

文章编号: 1002-0446(2002)06-0535-05

面向亚毫米级微粒的遥操作系统设计*

彭 刚 黄心汉 刘 敏 吕遐东

(华中科技大学控制科学与工程系 武汉 430074)

摘 要: 本文介绍了适用于微靶装配的遥操作机器人系统及其关键技术, 包括对亚毫米级微粒物体进行微操作的真空吸附装置的工作原理、构成和控制; 适合于微靶装配要求的高精度机械手的运动控制; 以及基于网络的遥操作技术等。

关键词: 微操作; 遥操作; 真空吸附; 机器人; 运动控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

SYSTEM DESIGN OF MICRO-OPERATION SUB-MILLIMETER OBJECT BASED ON TELEOPERATION

PENG Gang HUANG Xin-han LIU Min LU Xia-dong

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: This paper presents micro-operation system for sub-millimeter micro-object based on teleoperation. The principles and implementation of the vacuum micro-tool, the structure and control of the vacuum system, the motion control of high precise manipulator for micro-operation tasks, and the teleoperation input device, are discussed in detail.

Keywords: micro-operation, teleoperation, vacuum micro-tool, robot, motion control.

1 引言(Introduction)

微操作机械手在生物工程、临床医学、微细零件的加工和装配等领域有着重要的意义和良好的应用前景, 越来越受到人们重视, 已经成为机器人研究领域的一个重要方向和研究热点。由于工业机器人体积庞大笨重, 而且在定位精度和灵活性上很难满足微小运动及准确拾取、放置微小物体的要求, 很难在上述应用场所发挥作用。随着微型驱动器件、微操作技术和材料的日益完善和出现, 使微操作机械手的研制成功成为可能。

近年来, 国外利用机器人对微粒物体进行微操作的实验研究有较大进展, 如澳大利亚蒙那西大学的 R. A. Russell 研究了“用于完成亚毫米级抓取及操作任务的机器人系统”, 可完成距离为 0.05mm 的移动, 并可对大小为 0.2mm 到 2mm 的目标进行操作^[1]。瑞士联邦技术学院的 W. Zesch 等人研究了一

种由玻璃吸管和计算机控制的真空源组成的真空夹持工具, 并将该工具集成到纳米机器人(NanoRobot)上进行测试, 可抓取尺寸为 100 μ m 的金刚石晶体, 并把它放置到任意位置^[2]。日本东京大学的 Hideki Miyazaki 等人研究了“微粒物体三维结构的机械装配”, 深入分析了微粒物体间的动力学及其操作原理^[3]。

本文研究的对象是惯性约束聚变(ICF)模拟靶球的操作和装配。模拟靶球通常为 200-600 微米直径的玻璃壳或塑料壳小球, 在进行模拟实验前, 需将这种亚毫米级的微小球状物体安装在不同形状的靶腔内或靶杆上, 安装的定位精度要求达到微米级, 供打靶实验使用。另外, 在进行惯性约束聚变时, 由于环境的要求, 需要对靶球进行遥控操作和装配。因此, 本文将基于真空吸附原理的微操作技术和遥操作技术有机地结合起来, 可以降低操作难度, 提高系

* 基金项目: 本文由国家 863 计划 416 主题项目资助, (项目编号为: 863-416-3.3.9)。

收稿日期: 2002-03-15

统的安全性、可靠性和装配效率,极大地方便靶球的安装和装配。

2 基于遥控的微操作系统(Micro-operation system based on teleoperation)

目前,国内外有很多基于网络的机器人遥操作系统,例如西澳洲大学的 Telerobot 系统^[4],美国南加州大学的 Mercury 项目^[5]和 TeleGarden 项目^[6], Berkeley 大学的 Mechanical Gaze 系统^[7],英国 Bradford 大学 Robotic Telescopes^[8]等。这些基于网络的机器人遥操作系统改变了传统点到点式的机器人控制方式,操作者可以控制远端的机器人,就象是在现场亲自操作一样^[9],来完成指定的任务,从而提供了一种崭新的人机交互环境。

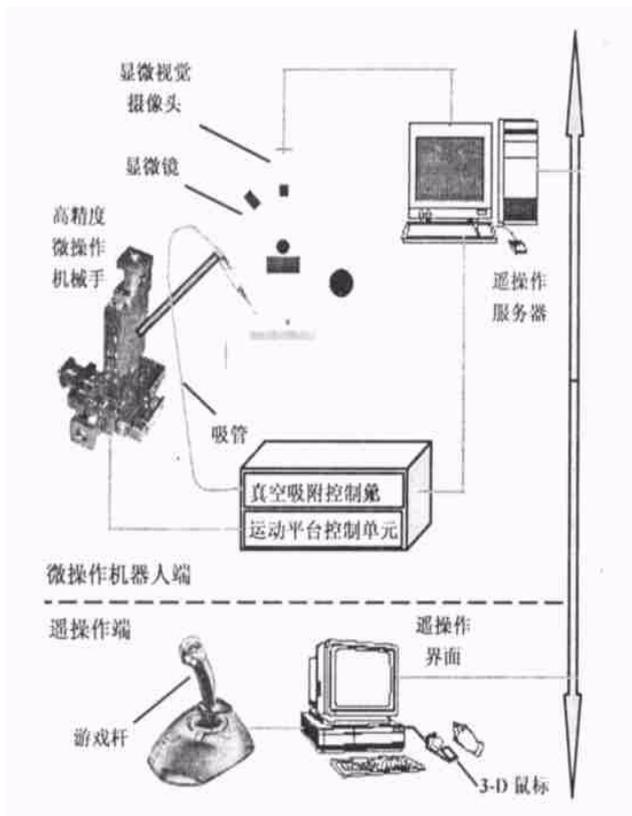


图1 系统结构图

Fig. 1 Sketch man of system strucutre

图1为面向亚毫米级微粒的遥操作系统实验平台。主要包括局域网、Micro-Slides 高精定位机械手、真空吸附装置、基于 DSP 的多轴运动控制器、显微视觉摄像头、遥操作服务器、遥操作界面以及输入设备等。遥操作服务器主要负责高精机械手的运动控制、轨迹规划、视频捕捉以及真空吸附装置的控制,并与遥操作用户进行通讯。而遥操作用户可以通过有关的输入设备,如键盘、游戏杆等,控制机械手

的运动(包括大尺度的粗运动和小尺度的精运动),吸取操作和释放操作,完成对亚毫米级靶球的装配作业。

3 微操作机器人系统的设计(Design of micro-operation robot system)

包括2个部分:真空吸附单元和高精度的运动控制单元。其中,真空吸附单元是对亚毫米级物体进行拾取和放置的关键,而高精度的伺服运动控制单元则是完成微操作和装配任务的前提和保障。

3.1 真空吸附

对微粒物体进行微操作的方式主要有两种:一是用微夹钳夹取方式,二是用真空或静电吸附方式。若采用微夹钳夹取方式,对微夹钳的材料、设计和加工工艺要求高,并且驱动困难。而静电吸附方式对吸盘的加工要求高,不同操作对象所采用的吸盘材料也不同,给操作带来不便。因此,我们采用真空吸附方式,利用粘着力和真空吸附产生的负压对物体进行吸取,利用正压力进行放置。

3.1.1 微操作中的粘着力分析

在对亚毫米级微粒状物体(微靶)进行微操作(拾取与放置)时,由于对象的几何尺寸微小,粘着力起着主导作用,微粒物体的重力可忽略不计,如图2所示^[2]。其中,粘着力主要由表面张力、范德华力和静电力组成。

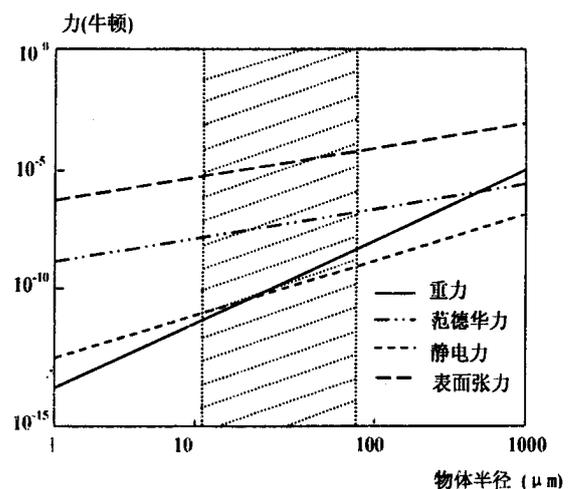


图2 重力和附着力量

Fig. 2 Force analyse

1) 表面张力 F_{cap} (Capillary Force)

表面张力 F_{cap} 是最重要的粘着力分量,它是存在于物体接触面之间的作用力,其大小近似为

$$F_{cap} = \pi d \gamma \quad (1)$$

其中, d 为接触面直径, γ 为亲水系数.

2) 范德华力 F_{vdw} (Van der Waals Force)

范德华力 F_{vdw} 是运动电子之间的作用力, 其大小有如下近似关系

$$F_{vdw} = \frac{Hd}{12z^2} \quad (2)$$

其中, d 为物体直径, z 为物体与接触面之间的距离, H 为 Hamaker 系数. 它与物体表面的粗糙度有关, 表面光滑时, Hamaker 系数大, 表面粗糙时较小.

3) 静电力 F_{el} (Electrostatic Attraction)

静电力 F_{el} 是两个带电物体间的库仑力, 其大小可由下式表示

$$F_{el} = \frac{\pi \epsilon - \epsilon_0}{4\epsilon_0 \epsilon + \epsilon_0} d^2 \sigma^2 \quad (2)$$

其中, ϵ_0, ϵ 分别为空气和物体表面的介电系数, d 为物体的直径, σ 为表面电荷密度. 为了减小静电的影响, 需要对传导表面进行放电处理, 并对周围环境进行电离.

3.1.2 吸取和释放条件的力分析

微操作时, 微粒与吸管之间的运动速度近似等于零, 范德华力可忽略不计. 并假设已经对物体进行了放电处理, 因此静电力也可忽略不计. 图 3 示出了微小物体的受力情况^[2]. 其中 F_g 为重力, F_z 为微粒与台面的粘着力(垂直方向), F_x 为切向粘着力, F_n 为吸管与微粒的粘着力, F_t 为吸管与微粒的切向粘着力, α 为吸管与台面的夹角.

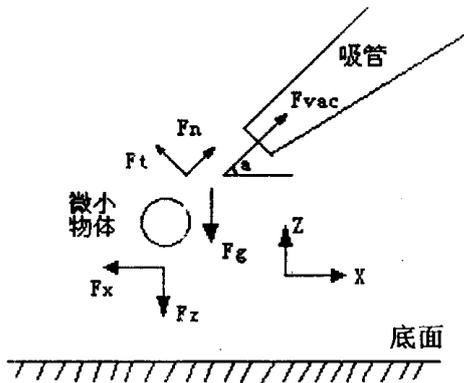


图 3 微小物体的受力情况

Fig. 3 Force analyse of micro-objects

1) 设负压吸取力为 F_{vac} , 则吸取的必要条件为

$$F_{vac} > \sin(\alpha)(F_g + F_z) + \cos(\alpha)F_x - F_n \quad (4)$$

当物体半径在 $10 \sim 100\mu\text{m}$ 之间时, 重力 F_g 可忽略不计, 则式(4)可简化为

$$F_{vac} + F_n > \sin(\alpha)F_z + \cos(\alpha)F_x \quad (5)$$

2) 设正压释放力为 F_p , 则释放的必要条件为

$$F_n < \sin(\alpha)(F_g + F_z) + \cos(\alpha)F_x + F_p \quad (6)$$

忽略重力作用, 式(6)可简化为

$$F_n < \sin(\alpha)F_z + \cos(\alpha)F_x + F_p \quad (7)$$

比较式(5)和式(7)可知, 吸取和释放的条件对微粒与吸管之间的粘着力有相反的要求: 在进行吸取操作时, 为了增加吸附力, 要求尖端直径大些; 而为了成功地放置微粒, 希望减小吸附力, 又要求尖端直径小些, 因此, 在设计吸管的形状和尺寸时要综合考虑, 兼顾吸取和放置两方面的要求. 根据有关资料^[2]和实验结果, 在空气湿度为 $25 \sim 70\%$ 时, 最佳的尖端尺寸大约为微粒尺寸的 $25 \sim 50\%$, 如半径为 $100\mu\text{m}$ 的微粒物体, 其吸管尖端口径的合理尺寸应为 $25 \sim 50\mu\text{m}$.

3.1.3 真空吸附系统的构成

真空吸附系统主要由压力源、压力调节阀、真空发生器、电磁开关阀和吸管等组成, 如图 4 所示. 为了保证系统的安全和可靠性, 在压力源和电气比例调节阀之间加入了空气过滤器, 以防止空气中的水份对电气比例阀门中的精密器件造成损害. 由于操作的物体微小, 在释放过程时, 若气流量太大可导致微粒不能稳定的被放置, 故有必要在压力调节阀与开关 2 之间加入一个速度控制阀. 另外, 为了保证气路的方向性, 在吸管与真空发生器之间加入单向阀.

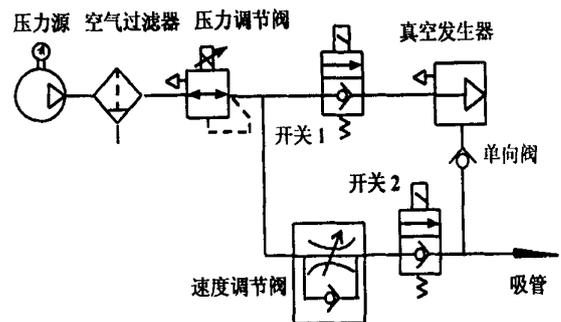


图 4 真空吸附系统的构成

Fig. 4 Structure of vacuum adhering device

真空系统的核心部分为产生真空的气流喷射泵 (Venturi jet pump), 即真空发生器, 它的高压端由压力源和一个线性压力调节阀控制, 开关 1 开启、开关 2 关闭时, 为真空发生器提供合适压力的气流, 系统对应于“吸取”状态. 开关 1 关闭、开关 2 开启时, 系统对应于“释放”状态.

3.2 高精度微操作机械手的控制

微操作的运动精度要求达到微米级, 这就要求

伺服系统的速度环和位置环要有较高的采样频率,采用普通的单片机已不能胜任,需要采用高速的运算处理器.我们在高精度微操作机械手控制系统中采用了基于 DSP(ADSP21 系列)的运动控制模块,以满足对亚毫米靶球进行微操作的精度要求.运动控制模块负责将上位机(遥操作服务器)传来的距离、速度和加速度数据等转化为相应的脉冲数、频率和频率变化率,并发给电机驱动模块,同时监测电机的正负限位和其它故障信号,实时地向上位机报警.

在微操作系统中,若运动轨迹的规划仍采用梯形曲线运动模式^[10],则是不合适的.这是因为为了获得稳定的运动特性,在运动轨迹中间的各直线插补段和圆弧插补段转接处,应尽可能减少沿轨迹切线方向合成速度的变化,否则会产生较大的震动,影响微操作的顺利进行.因此,微操作过程中的运动轨迹规划应采用 S-曲线运动模式,而不是梯形曲线运动模式.图 5 为典型的 S-曲线模式的速度、加速度、加加速度的规划曲线图.运动控制过程描述如下:在开始的 1 区,加速度从零开始,以设定的最大加速度为目标,以加加速度(单位时间内加速度的增量)为增量递增,直到达到最大加速度为止;在 2 区,加加速度为零,按已达到的最大加速度加速到第 3 区;然后,按负的加加速度使加速度减为零值,使速度达到最大值.到此完成运动的加速过程;第 4 段为匀速运行阶段,加速度和加加速度都为零;在第 5、6、7 阶段与第 1、2、3 阶段类似,不同的是减速运行到速度为零.这样,运动过程稳定、平滑,从而保证了微操作过程的顺利进行.

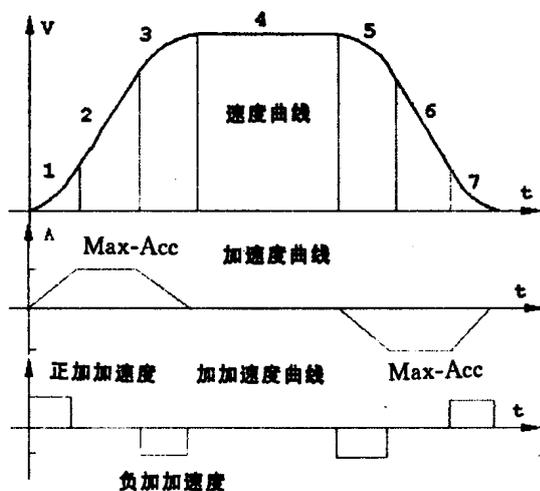


图 5 S-曲线模式的速度曲线

Fig. 5 Velocity curve of S-curve mode

4 遥操作(Tele-operation)

通过网络,利用输入设备,远程控制微操作机械手的运动,以及吸取和释放靶球,可以提高系统的安全性和可靠性.为了适应微操作的要求,遥操作输入设备设计成既可进行大尺度的粗运动,也可进行小尺度的精运动.如图 6 所示,通过映射罗技游戏杆上的各个按键,完成微操作机械手的 XYZ 运动、大小步长调整、紧急停止以及吸取和释放等操作.

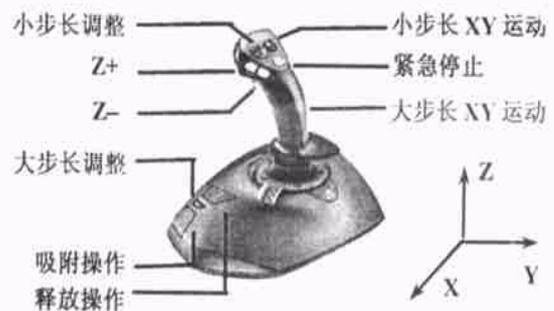


图 6 遥操作输入设备按钮的定义

Fig. 6 Definition for teleoperation input device

在遥操作系统中,服务器和遥控端之间的通讯数据主要有以下几种类型:设置参数,遥操作命令,位置反馈和状态数据以及视频图象.其中,前三种数据类型的数据包小,对数据的可靠性和完整性要求高,采用面向连接的 TCP Socket 进行传输.而视频图象的数据包尺寸大,易受网络负荷、延时和丢失的影响,采用实时传输协议(RTP over UDP),视频编码方案为 JPEG.

5 实验(Experiment)

微操作机械手工作空间长 50 毫米,宽 50 毫米,高 50 毫米.伺服系统运动控制分辨率为 0.25 微米(1 个脉冲),重复定位精度为 ± 2 微米,绝对定位精度为 ± 2.5 微米,直线度(平直度)为 ± 2.5 微米;显微视觉的最大可见区域长 2500 微米,宽 2500 微米.实验所用靶球直径为 100 微米.图 7 示出了真空系统的微操作过程,具有 4 种不同的操作模式,即待命模式、负压吸取模式、保持模式和正压释放模式.遥操作命令经网络传送到微操作机器人系统,控制微操作机械手的运动,并由单片机控制器控制真空单元中的压力调节阀和开关,使真空系统根据靶球装配作业的要求,在适当时候产生适当大小的正负气压.负压时,可使玻璃吸管的尖端牢牢地吸取靶球,正压时,将靶球准确地释放到靶腔的装配点上.

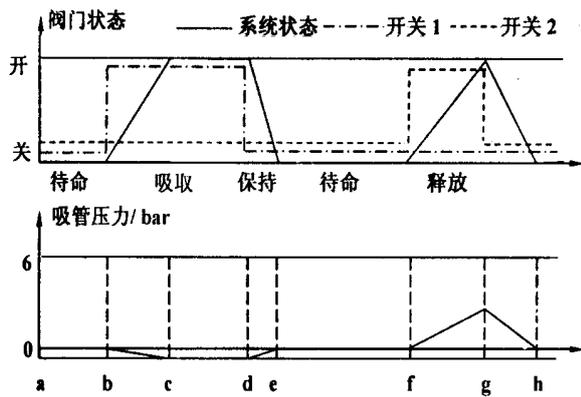
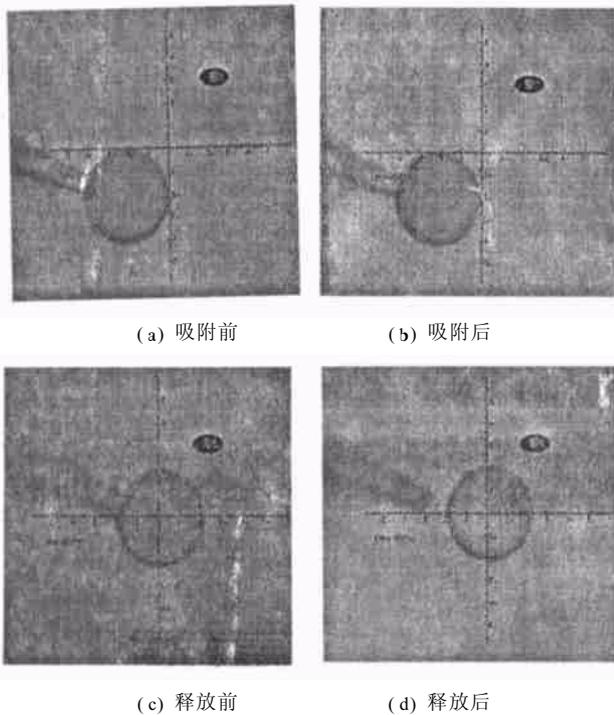


图 7 真空系统的操作过程

Fig. 7 Operation process of vacuum system

吸取和释放操作实验如图 8 所示.



(a) 吸附前 (b) 吸附后

(c) 释放前 (d) 释放后

图 8 微操作实验

Fig. 8 Experiment of micro-operation

开始时, 系统处于待命状态, 此时, 可采用大尺度的粗运动方式控制微操作机械手快速靠近靶球, 然后, 采用小尺度的精细运动方式使机械手慢慢接近靶球, 如图 8(a) 所示. 在 b- c 段, 真空吸附装置的开关 1 打开, 开关 2 关闭, 由于负压的作用, 靶球被吸管吸起, 如图 8(b) 所示. 在 d- e 段, 可关闭开关 1, 此时只需依靠靶球与吸管之间的粘着力就可将靶球吸取(重力远小于粘着力), 而无需再提供负压吸力 F_{vac} , 并为释放操作做好准备. 在 e- f 段, 可通过游戏杆上的按钮, 遥控调整机械手运动步长的大小, 使之快速接近期望位置, 如图 8(c) 所示. 之后在 f- g 段,

就可打开开关 2, 将靶球释放, 如图 8(d) 所示.

在实验中, 我们发现释放操作的成功率要低于吸附操作. 一方面, 这与吸管口径尺寸有关^[2], 另一方面, 与释放操作时所需要产生的正压“吹力”大小(以克服靶球与吸管之间的粘着力)有关. 因此, 今后所要解决的主要问题在于提高释放操作的成功率.

6 结论(Conclusion)

本文研究了对亚毫米级微靶进行遥控微操作的关键技术. 通过真空吸附技术、高精度的运动控制技术以及基于网络的遥控技术的有机结合, 提高了靶球装配的自动化程度和效率, 以及系统的安全性和可靠性.

参考文献 (References)

- [1] R Andrew Russell. A robotic system for performing sub-millimeter grasping and manipulation tasks. *Robotics and Automation Systems*, 1994, 13: 209- 218
- [2] Wolfgang Zesch, Markus Brunner, Ariel Weber. Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot. *Proceedings of the 1997 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, April 1997, 1761 - 1766
- [3] Hideki Miyazaki and Tomomasa Sato. Mechanical assembly of three-dimensional microstructures from fine particles. *Advanced Robotics*, 1997, 112: 169- 185
- [4] K Taylor and B. Dalton. Issues in Internet Tele-robotics. *International Conference on Field and Service Robotics*, Canberra, Australia, Dec. 1997
- [5] K Goldberg, S Gentner, C Sutter, J Wiegley. The Mercury Project: a feasibility study for Internet robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2000, 7(1): 35- 40
- [6] K Goldberg, M Mascha, S Gentner, N Rothenberg, C Sutter, J Wiegley. Desktop teleoperation via the World Wide Web. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, 1: 654- 659
- [7] Eric Paulos, John Canny. Delivering real reality to the World Wide Web via telerobotics. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, 1996, 2: 1694- 1699
- [8] Mark J Cox, John E F Baruch. Robotic Telescopes: An Interactive Exhibit on the World-Wide Web. *The Second International Conference of the World-Wide Web*, Chicago, 1994
- [9] Tony Fitzpatrick. Live Remote Control of Robot via the Internet. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1999, 6(3): 7- 8
- [10] 董玉涛, 张建勋. 微操作机器人控制系统下位机的设计. *机器人*, 2000, 22(4): 310- 314

作者简介:

彭 刚 (1973-), 男, 博士研究生. 研究方向为遥操作机器人, 微操作技术, 运动控制, 人工智能等.
 黄心汉 (1946-), 男, 博士生导师. 研究方向为多传感器数据融合, 机器人控制, 人工智能, 图象处理等.
 刘 敏 (1978-), 男, 硕士研究生. 研究方向为微操作技术, 真空吸附技术.