

DOI: 10.11992/tis.201611016

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20170317.1937.012.html>

仿尺蠖爬壁机器人自适应吸附及摇杆控制

高国庆, 王涛, 王斌锐

(中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 为了解决真空吸附爬壁机器人爬行时, 需要吸盘和壁面紧密贴合, 不易操控的问题。建立了吸盘足至壁面的空间几何模型; 基于 D-H 参数, 建立了运动学模型, 根据速度运动学逆解, 设计了一种用于对称机构爬壁机器人的摇杆操作方法, 将摇杆轴映射为关节速度闭环; 根据位置运动学逆解, 设计了自适应吸附动作, 吸盘足与壁面距离小于设定阈值时, 自动触发自适应吸附动作; 搭建了机器人控制系统和自适应吸附装置, 在水平壁面上进行爬行实验, 验证了该方法可减小操控难度。

关键词: 仿尺蠖爬壁机器人; 真空吸附; 摇杆操作; 建模

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)02-0208-06

中文引用格式: 高国庆, 王涛, 王斌锐. 仿尺蠖爬壁机器人自适应吸附及摇杆控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(2): 208-213.

英文引用格式: GAO Guoqing, WANG Tao, WANG Binrui. Adaptive adsorption and joystick control of an inchworm wall-climbing robot[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(2): 208-213.

Adaptive adsorption and joystick control of an inchworm wall-climbing robot

GAO Guoqing, WANG Tao, WANG Binrui

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

Abstract: When a vacuum-adsorbed wall-climbing robot crawls, it is necessary for the acetabulum to closely attach onto a wall surface, and this is not easy to manipulate. To solve this problem a space geometry model on the acetabulum foot and wall surface was developed, and a kinematics model was established on the basis of the D-H parameters. A rocker control method was designed for the wall-climbing robot with symmetric structure according to the inverse kinematics for speed. The rocker shaft was mapped as the joint velocity loop, and the adaptive adsorption action was designed according to the inverse kinematics for location. When the distance between the acetabulum foot and the wall surface was less than the set threshold, the adaptive adsorption action was triggered automatically. The robot control system and adaptive adsorption device were built, and a crawling experiment that was carried out on the horizontal wall surface revealed that the method could reduce the difficulty of manipulation.

Keywords: inchworm wall-climbing robot; vacuum adsorption; rocker control; modeling

爬壁机器人的吸附方式中真空吸附应用普遍。真空吸附主要包括真空泵和吸盘。真空泵不断从吸盘腔中抽气, 使吸盘腔内达到一定真空度, 在大气压和摩擦力作用下, 机器人不会倾覆^[1]。为了使吸盘和壁面紧密贴合, 必须使吸盘平面和目标壁面平行, 且两个平面间距足够小。足式真空吸附爬壁机器人通过接触传感器来感知吸盘和壁面的接触情

况。美国密歇根州立大学研发的爬壁机器人 Flipper 和 Crawler^[2]、中国科学院沈阳自动化研究所研发的机器人^[3-4]均采用单吸盘结构, 在每个吸盘足安装了 2 个接触传感器, 通过试探性地微调足端来使吸盘和壁面贴合, 吸附动作缓慢; 文献[5-6]采用吸盘组作为机器人的吸足, 对吸盘与壁面的相对姿态要求更高; 文献[7]爬壁机器人吸盘底部装有 8 个红外传感器组成的圆形阵列, 用来判断吸盘和壁面的平行度, 吸盘两侧装有光纤触觉传感器, 用来感知

收稿日期: 2016-11-14. 网络出版日期: 2017-03-17.

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY14F030021).

通信作者: 王斌锐. E-mail: wangbrpaper@163.com.

吸盘和壁面的距离。机器人根据8个传感器的值,经位置逆解来使吸盘足和壁面平行。文献[8-9]通过在吸盘平面上安装距离传感器,来测量与壁面的距离。空间中确定吸盘平面至少需要安装3个距离传感器。根据3个距离传感器的值,计算出吸盘平面相对于壁面的夹角和距离。机器人基于运动学位置逆解调节关节角度,使吸盘和壁面贴合紧密。

在实际作业时,操作功能是机器人的关键。华南理工大学研发了爬杆机器人Climbot^[10-11],使用摇杆控制机器人从6 m高的路灯杆上拧下灯泡,但是其摇杆和机器人动作映射过于复杂。文献[12]设计了混合坐标系来操作挖掘机,作者将挖斗和根部关节分开控制,使摇杆操作更直观。文献[13]为不同支撑足的情况分别建立了运动学模型。

本文首先介绍了自主研发的爬壁机器人机构;而后根据D-H参数,建立运动学模型、吸盘足至壁面的空间几何模型,分析可靠吸附的必要条件;然后设计了一种用于机构对称机器人的摇杆操作方法,摇杆轴数值映射为机器人摆动吸盘足在笛卡尔空间中的速度;最后开发了自适应吸附装置,在爬壁机器人上进行实物验证。

1 机器人机构

仿尺蠖爬壁机器人由5个旋转关节串联组成,结构对称,可以像图1(a)中的尺蠖一样蠕动爬行。图1(b)中, J_1 和 J_5 关节轴线和连杆轴线重合,传动链是直流无刷电机+行星减速机+谐波减速机,用来模仿尺蠖转向; J_2 、 J_3 和 J_4 关节轴线和连杆轴线垂直,传动链是直流无刷电机+谐波减速机+锥齿轮,用来模仿尺蠖躯体伸缩。 S_1 和 S_2 是两个吸盘足,对应于尺蠖头部和尾部用来附着植物的趾钩。每个吸盘足上安装有3个真空吸盘,以等边三角形分布,用以抵抗重力。多吸盘结构能够减小因吸盘形变导致的机器人倾斜^[14]。

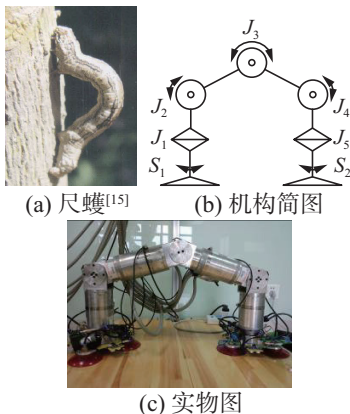


图1 仿尺蠖爬壁机器人

Fig. 1 Inchworm wall-climbing robot

2 机器人建模

2.1 位置运动学建模

J_2 、 J_3 和 J_4 关节是爬行运动的关键,将爬壁机器人简化为一个平面三连杆机构。建立D-H坐标系,如图2所示。

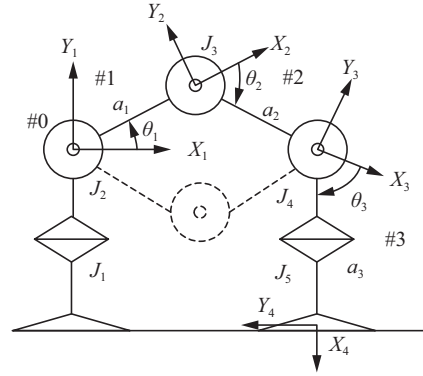


图2 D-H坐标系

Fig. 2 D-H coordinate system

建立摆动吸盘足到支撑吸盘足的齐次坐标变换矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & p_x \\ s_{123} & c_{123} & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$p_x = a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} \quad (2)$$

$$p_y = a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \quad (3)$$

式中: s_1 、 c_1 分别为 $\sin \theta_1$ 和 $\cos \theta_1$ 的缩写, s_{12} 、 c_{12} 分别为 $\sin(\theta_1 + \theta_2)$ 和 $\cos(\theta_1 + \theta_2)$ 的缩写, s_{123} 、 c_{123} 分别为 $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 和 $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 的缩写, a_1 、 a_2 和 a_3 均表示连杆长度。

设

$$\varphi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (4)$$

可得

$$\varphi = \arctan \frac{s_{123}}{c_{123}}$$

$$\theta_2 = \pm \arctan \frac{w_x^2 + w_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 a_2 \sqrt{1 - c_2^2}} \quad (5)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{(a_1 + a_2 c_2)w_y - a_2 s_2 w_x}{(a_1 + a_2 c_2)w_x + a_2 s_2 w_y} \quad (6)$$

$$\theta_3 = \varphi - \theta_1 - \theta_2 \quad (7)$$

式中: $w_x = p_x - a_3 c \varphi$, $w_y = p_y - a_3 s \varphi$ 。

由式(5)可知,运动学位置逆解有两组解: θ_2 为正值时,机器人如图2虚线所示,由于机构参数限制, J_2 和 J_4 关节无法到达此位置,此解无效; θ_2 为负值时,机器人如图2实线所示,此解为有效解。

2.2 速度运动学建模

分别对式(2)~(4)求微分,并写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} dp_x \\ dp_y \\ d\varphi \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 \mathbf{J} 为雅各比矩阵。

式(8)中引入 φ 是为了将 \mathbf{J} 凑成 3×3 方阵,以便于求逆。式(8)两边同时左乘雅各比逆矩阵 \mathbf{J}^{-1} ,并除以 dt ,可得

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\varphi \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为关节 J_2 、 J_3 与 J_4 的转速, v_x 和 v_y 为机器人末端在笛卡尔空间中相对基坐标系 X_1 和 Y_1 方向上速度。

2.3 吸盘足与壁面夹角分析

如图3所示, S_1 为支撑吸盘足, S_2 为摆动吸盘足,下文分别简称为支撑足和摆动足。 α 为吸盘和距离传感器所在平面, β 为目标壁面,点 A 、 B 和 C 分别表示3个距离传感器的安装位置, ΔABC 为等边三角形, l_1 、 l_2 和 l_3 分别为点 A 、 B 和 C 到目标平面 β 的距离, $\Delta A'B'C'$ 为 ΔABC 在平面 β 上的投影。

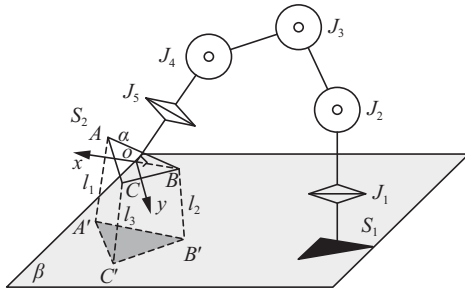


图3 空间坐标系

Fig. 3 Space coordinate system

在平面 α 内建立空间坐标系,以 ΔABC 的中心作为坐标系原点 O 。点 O 到点 A 、 B 、 C 的距离均为 R 。 α 和 β 平面方程分别为

$$\alpha: z = 0$$

$$\beta: Mx + Ny + Pz + Q = 0$$

式中: $M = 2l_2 - l_1 - l_3$, $N = \sqrt{3}(l_1 - l_3)$, $P = 3R$, $Q = -R(l_1 + l_2 + l_3)$ 。

平面 α 和 β 的法向量可表示为 \mathbf{n}_α 和 \mathbf{n}_β :

$$\mathbf{n}_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \mathbf{n}_\beta = \begin{bmatrix} M & N & P \end{bmatrix}^T$$

由此可得平面 α 和 β 的夹角 θ :

$$\cos \theta = \cos \langle \mathbf{n}_\alpha, \mathbf{n}_\beta \rangle = \frac{|\mathbf{n}_\alpha \cdot \mathbf{n}_\beta|}{|\mathbf{n}_\alpha| |\mathbf{n}_\beta|}$$

推导可得

$$\theta = \arccos \frac{P}{\sqrt{M^2 + N^2 + P^2}} \quad (10)$$

θ 的范围为 $0 \sim \pi/2$ 。 $\theta = 0$ 时,吸盘足和壁面平行,是可靠吸附的必要条件。

3 摇杆操作与自适应吸附设计

3.1 摇杆与机器人动作映射

吸盘足交替吸附时,机器人始终以 X_1 、 Y_1 作为基坐标系。将摇杆轴数值映射为摆动足的速度值。

根据式(9),在已知机器人摆动足在笛卡尔空间中 X_1 和 Y_1 方向上速度情况下,可求得关节 J_2 、 J_3 与 J_4 的转速。机器人运动过程中有3种情况:

1) 吸盘足的抬起和放下。如图4(a),当 S_1 为支撑足时,摆动足 S_2 向上抬起,若此时 S_2 为支撑足,如图4(b),可以看到摆动足 S_1 是向下运动的。支撑足不同时,相同的动作,导致摆动足在 Y_1 方向上的运动方向是相反的。为使摇杆轴和机器人运动之间的映射不因支撑足不同而改变,当 S_1 为支撑足时, $y \rightarrow v_y$;当 S_2 为支撑足时, $y \rightarrow -v_y$ 。其中, y 表示摇杆 y 轴的值, v_y 表示机器人摆动足沿 Y_1 方向运动的速度,箭头表示映射。

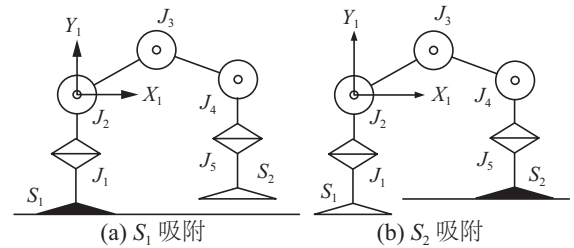


图4 吸盘足上下运动

Fig. 4 Up-and-down motion

2) 机器人躯干的伸缩。如图5,当 S_1 或 S_2 为支撑足时,躯干伸长代表前进,躯干缩短代表后退,摇杆与机器人动作映射为: $x \rightarrow v_x$,其中, x 表示摇杆 x 轴的值, v_x 表示机器人摆动足沿 X_1 方向运动的速度。

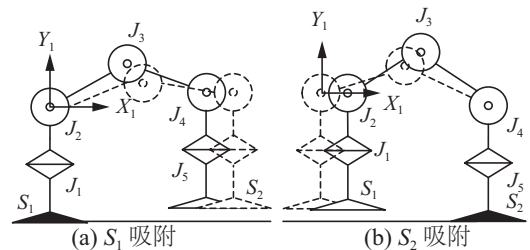


图5 吸盘足前后运动

Fig. 5 Forward and backward motion

3) 机器人转向。如图6(a),当 S_1 为支撑足时,摇杆控制 J_1 , $z \rightarrow v_{J_1}$;如图6(b),当为 S_2 支撑足时,摇杆控制 J_5 , $z \rightarrow v_{J_5}$ 。其中, z 表示摇杆 z 轴的值, v_{J_1} 表示机器人 J_1 关节转速, v_{J_5} 表示机器人 J_5 关节转速。

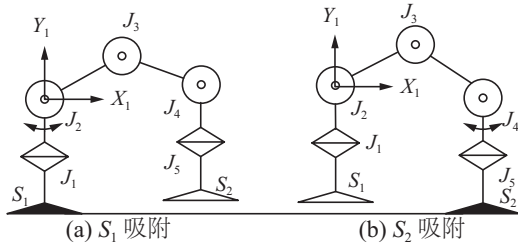


图6 转向

Fig. 6 Swerve motion

机器人运动过程中,通过监测 S_1 和 S_2 中的气压来确定支撑足和摆动足。当摆动足至壁面距离小于设定阈值时,摇杆操作失效,机器人自动切换至自适应吸附动作。

3.2 自适应吸附设计

如图 7(a), S_1 为支撑足,根据式 (10) 求出 θ 的值; J_4 关节旋转 θ , 使摆动足和壁面平行, 此时 $l_1 = l_2 = l_3$; 之后再次获取 l_1 的值, 根据式 (5)~(7) 求得 J_3 、 J_4 和 J_5 的角度, 使 $l_1 = 0$, 此时 S_2 和壁面贴合紧密。如图 7(b), S_2 为支撑足, 不同于 S_1 为支撑足的情况: 此时通过调节 J_2 使摆动足和壁面平行。

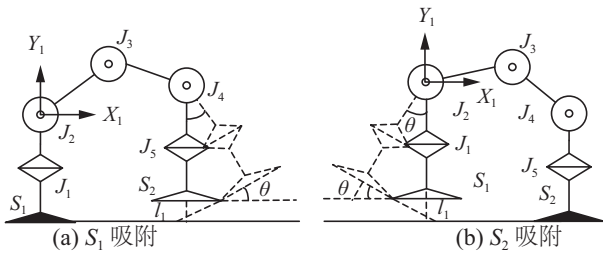


图7 自适应吸附流程

Fig. 7 Adaptive adsorption process

4 实验测试

4.1 控制系统

搭建了控制系统, 如图 8 所示, 控制系统包括 PC、关节模块、摇杆、图像采集设备和吸附模块。

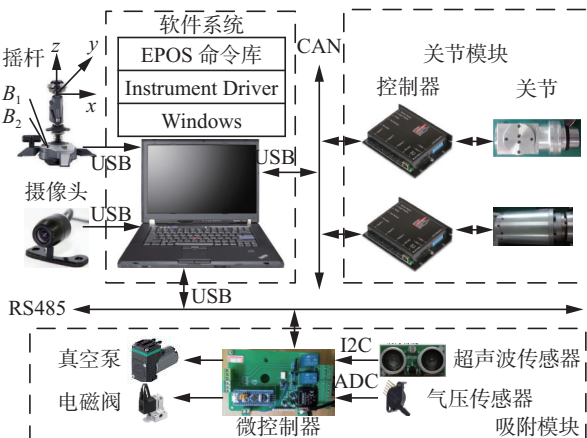


图8 控制系统结构

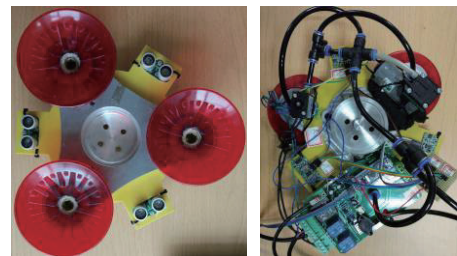
Fig. 8 Control system structure diagram

PC 作为上位机负责机器人的运动规划、状态监控、人机交互和图像采集; 关节模块中, 每个电机上集成有相对式编码器, 伺服控制器负责底层电流、速度及位置闭环运动控制; 吸附模块由微控制器最小系统和外围电路组成, 微控制器作为下位机, 负责响应上位机命令。PC 通过 CAN 和 5 个关节模块进行通信, 通过 RS485 和 2 个吸盘足上的微控制器进行通信。摇杆和图像采集设备通过 USB 和 PC 连接。

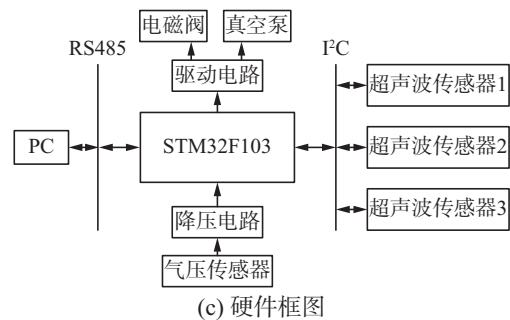
吸盘足上的微控制器和上位机约定有 6 种命令: 0x11、0x12、0x13、0x21、0x22 和 0x23, 其中 0x 代表十六进制; 第一位代表吸盘足, “1”代表吸盘足 S_1 , “2”代表吸盘足 S_2 ; 第二位代表命令, “1”代表读取距离, “2”代表读取气压, “3”代表吸盘足释放。

4.2 吸附装置

选用基于 ARM 的 32 位微控制器 STM32F103 作为足端传感和控制系统的控制器, 运行频率 72 MHz。距离传感器选用超声波传感器 KS103, 3 个超声波传感器以等边三角形方式安装于吸盘足上, 如图 9(a)、(b) 所示, 微控制器通过 I2C 总线读取超声波传感器的数值。为了判断是否吸附成功, 选用 MPX5100 气压传感器检测气路中气压, MPX5100 输出 0~5 V 的模拟量, 经过降压后接入微控制器的 ADC 端口。微控制器通过控制电磁阀和真空泵的开关, 来控制吸盘足的吸附和释放。硬件框图如图 9(c) 所示。



(a) 超声波的安装 (b) 吸附装置实物



(c) 硬件框图

图9 自适应吸附装置

Fig. 9 Adaptive adsorption device

机器人有两个吸盘足, 每个吸盘足上都装有自适应吸附装置。以吸盘足 S_1 为例, 微控制器上电后, 经初始化进入循环, 在循环中不断检查是否收到命令。微控制器收到 0x11 后分别测量 3 个超声

波的值,并发送至上位机,满足设定阈值时,自动打开真空泵,开始吸附;收到 0x12 后测量气压传感器的值,并发送至上位机;收到 0x13 后,关闭真空泵,气路接大气。

4.3 爬行测试

机器人空载时,使用摇杆控制机器人在水平壁面上进行全向爬行运动。在图 10(a)~(g) 中,机器人前进了一个步长;在图 10(h)~(n) 中,机器人改变了运动方向。操作方法如下:

1) 按下 B_1 按键, S_1 释放;

2) 按下 B_2 按键, S_2 释放;

3) 操作摇杆y轴,抬起或放下摆动足,当摆动足至壁面距离小于自动吸附阈值时,摇杆轴失效,机器人自适应吸附至壁面;操作摇杆x轴,机器躯体伸缩;操作摇杆z轴,机器人转弯。

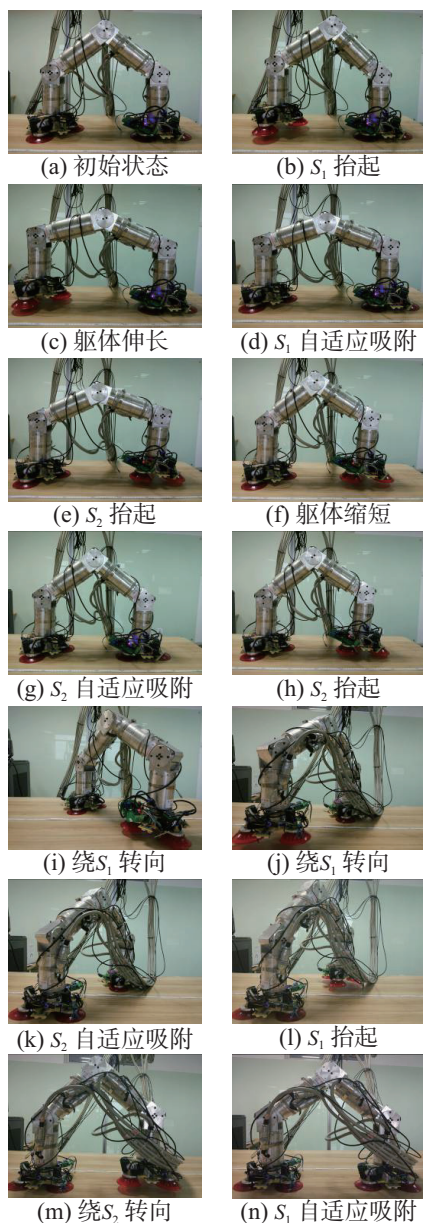


图 10 爬行实验

Fig. 10 Crawling experiment

5 结束语

自适应吸附和摇杆控制设计,使机器人无需人工干预,自动调整吸盘足位姿,完成吸附动作,实验验证得出以下结论: 1) 在机器人吸盘足上安装 3 个距离传感器,测量吸盘足相对壁面的距离和倾角,经位置逆运动学求解,控制关节位置闭环,可使机器人自适应吸附至壁面; 2) 经逆速度运动学求解,将摇杆映射为机器人关节速度闭环,设定自适应吸附动作触发阈值,吸盘接近壁面时自动触发自适应吸附,降低了操控复杂度。由于超声波传感器的物理特性限制,当吸盘和壁面夹角大于超声波传感器波束角时,测距误差过大,无法正常使用,以后可选用其他类型的距离传感器。

参考文献:

- [1] CHU B, JUNG K, HAN C S, et al. A survey of climbing robots: locomotion and adhesion[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2010, 11(4): 633-647.
- [2] TUMMALA R L, MUKHERJEE R, XI Ning, et al. Climbing the walls[J]. IEEE robotics and automation magazine, 2002, 9(4): 10-19.
- [3] 姜勇, 王洪光, 房立金. 基于主动试探的微型爬壁机器人步态控制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 56-62.
JIANG Yong, WANG Hongguang, FANG Lijin. Gait control of micro wall-climbing robot based on initiative exploration[J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(7): 56-62.
- [4] 王洪光, 姜勇, 房立金, 等. 双足爬壁机器人壁面凹过渡步态规划研究[J]. 智能系统学报, 2007, 2(4): 40-45.
WANG Hongguang, JIANG Yong, FANG Lijin, et al. Gait planning of concave transitions between different slopes for bipedal wall-climbing robots[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2007, 2(4): 40-45.
- [5] 王斌锐, 冯伟博, 骆浩华, 等. 曲面上双足三自由度爬壁机器人设计与稳定性分析[J]. 机器人, 2014, 36(3): 349-354.
WANG Binrui, FENG Weibo, LUO Haohua, et al. Design and stability analysis of dual-foot 3 DOF climbing robot for blade surface[J]. Robot, 2014, 36(3): 349-354.
- [6] 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.
- [7] 李满天. 微型尺蠖式壁面移动机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
LI Mantian. Research on inchworm-like wall-climbing micro-robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [8] ZHU Haifei, GUAN Yisheng, WU Wenqing, et al.

- Autonomous pose detection and alignment of suction modules of a biped wall-climbing robot[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2015, 20(2): 653–662.
- [9] 张联盟, 管贻生, 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.
ZHANG Lianmeng, GUAN Yisheng, ZHU Haifei, et al. Posture detection of suction modules for a biped wall-climbing robot[J]. Robot, 2012, 34(6): 758–763.
- [10] GUAN Y, JIANG L, ZHU H, et al. Climbot: a bio-inspired modular biped climbing robot—system development, climbing gaits, and experiments[J]. Journal of mechanisms and robotics, 2016, 8(2): 21026.
- [11] 蔡传武, 管贻生, 周雪峰, 等. 双手爪式仿生攀爬机器人的摇杆控制[J]. 机器人, 2012, 34(3): 363–368.
CAI Chuanwu, GUAN Yisheng, ZHOU Xuefeng, et al. Joystick-based control for a biomimetic biped climbing robot[J]. Robot, 2012, 34(3): 363–368.
- [12] YOON J, MANURUNG A. Development of an intuitive user interface for a hydraulic backhoe[J]. Automation in construction, 2010, 19(6): 779–790.
- [13] XIAO Jizhong, MINOR M, DULIMARTA H, et al. Modeling and control of an under-actuated miniature crawler robot[C]//Proceedings of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium. Maui, HI, USA: IEEE, 2001: 1546–1551.
- [14] GUAN Yisheng, ZHU Haifei, WU Wenqiang, et al. A modular biped wall-climbing robot with high mobility and manipulating function[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2013, 18(6): 1787–1798.
- [15] 余夫. 爬行——从容不迫的运动方式[J]. 百科知识, 2009(5): 29–31.
YU Fu. The crawling motion way take it leisurely and unoppressively[J]. Encyclopedia knowledge, 2009(5): 29–31.

作者简介:



高国庆,男,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为仿生爬壁机器人运动控制。



王涛,男,1992年生,硕士研究生,主要研究方向为模块化机器人。



王斌锐,男,1978年生,教授,博士,主要研究方向为仿生机器人及智能控制。