

基于头戴设备和手柄的机械系统 远程控制方法

陈琼, 吴武豪, 陈少尉

(中电海康集团有限公司, 杭州 311100)

摘要: 设计了一种基于头戴式设备和操作手柄的机械系统远程控制方法, 该方法使用操作手柄的位姿信息远程控制机械系统的运动, 并通过计算头戴式设备与操作手柄之间相对位姿来控制机械系统上的图像采集设备; 基于本方法, 在增强现实眼镜工程样机及其连接的智能手机上进行了对机械系统及其上图像采集设备的远程控制的系统实现, 并在四足机器人和四轮小车两种机械系统上对本方法进行了实验验证; 实验结果表明本方法具备较好的可行性和实用性, 让使用者更有身临其境的沉浸式现场感; 同时, 无需部署外置的姿态捕捉设备, 对使用场地环境也没有要求, 可以在室内外环境下使用。

关键词: 遥操作; 远程控制; 机械系统; 增强现实; 虚拟现实

Remote Control Method for Mechanical System Based on Head Mounted Device and Handle

CHEN Qiong, WU Wuhao, CHEN Shaowei

(CETHIK Group Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: A remote control method for mechanical system based on head mounted device and operating handle is proposed, the pose information of operating handle is used to control the movement of the mechanical system, and the relative pose between the head mounted device and operating handle is calculated to control the image acquisition equipment on the mechanical system. Based on this method for an AR glasses engineering prototype which connected to a smart phone, the remote control between the mechanical system and image acquisition equipment is realized, and the feasibility of this method is verified by the experiments on two types of mechanical systems (a quadruped robot and a four-wheel car). The experimental results show that this method has good feasible and practical. At the same time, It is not necessary to deploy external attitude capture equipment, and there is no requirement for environment, so it can be used in indoor and outdoor environments.

Keywords: teleoperation; remote control; mechanical system; augmented reality; visual reality

0 引言

随着科学技术的发展, 机器人技术在空间探索、深海开发、应急侦查等领域的应用越来越广泛。当前, 虽然自主式智能机器人已有较大发展, 但受限于现有技术, 在较为复杂环境下作业时, 由人工控制的交互式远程操作仍然是当前机器人远程作业的主要技术手段^[1]。

在使用交互式远程控制过程中, 实现对机械系统所在实地环境的实时感知, 使得操作者在本地有“临场感”, 远程作业的效率可以得到很大提高^[2]。另一方面, 人机交互是实现操作者与计算机之间信息交互的界面, 从键盘鼠标、到触摸屏、语音, 再到体感、手势等, 人机交互一直是研究的热门课题^[3]。随着计算机运算性能提升和计算机图形

学的发展, 虚拟现实^[4]和增强现实^[5]作为获得操作者“临场感”的关键技术被应用到机器人及机械系统的远程操作中^[6]。

目前在以机器人为代表的机械系统运动远程操作控制中, 主要通过手柄等单一操作方式操控机械系统的运动行为。单一的手柄操作方式不仅体验感不强, 而且存在多个手柄同时操作给用户带来操作难度的问题。通过虚拟现实技术, 可以在主端模拟一个与从端环境类似的虚拟世界。为了进一步增强用户在操作机械系统时的体验感、降低操作难度, 使用虚拟现实/增强现实技术, 并结合操作手柄的方式操控机械系统运动, 可以同时让用户拥有第一人称的操作视角和身临其境的感觉。本文针对现有 VR/AR 系统远程操作机械系统的缺点, 提出一种使用操作手柄的位姿信

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-07-11。

基金项目: 国家自然科学基金(U20B2074); 国家科技重大专项(2018ZX010281, 子课题 2018ZX01028102-004)。

作者简介: 陈琼(1977-), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事平台共性技术和软件系统架构方向的研究。

引用格式: 陈琼, 吴武豪, 陈少尉. 基于头戴设备和手柄的机械系统远程控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 113-119.

息远程控制机械系统的运动,并通过计算头戴式设备与操作手柄的之间相对位姿来控制机械系统上的图像采集设备的方法,从而提高用户的操作体验和“临产感”。然后通过 AR 眼镜工程样机,及与其联结并充当手柄的普通智能手机,来对作为机械系统两种案例的四足机器人和四轮小车,及其上的图像采集设备进行远程控制实验,来验证本方法的可行性和实用性。

1 概念和相关工作

1.1 交互式远程操作的系统组成

交互式远程操作系统主要由 5 个部分构成^[7],包括操作者、主端控制回路、通信链路、从端控制回路及机械系统(机器人)。在机械系统的远程作业过程中,操作者从主端控制回路,通过通讯链路,向从端控制回路发出控制命令。接收命令后,从端控制回路控制机械系统完成命令,并将机械系统与现场环境的交互信息通过通讯链路反馈给主端,使得操作者能够根据反馈信息做出下一步动作。

基于虚拟现实或者增强现实的交互式远程操作系统的主要组成如图 1 所示^[8],包括操作者、人机交互设备、虚拟现实/增强现实环境、通信链路、从端控制器、从端机械系统(机器人)、机械系统搭载的各类传感器、和远端实际环境。其中,虚拟现实、增强现实为操作者提供人机交互设备,模拟构建与现场类似的环境。操作者通过人机交互界面发出控制命令并获得视觉、触觉、听觉、味觉等现场实时反馈。处于从端环境的机械系统,通过从端控制器获得来自主端的控制命令并完成命令作业。在机械系统上可安装视觉、听觉、触觉传感器等,采集环境感知信号和交互信息,通过通信链路反馈给主端。由于成本和技术等方面的原因,通过音视频回传现场视觉和听觉信息是当前最为常见的技术方案。

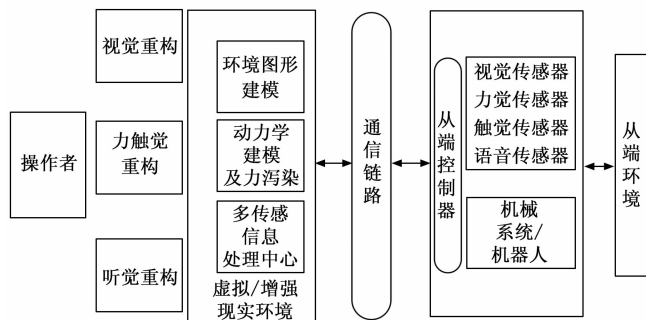


图 1 基于虚拟现实环境的远程操作系统基本组成

1.2 研究现状

基于虚拟/增强现实的机械系统远程操作已经在各个领域得到广泛应用。早在 1993 年,德国研制了由人机交互装置、空间机器人和三维环境组成的系统,并在航天飞机上完成了空间遥操作试验^[9]。加拿大研究人员开发的遥控排爆装置^[10],在机械臂上安装 6 个摄像头构建多视角深度信息,操作者可以通过触屏控制调整场景视角并使用 Oculus

眼镜感知深度信息,从而对两个机械臂操控进行排爆作业。Steven J. Levine 提出了基于手势识别的交互方式^[11],先将操作者动作映射到虚拟机器人上,然后使用虚拟机器人对虚拟目标物进行抓取等动作并确认,最后真实机器人重复虚拟机器人动作完成对实际目标物的作业。波恩大学和卡内基梅隆大学研发的博物馆导游机器人^[12],通过 Web 网站对导游机器人进行远程操控,来引导游客参观。日本研究者设计的远程机械臂^[13],通过安装在机械臂上的立体相机来测量前者与目标物的距离,然后操作者手动或者通过视觉伺服系统,实现对机械臂的远程控制。

在国内,相关研究和应用也广泛展开。魏青^[14]等人使用 Oculus 虚拟现实头盔,设计了一个空间机器人预测仿真系统,通过实验证实可以提高工作效率。徐效农、宋爱国^[15]搭建了基于虚拟视觉和力觉反馈的空间遥操作实验平台,通过 KINECT 相机采集三维点云信息重建虚拟机械臂及其作业环境,并在此重建环境中获得实时视觉及力觉反馈,然后在 Schunk 机械臂中进行实际操作。应骏^[16]等结合了体感与增强现实技术,构建了体感控制机器人,通过摄像头获得现场全息视角并采用眼镜进行视觉反馈,采用体感来控制机器人位姿。魏焱^[17]设计了一种基于 VR 的变电站智能巡检系统,首先对变电站进行精细化三维建模,然后利用虚拟现实技术,将变电站相关的各种数据信息以三维模型为载体进行了综合展现。王成业^[18]等人在虚拟环境中构建模拟机器人,然后通过模拟机器人来操控实际机器人。邵欣欣等^[19]构建了一个基于虚拟现实的物联网水环境检测系统,将传感器采集到的水量、水质和污染物等水环境信息,在其构建的虚拟现实环境中实时展示,并对传感器实时获取的数据和实际水量调度方案进行一致性监测。赵静^[20]等人设计了一款基于虚拟现实环境监测机器人,使用 VR 手柄对机器人进行远程控制,佩戴 VR 头显查看农田环境可视化数据,并利用机器人现场回传田间实时视频获得沉浸式体验。薛彩龙^[21]研究了基于 VR 技术的井下可视化监测系统,构建由多种传感器组成的多个监测分站,将采集到的速度、压力等数据展现在煤矿井下排水系统及其结构分布图的三维模型中。张可征^[22]等提出一种 VR 远程医疗服务机器人,由机器人搭载红外摄像头和可见光摄像头,实现人脸检测、多人同时测温、识别抓取多种物品目标等功能,并回传相关信息。

前述的各种通过 VR/AR 及其手柄控制机械系统的方法,或者只是单独远程控制机械系统,或者单独控制从端的图像采集设备,都无法控制机械系统与其上图像采集设备的相对运动。如果只是分别独立控制机械系统的运动,和其上图像采集设备的运动,而不顾两者的相对位置,则操作者的沉浸式临场感会有较大降低。而且在使用 AR/VR 设备时,一般使用微软 KINECT、HTC VIVE 等设备。这些设备的局限在于,为了得到操作人员的位姿信息,需要部署外置的姿态捕捉设备,成本较高,也需要部署时间,

从而难以在室外等较为复杂的环境下随时随地使用。

2 系统的设计和实现

本文描述的基于头戴式设备和操作手柄的机械系统控制方法, 融合计算头部和手部的运动体态, 通过交互式远程控制方法, 可控制位于从端环境的机械系统的运动, 并控制位于机械系统上的图像采集设备相对于机械系统的运动, 给操作者以临场感。并且本文所述的方法也无需部署外置的姿态捕捉设备, 成本较低, 无部署环境要求, 可以在室外环境下随时随地的使用。

2.1 整体架构及控制方法设计

本文所述的控制方法, 其整体架构如图 2 所示。

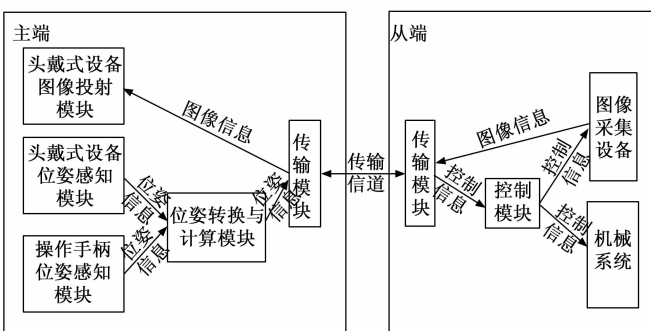


图 2 整体架构图

位于主端的头戴式设备位姿感知模块和操作手柄位姿感知模块, 将实时采集的位姿信息输入到位姿转换与计算模块, 其计算得到的控制信息通过传输模块传送到处于从端的控制模块, 分别控制机械系统和图像采集设备的运动。

同时, 图像采集设备采集的图像信息(经常也包括音频信息)通过传输模块实时回传到主端, 并通过头戴式设备图像投射模块, 对使用者进行视觉(经常也包括听觉)反馈。这一图像回传过程本文不再赘述。

如图 3 所示, 本基于头戴式 AR/VR 设备和操作手柄的机器人控制方法, 包括:

1) 获取操作手柄的空间姿态数据, 并根据操作手柄的空间姿态数据控制机械系统运动。

2) 获取头戴式 AR/VR 设备的空间姿态数据(该空间姿态数据根据佩戴者的头部移动进行变化), 并根据头戴式 AR/VR 设备和操作手柄的相对空间姿态数据控制图像采集设备转动。

控制机械系统运动以及控制图像采集设备转动为两个互相独立的控制, 两者在执行顺序上无先后关系。应该理解的是, 虽然图 3 的流程图中的 a), b) 两个步骤按照箭头的指示依次显示, 但是这两个步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。两个步骤的执行并没有严格的顺序限制, 而是可以独立进行控制。

本方法提供的控制方法逻辑简单, 控制时效性高, 并且控制参数多, 能够满足机械系统的多方位运动。

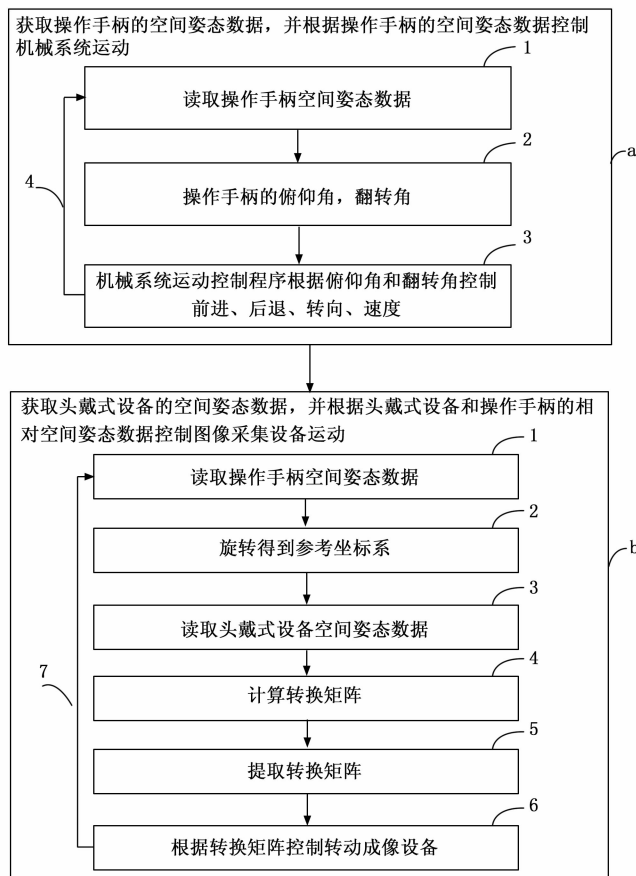


图 3 本方法的流程图

2.2 操作手柄控制机械系统的运动方向算法

本方法中操作手柄的参考坐标系 Q (即地球参考系) 在无空间旋转时, y 轴在水平面上指向地磁北极, z 轴垂直于水平面向上, 其 x 轴垂直于 y 轴和 z 轴的交平面指向东。操作手柄的本地坐标系 P 固定, 当手柄屏幕水平朝上, 头部朝北放置时, 本地坐标系 P 的 y 轴在水平面上指向地磁北极, z 轴垂直于屏幕向上, x 轴垂直于 y 轴和 z 轴的交平面指向东。

如图 3 步骤 a) 的控制机械运动流程所示, 基于操作手柄空间姿态的机械系统运动控制方法, 步骤如下。

步骤 1: 读取操作手柄的空间姿态数据。在本例中读取其空间旋转相关的 3 个自由度的数据, 即俯仰角、偏航角和翻转角。也可直接获取其空间姿态的四元数、旋转矩阵或旋转向量, 获取后可以使用相应的转换方法将四元数、旋转矩阵或旋转向量转换为俯仰角、偏航角和翻转角;

步骤 2: 提取俯仰角和翻转角;

步骤 3: 将俯仰角和翻转角输入到机械系统运动控制程序中, 控制程序根据输入数据来操控机械系统前进、后退、转向和运动速度。具体地, 本例中使用翻转角的角度来控制机械系统的转向, 使用俯仰角来控制机械系统的前进、后退以及运动速度, 俯仰角为正, 机械系统前进, 俯仰角

为负，机械系统后退，俯仰角越大，车速则越快。容易理解的是，这仅是其中一种可行的控制方式，基于翻转角还可以演变出其他许多控制方式，例如机械系统旋转的角度与翻转角成倍数关系、机械系统旋转的方向与翻转角的正负关系变化等等。

步骤 4：循环，即返回步骤 1 循环执行程序，从而实现机械系统运动的连续控制。

2.3 头戴式设备控制机械系统图像采集设备算法

本方法中头戴式设备使用和操作手柄相同的 IMU 传感器来跟踪头戴式设备的空间姿态，因此头戴式设备的参考坐标系 W 和控制手柄的参考坐标系 Q 重合，是同一个坐标系。头戴式设备的本地坐标系 E 固定，当操作员佩戴好头戴式设备并面朝地磁北极时，本地坐标系 E 的 y 轴在水平面上指向地磁北极， z 轴垂直水平面向上， x 轴垂直于 y 轴和 z 轴交平面指向东。

如图 3 步骤 b) 的控制图像采集设备流程所示，头戴式设备控制机械系统上成像设备的转动控制方法，步骤如下。

步骤 1：读取操作手柄的空间姿态数据。在本例中读取其空间旋转相关的 3 个自由度的数据，即俯仰角、偏航角和翻转角数据。

步骤 2：令操作手柄的参考坐标系为 Q ，将参考坐标系 Q 绕其 z 轴旋转 θ 角后得到参考坐标系 V ，初始状态下参考坐标系 V 和参考坐标系 Q 重合，其中 θ 角等于操作手柄的偏航角，即旋转坐标系 V 跟随操作手柄的 y 轴正方向的朝向旋转，则参考坐标系 Q 到参考坐标系 V 的转换矩阵 T_{qv} 如下：

$$T_{qv} = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{qv} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\text{其中：}\mathbf{R}_{qv} = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

步骤 3：读取头戴式设备的空间姿态数据。本例中读取头戴式设备其 3 个自由度的数据，即俯仰角、偏转角和翻转角数据。本例中头戴式设备的空间姿态使用 9 轴 IMU 传感器测量，从传感器上读取陀螺仪、加速度计和磁力计的数据，使用姿态解算算法计算得到表示操作手柄空间姿态的四元数。

步骤 4：计算转换矩阵 T_{ew} 和 T_{ev} 。如图 4 所示，转换矩阵 T_{ew} 为坐标系 E 到坐标系 W 的转换矩阵，转换矩阵 T_{ev} 为坐标系 E 到坐标系 V 的转换矩阵。具体地，本实施例中 T_{ew} 和 T_{ev} 的计算方法如下：

令头戴式设备的本地坐标系为 E ，参考坐标系为 W ，特殊地，在本例中 E 与 W 的坐标原点重合，则 E 相对于 W 的空间旋转关系为 \mathbf{R}_{ew} ， \mathbf{R}_{ew} 可以直接通过步骤 3 中得到的头戴式设备的四元数计算得到。若四元数为 $q = \omega + xi + yj + zk$

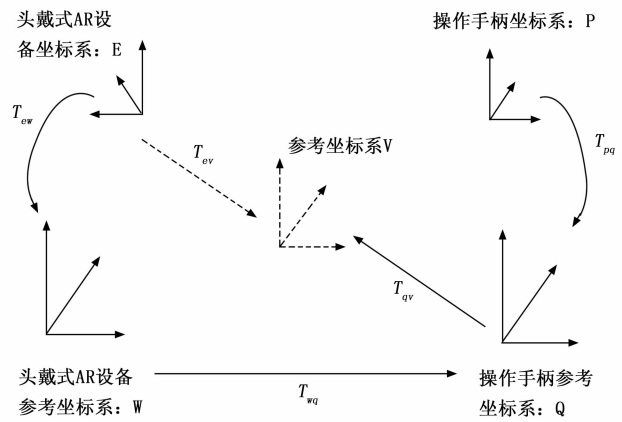


图 4 坐标转换示意图

其中 i, j, k 为四元数的 3 个虚数单位， ω, x, y, z 为 4 个实数，则空间旋转矩阵 \mathbf{R}_{ew} 如下：

$$\mathbf{R}_{ew} = \begin{vmatrix} 1 - 2y^2 - 2z^2 & 2xy - 2z\omega & 2xz + 2y\omega \\ 2xy + 2z\omega & 1 - 2x^2 - 2z^2 & 2yz - 2x\omega \\ 2xz - 2y\omega & 2yz + 2x\omega & 1 - 2x^2 - 2y^2 \end{vmatrix}^{-1}$$

由于本例中 E 到 W 无相对平移和缩放变换，只有旋转变换，所以 E 到 W 的转换矩阵为 $T_{ew} = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{ew} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ 。

复用步骤 1 从操作手柄上读取的空间姿态数据：3 个自由度数据，其中 θ 角等于操作手柄的偏航角。

根据步骤 2，已知 V 可以通过 Q 旋转 θ 角度得到，那么 Q 到 V 的转换矩阵为： $T_{qv} = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{qv} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ 。

本例中头戴式设备的本地坐标系 E 到虚拟参考坐标系 V 的转换关系不能直接得到，但是可以通过中间坐标系转换得到，即： $T_{ev} = T_{qv} T_{wq} T_{ew}$ ，也就是坐标系 E 先转换到坐标系 W ， W 再到 Q ，最后 Q 转换到 V 。特殊地，本例中坐标系 W 和坐标系 Q 重合，即 T_{wq} 为单位矩阵，则转换关系可以简化为： $T_{ev} = T_{qv} T_{ew}$ ，其中 T_{qv} 和 T_{ew} 的计算方法已知。

步骤 5：将 T_{ew} 进行矩阵分解，得到旋转矩阵 \mathbf{R}_{ew} 。将得到的 T_{ev} 进行矩阵分解，获得旋转矩阵 \mathbf{R}_{ev} 。特殊地，本例中无坐标平移、缩放变化，所以旋转矩阵 \mathbf{R}_{ev} 的计算可以简化为 $\mathbf{R}_{ev} = \mathbf{R}_{qv} \mathbf{R}_{ew}$ 。

步骤 6：将矩阵 \mathbf{R}_{ew} 和 \mathbf{R}_{ev} 输入到机械系统上的成像设备控制程序中，控制程序根据旋转矩阵 \mathbf{R}_{ew} 来控制摄像头的俯仰角，根据旋转矩阵 \mathbf{R}_{ev} 来操控摄像头的偏航角。

本例中使用头戴式设备的俯仰角 pitch 控制成像设备的俯仰角，使用公式 $\text{pitch} = \arcsin(\mathbf{R}_{ew} [3] [2]) * 180/\pi$ 计算头戴式设备的俯仰角 pitch 的角度值，其中 $\mathbf{R}_{ew} [3] [2]$ 是矩阵 \mathbf{R}_{ew} 的第 3 行第 2 列的值。

本例中使用头戴式设备相对于操作手柄的偏航角 yaw 来控制成像设备的偏航角，使用公式 $\text{yaw} = \text{atan2}(\mathbf{R}_{ev} [1]$

[2], $R_{ev} [2] [2]) * 180/\pi$ 计算偏航角 yaw 的角度值, 其中 $R_{ev} [1] [2]$ 是矩阵 R_{ev} 的第 1 行第 2 列的值, $R_{ev} [2] [2]$ 是矩阵 R_{ev} 第 2 行第 2 列的值。

步骤 7: 循环, 从而实现机械系统上成像设备的连续控制。

3 实验应用

在前述方法中的机械系统可以是监控机器人、机器狗、巡逻机器人等各种形式的机器人, 即可以理解为具有运动结构的系统, 包括但不限于无人机、飞行器、足式机械系统、轮式机械系统等; 机械系统上的图像采集设备包括但不限于 RGB 摄像头、红外成像仪等。

在前述方法中的头戴式设备包括但不限于 AR/VR 眼镜、AR/VR 头盔等。图像采集设备将采集的图像画面实时回传到头戴式设备上同步显示。在头戴式设备回传显示前端图像采集设备的视频/图像为成熟的技术, 头戴式设备与图像采集设备之间可以采用有线或无线通信进行图像画面的实时回传。

在前述方法中的操作手柄不限制其具体形式, 可以是智能手机、平板电脑、游戏手柄等。为了丰富控制方式, 头戴式设备支持 9Dof, 操作手柄同样支持 9Dof, 即能够进行 9 个自由度的空间姿态数据的测量。

本控制方法可以运行在用于控制机械系统和图像采集设备控制器上, 该控制器设置在机械系统内部, 且与头戴式设备和操作手柄无线连接; 也可以是运行在独立的计算机或服务器上, 与头戴式设备、操作手柄、机械系统以及图像采集设备之间均采用无线连接; 还可是运行在集成于头戴式设备或操作手柄的微处理器上。

3.1 实验配置环境

当前视频透视式 (video see-through) 和光学透视式 (optical see-through)^[23-24] 是增强现实在物理上的两种主要实现方法。光学透视式是将虚拟信息投影到位于眼前的一层半透明镜片上, 这样虚拟信息和现实场景可以同时出现在用户的视线中。视频透视式技术是先使用摄像头将现实场景输入, 经过计算模块与虚拟信息整合后统一呈现。智能手机等手持设备一般采用视频透视式, AR 眼镜、AR 头盔等常见可穿戴设备较多使用光学透视式。

在对本方法进行的实验中, 头戴式设备是一个 AR 眼镜工程样机, 如图 5 左图所示。该工程样机采用分体式设计, 即其计算单元和电源不放在眼镜上, 而放在与其通过 USB-C 线连接的移动设备上, 其可以是普通智能手机, 在实验中使用华为 P20Pro, 如图 5 右图所示。AR 眼镜的显示装置为两片采用阵列光波导的 AR 显示模组, 其可以识别并获取佩戴者的头部空间姿态。操作手柄是普通的智能手机, 也就是通过 USB-C 线与 AR 眼镜连接的手机, 其可识别并获取其自身空间姿态。

实验中的机械系统采用了两种设备做对比验证。一种



图 5 AR 眼睛工程样机

设备是安装 RGB 图像采集设备的四足机器人。一种设备是安装有 RGB 图像采集设备的四轮小车。四足机器人是基于 MIT Mini Cheetah 开源项目研制, 机器人人具备行走、跑、跳能力, 能够抵抗一定的外力干扰并实现自平衡, 其具体参数如表 1 所示。四轮小车采用 RoboMaster M2006 直流无刷电机搭建, 其控制器集成了 IMU, 每个电机都可以反馈转速, 其具体参数如表 2 所示。实验中可以通过手柄 (即智能手机) 的姿态控制四足机器人和四轮小车前进、后退、转弯运动。四足机器人和四轮小车上都搭载了萤石 C6TC 云台摄像, 其具体参数如表 3 所示。实验中可以通过 AR 眼镜控制云台摄像头的转动, 实现摄像头视角跟随 AR 眼镜视角的效果。

表 1 四足机器人参数

参数	数据
重量	10 kg
尺寸	490×280×300(mm ³)
负载	3 kg
续航	1 h
自由度	3(单腿)×4(四足)=12
传感器	IMU、编码器

表 2 四轮小车参数

参数	数据
重量	3 kg
尺寸	410×250×150(mm ³)
负载	3 kg
续航	1.5 h
传感器	IMU、编码器

表 3 云台摄像头参数

参数	数据
型号	C6TC
重量	215 g
尺寸	100×100×90(mm ³)
清晰度	200 万像素
云台旋转角度	水平 353°, 垂直 133°

3.2 对比实验和效果

在实验中, 从端控制器与 AR 眼镜工程样机和智能手

机之间为无线连接通信，从端控制器与四轮小车或者四足机器人及图像采集设备之间通过有线连接通信，并被安装在四轮小车或者四足狗上。从端控制器通过通讯连接获取 AR 眼镜和智能手机的空间姿态数据，从而控制四轮小车或者四足机器人运动和 RGB 摄像机转动。其结构如图 6 所示。

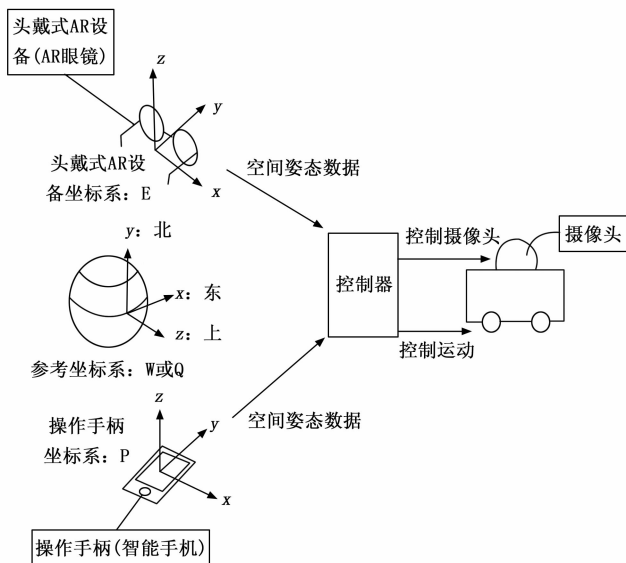


图 6 实验系统结构示意图

在实际工程使用中，有两种控制图像采集设备的方法。第一种控制方法为，将所述图像采集设备的俯仰角设置为和计算得到的俯仰角 pitch 的角度值相等，效果是头戴式眼镜和图像采集设备在垂直方向上转动的角度一样；将所述图像采集设备的偏航角设置为和计算得到的偏航角 yaw 的角度值相等，效果是头戴式设备和图像采集设备在水平方向上转动的角度一样。

第二种控制方法为，使用计算得到的俯仰角 pitch 角度值控制图像采集设备俯仰角，当 pitch 大于 A_p (例如 $A_p = 10^\circ$) 时，控制图像采集设备向上转动，当 pitch 小于 $-A_p$ 时，控制图像采集设备向下转动，否则图像采集设备在垂直方向停止不动；使用计算得到的偏航角 yaw 角度值控制图像采集设备的偏航角，当 yaw 大于 B_y (例如 $B_y = 10^\circ$) 时，控制图像采集设备水平向左转动，当 yaw 小于 $-B_y$ 时，控制图像采集设备向右转动，否则图像采集设备在水平方向上停止不动。

在本实验中，由于采用的云台摄像头不具备按角度精确控制功能，因此采用了第二种控制方法。表 4 是采用本方法，对图像采集设备的控制准确率。这里 A_p 和 B_y 都设为 20° ，表中俯仰角 pitch 和偏航角 yaw 的每个角度都进行 20 次测试。 20° 是设置的临界角度，此角度下准确率不高可以理解。由于俯仰角 pitch 直接来自头戴式设备，因此控制准确率较高，而偏航角 yaw 需计算头戴式设备和控制手柄之间的相对角度，所以控制正确率要比前者低。

表 4 图像采集设备的控制准确率

控制角度/ $^\circ$	云台正确姿态	pitch 准确率/%	yaw 准确率/%
< -40	下转 (pitch) 右转 (yaw)	100	100
-40		100	100
-30		95	80
-20	不动	80	65
-10		100	85
0		100	95
10		100	80
20		70	60
30		100	90
40	上转 (pitch) 左转 (yaw)	100	100
> 40		100	100

经过对四足机器人和四轮小车的对比实验，验证了通过本方法，可以较好地远程控制机械系统和安装在它上面的图像采集设备。图 7 左图是操作人员通过 AR 眼镜工程样机及连接的智能手机观察视频回传信息并控制四足机器人的运动和其上云台摄像头，图 7 右图是正在被远程控制运动中的四轮小车。

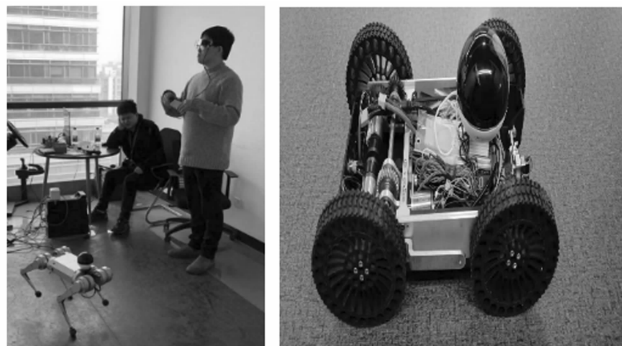


图 7 实验效果

本文前述引用的现有方法，一般通过 VR/AR 眼镜来观察远程回传的视频，从而观察周边环境。有的使用手柄控制远程机器系统本身，如控制机械臂。还有的通过 VR/AR 设备来控制远程图像采集设备。但现有方法或者单独远程控制机械系统，或者单独控制从端图像采集设备，都没有考虑机械系统和其上图像采集设备的相对位置，无法控制两者之间的相对运动。在选用 VR 系统时，通常都使用微软 KINECT、HTC VIVE 等现有成套 VR 系统，这些系统都需要部署外置的姿态捕捉设备，并通过专用手柄来控制远程机械设备。这种方法成本较高，部署有时间和环境要求，难以在室外等较为复杂的环境下随时随地的使用。本文所述的方法通过 AR 眼镜及充当手柄的普通智能手机，能够同时控制机械系统运动和其上图像采集设备相对机械系统的运动，让使用者更有身临其境的沉浸式现场感。同时，无需部署外置的姿态捕捉设备，对使用场地环境也没有要求，可以在室内外环境下使用。表 5 选取了几种前诉文献中描

述的 VR/AR 远程控制应用系统与本文的所述方法和实验系统的对比情况。

表 5 几种远程控制系统的对比

影响因素	文献 14/22	文献 16	文献 17/19/21	文献 18/20	本文
图像回传/信息叠加	有	有	有	有	有
机械系统运动控制	有	有	无	有	有
图像采集设备运动控制	无	有	无	无	有
图像采集设备相对机械系统的运动控制	无	无	无	无	有
外置姿态捕捉设备	不需	需要	不需	需要	不需

4 结束语

本文设计了一种基于头戴式设备和操作手柄的机械系统远程控制方法,该方法使用操作手柄的位姿信息远程控制机械系统的运动,并计算头戴式设备与操作手柄的相对位姿来控制机械系统上的图像采集设备。通过 AR 眼镜工程样机及其连接的智能手机,本方法在四足机器人和四轮小车两种机械系统上进行了实验验证。由于本文采用的云台摄像机不具备按角度精确控制功能,所以本文的 AR 眼镜样机相对智能手机位姿的计算结果,无法用来精确控制图像采集设备相对于机器狗或者四足机器人的位置,从而较大得影响了操作者的控制体验。实验后继准备更换为具有按角度精确控制的云台设备,从而达到对图像采集设备相对机械系统角度的精确控制,提高操作者的控制体验。总得来说,本方法对计算资源要求不高,无部署时间和环境要求,可以随时随地开展使用,可应用在对机器人、无人机等各类机械系统的远程操控上,在应急侦查、空间探索、工业控制等领域都有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 陈俊杰,黄惟一,宋爱国. 虚拟现实力觉临场感系统中操作者的动力学模型[J]. 传感技术学报, 2002, 15(1): 230 - 236.

[2] YUICHIRO A. Human-robot-computer interaction; a new paradigm of research in robotics [J]. Advanced Robotics, 1993, 8 (4): 357 - 369.

[3] 董士海. 人机交互的进展及面临的挑战[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(1): 1 - 13.

[4] SHERMAN W R, CRAIG A B. Understanding virtual reality [J]. Journal of Documentation, 2003, 59 (4): 483 - 486.

[5] CAUDELL T P, MIZELL D W. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes[C]// Proceedings of the 25th Hawaii International Conference on System Sciences. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1992: 659 - 669.

[6] 倪得晶, 宋爱国, 李会军. 基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 13.

[7] PASSENBERG C, PEER A, BUSS M. A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for tele-operation

systems [J]. Mechatronics, 2010, 20(7): 787 - 801.

[8] KUAN C P, YOUNG K Y. Challenges in VR-based robot teleoperation [C]//Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2003: 4392 - 4397.

[9] HIRZINGER G, BRUNNER B, DIETRICH J, et al. ROTEX-the first remotely controlled robot in space[C]// Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2002.

[10] ERICKSON D, LACHERAY H, LAI G, et al. Multi-arm multilateral Haptics-based immersive tele-robotic system (HITS) for improvised explosive device disposal [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9084(18): 8409 - 8412.

[11] LEVINE S J, SCHAFFERT S, CHECKA N. Natural User Interface for Robot Task Assignment[C]// Robot and Human Interactive Communication, 2014 RO-MAN; The 23rd IEEE International Symposium on. IEEE, 2014.

[12] TRIMPE S, BUCHLI J. Event-based estimation and control for remote robot operation with reduced communication[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 5018 - 5025.

[13] MATSUDA Y, SUGI T, GOTO S, et al. Teleoperation of robot arm with position measurement via angle-pixel characteristic and visual supporting function[J]. Artificial Life and Robotics, 2016, 21(4): 478 - 485.

[14] 魏 青, 崔 龙. 基于时延预测的遥操作机器人预测显示方法 [J]. 机器人, 2017, 39(3): 298 - 306.

[15] 徐效农, 宋爱国, 朱澄澄, 等. 基于环境建模与修正的视觉/力觉辅助遥操作系统[J]. 载人航天, 2016(1): 55 - 61.

[16] 应 俊, 王 磊, 薛 凯, 等. 基于 VR、体感控制技术的机器人设计[J]. 军民两用技术与产品, 2016(2): 123 - 124.

[17] 魏 焱. 基于 VR 的变电站智能巡检场景研究与设计[J]. 科技视界, 2013(27): 316 - 318.

[18] 王成业, 李庆党, 王晓波. 基于 VR 技术的机器人遥操作系统设计与开发[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(11): 84 - 86.

[19] 邵欣欣, 张明会. 基于虚拟现实和物联网的水环境监测系统 [J]. 中国科技论文, 2017, 12(7): 738 - 742.

[20] 赵 静, 闫春雨, 曹佃龙, 等. 基于 VR 的农田环境监测机器人研制[J]. 农机化研究, 2020, 42(12): 74 - 79.

[21] 薛彩龙. 基于 VR 技术的井下排水可视化监测系统研究[J]. 机械管理开发, 2018, 33(10): 106 - 107.

[22] 张可征, 方 武, 李晨曦, 等. 一种 VR 远程医疗服务机器人 [J]. 工业控制计算机, 2020, 33(4): 3.

[23] AZUMA R T, H OFF B R, NEELY III H E, et al. Making augmented reality work out doors requires hybrid tracking [C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Augmented Reality, San Francisco, 1998: 219 - 224.

[24] BILLINGHURST M, CLARK A, LEE G. A survey of augmented reality [J]. Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, 2015, 8(2 - 3): 73 - 272.