

# 双足爬壁机器人壁面凹过渡步态规划研究

王洪光<sup>1,2</sup>, 姜 勇<sup>1,2</sup>, 房立金<sup>1</sup>, 赵明扬<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所机器人学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**针对腿足式爬壁机器人在壁面过渡时的步态规划问题,以真空吸附式双足爬壁机器人为研究对象,在步态分析的基础上,基于有限状态机建立了机器人的步态模型,进而提出了基于加权插值和BP神经网络的双足爬壁机器人壁面凹过渡在线步态规划算法,为提高机器人壁面过渡的自主控制能力奠定了基础.仿真分析和实验结果表明,该步态规划算法对于实际的机器人系统是有效的和可行的.

**关键词:**双足爬壁机器人;有限状态机;壁面凹过渡;步态规划

**中图分类号:**TP24 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2007)04-0040-06

## Gait planning of concave transitions between different slopes for bipedal wall-climbing robots

WANG Hong-guang<sup>1,2</sup>, JIANG Yong<sup>1,2</sup>, FANG Li-jin<sup>1</sup>, ZHAO Ming-yang<sup>1</sup>

(1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to solve the gait planning issue in wall transitions for bipedal wall-climbing robots fitted with vacuum suction cups, a gait model based on finite state machine was established after deep analysis of the robot's gait. On this basis, an on-line gait planning algorithm for concave transitions was proposed based on weighted interpolation and BP neural networks. This lays a foundation for improving the ability of robots to transit complex walls under automatic control. Simulations and experiments show that the on-line gait planning algorithm can successfully help wall-climbing robots complete a concave transition.

**Keywords:** bipedal wall-climbing robot; finite state machine; concave transition; gait planning

腿足式爬壁机器人是基于仿生学、机械设计、控制理论和人工智能等多学科交叉的一种特殊用途机器人.与轮式和履带式爬壁机器人相比,腿足式爬壁机器人不仅可以在单一壁面上移动,而且也可以完成复杂的壁面过渡,具有较强的运动能力和灵活性,因此得到了广大研究学者的关注<sup>[1]</sup>.所谓壁面过渡是指机器人从当前壁面移动到与此壁面相交一定角度的另外一个壁面上的过程.根据2个壁面之间交角的大小可分为壁面凹过渡( $<$ )和壁面凸过渡( $>$ )2种情况.

针对腿足式爬壁机器人的特殊机构,如何规划其步态以实现自主壁面过渡是此类机器人研究的一个难点问题. A. Alsalam 等在文献[2]中从机构设置

计的角度分析了四足爬壁机器人实现壁面过渡的步态可行性,但是对相应的步态规划方法并没有做深入的研究;J. Z. Xiao 等在文献[3]中分析了微小型爬壁机器人 CRAWLER 壁面凹过渡的步态过程,提出了基于多传感器信息融合的步态控制方法,但对于步态规划中涉及的壁面交角与各个关节变量取值之间的关系并没有给出进一步的分析结果;Hyungseok Kim 等在文献[4]中研究了四足爬壁机器人 MRWALLSPECT 在三维环境下实现壁面过渡的步态规划问题,通过建立机器人与环境的几何模型分别推导出壁面凹过渡和凸过渡的各个步态参数的离线计算方法,对于如何实现机器人的在线步态规划并未给出具体的解决办法.

本文以真空吸附式双足爬壁机器人为研究对象,针对机器人壁面凹过渡的步态规划问题,在步

收稿日期:2006-11-27.

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2004AA4201102).

态分析和建立有限状态机 (finite state machine, FSM) 模型的基础上,利用神经网络的学习能力,提出了基于加权插值和 BP 神经网络的双足爬壁机器人壁面凹过渡在线步态规划算法。

1 双足爬壁机器人

双足爬壁机器人本体采用五自由度 (RRPRR) 三电机驱动的欠驱动机构设计,利用 2 个真空吸盘足实现机器人的壁面吸附功能<sup>[5]</sup>。如图 1 所示。旋转关节 1 和 5 使爬壁机器人具有 2 个俯仰自由度,这 2 个自由度分别由 2 台电机独立驱动;机身通过移动关节 3 实现一个伸缩自由度,由一个电机驱动使机器人可以借助两腿的伸展和收缩达到移动的目的;旋转关节 2 和 4 是 2 个被动关节,它们在机器人的腿和足之间产生 2 个水平回转自由度,使机器人具备转向能力;另外,旋转关节 2 和 4 产生的 2 个水平回转自由度是通过与移动关节 3 运动耦合来实现的。

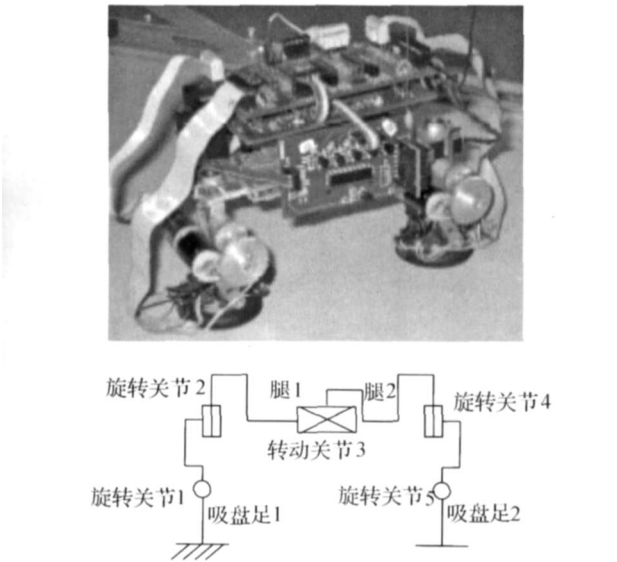


图 1 双足爬壁机器人及其机构简图

Fig. 1 Bipedal climbing robot and mechanism sketch

双足爬壁机器人的控制系统采用 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 芯片作为中央处理器。关节电机和真空泵电机的驱动选用 TI 公司的 SN754410 芯片。2 台直流伺服电机均安装光电码盘,可以对每个关节的运动实施位置和速度闭环控制。集成在机器人本体上的传感器包括:1 个零位开关、4 个触觉传感器、2 个压力传感器、2 个红外测距传感器和 2 个模式传感器。零位开关用来识别机器人的参考零位置;触觉传感器用来反馈两吸盘足与壁面的接触状态;压力传感器用来检测气路中的负压值;红外测

距传感器用来测定机器人壁面过渡的环境数据;模式传感器用来区分机器人的运动模式。机器人与基站之间通过无线蓝牙模块进行实时通讯。

2 机器人步态建模

2.1 壁面凹过渡的步态分析

双足爬壁机器人可以通过 2 个吸盘足的交替吸附和各个关节的配合灵活地实现尺蠖式爬行和转向,并且能够在夹角满足一定范围的凹交叉壁面之间实现过渡运动。机器人从当前位置运动到与所在壁面相交一定角度  $[45^{\circ}, 180^{\circ}]$  的另外一个壁面的整个过渡步态如图 2 所示。

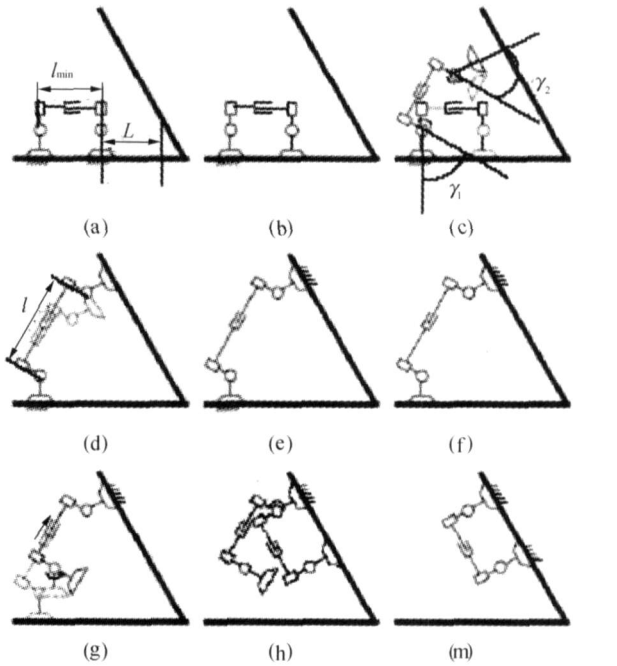


图 2 壁面凹过渡

Fig. 2 Concave transition

- 运动过程为:
- 1) 机器人移动到距离目标壁面为  $L$  (红外测距传感器检测值) 的位置,移动关节 3 收缩至最短  $L_{min}$ ;
  - 2) 释放吸盘足 2;
  - 3) 旋转关节 1 逆时针旋转  $\gamma_1$  角度,旋转关节 5 逆时针旋转  $\gamma_2$  角度;
  - 4) 移动关节 3 伸长至  $L$ ,使吸盘足 2 触及目标壁面;
  - 5) 启动真空泵使吸盘足 2 牢牢吸附在目标壁面上;
  - 6) 释放吸盘足 1;
  - 7) 移动关节 3 收缩至  $L_{min}$ ,旋转关节 1 逆时针旋转  $\gamma_1$  角度;
  - 8) 旋转关节 5 逆时针旋转  $\gamma_2$  角度;

9) 启动真空泵使吸盘足 1 牢牢吸附在目标壁面上.

上述壁面凹过渡步态可用函数表示为

$$G = g(L, \text{ }_1, \text{ }_2, l).$$

式中: 是相交壁面的夹角; $L$ 、 $\text{ }_1$ 、 $\text{ }_2$  和  $l$  是步态规划的待定参数.

2.2 基于 FSM 的步态建模

FSM 由有限个状态和相互之间的转移构成,机器人在任何时候只能处于给定数目的状态中的一个.当接收到一个输入事件时,FSM 产生一个输出,同时也可能伴随着状态的转移.

双足爬壁机器人步态规划的 FSM 模型表示为

$$M = (Q, \text{ }_i, \text{ }_0, F).$$

式中:  $Q$  代表机器人运动步态的有限状态集合,  $\forall q_i \in Q, q_i$  为  $M$  的一个状态;  $\text{ }_i$  代表机器人运动过程的输入状态集合;  $q_0 \in Q$  表示机器人的初始状态;  $F \subseteq Q$  代表机器人的终止状态集合; 状态转移函数:  $Q \times \text{ }_i \rightarrow Q$ , 则  $(q_i, a) = q_j$  表示当输入为  $a$  时,机器人的状态从  $q_i$  转移到  $q_j$ . FSM 模型的状态向量  $q_i$  由 8 个元素组成, 占据 2 个字节(共 16 位, 其中 15~13 位取“0”), 如表 1 所示.

表 1 FSM 状态向量

Table 1 FSM state vectors

元素	位
LM	12, 11
$J_1$	10, 9
$J_{2,3,4}$	8, 7, 6
$J_5$	5, 4
$SC_1$	3
$SC_2$	2
AR	1
ST	0

LM(locomotion mode) 机器人的运动模式: “00”表示参考零位置静止模式, “01”表示尺蠖式爬行模式, “10”表示转向模式, “11”表示壁面过渡模式.

$J_1$  (joint 1) 关节 1 的运动状态: “00”表示静止或吸盘足自动微调( $AR = 1$ ), “01”表示关节 1 顺时针转动, “10”表示关节 1 逆时针转动, “11”非法状态.

$J_{2,3,4}$  (joint 2, 3 and 4) 关节 2、3 和 4 的运动状态: “000”表示静止或吸盘足自动微调( $AR = 1$ ), “001”表示关节 2 顺时针转动, “010”表示关节 2 逆时针转动, “011”表示关节 3 伸长, “100”表示关节 3 收缩, “101”表示关节 4 顺时针转动, “110”表示关节

4 逆时针转动, “111”非法状态.

$J_5$  (joint 5) 关节 5 的运动状态: “00”表示静止或吸盘足自动微调( $AR = 1$ ), “01”表示关节 5 顺时针转动, “10”表示关节 5 逆时针转动, “11”非法状态.

$SC_1$  (suction cup 1) 吸盘足 1 的状态: “0”表示吸盘足 1 释放, “1”表示吸盘足 1 吸附.

$SC_2$  (suction cup 2) 吸盘足 2 的状态: “0”表示吸盘足 2 释放, “1”表示吸盘足 2 吸附.

AR(adaptive regulate) 吸盘足姿态自调整: “0”表示终止自调整程序, “1”表示启动自调整程序.

ST(stage) 基本步态阶段: “0”表示处于基本步态的前半程阶段, “1”表示处于基本步态的后半程阶段.

根据上述双足爬壁机器人步态规划 FSM 模型的状态向量定义, 可以得到壁面凹过渡时机器人的状态(十六进制表示)转移路径, 如图 3 所示.

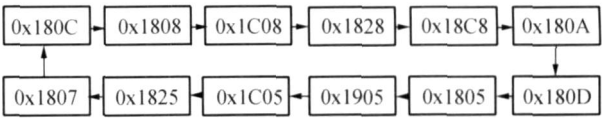


图 3 壁面凹过渡 FSM 转移路径

Fig. 3 FSM path of concave transition

3 机器人步态规划算法

3.1 相关参数

当双足爬壁机器人要实现在相交角度为  $[45^\circ, 105^\circ]$  的 2 个壁面之间的过渡时, 如图 4(a) 所示, 一方面, 过渡起始位置与目标壁面的距离  $L$  不能过长, 否则, 即使移动关节 3 的伸长量  $l$  达到最大值  $L_{\max}$ , 吸盘足也无法完全接触到目标壁面; 另一方面, 为避免运动机构与墙壁发生干涉, 要求  $R_1 < L_1$  和  $R_2 < L_2$ , 则  $L$  不能过短. 基于规则的参数  $L$  分段取值如下:

IF  $[ \text{ }_1 = 45^\circ, \text{ }_2 ]$ , THEN  $L = m_1$ ;

IF  $[ \text{ }_2, \text{ }_3 ]$ , THEN  $L = m_2$ ;

...

IF  $[ \text{ }_{n-1}, \text{ }_n = 105^\circ ]$ , THEN  $L = m_{n-1}$ .

其中  $45^\circ = \text{ }_1 < \text{ }_2 < \dots < \text{ }_{n-1} < \text{ }_n = 105^\circ$ ; 常数  $m_1, m_2, \dots, m_{n-1}$  是通过离线试验确定的.

当双足爬壁机器人要实现在相交角度为  $[105^\circ, 180^\circ]$  的 2 个壁面之间的过渡时, 如图 4(b) 所示, 则参数  $L$  的取值为

$$L = d \cdot \tan\left[ \text{ } - \frac{\text{ }_2}{2} \right] + c \cdot r.$$

式中:  $d$  是红外测距传感器的安装位置到吸盘腔底的距离,  $r$  是吸盘腔底的直径, 常数  $C$  是安全系数.

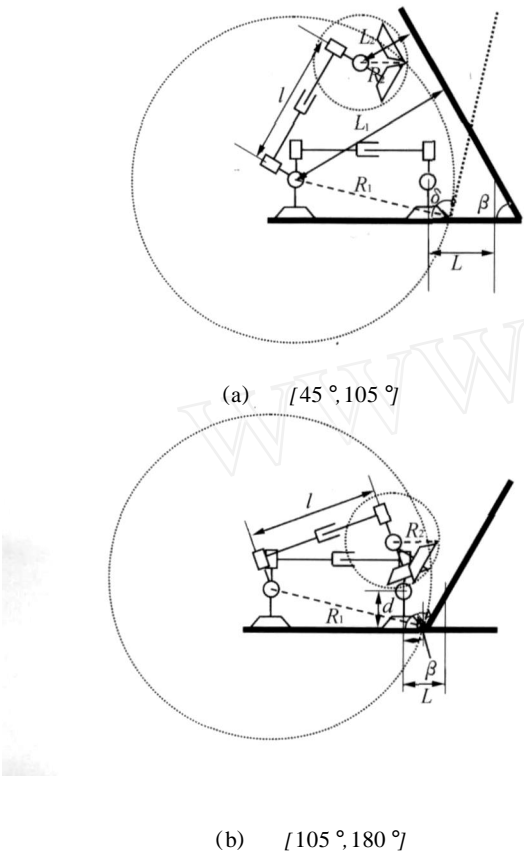


图 4 过渡起始位置与目标壁面的距离  
Fig. 4 Distance between original position and object slope

在壁面凹过渡时, 双足爬壁机器人的旋转关节 1 的旋转角度  $\gamma_1$  和旋转关节 5 的旋转角度  $\gamma_2$  与壁面夹角  $\beta$  的关系如图 5 所示, 其中  $\gamma_1 = \angle ACB$ ,  $\gamma_2 = \angle ABC$ ,  $\gamma = \angle ACB + \angle ABC$ ,  $\gamma + \beta = 180^\circ$ ,  $\gamma_1 + \gamma_2 + \beta = 180^\circ$ .

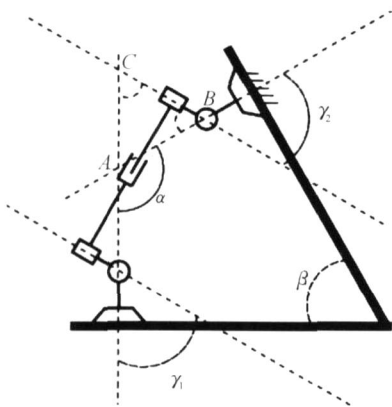


图 5 与参数  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的关系  
Fig. 5 Relations of  $\gamma$  and parameters  $\gamma_1, \gamma_2$

3.2 步态规划算法  
通过离线步态规划, 双足爬壁机器人可以自主实现相交角度为  $\gamma \in [45^\circ, 75^\circ, 105^\circ, 135^\circ, 165^\circ]$  的壁面凹过渡, 相应的步态可用函数表示为

$$G_i = g(L_i, \gamma_i, \gamma_{i+1}, l_i), i = 1, 2, 3, 4, 5.$$

对于  $\gamma \in [45^\circ, 180^\circ]$  的任意凹交叉壁面, 机器人实现自主壁面过渡的在线步态规划算法如下:

1) 确定与  $\gamma$  相邻的  $\gamma_i$  和  $\gamma_{i+1}$ , 即  $\gamma_i < \gamma < \gamma_{i+1}$ , 对应的步态函数分别为

$$G_i = g(L_i, \gamma_i, \gamma_{i+1}, l_i),$$
$$G_{i+1} = g(L_{i+1}, \gamma_{i+1}, \gamma_{i+2}, l_{i+1}).$$

2) 计算权重因子  $w_1$  和  $w_2$ :

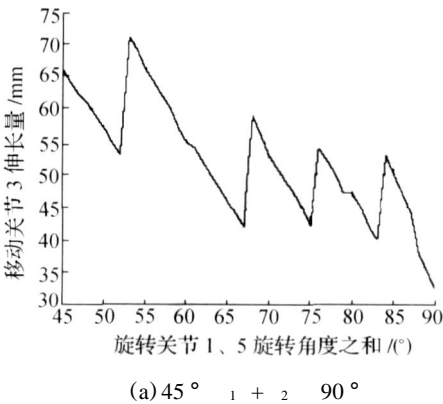
$$w_1 = \begin{cases} 1 - \frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, & \gamma > \gamma_i, \\ 1, & \gamma = \gamma_i, \\ 1 + \frac{\gamma_{i+1} - \gamma}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, & \gamma < \gamma_i, \end{cases}$$
$$w_2 = \begin{cases} 1 + \frac{\gamma - \gamma_{i+1}}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, & \gamma > \gamma_{i+1}, \\ 1, & \gamma = \gamma_{i+1}, \\ 1 - \frac{\gamma_{i+1} - \gamma}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, & \gamma < \gamma_{i+1}, \end{cases}$$
$$\gamma = \frac{\gamma_i + \gamma_{i+1}}{2}.$$

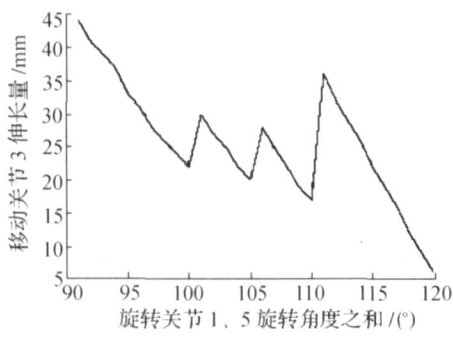
3) 计算旋转关节 1 和 5 的转动角度  $\gamma_1, \gamma_2$ :

$$\gamma_1 = \frac{w_1 \gamma_i + w_2 \gamma_{i+1}}{2},$$
$$\gamma_2 = 180^\circ - \gamma - \gamma_1.$$

4) 根据规则确定参数  $L$ ;

5) 基于神经网络的训练和学习, 利用多个 BP 神经网络对旋转角度  $\gamma_1, \gamma_2$  和移动变量  $l$  的关系曲线(如图 6 所示)进行分段拟合, 计算移动关节 3 的伸长量  $l$ ; 拟合曲线是根据离线规划获得的相关数据绘制的.





(b)  $90^{\circ} < \alpha_1 + \alpha_2 < 120^{\circ}$

图 6 旋转角度  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和移动变量  $l$  的关系

Fig. 6 Relationship of  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $l$

6) 由上述计算值得到步态函数  $G = g(L, \alpha_1, \alpha_2, l)$ , 在线规划出壁面凹过渡的步态.

### 4 仿真与实验

每个 BP 神经网络都具有相同的结构, 如图 7 所示, 2 个网络输入量分别是双足爬壁机器人旋转关节 1 和 5 的旋转角度值  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 隐层包含 3 个神经元, 网络输出为移动关节 3 的伸长量  $l$ , 对网络进行训练的样本源自离线规划数据.

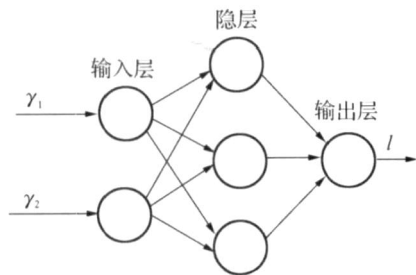
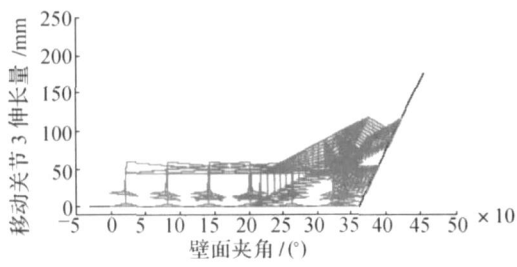


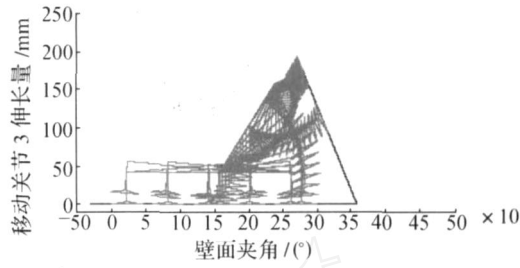
图 7 BP 神经网络

Fig. 7 BP neural network

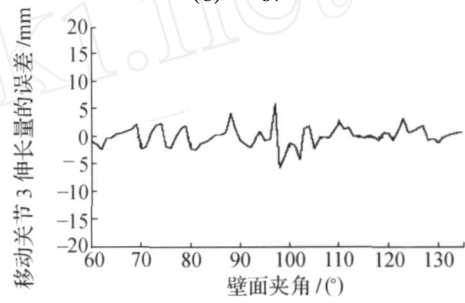
图 8 所示为基于在线步态规划的双足爬壁机器人壁面凹过渡的仿真结果: 当机器人实现夹角为  $[60^{\circ}, 135^{\circ}]$  的壁面凹过渡时, 采用多个 BP 神经网络进行曲线拟合所得到的移动关节 3 伸长量的误差基本上为  $-5 \sim 5 \text{ mm}$ , 如图 8(c) 所示.



(a)  $\alpha = 118^{\circ}$



(b)  $\alpha = 67^{\circ}$

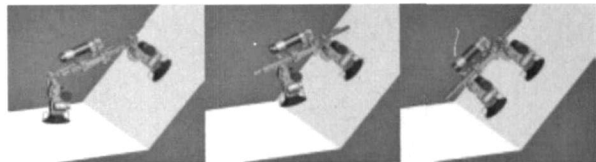
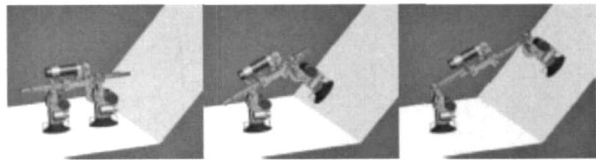


(c) 关节 3 伸长量  $l$  的误差

图 8 壁面凹过渡在线步态规划算法仿真结果

Fig. 8 Simulations of gait planning algorithm

图 9 所示为三维模拟环境中双足爬壁机器人壁面凹过渡的步态规划仿真; 图 10 所示为基于在线步态规划的双足爬壁机器人壁面凹过渡实验: 利用 2 块铝板搭建凹交叉壁面实验环境, 其夹角为  $95^{\circ}$ ; 机器人总重量是  $650 \text{ g}$ , 移动关节 3 的伸缩范围是  $l \in [140 \text{ mm}, 220 \text{ mm}]$ , 吸盘足提供的真空负压最大值是  $90 \text{ kPa}$ ; 实验过程中为弥补在线步态规划算法产生的误差, 采用了基于传感器的吸盘足姿态自调整控制方法<sup>[6]</sup>.



(a)  $\alpha = 118^{\circ}$



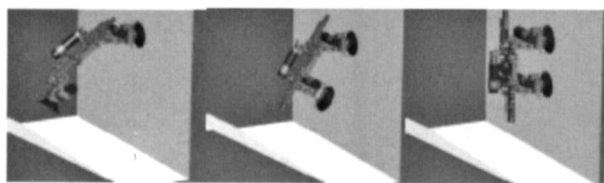
(b)  $= 67^\circ$ 

图 9 3D 模拟环境中壁面凹过渡仿真

Fig. 9 Simulations of concave transition in 3D

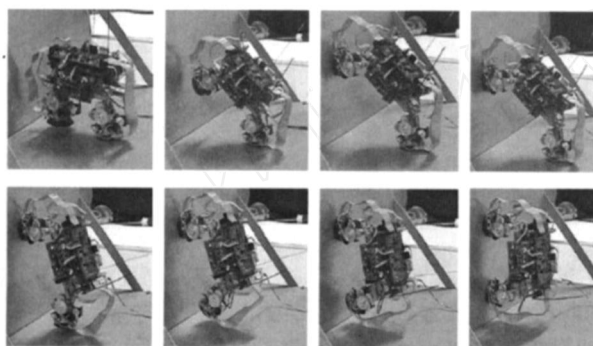


图 10 机器人壁面凹过渡实验

Fig. 10 Experiments of concave transition  
for climbing robot

实验结果证明,在凹交叉壁面夹角角度已知的前提下,基于本文提出的在线步态规划算法,双足爬壁机器人能够自主地实现壁面凹过渡。

## 5 结束语

本文通过对双足爬壁机器人壁面凹过渡步态的分析,建立了基于 FSM 的步态模型,并在此基础上提出了基于加权插值和 BP 神经网络的在线步态规划算法,实现了机器人的自主壁面凹过渡。通过仿真分析和实验,证明了该算法的有效性和可行性。本文所提出的方法对壁面夹角的检测精度有较高的要求,并且不适用于壁面凸过渡的情况。在未来的工作中,将进一步研究壁面夹角的测定方法,以及探讨壁面凸过渡乃至更复杂环境的步态规划方法。

## 参考文献:

- [1]肖立,佟仕忠,丁启敏,吴俊生. 爬壁机器人的现状与发展[J]. 自动化博览, 2005, 22 (1): 81 - 84.  
XIAO Li, TONG Shizhong, DING Qimin, WU Junsheng. The current situation and development of the wall-climbing robot [J]. Automation Panorama, 2005, 22 (1): 81 - 84.
- [2]ALSALAMEH A A S, AMIN S H M, MAMAT R. Mechanical design of a quadruped robot for horizontal

ground to vertical wall movement [A]. Proceedings TENCON 2000[C]. [s.l.], 2000.

- [3]XIAO Jizhong, XI Ning, XIAO Jun, TAN Jindong. Multi-sensor referenced gait control of a miniature climbing robot [A]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. [s.l.], 2003.
- [4]HYUNGSEOK K, TAEHUN K, VO GL, HYOU K R C. Gait planning of quadruped walking and climbing robot for locomotion in 3D environment [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Spain, 2005.
- [5]XIAO J Z, XIAO J, XI N. Minimal power control of a miniature climbing robot [A]. Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics [C]. New York, USA, 2003.
- [6]JIANG Yong, WANG Hongguang, FANGLijin, ZHAO Mingyang. A novel approach to fault detection and identification in suction foot control of a climbing robot [A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Beijing, 2006.

### 作者简介:



王洪光,男,1965年生,研究员,博士生导师,主要研究方向为机器人机构学、特种机器人及机电一体化技术,主持和参加了国家自然科学基金、国家 863 计划、九五攻关、国家重大科学工程及企业委托等研究与应用课题多项;获得发明和实用新型专利 10 余项;获辽宁省技术发明二等奖 1 项,沈阳市科技进步二等奖 1 项,发表论文 30 余篇。

E-mail: hgwang@sia.cn.



姜勇,男,1975年生,博士,主要研究方向为移动机器人运动规划与控制、智能控制,发表学术论文 10 余篇。



房立金,男,1965年生,博士,研究员,主要研究方向为离散自动控制,并机器人、机器人控制。1998 年获中国科学院自然科学三等奖一项;1999 年获沈阳市科技进步二等奖一项;2002 年获解放军总参二等奖一项;申请专利 10 余项,发表学术论文 10 余篇。