

# 仿尺蠖多模式爬壁机器人设计与控制方法研究

眭翔<sup>1,2,3</sup>, 徐林森<sup>4</sup>, 周瑞吉<sup>2,3</sup>, 刘进福<sup>5</sup>, 龙杰<sup>4</sup>

(1. 常州信息职业技术学院 常州市高端制造装备智能化技术重点实验室, 江苏 常州 213164;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230032; 3. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

4. 河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;

5. 常州工业职业技术学院 智能控制学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 对于高层建筑清洁、大型化工罐体焊接与检测以及管道、隧道等狭小空间的安全巡查, 传统方式为人工操作, 存在安全隐患及效率低下等缺点, 针对这些问题, 提出了一种爬壁机器人设计方案; 通过研究自然界尺蠖类生物的壁面攀爬机理, 结合仿生技术, 利用真空吸附和爪刺抓附两种附着技术, 研发了一种仿尺蠖多模式爬壁机器人; 首先在静态条件下, 采用 D-H 参数法建立了机器人运动学数学模型, 求解了机器人运动学的正、逆解, 然后进行了基于极坐标理论的机器人控制方法研究, 分析了步态控制策略, 并基于嵌入式控制器搭建了实际样机的控制系统, 进行了功能性测试, 验证了爬壁机器人的运动学模型的正确性和步态控制方法的平稳性, 为双足类仿生机器人进一步研究提供了参考。

**关键词:** 爬壁机器人; 尺蠖; 真空吸附; 爪刺抓附; 控制方法

## Research on Design and Control Method of a Multi-mode Inchworm-like Wall-climbing Robot

SUI Xiang<sup>1,2,3</sup>, XU Linsen<sup>4</sup>, ZHOU Ruiji<sup>2,3</sup>, LIU Jinfu<sup>5</sup>, LONG Jie<sup>4</sup>

(1. Changzhou City Lab of Intelligent Technology for Advanced Manufacturing Equipment,

Changzhou College of Information Technology, Changzhou 213164, China;

2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230032, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

5. School of Intelligent Control, Changzhou Vocational Institute of Industry Technology, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Aimed at the problems of the cleaning of high-rise buildings, welding and testing of large chemical tanks and safety inspection of narrow Spaces such as pipelines and tunnels, the traditional way is manual operation, which has the disadvantages of hidden dangers and low efficiency. To solve these problems, a design scheme of wall-climbing robot is proposed. By studying the wall-climbing mechanism of natural inchworm organisms and combining with the bionic technology, a multi-mode wall-climbing robot imitating inchworm is developed by using two technologies of vacuum adsorption and claw adhesion. Firstly, under static conditions, the mathematical model of the robot is established by using the D-H parameter method, and the forward and inverse solutions of robot kinematics are solved. And then the control method of the robot is studied based on the polar coordinate theory, and the gait control strategy is analyzed. The control system of the actual prototype is built based on the embedded controller, and the functional test is carried out. Experiments verify the correctness of the kinematics model of the wall-climbing robot and the smoothness of the gait control method, which provides a reference for the further research of the bipedal bionic robots.

**Keywords:** wall-climbing robot; inchworm; vacuum adsorption; claw adhesion; control method

## 0 引言

目前对于高层建筑清洁与检测、大型化工罐体焊接与检测、管道和隧道等狭小空间安全巡检等场合, 传统条件

下一般由人工来完成, 有时在一些恶劣、狭小环境人工操作也很困难, 不仅效率低下, 而且经常发生安全事故, 每年因为检测不到位或意外事故产生了大量的损失, 因此爬壁机器人成为机器人研究领域的热门课题, 众多国内外

收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2022-07-25。

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(B220201025); 江苏省高等学校自然科学面上项目(21KJB460030); 江苏省前沿引领技术基础研究专项项目(BK20192004); 江苏高校青蓝工程优秀教学团队资助项目; 常州市重点研发计划项目(CJ20210040); 常州信息职业技术学院 2018 年度校级科研平台(KYPT201801G)。

作者简介: 眭翔(1989-), 男, 江苏常州人, 博士研究生, 讲师, 主要从事传感器与机器人技术方向的研究。

通讯作者: 徐林森(1981-), 男, 江苏靖江人, 博士, 教授, 主要从事智能机器人及机械系统设计方向的研究。

引用格式: 眭翔, 徐林森, 周瑞吉, 等. 仿尺蠖多模式爬壁机器人设计与控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 155-161.

学者对爬壁机器人进行了相关研究。在文献 [1] 中, 国内哈尔滨工业大学学者研究了多种结构的爬壁机器人, 但是主要是以导磁性材料为核心, 只能适应导磁性壁面。文献 [2] 中广东工业大学学者研发了一种双足爬壁机器人 W-Climb, 属于足式机器人, 运动能力较为灵活, 但是爬行方式单一, 只能吸盘吸附行走。国外学者研究更早, 文献 [3] 中斯坦福大学研究者采用金属钩刺设计了一种可以依附于墙面的仿生装置, 质量很轻, 负载能力偏弱。文献 [4] 中以色列学者结合足式机器人及螳螂足底附着机理, 设计了四足式仿生机器人, 仅依靠贴合悬挂的方式附着与墙面。上述研究表明, 目前国内外爬壁机器人的研究虽然已经有些成果, 但是仍处于功能单一、结构简单的状态, 缺乏一定的可靠性, 存在较大的优化空间。

尺蠖结构简单、体型小巧、运动迅速, 本研究基于自然界尺蠖类生物的壁面攀爬机理<sup>[5-7]</sup>, 结合仿生技术, 研发了一种仿尺蠖多模式爬壁机器人, 该机器人属于一种仿生多连杆关节机器人, 其关节采用具有扭矩控制功能的伺服电机。结合实际应用场景, 构建了运动学模型, 对机器人采用进行基于关节扭矩的力控方式, 探索了基于极坐标理论的机器人步态控制方法, 并在实际样机平台进行了测试, 验证了爬壁机器人的运动学模型的正确性和步态控制方法的平稳性。

### 1 仿尺蠖多模式爬壁机器人设计

尺蠖是一种节肢类生物, 在附着时它可以利用头部和尾部的微小倒刺结构实现对物体表面的抓附, 在运动时身体通过不断的伸展和收缩来实现前进和后退, 结合尺蠖的运动规律<sup>[8]</sup>, 简化其运动模式, 本研究设计了多模式的仿尺蠖爬壁机器人。

仿尺蠖爬壁机器人虚拟样机如图 1 所示, 尺蠖机器人是一种多连杆的双足机器人, 为了增加其负载能力, 没有选择一些学者经常采用的软体材料或者记忆合金材料<sup>[9-10]</sup>, 而采用在两个足部之间由一个三自由度机械臂连接的方案。每条大臂长 10 cm, 总长 75 cm, 采用铝合金制作, 在机械臂上安装了 3 个配有高精度绝对编码器的伺服电机, 每个电机扭矩 20 N·m, 通过 CAN 协议实现精确的位置和扭矩控制。

仿尺蠖爬壁机器人可以实现多模式运动, 其中攀爬模式是重要功能, 为了实现附着功能, 爬壁机器人足部设计了两种附着机构<sup>[11-12]</sup>, 分别是真空负压吸附和仿生爪刺抓附两个功能模块。真空负压吸附模块在每个足部安装了两个真空吸盘, 通过真空泵抽真空来提供附着力。仿生爪刺附着装置由两对爪刺模组构成, 如图 2 所示, 爪刺模组安装在足底部, 每只足包含一对爪刺模块, 每一个模块由多个爪刺足片组成, 每对爪刺模块的抓附由通过安装在底部的高扭矩舵机控制, 舵机可以针对不同的壁面控制张合的大小, 以此实现抓附力度的控制。通过这两个吸附装置的配合, 可以实现在平整表面和粗糙壁面等多种环境下的有

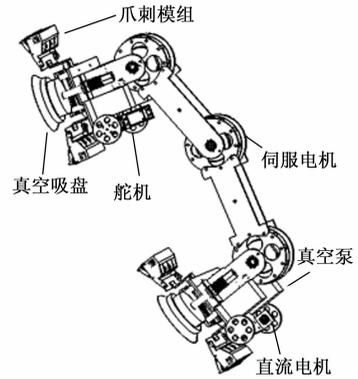


图 1 仿尺蠖多模式爬壁机器人虚拟样机

效吸附。

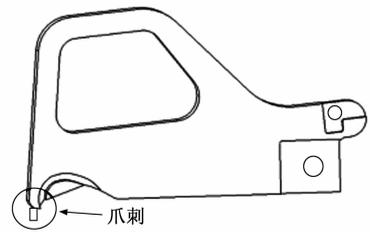


图 2 爪刺足片

爬壁机器人除了可以利用两种附着装置实现多种壁面的攀爬, 同时为了解决水平面到垂直壁面过渡的问题, 机器人安装了四个直流电机, 可以在地面上行走, 提高了机器人多种类型壁面的适应性, 实现了多模式的运动功能。

### 2 仿尺蠖多模式爬壁机器人运动学建模

#### 2.1 多模式爬壁机器人坐标系

当机器人做爬壁运动时, 通过两足的不断交替吸附以实现循环攀附, 同时身体关节不断伸展和收缩以实现上下运动<sup>[13]</sup>。对于这两种运动, 建立如图 3 所示的坐标系, 图中以攀爬时伸展姿态建立坐标系。机器人的一只足命名为  $O_A$ , 与墙面保持固定的  $O_A$  为基座标, 此处简化模型, 选择以机器人三个关节分别命名为  $O_{A0}$ ,  $O_{A1}$ ,  $O_{A2}$ , 四个连杆的长度分别为  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ 。定义连杆  $L_0$  为机器人的基座标系  $\{0\}$ , 关节  $O_{A0}$  为坐标系  $\{1\}$ , 关节  $O_{A1}$  为坐标系  $\{2\}$ , 关节  $O_{A2}$  为坐标系  $\{3\}$ 。

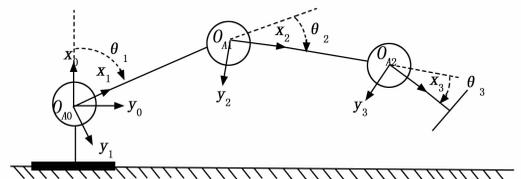


图 3 多模式爬壁机器人坐标系

#### 2.2 多模式爬壁机器人运动学正解

本研究采用 D-H 参数法建立机器人运动学模型<sup>[14-15]</sup>, 如表 1 所示, 定义各个关节轴心线为  $i$ , 表中  $\alpha_{i-1}$  为轴心线  $i$

-1 与轴心线  $i$  的夹角,  $\alpha_{i-1}$  为轴心线  $i-1$  与轴心线  $i$  的距离, 即为连杆的长度,  $\theta_i$  是指各个关节的角度,  $d_i$  则表示为轴心线  $i-1$  与轴心线  $i$  的垂直距离, 对于相互平行的轴心线来说, 该值一般为 0。

表 1 仿尺蠖多模式爬壁机器人 D-H 参数表

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$\theta_i$	$d_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	0	$L_1$	$\theta_2$	0
3	0	$L_2$	$\theta_3$	0

将坐标系  $\{i\}$  经过变换使其与  $\{i-1\}$  重合, 则坐标系  $\{i\}$  到坐标系  $\{i-1\}$  的变换矩阵为:

$${}_{i-1}^{i-1}\mathbf{T} = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1})\text{Trans}(\alpha_{i-1}, 0, 0)\text{Rot}(z, \theta_i)\text{Trans}(0, 0, d_i)$$

即:

$${}_{i-1}^{i-1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s_i c_{\alpha_{i-1}} & c_i c_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} & -s_{\alpha_{i-1}} d_i \\ s_i s_{\alpha_{i-1}} & c_i s_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} & c_{\alpha_{i-1}} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $c_i$  表示的是  $\cos(\theta_i)$ ,  $s_i$  则表示  $\sin(\theta_i)$ , 以及下文出现的  $c_{ij}$  和  $s_{ij}$  分别为  $\cos(\theta_i + \theta_j)$  和  $\sin(\theta_i + \theta_j)$ 。

当  $i$  分别为 1、2、3 时, 得到连杆  $i$  相对于基坐标的变换阵如下:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^0_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^0_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将以上矩阵依次相乘, 得到机器人末端位姿在笛卡尔坐标系中的矩阵:

$${}^0_3\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}_1 {}^1_2\mathbf{T}_2 {}^2_3\mathbf{T}_3 \mathbf{T} \quad (5)$$

将式 (2) ~ (4) 代入式 (5) 中获得末端关节坐标系  $O_{A2}$  在基坐标系  $O_{A0}$  中的位姿描述矩阵:

$${}^0_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_1 c_1 + L_2 c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_1 s_1 + L_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\theta & 0 & p_x \\ s_\theta & c_\theta & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $c_{ijk}$  和  $s_{ijk}$  分别表示  $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$  和  $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ,  $(p_x, p_y, p_z)$  为机器人末端关节坐标系在笛卡尔空间下的坐标位置,  $\theta$  爬壁机器人末端执行器的姿态。

### 2.3 多模式爬壁机器人运动学逆解

在仿尺蠖爬壁机器人实际应用中, 经常需要运动到目标位置, 即需要将已知的笛卡尔空间坐标转换成关节空间位置, 该机器人的运动学逆解方法如下<sup>[16-17]</sup>, 首先建立运动学方程组:

$$\begin{cases} p_x = L_1 c_1 + L_2 c_{12} \\ p_y = L_1 s_1 + L_2 s_{12} \\ p_z = 0 \\ c_\theta = c_{123} \\ s_\theta = s_{123} \end{cases} \quad (7)$$

对式 (7) 中的式 (1) 和 (2) 左右平方和相加得:

$$p_x^2 + p_y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 c_2 \quad (8)$$

以此分别求得:

$$\cos(\theta_2) = \frac{p_x^2 + p_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \quad (9)$$

$$\sin(\theta_2) = \pm \sqrt{1 - \cos^2(\theta_2)} \quad (10)$$

由双变量正反切公式计算得到:

$$\theta_2 = \text{Atan2}(\sin(\theta_2), \cos(\theta_2)) \quad (11)$$

由机械结构限制和约束条件得到唯一解:

$$\theta_2 = \text{Atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(\theta_2)}, \cos(\theta_2)) \quad (12)$$

结合式 (7) 和 (12) 可以解算出  $\theta_1$  的值。为此改写式 (7) 为:

$$\begin{cases} p_x = k_1 c_1 - k_2 s_1 \\ p_y = k_1 s_1 + k_2 c_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中,

$$\begin{cases} k_1 = L_1 + L_2 c_2 \\ k_2 = L_2 s_2 \end{cases} \quad (14)$$

假设:

$$\delta = + \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (15)$$

$$\gamma = \text{Atan2}(k_2, k_1) \quad (16)$$

则有:

$$\begin{cases} k_1 = \delta \cos(\gamma) \\ k_2 = \delta \sin(\gamma) \end{cases} \quad (17)$$

代入式 (13) 得:

$$\begin{cases} \frac{p_x}{\delta} = \cos(\gamma) \cos(\theta_1) - \sin(\gamma) \sin(\theta_1) \\ \frac{p_y}{\delta} = \cos(\gamma) \sin(\theta_1) - \sin(\gamma) \cos(\theta_1) \end{cases} \quad (18)$$

因此可以得到:

$$\begin{cases} \cos(\gamma + \theta_1) = \frac{p_x}{\delta} \\ \sin(\gamma + \theta_1) = \frac{p_y}{\delta} \end{cases} \quad (19)$$

故:

$$\gamma + \theta_1 = \text{Atan2}\left(\frac{p_y}{\delta}, \frac{p_x}{\delta}\right) = \text{Atan2}(p_y, p_x) \quad (20)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) - \text{Atan2}(k_2, k_1) \quad (21)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \text{Atan2}(s_\theta, c_\theta) \quad (22)$$

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2 \quad (23)$$

综上可得运动学逆解方程如下：

$$\begin{cases} \theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) - \text{Atan2}(k_2, k_1) \\ \theta_2 = \text{Atan2}(W, Q) \\ \theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2 \end{cases} \quad (24)$$

其中：
$$W = \sqrt{1 - \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right)^2}$$
$$Q = \frac{p_x^2 + p_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}$$

获得爬壁机器人运动学逆解后，可以根据笛卡尔坐标系空间位置解算爬壁机器人各关节角度信息，通过控制器及编码器数值可以进行角度闭环控制，从而实现爬壁机器人的灵活运动。

### 3 仿尺蠖多模式爬壁机器人步态控制

仿尺蠖多模式爬壁机器人可以实现地面—壁面过渡、壁面攀爬、壁面—天花板过渡三种状态的运动<sup>[18]</sup>，其中壁面攀爬为重要功能，本文重点分析。尺蠖通过不断循环完成躯体的伸展姿态和收缩姿态，实现上下运动，同时双足配合在墙壁上交替抓附来完成自身的吸附脱附等动作。参考自然界尺蠖生物的攀爬原理和运动机理来设计一种高效稳定的步态控制方案，本文将这种步态称为尺蠖步态，需要控制 3 个关节实现爬壁机器人的尺蠖步态控制。仿尺蠖爬壁机器人攀爬状态如图 4 所示，机器人在攀爬过程中有伸展、收缩、驻留 3 种姿态。

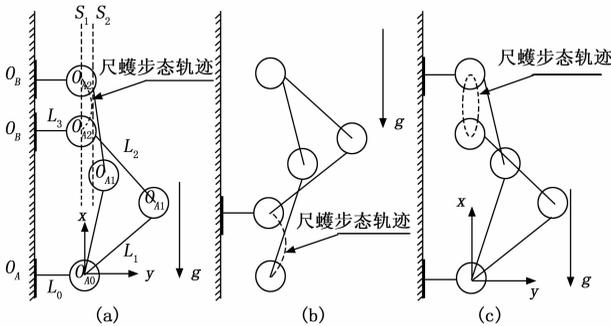


图 4 仿尺蠖多模式爬壁机器人攀爬运动模式

当机器人双足吸附在墙面时，即为驻留状态，两只脚都依靠真空吸盘吸附，当准备向上攀爬时，机器人首先脱附上足  $O_B$ ，机器人通过三个伺服电机协同工作，使机器人运动到伸展状态，并且保持足底与墙面保持平行且留有安全距离，避免发生碰撞。如图 4 (a) 所示，当机器人从初始状态向上达到伸展状态时，机器人的关节  $O_{A2}$  的具体运动路径如图中的虚线所示，且过程中避免角度过大，导致机器人发生后仰倾覆，即虚线  $S_1$  和  $S_2$  间距最小。当完成伸展动作后，爬壁机器人下足需要进行收缩运动，如图 4 (b) 所示，其下足进行向上运动，虚线为机器人下足的关节运动轨迹，完成后双足吸附在墙面，进行驻留，机器人不停实现伸展—收缩—驻留循环动作就可以实现攀爬运动。

从图 4 (c) 中可以看出上足关节  $O_{A2}$  的运动轨迹如图中虚线，为一个类似右边半个椭圆的轨迹。基于这个半椭圆，补足另外半个椭圆，并以此轨迹进行建模<sup>[19]</sup>。本文采用基于极坐标理论的尺蠖步态轨迹规划方法，首先时间信号  $t$  为基础，建立两个极坐标方程，分别对应笛卡尔空间下的  $X$  轴和  $Y$  轴的轨迹信息。具体的数学模型如式 (25) 所示：

$$\begin{cases} X = X_a + X_R * \cos\left(\frac{\pi}{T} * t\right) \\ Y = Y_a + Y_R * \sin\left(\frac{\pi}{T} * t\right) \end{cases} \quad (25)$$

式中， $X$  和  $Y$  分别代表机器人末端连杆坐标系在笛卡尔空间下的坐标位置，即为  $(X, Y)$ 。 $X_a$  和  $Y_a$  为机器人末端连杆坐标系的初始位置相对于基坐标系的初始位置偏移量， $X_R$  与  $Y_R$  则为尺蠖步态轨迹在笛卡尔坐标系下在  $X$  轴与  $Y$  轴上的振幅，调节  $X_R$  可以改变调整机器人的运动步长，调节  $Y_R$  能够调整机器人与墙面的最远距离，但是该参数的设置不宜过大，否则机器人会出现后仰倾覆的问题。 $t$  为实时时间信号， $T$  是一个正增益系数，该系数可以直接影响到机器人的运行速度。

为了对模型进行分析，实验设置了三组参数来进行相互对比验证，各个参数设置如式所示：

$$\begin{cases} X_a = 2, Y_a = 2, X_R = 1, Y_R = 0.5, T = 2 \\ X_a = 3, Y_a = 3, X_R = 2, Y_R = 1, T = 3 \\ X_a = 5, Y_a = 5, X_R = 3, Y_R = 1.5, T = 4 \end{cases} \quad (26)$$

在上述仿真平台中进行实验仿真，得到如图 5 所示的三组数据，三个图分别表示以上三组数据下机器人末端连杆坐标系在笛卡尔空间下的运动轨迹，从图 (a)、(c)、(e) 中可以看出伴随着  $X_a$  和  $Y_a$  的逐渐增大，其椭圆形轨迹的  $X$  轴和  $Y$  轴的亦随之增大。其中  $X$  轴的数据变化范围分别是 (1, 3), (1, 5), (2, 8),  $Y$  轴的数据变化范围分别是 (1.5, 2.5), (2, 4), (3.5, 6.5)，并且  $X$  轴的数据跨度为  $X_R$  的 2 倍， $Y$  轴的数据跨度为  $Y_R$  的 2 倍。故机器人的运动步长和运动幅度可以由  $X_a$  和  $Y_a$  的值进行调整。

从图 5 (b)、(d)、(f) 中的曲线可以得到，随着增益系数  $T$  的不断增大，曲线在单位时间内的振动频率明显逐渐减小，即在相同的时间内， $T$  值越大，末端连杆坐标系在笛卡尔空间坐标系下完成的椭圆轨迹数量就会相应减少，也就是  $T$  值越小机器人运行速度越快， $T$  值越大运行速度越慢。由此实验验证可知，该基于极坐标的仿尺蠖爬壁机器人的步态控制方法是有效的。

## 4 仿尺蠖多模式爬壁机器人控制系统设计与实验

### 4.1 多模式爬壁机器人控制系统硬件设计

完成仿尺蠖爬壁机器人的运动学建模、步态规划仿真后，基于这些数据，对于仿尺蠖多模式爬壁机器人的控制系统，设计了上、下位机两个部分。上位机部分采用基于 Android 平台的手持式终端设计，下位机部分采用基于 STM32F407 嵌入式控制器的主控系统。

上位机手持终端的设计如图 6 所示，终端采用无线图

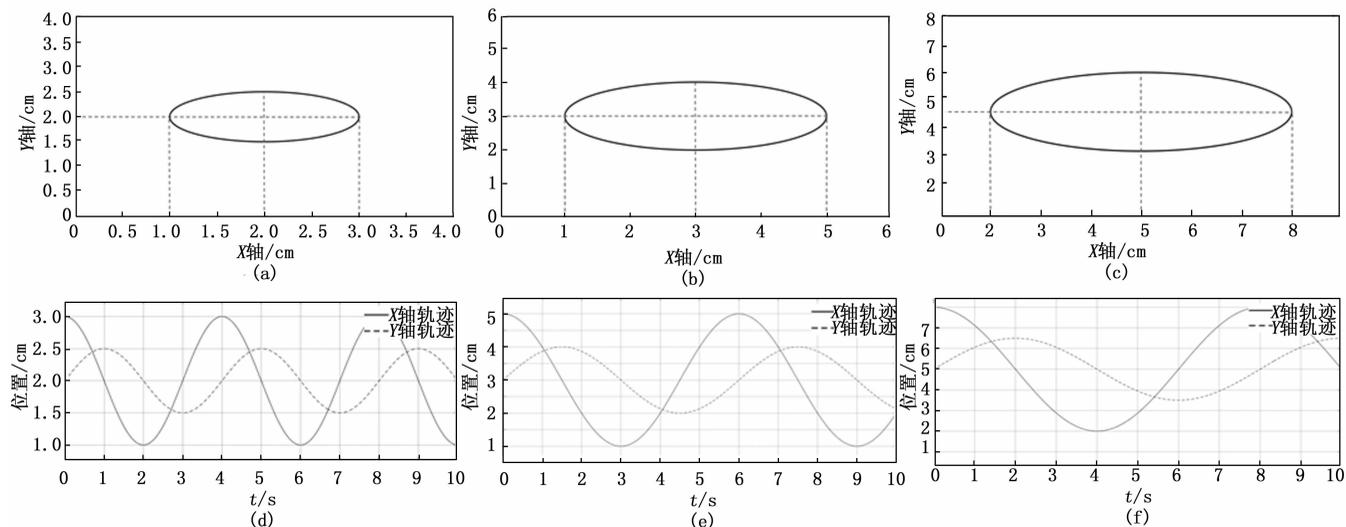


图 5 步态轨迹规划仿真实验数据图

数传输模块接收下位机传输的视频信息和控制信息, 底层控制芯片采用 STM32F103 控制器采集摇杆和按钮的信号, 同时接收下位机上传的电机、传感器等反馈信号, 最后将采集的控制数据打包传输给 Android 平台。上位机主监控平台采用 Android 平台, 屏幕上设计监控区和设置区, 其中监控区显示爬壁机器人的现场视觉监控画面及监控的电压、电流、压力、速度和角度等参数, 设置区提供信道选择、工作模式、电机参数等设置, 后台处理程序同时把这些控制数据下发给机器人。

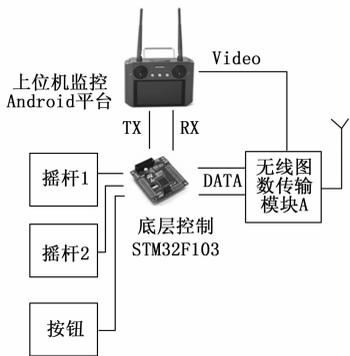


图 6 上位机手持终端

爬壁机器人控制系统结构如图 7 所示, 主控采用 STM32F407 控制器, 外接伺服电机、舵机、真空泵控制模组、直流电机和无线图数传输模块。主控器首先接收上位机手持终端通过无线图数传输模块下发的配置参数, 写入存储器后, 启动主程序。其中主控通过 CAN 总线控制 3 个关节, 关节为驱控一体结构, 同时带扭矩控制的伺服电机, 可以提供  $24 \text{ N} \cdot \text{m}$  的扭矩。

吸附装置采用真空泵和电磁气阀组合控制实现吸附和脱附功能<sup>[20-22]</sup>, 当需要吸附时真空泵打开进行吸附, 控制器可以通过压力传感器检测吸附效果, 当需要脱附时, 控

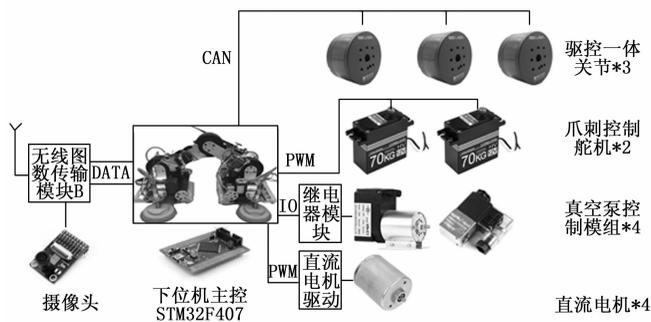


图 7 下位机控制系统

制器一边控制真空泵继电器失电停止抽真空, 同时为了加快脱附, 另一边通过控制加装的电磁气阀得电加快放气。爪刺模组的控制, 通过两个舵机来控制两个足端的爪刺的张合, 在两足吸附后, 通过控制爪刺的收缩量来控制抓附的力度, 从而增强吸附能力, 提高了多种粗糙度壁面的适应能力。机器人同时可以在平面到壁面的过渡进行行走, 其通过主控驱动直流电机以实现, 这个行走功能增加了机器人的运动模式, 适应仿尺蠖多模式爬壁机器人的各种运动场景。

### 4.2 多模式爬壁机器人控制系统软件设计

完成控制系统硬件设计后, 需要进行机器人控制软件设计<sup>[23-25]</sup>, 仿尺蠖多模式爬壁机器人软件控制程序流程图如图 8 所示, 左侧为下位机主控程序结构, 右侧为上位机监控端程序结构。首先上位机监控端主要是视频显示和收发控制数据, 与下位机通过通信关键帧来判断连通状态, 及时发现通信故障并显示故障代码。下位机主控通过上位机下发通信状态关键帧来判断通信链路状态, 系统启动后首先进行姿态复位操作, 初始化机器人初始位置, 记录编码器初始值。反馈复位状态, 等待监控终端指令, 当接收到终端指令后, 根据控制参数, 启动对应的运动模式。不同

的运动模式对应不同的步态轨迹算法，算法相应的控制机器人各个关节运动姿态，主控制器实时将关节伺服电机的如电压、电流、位置、角度和扭矩等信息上传到算法模块进行实时动态调整，同时主控也监测关节数据以及控制系统电压、电流、真空压力等信息，如果发现异常及时报警。

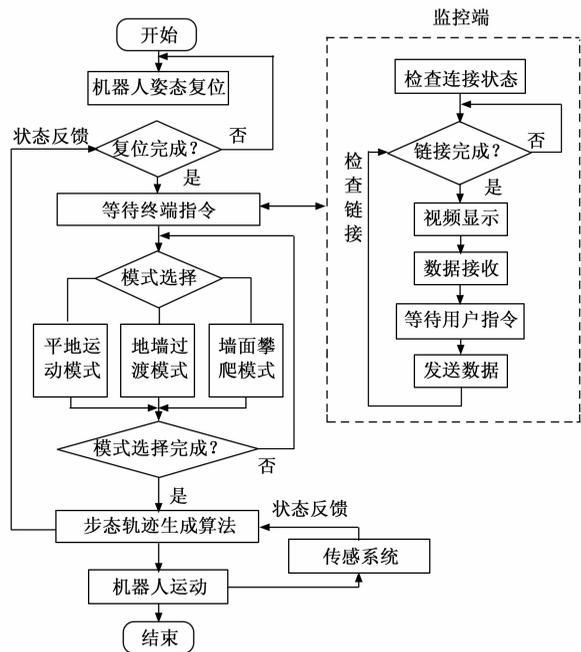


图 8 控制系统软件程序流程图

### 4.3 多模式爬壁机器人攀爬实验

根据以上仿尺蠖多模式爬壁机器人控制系统搭建，结合步态规划仿真数据，进行了机器人攀爬实验。仿尺蠖多模式爬壁机器人自重约 9 kg，总长约 75 cm，仿尺蠖爬壁机器人攀爬实验如图 9 所示。



图 9 攀爬实验

首先机器人根据箭头方向以直线姿态前进到目标墙壁，通过前足的吸附及爪刺收缩实现固定，之后开始地墙过渡动作，上位机发出过渡指令后，下位机主控根据指令运行过渡程序，控制 3 个关节实现翻转，机器人从直线状态转换到爬壁状态，之后后足进行吸附固定，整个过程耗时 1.5 s。之后机器人双足吸附在壁面，进行向上攀爬，经过测试，机器人设置路程 1 000 mm，负载 2 kg 时，速度可达 90 mm/s，实验验证了多模式爬壁机器人攀爬功能的可靠性，但是由于机器人吸附和脱附比较耗时间，所以机器人整体目前速度不是太快，后期可以进一步优化步态算法。

同时采集的关节 3 的轨迹角度误差数据如图 10 所示，

在负载测试情况下，关节 3 轨迹误差在短暂振荡超调后，于 0.24 s 左右进入稳定状态，实验证明机器人在运动过程中具有良好的稳定性，实现了各项预设目标。

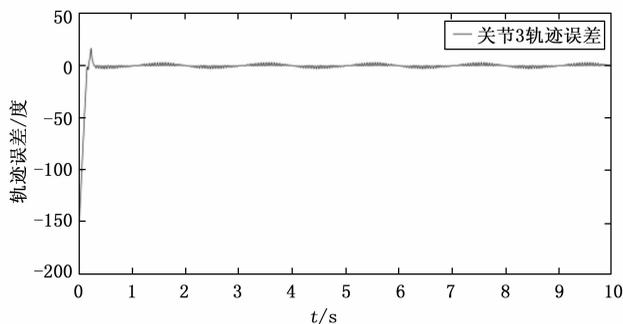


图 10 关节轨迹误差图

## 5 结束语

本文结合自然界尺蠖类生物的壁面攀爬机理，利用仿生爬壁技术，研发了一种仿尺蠖多模式爬壁机器人，机器人设计了真空吸附和爪刺抓附两种吸附装置，并建立了机器人运动学模型，进行了正、逆运动学求解。同时研究了基于极坐标理论的机器人步态控制方法，并通过地墙过渡和壁面攀爬测试，实验表明该设计可以完成爬壁机器人的地墙状态切换，并且壁面攀爬速度可达 90 mm/s，运行过程稳定，具有良好的抗倾覆能力。本文研究的仿尺蠖多模式爬壁机器人建模与控制方法为双足类仿生机器人进一步研究提供了参考。

### 参考文献:

- [1] GUAN Y, ZHU H, WU W, et al. A modular biped wall-climbing robot with high mobility and manipulating function [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 18 (6): 1787 - 1798.
- [2] 张联盟, 管胎生, 朱海飞, 等. 双足爬壁机器人吸附模块位姿的检测 [J]. 机器人, 2012, 34 (6): 758 - 763.
- [3] ROCHAT F, SCHOENEICH P, BONANI M, et al. Design of magnetic switchable device (MSD) and applications in climbing robot [M]. Emerging Trends in Mobile Robotics, 2010: 375 - 382.
- [4] ASBECK A T, KIM S, CUTKOSKY M R, et al. Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays [J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25 (12): 1165 - 1179.
- [5] 金英连, 任杰, 冯伟博, 等. 仿尺蠖机器人曲面爬行步态分析与中枢模式发生器规划 [J]. 兵工学报, 2016, 37 (6): 1104 - 1110.
- [6] CAO J, LIANG W, WANG Y, et al. Control of a soft inchworm robot with environment adaptation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67 (5): 3809 - 3818.
- [7] UENO S, TAKEMURA K, YOKOTA S, et al. Micro inchworm robot using electro-conjugate fluid [J]. Sensors and Ac-

- tuators A; Physical, 2014, 216: 36-42.
- [8] LEE K, KIM Y, PAIK J K, et al. Clawed miniature inchworm robot driven by electromagnetic oscillatory actuator [J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12 (4): 519-526.
- [9] ROY R G, GHOSHAL D. Grey wolf optimization-based second order sliding mode control for inchworm robot [J]. Robotica, 2020, 38 (9): 1539-1557.
- [10] 张力文, 徐齐平, 刘锦阳. 软体尺蠖爬行机器人建模与仿真分析 [J]. 上海交通大学学报, 2021, 55 (2): 149-160.
- [11] LIU J, XU L, CHEN S, et al. Development of a bio-inspired wall-climbing robot composed of spine wheels, adhesive belts and eddy suction cup [J]. Robotica, 2021, 39 (1): 3-22.
- [12] 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 [J]. 机器人, 2019, 41 (4): 526-533.
- [13] 胡俊峰, 林茂虎, 王文慧. 微型仿尺蠖软体机器人的设计与实验 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (8): 106-109.
- [14] 于丰博, 杨惠忠, 卿兆波. 基于 D-H 参数法的二自由度并联机械手逆运动学求解 [J]. 制造业自动化, 2015, 37 (22): 10-13.
- [15] 戴 楨, 刘卫东, 徐景明, 等. 基于高阶多项式的爬游机器人足端轨迹规划 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 159-164.
- [16] ROY R G, GHOSHAL D. Grey wolf optimization-based second order sliding mode control for inchworm robot [J]. Robotica, 2020, 38 (9): 1539-1557.
- [17] 李 琳, 薛泽浩, 蔡 蒂, 等. 管道内壁四足爬壁机器人的运动学与步态规划 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2021, 55 (12): 2286-2297.
- [18] 江 励, 管贻生, 蔡传武, 等. 仿生攀爬机器人的步态分析 [J]. 机械工程学报, 2010 (15): 17-22.
- [19] 李 莹, 申丽芳. 基于大数据聚类的机器人步态控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 95-99.
- [20] 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): 1729881420926409.
- [21] ROSA G L, MESSINA M, MUSCATO G, et al. A low-cost lightweight climbing robot for the inspection of vertical surfaces [J]. Mechatronics, 2002, 12 (1): 71-96.
- [22] HILLENBRAND C, SCHMIDT D, BERNS K. CROMSCI: development of a climbing robot with negative pressure adhesion for inspections [J]. Industrial Robot, 2008, 35 (3): 228-237.
- [23] VO-GIA, LOC, et al. Sensing and gait planning of quadruped walking and climbing robot for traversing in complex environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58 (5): 666-675.
- [24] KWON Y S. Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28 (3): 681-696.
- [25] ZHAO Z, TAO Y, WANG J, et al. The multi-objective optimization design for the magnetic adsorption unit of wall-climbing robot [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36 (1): 305-316.
- \*\*\*  
(上接第 154 页)
- [3] 凌翼飞. 基于多传感器信息融合的车辆检测与定位技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [4] 吴佳骏. 面向自动驾驶的视觉与毫米波雷达融合感知定位方法研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [5] 罗 道, 姚 远, 张金换. 一种毫米波雷达和摄像头联合标定方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2014, 54 (3): 289-293.
- [6] 周文鹏, 路 林, 王建国. 多传感器信息融合在无人驾驶中的研究综述 [J]. 汽车文摘, 2022 (1): 45-51.
- [7] 陈 鹏, 徐 梅, 周传树, 等. 客车 OTA 实施及其整车 CAN 通信设计 [J]. 汽车电器, 2022 (3): 4-6.
- [8] 陈睿智. 基于 UDS 协议的汽车电控单元故障诊断服务设计与实现 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [9] 马天才, 许建森. 基于 AUTOSAR 标准的 UDS 诊断通信 [J]. 机电一体化, 2020, 26 (5): 34-40.
- [10] 徐 希, 戈小中, 童晓辉, 等. 纯电动客车 CAN 通信上位机设计与应用 [J]. 客车技术与研究, 2021, 43 (3): 47-50.
- [11] 孙 瑶, 王小妮, 刘 鹏, 等. 一种汽车 CAN 总线节点认证与加密通信机制 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (9): 6-11.
- [12] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [13] DATTA A, KIM J S, KANADE T. Accurate camera calibration using iterative refinement of control points [C] // IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, IEEE, 2014.
- [14] SHEN Y J, et al. Quasi-eccentricity error modeling and compensation in vision metrology [J]. Measurement Science & Technology, 2018, 29 (4): 045006-1-045006-9.
- [15] 贾洪涛, 朱元昌. 摄像机图像畸变纠正技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19 (3): 46-49.
- [16] 张宏峰, 倪受东, 赵 亮, 等. 基于麻雀搜索算法的摄像机标定优化方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (22): 384-390.
- [17] 牛萍娟, 刘 雷. 基于神经网络的毫米波雷达与视觉传感器联合标定方法 [J]. 天津工业大学学报, 2019, 38 (5): 64-69.
- [18] 田小超, 李忠科. 双平面法标定的双目视觉三维测量系统 [J]. 电光与控制, 2015, 22 (3): 54-57, 96.
- [19] 裴 乐, 王爱春, 黄少堂, 等. 一种车载前向毫米波雷达下线校准方法 [J]. 汽车电器, 2021 (5): 4-6.
- [20] 汤天殷, 高旭峰, 王天军, 等. 基于信息融合的驾驶辅助模块标定集成工位开发 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46 (24): 34-37.