

# 基于循环抑制 CPG 模型控制的 蛇形机器人三维运动

卢振利<sup>1,3,4</sup> 马书根<sup>1,2</sup> 李斌<sup>1</sup> 王越超<sup>1</sup>

**摘要** 具有三维运动能力和独特的节律运动方式,使生物蛇能在复杂的地形环境中生存.大多数动物节律运动是由中央模式发生器(Central pattern generator, CPG)控制的.以此为理论依据,首次以循环抑制建模机理构建蛇形机器人组合关节运动控制的 CPG 模型.证明该模型是节律输出型 CPG 中微分方程维数最少的.采用单向激励方式连接该类 CPG 构建蛇形机器人三维运动神经网络控制体系,给出该 CPG 网络产生振荡输出的必要条件.应用蛇形机器人动力学模型仿真得到控制三维运动的 CPG 神经网络参数,利用该 CPG 网络的输出使“勘查者”成功实现三维运动.该结果为建立未探明的生物蛇神经网络模型提供了一种全新的方法.

**关键词** 蛇形机器人, 三维运动, 循环抑制, 中央模式发生器(CPG), 稳定性分析  
**中图分类号** TP510.80

## 3-dimensional Locomotion of a Snake-like Robot Controlled by Cyclic Inhibitory CPG Model

LU Zhen-Li<sup>1,3,4</sup> MA Shu-Gen<sup>1,2</sup> LI Bin<sup>1</sup> WANG Yue-Chao<sup>1</sup>

**Abstract** With 3D movement's ability and rhythmic locomotion mode, a nature snake makes itself survive in rugged terrains. The rhythmic activities of most creatures are generated by the CPG (Central Pattern Generator). Based on this fact, the sustained-type neuron has been adopted to construct a cyclic inhibitory CPG model for a snake-like robot whose joints are perpendicularly connected in series. The cyclic inhibitory CPG was proven to be able to generate rhythmic output with the least number of differential equations. The neuron network organized by the CPGs connected in line with unilateral excitation has been introduced to control the 3D locomotion of the snake-like robot, and then the necessary condition is also presented for the CPG neuron network to sustain a rhythmic output. By implementing this control architecture to a simulator of a snake-like robot, preliminary parameters of the CPG neuron network for its 3D locomotion are obtained. Moreover, it is known that "Perambulator" can successfully exhibit 3D locomotion by using the output of the proposed CPG network. The obtained results have also provided a brand-new approach to understand the unknown neuron network of nature snake.

**Key words** Snake-like robot, 3-dimensional locomotion, cyclic inhibition, central pattern generator (CPG), stability analysis

## 1 引言

生物蛇具有三维运动能力和独特的节律运动方

式,使其可以在崎岖不平的环境中运动,而且具有很好的稳定性<sup>[1]</sup>.模仿蛇结构和运动的蛇形机器人在国内外得到了广泛关注和研究.日本东京工业大学的 Hirose 教授研制 ACM-R3<sup>[2]</sup>等蛇形机器人,并应用空间形状组合控制方法实现了多种三维运动;德国 GMD 研制了柔索蛇形机器人<sup>[3]</sup>,但其运动较难控制;Ma 通过耦合驱动设计了三维蛇形机器人<sup>[4]</sup>,其具有重量轻,输出力矩大,无奇异点等特性.

大多数动物的节律运动是其低级神经中枢的一种自激行为,是由中央模式发生器(Central pattern generator, CPG)控制的<sup>[5]</sup>.许多学者根据不同的生物模型对 CPG 进行了大量的数学建模<sup>[6,7]</sup>.现在行走类机器人控制应用最多的是 Matsuoka<sup>[8]</sup>提出的具有调整功能的神经元组成的相互抑制 CPG 模型<sup>[9,10]</sup>.该 CPG 模型在解决蛇形机器人平面二维运

收稿日期 2005-12-8 收修改稿日期 2006-4-26  
Received December 8, 2005; in revised form April 26, 2006  
国家自然科学基金(60375029),国家“863”计划(2001AA422360),  
日本学术振兴会科学研究补助金“JSPS”(15360129)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of  
P. R. China (60375029), the National Hi-tech Research and De-  
velopment Plan (2001AA422360), and Japan Society for the Pro-  
motion of Science (15360129)  
1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳  
110016 2. 日本立命馆大学 COE(Center of Excellence)推进机  
构 滋贺 525-8577 日本 3. 沈阳理工大学 沈阳 110168 4.  
中国科学院研究生院 北京 100039  
1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation,  
Shenyang 110016 2. Organization for Promotion of the  
COE Program, Ritsumeikan University 525-8577, Japan 3.  
Shenyang Ligong University, Shenyang 110168 4. Graduate  
University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039  
DOI: 10.1360/aas-007-0054

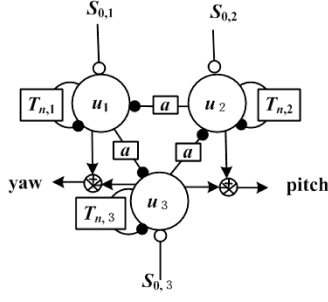


图 1 循环抑制 CPG 模型

Fig. 1 Cyclic inhibitory CPG model

动的关节控制中有较好的应用<sup>[11]</sup>.

本文针对蛇形机器人组合关节(相邻关节电机转轴正交连接)提出一种全新的循环抑制 CPG 模型. 该 CPG 中的神经元不需要具有调整功能, 其产生振荡输出的机制是神经元之间具有强的循环抑制连接, 这完全不同于相互抑制 CPG. 循环抑制 CPG 模型中三个神经元的两两组合很好的实现了对组合关节的控制, 比相互抑制 CPG 控制组合关节减少一半的微分方程数量, 降低了系统的计算量.

## 2 循环抑制 CPG 模型

依据循环抑制建模原理, 采用持续型(Sustained-type)神经元<sup>[12]</sup>构建 CPG 模型, 如图 1 所示. 该循环抑制 CPG 模型由偏航神经元  $n_y$ , 俯仰神经元  $n_p$  和调节神经元  $n_m$  构成. 其动力学表示如下

$$T_{n,1} \dot{u}_1 + u_1 = S_{0,1} - ag(u_2) \quad (1)$$

$$T_{n,2} \dot{u}_2 + u_2 = S_{0,2} - ag(u_3) \quad (2)$$

$$T_{n,3} \dot{u}_3 + u_3 = S_{0,3} - ag(u_1) \quad (3)$$

$$y_i = g(u_i) \quad g(u_i) = \max(0, u_i) \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$y_{out} = y_1 - y_3 \quad (5)$$

$$p_{out} = y_2 - y_3 \quad (6)$$

其中,  $a$  为循环抑制连接权重 ( $>0$ );  $u_1$ 、 $u_2$  和  $u_3$  分别为  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的薄膜潜能;  $T_{n,1}$ 、 $T_{n,2}$  和  $T_{n,3}$  分别为  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的薄膜潜能时间常量;  $S_{0,1}$ 、 $S_{0,2}$  和  $S_{0,3}$  分别为  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的所有激励输入与突触连接权重的乘积 (除了该 CPG 内的神经元外), 这里取常量 ( $>0$ );  $y_1$ 、 $y_2$  和  $y_3$  分别为  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的输出;  $y_{out}$  为控制关节偏航运动的 CPG 输出信号;  $p_{out}$  为控制关节俯仰运动的 CPG 输出信号.

由文献 [12] 可知: 两个该类持续型神经元应用相互抑制建模机理构成的 CPG 不能产生振荡输

出. 通过证明构成该循环抑制 CPG 的方程组没有稳定的稳态解, 并且对应的解是有界的, 则可说明该 CPG 能产生振荡的输出信号. 由方程 1、2 和 3 可知其在这些稳定状态邻域内是严格线性的, 研究该线性微分方程组的特征方程可得到对应稳态解的稳定性.

设定  $T_{n,1} = T_{n,2} = T_{n,3} = \tau$ ; 该 CPG 模型的特征根为  $\lambda$ . 计算得到

1) 单个和两个神经元激活时

$$\lambda_{1,2,3} = -\frac{1}{\tau} \quad (7)$$

系统是稳定的.

2) 三个神经元激活时

$$\lambda_1 = -\frac{1+a}{\tau}, \lambda_{2,3} = -\frac{2-a}{2\tau} \pm \frac{\sqrt{3}a}{\tau}i \quad (8)$$

此时, 系统不稳定的条件是: 参数  $a \leq -1$  或者  $a \geq 2$ . 但是, 参数  $a \leq -1$  时神经元的输出是单调增加, 不能用于工程控制. 所以采用循环抑制 ( $a \geq 2$ ) 建模机理构建该 CPG 模型.

该循环抑制 CPG 的稳态输出有界性证明如下. 证明. 通过对循环抑制 CPG 的动力学模型积分得到

$$u_i(t) = \frac{1}{\tau} u_i(0) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{\tau} s_{0,i} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) - \frac{a}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \int_0^t g(u_j(x)) e^{\frac{x}{\tau}} dx \quad (9)$$

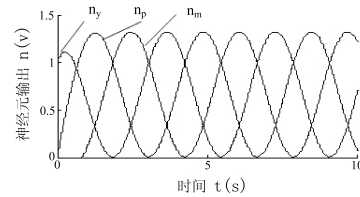


图 2 神经元阶跃响应

Fig. 2 Step response of the neurons  
( $T_{n,1} = T_{n,2} = T_{n,3} = 1$ ,  $S_{0,1} = S_{0,2} = S_{0,3} = 1$ ,  $a = 2$ )

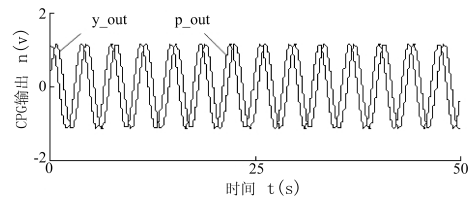


图 3 循环抑制 CPG 输出

Fig. 3 Output of the cyclic inhibitory CPG  
( $T_{n,1} = T_{n,2} = T_{n,3} = 1$ ,  $S_{0,1} = S_{0,2} = S_{0,3} = 1$ ,  $a = 2$ )

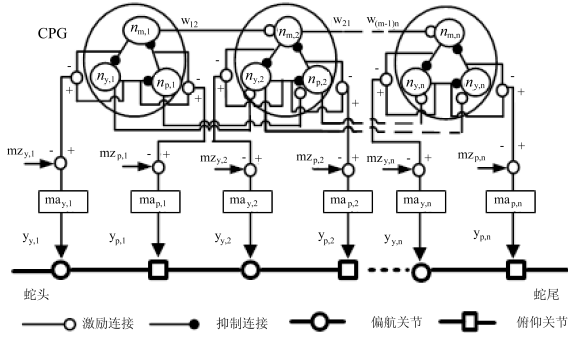


图 4 蛇形机器人 CPG 控制系统

Fig. 4 CPG control system of the snake-like robot

式中  $i = 1, j = 2; i = 2, j = 3; i = 3, j = 1$ . 此处强调是循环抑制连接 ( $a > 0$ ), 那么得到该 CPG 中神经元输出的上界为

$$u_i(t) \leq \frac{1}{\tau} (|u_i(0)| + |S_{0,i}|) \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

由于  $g(u_j(x)) (j = 1, 2, 3)$  是一个有界的函数, 范围是  $(0, |u_j(0)| + |S_{0,j}|)$ . 所以该 CPG 中神经元输出的下界为

$$u_i(t) \geq -\frac{1}{\tau} (|u_i(0)| + |S_{0,i}|) - \frac{a}{\tau} (|u_j(0)| + |S_{0,j}|) \quad i = 1, j = 2; i = 2, j = 3; i = 3, j = 1 \quad (11)$$

□

由此得到当参数  $a \geq 2$  时, 该循环抑制 CPG 及其神经元可以产生振荡输出, 如图 2 和图 3 所示.

综上, 该 CPG 模型是能产生蛇形机器人组合关节实现三维运动节律信号的 CPG 模型中微分方程维数最少的.

### 3 蛇形机器人三维运动循环抑制 CPG 控制系统

采用上述循环抑制 CPG 模型, 以单向激励串联方式构建了由组合关节构成的蛇形机器人 CPG 神经网络控制系统, 如图 4 所示. 该 CPG 控制系统的动力学表示如下

$$T_{\{y,p,m\},i} \dot{u}_{\{y,p,m\},i} = -u_{\{y,p,m\},i} + w_{\{y,p,m\},i} y_{\{m,y,p\},i} + S_{0,\{y,p,m\},i} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{\{y,p,m\},j} \quad (12)$$

$$y_{\{y,p,m\},i} = \max(0, u_{\{y,p,m\},i}) \quad (13)$$

$$c_{out\{y,p\},i} = ma_{\{y,p\},i} ((y_{\{y,p\},i} - y_{m,i}) - mz_{\{y,p\},i}) \quad (14)$$

$$mz_{\{y,p\},i} = \frac{\sum_{j=r}^{r+q-1} (y_{\{y,p\},i,j} - y_{m,i,j})}{q} \quad (15)$$

$$ma_{\{y,p\},i} = \alpha_{max} \frac{\max(y_{\{y,p\},i})}{\max(y_{\{y,p\},j})} \quad j = 1, \dots, n \quad (16)$$

其中,  $u_{\{y,p,m\},i}$  各自代表第  $i$  个 CPG 中  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的薄膜潜能;  $T_{\{y,p,m\},i}$  各自代表第  $i$  个 CPG 中  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的薄膜潜能时间常量;  $w_{\{y,p,m\},i}$  各自代表第  $i$  个 CPG 中  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的循环抑制连接权重系数;  $w_{ij}$  各自代表第  $i$  个与第  $j$  个 CPG 之间的连接权重系数, 设定相邻 ( $i = j - 1$ ) 的 CPG 间连接权重系数取常数, 其余均取 0;  $S_{0,\{y,p,m\},i}$  各自代表第  $i$  个 CPG 中  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的所有激励输入与突触连接权重的乘积 (除了该 CPG 内的神经元外), 这里取常量 ( $>0$ );  $y_{\{y,p,m\},i}$  各自代表第  $i$  个 CPG 中  $n_y$ 、 $n_p$  和  $n_m$  的输出;  $c_{out\{y,p\},i}$  各自代表控制第  $i$  个组合关节偏航运动、俯仰运动的 CPG 的输出信号;  $ma_{\{y,p\},i}$  各自代表控制第  $i$  个组合关节偏航运动、俯仰运动的幅值调整系数;  $mz_{\{y,p\},i}$  各自代表控制第  $i$  个组合关节偏航运动、俯仰运动的相位调整系数;  $n$  为神经网络中 CPG 总数;  $i, j$  为机器人组合关节系数, 取值范围是  $1 \sim n$ ;  $\alpha_{max}$  为机器人转角范围参数;  $r$  为稳态域内优化采样起始点;  $q$  为稳态域内优化采样时间范围.

由三角行列式的计算规则得到单向激励连接该类 CPG 构成的网络产生振荡输出的必要条件是: 网络中每个 CPG 内的循环抑制连接权重参数  $w_{\{y,p,m\},i} \geq 2, i = 1, \dots, n$ .

表 1 “勘查者”参数

Table 1 Parameters of “Perambulate”

关节数 ( $N$ )	8 (俯仰 4, 偏航 4)
尺寸 ( $U/m^3$ )	$0.7 \times 0.055 \times 0.055$
关节质量 ( $m_u/kg$ )	0.2
力矩 ( $T/N \cdot m$ )	0.84
功率 ( $P/w$ )	1.2
关节空间 ( $W/^\circ$ )	$\pm 90$

### 4 仿真

按照表 1 中“勘查者”蛇形机器人本体参数, 应用 ADAMS 软件环境建立了三维蛇形机器人动力学仿真模型. 蛇形机器人与环境之间为库仑摩擦, 静摩擦系数为 0.3, 动摩擦系数为 0.1. 应用该动力学模型对该 CPG 网络的输出进行了仿真, CPG 神经网络参数如表 2 所示. 该参数是通过反复试验观察

其对模型的构形和运动的影响, 从中选取较好的一组值.

表 2 CPG 神经网络参数

Table 2 Parameters of the CPG neuron network

$s_{0,\{y,p,m\},i}/V (i=1,\dots,4)$	1
$T_{n,i}/s$	0.3
$w_{\{y,p,m\},i}/V$	2
$w_{ij} (j=i+1)$	2
$\alpha_{max}/(rad)$	$\pi/3$
$r/s$	10
$q/s$	30

该 CPG 网络输出经过式 15、16 优化后, 得到的波形控制信号如图 5 和图 6 所示. 约 5s 达到稳定的振荡输出.

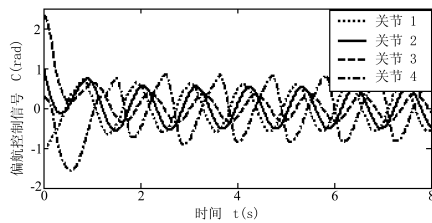


图 5 优化后 CPG 神经网络的偏航关节控制信号

Fig. 5 Yaw joint signal of the optimized CPG neuron network

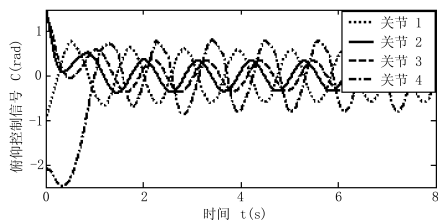


图 6 优化后 CPG 神经网络的俯仰关节控制信号

Fig. 6 Pitch joint signal of the optimized CPG neuron network

以此作为蛇形机器人关节相对转角的输入控制量, 进行了动力学仿真. 仿真运行时间是 50s, 采样周期是 0.2s, 结果如图 7 所示.

机器人模型成功实现了三维运动. 蛇头向左移动是 0.84m, 平均速度是 0.017m/s; 向前移动是 0.21m, 平均速度是 0.004m/s, 机器人模型构形水平方向最大波形幅值 0.12m, 垂直方向最大波形幅值 0.08m.

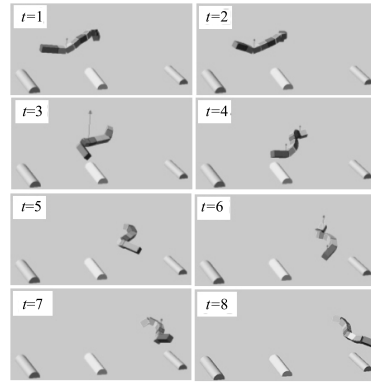


图 7 三维动力学模型运动过程

Fig. 7 Locomotion of the 3D dynamic model

## 5 试验

为验证该循环抑制 CPG 控制体系的有效性, 应用“勘查者”蛇形机器人进行了试验. 试验中的地面是光滑地板. 试验中采用的 CPG 控制体系参数如表 2 所示. 试验运行时间是 50s, 采样周期是 0.2s, 结果如图 8 所示.

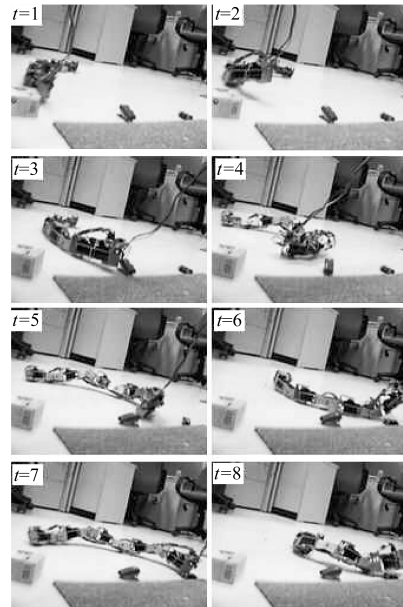


图 8 “勘查者”运动过程

Fig. 8 Locomotion of “Perambulator”

蛇头向左移动是 0.4m, 平均速度是 0.008m/s; 向前移动是 0.1m, 平均速度是 0.002m/s; 机器人模型构形水平方向最大波形幅值 0.13m, 垂直方向最大波形幅值 0.09m. 试验结果表明“勘查者”在该循环抑制 CPG 控制体系的输出控制下成功实现了三维运动.

蛇形机器人机构和环境不能完全与仿真环境设定吻合,使试验结果与仿真结果有一定的差异,但能从趋势上反映以上参数设定策略是正确的。

## 6 结束语

基于循环抑制建模机理,首次应用持续型神经元建立了蛇形机器人组合关节运动控制 CPG 模型,并证明了其是应用最少数目微分方程构建的能产生稳定振荡输出的 CPG 模型。采用单向激励连接该类 CPG 构建了蛇形机器人三维运动神经网络控制体系,给出了该 CPG 控制体系产生稳定振荡输出信号的必要条件。最后,通过仿真与实验验证了该 CPG 控制体系控制蛇形机器人实现三维运动的有效性。该结果为建立蛇运动控制的神经网络模型提供了全新途径。

## References

- Hirose S. *Biologically Inspired Robots-Snake-Like Locomotor and Manipulator*. Oxford: Oxford University Press, 1993. 1~13
- Mori M, Hirose S, Yamada H. Design and development of active cord mechanism "ACM-R3" and its 3-dimensional locomotion control. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2005, **23** (7): 120~131(in Japanese)
- Paap K, Dehlwisch M, Klaassen B. GMD-Snake: a Semi-Autonomous Snake-Like Robot. In: 3rd International Symposium on Distributed Autonomous Robot Systems (DARS 96). Saitama City, Japan. IEEE, 1996. 29~31
- Ma S G, Lan G P, Tanabe Y, Sasaki R, Inoue K. A serpentine robot based on 3 DOF coupled-driven joint. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2004). 2004. 70~75
- Wilson D M. The central nervous control of flight in a locust. *Journal of Experimental Biology*, 1961, **38**: 471~490
- Hodgkin A L, Huxley A F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *Journal of Physiology*, 1952, **117** (4): 500~544
- Golubitsky M, Stewart I, Buono P L, Collins J J. A modular network for legged locomotion. *Physica D*, 1998, **115** (1): 56~72
- Matsuoka K. Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators. *Biological Cybernetics*, 1987, **56** (5-6): 345~353
- Kimura H, Fukuoka Y, Konaga K. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot using a neural system model. *Advanced Robotics*, 2001, **15** (8): 859~878
- Taga G, Yamaguchi Y, Shimizu H. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics*, 1991, **65** (3): 147~159
- Inoue K, Ma S, Jin C H. Neural oscillator network-based controller for meandering locomotion of snake-like robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. 5064~5069
- Matsuoka K. The dynamic model of binocular rivalry. *Biological Cybernetics*, 1983, **49** (3): 201~208



**卢振利** 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生,研究领域为蛇形机器人、机器人智能控制。本文通信作者。E-mail: luzhl@sia.cn

(**LU Zhen-Li** Ph.D. candidate at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include snake-like robot and

robot intelligent control. Corresponding author of this paper.)



**马书根** 中国科学院沈阳自动化研究所,日本立命馆大学教授,博士生导师,研究领域为新形机器人设计和控制理论、仿生机器人、超冗长机器人机构与控制、灾难救援机器人。E-mail: shugen@fc.ritsumei.ac.jp

(**MA Shu-Gen** Professor at Shenyang Institute of Automation,

Chinese Academy of Sciences, and Ritsumeikan University. His research interests include design and control theory of new types of robots, the mechanism and control of redundant manipulators, bio-mechanics, and rescue robots.)



**李斌** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员,研究领域为机器人智能控制。E-mail: libin@sia.ac.cn

(**LI Bin** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include robot intelligent control, etc.)



**王越超** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员,博士生导师,研究领域为机器人智能控制。E-mail: ycwang@sia.ac.cn

(**WANG Yue-Chao** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include robot intelligent control, etc.)