

# 基于循环抑制 CPG 模型控制的 蛇形机器人蜿蜒运动<sup>1)</sup>

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>

<sup>1</sup>(中国科学院沈阳自动化所机器人学重点实验室 沈阳 110016)

<sup>2</sup>(日本立命馆大学 COE(Center of Excellence) 推进机构 滋贺 525-8577 日本)

<sup>3</sup>(沈阳理工大学 沈阳 110168)

<sup>4</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

(E-mail: luzhl@sia.cn)

**摘 要** 根据生物蛇和蛇形机器人的结构及运动特点,应用循环抑制 CPG 建模理论构建了蛇形机器人神经网络模型;利用蛇形机器人模型,仿真验证了 CPG 模型对蜿蜒运动控制的有效性;提出并验证了实现有目的转弯控制的 CPG 参数调节方法.最后,给出了今后的研究方向.

**关键词** 蛇形机器人, 中央模式发生器, 循环抑制, 蜿蜒运动

**中图分类号** TP24

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

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

<sup>1</sup>(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

<sup>2</sup>(Organization for Promotion of the COE Program, Ritsumeikan University, Shiga-Kan 525-8577. Japan)

<sup>3</sup>(Shenyang Ligong University, Shenyang 110168)

<sup>4</sup>(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(E-mail: luzhl@sia.cn)

**Abstract** Based on the structure of both biological snakes and snake-like robots and their rhythm movement, the cyclic inhibitory CPG is adopted as a control method to construct a snake-like robot neuron network model. The validity of the serpentine movement controlled by the CPG model is verified through a snake-like robot model. A modulating method of the CPG parameters is brought forward and simulation to realize the required turning motion is carried out. Finally, the aspects of future research are discussed.

**Key words** Snake-like robot, central pattern generator (CPG), cyclic inhibition, serpentine locomotion

## 1 引言

生物蛇的典型运动方式表明其身体各个部分有相似的运动轨迹<sup>[1]</sup>,或是可以由一个循环运动周期表示.这说明蛇的运动是一种节律运动.模仿蛇节律运动的控制方法常用来实现

1) 国家自然科学基金(60375029)与国家“863”计划(2001AA422360)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P.R.China (60375029), the National Hi-tech Research and Development Plan (2001AA422360)

收稿日期 2004-9-29 收修改稿日期 2005-9-23

Received September 29, 2004; in revised form September 23, 2005

现蛇形机器人的移动功能. Hirose<sup>[2]</sup> 提出了曲率变化连续的 Serpenoid 曲线作为蛇形机器人运动的形状曲线; Ma<sup>[3]</sup> 在此基础上提出了 Serpentine 蛇形曲线; Burdick<sup>[4]</sup> 用分段函数的方法拟合蛇在沙漠中侧向滑动的轨迹; 其他学者也进行了有关蛇形机器人运动控制方法的研究, 但至今没有任何一种蛇形机器人的运动能力能与自然界的蛇相比. 生物的节律运动是低级神经中枢的自激行为<sup>[5]</sup>, 由位于脊髓中的中央模式发生器 (Central pattern generators, CPG) 控制. 所谓 CPG 就是一种能够在缺乏有规律的感知和中央控制输入的情况下, 产生不同模式的、有节奏的输出的神经网络.

基于生物蛇 CPG 原理的运动控制是近几年兴起的一种新的蛇形机器人控制方法. 其通过对生物蛇 CPG 模型的工程模拟, 来提高蛇形机器人的运动能力和控制水平.

2004 年, Ma<sup>[6]</sup> 基于相互抑制 CPG 建模方法构建了蛇形机器人神经网络控制体系结构, 但由于相互抑制 CPG 模型中的神经元必须依靠调整功能实现周期循环输出, 且该网络中 CPG 的数量必须比控制的蛇形机器人关节多一个, 增加计算复杂度.

基于循环抑制 CPG 建模方法, 构建了蛇形机器人控制体系模型. 本模型的特点是: CPG 单元产生周期循环输出的机制是神经元之间强的循环抑制, 而不是调整功能; 每个 CPG 单元都控制关节电机输出, 符合仿生学.

## 2 构建蛇形机器人 CPG 模型

### 2.1 循环抑制型 CPG 数学建模

应用文 [7] 中 K. Matsuoka 提出的神经元, 采用循环抑制连接方式构成了 CPG 模型单元, 如图 1 所示.

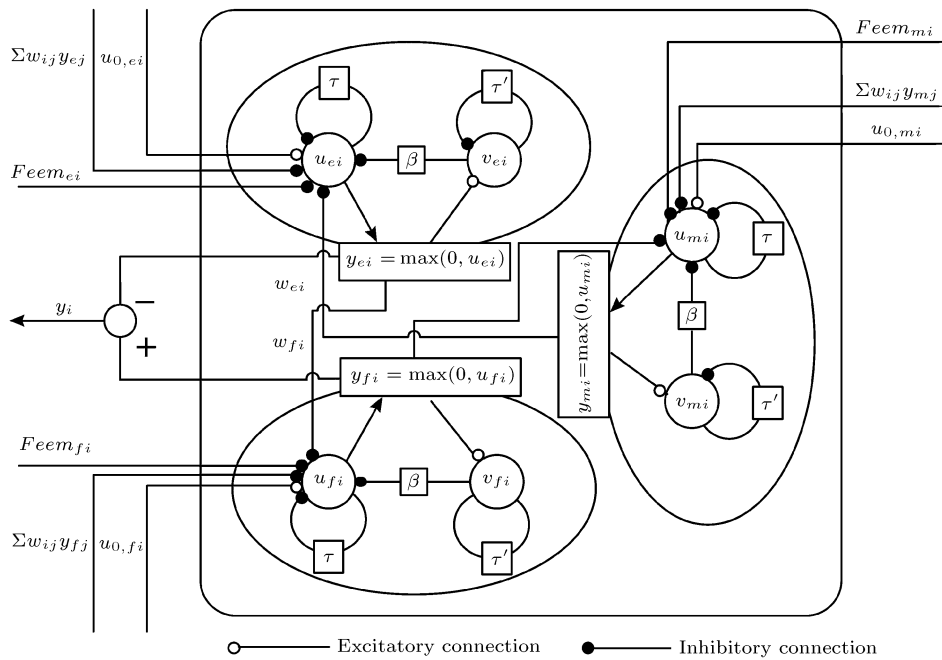


图 1 循环抑制的 CPG 单元  
Fig. 1 Cyclic inhibitory CPG unit

该 CPG 模型的动力学表示如下:

$$\tau \dot{u}_{\{e,f,m\}i} = -u_{\{e,f,m\}i} + w_{\{e,f,m\}i} y_{\{m,e,f\}i} - \beta v_{\{e,f,m\}i} +$$

$$u_{0,\{e,f,m\}i} + Feed_{\{e,f,m\}i} + \sum_{i=0}^n w_{ij} y_{\{e,f,m\}i} \quad (1)$$

$$y_{\{e,f,m\}i} = \max(0, u_{\{e,f,m\}i}) \quad (2)$$

$$\tau' \dot{v}_{\{e,f,m\}i} = -v_{\{e,f,m\}i} + y_{\{e,f,m\}i} \quad (3)$$

$$y_i = y_{fi} - y_{ei} \quad (4)$$

其中  $u_{\{e,f,m\}i}$  为第  $i$  个 CPG 的伸肌神经元、屈肌神经元、中间神经元的薄膜潜能;  $v_{\{e,f,m\}i}$  为相应神经元的疲劳程度;  $y_{\{e,f,m\}i}$  为相应神经元的输出;  $u_{0,\{e,f,m\}i}$  为相应神经元的激励;  $w_{\{e,f,m\}i}$  为相应神经元的连接权重, 这里都取常量权重  $w_{cn}$ ;  $Feed_{\{e,f,m\}i}$  为相应神经元的传感器反馈信号;  $\beta$  为自约束程度对内部状态影响的常数;  $\tau$  为神经元激活的上升时间;  $\tau'$  为神经元的调整时间;  $w_{ij}$  为第  $i$  个 CPG 与第  $j$  个 CPG 之间的连接权重;  $y_i$  为第  $i$  个 CPG 的最终输出.

该循环抑制 CPG 产生节律输出的机制与相互抑制的 CPG 是完全不同的. 其机制是: 如果中间神经元首先被激活, 那么伸肌神经元的活动将被抑制, 这样屈肌神经元就处于激活状态, 其输出将抑制中间神经元的活动, 如此循环. 这样, 神经元激活状态的改变是由网络中环形负反馈引起的, 而不是通过单个神经元的调整或衰退引起的. 该网络要产生节律输出只需要强的循环抑制, 而不需要神经元具有调整功能. 循环抑制 CPG 节律输出的频率独立于激励的强度, 这主要是由于上升时间  $\tau$  不依赖于激励强度. 如果改进神经元模型, 使细胞体薄膜潜能有饱和值  $u_{\max}$ , 则  $u_{\max}$  可以导致神经元激活率饱和, 其阶跃响应曲线中“虚”上升时间的改变就可与输入信号的幅值变化相一致(注: 所谓“虚”上升时间主要是因为上升时间变化特性不是完全由  $\tau$  决定). 如果该类型的神经元被应用到循环抑制的 CPG 模型中, 节律输出的频率就可以按照激励的强度而改变.

## 2.2 构建蛇形机器人 CPG 网络模型实现蜿蜒运动

根据生物蛇的运动机理, 蛇形机器人的蜿蜒运动可以看作是波的向后传播过程. 即首先第一关节开始运动, 然后其它的关节依次开始运动, 运动的规律和第一关节相同或相似, 只是滞后了某个相位值. S.Hirose 提出的蛇形曲线实际就是这样一个传播过程. 采用 2.1 节中的 CPG 单元串联构建蛇形机器人 CPG 网络模型, 如图 2 所示.

该 CPG 网络模型的机制是: CPG 单元内神经元循环抑制; 第一个 CPG 单元采用自身激励反馈, 权重为  $w_{00}$ ; CPG 单元之间按照从头到尾方向, 相同神经元对应单向激励连接, 这里取常量权重  $w_0$ ; 非同层的不同神经元之间没有连接.

$$w_{ij} = \begin{cases} w_{00}, & i = j = 0 \\ w_0, & i = j - 1, \quad i = 0, \dots, n \quad j = 0, \dots, n \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

通过  $w_0$ , 后面的 CPG 将被其前面的神经元激活; CPG 自身由于循环抑制的特性能够产生振荡; 这样振荡将从头到尾以某个特定的相位转换来传播.

该蛇形机器人 CPG 控制体系结构中, 第  $i$  个 CPG 的输出控制第  $i$  个蛇形机器人关节. CPG 的输出和关节相对转角之间的关系如下:

$$\theta_i = \alpha y_i, \quad i = 0, \dots, n \quad (6)$$

其中  $\theta_i$ (弧度) 为第  $i$  个关节的相对转角,  $\alpha$  为调节实际蛇形机器人关节输入控制的参数,  $n$  为最大蛇形机器人关节号.

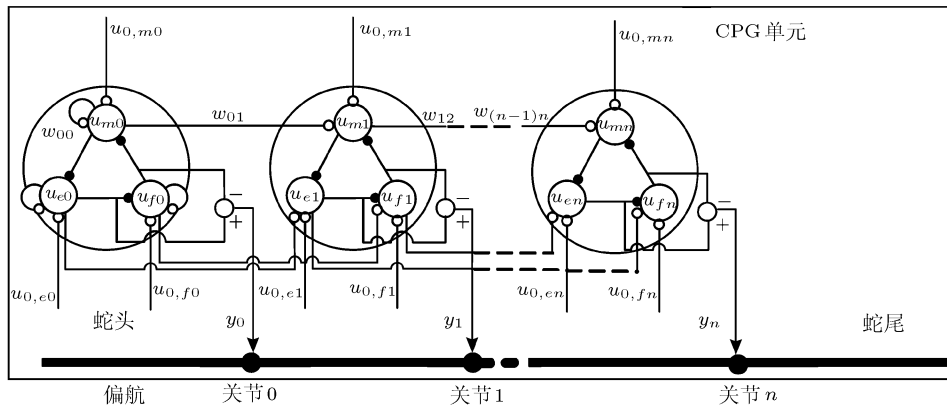


图 2 蛇形机器人 CPG 网络

Fig. 2 Snake-like robot CPG network

虽然 CPG 网络输出在第 0,1 个关节的相位差与其他相邻关节之间的相位差不一致, 但通过一个激励因子  $w_{00}$  既成功解决这个问题, 又利用其控制蛇形机器人的转弯动作. 这样 CPG<sub>0</sub> 不仅作为驱动单元, 而且还协调控制蛇形机器人运动.

### 3 蛇形机器人机构模型

为验证提出的蛇形机器人 CPG 网络模型控制体系, 以及实现有目的地控制的参数调节方法, 依据文 [1] 建立机器人动力学仿真模型. 在计算机上利用该动力学模型对其进行了仿真, 模型参数如表 1 所示. 机器人与环境作用的摩擦力按照被动轮建模.

表 1 动力学模型参数

Table 1 Parameters of kinetic model

参数名称	连杆数 ( $N_l$ )	转动惯量 ( $I$ )	连杆长度 ( $L_j$ )	连杆重心位置 ( $L_g$ )	连杆质量 ( $M$ )	接触点位置 ( $L_c$ )
参数取值	6	0.016 kg·m <sup>2</sup>	0.08 m	0.02 m	0.5 kg	0.04 m

## 4 蛇形机器人 CPG 模型的仿真分析

### 4.1 实现蜿蜒运动

依据表 2 中的参数对 CPG 网络进行了仿真, CPG 中神经元参数设定是借鉴文 [7] 中的条件, 设定运行时间  $t = 50s$ ;  $Feed_{\{e,f,m\}i} = 0$ , 即不考虑反馈信号的影响. 依据经验改变 CPG 单元间的连接权重, 使动力学模型的轨迹输出为一条直线.

表 2 CPG 模型参数

Table 2 Parameters of CPG model

参数名称	$\tau$	$\tau'$	$\beta$	$u_{0,\{e,f,m\}i}$	$w_{cn}$	$w_0$	$w_{00}$	$\alpha$	$n$
参数取值	0.3	0.3	1	2.5	2.5	1.5	1.54	1	4

CPG 网络在此设定下的输出如图 3 所示. 在初始阶段, 只有最前面的 CPG 被赋初值, 开始振荡, 幅值大; 后面的 CPG 随着也开始振荡, 大约 3s 振荡达到稳定. 稳定之后, 波的周期约为 1.25s; 相邻关节的相位差约为 11°; 单关节的相对转角范围约为  $[-57^\circ, 57^\circ]$ .

当把 CPG 的输出控制量通过 (6) 式 (其中  $\alpha=1$ ) 输入到动力学仿真模型中, 机器人模型成功实现了蜿蜒运动. 蛇形机器人头部轨迹如图 4 所示 (局部放大图参见图 7 初始部分). 由于神经网络的不确定性, 很难确定蛇形机器人的初始运动方向, 但从图 4 可看出蛇形机器人基本是按一条直线方向蜿蜒运动. 通过转弯来调整蛇形机器人运动方向, 从而有目的

控制蛇形机器人. 图 3 的曲线中存在着变化的不连续问题, 但由于变化不连续点在输出为零处, 对机器人运动影响不大. 另外, 可以通过很多方法解决, 例如调节神经元输出  $y$  的函数形式. 其作为关节电机的相对转角控制量, 可以认为是电机保持零位. 这里主要是从模型性质考虑对输出轨迹方向的影响. 轨迹优化是下一步要做的工作.

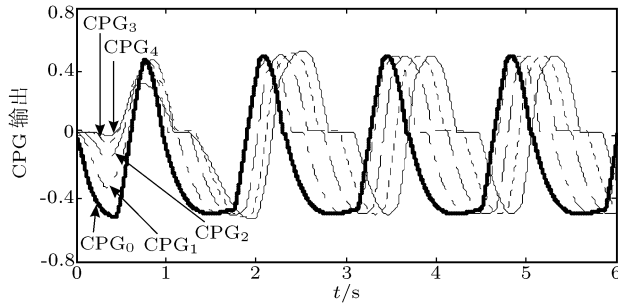


图 3 CPG 输出曲线图

Fig. 3 Output curve of CPG

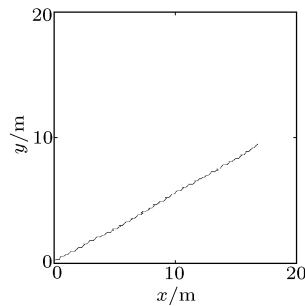


图 4 动力学模型输出曲线

Fig. 4 Output curve of kinetic model

#### 4.2 定性控制蛇形机器人转弯的 CPG 参数调节方法

控制蛇形机器人转弯的方法很多, 通常是将转弯方向的关节转角幅值变大, 而反方向的关节转角幅值变小. 本文提出了另外一种方法, 通过调节  $CPG_0$  的自身激励权重改变关节之间的相位差实现定性转弯控制. 算法如下:

$$w_{00,new} = w_{00} + \Delta w_{00} \quad (7)$$

其中,  $w_{00,new}$  为自身激励新权重;  $w_{00}$  为原权重, 设定  $w_{00} = 1.54$ ;  $\Delta w_{00}$  为权重的修正量. 仿真结果如图 5、6 所示.

由图 5 可见,  $\Delta w_{00} > 0$  时机器人左转弯, 并且单位时间内转弯角度和  $\Delta w_{00}$  的绝对值在一定范围内近似成正比关系, 图 5(a)、(b) 给出了两个转弯轨迹代表, 对应的  $\Delta w_{00}$  取值分别为 0.04 和 0.01. 由图 6 可见,  $\Delta w_{00} < 0$  时机器人右转弯, 并且单位时间内转弯角度和  $\Delta w_{00}$  的绝对值在一定范围内近似成正比关系, 图 6(a)、(b) 给出了两个转弯轨迹代表, 对应的  $\Delta w_{00}$  取值分别为 -0.01 和 -0.28. 图 5(c) 和图 6(c) 对应的  $\Delta w_{00}$  取值分别为 0.01 和 -0.01, 通过二者可以得到该方法主要是改变了第一, 二关节之间的相差. 综上, 转弯角和权重修正量在一定范围内的关系是:  $\Delta w_{00} > 0$  时左转 (逆时针方向);  $\Delta w_{00} < 0$  时右转 (顺时针方向);  $\Delta w_{00}$  绝对值越小, 转弯半径越大.

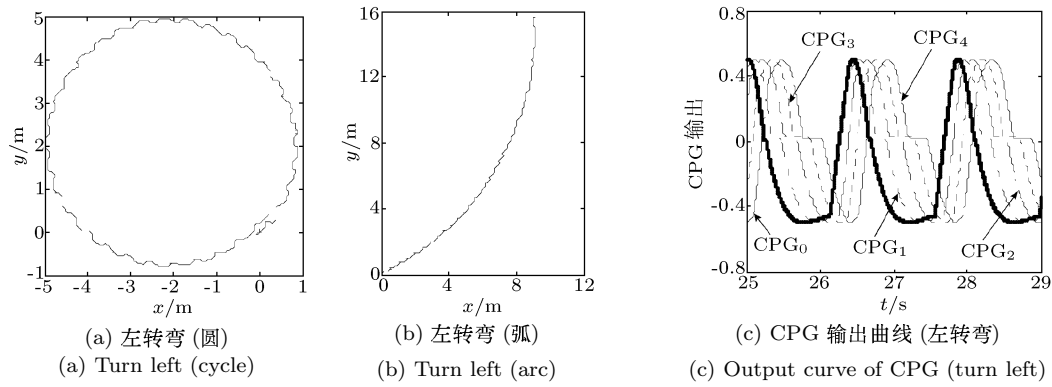


图 5 仿真结果  
Fig. 5 Simulation

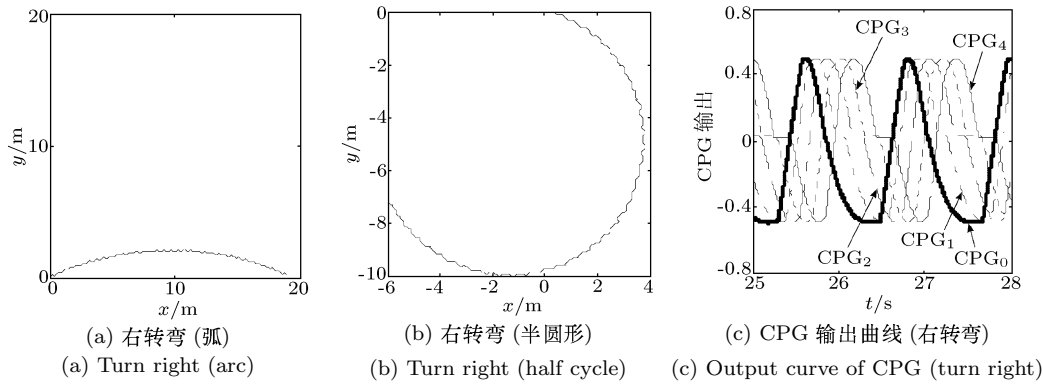


图 6 仿真结果  
Fig. 6 Simulation

图 7 是机器人在蜿蜒运动过程中, 行走一段距离后加入转弯参数的轨迹图. 其仿真控制算法是

$$\text{if } t \geq 25, \Delta w_{00} = 0.06; \text{ else } \Delta w_{00} = 0 \quad (8)$$

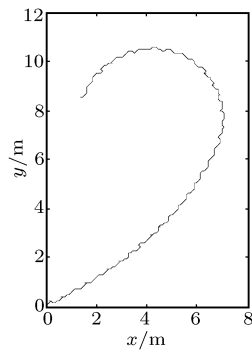


图 7 前进, 左转弯组合  
Fig. 7 Go forward and turn left

## 5 结束语

通过对生物蛇运动控制机理的分析, 首次应用循环抑制 CPG 建模理论构建了蛇形机器人 CPG 网络模型; 应用动力学仿真模型验证了该 CPG 网络对蜿蜒运动控制的有效性; 提出并仿真验证了实现有目的转弯控制的 CPG 参数的调节方法. 综上, 基于循环抑制 CPG 建模理论构建的蛇形机器人神经网络模型是可行的; 调整 CPG 网络的特定参数可以实现蜿蜒运动和定性的转弯控制; 为蛇形机器人分布式控制提供了新的方法.

## References

- 1 Ma S. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot. *Advanced Robotics*, 2001, **15**(2): 205~224
- 2 Hirose S. *Biologically Inspired Robot—Snake-like Locomotors and Manipulators*. Oxford: Oxford University Press, 1993
- 3 Ma S. Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robot. In: *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*. Detroit, Michigan: Institute of Electrical and Electronics Inc., 1999. 3007~3013
- 4 Burdick J W, Radford J, Chirikjian. A sidewinding locomotion gait for hyper-redundant robots. In: *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*. Atlanta, Georgia: Institute of Electrical and Electronics Inc., 1993. 101~106
- 5 Shik M L, Severin F V, Orlovskii G N. Control of walking and running by means of electrical stimulation of the Mid-brain. *Biofizyka [Biophysics]*. 1966, **11**(4): 756~765
- 6 Inoue K, Ma S, Jin C. Neural oscillator network-based controller for meandering locomotion of snake-like robots. In: *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*. New Orleans, Louisiana: Institute of Electrical and Electronics Inc., 2004. 5064~5069
- 7 Matsuoka K. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation. *Biological Cybernetics*, 1985, **52**(5):367~376

**卢振利** 中国科学院自动化所博士研究生, 研究领域为蛇形机器人、机器人智能控制.

(**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.)

**马书根** 中国科学院自动化所研究员, 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.

(**MA Shu-Gen** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include the design and control theory of new types of robots, the mechanism and control of redundant manipulators, and Bio-mechanics.)

**李斌** 中国科学院自动化所研究员, 研究领域为机器人智能控制.

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

**王越超** 中国科学院自动化所研究员, 博士生导师, 研究领域为机器人智能控制.

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