

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.001

阶梯攀爬机器人结构及控制方案设计*

杨 萍, 龚林强, 施俊屹, 曹 强
(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对阶梯攀爬机器人工作过程中的楼梯攀爬及避障问题,对阶梯攀爬机器人机械结构、机器人阶梯攀爬方式、差速驱动方式下机器人运动方程进行了分析,对阶梯攀爬机器人行驶过程中障碍物检测、避障控制策略进行了研究;基于模糊控制原理,建立了阶梯攀爬机器人模糊避障规则,提出了一种基于 MC9S12XS128 单片机以及超声波传感器的阶梯攀爬机器人障碍物检测、避障及楼梯攀爬控制系统,并利用所研制的阶梯攀爬机器人样机进行了机器人避障、楼梯攀爬测试。测试结果表明,基于变形轮与行星轮相结合的阶梯攀爬机器人机构可以实现阶梯攀爬机器人避障及攀爬楼梯的功能,控制系统可以准确、迅速判断障碍物以及楼梯所处位置,并依据所建立模糊避障规则完成避障及楼梯攀爬任务。

关键词:阶梯攀爬机器人;结构设计;模糊控制;运动方程;障碍物检测

中图分类号:TH122;TP242.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0557-06

Structure and control scheme of stair climbing robot

YANG Ping, GONG Lin-qiang, SHI Jun-yi, CAO Qiang

(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problem of climbing stair and avoiding obstacles in the working process of stair climbing robot, mechanical structure, climbing method and the motion equation of the stair climbing robot were analyzed, the obstacle detection and obstacle avoidance control strategy for the climbing robot were studied. The fuzzy obstacle avoidance rule for stair climbing robot was established which was based on the principle of fuzzy control, MC9S12XS128 singlechip and the ultrasonic sensor obstacle detection were used in forming the stair climbing robot's control system of obstacle detection, obstacle avoidance and stair climbing. The obstacle avoidance and stair climbing test was carried out by using the stair climbing robot prototype, the results indicate that stair climbing robot mechanical structure based on deformation wheels and planetary wheels can realize obstacle avoidance and climb the stairs, the control system can accurately and quickly determine the location of obstacles and stairs, and complete the task of obstacle avoidance and stair climbing task based on the established fuzzy obstacle avoidance rules.

Key words: stair climbing robot; structure design; fuzzy control; equation of motion; obstacle detection

0 引 言

智能运输机器人在实际生产过程中的应用可以有效降低劳动成本,尤其在某些不适宜人工作业的危险环境下,智能运输机器人可以替代人工进行运输作业,大幅度降低现场安全隐患,具有广阔的应用前景。

目前,AGV 智能小车在仓库运输系统中已经广泛应用并有效地减轻了人工负担,但 AGV 小车应用范围

仅局限于在平整路面进行运输工作,在阶梯环境下运输货物非人工不可取代,是一个亟待解决的现实问题。故设计并制作一款可以适应多种工作地面环境的智能运输机器人具有十分重要的研究价值及使用价值。目前,国内、外攀爬机器人研究集中于轮式攀爬机器人及履带式攀爬机器人,其中具有代表性的有美国 IBOT3000 六轮式攀爬机器人、日本 Quince 履带式攀爬机器人。国内攀爬机器人研究以哈工大研制的“远征”号轮式攀爬探测器以及中科院沈阳自动化研究所

收稿日期:2016-12-26

基金项目:兰州市科技局重点创新项目(2014-2-25)

作者简介:杨萍(1964-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,硕士生导师,主要从事特殊环境下的机器人开发方面的研究。E-mail:441245379@qq.com

设计的“灵蜥-B”履带式攀爬机器人为代表,并已投入使用。

本研究将基于模糊控制原理,设计一种攀爬控制系统。

1 阶梯攀爬机器人机械结构设计

机器人行走机构有以下 3 种:轮式、履带式以及腿式^[1]。其中,轮式机构结构简单、控制方式灵活且运动稳定,但越障能力差^[2]。履带式结构拥有较好的越障能力,但在攀爬、越障过程中履带边缘损伤较大,此外,履带结构与地面之间存在较大摩擦阻力,导致履带结构行进过程中耗能较高并且移动速度较慢。腿式结构的设计以人类腿部结构为参考^[3],灵活度较高,但机械结构以及控制系统设计复杂,实际应用性能不好。

结合阶梯攀爬机器人使用场地的特殊性,本研究最终选择轮式结构作为阶梯攀爬机器人移动方式,并通过变形轮机构实现攀爬机器人攀爬楼梯的目的。

阶梯攀爬机器人机械结构由两个独立驱动的变形轮、前置超声波传感器支架、攀爬机器人底盘以及后置的一对行星轮组成。

阶梯攀爬机器人三维图如图 1 所示。

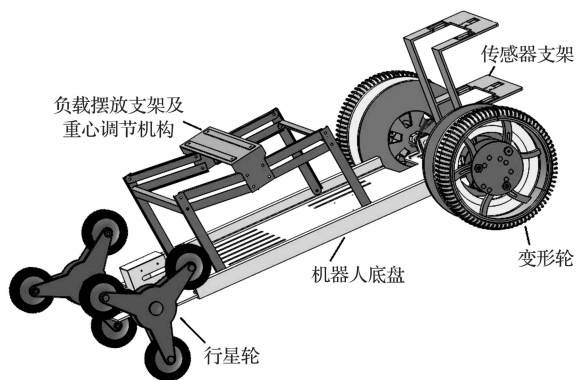


图 1 阶梯攀爬机器人三维图

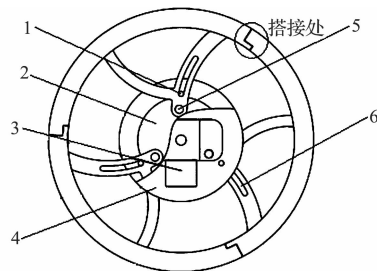
相比于其他类型的移动机器人,该机器人具有以下特点:

(1)通过变形轮机构,阶梯攀爬机器人既可以在平整地面行走又实现了攀爬楼梯的功能;

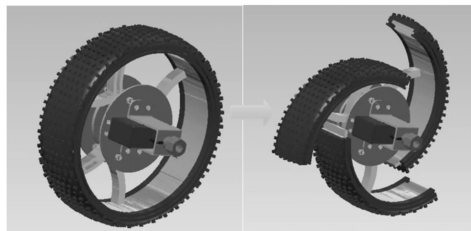
(2)变形轮使用双电机差速驱动,使得阶梯攀爬机器人在多障碍环境下工作时,具有连续变向躲避障碍物的能力;

(3)由于需要携带负载进行攀爬运输,通过重心调节结构使得梯攀爬机器人具备自动调节重心的能力,保证攀爬过程平稳。

变形轮结构及变形示意图如图 2 所示。



1.外盘转轴; 2.内盘; 3.舵机;
4.外盘; 5.内盘转轴; 6.轮毂轴槽
(a) 变形轮结构



(b) 变形示意图

图 2 变形轮结构及变形示意图

基于曲柄滑块机构原理,本研究设计了可以在普通圆形轮与三角形半步行轮之间自主转换的变形轮机构,如图 2(a)所示。

变形轮由 3 块分离的轮毂组成,通过安装在内、外转盘上的滑动轴固定。当阶梯攀爬机器人在水平路面上行进时,变形轮始终保持圆形,当前置超声波传感器检测到楼梯时,安装于变形轮内部的舵机 3 带动内盘 2 一起转动,固定在内盘上的转轴 5 与外盘滑动轴 1 产生相对运动,使得滑动轴 1 可以在轮毂轴槽 6 内滑动,进而导致变形轮轮毂在搭接处产生错位,变形轮逐渐打开,并变形为三角形半步行轮。变形轮结构变形前、后示意图如图 2(b)所示。

当布置在机器人前面的超声波传感器检测到台阶的时候,变形轮打开为三角形半步行轮,开始进行攀爬阶梯动作;同时,重心调节机构自动调节负载摆放高度及重心位置,保证攀爬过程平稳。阶梯攀爬机器人由平地到台阶运动过程如图 3 所示。

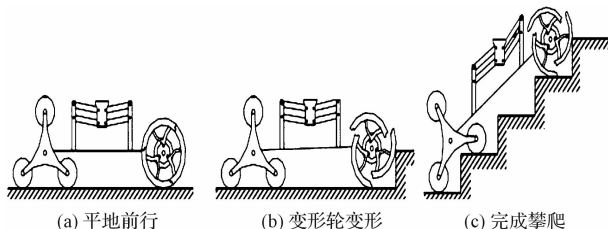


图 3 阶梯攀爬机器人平路-阶梯运动过程

2 阶梯攀爬机器人运动方程

阶梯攀爬机器采用双电机差速控制方式移动^[4-5],

差速控制可有效地减小攀爬机器人的转弯半径,尤其在狭窄的楼道内,转弯半径的缩小更有利于攀爬机器人的行走。

为了便于描述阶梯攀爬机器人运动的数学方程,建立如下两种坐标系:以平面坐标参考系 XOY 作为攀爬机器人全局参考系,以攀爬机器人车身轴线及其垂线建立攀爬机器人局部参考系 $X'O'Y'$,如图4所示。

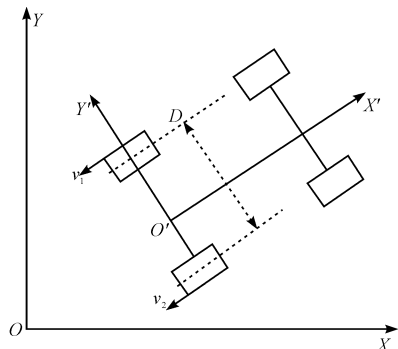


图4 攀爬机器人全局参考系和局部参考系

在全局参考系 XOY 平面内,攀爬机器人质心由坐标 $P(x, y)$ 确定。设全局参考系 XOY 横坐标轴 X 轴和局部参考系 $X'O'Y'$ 横坐标轴 X' 轴之间的夹角为 θ ,全局参考框架中,阶梯攀爬机器人上任一点 $\{x_l, y_l\}$ 的运动映射到局部参考框架 $\{x_R, y_R\}$ 中的运动方程为:

$$\dot{\xi}_R = \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_l \quad (1)$$

式中: $\dot{\xi}_l = (\dot{x}_l, \dot{y}_l, \dot{\theta})^T$; $\mathbf{R}(\theta)$ —正交旋转矩阵。

$\mathbf{R}(\theta)$ 如下式所示:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设右侧变形轮转动角速度为 φ_1 ,左侧变形轮转动角速度为 φ_2 ,此时 $v_1 = r\varphi_1$; $v_2 = r\varphi_1$,在局部参考系中:

(1) 当 $\varphi_1 \neq 0, \varphi_2 = 0$ 时,右侧变形轮速度 $v_R = r\varphi_1$,左侧变形轮速度为 $v_L = 0$,此时攀爬机器人整体将以速度 $v_p = 1/2(v_R + v_L) = r\varphi_1/2$,角速度 $\omega_1 = -r\varphi_1/4D$ 绕左侧变形轮逆时针转动,转动半径为 $D/2$ 。

(2) 当 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 \neq 0$ 时,左侧变形轮速度为 $v_L = r\varphi_2$,右侧变形轮速度为 $v_R = 0$,此时攀爬机器人整体将以速度 $v_p = 1/2(v_R + v_L) = r\varphi_2/2$,角速度 $\omega_2 = r\varphi_2/4D$ 绕左侧变形轮顺时针转动,转动半径为 $D/2$ 。

在差速驱动状况下,将两个变形轮的独立运动进行叠加可以确定攀爬机器人在局部参考系下的运动方程,由于以上速度均假设在局部参考系 $X'O'Y'$ 横坐标轴 X' 方向,速度 v_R, v_L 在 Y' 轴方向并无分量,所以:

$$\dot{\xi}_R = \begin{pmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r\varphi_1 + r\varphi_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\varphi_2 - r\varphi_1}{4D} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由前面公式可推导得出攀爬机器人在整体参考系下的运动方程为:

$$\dot{\xi}_l = \mathbf{R}^{-1}(\theta) \dot{\xi}_R = \mathbf{R}^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} \frac{r\varphi_1 + r\varphi_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\varphi_2 - r\varphi_1}{4D} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{R}^{-1}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

3 攀爬机器人避障控制

3.1 阶梯攀爬机器人控制系统设计

根据阶梯攀爬机器人机械结构及主要功能,本研究设计了阶梯攀爬机器人控制系统,该系统主要由以下部分组成:电源模块、主控芯片模块、稳压模块、电机驱动模块、超声波检测模块、电机转速检测模块、陀螺仪加速度计模块、摄像头无线传输模块。

阶梯攀爬机器人控制系统结构示意图如图5所示。

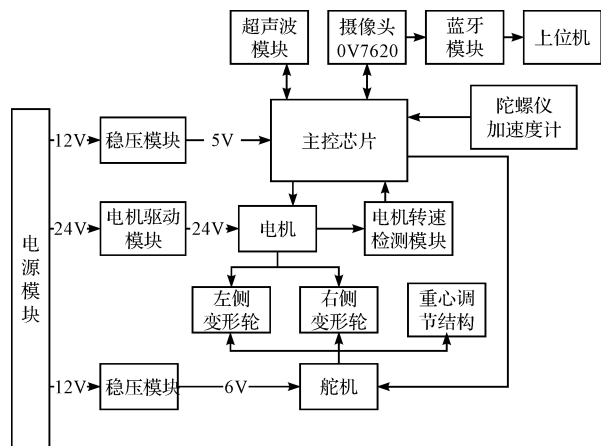


图5 阶梯攀爬机器人控制系统硬件结构图

控制方案中,电源模块由2个串联的12V锂电池组成,主控芯片选用MC9S12XS128MAL芯片,额定输入电压为5V;舵机选用SR-811E伺服电机,额定输入电压为6V;电机选用24V直流减速电机。通过安装在机器人前方的超声波传感器组检测处于机器人前方不同位置处的障碍物与机器人的距离,并将检测值与模糊控制规则进行比对,从而确定机器人前方障碍物的

具体类型。超声波传感器组按照上、下两层的方式排列在传感器支架上,其中,支架上层在正前方、左侧、右侧各安放一个超声波传感器,支架下层则在正前方、左侧、右侧、左前方、右前方各安装有一个超声波传感器。

传感器布局如图 6 所示。

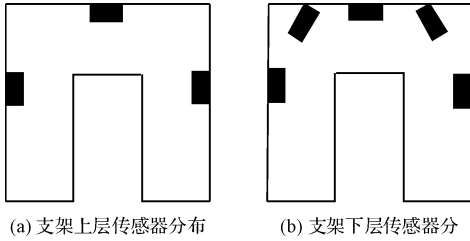


图 6 超声波传感器布局

3.2 阶梯攀爬机器人模糊控制避障规则

模糊控制基于计算机语言^[6],模仿人类控制经验,应用语言变量而不是数学变量,易于构造形成专家系统,推理过程采用“不精确推理”,推理过程模仿人类思维,能够处理复杂系统,是一种基于规则的控制方式^[7],适用于难以建立数学模型或难以捕捉动态特性的对象^[8],参数变化对控制效果影响小,具有较好的鲁棒性,控制效果优于常规控制器^[9]。而阶梯攀爬机器人属于移动机器人的一种,是一个时延、非线性不稳定系统,模糊控制可以完成阶梯攀爬机器人输入空间到输出空间的非线性映射,适合阶梯攀爬机器人的避障及阶梯攀爬控制。

阶梯攀爬机器人避障控制方案中,使用置于超声波支架底层前方、左前方、右前方的 3 个超声波传感器用于检测处于机器人前方位置并且会对机器人向前移动产生干扰的障碍物,左前方超声波传感器以及右前方超声波传感器与正前方超声波传感器夹角均为 60°。系统输入量为超声波传感器的检测值,用 d_l 、 d_c 以及 d_r 表示左前方、中间、右前方 3 个超声波传感器的测量值,定义模糊语言变量为 $\{\text{Near}, \text{Middle}, \text{Far}\} =$

$\{\text{“近”, “中”, “远”}\}$,论域为 $(0 \text{ m} \sim 4 \text{ m})$ 。输出变量 s_a 的模糊语言分为 $\{\text{TLB}, \text{TLS}, \text{TZ}, \text{TRS}, \text{TRB}\} = \{\text{“左转 } 90^\circ\text{”, “左转”, “前进”, “右转”, “右转 } 90^\circ\text{”}\}$ 。

阶梯攀爬机器人前进过程中,需根据超声传感器检测值 d_l 、 d_c 以及 d_r 的大小的不同,确定不同的输出值 s_a^* 。所建立的阶梯攀爬机器人模糊避障规则如表 1 所示。

表 1 阶梯攀爬机器人模糊避障规则

Rule	d_l	d_c	d_r	v_R	v_L	s_a^*
1	N	N	N	slow	fast	TRB
2	N	N	F	slow	normol	TRS
3	F	N	N	normol	slow	TLS
4	F	N	F	slow	normol	TRS
5	N	M	N	normol	normol	TZ
6	N	M	F	slow	normol	TRS
7	F	M	N	normol	slow	TLS
8	F	M	F	slow	normol	TRS
9	N	F	N	normol	normol	TZ
10	N	F	F	slow	normol	TRS
11	F	F	N	normol	slow	TLS
12	F	F	F	normol	normol	TZ

注: (N, M, F—Near, Middle, Far; fast, normol, slow—快速、中速、慢速)

3.3 去模糊化处理

模糊推理得到的输出量是一个模糊量^[10-11],不能直接应用于阶梯攀爬机器人控制,需对其进行去模糊化,得到精确的控制量^[12-13]。攀爬机器人模糊控制中,模糊控制的输入量为右前方传感器的测量值 d_r 、左前方传感器的测量值 d_l 、中间传感器的测量值 d_c 以及攀爬机器人运动方向与目标中心连线的距离 t_r ,以及输出量为攀爬机器人的转向角度 s_a 。假设目标处于攀爬机器人右前方的时候, t_r 为正值,其他情况下 t_r 为负值。转动角度 s_a 记为“TRB”以顺时针方向为正,逆时针方向为负,任意时刻的具体输入值为 $\{d_r^*, d_l^*, d_c^*, t_r^*\}$,输出量为 s_a ,令:

$$\begin{cases} u_{TRB}(s_a^*) = \min(u_{NEAR}(d_r^*), u_{FAR}(d_c^*), u_{NEAR}(d_l^*), u_{RB}(t_r^*)) \\ u_{TLB}(s_a^*) = \max(u_{TLB}^1(s_a^*), u_{TLB}^2(s_a^*), \dots, u_{TLB}^{40}(s_a^*)) \\ u_0(s_a) = \max(\min(u_{TBL}(s_a), u_{TLB}(s_a^*)), \min(u_{TLS}(s_a), u_{TRS}(s_a^*)), \min(u_{TZ}(s_a), u_{TZ}(s_a^*)), \min(u_{TRS}(s_a), u_{TRS}(s_a^*)), \min(u_{TRB}(s_a), u_{TRB}(s_a^*))) \end{cases} \quad (6)$$

去模糊化之后得模糊化推理控制的精确值为:

$$s_a^* = \frac{\int u_0(s_a) s_a ds_a}{\int u_0(s_a) ds_a} \quad (7)$$

爬机器人的运动方程为:

$$\dot{\xi}_l = R^{-1}(s_a^*) \dot{\xi}_R = R^{-1}(s_a^*) \begin{pmatrix} \frac{r\varphi_1 + r\varphi_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\varphi_2 - r\varphi_1}{4D} \end{pmatrix} \quad (8)$$

联立公式(5 ~ 7) 可得模糊控制方式中,阶梯攀

3.4 阶梯攀爬机器人阶梯检测

本研究在阶梯攀爬机器人传感器支架上、下两层左侧、右侧、居中位置均布置有超声波传感器,且位置相同,传感器支架上、下两层间距为 15 cm,与楼梯相邻两个台阶高度差一致,通过上下两层同侧超声波传感器的检测值,可判断楼梯所在方位。具体判断方式如下:若在短时间内,某一侧上、下两个超声波传感器检测值 $d_{ui} - d_i = \Delta i$ (Δi 为台阶宽度),则可认为所检测障碍物为阶梯,阶梯攀爬机器人变形轮开始变形,通过差速控制转向前进至台阶前,准备攀爬阶梯。差速转向控制状态下,左、右变形轮转速关系为:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{4d_i - d_c}{4\sqrt{d_i^2 + d_c^2} - \frac{d_i - d_c}{2}} \\ \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi(9) \\ v_R - v_L = \frac{4D\theta_1}{r} \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_i — 某一侧下层传感器检测值; d_c — 居中位置下层超声波检测值; φ — 某一侧传感器与台阶之间的夹角; θ_1 — 阶梯攀爬机器人转弯角度,其大小为阶梯中线与攀爬机器人轴线夹角角度; D — 左、右变形轮间距; r — 变形轮半径; v_L, v_R — 左、右变形轮线速度。

差速转向,左、右变形轮转速关系可由公式(9)确定。

4 样机实验及结果分析

所设计阶梯攀爬机器人参数如表 2 所示。

表 2 阶梯攀爬机器人参数

机器人质量/Kg	变形轮半径/m	变形轮轴距/m
18	0.15	0.4

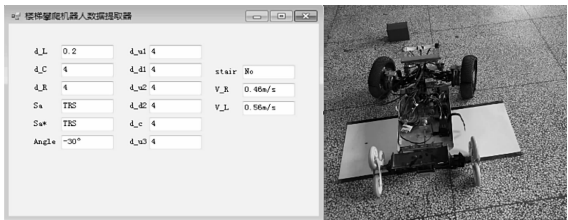
实验效果如图 7 所示。

阶梯攀爬机器人模糊控制论域为[0.2 m,4 m],实验过程中,阶梯攀爬机器人首先需要检测处于左前方的长方体障碍物,如图 7(a)所示。根据上位机显示数据可知,此时左前方、正中、右前方传感器检测值分别为 N、F、F,模糊控制输出值为 TRS,左、右变形轮转速分别为 0.4 m/s(fast)、0.56 m/s(normol),机器人向左前方转动,完成避障。

之后,阶梯攀爬机器人需要检测处于右前方的长方体障碍物,如图 7(b)所示。根据上位机显示数据可知,此时左前方、正中、右前方传感器检测值分别为 F、F、N,模糊控制输出值为 TLS,左、右变形轮转速分别为 0.55 m/s(normol)、0.45 m/s(fast),机器人向右前方转动,完成避障。

最后,阶梯攀爬机器人需要同时检测处于正前方的长方体障碍物以及右侧楼梯,如图 7(c)所示。

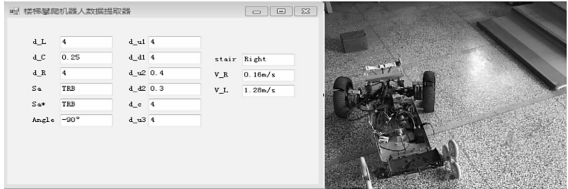
根据上位机显示数据可知,此时左前方、正中、右前方传感器检测值分别为 F、N、F,并通过对右侧上、下传感器检测值进行比对确认右侧障碍物类型为楼梯,此时模糊控制输出值为 TRB,左、右变形轮转速分别为 1.2 m/s(fast)、0.16 m/s(slow),机器人向右侧转动,完成避障并打开变形轮开始攀爬楼梯,如图 7(d)所示。



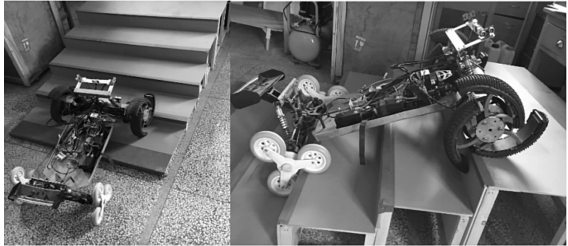
(a) 左侧障碍物检测及避障



(b) 右侧障碍物检测及避障



(c) 前向障碍物、楼梯检测及避障、攀爬



(d) 攀爬楼梯效果

图 7 阶梯攀爬机器人样机实验效果
(下转第 572 页)

本文引用格式:

杨 萍,龚林强,施俊屹,等. 阶梯攀爬机器人结构及控制方案设计[J]. 机电工程,2017,34(6):557-561,572.
YANG Ping, GONG Lin-qiang, SHI Jun-yi, et al. Structure and control scheme of stair climbing robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(6):557-561,572.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>