

文章编号: 1002-0446(2001)05-0385-06

虚拟现实辅助机器人遥操作技术研究*

刘伟军 朱 枫 董再励

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放研究实验室 沈阳 110015)

摘 要: 本文以水下机器人的遥操作作业为应用背景, 提出并实现了虚拟现实技术和视觉感知信息辅助机器人遥操作实验系统. 该系统使用了 CAD 模型和立体视觉信息完成遥操作机器人及其作业环境的几何建模和运动学建模, 实现了虚拟作业环境的生成和实时动态图形显示. 采用了基于立体视觉的虚拟环境与真实环境的一致性校正、图形图像叠加、作业体与环境位姿关系建立、基于网络的监控通讯等关键技术. 在这个实验系统中, 操作人员可利用所生成的虚拟环境, 在多视点、多窗口作业状态图形和图像显示帮助下, 实时动态地进行作业观测与机器人遥操作与运动规划, 为先进遥操作机器人系统的实现提供了经验和关键技术.

关键词: 虚拟现实; 机器人; 遥操作

中图分类号: TP24 文献标识码: B

VIRTUAL REALITY ASSISTED ROBOT TELEOPERATION RESEARCH

LIU Weirjun ZHU Feng DONG Zaili

(Shenyang Institute of Automation, Academia Sinica, Shenyang 110015)

Abstract This paper presents our recent research work. The purpose of this work is by using virtual reality technology to complete an assistant teleoperation system of underwater robot. This system consists of a supervision system, a stereo vision system, a VR environment building system and a submarine manipulator. To construct a virtual working environment, CAD models and stereo vision information are applied to building geometry models and kinematics models of the robot and its working environment. So the dynamic graphs of robot working process can be showed on screens in real time. In this system, the relationship between real world and virtual frame is built by using stereo vision, overlay technology of figures with graphics is used for person to supervise operating error and also the network technology is used for communication among all sub-systems. By the way, an operator could be help to operate and guide the robot motion by multiview points, multirindow graphs and real TV figures. The completion of the system will provide a lot of experiences and key techniques on creating a available teleoperation system of underwater robot.

Keywords: virtual reality, robot, teleoperation

1 引言(Introduction)

遥操作机器人系统, 亦称临场感遥控作业系统, 是 80 年代提出的一种基于人机交互技术的机器人作业系统. 其基本特点是: 由机器人所携带的传感器对环境的感知信息构建成作业现场的反馈信息, 使操作人员能够在这些感知信息的反馈下, 身临其境的异地操作在作业环境中的机器人系统完成作业任务. 因此, 在复杂或非确定环境下, 机器人的动作规

划和决策可以在人的监控下完成, 使机器人在人所无法到达的环境下准确有效的动作和作业. 这对于机器人学研究水平的提高, 扩大机器人的应用领域具有深远意义.

为提高遥操作机器人系统的能力和效率, 临场感(Tele-presence)技术是必不可少的. 其中视觉感知最为重要, 发展也最早^[6]. 国内从 80 年代末开始, 先后开展了用于军事侦察、核工业和 underwater 探测等方面

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69975020); 863 计划资助项目(863- 512- 9804- 16).

收稿日期: 2000- 12- 12

的遥控机器人的研究,并取得了重大的研究成果.但在这些系统中,操作手主要依靠观察由安装在机器人上的摄像机所获得的二维图像进行操作,因此存在重大缺陷:(1)操作手很难从二维图像中获得真实的三维环境感受,因而操作往往具有盲目性;(2)由于摄像视场受限,因此操作过程中无法及时了解周围环境的变化和自身在环境中的状态;(3)在恶劣环境下(如烟雾或水下作业环境等),电视图像暂时过于模糊而无法监视;所有这些会使操作手的负担过重,并且极度紧张而导致操作失败,这严重影响了遥操作机器人系统的应用和使用效率.因此研究开发新的有效的临场感技术和人机交互技术,对提高遥操作机器人系统的效率和可靠性具有重要意义.

虚拟现实技术(Virtual Reality),又称灵境技术.这种技术的主要特点是:它可以借助于视觉、听觉、力觉、触觉等传感器及相应的建模技术和设备,使人在与计算机系统技术所生成的虚拟环境进行相互作用的过程中产生“身临其境”的沉浸感,为用户提供一种崭新和谐的人机交互遥操作作业环境.虚拟现实技术的出现和发展为提高遥操作的效率和可靠性、减轻操作者负担提供了有效的途径,目前已经成为机器人遥操作领域的研究“热点”^[1-5].

本文以水下遥操作机器人对钻井井架的焊缝检测作业为背景,建立了虚拟环境下监控机器人遥操作实验系统实验环境.进行了遥操作机器人及其作

业环境的几何建模和运动学建模,基于立体视觉的多坐标系关系建立,虚拟环境与真实环境的一致性校正,基于图形图像叠加的误差检测、基于网络通讯的监控作业等关键技术研究.在该实验系统中,操作者可以利用生成的虚拟作业环境,在多视点、多窗口作业状态图形和图像显示帮助下,实时动态地进行作业观测与监控操作,从而提高了遥操作的效率和可靠性.为水下机器人监控遥操作系统研究水平的提高和新的作业方式提供了技术基础.

2 系统结构(System construction)

如图1所示,虚拟现实辅助机器人遥操作系统由遥控机器人工作环境和人机交互界面两部分组成.人机界面部分包括系统监控界面、视觉图像显示界面、虚拟环境图形界面、操作界面如主手、键盘、鼠标等多种输入设备.监控界面显示工作方式、机器人状态、监控命令和相关数据,视觉界面显示 CCD 摄取的作业图像和规划动作图形与图像叠加结果,虚拟界面显示作业场景的虚拟环境、机器人当前的位置及运动状态、机器人各关节值等,并配有多视点、多窗口图形显示及碰撞检测等功能.实验系统由一台五自由度机器人本体、控制器、作业对象(模拟井架)、机器人所持工具(探针)及双目立体视觉系统等组成.

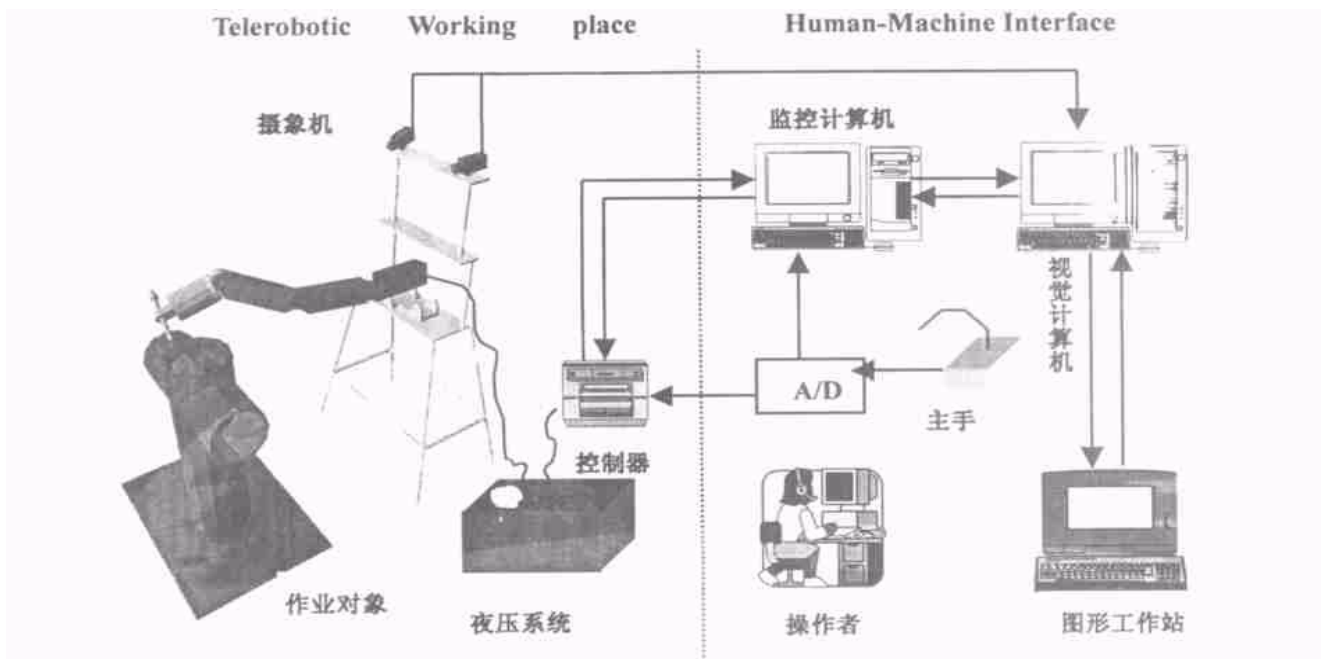


图1 虚拟环境机器人遥操作实验系统框图

Fig. 1 Structure diagram of teleoperation system

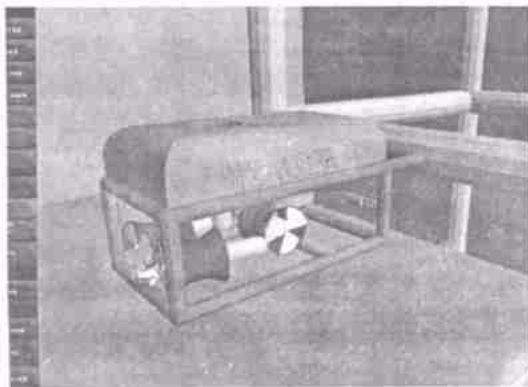
该系统的作业过程为: 作业对象进入视场后, 视觉系统通过观测安装在井架上的标志, 计算出井架与机械手坐标系的相互位姿关系, 并通过网络将此位姿关系传送至监控计算机和图形工作站. VR 系统根据这一关系对虚拟环境中井架与机械手坐标系之间的位置和姿态进行定位, 使之与真实环境一致. 监控系统则根据这个位姿关系, 完成机械手的动作规划. 然后启动机械手进入作业位置, 并将机械手各关节数据送至视觉系统和 VR 系统, 以及时显示机械手动作. 视觉系统根据监控系统传来的数据生成机械手末端位姿势图形与监视图像进行迭加, 供操作人员监视机械手的运动偏移. 如果认为偏移量超出允许范围, 操作人员需停止机械手运动. 以人机交互方式, 使用立体视觉系统对机械手末端工具进行位姿检测. 检测出的位姿偏移量送至监控系统进行规划位置和轨迹误差纠正.

3 虚拟环境生成 (VR environment modeling)

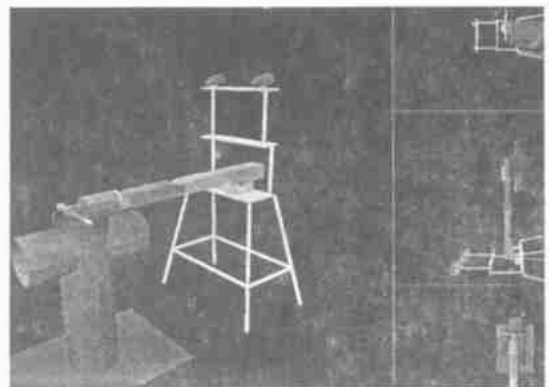
虚拟环境生成是在 SGI 工作站上用 DENEb 公司的 ENVISION 软件包实现的. 虚拟环境建模主要包括几何建模和运动学建模.

3.1 几何建模

使用 ENVISION 提供的基本基元: 长方体、楔形体、圆柱、圆台、球等构建多面体和基本的点、线、面组成所需要的几何模型.



(a)



(b)

图 3 虚拟环境建模及多画面显示

Fig. 3 VR environment modeling and its multiviews display

4 虚拟环境中机械手与作业对象之间的定位技术 (Localization of robot arm and operated object in VR environment)

使用虚拟现实技术辅助操作者有效地完成对机

在构建的几何模型基础上, 根据实体的物理性质定义它们的基本属性(位置、大小、颜色、纹理等)及其坐标系形成构件. 基本构件再合并成新的构件.

在构件的基础上, 定义它的运动学特性(自由度、平移与旋转轴、运动速度范围等约束), 形成可以对其编程控制的设备(device).

3.2 运动学建模

在控制设备的运动和组合运动时, 设备间可以树状结构连接, 每一个节点可定义为一个运动关节. 节点是分级的, 上一级节点可以带动下一级节点运动, 见图 2. 在树状结构下, 可以通过编程来控制虚拟环境及环境中物体各个部分分别或整体运动. 图 3A 是用上述建模方法构建的水下机器人及其虚拟作业环境. 图 3B 是多画面显示的遥操作实验系统的虚拟作业环境及机械手本体.

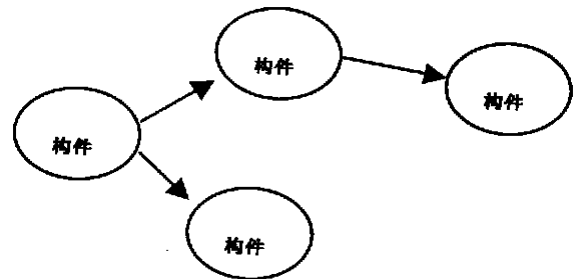


图 2 运动学建模的树状结构

Fig. 2 Tree architecture of kinematics model

器人的遥操作过程, 必须保证虚拟环境与真实环境的一致性. 即在作业过程中, 虚拟环境必须如实、准确地反映真实世界中机械手的运动及其与作业对象之间的位姿关系. 因此首先要确定机械手与作业对

象之间的位姿关系,并根据这个关系建立虚拟环境中两者模型间相应的位姿关系,以保证虚拟场景与真实场景的一致性.我们将这一过程称为虚拟环境中的定位技术.虚拟环境中机械手与作业对象之间的定位由立体视觉系统对作业对象的观测实现的.即视觉系统标定在机械手的基坐标系上,通过对作业对象标志点的观测,计算出二者的位姿关系.

4.1 图像采集与预处理

在本实验系统中,采用两个 MINTRON MTV-1881EX CCD 摄像机和加拿大 Mator 彩色图像采集卡,利用其 RG 两个通道同时采集立体视觉两个摄像机的图像,以保证其同步性.然后采用人机交互方法确定环境图像的搜索范围,完成预处理和特征提取与匹配点检出.

4.2 摄像机标定

视觉系统的标定是建立某一参考坐标系下的可观测对象与视觉系统之间的相互关系.以典型摄像机针孔模型为例,参考系 F 中点 $P(X_i, Y_i, Z_i)$ 与对应图像点 $P'(u_i, v_i)$ 间坐标关系为 $P' = MP$, 展开为

$$t_i \begin{vmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{vmatrix}$$

根据式(1),给定足够的空间点 P_i 和其所对应的图像点 P'_i ,就可以唯一确定其投影矩阵 M .

文中,标定时采用一个三维移动平台,平台上固定一个目标点,当目标点移动到某一位置时,由上述图像采集和处理方法得到特征点在左右图像中的图像坐标 $U_{li}, V_{li}, U_{ri}, V_{ri}$, 该特征点的三维空间坐标由三维平台读出后通过一个已知的坐标变换变换到机械手的基坐标系下,以保证在以后的点的三维坐标中所得到的数据都是针对机械手基坐标系的.这样反复多次可得到多个特征点的图像坐标及其对应的空间坐标,然后用上述方法就可计算出左右两个摄像机所对应的投影矩阵 $M_l = \{m_{lij}\}$ 和 $M_r = \{m_{rij}\}$.

4.3 基于立体视觉的特征点三维坐标计算

视觉系统在标定后,就可利用基于立体视觉的三维点重建方法^[7]来计算空间任一特征点在机械手基坐标系下的三维坐标.实验中,我们在作业对象上安装了三个发光二极管作为三个特征点并构成作业

对象坐标系.通过人机交互的方法分别得到这三个特征点的左右图像坐标 $(u_{li}, v_{li}), (u_{ri}, v_{ri})$, 再解出这三个特征点在机械手基坐标系下的坐标值,用于求解机械手基坐标系与作业对象坐标系的位姿关系.

4.4 机械手与作业对象之间的位姿关系求解

求解机械手与作业对象之间的位姿关系就是确定两者坐标系之间的变换关系.在实验过程中两个摄像机与机械手之间的位置关系是固定的,因此二者之间的关系标定好后是不变的.这样,对于空间任意一特征点 P ,通过立体视觉系统的计算可以得到其在机械手基坐标系 ω_0 下的坐标 x_0 ,如果该点在作业对象(井架)坐标系 ω 下的坐标 x_1 已知,则机械手基坐标系 ω_0 与作业对象坐标系 ω 之间变换关系为

$$x_0 = Rx_1 + T \quad (2)$$

式中 R 和 T 唯一地确定了机械手坐标系与作业对象坐标系之间的位姿关系.

运用文献[8]中所介绍的旋动理论来求解上述旋转矩阵 R 和平移向量 T ,就得到了机械手基坐标系相对于作业对象坐标系的位置和姿态 $(\alpha, \beta, \gamma, T_x, T_y, T_z)$.将这个位姿参数通过网络传至虚拟环境中,就可建立虚拟环境中机械手基坐标系和作业对象坐标系之间的位姿关系,并且与真实环境相一致.

5 系统中的通讯技术(Communication)

系统通讯主要包括三部分:(1)视觉系统与监控系统之间的通讯;(2)视觉系统与VR系统之间的通讯;(3)VR系统中真实环境与用ENVISION软件所建立的虚拟环境之间的通讯.

5.1 视觉系统与监控系统之间的通讯

视觉系统与监控系统之间的通讯主要是将监控系统发出的动作命令、机械手的各关节值和探针两端点的三维坐标值传至视觉系统;并且视觉系统将计算出来的定位信息和位姿校正数据等信息传至监控系统.视觉系统与监控系统之间的通讯采用客户服务器方式,监控系统作为服务器端,视觉系统为客户端,二者借助于WinSock工具以TCP方式进行连接,通讯周期为200毫秒.

5.2 视觉系统与VR系统之间的通讯

视觉系统与VR系统之间的通讯主要是将监控系统传来的命令、机械手的各关节值及视觉系统计算出来的定位信息传至VR系统等;视觉系统与VR系统之间的通讯采用客户服务器方式,VR系统作为服务器端,视觉系统为客户端,二者借助于WinSock工具以TCP方式进行连接,通讯周期为200毫秒.

5.3 VR 系统中真实环境与用 ENVISION 软件所建立的虚拟环境之间的通讯

VR 系统中真实环境与用 ENVISION 软件所建立的虚拟环境之间的通讯, 其主要作用是将视觉系统传来的数据(包括: 机械手位置和姿态信息、机械手各关节的运动信息及命令信息等)传至虚拟环境, 驱动机械手模型运动, 并使之运动与真实环境中的实际运动状态相一致. 在本文中, 虚拟环境是用 deneb 公司开发的 ENVISION 软件建立的, 虚拟环境中机械手的运动和刷新用软件本身所提供的 GSL

(Graphic Simulation Language) 语言编程来实现, 主程序通过 GSL 语言提供的接口函数与 C 语言程序接口, 通过调用 C 语言程序来实现与真实环境的数据通讯. VR 系统建立在 SGI 工作站上, 使用 UNIX 操作系统, 因此, 我们借助于 UNIX 操作系统的管道通讯手段, 来实现 VR 系统中真实环境与用 ENVISION 软件所建立的虚拟环境之间的通讯. 考虑到本文不是通常的进程之间的通讯, 而是要实现不同程序之间的通讯, 因此采用命名管道方式. 通讯简图如 4 图所示.

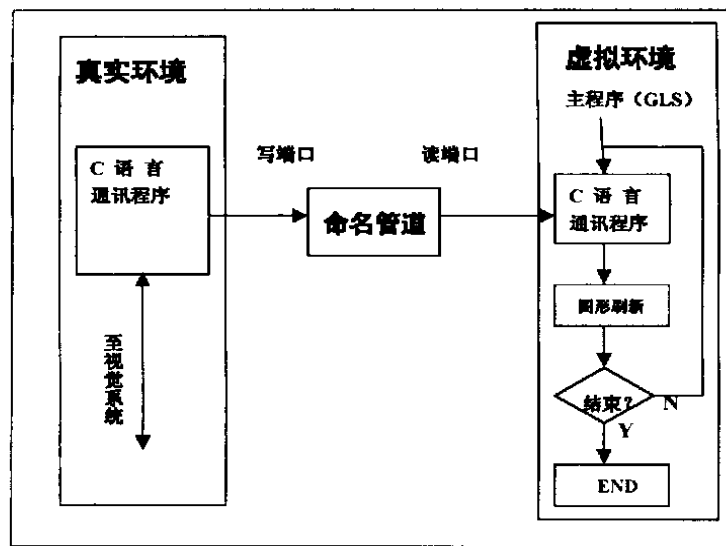


图 4 VR 系统中虚拟环境与真实环境之间的通讯简图

Fig. 4 Communication between VR environment and actual environment in VR system

6 图形图像叠加技术(Overlay of graphics model and video picture)

虚拟现实辅助机器人遥操作系统中, 虚拟环境的可靠性是非常重要的, 虚拟环境必须如实、准确地反映真实世界中机器人的运动状态及机器人与作业对象的位置关系, 为操作者提供真实可信的、友好的人机界面, 以真正起到提高操作者遥操作的效率, 减轻用户作业压力的作用. 但在现实中的虚拟现实辅助机器人遥操作系统中, 由于各种误差因素的综合影响, 使得虚拟环境与真实环境并不一致, 甚至有时会有很大的误差, 严重地影响了虚拟环境的可靠性, 为了解决这一问题, JPL 实验室首先提出了图形图像叠加技术, 即把高精度机器人模型叠加在真实的视频图像上, 实时监控误差情况, 判断虚拟环境的可靠性, 以便在误差超限时采取相应的措施加以补偿或补救.

在一般的图形图像叠加技术中, 由于三维模型和摄像机的视区变换和透视投影存在偏差, 因此首先必须进行三维图形和二维摄像机视图的精确标定, 即首先把图像模型叠加在真实的摄像机视图上, 然后通过一个交互式的图像接口, 由操作者选择三维图形和二维摄像机图像所对应的特征点(为了提高标定精度, 通常须选用机器人在不同臂姿情况下的多组点对进行标定), 最后系统利用这些特征点对自动计算摄像机的标定参数. 摄像机参数标定完之后, 就可进行图像图形叠加了^[9]. 由于在本文中, 我们主要以水下机器人检测石油钻机平台上的焊缝为应用背景, 因此在实验中, 我们只关心机械手末端所夹持的探针位置的可靠性, 而不关心机械手其它关节的位置, 因此, 我们只画出了探针的图形图像叠加情况.

设 $P1(x1, y1, z1)$ 和 $P2(x2, y2, z2)$ 分别为探针

的两个端点, P_1 和 P_2 这两点的坐标是由监控系统在向机械手下达运动指令时, 以机械手的各关节值为基础, 通过正解得到的, 然后通过网络传至视觉系统. P_1 和 P_2 这两点的坐标反映的是监控系统下达命令给机械手, 机械手运动后探针应该到达的位置, 而立体视觉中左右像机所得到的图像反映的是机械手按照监控系统的命令运动到指定位置后, 探针实际到达的位置. 这样, 将探针的两个端点投影到左右图像上, 如果二者不重合, 则说明出现了误差, 图形和图像的远离程度即反映了误差的大小. 方法如下:

设 $M_i = \{m_{ij}\}$ 为立体视觉中左像机所对应的投影矩阵, 则将 P_1 和 P_2 向左图像投影得到

$$u_{li} = \frac{m_{l11}x_i + m_{l12}y_i + m_{l13}z_i + m_{l14}}{m_{l31}x_i + m_{l32}y_i + m_{l33}z_i + m_{l34}}$$

$$v_{li} = \frac{m_{l21}x_i + m_{l22}y_i + m_{l23}z_i + m_{l24}}{m_{l31}x_i + m_{l32}y_i + m_{l33}z_i + m_{l34}}$$

式中, $(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2)$ 分别为探针两端点得坐标, $(u_{li}, v_{li}) (i=1, 2)$ 为探针两端点在左图像上得投影. 采用与上述完全相同的过程, 同样可得到探针两端点在右图像上的投影 (u_{ri}, v_{ri}) , 将 (u_{li}, v_{li}) 、 (u_{ri}, v_{ri}) 连线并分别在左右图像上画出, 就可判断出在虚拟环境中指令位姿与实际位姿的偏差量, 这可以监视虚拟环境的可靠性, 同时也可根据其偏差程度对监控操作进行修正.

7 系统实验(Experiments)

实验系统的构建如前所述, 在室内环境中, 安装一支架, 支架上安装水下机械手, 上方安装两只 CCD 相机. 使用 3D 平台使 CCD 的观测空间定义在机械手的基坐标系 W 上. 当模拟井架放置在这个工作区



图 5 实验现场照片

Fig. 5 Experiment scene

域内, 使用前述的视觉与井架定位技术, 计算出模拟井架与机械手位姿关系, 将这个关系送到 VR 系统, 对虚拟环境中机械手和作业对象的位置关系进行校正, 并指导监控系统按这个位姿关系进行运动轨迹规划. 运动结果由监控系统将各关节值送至 VR 系统, 以多视点、多窗口图形界面方式显示出来, 实时动态地帮助操作者进行作业观测与操作.

8 结论(Conclusion)

本文提出并实现了一种虚拟现实辅助机器人遥操作系统, 建立了完整的实验环境, 研究了遥操作机器人及其作业环境的几何建模和运动学建模、基于人机交互方式的虚拟环境与真实环境的一致性校正、图形图像叠加、基于网络的通讯等关键技术, 为虚拟现实辅助下的机器人监控遥操作技术的实用化提供了坚实的技术基础和实现经验, 促进了虚拟环境下遥操作机器人系统研究水平的提高和应用技术的发展.

参考文献 (References)

- 1 蒋新松. 未来机器人技术的发展方向. 机器人技术与应用, 1997, (2): 2
- 2 Sulzmann A. 3D Computer Graphics Based Interface to Real Microscopic Worlds for U-Robot Telemanipulation and Position Control. ISBN: 0-7803-2559-1/95, 1995 IEEE: 286
- 3 Grigore C. Burdea, Invited Review: The Synergy Between Virtual Reality and Robotics. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 400
- 4 赵春霞, Y F Li, 王树国等. 虚拟现实的发展及在机器人系统中的应用与研究. 机器人, 1999, 21(5): 395
- 5 Theodore T Blackmon, Lawrence W Stark. Model-Based Supervisory Control in Telerobotics. Presence, 1996, 5(2): 205
- 6 张再兴, 余新耀, 叶棒. 遥现——一种重要的虚拟现实技术. 机器人, 1995, 17(6): 22
- 7 马颂德, 张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998
- 8 刘伟军, 董再励, 郝颖明等. 基于旋动理论的移动机器人自定位方法研究. 中南工业大学学报, 2000, 31(专辑): 468
- 9 Kim W S. Virtual Reality Calibration for Telerobotic Servicing. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego: 2769

作者简介:

刘伟军 (1969-), 男, 博士, 助理研究员, 研究领域: 反求工程, 虚拟现实等.

朱枫 (1962-), 男, 硕士, 研究员. 研究领域: 计算机视觉, 虚拟现实等.

董再励 (1952-), 男, 硕士, 副研究员. 研究领域: 虚拟现实, 三维测量等.