

# 基于 VR 技术辅助机器人遥操作系统研究

张功,钟伟

(江苏科技大学 机械工程学院,江苏 镇江 212003)

**摘要:**虚拟现实技术是一个重要的科学技术领域,在遥操作机器人系统中采用虚拟现实技术提供反馈,不仅提高了操作过程中的临场感和交互性,而且降低了遥操作难度。通过对系统的总体结构设计与控制过程分析和 Unity3D 中虚拟环境的搭建、机器人运动学分析,完成系统之间通信和 VR 视觉反馈。

**关键词:**虚拟现实;遥操作机器人;Unity3D

**中图分类号:**TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0011-04

## Research on VR Technology-assisted Robotic Teleoperation System

ZHANG Gong,ZHONG Wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Virtual reality technology, an important field of science and technology, is adopted to provide feedback to the operator in the teleoperated robot system, which not only improves the sense of presence and interactivity in the operation process, but also reduces the difficulty of teleoperation. The overall structure design and control process analysis of the system are introduced, the virtual environment in Unity3D is constructed and the kinematic analysis of the robot is carried out. The inter-system communication and VR visual feedback are completed.

**Keywords:** virtual reality; teleoperated robot; Unity3D

## 0 引言

机器人遥操作技术<sup>[1]</sup>近年来已成为研究热点,可由通信环节实时控制从机器人进行作业。机器人遥操作实现了主机器人与从机器人、从机器人与环境之间的交互。该技术已被普遍应用于高温、高压、强辐射等极限环境,如深海与太空探索<sup>[2]</sup>、核电设备操作等。遥操作过程中主要依赖于视觉信息。人类从两只眼睛感知的空间为三维结构,深度信息对于执行各种操作任务至关重要。相机将三维世界成像到二维屏幕中丢失深度信息,而立体显示在各种遥操作场景中都可以有效缩短任务的完成时间,提高任务精度<sup>[3-4]</sup>。

虚拟现实技术是一种新兴的高新实用技术,可以有效与机器人技术进行结合。操作者通过虚拟现实技术提供的视觉、力觉等手段显著提高机器人遥操作的沉浸感、准确度和快速性。Unity3D 引擎是由 Unity Technologies 开发的一款三维可视化游戏开发工具。本文提出基于 Unity3D 游戏引擎开发的 VR 虚拟仿真技术辅助机器人遥操作并加以实现。

从机械臂控制器中。经过控制器解算求出从机械臂各关节转角,对从机械臂进行运动控制。与此同时将从机械臂位姿数据通过网络发送回上位机,再由上位机将从机械臂位姿数据发送到虚拟现实仿真服务器对虚拟机械臂进行控制。虚拟系统通过 HTC-VIVE 套件给操作者视觉上的反馈提示;另一方面,虚拟机器人在触碰虚拟物体的同时,将碰触信号发送回上位机,由上位机控制 Geomagic Touch 桌面主机器人提供力反馈。

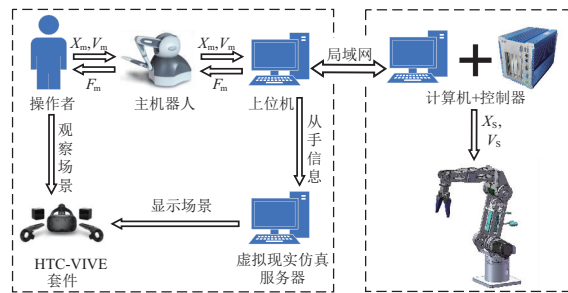


图 1 总体结构图

## 1 总体结构设计

基于 VR 技术辅助机器人遥操作系统,包含的硬件设备有 Geomagic Touch 桌面主机器人、HTC-VIVE 套件、上位机、虚拟现实仿真服务器、从机器人计算机与控制器、四自由度串联从手。如图 1 所示,操作者操作主机器人时,上位机获取主机器人末端坐标并通过 Socket 网络发送到

## 2 机器人遥操作系统的设计

### 2.1 上位机主手信息采集与数据通信

Geomagic Touch 六自由度串联主手设备作为遥操作主机械臂,OpenHaptic 是 Geomagic 公司为其设备提供的

第一作者简介:张功(1995—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为机器人控制技术,32568893@qq.com。

上位机编程接口<sup>[5]</sup>。该接口分为 HDPAI 与 HLAPI 两个部分,HDPAI 为设备的底层接口,可以通过回调函数读取设备的实时状态与参数。HLAPI 与 OpenGL 相似,并且能够对 OpenGL 代码重用。本上位机系统采用的 OpenHaptic3.4.0 版本,本系统是对四自由度串联机械臂实物进行控制,对实时性要求更高,选用更加接近底层的 HDPAI 编程接口进行编程。

上位机基于 C++ 建立 MFC 界面程序,上位机由 OpenHapticsHDPAI,以 1000 Hz 的采样频率获取 Geomagic Touch 的位姿信息。通过获取的各个关节转角信息,计算出主机机械臂末端坐标。如图 2 所示,创建 Socket 服务器,通过 Socket 通信的方式发送到下位机控制器,并获取下位机反馈的从机械臂各关节转角信息。并将从机械臂位姿信息通过 Socket 通信发送到虚拟现实仿真服务器控制虚拟机械臂运动。

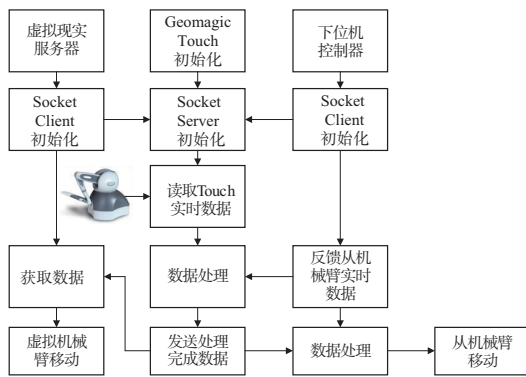


图 2 数据通信结构图

## 2.2 从机器人设计与分析

### 1) 机器人 D-H 连杆坐标系和连杆参数表

如图 3 所示,自主设计四自由度串联机械臂被用作遥操作系统中的从手,各关节转角范围,连杆长度都已明确。为机器人建立 D-H<sup>[6]</sup>坐标系如图 4 所示。根据坐标系可获得机器人 D-H 参数表,如表 1 所示。

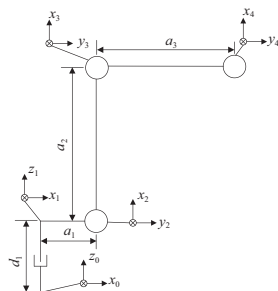


图 3 机器人三维模型 图 4 连杆坐标系

表 1 机器人连杆参数表

关节 <i>i</i>	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/\text{mm}$	$d_i/\text{mm}$	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	100	-90~90
2	90	80	0	-75~75
3	0	260	0	-10~120
4	0	298	0	-120~120

### 2) 机器人正运动学分析

运用齐次变换法对机器人进行运动学分析,得出相邻连杆坐标系间的位姿变换矩阵为

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则机器人末端相对于基坐标系的位姿变换矩阵为

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (2)$$

由此,可由机器人各关节旋转角度求解出机器人的末端位姿。

### 3) 机器人逆运动学分析

机器人逆运动学是根据机器人末端位姿求解机器人各关节转角的过程。可以采用反变换法求解,即对 ${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$ 公式两侧依次左乘 $({}^{i-1}T_i)^{-1}$ ,即可求解得出机器人各关节转角。

## 2.3 从机器人控制系统设计

Matlab/Simulink 中包含有 RTW 工具箱 (real time workshop) 专门用于实时控制<sup>[7]</sup>。下位机采用的是 Links-Box 实时仿真机,由 RTW 导出的目标文件,是完整的可执行文件。将生成的代码文件加载到实时仿真机中,可实现仿真参数的实时更改,并且内置于下位机的运动控制卡,其常用开发功能,如 PWM 脉冲输出、模拟量采集、数字量输出等,也都被进行合理封装,将复杂编程简易化。Simulink 模型包含主手运动学正解求取末端位姿、位置映射算法、从手运动学逆解求取各关节角、PID 控制器、Socket 客户端。使用 RTW 配合下位机 Link-box 实时仿真器,使得系统开发周期和成本都大大降低。

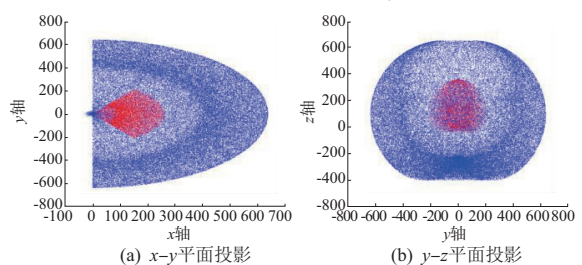
## 3 主机器人与从机器人之间的空间映射

主机器人为 Geomagic Touch 六自由度串联机械臂,从机器人为四自由度串联机械臂属于主从异构,所以需要进行主机器人与从机器人之间的空间映射<sup>[8]</sup>,以建立二者之间的运动关系。本文采用常比例空间映射,核心公式如下:

$$X_s = K'(X_m + X_n) \quad (3)$$

式中: $X_s$ 为从机器人的末端位置; $X_m$ 为主机器人的末端位置; $K' = [k_x, k_y, k_z]$ 为主机器人和从机器人的空间映射比例系数; $X_n$ 为主机器人位置映射后与从机器人位置保持一致的位置常量。

采用蒙特卡洛法结合主机器人和虚拟机器人的正运动学方程,进行工作空间求解,通过 Matlab 得到映射前的主机器人和虚拟机器人工作空间云点图对比,如图 5 所示。



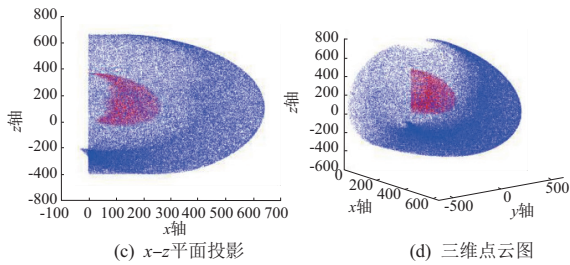


图 5 主机器人与从机器人工作空间点云图对比

根据图 5 和式(3),可计算得出  $K$  和  $X_n$  的取值,如表 2 所示。

表 2 参数取值

参数	$x$ 方向	$y$ 方向	$z$ 方向
$K'$	2.28	2.37	2.64
$X_n$	15.0	0	42.8

## 4 虚拟环境构建

机器人遥操作系统中的虚拟现实仿真采用的是 Unity3D 开发引擎,Unity3D 具有强大的渲染、物理碰撞检测引擎,并且可以多平台部署,包括 Oculus Rift、HTC-VIVE 与谷歌 VR 平台<sup>[9]</sup>。对于虚拟机器人,一方面要保证模型几何和装配的准确性,另一方面,也要保证模型在虚拟环境中的真实感<sup>[10]</sup>。因此,需要对机器人模型进行处理,处理流程如图 6 所示。

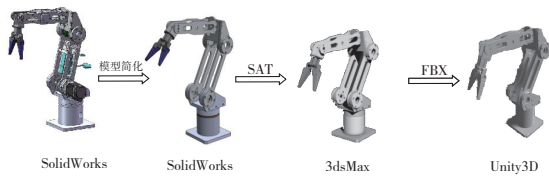


图 6 机器人模型处理流程

1) 在 SolidWorks 中对机器人模型进行简化处理,并将模型以 SAT 格式导出。

2) 将导出的机器人模型导入 3dsMax 中,对模型各关节的坐标轴进行调整,使其处于各关节旋转中心,以便在 Unity3D 中对各关节进行运动控制,并通过 3dsMax 中的材质编辑器赋予模型材质,以增加模型的真实感。

3) 将 3dsMax 中的模型以 FBX 格式导出,在导出前调整模型的长度单位为 m。

4) 在 FBX 格式的模型导入到 Unity3D 后,将一同运动的部件组合成一个运动整体,并确定各运动整体间的父子关系。

## 5 实验

### 5.1 实验平台搭建

搭建的实验平台如图 7 所示,包括 Geomagic Touch 主机器人、HTC-VIVE、虚拟显示服务器与上位机、Links-Box 实时仿真机(下位机)。操作者佩戴 HTC-VIVE 在虚拟视角下观察虚拟机器人,操作者控制主手产生位移信号,实时仿真

机获取主手位移信息,对数据进行处理,控制主机内置的 4 块运动控制卡在速度模式下实时控制从机器人各关节驱动电机,实现从机器人的随动,并且虚拟现实服务器实时获取真实从机器人位姿,刷新虚拟机器人状态。操作者在获取虚拟视角辅助的情况下,准确地操作主机器人动作。

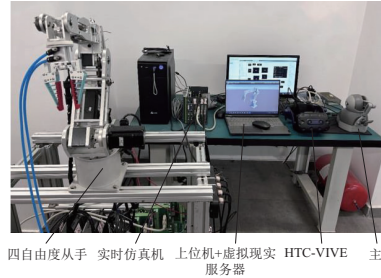


图 7 虚拟现实 VR 辅助机器人遥操作平台

### 5.2 实验与结果分析

首先验证主机器人与从机器人同步控制可行性,实验过程中,操作主机器人在空间内作随机移动,比较主机器人末端轨迹与从机器人的末端轨迹。随机操作主手绘制空间曲线并控制从手同步运动,实验结果如图 8 所示。

图 8 中虚线为主机器人末端轨迹,实线为从机器人末端轨迹曲线。通过曲线对比可以发现,主机器人末端轨迹姿态与从机器人末端轨迹姿态基本一致,从机器人末端轨迹对主机器人末端轨迹有很好的比例放大作用。

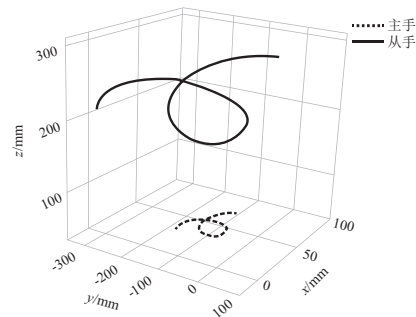
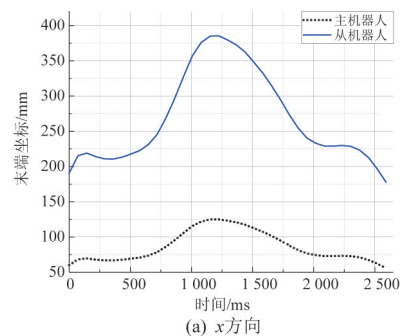


图 8 主机器人与从机器人的末端轨迹比较

主机器人与从机器人末端点坐标在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上随时间变化的曲线如图 9 所示。

由图 8 与图 9 可知,主、从机器人末端点轨迹较平顺,趋势相同,呈现比例放大的关系。由于系统延迟,计算机正反解速度等因素影响,存在误差如图 9(d) 所示,但误差范围控制在  $\pm 0.04\%$  以内,总体操作较为准确。



(a)  $x$  方向

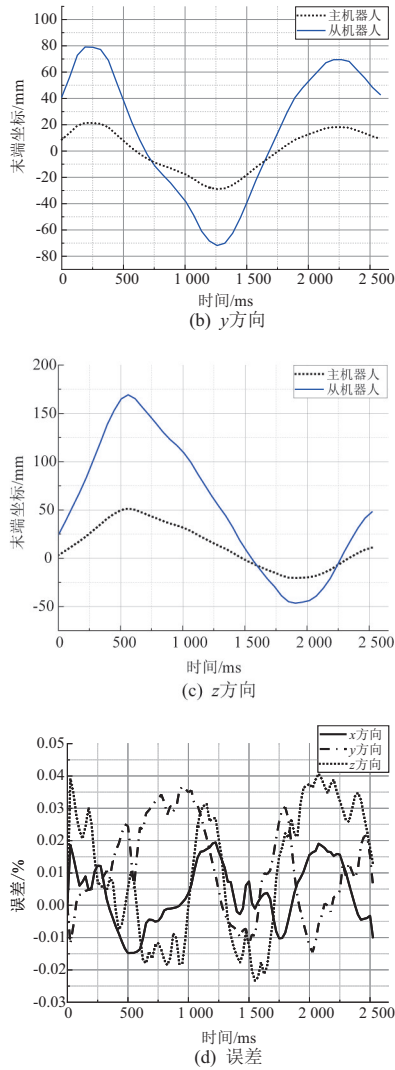


图9 主从设备末端点坐标在 x、y、z 方向随时间变化曲线

在验证当主机器人控制从机器人抓取物品时,虚拟仿真中的虚拟机械臂也会抓取物品,并给出 z 轴方向上的力反馈提示,实验结果如图 10 所示。

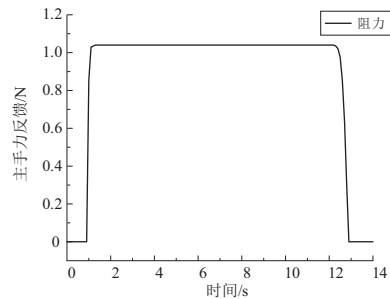


图 10 主手力反馈阻力

由图 10 可判断当虚拟机械臂抓取目标物时系统可快速反馈,上位机调用 API,给主手即提供力反馈提示操作者目标物抓取成功。当操作者控制主手放下目标物,则虚拟机械手也放下虚拟环境下的目标物,并且主手撤销力反馈提示操作者目标物已放下。

最后,利用虚拟现实 VR 技术辅助操作者通过主机器

人精准控制从机器人进行搬运。如图 11 所示,操作者佩戴 HTC-VIVE 通过视觉提示抓取放置在桌面上的圆柱物体并将其放入圆柱凹槽内,在 Unity3D 中已知两个目标物体的方位并且在虚拟环境中建模,并且抓取过程中主手 Geomagic Touch 会产生力反馈提示。通过实验,操作者可准确将目标物放置到指定地点。

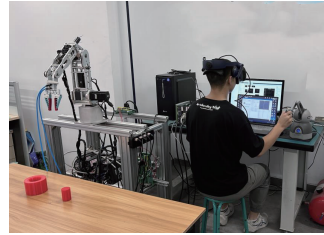


图 11 目标物搬运实验图

## 6 结语

本文结合虚拟现实技术与机器人遥操作技术,利用虚拟现实的视觉反馈,对虚拟现实 VR 辅助机器人遥操作进行研究。基于虚拟现实的遥操作系统,通过网络通信,实时、准确地显示从机器人位姿并通过力反馈主手给予操作者反馈,不仅有效地提高了遥操作的顺畅性、准确性,而且提高了操作者的沉浸感,并且具有良好的移植性,可以将其用在各种工业机器人需要遥操作的场景。

### 参考文献:

- [1] MELCHIORRI C. Robot teleoperation [M]//Encyclopedia of Systems and Control. London:Springer London,2013:1-14.
- [2] XIA T, LÉONARD S, DEGUET A, et al. Augmented reality environment with virtual fixtures for robotic telemanipulation in space [C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura - Algarve, Portugal: IEEE,2012:5059-5064.
- [3] CHEN J Y C, ODEN R N V, KENNY C, et al. Stereoscopic displays for robot teleoperation and simulated driving [J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting,2010,54(19):1488-1492.
- [4] MIYANISHI Y, SAHIN E, MAKINEN J, et al. Subjective comparison of monocular and stereoscopic vision in teleoperation of a robot arm manipulator [J]. Electronic Imaging, 2019, 31(3):659.
- [5] 李大为. 基于 OpenHaptics 的六自由度串联机器人实时控制[J]. 计算机系统应用,2016,25(11):221-226.
- [6] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. Journal of Applied Mechanics,1955,22(2):215-221.
- [7] 陈攀,张承瑞,罗映. 利用 MATLAB/RTW 的嵌入式代码自动生成与整合[J]. 小型微型计算机系统,2018,39(4):738-741.
- [8] 张兴宇. 主从异构遥操作机器人的路径规划研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2019.
- [9] JO Y, KIM Y J, CHO M, et al. Virtual reality-based control of robotic endoscope in laparoscopic surgery [J]. International Journal of Control, Automation and Systems,2020,18(1):150-162.
- [10] 贾飞. 基于虚拟现实的工业机器人运动仿真与控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.

收稿日期:2022-12-07