以 JOINT _ T2 关节所在的 CPG 单元为例，进行学习 110 s 后，其角度信号与期望信号基本一致，如图 17(a)所示。该 CPG 网络模型振荡器之间的频率、幅值和相位逐步趋于一致，如图 17(b) ~ (d)所示。学习误差慢慢收敛，并降至 10^{-3} 数量级，如图 17(e)所示，说明学习精度较高且系统稳定性良好。

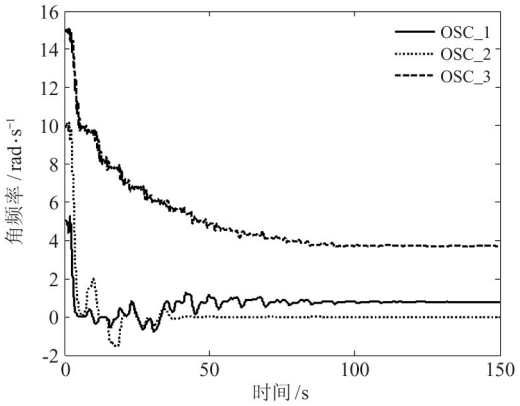
4　实验验证

4.1　Matlab/Simulink 和 Adams 联合仿真实验

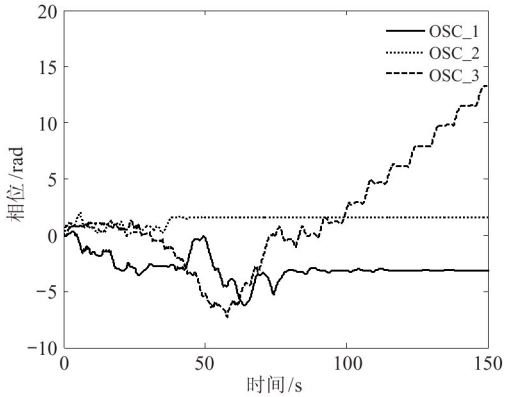
为验证 CPG 网络生成的各关节幅值参数是否合理，在 ADAMS 建立动力学模型，导入各关节的参数，联合 Matlab 完成仿真模块搭建，如图 18 所示。并与 Simulink 中搭建的 CPG 网络模块接连，这种配置实现了在 Simulink 中调用 Adams 参数，完成联合仿真。



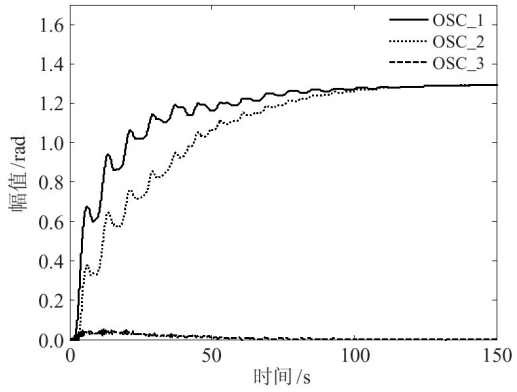
(a) JOINT _ T2 角度曲线



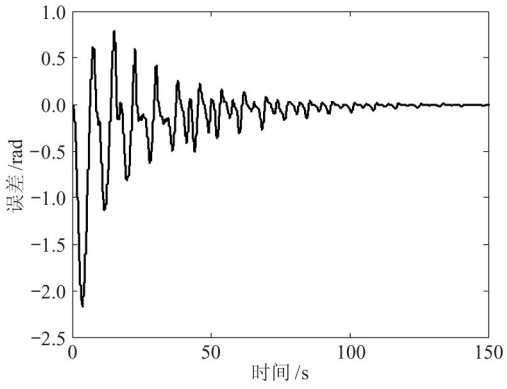
(b) JOINT _ T2 振荡器频率变化曲线



(c) JOINT _ T2 振荡器相位变化曲线



(d) JOINT _ T2 振荡器幅值变化曲线



(e) JOINT _ T2 学习误差变化曲线

图 17　JOINT _ T2 关节学习曲线

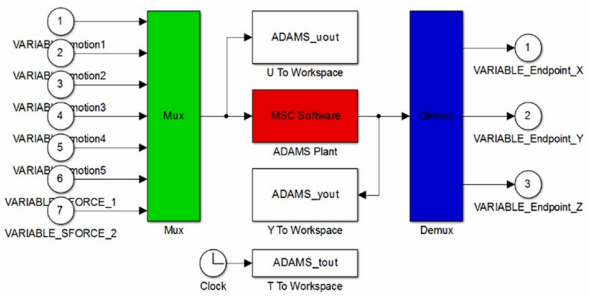


图 18　Adams 与 Simulink 联合仿真建立

经过 Adams 与 Matlab 学习了平面步态,得到在曲面仿真结果的翻转步态如图 19 所示。

从仿真结果看出,经过 CPG 网络学习的平面运动步态,可以将原本的平面步态转换成适应曲面的步态,同时也能通过调节振荡器频率来控制其在曲面上的运动速度。这一方式相比传统的多项式插值轨迹规划方法,能够提供更大的灵活性与适应性,尤其是在曲面上速度和运动轨迹的调节上。

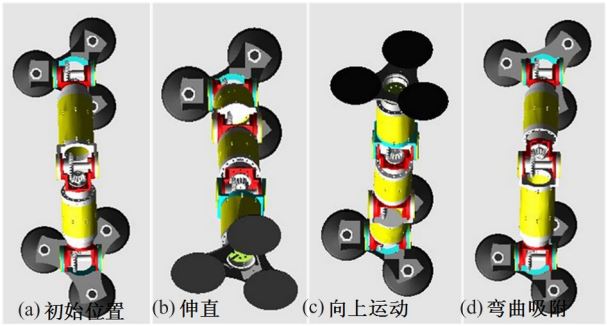


图 19　联合仿真中翻转步态运动仿真

4.2　机器人曲面攀爬实验

将机器人实验平台进行搭建，设计控制系统，其主要有上位机、电机驱动、双足吸盘系统和操纵杆组成，如图 20 所示。

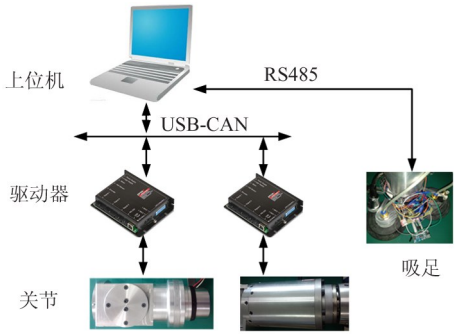


图 20　机器人控制系统

PC 机使用 VScode 编程环境开发，采用 Maxon 自带的 EPOS Command 函数库调用实现对驱动器控制。PC 机与机器人的各关节通信采用通用串行总线（universal serial bus，USB）转控制器局域网（controller area network，CAN）方式进行高效通信。各个机器人关节驱动器均包含位置环、速度环和电流环以确保机器人运动稳定性。

吸盘控制系统（如图 21）采用 STM32F103 作为主控芯片，吸足通信方式采用 RS485 总线与 PC 机通信，采集气路气压传感器和距离等数据，控制吸盘的吸附与释放。内置集成 STM32 控制吸盘动作和传感器数据采集，提升了机器人运动的精确性。基于真空泵和电磁阀的小型化设计，系统轻便高效，能满足复杂壁面作业需求。采用多层通信结构（USB 转 CAN 和 RS485），实现了对机器人运动和吸附状态的实时监控与调整。

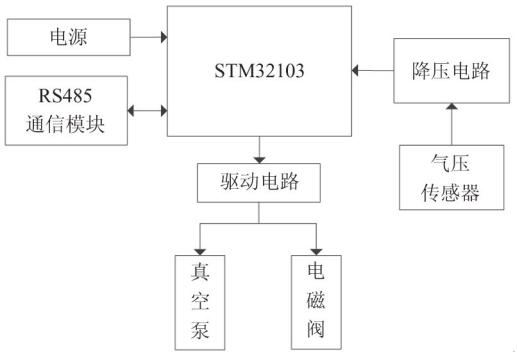


图 21　吸足控制系统结构

机器人在平面上作翻转步态运动的实验，如图 22所示。

机器人在曲面上作翻转步态运动的实验，如图 23所示。

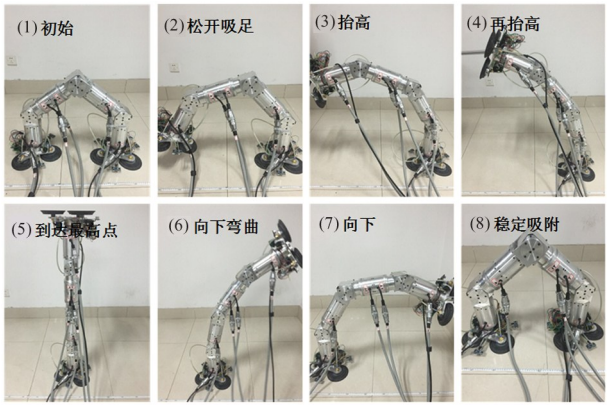


图 22　机器人平面翻转步态实验

图 23　机器人曲面翻转步态实验

通过图 22 和图 23 可看出，实验结果与仿真结果基本一致。通过 CPG 网络经过简单的学习和在

线调节参数,可快速将平面步态转换为曲面步态,从实验结果看出机器人能够适应不同运动工况,表明其结构合理和此运动规划方法的有效性。

5 结 论

本文结合尺蠖运动特性,研制了双足爬壁机器人在平面及曲面上的运动规划与控制方法,结论如下。

(1)分析了吸足吸盘的稳定吸附条件。

(2)根据机器人自身 3 个关节特性,构建了基于自适应频率 Hopf 振荡器的 CPG 网络构建。

(3)通过有监督的学习方法,使 CPG 网络能够适应复杂曲面变化,实现机器人在不同曲率的曲面上翻转步态的生成与运动控制。

(4)最后通过仿真和机器人在曲面爬行实验,得出机器人在平面与曲面运动间可平滑过渡的结论。验证了机构设计和步态规划方法的合理性与有效性,为爬壁机器人在复杂环境中的应用提供了理论和技术支持。

参考文献

[1] 李享, 李科, 张明路, 等. 风电塔筒用变曲率自适应爬壁机器人运动特性分析与磁吸附模块优化[J]. 工程设计学报, 2025,32(2):169 - 181.

[2] 李明昊, 杜楠. 智能机器人巡检油气管道异常状态激光点云定位预警方法[J]. 兵工自动化, 2025,44(2):100 - 105.

[3] Balaguer C, Gimenez A, Jardon A. Climbing robots' mobility for inspection and maintenance of 3D complex environments.[J]. Autonomous Robots, 2005,18(2):157 - 169.

[4] Gimenez A, Abderrahim M, Padron V M, et al. Adaptive control strategy of climbing robot for inspection applications in construction industry[C]// The 15th Triennial World Congress of the IFAC. Barcelona, Spain: IFAC, 2002:19 - 24.

[5] 张培锋,王洪光,房立金,等. 一种新型爬壁机器人机构及运动学研究[J]. 机器人, 2007,29(1):12 - 17.

[6] 梁云,宋捷,程浔,等. 磁吸式爬壁机器人研究现状和发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2024(5):11 - 15.

[7] 赵晨君. 基于仿生爪刺吸盘复合足的四足爬壁机器人研究[D]. 西安:西安理工大学, 2024.

[8] Zhang T, Hu Q, Li S, et al. A CPG-based framework for flexible locomotion control and propulsion performance evaluation of underwater undulating fin platform[J]. Ocean Engineering, 2023,288:116118.

[9] Arena E, Arean P, Patane L. CPG-based locomotion generation in a Drosophila inspired legged robot[C]// 2012 4th IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Rome, Italy: IEEE, 2012:1341 - 1346.

[10] Righetti L, Buchi J, Ijspeert A J. Dynamic hebbian learning in adaptive frequency oscillators[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2006,216(2):269 - 281.

[11] Righetti L, Buchi J, Ijspeert A J. From dynamic hebbian learning for oscillators to adaptive central pattern generators[C]// Proceedings of 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines. Tokyo, Japan: AMAM, 2005:1 - 7.

[12] RighettiI L, Ijspeert A J. Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control[C]// 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, USA: IEEE, 2006:1585 - 1590.

[13] Tavakoli M, Marques L. OmniClimber: an omnidirectional light weight climbing robot with flexibility to adapt to non-flat surfaces[C]// 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, 2012:280 - 285.

[14] Balaguer C, Gimenez A, Huete A J, et al. The MATS robot: service climbing robot for personal assistance[J]. Robotics and Automation Magazine, 2006,13(1):51 - 58.

[15] Fang Y, Wang S, Bi Q, et al. Design and technical development of wall-climbing robots: a review[J]. Journal of Bionic Engineering, 2022,19(4):877 - 901.

[16] Liu J, Xu L, Xu J, et al. Analysis and optimization of the wall-climbing robot with an adsorption system and adhesive belts[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020,17(3):1 - 14.

[17] Li X F, Shougat M R E U, Kennedy S, et al. A four-state adaptive Hopf oscillator[J]. PLoS one,2021,16(3):e0249131.

[18] Wei S X, Wu H, Liu L, et al. A CPG-based gait planning and motion performance analysis for quadruped robot[J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2022,49(4):779 - 797.

Curved surface gait planning and CPG network construction for an inchworm-inspired wall-climbing robot

Liu Haijun [*], Wang Guanghui [*], Wu Shanqiang [**], Zhou Kun [**], Zheng Xiaofei [**], Feng Weibo [**]

([*] Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 010300)

([**] College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018)

Abstract

To address the motion planning challenges of wall-climbing robots on complex curved surfaces, this study proposes a bio-inspired gait planning method based on an adaptive central pattern generator (CPG). Inspired by the locomotion of inchworms in nature, a five-degree-of-freedom bipedal wall-climbing robot is designed. First, the conditions for stable adhesion of the robot's bipedal suction cups are analyzed. A CPG network model for the robot's three joints is constructed by coupling multiple tunable Hopf oscillators using a supervised learning method. The CPG network parameters for curved-surface flipping are obtained by learning the joint angles, amplitudes, and other parameters of the robot's T-joint during planar flipping gaits. Online modifications are then applied to the joint angles and amplitudes mapped by the CPG network for curved-surface flipping to achieve gait planning. Subsequently, a simulation model is established using Matlab/Simulink and Adams to verify the robot's ability of adapting to flipping gaits on surfaces with varying curvatures. Finally, flipping gait experiments are conducted on real curved surfaces, with experimental results consistent with simulations. The findings demonstrate that after learning planar gaits, the CPG network can transform them into curved-surface gaits, validating the effectiveness of the online adaptive gait planning method based on CPG.

Key words: wall-climbing robots, central pattern generator network, gait analysis, motion planning, adsorption conditions