

摆臂轮式机器人越障过程建模及仿真*

丁毓峰, 张云群, 龚 力, 李 伟, 盛步云

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为解决在城市灾难现场,很多狭窄空间搜救人员无法进入的难题,充分利用搜救过程中轮式机器人的越障能力,首先对小型可分离式机器人进行了结构设计,并进行了越障过程的理论分析,然后使用 Matlab 对机器人的越障过程进行了运动学和静力学仿真。仿真和实验结果验证了电机驱动力矩、机器人主体与摆臂长度的比例及障碍物高度等之间的关系,为研究小型机器人在复杂环境中的越障能力提供理论依据。

关键词: 轮式机器人;越障过程;Matlab

中图分类号: TP242;TH113 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0725-05

Obstacle-surmounting modeling and simulation of wheeled Robot

DING Yu-feng, ZHANG Yun-qun, GONG Li, LI Wei, SHENG Bu-yun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to solve the problem that in the disaster site of city, it is not easy for a person to enter into many narrow space, and make full use of wheeled robots to conduct, search and rescue, the detachable robot structure was designed firstly, and the process of obstacle-surmounting was analyzed in theory, and then kinematics and statics simulation of the robot was carried out by using Matlab. The simulation and experimental results of the motor drive torque verify the relationship between the main body of the robot arm length ratio and height, provide a theoretical basis for the more impaired ability of the small robot in complex environments.

Key words: wheeled robot; obstacle process; Matlab

0 引 言

多机器人协同进行搜索和营救是机器人学中的一个重要研究课题,吸引了国内外学者的广泛关注与研究。近年来,对这一问题的研究主要集中在两个方面:一是多机器人路径规划问题^[1];二是多机器人协同方法的研究^[2-3]。但是两者都只是基于理论的研究,所使用的试验平台也基本以平坦的地面为主。灾难现场环境复杂,对单个机器人的自主越障能力提出了更高的要求。

为了实现多机器人在复杂环境中的协同,这就要求单个搜救机器人具有很好的越障能力。许多文献针对不同形式的机器人,分析了影响其越障能力的因素。研究人员分别分析了两节履带机器人^[4]、关节式

轮式机器人^[5]、三节履带机器人^[6]和多单元机器人^[7]对跨越垂直障碍和壕沟的影响,但是没有建立完整的数学模型,没有对机器人越障的整个过程进行完整描述与定量分析。

针对城市灾难现场搜救问题,本研究对机器人越障机理进行分析,并设计相应的可分离式机器人组合结构。为增加其越障能力,在机器人前部添加可 360° 回转的摆臂,后部添加优化机器人主体长度与摆臂长度比例的辅助推力装置,可以快速与主体脱离(也可再次结合),以增强主体在平坦路面上的机动性。通过使用 Matlab 对越障过程进行了建模和仿真,并采用自主研发的单关节轮式移动机器人进行实验验证。

收稿日期:2012-02-16

基金项目:湖北省国际科技合作重点项目(2009BFA003)

作者简介:丁毓峰(1972-),男,吉林通化人,副教授,主要从事数字制造、多机器人系统、系统可靠性与维修方面的研究。E-mail:dingyf@whut.edu.cn

1 机器人越障机理

1.1 单关节轮式机器人结构

本研究以机器人后轮轴心为坐标原点,建立坐标系 xO_1y , 设机器人主体部分前后轮 O_1O_2 的间距为 S_1 , 主体部分的质量为 m_1 , 质心 G_1 的坐标为 (l_1, h_1) ; 设两摆臂长度 O_2O_3 为 S_2 , 摆臂质量为 m_2 , 质心 G_2 处于摆臂中心线 O_2O_3 上, 距离主驱动轮轴心 O_2 的长度为 l_2 , 摆臂的摆角为 θ , 且 $\theta \in [0, 2\pi]$; 设主体轮半径为 R , 摆臂轮半径为 r , 机器人宽度为 b 。

单关节轮式机器人结构如图1所示。

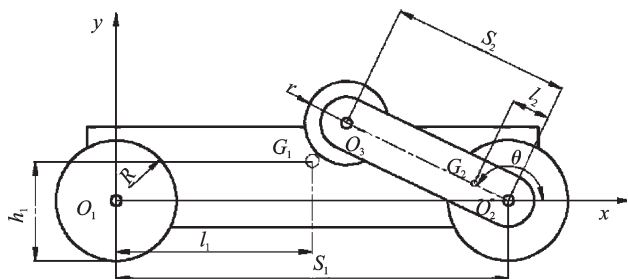


图1 单关节轮式机器人结构

轮式与履带式机器人最大的不同之处在于,轮式机器人与地面间是点接触,履带则是面接触,这样轮式机器人的每一个姿态必须有两个点与地面接触才能保持稳定。该机器人采用单关节轮式结构,可以正向攀越台阶^[8]。

1.2 机器人主体的结构设计

通过分析机器人的越障机理及其结构尺寸的关系可知,机器人重心的偏移与机器人主体长度的伸长是一个矛盾的问题,主体尺寸过长还会导致机器人在平面上机动性能的减弱,为解决这两个矛盾,本研究设计了为机器人翻越台阶的辅助越障机构,设计图如图2所示。图2中,1号部件为辅助越障机构,它质量轻,主要起到支撑及增长主体尺寸的目的,并且能够快速与主体部分分离,增强机器人平面的机动性。

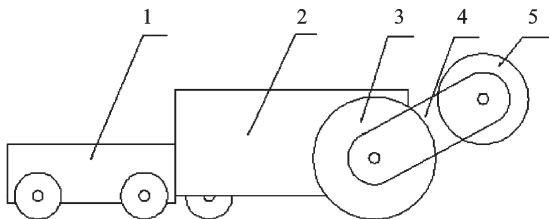


图2 机器人结构设计

机器人翻越障碍物能力主要受两方面因素决定:

(1) 机器人摆臂的可达高度。这是机器人越障极限的决定因素。设机器人摆臂宽度为 d , 则机器人摆臂的最大可达高度为: $H_{\max} = S_2 + R - r$ 。

(2) 机器人翻越障碍物的最大高度又要受机器人

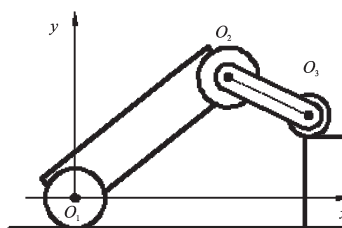
重心位置 l_1 及机器人主体长度 S_1 决定。通过分析机器人翻越时各部分尺寸的力学关系,可以得出机器人主体尺寸必须大于 $S_{1\min} = (H_{\max} + r + S_2 - R) / \sin \alpha$, α 为机器人最大倾斜角度,为保证机器人的稳定, $\alpha = 75^\circ$ 。且 $S_{1\min} - l_1 < S_2$ ($l_1 \approx 0.69S_1$), 这样以保证其翻越时重心能够越过台阶。

2 搜索机器人越障过程建模与仿真

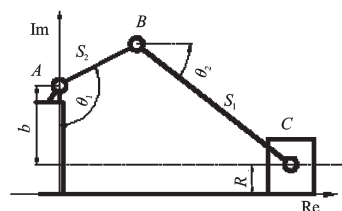
机器人翻越台阶的过程可以简化为3个阶段:第一阶段,机器人重心抬升过台阶边缘线;第二阶段,机器人整体平移;第三阶段,机器人在摆臂和质心的共同作用下翻上台阶。

2.1 机器人模型简化

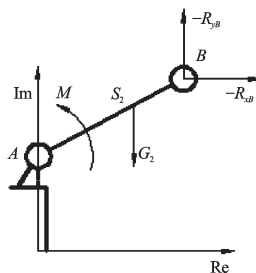
通过分析机器人的翻越过程,本研究可将机器人翻越的第一阶段简化为曲柄滑块机构,简化方式如图3(b)所示,机器人主体简化为机构中的连杆 S_1 ; 摆臂



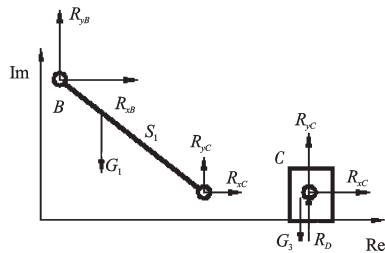
(a) 机器人模型



(b) 简化为曲柄滑块机构



(c) 曲柄部分



(d) 连杆和滑块

图3 第一阶段建模

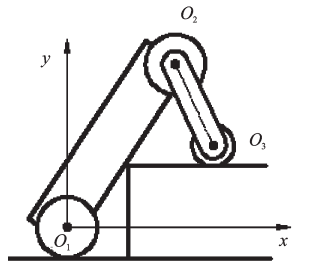
简化为机构中的曲柄 S_2 ;摆臂轮与台阶的接触点简化为固定铰链 A ;机器人主体与摆臂的连接点简化为活动铰链 B ;机器人后轮部分简化为滑块 C 。

2.2 机器人运动学分析

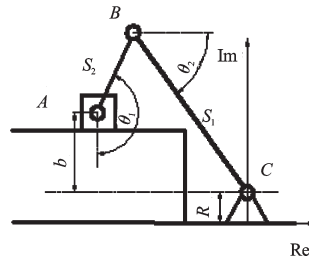
本研究模型划分为两个杆组,一个是由 S_2 构成的曲柄,一个是连杆 S_1 和滑块 C 组成的杆组。如图4(b)所示,本研究设曲柄 S_2 为常数,幅角 θ_1 为变量;连杆 S_1 长度为常量,连杆 S_1 的幅角 θ_2 为变量,滑块 C 相对于原点 O 的位移 s 为变量,则可得曲柄、连杆、滑块的关系方程为:

$$\vec{B} = \vec{A} + \vec{S}_2 = S_2 e^{j(\theta_1 - \frac{\pi}{2})} \quad (1)$$

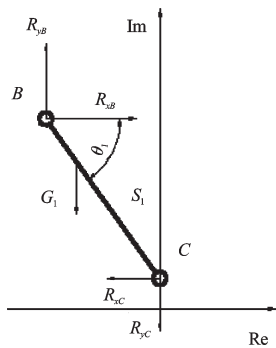
$$\vec{C} = \vec{B} + S_1 e^{j\theta_2} = \vec{O} + \vec{s} \quad (2)$$



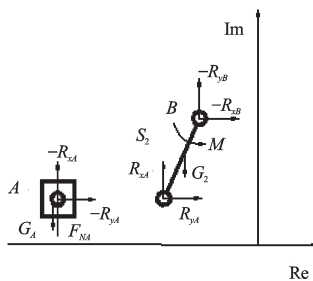
(a) 机器人模型



(b) 曲柄滑块机构模型



(c) 连杆 BC



(d) 滑块和连杆的受力

图4 第三阶段建模

式中: $\vec{O}-C$ 的 Im 轴初矢量。

式(1)两边对时间求二阶导,得铰链 B 的加速度方程为:

$$\begin{bmatrix} \text{Re} \ddot{B} \\ \text{Im} \ddot{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_2 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + S_2 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) \\ S_2 \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + S_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(2)求一阶导,得滑块 C 的速度关系方程:

$$\begin{bmatrix} S_1 e^{j(\theta_2 + \frac{\pi}{2})} - e^{j0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \dot{O} - \dot{B} \quad (4)$$

对式(2)求二阶导,得加速度关系方程:

$$\begin{bmatrix} S_1 \cos(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & -1 \\ S_1 \sin(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{s} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} S_1 \cos(\theta_2 + \pi) & 0 \\ S_1 \sin(\theta_2 + \pi) & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Re} \ddot{O} - \text{Re} \ddot{B} \\ \text{Im} \ddot{O} - \text{Im} \ddot{B} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 机器人静力学分析

机器人各个部分受力情况如图4(c)、(d)所示,本研究设连杆 S_1 的质量为 m_1 ,转动惯量为 J_1 ;曲柄 S_2 的质量为 m_2 ,转动惯量为 J_2 ,曲柄受到的外力矩为 M ;滑块的质量为 m_3 。则可得 A 、 B 、 C 点的受力关系方程为:

$$\begin{bmatrix} R_{xA} \\ R_{yA} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 \text{Re} \ddot{A} + m_2 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + m_2 l_2 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) + R_{xB} \\ m_2 \text{Im} \ddot{A} + m_2 l_2 \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + m_2 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) + R_{yB} + m_2 g \\ J_2 \ddot{\theta}_1 - R_{xB} S_2 \sin(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) + R_{yB} S_2 \cos(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) + m_2 g l_2 \cos(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 \sin(\theta_2) & S_1 \sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{xB} \\ R_{yB} \\ R_{xC} \\ R_{yC} \\ R_D \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} m_1 \text{Re} \ddot{B} + m_1 (S_1 - l_1) \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) + m_1 (S_1 - l_1) \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2 + \pi) \\ m_1 \text{Im} \ddot{B} + m_1 (S_1 - l_1) \ddot{\theta}_2 \sin(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) + m_1 (S_1 - l_1) \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_2 + \pi) + m_1 g \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + m_1 g l_1 \cos(\theta_2) \\ m_3 \ddot{s} \\ m_3 g \end{bmatrix} \quad (7)$$

第二阶段为第一阶段的最终状态平移,具体分析略。第三阶段模型可简化为另一组曲柄滑块机构,如图4(b)所示,原固定铰链A简化为滑块,原滑块C简化为固定铰链。

可推导出运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} S_1 \cos(\theta_2 + \frac{2}{3}\pi) & -1 \\ S_1 \sin(\theta_2 + \frac{2}{3}\pi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \pi) \\ -S_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 + \pi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

动力学方程为:

$$\begin{bmatrix} R_{xC} \\ R_{yC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \text{Re} \dot{C} + m_1 l_1 \ddot{\theta}_2 \cos(-\theta_2 + \frac{\pi}{2}) - m_1 l_1 \dot{\theta}_2^2 \cos(-\theta_2 + \pi) + R_{xB} \\ -m_1 \text{Im} \dot{C} + m_1 l_1 \ddot{\theta}_2 \sin(-\theta_2 + \frac{\pi}{2}) - m_1 l_1 \dot{\theta}_2^2 \sin(-\theta_2 + \pi) + R_{yB} - m_1 g \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ S_1 \sin(-\theta_2) & S_1 \cos(\theta_2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{xB} \\ R_{yB} \\ R_{xA} \\ R_{yA} \\ F_{NA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 \text{Re} \dot{A} + m_2 l_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + m_2 l_2 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) \\ m_2 \text{Im} \dot{A} + m_2 l_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + m_2 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 + \frac{\pi}{2}) + m_2 g \\ m_3 \ddot{s} \\ m_3 g \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + m_1 g l_1 \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.4 机器人Matlab仿真

根据建立的运动学和静力学的数学模型,本研究在Matlab/Simulink中建立仿真模型,并进行分析,通过仿真得出机器人在翻越障碍物的3个阶段的角位移、速度、加速度的变化情况,如图5所示。

3 机器人越障能力的理论与实测值验证

为了验证计算机仿真结果的正确性,本团队自主开发了一个小型搜救轮式机器人,其实际结构如图6(a)所示。机器人越障过程在计算机上的三维动画仿真过程如图6(b)所示。

实际物理环境选择在实验室进行,地面为平坦的地板,在2 000×2 000 mm的范围内布置了楼梯类斜坡(高度为100 mm)、狭窄小洞穴、无法翻越的障碍物等物体。机器人的基本结构参数为:高度80 mm,子机器人到母机器人的最大轮距为253 mm,摆臂长度93 mm。母机器人大轮半径46 mm。

为了进行实验验证,本研究首先将机器人基本参数代入数学模型,通过计算可以求得机器人越障最大高度的理论值为105 mm,机器人受到的最大转矩理论值为1.5 N·m。

在本研究构建的灾难现场模拟环境中,笔者使用小型搜救轮式机器人在楼梯类斜坡处进行越障实验,经过多次实验,可以获得机器人可以攀爬的台阶最大

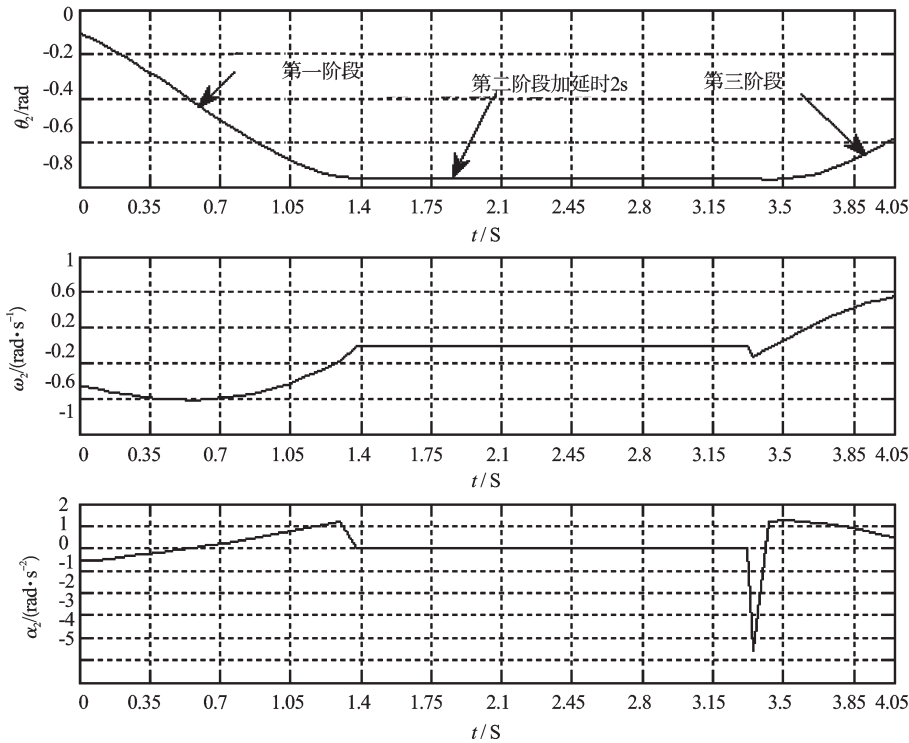
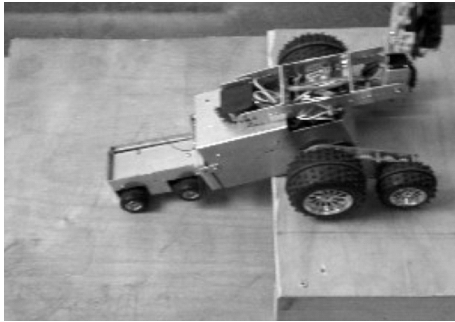
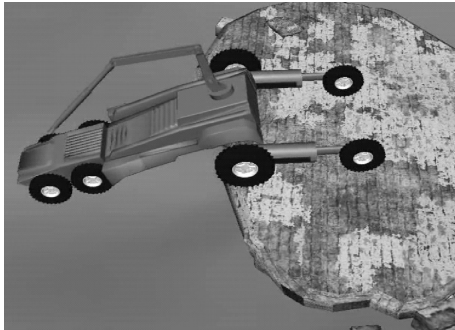


图5 机器人翻越过程的角位移、速度、加速度变化



(a) 物理实验



(b) 越障仿真

图6 机器人翻越过程的仿真环境和物理实验

高度为 109 mm, 针对每次固定的台阶高度, 可以获得最大转矩和越障时间值。机器人样机越障能力的理论值与实测值如表 1 所示。

表 1 机器人样机越障能力的理论值与实测值

	攀爬台阶最大高度 $H_{\max}/\text{mm}$	最大转矩 $/\text{N} \cdot \text{m}$	越障时间 $/\text{s}$
理论值	105	1.5	5
实测值	109	2.3	13

本研究分析实验结果, 发现由于轮式机器人轮子的运动速度很快, 在翻越障碍物的过程中能够产生一定的惯性冲击力, 使得翻越台阶的最大高度高于理论值。但是轮式机器人轮部受到的正压力随着机器人姿势的变化而变化, 有时会导致轮子出现打滑现象, 会使得机器人的驱动力矩大于理论值, 所以最大转矩和越障时间都大于理论值。

4 结束语

本研究从运动学的角度, 在典型单关节轮式越障机理的基础上, 分析了摆臂轮式机器人的越障能力受

到哪些因素的影响, 推导出了机器人长度、摆臂长度与重心位置间的关系, 优化设计了机器人结构, 重点分析了轮式机器人越障的整个过程中各个变量的变化情况。最后对机器人的运动性能进行了验证。本研究为轮式机器人越障策略、结构设计、驱动模块选型及控制设计提供了理论依据。

本研究所搭建的进行物理实验的环境比较简单, 实际的灾难现场比本研究的实验环境要更复杂, 对机器人的越障能力和越障策略将提出更高的要求, 这是下一步将要继续研究的方向。

参考文献(References):

- [1] CHAKRABORTY J, KONAR A, JAIN L C, et al. Cooperative multi-robot path planning using differential evolution [C]// Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation 2009. Portugal: [s.n.], 2009: 2120–2126.
- [2] FAN J, FEI M R, SHAO L K, et al. A Novel Multi-robot co-Ordination Method based on Reinforcement Learning [C]// Proceedings of Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), v 5226 LNCS. Portugal: [s.n.], 2008: 1198–1205.
- [3] 吴良霞, 李国阳, 韦 巍. 基于 WLAN 的多机器人分布式合作系统研究, 机电工程, 2006, 22(5): 32–36.
- [4] 信建国, 李小凡, 王忠, 等. 履带腿式非结构环境移动机器人特性分析[J]. 机器人, 2004, 26(1): 35–39.
- [5] 徐正飞, 杨汝清, 王 韬. 关节式移动机器人的越障运动[J]. 中国机械工程, 2003, 14(12): 1052–1055.
- [6] MASAYUKIA, TAKAYAMA T, HIROSE S. Development of Souryu-3 Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space [C] // Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.L.]: IEEE, 2004: 52–58.
- [7] LIU Jing-guo. Transformation Technique Rresearch of the Improved Link-type Shape Shifting Modular Robot [C] // Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation. [S.L.]: IEEE, 2006: 295–300.
- [8] GONG Li, DING Yu-feng, SHENG Bu-yun, et al. The Obstacle-surmounting Process Simulation of Arm-swing Wheeled Robot based on Matlab [C] // Proceedings of IC-MSE 2011. Rome: [s.n.], 2011: 1244–1248.

[编辑: 李 辉]