

文章编号: 1002-0446(2008)01-0047-09

多信息感知辅助的网络遥操作机器人系统*

王世华¹, 胥布工¹, 刘云辉², 贾允毅¹

(1. 华南理工大学自动化科学与工程学院基于网络和现场总线实时控制实验室, 广东 广州 510640

2. 香港中文大学机械与自动化工程学系, 香港 新界 沙田)

摘要: 构建了多信息感知辅助的网络遥操作机器人系统, 该系统提供了一种通过多信息感知手段辅助操作者决策的远程控制方式. 首先, 分析了网络条件下遥操作机器人系统多信息感知的原理. 该多信息包括机器人多传感器和网络回程时延等信息. 通过对这些多信息的预处理、分类和决策处理, 将该多信息以视觉、听觉、力觉、报警灯和交互文本方式转化为人可感知的信息. 使用网络时延缓冲器和网络双连接, 降低了网络可变时延对系统的影响. 最后, 长距离的网络遥操作实验验证了系统和控制策略的实用性和有效性.

关键词: 遥操作; 网络机器人; 多信息感知

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Multi-information Perception Aided Teleoperated Robot System over Internet

WANG Shihua¹, XU Bu-gong¹, LIU Yun-hui², JIA Yun-yi¹

(1. Laboratory of Real-time Control through Internet and Fieldbuses, College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, N. T., Hongkong, China)

Abstract With the help of multi-information perception, a teleoperated robot system over Internet is proposed, which provides a tele-control mode through multi-information perception aided decision making. First, the principle of multi-information perception in Internet-based teleoperated robot system is analyzed, and the multi-information includes data of robot sensors, network back delay, etc. After the multi-information is pre-processed and classified and the decision making is done, the multi-information can be perceived by the operator with such modes as vision, audio, force, alarm box and interactive text. The use of network delay buffer and double data links decreases the impact from variable network delay. Finally, the usefulness and effectiveness of the developed schemes and system are validated by teleoperation experiments through Internet over long distance.

Keywords teleoperation; Internet robot; multi-information perception

1 引言 (Introduction)

1994年, 美国南加州大学 Goldberg 等人第一次建立了基于 Internet 的机器人系统 Mercury Project^[1], 基于 Internet 的远程控制机器人由此诞生. 随着互联网的迅速扩张和遥操作研究的深入, 大量机器人联接上互联网^[2~11]. 对于双向遥操作控制系统, 由于传输通道时延的存在, 导致系统稳定性和透明性等性能严重下降^[12, 13]. 对于基于 Internet 的遥操作机器人系统, 在消除或降低网络时延对系统的影响, 提高系统控制性能方面, 目前的研究主要集中在三

个方面: 控制策略、网络通讯协议和机器人自主性. 从控制策略上看, 基于事件的控制策略以事件为参变量, 避免了系统的稳定性问题^[14, 15], 但系统控制的实时性难以保证; 预估控制策略虽然能够通过模型输出来抵消时延的影响^[16~18], 或通过模型的虚拟现实来增强系统控制的实时性和临场感^[19~21], 但保证系统稳定性需要模型一致和时延为常数^[22]; 从对网络协议本身的研究上看, 虽然可以通过修改 TCP 协议算法减小时延^[23], 采用缓冲策略降低时延抖动^[16, 24], 或者增加数据发送的中断优先级^[25], 但也

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60334010); 国家自然科学基金资助项目 (60474047); 广东省自然科学基金资助项目 (06105413).

收稿日期: 2007-04-24

只能从一定程度上缓解时延的影响. 增加机器人自主性, 可以从任务规划的层次增加机器人自主避障、目标定位、路径搜寻等的安全性^[26~29], 但系统控制的实时性和透明性等性能大大降低. 所以, 虽然上述研究提供了一些控制策略或控制方法, 但所取得的控制效果远没有达到令人满意的程度, 仍需要从新的角度来研究和解决网络遥操作机器人的控制性能问题.

2 问题描述 (Problem formulation)

目前, 网络遥操作机器人系统所提供的反馈一般只有现场视频反馈和力觉反馈^[1~11, 15~17, 25]. 然而, 由于现场视频信息需经过采样、加工、压缩、传输、缓冲、解压缩和显示等阶段, 视频反馈滞后更加严重. 而且, 由于操纵杆等力反馈设备的惯性、灵敏度等因素影响, 人对力反馈的感知并不明显. 进一步地, 由于摄像头拍摄角度的限制, 视频反馈的信息是受限的, 并且操作者通过视频反馈难以定量地得到机器人状态等信息. 所以, 所实现的遥操作系统操作性能较差.

操作者通过视频和力觉反馈感知机器人的运动状态和其周边环境信息, 所得到的感知信息只能是定性和粗糙的. 对于无人控制的机器人系统, 其核心要求就是机器人能够实时地感知、融合和解释视觉、距离、触觉等多传感器信息, 产生合理的动作去完成相应的任务^[30]. 为此, 对加入了遥操作者的有人控制机器人系统, 需要对这些多传感信息加以量化并反馈给操作者, 通过人的高智商和自学习能力, 使得操作者能够替代机器人完成更高层次的决策、控制等功能. 显然, 这些量化的信息反馈是原始的, 为了进一步地给操作者提供辅助决策, 需要对这些多信息加以融合和处理. 为了增强操作者全方位的感知能力, 可以将这些多信息以视觉、听觉和触觉等信息反映出来.

人的高智商和自学习能力, 反映在人准确和实时地感知信息后, 能够迅速地对这些复杂信息加以融合处理, 通过已有的记忆、经验等知识库进行合理的逻辑分析和判断, 从而给出下一步的控制决策, 同时, 对现时的操作能够得出一定的经验总结, 并实时更新自身的知识库. 为了更好地利用人的高智商和自学习能力, 遥操作系统需要多途径、全方位地为操作者提供更多的信息, 且这些多信息反映的状态要尽可能地准确、快速和直接. 首先, 机器人的运动状态和其与环境的交互信息, 要能够定量地反映给操作者. 由于这些信息所包含的数据量小, 与视频反馈

相比, 处理时间和网络传输时延要小得多. 其次, 力觉反馈应该可视化, 即将力反馈以曲线显示出来, 弥补人的触觉感知不足. 再次, 加入听觉信息, 进一步丰富操作者的临场感. 然后, 加入报警灯和交互文本, 辅助操作者智能决策, 增强人和机器人的交互能力. 最后, 加入端对端的数据传输时延曲线, 增强操作者对未来状态的预测能力, 并通过时间权重系数, 解决多信息反馈的感知同步问题.

操作者对机器人传感器、现场环境信息和网络时延的准确和实时感知, 对于完成相应的远程控制任务是非常重要的. 为此, 本文通过多信息知觉化感知辅助, 实现了基于 Internet 的遥操作机器人系统. 该系统通过视觉、听觉, 结合智能决策输出, 将多传感器信息及网络时延大小转化为人可感知的信息, 为操作者正确决策提供辅助.

3 多信息感知辅助的网络机器人系统 (Multi-information perception aided robot system over Internet)

3.1 系统框架

如图 1 所示, 主操作端通过力反馈操纵杆及其按钮控制远端机器人运动, 操纵杆位置偏移量反映为机器人期望速度大小, 操纵杆按钮发送实时交互的远程命令 (telecommanding) 或紧急控制命令. 机器人传感器有红外测距、超声测距、碰撞传感器. 机器人顶部有一个红色标记, 通过其上方 CCD 摄像头进行特征提取, 从而能够得到机器人的相机平面坐标. 系统反馈的传感器信息包括力反馈信息, 且这些信息通过信息处理 (information processing) 模块转化为人可感知的视觉、听觉、力、报警灯和交互文本等. 网络单向时延值的大小通过时延监控器 (delay supervisor) 实现. 为了尽可能降低网络时延抖动, 避免控制信号的失真和混乱, 从端采用缓冲 (buffer) 策略, 并通过网络时延调节器 (network delay regulator) 管理缓冲区长度. 系统采样双网络连接发送数据, 第一个连接用来发送速度控制命令数据, 第二个连接用来传递一些紧急控制数据和远程命令数据.

3.2 系统模型

操纵杆: 按照弹簧阻尼原理, 操纵杆可以简单表示如下:

$$M_m \ddot{X}(t) + K_m X(t) = F_d(t) - F_m(t) \quad (1)$$

其中 M_m 和 K_m 分别表示操纵杆质量和弹性系数, $X(t) = [X_x, X_y]^T$ 表示操纵杆距离中心点偏移量, F_d 为操作者作用力, F_m 为反馈作用力.

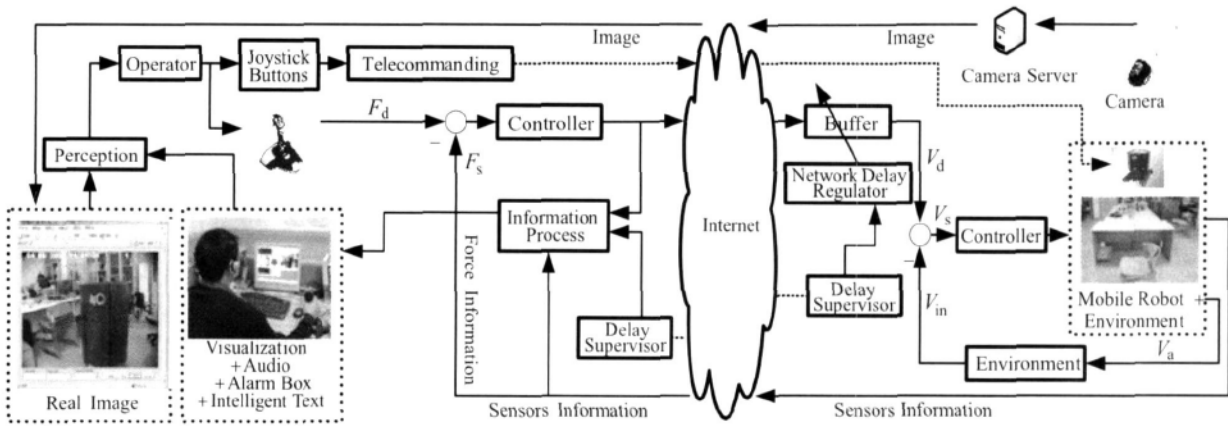


图 1 网络遥操作移动机器人系统框架

Fig 1 Architecture of mobile teleoperated robot system over Internet

移动机器人: 从端移动机器人接受速度指令, 采取闭环控制, 该速度可为矢量. 其速度大小可表示为:

$$V_d = K_p X(t) \quad (2)$$

其中 V_d 表示操纵杆产生的速度命令, K_p 表示位置-速度转换系数大小.

力反馈: 当接触障碍物时, 其力反馈可表示为:

$$F_m = -K_r \cdot r - K_v f(\theta) \cdot (|V_s| - |V_r|) \\ f(\theta) = \{ \cos(\theta), \sin(\theta) \} \text{ as } X, Y \text{ axis} \quad (3)$$

其中 K_r, K_v 分别为位置和速度力反馈增益, V_s 为机器人控制输入速度, 且满足

$$V_s = V_d - V_m \quad (4)$$

其中 V_m 为环境影响速度. V_r 表示障碍物速度大小, r 为依赖于机器人与障碍物距离 D 大小的变量, 且有:

$$r = \begin{cases} 0 & D \geq 100 \\ 0.5 & 50 \leq D < 100 \\ 0.7 & 10 \leq D < 50 \\ 1 & D < 10 \end{cases} \quad (5)$$

4 多信息感知原理 (Principle of multi-information perception)

网络遥操作系统多信息感知的目的就是通过各种途径, 将远程机器人与环境的交互信息 (包括视觉、力觉、触觉、听觉等) 与网络返程时延实时反馈到本地操作者处, 使操作者产生身临其境的感受, 并能够感知目前的网络时延大小, 从而实现对机器人遥操作系统带感觉的控制, 完成期望作业任务. 多信息感知原理如图 2 所示, 机器人现场环境、通讯环节的网络返程时延、目标特征点等信息, 通过对感知的信息进行预处理、分类和决策, 进一步转换输出为人可感知的可视化信息、听觉信息、力觉、报警灯和交互

文本.

预处理 (pre-processing): 由于多传感器输出的数据形式、对环境的描述和说明可能不一致, 为了使得操作者能够正确感知这些数据, 需要预先处理这些不同来源的信息. 首先, 对数据进行一致性检验, 将那些错误的、不真实的测量值从数据总体中去掉. 错误的信息一般来自传感器的故障等因素, 而不真实的数据则来自于外界环境因素如湿度、电磁等干扰. 其次, 把这些数据按照一定的标准转换成相同的形式、相同的描述或说明, 不仅要转换不同层次之间的信息, 而且还要转换对环境或目标的描述或说明的不同和相似之处. 最后, 由于传感器信息的获取是异步的, 坐标的变换是非线性的, 故要通过一定的法则对这些信息进行时间和空间的校准.

分类 (classification): 主要对多信息按冗余信息、互补信息和协同信息进行分类, 对冗余信息进行过滤, 对互补信息和协同信息进行进一步的提取和处理. 冗余信息是指系统中多个传感器提供的关于环境信息中同一特征的多个信息, 也可以是同一传感器在一段时间内多次测量得到的信息, 这些传感器信息表达的内容一般是同质的. 互补信息是指在一个多传感系统中, 每个传感器提供的环境特征都是彼此独立的, 即感知的环境是各个不同的侧面, 将这些特征综合起来就可以构成一个完整的环境描述. 协同信息是指某一传感器信息的获得必须依赖于另一个传感器信息, 这两个传感器提供的信息称为协同信息.

支持数据库 (support database): 其中包含: 传感器信息的测量范围、变化趋势等信息; 机器人自身速度、加速度、转角和运动方向等; 机器人现场环境可提前标定的信息; 图像采集和处理时间等信息; 网

络返程时延信息; 机器人可感知的障碍物信息等等. 该数据库可分为实时和非实时数据库. 实时数据库主要是把传感器信息实时传递给决策模块, 同时将

决策分析得到的中间结果保存下来. 非实时数据库主要存储传感器的历史数据, 有关目标和环境的辅助信息及推理决策的历史信息.

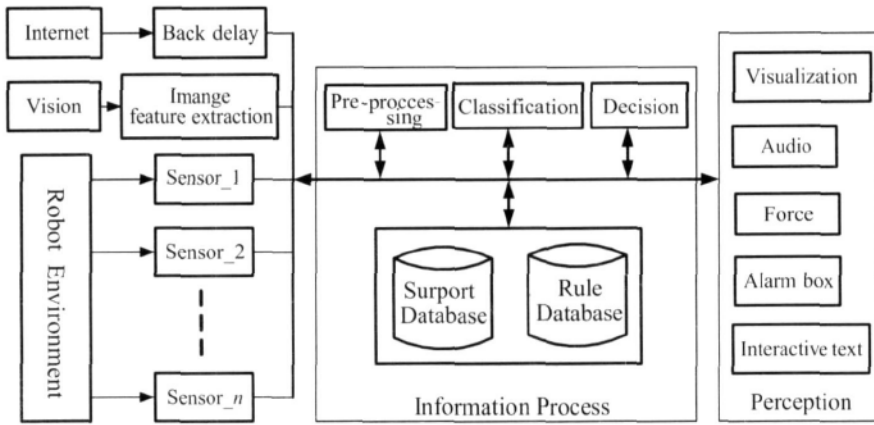


图 2 多信息感知原理

Fig 2 Principle of multi information perception

规则数据库 (rule database): 基于支持数据库, 对反馈回操作端的多信息, 做出智能决策, 并可视化反映给遥操作者, 其中包含: 多信息的预处理规则; 多信息的分类规则; 信息查询规则; 通过多信息进行智能决策的规则. 同样地, 该规则数据库也分为实时和非实时规则库. 实时规则库主要来自于操作者在与远端现场环境交互时形成的实时决策规则, 例如, 当网络通讯状况较差时, 操作者实时增加的机器人操作规则, 或操作者对系统预先设定的规则所做的实时修改. 非实时规则库主要来自于历史规则数据, 或系统预先设定的规则, 如障碍物报警、自主运动规划等.

决策 (decision): 该决策主要基于传感器信息, 通过支持数据库和规则数据库, 实现报警灯和交互文本等输出. 该决策方法可以根据贝叶斯估计法、专家系统、模糊控制、多逻辑推理等, 通过告警和交互文本与遥操作者之间实现交互. 该决策只是对操作者的决策提供辅助, 其最终的判断和决策主要来自于遥操作者.

感知 (perception): 多信息以视觉、听觉、力觉、报警灯及交互文本方式提供给操作者感知. 结合系统的辅助决策输出, 操作者会根据对系统的多信息感知, 考虑所要完成的控制任务, 基于自身的知识库进行综合、分析、推理和判断, 给出合理的控制命令. 操作者对于多信息感知这种复杂的处理过程可以划分为以下三个环节, 图 3 描述了这三个环节的信息感知流程. 第一, 通过对感知信息 (perceptive informar

tion) 进行综合、分析、推理和判断, 操作者理解系统目前状态和未来状态, 给出可能的控制选项. 假设通过视频反馈感知的系统目前状态为 $P(t)$, 若感知的时延大小为 ΔT , 则操作者预测的系统下一步状态可近似为 $P(t + \Delta T) = P(t) + V(t) \Delta T$. 第二, 考虑所要完成的控制任务, 通过自身知识库进行智能决策, 操作者从候选的可能控制选项中选择自认为合适的一个. 第三, 通过对前两个环节过程进行学习和经验总结, 形成更进一步的知识更新自身知识库.

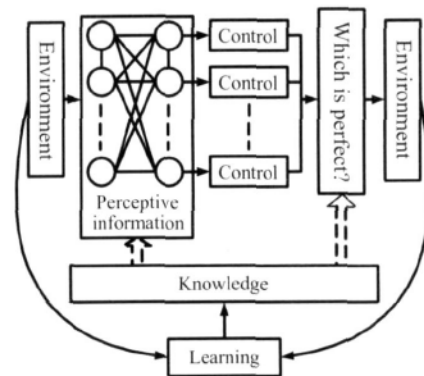


图 3 信息感知流程

Fig 3 Process of information perception

5 多信息感知实现 (Implementation of multi information perception)

除了系统已有的视频和力觉反馈外, 针对系统反馈的传感器信息、网络返程时延等, 通过信息处理模块加工后, 以时间权重、视觉、听觉、力觉、报警灯

和交互文本反映给操作者. 图 4 为网络机器人系统多信息感知用户界面, 依次为时间权重 (time weight)、力反馈曲线 (force feedback curve)、机器人速度 (robot speed) 和机器人在相机平面位置 (robot coordinate)、机器人可活动范围 (robot range)、机器人速度矢量指针圆盘 (control direction)、网络返程时延曲线 (network back delay)、报警灯 (alarm box) 和交互文本 (interactive text).

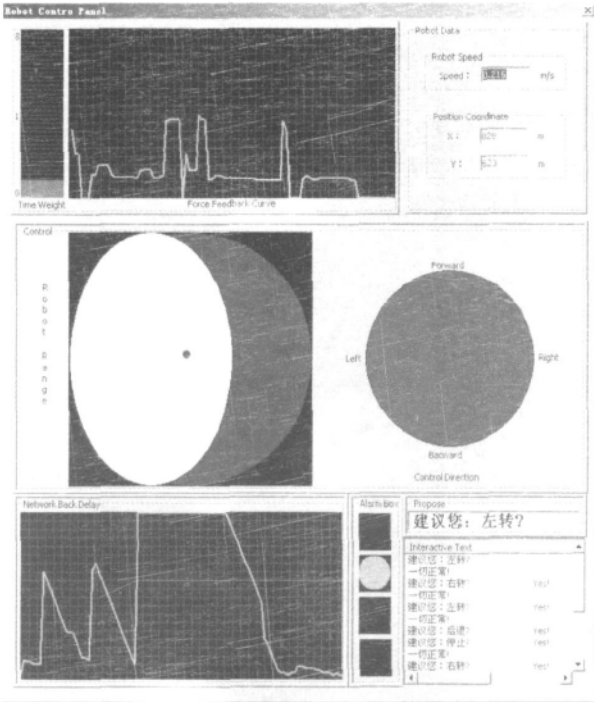


图 4 多信息感知下用户界面

Fig 4 User interface for multi-information perception

预处理: 首先, 基于支持数据库内传感器的可测量范围等信息, 对测量值进行一致性检验, 过滤错误和不真实信息. 然后, 将红外和超声传感器得到的测量值同一化, 即按相同度量值表述其所得距离. 最后, 利用一种时间权重估计方法, 解决传感器信息和现场视频反馈时间轴上的校准 (空间上的校准在此不作讨论). 因为视频数据和控制数据的采样、处理和传输时间是不同的, 所反映的状态信息在时间轴上是不一致的. 所以, 二者之间在时间轴上的校准是必要的. 忽略传感器的采样处理时间, 设系统传感器采样频率为 f_s , 反馈回操作端的传感器信息数据容量为 P_s . 忽略视频采样处理时间, 设其数据帧率为 f_v , 每帧图像大小为 P_v . 利用 TCP/IP 协议传递传感器数据, 利用 UDP/IP 协议传递视频数据, 则二者之间的传输时间比可近似为 τ_s/τ_{in} , 其中 τ_s 为传感器

数据传递时间, τ_{in} 为 τ_s 最小值. 以一种时间权重 $\Theta \in \mathbb{R}^+$ 表征传感器数据和视频数据二者之间在时间上的相差程度, 也就是比较二者谁先到达, $\Theta < 1$ 表示前者领先后者, $\Theta = 1$ 表示二者时间上相同, 则有:

$$\Theta = \gamma \times \frac{\tau_s}{\tau_{in}} \times \frac{f_s P_s}{f_v P_v} \quad (6)$$

其中 $\gamma < 1$ 表示忽略视频图像的缓冲、压缩和解压缩时间而增加的修正系数. 该时间权重直接通过用户界面显示给操作者.

分类: 多信息的分类主要是找出冗余信息、互补信息和协同信息. 由于超声和红外测距传感器其测量距离不同, 超声测距测量范围较大, 红外测量距离较小, 二者之间所得到的测量值中有一些测量信息是冗余和互补的. 如图 5 所示, “星号”表示的不规则图形为机器人实际测量的距离信息, 为红外和超声传感获得距离信息的叠加, 然后按照各自的测量范围剪裁得到的. 注意图中的椭圆形曲线, 该曲线为机器人实测的距离信息通过四点拟合 (任意一个椭圆可以由 4 个边界点确定) 转化得到, 并显示给操作者 (图 4 中的椭圆). 机器人距离信息和摄像头的焦距大小是可以协同的. 考虑超声和红外得到的距离信息, 可以自动调整摄像机的焦距, 使之与物体对焦, 从而获得环境中物体的清晰图像.

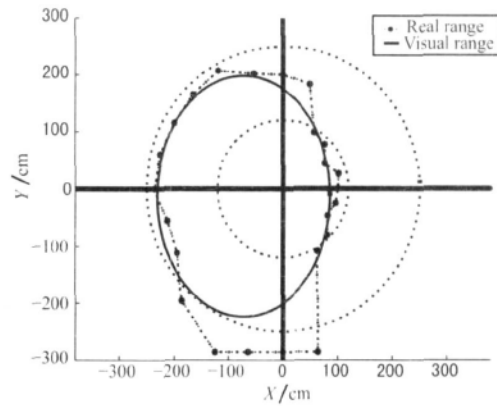


图 5 红外、超声传感器信息的可视化

Fig 5 Visualization of infrared and ultrasonic sensor data

决策: 主要通过报警灯和交互文本实现. 报警灯分为四级, 表征了当前机器人的四个安全级别: 极低、低、中、高, 该级别由 S 表示:

$$S = \begin{cases} \text{极低} & D \geq 100 \\ \text{低} & 50 \leq D < 100 \\ \text{中} & 10 \leq D < 50 \\ \text{高} & D < 10 \end{cases} \quad (7)$$

对于交互文本, 操作者根据系统提示的此文本, 通过操纵杆按钮发送远程命令控制远端机器人. 交互文本根据机器人目前的状态和危险程度给出, 分为提示性文本和交互性文本. 提示性文本为系统根据机器人与障碍物是否可能发生碰撞而给出的提示, 操作者无需对该文本做出答复. 而交互性文本为系统根据支持数据库和规则数据库, 警示操作者应该产生的控制命令, 分为向前、向后、向左、向右和停止五个动作, 如果操作者同意该提示文本给出的动作, 则按下相应的操纵杆按钮. 此时按钮产生的远程控制命令代替先前机器人的速度控制命令, 通过第二个网络连接传递数据. 终止远程控制命令方式只需按下相应的操纵杆按钮, 此时机器人停止. 网络时延很大时, 控制数据不能及时到达从端机器人, 此时机器人处于失控状态, 为此可以通过第二个网络连接传递紧急控制命令, 这些命令包括激活从端机器人自主避障和停止运动等.

感知: 为了增强对力觉的感知, 系统力反馈曲线量化显示给操作者; 对于听觉的感知, 目前实现了碰撞告警音, 即当系统检测到碰撞传感器输出时, 发出告警音给操作者; 对于网络返程时延的感知, 可以经过端对端的时钟同步后 (如何同步见第 6 节), 获取实际的网络返程时延曲线反映给操作者. 通过机器人运动状态、力反馈曲线和操纵杆信息等的定量显示, 操作者能够较好地感知系统目前的状态. 通过报警灯和智能文本, 增强了操作者的危机处理能力. 显然, 通过网络时延的量化显示, 结合时间权重大小, 操作者能够较好地感知系统下一步的状态. 而且, 力反馈曲线和时延曲线包含了一段历史数据, 更进一步增强了操作者对系统的感知.

6 网络时延处理 (Network delay processing)

6.1 返程时延获取

在实时控制系统中, 网络返程时延的获得需要端对端的时钟同步. 为此我们继续文 [31] 的工作, 该网络遥操作机器人系统端对端时钟同步算法如下:

第 1 步 握手: 向从端发送主端系统时间 $t_m = t_m + \Delta t$ 其中 t_m 为主端系统当前时间, $\Delta t = \tau$ 表示估计的前向网络时延, 其初始值为 $\Delta t = 0$ 从端接收该数据后立即回发该数据包, 并保存 \hat{t}_s 和其实际系统时间 t'_s .

第 2 步 校正: 主端接收到从端回发的数据包, 同时检测系统现在的时间为 t_1 , 计算 $\Delta t_1 = t_1 - \hat{t}_s$ 如

果 $|\Delta t_1 - \Delta t| \geq \xi$ ξ 为设定的时延误差阈值, 则返回第 1 步, 并令 $\Delta t = (t_1 - t_m) / 2$ 反之进入第 3 步.

第 3 步 确认: 发送完成同步标志, 从端收到该标志, 则确认与主端相对应的同步时间 \hat{t}_s 和其对应的从端系统时间 t'_s .

时间同步后, 主操作端接收数据包时的网络返程时延可以计算为:

$$\tau_n = t_m(n) - \hat{t}_s(n) \quad (8)$$

其中 $t_m(n)$ 表示主操作端接收数据包时的系统时间, $\hat{t}_s(n)$ 表示第 n 个数据包发送时从端相对于主端的系统同步时间, 若以 $t_s(n)$ 表示数据包发送时从端的系统时间, 则有:

$$\hat{t}_s(n) = t'_s + (t_s(n) - t'_s) \quad (9)$$

6.2 缓冲器管理

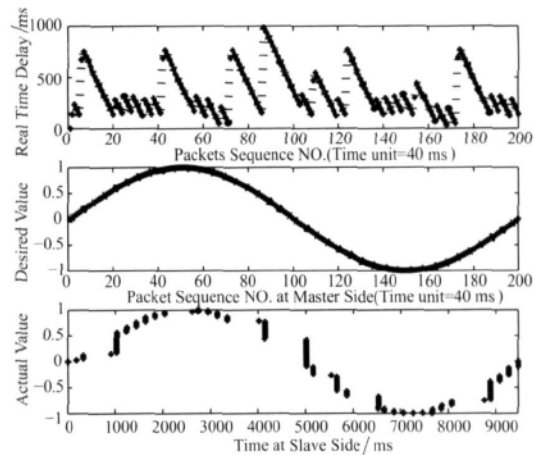


图 6 网络时延下正弦信号传输曲线

Fig 6 Sine signal transmitted over delayed network

由于网络提供的是尽力而为 (best-effort) 的数据传递服务, 其结构是动态变化的, 数据流量是不均衡的, 因而, 网络时延是不确定和动态变化的. 这种变化的网络时延导致了控制信号传递的严重失真和混乱. 图 6 第 1 行为广州—香港间的网络时延曲线; 第 2 行为主端发送的正弦信号, 200 次完成一个周期 2π 的采样, 每个采样发送间隔为 40 ms ; 第 3 行为主端正弦信号经第 1 行所示时延后到达从端时的信号波形. 显然经过网络时延后, 信号波形将严重失真, 且主从端对应于每个命令的执行时间变化很大. 注意第 3 行 X 轴为时间轴, 也就是说不但信号变形, 同时在同一个时刻从端会收到多个信号. 对于第 1 行所示时延变化, 实验中从端在同一个时刻收到的信号最多达到 18 个. 所以对于网络时延, 为了控制这种信号的失真和混乱, 尽可能地降低时延抖动, 需要

增加时延缓冲器。

为此,根据缓冲策略在从端设计了网络时延缓冲器,其原理如图 7 所示。

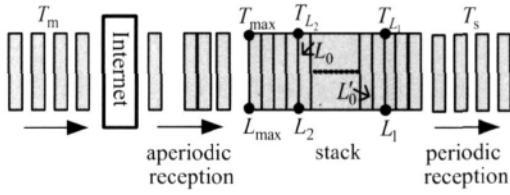


图 7 网络时延缓冲器原理

Fig 7 Principle of network delay buffer

我们改进了文 [32] 的缓冲器长度管理算法,其实现如下:

- 1) 如果 $L > L_{max}$, 其中 $L_{max} = L_2 + L_1$, 则缓冲队首开始判断是否为关键命令, 如果不是, 则丢弃该数据, 直至缓冲队列长度为 L_{max} , 同时 $L_2 = L_2 + 2 \times L_1$.
- 2) 如果 $L_2 < L \leq L_{max}$, 则 $T_s(n) = \lceil 10 + T_s(n - 1) \rceil / 2$
- 3) 如果 $L_1 \leq L \leq L_2$, 则 $T_s(n) = T_m$ 且 $L_{FixLen} + 1$ 如果 $L_2 > L_{initiated}$ 且 $L_{FixLen} > 2 \times L_2$, 则 $L_2 = L_2 - 0.5 \times L_1$, 同时令 $L_{FixLen} = 0$
- 4) 如果 $L \leq L_1$, 则 $T_s(n) = 1.5 \times T_s(n - 1)$.
- 5) 如果 $L = 0$ 则 $T_s(n) = T_m$, 此时发生空采样。

6.3 网络双连接

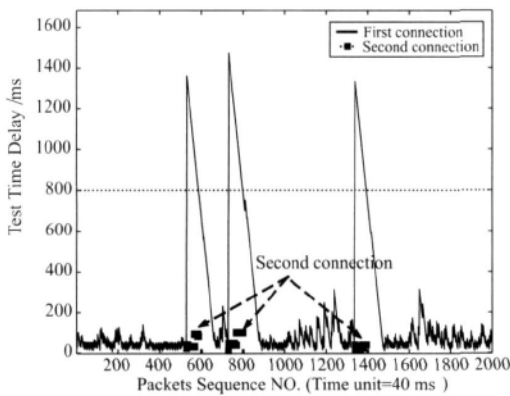


图 8 双连接下的网络单程时延

Fig 8 Oneway network delay under double connections

当网络发生拥塞时,发送窗口下降,此时的应用层数据受 TCP 的控制不能注入网络,从而导致该连接上的数据传递时延增大。发生拥塞时的窗口显然比其初始值要小得多,为此,当一个连接的时延很大时,可以采用备用连接来传递一些紧急数据。当备用连接启动时,其窗口为初始窗口值。显然,在该初始

窗口值下传递数据,连接上的数据能够立即注入网络,从而得到的网络时延较小。图 8 显示了广州—沈阳双连接下的单程网络时延,其中连续抖动曲线表示第一个连接的网络时延,箭头所指部分表示当第一个连接时延大于 800 ms 时启用第二个连接所得到的网络时延。由图中可以明显看出,当第一个连接时延较大时,第二个连接的网络时延相比之下要小很多。所以,在我们的系统实现中,控制数据使用第一个连接来传递数据,第二个连接用来传递系统控制所发送的紧急数据、由操纵杆按钮产生的远程控制命令数据。

7 实验 (Experiments)

为了验证多信息感知辅助下网络遥操作机器人系统的实际控制效果,我们在华南理工大学和北京邮电大学两点之间进行了多次实际系统操作实验。

实验 1 实验任务是操作者控制从端机器人穿越以固定速度往返运动的障碍小车,该小车以南北向往返运动,机器人为东西向穿越。显然,随着小车往返速度的增大,机器人成功穿越的难度也增大。实验中,机器人最大速度为 V_{max} ,表 1 显示了在有、无多信息感知辅助时网络机器人控制的实验比较结果。目前普遍存在的遥操作系统一般只有现场视频和力觉这两种信息反馈,本文构建的网络遥操作机器人系统除了视频和力觉反馈外,还包括图 4 所示的多信息反馈及听觉反馈,为了区别这两种系统,此处多信息感知辅助下的遥操作系统指本文构建的机器人系统,而无多信息感知辅助的系统则为只有视频和力觉反馈的遥操作系统。可以看出,有多信息感知辅助的网络遥操作,其完成任务的平均时间更短,成功次数更多,大大增强了机器人的远程控制性能和准确性。

表 1 有、无多信息感知辅助时的系统实验结果
Table 1 Experimental results of system with and without multi information perception

障碍小车速度	是否多信息感知辅助	实验次数	通过次数	平均完成时间 (s)
$1 \times V_{max}$	有	5	3	34.370
	无	5	0	---
$0.5 \times V_{max}$	有	5	5	32.073
	无	5	3	49.872
$0.2 \times V_{max}$	有	5	5	28.830
	无	5	4	41.524

实验 2 实验任务是操作者控制从端机器人先做自由的蛇形前进运动,然后避过固定障碍物,最后是避开迎面而来的移动障碍物。图 9 第 1 行和第 2 行

表示在多信息感知辅助下移动机器人在 X 和 Y 方向的实际路径, 此时机器人与环境作用的力反馈见图 10 图 11 第 1 行和第 2 行表示没有多信息感知辅助时移动机器人在 X 和 Y 方向的实际路径, 此时的力反馈见图 12 图 10 中, 当移动机器人遇到障碍物时产生较大的力反馈, 其中左边第 1 个较大跃升表示与固定障碍物相遇, 第 2 个表示与移动障碍物相遇. 图 12 中, 多个较大跃升显示机器人难以避开障碍物, 最后一个跃升显示机器人失去控制与环境发生碰撞. 通过比较图 9、图 11 和图 10、图 12 可以发现, 显然有多信息感知辅助的网络遥控机器人系统控制效果更佳. 如果没有多信息感知辅助, 从图 11 中存在 X 和 Y 方向大量相同的位置可以看出, 操作者主要通过“Look-Move”策略控制移动机器人, 而且操作者在避免同障碍物碰撞时要更加小心, 尤其是对移动障碍物的避障. 通过比较上述各图横坐标值发现, 没有多信息感知辅助时机器人完成同样的任务所花费的时间是有多信息感知辅助时机器人完成时间的 5 倍多.

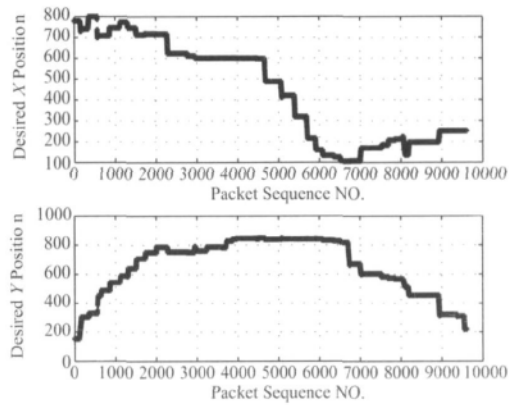


图 11 没有多信息感知辅助时移动机器人的位置
Fig 11 Position of mobile robot without multi information perception

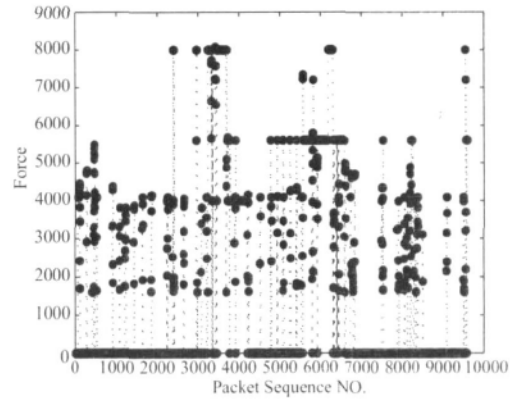


图 12 没有多信息感知辅助时的力反馈
Fig 12 Force feedback without multi information perception

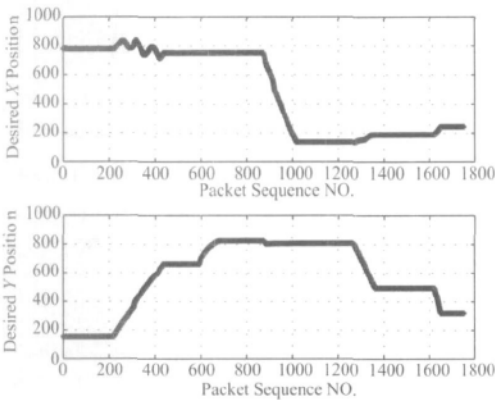


图 9 有多信息感知辅助时的移动机器人位置
Fig 9 Position of mobile robot with multi information perception

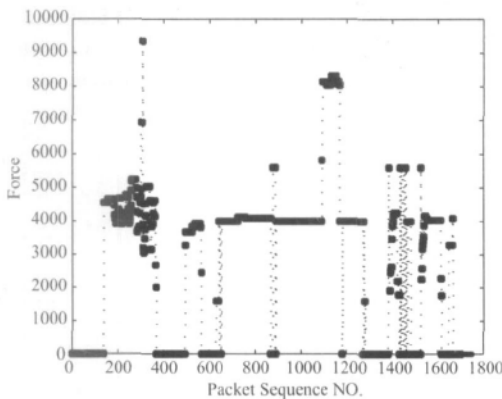


图 10 有多信息感知辅助时的力反馈
Fig 10 Force feedback with multi information perception

讨论: 通过上述实验结果, 与目前一般的网络遥控操作机器人系统相比较, 多信息感知辅助的网络遥控操作系统具有如下优势: (1) 反应直观. 由于操纵杆等控制输入设备的惯性, 人一般只能对持续的力做出反应. 同时, 人眼看到的比单纯的力感觉反映也更快. (2) 感觉丰富. 多信息感知相对于视频和力觉反馈, 能够提供给人更多的感知信息, 尤其是定量感知信息. (3) 信息传递快. 因为视频数据量相对于传感器数据量要大得多, 同时对视频数据, 经历采样—压缩—传输—缓冲—解压等阶段, 处理周期长. (4) 系统更可靠和鲁棒. 多传感器信息及网络时延信息, 提供给人感知整个网络机器人系统的途径更多, 当其中的某个感知信息发生错误或失去功能时, 其他感知信息也能使得人的感知不会完全丢失. (5) 利用时间权重关系, 初步实现了对反馈信息在时间轴上的校准, 通过时延曲线, 促进了人对系统未来状态的感知. (6) 由图 4 所示信息感知流程可以看出, 所实现

系统充分考虑了人的高智商和自学习能力, 进一步提高了系统控制性能和准确性。

8 结论 (Conclusion)

本文描述并实现了多信息感知辅助的网络遥操作机器人系统。该系统以视觉、听觉等多种途径对机器人多传感器信息及网络单程时延进行知觉转化, 增强了操作者对整个网络遥操作机器人系统的感知, 为操作者的正确决策提供了一个较好的辅助途径。同时, 通过操作者和文本的交互, 实现了在直接速度控制基础上的远程命令控制, 增强了系统控制的鲁棒性。利用文中的时延处理技术, 较好地克服了网络可变或突变时延对遥操作系统的影响。通过所得的实验结果可以看出, 操作者能够利用多信息感知, 更好地实现网络机器人的远程操作和控制。

参考文献 (References)

- [1] Goldberg K, Mascha M, Gentner S, *et al*. Desktop teleoperation via the World Wide Web [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1995: 654–659.
- [2] Pauls E, Canny J. Delivering real reality to the World Wide Web via telerobotics [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1996: 1694–1699.
- [3] Banach J E F, Cox M J. Remote control and robots: An Internet solution [J]. Computing and Control Engineering Journal, 1996, 7(1): 39–45.
- [4] Brady K, Tam T J. Internet-based remote teleoperation [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1998: 65–70.
- [5] Simmons R, Fernandez J L, Goodwin R, *et al*. Lessons learned from Xavier [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, 7(2): 33–39.
- [6] Stein M R. Interactive Internet artistry [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, 7(2): 28–32.
- [7] Chums C L, Prozesky V M, Springhorn K A. The remote control of nuclear micropores over the Internet [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1999, 158(1–4): 124–128.
- [8] Saucy P, Mondada F. KheperOnTheWeb: open access to a mobile robot on the Internet [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, 7(1): 41–47.
- [9] Taylor K, Dalton B. Internet robots: A new robotics niche [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, 7(1): 27–34.
- [10] Schilling K, Roth H, Lieb R. Remote control of a “Mars Rover” via Internet – To support education in control and teleoperations [J]. Acta Astronautica, 2002, 50(3): 173–178.
- [11] Preusche C, Ortmaier T, Hirzinger G. Teleoperation concepts in minimal invasive surgery [J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(11): 1245–1250.
- [12] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(5): 494–501.
- [13] Lawrence D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 624–637.
- [14] Xin N, Tam T J. Stability analysis of non-time referenced Internet-based telerobotic systems [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 32(2): 173–178.
- [15] Elhajj I X N, Fung W K, *et al*. Supermedia-enhanced Internet-based telerobotics [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(3): 396–420.
- [16] Andreu D, Fraisse P, De Los Rios J A S. Teleoperation over an IP network: From control to architectural considerations [A]. Proceedings of the 8th International Conference on Control Automation, Robotics and Vision [C]. New York, USA: IEEE, 2004: 765–770.
- [17] Wang S H, Xu B G, Wang Q Y. Delays analysis for teleoperation over Internet and Smith predictor with adaptive time-delay control [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2005: 664–669.
- [18] Casavola A, Mosca E, Papini M. Predictive teleoperation of constrained dynamic systems via Internet-like channels [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 681–694.
- [19] Ramos J J G, Maeta S M, Mirisola L G B, *et al*. Internet-based solutions in the development and operation of an unmanned robotic airship [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(3): 463–473.
- [20] Brunner D J, Few D A, Walton M C, *et al*. “Turn off the television”: Real world robotic exploration experiments with a virtual 3-D display [A]. Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2005: 296.
- [21] Itoh T, Yudate K, Ito S, *et al*. New predictive display method of motion and force information for network teleoperation without using virtual environment model [A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2003: 2815–2822.
- [22] Smith O J. A controller to overcome dead time [J]. ISA Journal, 1959, 6(2): 28–33.
- [23] Liu P X, Meng M Q H, Liu P R, *et al*. An end-to-end transmission architecture for the remote control of robots over IP networks [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(5): 560–570.
- [24] Oboe R. Force-reflecting teleoperation over the Internet: The JBIF project [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(3): 449–462.
- [25] Uchinura Y, Yakhov T. Bilateral robot system on the real-time network structure [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5): 940–946.

- [12] Wang K, Yan G. Micro robot prototype for colonoscopy and in vitro experiments [J]. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 2007, 31(1): 24- 28.
- [13] 王坤东, 颜国正, 张涛. 微创诊疗微机器人结肠镜系统的研制 [J]. *北京生物医学工程*, 2006, 25(5): 498- 502.
- [14] 左建勇, 颜国正. 用于肠道检查的微型蠕虫机器人 [J]. *上海交通大学学报*, 2004, 38(8): 1310- 1313.
- [15] Puers R, Vandevoorde G. Recent progress on transcutaneous energy transfer for total artificial heart systems [J]. *Artificial Organs*, 2001, 25(5): 400- 405.
- [16] Lin H G, Yoon Y H, Lee C W, *et al*. Implementation of a transcutaneous charger for fully implantable middle ear hearing device [A]. *Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2005, 6813- 6816.
- [17] Rintoul T C, Dolgin A. Thoratec transcutaneous energy transformer system: A review and update [J]. *ASAIO Journal*, 2004, 50(4): 397- 400.
- [18] 马官营, 颜国正, 于莲芝, 等. 人体消化道内微机电系统线圈耦合系数分析 [J]. *北京生物医学工程*, 2006, 25(5): 486- 489.
- [19] Ma G Y, Yan G Z, He X. Power transmission for gastrointestinal microsystems using inductive coupling [J]. *Physiological Measurement*, 2007, 28(3): 9- 18.
- [20] Lenaerts R, Puers R. An inductive power link for a wireless endoscope [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22(7): 1390- 1395.
- [21] 王文兴. 人体胃肠道微创检查系统及其实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [22] Dario P, Ciarletta P, Menciassi A, *et al*. Modeling and experimental validation of the locomotion of endoscopic robots in the colon [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(4- 5): 549- 556.

作者简介:

马官营 (1978-), 男, 博士生. 研究领域: 无线能量传输, 数字化医疗设备.

颜国正 (1961-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 精密工程, 微特机器人, 生物医学工程.

(上接第 55 页)

- [26] Tsuji T, Kato A, Ohnishi K, *et al*. Safety control of teleoperation system under time varying communication delay [A]. *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control* [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2004, 463- 468.
- [27] Fong T, Thorpe C, Baur C. Robot asker of questions [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 42(3- 4): 235- 243.
- [28] Wang M, Liu J N K. Interactive control for Internet-based mobile robot teleoperation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 52(2- 3): 160- 179.
- [29] Sin K B, Byun K S, Harashina F. Internet-based teleoperation of an intelligent robot with optimal two-layer fuzzy controller [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(4): 1362- 1372.
- [30] Abidi M A, Eason R O, Gonzalez R C. Autonomous robotic inspection and manipulation using multisensor feedback [J]. *Computer*, 1991, 24(4): 17- 31.
- [31] 王世华, 胥布工, 刘云辉. 网络实时系统端对端的时钟同步研究及算法实现 [J]. *信息与控制*, 2007, 36(3): 352- 356, 385.
- [32] 王世华, 胥布工, 刘云辉, 等. 预估控制下的实时网络遥操作移动机器人 [J]. *机器人*, 2007, 29(4): 305- 312.

作者简介:

王世华 (1979-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人学, 网络控制系统理论与应用.

胥布工 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员. 研究领域: 时滞和不确定控制系统的分析与综合, 网络化控制系统理论与应用, IP 网络和现场总线的应用.

刘云辉 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员. 研究领域: 机器人学, 机电系统, 视觉伺服.