

## 网络服务质量动态监测的远程机器人控制

张 平<sup>1</sup>, 徐扬生<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 计算机学院, 广东 广州 510640; 2. 香港中文大学 自动化与计算机辅助工程系, 香港)

**摘要:** 为了有效地控制远程机器人, 提高机器人的运动控制精度, 通过测量网络动态性能, 得到了网络服务质量参数; 通过排队网络模型求解, 得出远程机器人在线控制参数; 通过对远程移动机器人的控制实验, 验证了本控制算法的可行性. 本控制算法可以推广应用于对其它网络设备的远程监控.

**关键词:** 机器人; 网络; 服务质量; 远程控制

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## Remote robotic control based on the monitoring of network quality of service

ZHANG Ping<sup>1</sup>, XU Yang-sheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Automation & Computer-Aided Engineering, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract:** In order to effectively control a remote robot and improve its motion accuracy, the parameters of network quality of service (QoS) is gotten by real time measuring network performance. Then a creative model based on queueing theory is introduced to calculate the control parameters of remote robot. According to these parameters, the remote robot can be controlled on line. Remote mobile robot experiments show that the control algorithm is feasible and efficient. It can be applied further to the remote control of network systems.

**Key words:** robot; network; quality of service(QoS); remote control

### 1 前言 (Introduction)

当前, 基于 Internet 的机器人控制技术是机器人应用领域中的一个重要的前沿研究课题, 备受各国重视<sup>[1]</sup>. 它主要研究在遥环境下, 通过人机交互的协调操作, 基于 Internet 实现对远程机器人系统的遥操作.

由于 Internet 数据传输的时延、抖动以及链路故障等原因, 使得通过网络对远程机器人进行控制变得非常复杂, 甚至影响到机器人控制的稳定性.

目前国内外主要集中在分析网络时延对机器人控制的影响上<sup>[2~6]</sup>, 文献[2]提出了机器人远程控制中的网络时延测量方法; 文献[3,4]分析了采用网络 TCP/IP 协议进行机器人远程控制的局限性, 提出了一种新的控制协议, 并进行了网络仿真; 文献[5,6]初步分析了网络时延和网络负荷变化对机器人控制的影响. 但是, 目前国内外尚缺乏如何对网络服务质量进行动态监测, 并根据网络服务质量动态监测结

果对远程机器人进行有效的控制.

本文通过对网络性能动态监测, 得到了网络服务质量参数. 通过排队系统理论对网络系统和机器人控制系统进行建模分析, 获取远程机器人的控制参数, 并将其用于远程机器人的控制, 可以提高机器人的控制性能.

### 2 机器人运动控制 (Robotic motion control)

机器人在执行某些作业时, 常需要按照一定的轨迹进行运动. 这些机器人运动轨迹可以采用一系列特定的位姿点及其两点之间的轨迹来描述<sup>[7]</sup>. 设机器人从点  $P_i$  向点  $P_{i+1}$  运动 (见图 1), 则机器人的运动可以表示为

$$\text{从} \quad {}^0T_6 = {}^0T_B {}^B P_i {}^6T_E^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{到} \quad {}^0T_6 = {}^0T_B {}^B P_{i+1} {}^6T_E^{-1}. \quad (2)$$

其中  ${}^0T_6$  和  ${}^0T_B$  是坐标系  $\{6\}$  和  $\{B\}$  相对参考坐标系  $\{O\}$  的齐次变换,  ${}^6T_E$  是工具坐标系  $\{E\}$  相对末端坐标系  $\{6\}$  的齐次变换.  ${}^B P_i$  和  ${}^B P_{i+1}$  分别为两结点

$P_i$  和  $P_{i+1}$  相对基坐标系  $\{B\}$  的齐次变换. 根据式(1)和(2), 加入驱动变换  $D(\lambda)^{[7]}$ , 可得

$${}^0T_6(\lambda) = {}^0T_B {}^B P_i D(\lambda) {}^6T_E^{-1}. \quad (3)$$

式中:  $\lambda = t/T, \lambda \in [0, 1]$ ;  $t$  为机器人运动开始时间;  $T$  是机器人完成从  $P_i$  点到  $P_{i+1}$  运动所需的总时间. 因此,  $\lambda = 0$  时, 机器人位于  $P_i$ ;  $\lambda = 1, t = T$  时, 机器人位于  $P_{i+1}$  点. 由此, 得

$$D(1) = {}^B P_i^{-1} {}^B P_{i+1}. \quad (4)$$

通过式(1)和(2), 可以求出点  $P_i$  和点  $P_{i+1}$  的齐次坐标. 而通过控制  $\lambda$  即可实现机器人从点  $P_i$  到点  $P_{i+1}$  的运动.

对远程机器人进行控制, 机器人控制信息数据包包括控制命令  $c$ 、机器人坐标位姿  $P_i$ 、以及运动速度  $\dot{q}$ . 数据包结构为

$$\text{packet} = \{c, P_i, \dot{q}\}. \quad (5)$$

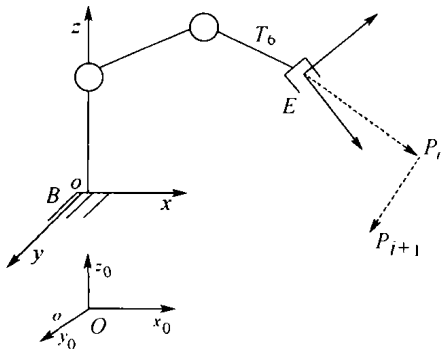


图1 机器人运动描述  
Fig. 1 Robot motion description

### 3 机器人远程控制建模 (Modeling of robotic remote control)

由于 Internet 的开放性, 使得 Internet 成为一个

公共的信息传输通道, 任何信息都可以通过 Internet 传输. 为建模方便, 将基于 Internet 进行遥控制的机器人系统作为一个多节点的串联排队系统(见图2). 将网络作为一个排队节点, 机器人远程控制流作为该排队节点的输入流, 远程机器人控制器作为另一排队服务节点<sup>[8]</sup>. 为了减少网络的时间延时、抖动等影响, 机器人控制器节点具有一定的机器人控制信息缓存能力. 由于基于网络进行机器人控制信息传输的不确定性, 因此, 机器人控制器节点缓存的容量将影响机器人控制的性能.

为了建模需要, 作如下假设:

**假设 1** 机器人远程控制系统采用先到先服务原则;

**假设 2** 网络服务节点是一个具有损失的排队服务节点. 设网络服务节点为  $M/M/1/k$  有损失服务系统. 排队系统顾客(机器人控制信息, 以下相同)到达间隔服从参数为  $\lambda_n$  负指数分布, 系统服务时间服从参数为  $\mu_n$  负指数分布. 排队系统只有一名服务员, 系统具有有限的等待空间. 因此, 顾客可能因为没有等待空间而离开, 即出现顾客丢失. 当某个顾客到达系统, 如发现系统已有  $k$  个顾客, 则这个新来的顾客就离去, 且永不再来. 如发现系统的顾客数小于  $k$ , 则这个顾客就加入排队, 等待接受服务.

**假设 3** 远程机器人控制器的缓冲区容量是有限的, 因此可能出现机器人控制信息阻塞、饥饿、以及丢失现象. 设机器人远程控制器节点为  $M/M/1/k$  排队服务系统. 顾客到达间隔时间服从参数为  $\lambda_c$  负指数分布, 服务时间服从参数  $\mu_c$  为负指数分布. 远程控制器节点的缓冲区容量大小需要根据网络状况确定.

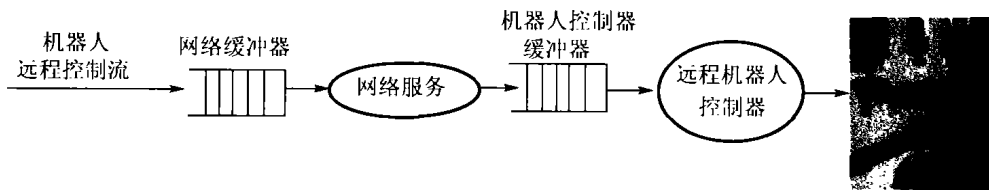


图2 远程机器人控制模型  
Fig. 2 Remote robot control model

设  $w_n, w_{nq}$  分别为网络排队系统中顾客平均的逗留时间和平均的排队时间,  $L_n$  为平均队列长度, 网络排队系统对顾客的服务时间是独立同分布的随机变量序列  $\{V_n\}$ , 则<sup>[8]</sup>

$$L_n = \begin{cases} \frac{\rho_n}{1 - \rho_n} - \frac{(k+1)\rho_n^{k+1}}{1 - \rho_n^{k+1}}, & \rho_n \neq 1, \\ \frac{k}{2}, & \rho_n = 1. \end{cases} \quad (6)$$

式中利用率  $\rho_n = \lambda_n/\mu_n$ , 空闲率  $p_{n0}$  为

$$p_{n0} = \begin{cases} \frac{1 - \rho_n}{1 - \rho_n^{k+1}}, & \rho_n \neq 1, \\ [1 + k]^{-1}, & \rho_n = 1. \end{cases} \quad (7)$$

由 Little 公式得顾客在网络系统的平均逗留时间为

$$w_n = \frac{L_n}{\lambda_n} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_n - \lambda_n} - \frac{k\rho_{nk}}{\mu_n(1 - \rho_n^k)}, & \rho_n \neq 1, \\ \frac{k+1}{2\lambda_n}, & \rho_n = 1. \end{cases} \quad (8)$$

式中, 顾客损失率  $\rho_{nk} = \begin{cases} \frac{(1 - \rho_n)\rho_n^k}{1 - \rho_n^{k+1}}, & \rho_n \neq 1, \\ \frac{1}{k+1}, & \rho_n = 1. \end{cases}$

根据顾客损失率为  $\rho_{nk}$ , 可得到网络排队系统有效输出率, 也即机器人远程控制器的输入率  $\lambda_c$  是

$$\lambda_c = \lambda_n(1 - \rho_{nk}). \quad (9)$$

根据假设 3, 机器人远程控制器的平均等待队长  $L'_c$  为

$$L'_c = \begin{cases} \frac{\rho_c^2}{1 - \rho_c} - \frac{(k + \rho_c)\rho_c^{k+1}}{1 - \rho_c^{k+1}}, & \rho_c \neq 1, \\ \frac{k(k-1)}{2(k+1)}, & \rho_c = 1. \end{cases} \quad (10)$$

式中利用率  $\rho_c = \frac{\lambda_c}{\mu_c}$ .

机器人远程控制器的平均队长  $L_c$  为

$$L_c = \frac{L'_c}{1 - \rho_{c0}} = \begin{cases} \frac{\rho_c}{1 - \rho_c} - \frac{(k+1)\rho_c^{k+1}}{1 - \rho_c^{k+1}}, & \rho_c \neq 1, \\ \frac{k}{2}, & \rho_c = 1. \end{cases} \quad (11)$$

顾客在机器人远程控制器的平均等待时间  $w_{cq}$  为

$$w_{cq} = \frac{L'_c}{\lambda_c} = \begin{cases} \frac{\rho_c}{\mu_c - \lambda_c} - \frac{k\rho_{ck}}{\mu_c(1 - \rho_c^k)}, & \rho_c \neq 1, \\ \frac{k-1}{2\lambda_c}, & \rho_c = 1. \end{cases} \quad (12)$$

式(11)和(12)中的  $\rho_{c0}$  和  $\rho_{ck}$  的计算与网络排队系统的  $\rho_{n0}$  和  $\rho_{nk}$  计算相同.

顾客在机器人远程控制器的平均逗留时间  $w_c$  为

$$w_c = \frac{L_c}{\lambda_c} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_c - \lambda_c} - \frac{k\rho_c^k}{\mu_c(1 - \rho_c^k)}, & \rho_c \neq 1, \\ \frac{k+1}{2\lambda_c}, & \rho_c = 1. \end{cases} \quad (13)$$

所以, 机器人控制信息数据包的执行时间  $w$  为

$$w = w_n + w_c. \quad (14)$$

根据上面分析得知, 基于网络的机器人的控制性能与网络排队系统输入率  $\lambda_n$ 、输出率  $\lambda_c$ 、网络的

QoS 特性, 以及机器人控制器的缓冲器容量  $k$  有直接的关系. 因此, 可以通过调整、控制上述参数, 改善机器人的控制.

#### 4 基于网络服务质量动态监测的远程机器人控制 (Remote robot control based on dynamical monitoring of network quality of service)

##### 4.1 远程机器人控制系统设计思想 (Design ideas of remote robot control system)

由于 Internet 无法保证机器人每个控制信息数据包时延都相等, 也无法保证都小于实时控制的同步时间. 因此, 为了改善远程机器人控制的通信质量, 采用流量控制技术, 通过设定控制信息数据包缓冲区, 采用预取存储技术来消除延时抖动, 实现机器人连续稳定的控制, 提高控制质量; 机器人远程控制器必须足够快地接收控制信息数据包, 以一个稳定的控制流传送给机器人; 远程机器人控制器采用多线程处理方式. 接收、解压缩、控制各用一个线程, 使得机器人控制器可以一个接受控制信息数据包, 一个解压缩, 一个控制机器人运动和动作. 对于来不及处理的控制信息数据包, 则存入缓冲区. 确保机器人控制的服务质量 (见图 3).

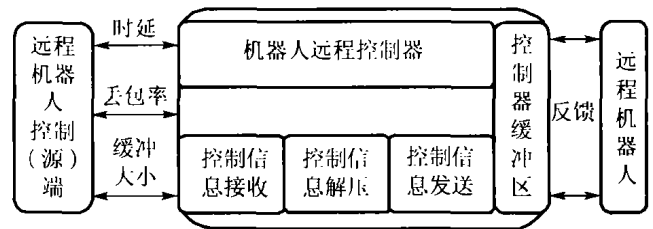


图 3 机器人远程控制系统结构  
Fig. 3 Robotic remote control system architecture

##### 4.2 远程机器人控制 (Remote robot control)

在机器人远程控制实验系统中 (见图 1), 移动机器人沿  $y$  方向运动 (见图 4). 机器人远程控制器数据采样时间  $\tau = 100 \text{ ms}$ , 机器人控制信息到达间隔时间  $\lambda = 524.69 \text{ ms}$ , 移动机器人的移动速度为  $0.08 \text{ m/s}$ . 机器人远程控制源端地址为  $202.112.18.71$ , 机器人远程控制器地址为  $137.189.101.46$ .

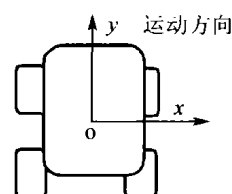


图 4 移动机器人运动  
Fig. 4 Mobile robot motion

经测试网络平均时延为  $w_n = 162.07 \text{ ms}$ , 机器人控制信息丢失率 16.67%. 图 5 为机器人远程控制器容量对网络时延的影响. 图 6 为机器人远程控制器容量对机器人控制信息丢失率的影响. 图 5 和 6 结果显示, 增加机器人远程控制器容量, 将有助于减少机器人控制信息网络时延和机器人控制信息的丢失.

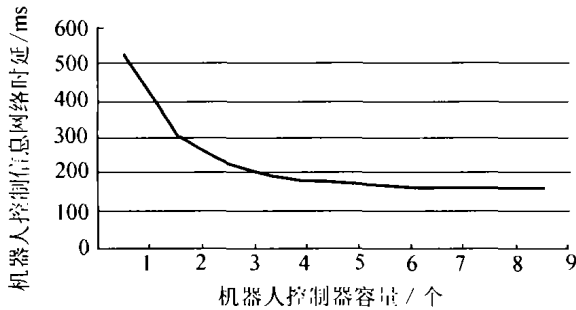


图 5 机器人远程控制器容量对网络时延的影响  
Fig. 5 Effect of robotic controller buffers on network time-delay

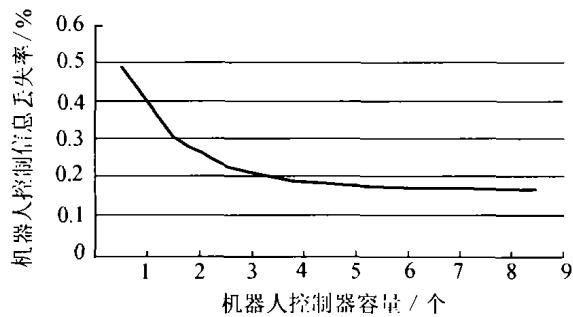


图 6 机器人远程控制器容量对机器人控制信息丢失率的影响

Fig. 6 Effect of robotic controller buffers on network packets loss rate

根据上面分析结果, 为了实现基于服务质量监测的机器人控制, 本文提出如下远程机器人控制模式(见图 7).

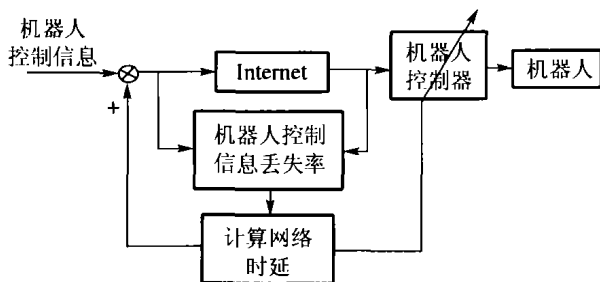


图 7 远程机器人控制框图  
Fig. 7 Remote robot control frame

图 8 为无服务质量动态监测时, 移动机器人的位置误差曲线. 机器人沿  $y$  方向位置平均误差为  $0.00497 \text{ m}$ . 图 9 为具有服务质量动态监测时, 移动机器人沿  $y$  方向位置误差曲线. 机器人沿  $y$  方向位置

平均误差为  $0.00143 \text{ m}$ . 从图 8 和 9 中看出, 机器人的位置误差得到很大程度的降低.

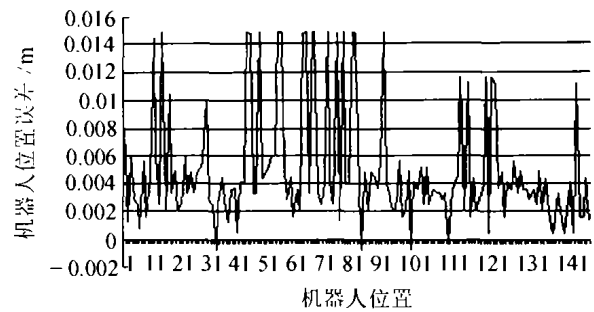


图 8 无服务质量动态监测的机器人位置误差  
Fig. 8 Robot pose error without dynamic monitoring of quality of service

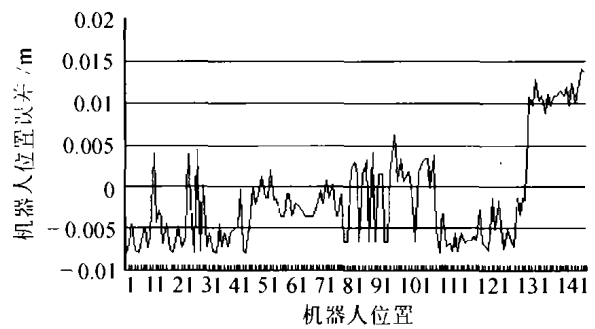


图 9 具有服务质量动态监测的机器人位置误差  
Fig. 9 Robot pose error with dynamic monitoring of quality of service

### 5 结束语 (Conclusion)

通过对网络服务质量动态监测, 采用排队理论建立远程机器人控制模型, 较好地解决了网络时延、抖动等对机器人远程控制的影响. 通过对该方法加以推广, 可以应用于对其它网络设备进行远程监控.

### 参考文献 (References):

- [1] GOLDBERG K. *The Robot in the Garden: Telerobotics and Telepresence in the Age of the Internet* [M]. Boston: The MIT Press, 2000.
- [2] 王庆鹏, 谈大龙, 陈宁. 基于 Internet 的机器人控制中网络时延测试及分析[J]. 机器人, 2001, 23(4): 316-321.  
(WANG Qingpeng, TAN Dalong, CHEN Ning. Network time-delay test and analysis in the control of Internet-based Telerobotics [J]. *J of Robot*, 2001, 23(4): 316-321.)
- [3] LIU P X, MENG M, GU J, et al. A study of internet delays for teleoperation using biologically inspired approaches [J]. *Int J of Robotics and Automation*, 2002, 17(4): 186-195.
- [4] LIU P X, MENG M, YANG S, et al. Better transport protocol internet-based teleoperation [C]// *Proc of the 9th IEEE Conf on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. Thailand: IEEE Press, 2002: 323-328.

(下转第 1019 页)

- [6] 修智宏,张运杰,任光.输入采用标准模糊划分的模糊控制系统性质及稳定性分析[J].模糊系统与数学,2004,18(4):71-82.  
(XIU Zhihong, ZHANG Yunjie, REN Guang. Properties and stability analysis of fuzzy control systems employing standard fuzzy partition inputs [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2004, 18(4): 71-82.)
- [7] TANAKA K, IKEDA T, WANG H O. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: quadratic stability,  $H_\infty$  control theory and linear matrix inequalities [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 1-13.
- [8] WANG H O, TANAKA K, GRIFFIN M F. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 14-23.
- [9] PARK J, KIM J, PARK D. LMI-based design of stabilizing fuzzy controllers for nonlinear systems described by Takagi-Sugeno fuzzy model [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 122: 73-82.

#### 作者简介:

修智宏 (1967—),男,海军大连舰艇学院指控信息系高级工程师,现为大连海事大学博士生,主要研究领域:模糊控制、船舶自动化和智能化. E-mail: xzhdy@mail.dlptt.ln.cn;

任光 (1952—),男,大连海事大学轮机工程学院院长,博士,教授,博士生导师,主要研究领域:智能控制系统、船舶自动化. E-mail: reng@dlmu.edu.cn;

张运杰 (1963—),男,大连海事大学数理系教授,博士,主要研究领域:模糊数学、图象处理. E-mail: yunjiezhngcn@sohu.com.

#### (上接第 1010 页)

- [8] 秦进,梁梁.遗传算法与旋转正交设计的结合应用[J].系统工程理论与实践,2002,22(4):75-79.  
(QIN Jin, LIANG Liang. The integrated application of genetic algorithm and rotating orthogonal method [J]. *J of System Engineering Theory and Practice*, 2002, 22(4): 75-79.)
- [9] 金菊良,杨晓华,丁晶.标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J].系统工程理论与实践,2001,21(4):8-13.  
(JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jing. An improved simple genetic algorithm - accelerating genetic algorithm [J]. *J of System Engineering Theory and Practice*, 2001, 21(4): 8-13.)
- [10] 姚俊峰,梅焯,彭小奇.混沌遗传算法(CGA)的应用研究及其优化效率评价[J].自动化学报,2002,28(6):935-942.  
(YAO Junfeng, MEI Chi, PENG Xiaoqi. The application research of

the chaos genetic algorithm (CGA) and its evaluation of optimization efficiency [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(6): 935-942.)

- [11] YAO Xin, LIU Yong, LIN Guangming. Evolutionary programming made faster [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, 3(2): 82-102.

#### 作者简介:

黄鹂 (1973—),男,博士,主要研究方向为智能信息处理、智能控制与管理等. E-mail: huang\_l\_kun@sina.com;

陈森发 (1945—),男,博士生导师,主要研究方向为智能控制与管理、复杂系统建模等;

周振国 (1972—),男,讲师,博士研究生,研究领域为数据挖掘.

#### (上接第 1014 页)

- [5] FUNG Wai-keung, XI Ning, LO Wang-tai, et al. Improving efficiency of internet based teleoperation using network QoS [C] // *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Washington, DC: IEEE Press, 2002: 2707-2712.
- [6] 彭刚,黄心汉,蒋毅.网络延时和负荷变化对基于网络的遥操作机器人系统的影响和解决方法[J].计算机工程与应用,2002,38(11):12-15.  
(PENG Gang, HUANG Xinhan, JIANG Yi. The influences and solutions of network delay and variable loads in telerobotics via network [J]. *J of Computer Engineering and Application*, 2002, 38(11): 12-15.)
- [7] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.

(CAI Zixing. *Robotics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)

- [8] 孟玉珂.排队论基础及应用[M].上海:同济大学出版社,1989.  
(MENG Yuke. *Queueing System Basic and Its Application* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989.)

#### 作者简介:

张平 (1964—),男,博士,副教授,主要研究智能机器人、CIMS、基于网络的智能应用等. E-mail: pzhang@suct.edu.cn;

徐扬生 (1958—),男,博士,教授,香港中文大学自动化与计算机辅助工程系主任,主要研究空间机器人、智能控制和人机智能接口等.