

## 具有虚拟力觉导引功能的机器人网络遥操作系统

化建宁<sup>1</sup>, 崔玉洁<sup>1</sup>, 李洪谊<sup>2</sup>, 王越超<sup>2</sup>, 席宁<sup>2</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分校自动化工程系, 河北 秦皇岛 066004;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 为实现机器人网络遥操作系统中从端机器人和被抓取目标接触前的力觉感知效果, 提出了具有虚拟力觉导引功能的机器人网络遥操作系统控制方法. 利用单目视觉技术获得末端执行器相对于被抓取目标的位姿信息, 并将此信息转换为操作者相对敏感的力反馈信息, 引导操作者为远端机器人系统提供合适的控制命令, 控制机器人达到期望的位姿. 利用手腕相机和人工目标搭建了演示实验系统, 并分别进行了机器人位置和姿态遥操作控制实验. 实验结果表明, 机器人遥操作系统的可操作性和操作效率有了明显提高.

**关键词:** 虚拟力反馈; 单目视觉; 遥操作

中图分类号: TP24

文献标识码: B

文章编号: 1002-0446(2010)-04-0522-07

### Network-based Tele-robotic System with Guidance Functionality from Virtual Force

HUA Jianning<sup>1</sup>, CUI Yujie<sup>1</sup>, LI Hongyi<sup>2</sup>, WANG Yuechao<sup>2</sup>, XI Ning<sup>2</sup>

(1. Department of Automation Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** A virtual force guided control method for network-based tele-robotic systems is presented to obtain force effect before the slave robot contacts with the object to be grasped. Relative posture between the end-effector and the object to be grasped is obtained based on the monocular vision technology, and it is transformed into force feedback information to which operators are more sensitive. The operator can give proper commands to control the slave robot to achieve the desired final posture under the guidance of the virtual force information. A demonstration setup is developed with man-made targets and the camera fixed on the wrist of the robot. Teleoperation experiments are conducted under robot position control mode and attitude control mode respectively, which demonstrate the improvement of operability and efficiency of the tele-robotic system.

**Keywords:** virtual force feedback; monocular vision; teleoperation

## 1 引言 (Introduction)

反馈信息在基于网络的机器人遥操作系统中扮演着重要角色, 操作者需要根据来自于远端工作环境的反馈信息为机器人提供相应的控制命令. 除了视频信息和力/触觉反馈信息外, 遥操作系统中经常采用的反馈信息还包括文本、音频以及温度等, 这些信息统称为“超媒体”(supermedia)信息<sup>[1]</sup>. 由于视频反馈比较直观, 能够为操作者提供远端工作环境的整体印象, 早期的机器人网络遥操作系统大多采用视频信息反馈, 但其丢失了深度信息, 因此遥操作系统中通常采用多幅视频图像反馈的方法. 该方法需要操作者根据多幅视频流推断出机器人和被抓取目标的相对位姿信息, 因而增加了操作者的工

作负担<sup>[2]</sup>.

与视频反馈信息相比, 力/触觉信息具有如下优点: (1) 能够提供 3 维信息; (2) 人类对力/触觉信息比对视觉信息更加敏感. 人类感知的心理物理学研究表明, 人眼能看到的连续图像所对应的视频最低更新频率为 30 Hz, 而为了使操作者感觉不到力/触觉信息的抖动, 力/触觉反馈信息的更新频率至少为 1 000 Hz<sup>[3]</sup>. 近年来, 力/触觉反馈信息更多地应用于人机交互系统中. 当把机器人系统和工作环境的交互力信息提供给操作者时, 遥操作系统的性能得到很大提高. Hill<sup>[4]</sup>的研究工作表明, 具有力反馈功能与没有力反馈功能的遥操作系统相比, 完成插孔操作 (peg-in-hole) 的时间缩短了 50%. 对于微观尺度下的操作而言, 力/触觉反馈使操作者可以实时调整

相应的操作,使微观环境中的操作如同宏观环境中那样灵活<sup>[5-7]</sup>.在虚拟现实技术领域,力/触觉信息反馈可以增强沉浸感与交互能力<sup>[8-9]</sup>.

虽然力传感器能够为操作者提供真实的力/触觉信息,但也存在如下缺点<sup>[10]</sup>:(1)价格昂贵,且易受噪声干扰;(2)难以提供适用于微观尺度环境的力传感器;(3)只适用于接触状态下力/触觉信息的测量.根据遥操作的经验可知,操作者利用主端控制器控制从端机器人系统抓取目标物体时所关心的是机器人末端执行器相对于被抓取目标的相对位姿信息.在此操作阶段,由于末端执行器尚未与抓取目标接触,力传感器并不能提供相关信息.接近觉传感器也只能提供末端执行器和被抓取目标接近与否的二值信息,操作者不能够获取相对位姿的定量信息.在这种情况下,如果采用多幅视频图像反馈的方法,势必增加操作者的工作负担,降低遥操作系统的效率.针对该问题,本文提出了具有虚拟力觉导引功能的机器人网络遥操作系统控制方法,采用基于模型的单目视觉位姿测量技术获得末端执行器与被抓取目标接触前的相对位姿信息,并把此信息转换为力反馈信息提供给操作者,使操作者在该力反馈信息的引导下,为远端机器人提供合适的控制命令.这样,遥操作系统的可操作性和操作效率明显提高,并可以避免末端执行器与被抓取目标的突然碰撞.实验结果证实了该方法的有效性.

## 2 系统硬件及软件实现 (Hardware and software implementation of the system)

### 2.1 系统硬件

系统硬件结构如图 1 所示,主要包括客户端、机器人系统、图像处理单元和视频传输单元 4 部分.

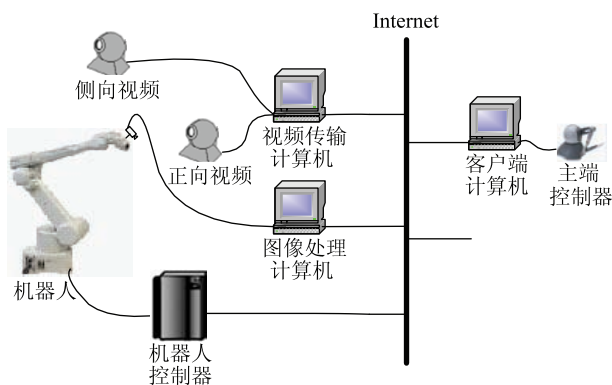


图 1 系统硬件结构

Fig.1 Structure of the system hardware

#### 2.1.1 客户端

客户端屏幕界面主要包含两类信息:一类是来

自正向视频相机和侧向视频相机的视频反馈信息,另一类是机器人系统的控制模式信息.在本系统中,视频反馈主要用于为操作者提供机器人工作环境的整体信息.从端机器人系统具有两种控制模式:位置控制和姿态控制.在位置控制模式中,操作者利用主端控制器控制机器人末端执行器空间位置,其姿态不发生变化.在姿态控制模式下,机器人末端执行器空间位置不变,其姿态产生连续的变化.客户端界面如图 2(a) 所示.

本系统采用 Sensable 公司的 PHANTOM Omni 设备作为主端控制器.该设备通过 IEEE 1394 接口和客户端计算机连接,具有 3 个自由度,能够在 3 维空间中提供力反馈信息.PHANTOM Omni 具有结构紧凑、驱动性能良好、摩擦低、惯量低等特点,特别适于用作力/触觉交互设备.主端控制器如图 2(b) 所示.



(a) 客户端



(b) PHANTOM Omni 设备

图 2 客户端和主端控制器

Fig.2 Client and master device

#### 2.1.2 机器人系统

从端机器人为具有 6 个自由度的 Motoman 工业机器人系统,控制器软件运行于 QNX 操作系统,由若干进程组成,各进程之间协作完成机器人系统控制命令的接收、规划和控制任务.机器人手腕处安装有 CCD 相机,用于获取机器人末端执行器相对于被抓取目标的位姿信息.

#### 2.1.3 图像处理单元

本系统采用基于模型的单目视觉位姿测量技术获得机器人末端执行器和被抓取目标之间的相对位姿信息.所谓视觉测量,即利用 CCD 相机作为传感器获取包含观察目标的图像,基于图像处理技术识别观察目标,再通过观察目标的某种约束关系计算出目标与摄像机之间的相对位姿关系,最后变换为被抓取目标与机器人末端执行器之间的相对位姿关系.本系统选择最简单的点特征作为识别特征,利用单相机和 3 个已知模型的控制点实现精确的位姿测量.图 1 中的图像处理计算机负责图像处理及位姿解算任务,并把相对位姿信息通过网络传递给客户端.

### 2.1.4 视频传输单元

虽然视频信息与力/触觉信息相比有诸多缺点,但在遥操作系统中力/触觉反馈信息并不能完全代替视频反馈信息.为了给操作者提供机器人工作环境的整体效果,在机器人工作现场的正向和侧向布置 2 个相机,利用视频会议工具 (VIC) 把相机获得的视频流传递到客户端界面.图 1 中的视频传输计算机负责将视频反馈信息提供给操作者.客户端屏幕上的视频信息如图 3 所示.



(a) 侧向视频 (b) 正向视频

图 3 客户端视频反馈信息

Fig.3 Video feedback information on the client interface

### 2.2 系统软件

客户端软件和图像处理计算机上运行的图像处理软件都是基于 VC++ 开发的.图像处理计算机把得到的机器人末端执行器和被抓取目标的相对位姿信息通过网络传递到客户端系统.客户端一方面接收来自于图像处理计算机的位姿数据,在主端控制器上播放力效果,另一方面采集主端控制器的状态数据,转换为期望的线速度或角速度指令后传递给机器人系统.因此,客户端程序包含 2 个线程,一个线程负责接收来自于图像处理计算机的位姿数据,采用消息驱动方式实现数据的接收;另一个线程负责和机器人系统的通信.

### 3 末端执行器与被抓取目标之间的相对位姿信息获取 (Acquisition of the relative posture between end-effector and the object to be grasped)

在执行遥操作任务过程中,操作者所关心的是机器人末端执行器相对于抓取目标的位姿信息.本节将介绍基于单目视觉位姿测量技术获取机器人末端执行器与抓取目标之间相对位姿的方法.

#### 3.1 基于模型的单目视觉位姿测量

给定 3 个控制点,如果已知它们在两个坐标系中的坐标值,就可以确定这两个坐标系之间的空间位姿关系,这是三点透视问题 (P3P) [11-12] 的一般性描述.其更为精确的数学描述如图 4 所示:设控制点 A、B、C 与相机光心 O 之间连线长度分别为

$x$ 、 $y$ 、 $z$ , 已知它们之间的夹角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 并且  $|AB| = c$ ,  $|AC| = b$ ,  $|BC| = a$ , 求  $x$ 、 $y$ 、 $z$ .

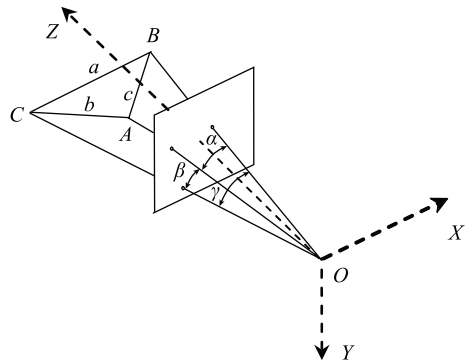


图 4 三点透视问题示意图

Fig.4 Perspective-three-point problem

由余弦定理可得到如下约束方程:

$$\begin{cases} x^2 + z^2 - 2xz \cos \beta = b^2 \\ y^2 + z^2 - 2yz \cos \gamma = a^2 \\ x^2 + y^2 - 2xy \cos \alpha = c^2 \end{cases} \quad (1)$$

方程 (1) 是一个相互耦合的非线性方程,一般情况下没有唯一解.文 [13] 的研究结果表明:当 3 个控制点 A、B、C 构成一个等腰三角形时,在空间中可以确定一些区域,如果相机光心进入这些区域,P3P 问题就存在唯一解.在图 5 中,AM 和 AN 分别垂直于 AB 和 AC,如果相机光心位于平面  $\Sigma_1$  和  $\Sigma_2$  右侧,利用二分法就可以得到 P3P 问题的唯一解 [14],在此基础上就可以得到摄像机坐标系和控制点坐标系之间的相对位姿信息.

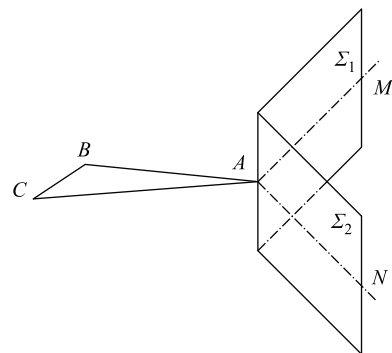


图 5 三点透视问题存在唯一解时相机的一种布置方案

Fig.5 An arrangement of the camera when a unique solution exists for the P3P problem

#### 3.2 机器人末端执行器与被抓取目标之间的相对位姿

视觉测量过程中能够得到控制点坐标系相对于摄像机坐标系的相对位姿关系.为降低客户端计算量,在图像处理计算机上对视觉测量结果作进一

步处理, 对被抓取目标和末端执行器之间的位置关系进行标定, 建立了基准坐标系  $\{J\}$  和手爪坐标系  $\{H\}$ . 这样, 客户端得到的就是控制点坐标系相对于基准坐标系的位姿关系. 在标定目标坐标系和末端执行器坐标系过程中建立了手爪坐标系  $\{H\}$ , 各坐标系之间的位姿关系如图 6 所示. 需要特别指出的是,  $\{H\}$  不同于机器人工具坐标系,  $\{J\}$  也不同于摄像机坐标系. 末端执行器抓取目标时,  $\{B\}$  和  $\{J\}$  重合,  $\{O\}$  和  $\{H\}$  重合.

坐标系  $\{O\}$  相对于坐标系  $\{B\}$  是固定的, 两者之间的关系可以描述为:

$${}^B_O\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^B_O\mathbf{R} & {}^B\mathbf{p}_O \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 187 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

坐标系  $\{H\}$  和  $\{J\}$  之间的关系也是固定的, 两者之间的关系可以描述为:

$${}^J_H\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^J_H\mathbf{R} & {}^J\mathbf{p}_H \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 187 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

控制点坐标系  $\{B\}$  相对于虚拟坐标系  $\{J\}$  的位姿关系可以通过视觉测量得到. 由图 6 可以得到:

$${}^J_B\mathbf{T} \cdot {}^B_O\mathbf{T} = {}^J_H\mathbf{T} \cdot {}^H_O\mathbf{T} \quad (4)$$

因此有:

$${}^H_O\mathbf{T} = ({}^J_H\mathbf{T})^{-1} \cdot {}^J_B\mathbf{T} \cdot {}^B_O\mathbf{T} \quad (5)$$

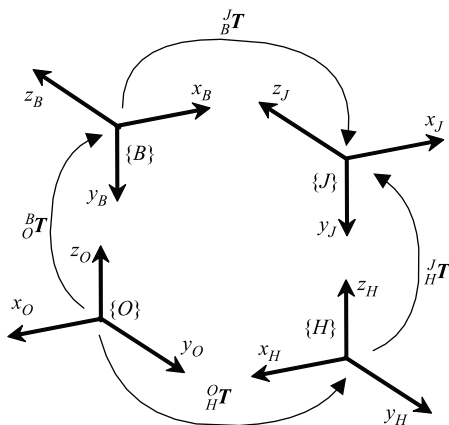


图 6 标志器坐标系、目标坐标系、相机坐标系和手爪坐标系之间的位姿关系

Fig.6 Relationship among the mark coordinate, object coordinate, camera coordinate and hand coordinate

## 4 虚拟引导力的建模 (Modeling of the virtual attractive force)

### 4.1 机器人位置控制模式下的反馈力

在位置控制模式下, 客户端为机器人提供的是线速度控制指令, 控制机器人末端执行器在工作空间中的位置, 而其姿态保持不变. 为实现该控制模式下的虚拟力导引效果, 需要根据目标坐标系  $\{O\}$  相对于手爪坐标系  $\{H\}$  的位置矢量  ${}^H\mathbf{p}_O$  定义虚拟力模型. 为了把目标坐标系和手爪坐标系之间的相对位置关系映射到主端控制器坐标系中, 需要确定工具坐标系  $\{E\}$ 、手爪坐标系  $\{H\}$  和主端控制器坐标系  $\{M\}$  之间的姿态关系. 由图 7 易知,  $\{H\}$  相对于  $\{E\}$  的旋转矩阵为:

$${}^E_H\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\{E\}$  相对于  $\{M\}$  的旋转矩阵为:

$${}^M_E\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此, 位置控制模式下虚拟引导力模型可定义为:

$${}^M\mathbf{F} = k \cdot {}^M_E\mathbf{R} \cdot {}^E_H\mathbf{R} \cdot {}^H\mathbf{p}_O \quad (8)$$

其中  $k$  为虚拟反馈力系数.

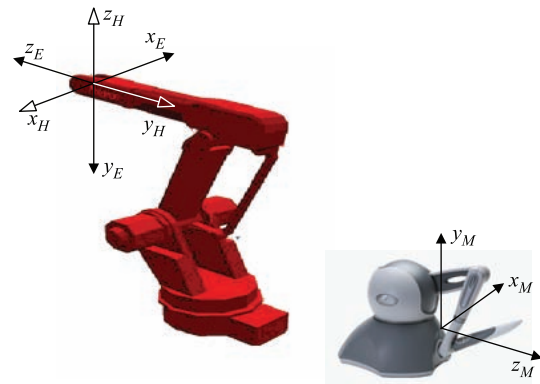


图 7 主端控制器坐标系、工具坐标系和手爪坐标系之间的位姿关系

Fig.7 Relationship among the master device coordinate, end-effector coordinate and hand coordinate

### 4.2 机器人姿态控制模式下的反馈力

为实现姿态控制模式下虚拟力的导引效果, 需要把目标坐标系  $\{O\}$  相对于手爪坐标系  $\{H\}$  的姿

态关系映射到主端控制器坐标系  $\{M\}$  中.  $\{O\}$  相对于  $\{H\}$  的旋转矩阵为:

$${}^H_O\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\{H\}$  坐标系中与此旋转矩阵对应的等效转角和等效转轴分别为:

$$\theta = \text{atan2} \left( \sqrt{(o_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - o_x)^2}, n_x + o_y + a_z - 1 \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{k} = (k_x \quad k_y \quad k_z) \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} k_x = \frac{o_z - a_y}{2 \sin \theta} \\ k_y = \frac{a_x - n_z}{2 \sin \theta} \\ k_z = \frac{n_y - o_x}{2 \sin \theta} \end{cases} \quad (12)$$

为获得机器人在姿态控制模式下的虚拟引导力, 需要把用等效转角和等效转轴描述的相对姿态误差映射到主端控制器坐标系中, 因此姿态控制模式下的虚拟引导力可以定义为:

$${}^M\mathbf{F} = k \cdot {}^M_E\mathbf{R} \cdot {}^E_H\mathbf{R} \cdot (\theta \cdot \mathbf{k}) \quad (13)$$

其中,  $k$  为姿态控制模式下虚拟反馈力系数, 虚拟反馈力仍在主端控制器坐标系中描述.

### 5 实验结果与分析 (Experimental results and analysis)

为了验证具有虚拟力觉导引功能的机器人网络遥操作系统的有效性, 进行了机器人位置控制与姿态控制实验.

#### 5.1 机器人位置控制实验

在位置控制模式下, 客户端根据末端执行器与抓取目标之间的相对位置信息在主端控制器上播放力效果. 在力信息的引导作用下, 操作者利用主端控制器为从端机器人系统提供线速度命令, 控制末端执行器接近抓取目标. 实验结果如图 8 所示, 图 9 给出了从端机器人在位置控制模式下接近抓取目标的工作过程.

#### 5.2 机器人姿态控制实验

在机器人姿态控制模式下, 末端执行器相对于抓取目标的姿态信息转换为虚拟力, 引导操作提供机器人角速度控制命令, 控制末端执行器的姿态接

近目标姿态, 而末端执行器的空间位置固定不变. 实验结果如图 10 所示.

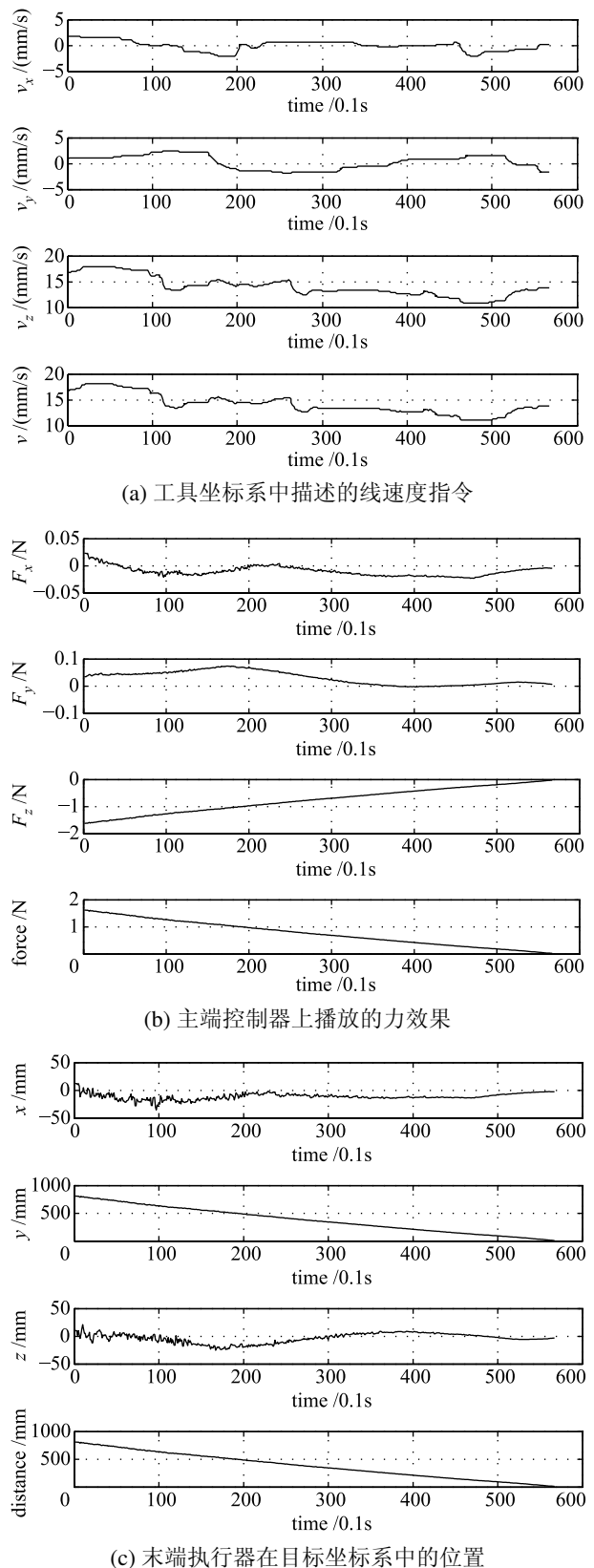


图 8 从端机器人的位置控制实验结果

Fig.8 Experimental results for position control of the slave robot

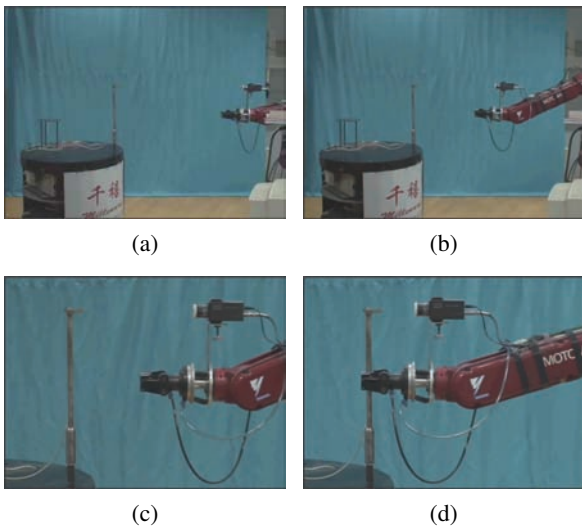


图 9 位置控制下从端机器人的工作过程

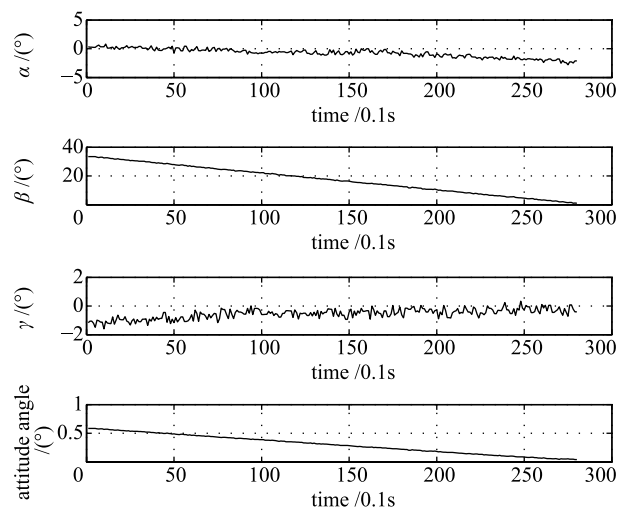
Fig.9 Working process of the slave robot in position control mode

由图 8(b) 和 (c) 可以看出, 在位置控制模式下, 当末端执行器逐渐接近被抓取目标时, 主端控制器上播放的力效果也逐渐减小, 并且反馈力的方向可以引导操作者控制机器人末端执行器接近操作目标. 类似地, 在姿态控制实验中, 随着手爪坐标系和目标坐标系的姿态趋向于一致, 主端控制器上播放的力效果逐渐减小, 而且主端控制器上的力效果也可以引导操作者控制远端机器人, 使得机器人手爪坐标系姿态与目标坐标系趋向一致, 如图 10(a) 和 (c) 所示. 另外, 从图 8(b) 和图 10(c) 可以看出, 由于 PHANTOM Omni 主端控制器本身维护一个优先级很高的线程负责设备状态更新和力效果的播放, 所以力效果是非常平滑的.

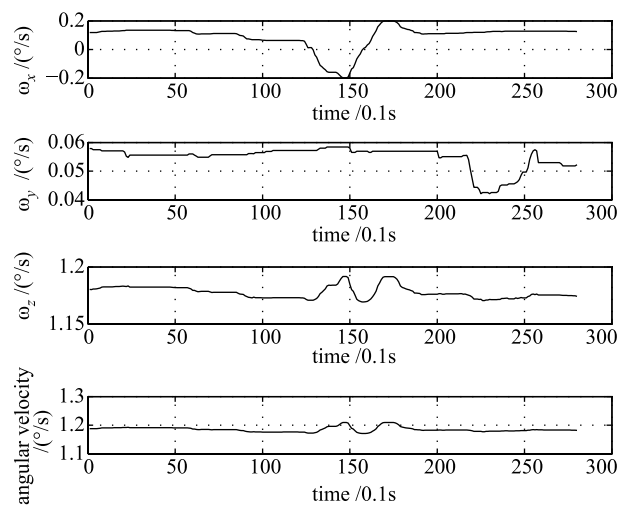
### 6 结论 (Conclusion)

为实现遥操作系统中机器人末端执行器与被抓取目标接触之前的力觉感知效果, 引导操作者提供与机器人工作状态相适应的控制命令, 本文提出了虚拟力觉导引的机器人网络遥操作系统控制方法. 采用基于单目视觉的位姿测量技术获得机器人末端执行器相对于被抓取目标的位置和姿态, 并把这种信息以力反馈信息的形式提供给操作者, 从 2 维图像信息中提取出空间位姿信息. 该方法的优点体现在两个方面: 一方面是把从视频信息中获取的相对位姿信息提供给操作者, 降低了系统中的数据传输量; 另一方面, 由于操作者对力/触觉反馈信息比对视频信息更敏感, 通过把反映相对位姿信息的力反馈信息提供给操作者, 减轻了操作者的负担, 提高了遥操作系统的可操作性和操作效率.

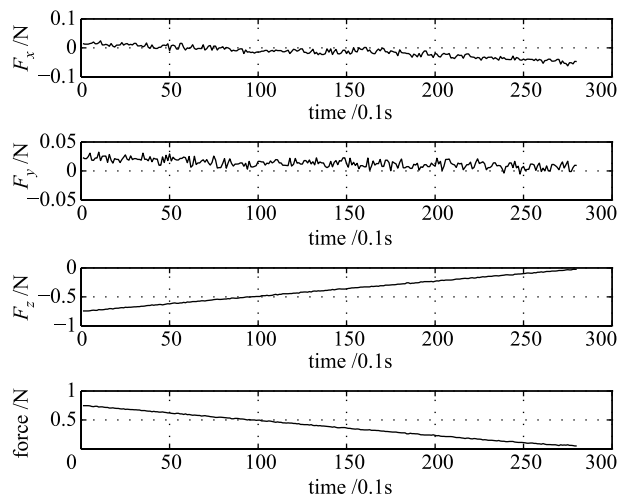
致谢: 感谢中国科学院沈阳自动化研究所朱枫、欧锦军、董再励等对我们研究工作的帮助.



(a) 手爪坐标系相对于目标坐标系的姿态



(b) 末端执行器角速度



(c) 主端控制器上播放的力效果

图 10 机器人姿态控制实验结果

Fig.10 Experimental results for attitude control of the robot

## 参考文献 (References)

- [1] Elhajj I, Xi N, Fung W K, et al. Supermedia-enhanced Internet-based telerobotics[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(3): 396-420.
- [2] Fung W K, Lo W T, Liu Y H, et al. A case study of 3D stereoscopic vs. 2D monoscopic tele-reality in real-time dexterous teleoperation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 181-186.
- [3] Sensable Technologies, Inc. 3D TOUCH™ SDK (version 1.0) [EB/OL]. [2009-09-28]. <http://www.sensable.com>.
- [4] Hill J W. Study of modeling and evaluation of remote manipulation tasks with force feedback, NASA-CR-158721[R]. USA: NASA, 1979.
- [5] Mitsuishi M, Kobayashi K, Nago T, et al. Development of teleoperated micro-handling/machining system based on information transformation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 1473-1478.
- [6] Mitsuishi M, Hori T, Hikita T, et al. Experiments in telehandling and tele-machining at the macro and micro scales, using the Internet for operational environment transmission[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 13-20.
- [7] 田孝军, 王越超, 董再励, 等. 基于 AFM 的机器人化纳米操作系统综述 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 14-23.  
Tian Xiaojun, Wang Yuechao, Dong Zaili, et al. Review of AFM based robotic nanomanipulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 14-23.
- [8] 王党校, 张玉茹, 王勇, 等. 面向牙科手术培训的力觉合成技术 [J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(1): 159-174.  
Wang Dangxiao, Zhang Yuru, Wang Yong, et al. Haptic synthesis technology for dental surgery[J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2009, 39(1): 159-174.
- [9] 赵沁平. 虚拟现实综述 [J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(1): 2-46.  
Zhao Qiping. Review of virtual reality[J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2009, 39(1): 2-46.
- [10] Ni L Y, Wang D W L. A gain-switching control scheme for position-error-based force-reflecting teleoperation[C]//10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2002: 239-246.
- [11] DeMenthon D, Davis L S. Exact and approximate solutions of the perspective-three-point[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(11): 1100-1105.
- [12] Haralick R M, Lee C N, Ottenberg K, et al. Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(3): 331-356.
- [13] 周鑫, 朱枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论 [J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1696-1701.  
Zhou Xin, Zhu Feng. A note on unique solution conditions of the P3P problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1696-1701.
- [14] 郝颖明, 朱枫, 欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(12): 1247-1251.  
Hao Yingming, Zhu Feng, Ou Jinjun. 3D visual methods for object pose measurement[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(12): 1247-1251.

## 作者简介:

化建宁 (1975-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 机器人控制, 机器人遥操作.

## 作者更正

《机器人》2010 年第 32 卷第 3 期第 349 页 (作者韩光等) 右栏第 6 行, “纹理特征是 22 维 DCT 特征” 修改为 “纹理特征是 13 维 DCT 特征”, 编辑部对因此给读者带来的不便深表歉意.