

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.043

面向风电巡检中的 VR 移动机器人系统设计

吴文宝^{1,2}, 郑素娟¹, 罗玮¹, 黄晓宏^{1,2}, 金声超^{1,2}

(1. 江西省电力建设有限公司, 江西 南昌 330001;

2. 智信能源科技有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘 要:针对人工风电巡检中存在效率低、劳动强度大的现状,设计开发一个基于虚拟现实(VR)技术的三维人机交互机器人系统。该 VR 移动机器人能为风电巡检者提供身临其境的远程呈现,并通过人手持控制器与移动机器人进行交互,通过头戴式显示器实时扫描和重建远程环境。对 VR 移动机器人进行系统设计,搭建 VR 移动机器人系统平台。该系统平台主要对机器人的头部、手臂和小车进行控制实验及测试。测试结果表明:基于 VR 技术的移动机器人系统设计合理,可为远程风电巡检提供沉浸式的体验和可行的远程巡检路径。

关键词:风电巡检;虚拟现实;沉浸式;移动机器人

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0222-07

Design of VR Mobile Robot System for Wind Power Inspection

WU Wenbao^{1,2}, ZHENG Sujuan¹, LUO Wei¹, HUANG Xiaohong^{1,2}, JIN Shengchao^{1,2}

(1. Jiangxi Electric Power Construction Co., Ltd., Nanchang 330001, China;

2. Zhixin Energy Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: A three-dimensional human-machine interactive robot system based on virtual reality (VR) technology is designed and developed to address low efficiency and high labor intensity in wind power inspection. The VR mobile robot can provide wind power inspectors with an immersive remote presentation, and interact with the mobile robot through a handheld controller. The remote environment is scanned and reconstructed in real-time through a headworn display. A system for VR mobile robots is designed and its platform is built. The system platform mainly conducts control experiments and tests on the robot's head, arms, and small car. The results show that the mobile robot system based on VR technology is reasonable and can provide an immersive experience and feasible remote inspection path for remote wind power inspection.

Keywords: wind power inspection; virtual reality; immersive; mobile robot

0 引言

遥控机器人是一种被送到远程位置执行任务的机器人。远程机器人操作的主要挑战之一是在远程环境中保持对机器人的高度态势感知以实现精确导航和操纵。因此,通常在远程机器人上安装一台摄像机以捕捉远程场景的图像。但使用 2D 视频或图片无法获取两个对象之间的距离信息,从而为本地用户提供全面的环境地图来导航远程机器人。不正确或不完整的空间信息可能会导致操作错误。所以提供有关远程站点的 3D 数据对于有效地操作远程机器人很重要。随着计算机技术的进步,虚拟现实(VR)已被用于增强远程机器人的操作。虚拟环境可以作为人类操作员和远程机器人之间的“媒介”,并提供对远程任务环

境的更好感知。如果环境地图或模型是预先构建的,则可以直接从中实现 VR 感知。然而,在未知环境中导航机器人无法获得预先构建的 3D 模型。如果没有事先的地图,跟踪和配准将变得困难,这往往限制了远程机器人的操作。近几年来,研究者们已经开发了实时定位和导航(SLAM)技术,用于在没有环境先验知识的情况下构建未知环境的地图并在地图中定位传感器。

目前研究表明,与桌面 VR 相比头戴式显示器(HMD)VR 提供了更高的空间存在感和沉浸感^[1]。曹力等^[2]使用平面辅助物将智能平板的交互范式引入到头戴式虚拟现实环境中,提出了一种触觉重定向方法,构建了一个高效的交互系统。左轩尘等^[3]开发了一种基于 ROS 现实的 VR 用户界面,通过操作者的人体姿态和语音对远程

基金项目:江西省 2021 年省级科技计划项目(第三批)资助项目

第一作者简介:吴文宝(1982—),男,江西南康人,高级工程师,本科,研究方向为新能源企业运营和全面管理,zhengsj@

iiimt.org.cn。

机械臂进行控制,操作者通过传感器反馈观看远程机械臂的状态及其周边的虚拟现实环境。陆怀谷等^[4]针对配电线路维护机器人远程显示和在线作业轨迹规划构建虚拟现实环境。为配电线路维护机器人完成带电作业任务提供了远程指导,具有直观、安全和高效的特点。DE PACE 等^[5]使用两个固定的 RGB-D 相机,使用点云捕捉并重建机器人模块,并将该系统称为 EVR(增强型 VR)。STOTKO 等^[6]在移动机械臂的末端执行器上安装了 RGB-D 相机,以探索和重建远程场景。曹蜜等^[7]比较了 ORB-SLAM 2 中 RANSAC 算法和采用 PROSAC 算法的性能,得出结论认为 ORB-SLAM 2 中 PROSAC 算法的运算效率比 RANSAC 算法更高。SLAM 技术也已应用于远程机器人操作,特别是固定机械臂执行抓取任务^[8-9]。黄伟等^[10]探讨 VR 在光伏电厂的应用。吴士华等^[11]在三维虚拟场景中增加可以人机交互式操作及巡视的三维设备模型辅助风电运维。胡建侠^[12]利用 VR 技术解决变电站人工巡检中的诸多弊端。卜江辉等^[13]对 VR 新技术构建风电机组综合实操平台、电动变桨实训平台等提出有效策略以提升设备维检效果。芦佳硕等^[14]基于 VR 技术设计了一款电力系统异常情况巡检系统,一定程度上提高了巡检的效率。柴旭等^[15]利用 VR、智能监控等手段帮助运维人员实现虚拟培养和行为监控。

尽管现有成果已经表明了远程操作中应用 SLAM 的好处,但在基于 VR 环境的远程移动机器

人巡检中,机器人对巡检现场环境精准建模是准确控制机器人进行巡检工作的前提。因此,本文首先设计一套符合人体生理特征的巡检机器人控制系统,以提升巡检者的操作感与提升控制精准度。选用 RGB-D 相机安装在机器人上面并且可跟随操作者进行肢体以及头部体感控制,降低巡检人员操作的技术难度,同时也提升了风电巡检环境重建的准确性。最后本文进行了基于 VR 环境的机器人头部、手臂和小车控制实验验证,以评估风电巡检环境重建的准确性,并对机器人云台控制精度、机械臂控制精度和小车控制速度等方面进行了实验验证。

1 VR 移动机器人系统设计

1.1 通信架构设计

图 1 为系统通信架构设计。由机器人端的 RGB-D 相机负责实时采集巡检画面,在 Jetson 主控制板通过程序端口 2 将采集到的视频推流至公网服务器,同时位于 VR 服务器端的 VR 软件实时拉取视频流内容,对巡检现场画面在 VR 显示器中进行重现,完成 VR 现场环境的重建任务。机器人控制指令输入端硬件也由 VR 显示头盔和 VR 控制手柄组成,将通过 VR 设备陀螺仪等传感器获取到的转动信息,经由姿态解算后通过公网服务器由 TCP 协议传输到 Jetson 主控板,主控板再驱动小车行进、控制摄像头转动以及机械臂的动作,完成对巡检现场机器人的控制作业。

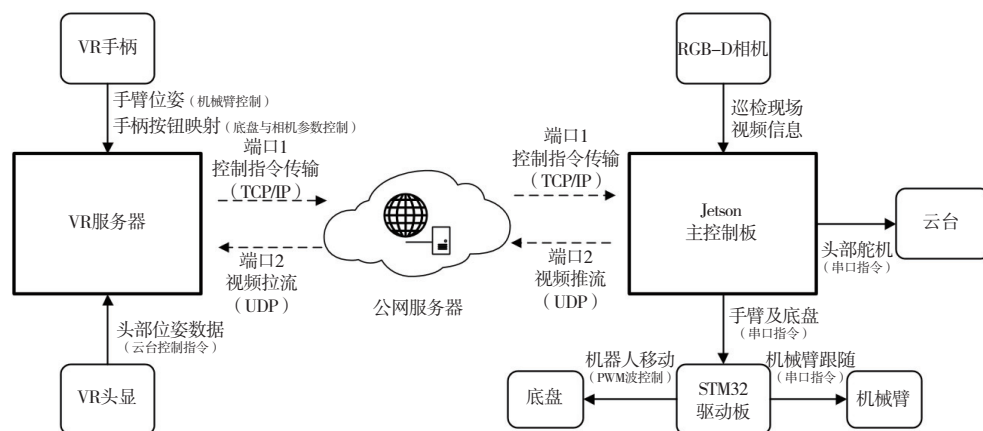


图1 系统框架图

机器人控制端主要有 Jetson AGX Xavier 主控板和 STM32F103C8T6 驱动板两部分组成。Jetson 主控板接收由端口 1 传输过来的控制指令并分割成 A 与 B 部分。A 部分对机器人云台

舵机控制,完成机器人头部跟随。在 Jetson AGX Xavier 主控板将 B 部分处理成串口数据,下发至 STM32F103C8T6 驱动板。STM32F103C8T6 驱动板将 B 部分命令分割成 B1、B2 两部分。B1 部

分通过串口命令方式直接控制机械臂及云台舵机旋转,模拟人体手臂手腕与手肘两个关节及手掌的动作,实现机械臂的跟随控制;B2部分命令转化为PWM波形式下发控制机器人底盘麦克纳姆轮小车运动,实现机器人的移动控制。机器人受控系统功能需求如图2所示。

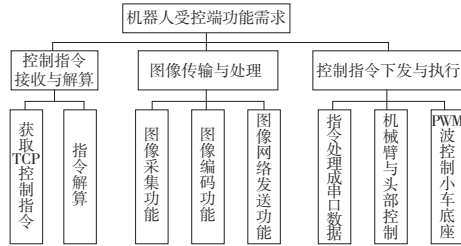


图2 机器人受控系统功能需求图

1.2 控制系统设计

巡检者对机器人控制作业时,通过头戴VR眼镜实时获取巡检者的头部位姿信息,并以此控制机器人云台相机旋转。VR头戴设备的陀螺仪检测到控制者头部偏移量,实时获取头部在 x 、 y 、 z 3个方向的移动位姿数据与旋转角,并控制机器人头部舵机旋转,实现头部摄像机跟随旋转以获得更大视场角,减小控制者的视角盲区;同理,带有陀螺仪的VR手柄检测人体手臂末端的偏移量,通过手持VR手柄产生移动和旋转动作,以此控制机器人手臂,实现机械臂运动轨迹跟随。该部分控制映射关系如图3、图4所示。

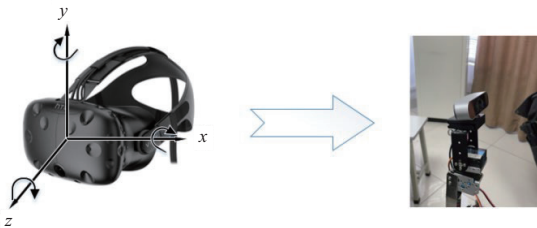


图3 头部控制映射

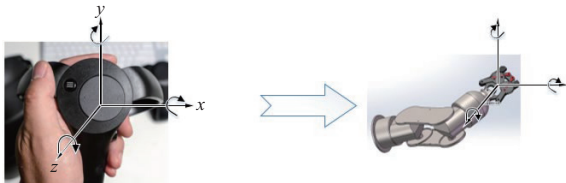


图4 手臂控制映射

下面依次实现巡检者对机器人的头部及手臂的控制。

首先是VR设备获取头部的位姿信息,VR眼

镜获取到的原始位姿信息是在笛卡儿坐标系下 x 、 y 、 z 3个方向的直线位姿以及角位姿,直线位姿依次记为 α_x 、 α_y 、 α_z ;角位姿数据记为 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 。由式(1)、式(2)计算出头部在 x 、 y 、 z 3个方向上的相对偏移量与转动角度。头部相对偏移量分别记为 $P_{os,headx}$ 、 $P_{os,heady}$ 、 $P_{os,headz}$,相对转动角记为 $R_{ot,headx}$ 、 $R_{ot,heady}$ 、 $R_{ot,headz}$ 。

$$P_{os} = \sum_{i=0}^k \frac{1}{2} \xi_1 \alpha n^2, \quad n = 0.02 \text{ s} \quad (1)$$

$$R_{ot} = \sum_{i=0}^k \frac{1}{2} \xi_2 \omega n^2, \quad n = 0.02 \text{ s} \quad (2)$$

式中:系数 ξ_1 、 ξ_2 根据设备实际表现值取得,用于降低设备获取偏移量出现的误差; n 为设备刷新周期,本文实验设备为50 Hz刷新率,即每0.02 s获取1次设备偏移位姿数据; k 为设备获取位姿信息次数,该数值会随工作时间而增加。最后将得到的操作人员头部相对偏移数据Pos值和相对转动角度Rot值作为命令控制巡检机器人头部跟随运动。

由VR设备获取手臂的位姿信息的获取机制同头部获取机制一致,通过VR手柄获取到的手臂末端位姿信息为左、右手在 x 、 y 、 z 3个方向的直线位姿与角位姿数据,记手臂末端运动的直线位姿信息为 β_{Rx} 、 β_{Ry} 、 β_{Rz} 、 β_{Lx} 、 β_{Ly} 、 β_{Lz} ,角位姿数据记为 v_{Rx} 、 v_{Ry} 、 v_{Rz} 、 v_{Lx} 、 v_{Ly} 、 v_{Lz} ,带入式(1)、式(2)计算出右手、左手在 x 、 y 、 z 3个方向上的相对偏移量和相对转动角度。

除了实现以上主要功能,其余主要辅助功能按键映射规则制定如下:获取手柄摇杆在 xy 平面上 $(-1,1)$ 的线性值,用于小车底盘移动旋转及速度指令控制;获取手柄按钮A键为bool值,A键按下时机械臂与头部位姿信息归0校准;获取手柄斜侧抓握键值为 $(0,1)$ 的线性值,用于控制机械臂末端的握爪与夹钳的放松到握紧的线性动作。防止指令过于冗余,导致丢包,对数据进行取整后打组传输,减小数据量。在VR服务器部分实现了所有原始数据的获取及处理后汇成一个指令数据,通过公网服务器传输至Jetson主控制板,在Jetson主控制板识别数据串中的分割标识代码分割出各部分控制指令,完成相对应部分的控制功能。

Jetson主控制板对上述过程分解出来的角度、位移与bool数值处理成各自的串口指令,分别下发控制对应舵机以及电机转动,为完成角度、位移与bool数值在Jetson板上转换成串口控制命令的处理,以实现硬件之间通信控制,需要确定接收

到的串口数据是否是正确的指令。只有符合设置的数据格式,驱动板才会执行对应的指令,否则认定该串口数据不是正确的指令格式,该指令无效且不执行。

2 相机与机器人标定

为了与远程移动机械手进行流畅、正确的交互,需要统一不同的坐标系,对人机交互的自然行为进行设计。首先,建立一个相机成像的原理(图5), O_1-uv 表示某个像素的坐标系、 O_2-xy 表示图像坐标系、 $O_C-x_Cy_Cz_C$ 表示相机的坐标系、 $O_W-x_Wy_Wz_W$ 表示世界坐标系。

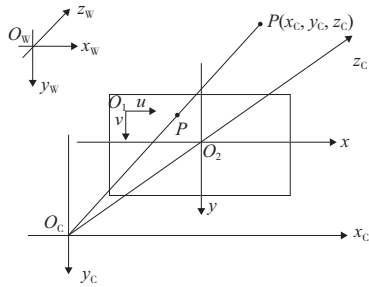


图5 相机成像原理

真实世界中某个点在像素坐标系和图像坐标系中的投影坐标 (u, v) 和 (x, y) 之间可以进行如下相互转换:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

相机坐标系中的任意点 $P(x_C, y_C, z_C)$ 与在图像坐标系中的对应点 $p(x, y)$ 之间可以进行如下变换。相机坐标系中点 $p(x, y)$ 通过参数 f 映射到图像坐标系中。

$$z_C \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 f 为相机镜头的焦距,即镜头到图像平面的距离。

世界坐标系中的某一点 (x_W, y_W, z_W) 与在图像坐标系中的点 (x_C, y_C, z_C) 之间可以进行如下变换:

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{R}$ 表示正交单位旋转矩阵; $\mathbf{T}$ 表示三维平移

向量。将式(3)、式(4)以及式(5)联合可以得出:

$$z_C \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 表示相机的内参; $\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示相机外参,二者的内积就是相机的投影矩阵。

为将操作者手掌运动空间与机械臂末端执行器运动空间二者之间实现空间对应,将现实中操作者通过 VR 设备获取到的位姿数据映射到巡检机器人运动的位姿数据。令操作者手掌运动空间为 M_W ,机械臂末端执行器的运动空间为 M_C , $M_{C'}$ 表示操作者手掌映射到机械臂末端执行器上的运动空间,在空间 M_W 和空间 M_C 中各取一点并分别表示为 P_W 和 P_C ,则我们可以将 P_W 和 P_C 之间的映射关系作出如下描述:

$$P_{W,t} = P_{W,t-1} + f(\Delta P_{C,t}) = P_{W,t-1} + \mathbf{K} \Delta P_{C,t} \quad (7)$$

式中: t 表示时间;矩阵 $\mathbf{K}$ 是两个空间之间的映射比例。对于两个空间中点,有

$$P_t = P_{t-1} + \Delta P_{t,t-1} = \begin{bmatrix} x_{t-1} + \Delta x_{t,t-1} \\ y_{t-1} + \Delta y_{t,t-1} \\ z_{t-1} + \Delta z_{t,t-1} \\ \phi_{t-1} + \Delta \phi_{t,t-1} \\ \theta_{t-1} + \Delta \theta_{t,t-1} \\ \varphi_{t-1} + \Delta \varphi_{t,t-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $P_t, P_{t-1}, \Delta P_{t,t-1}$ 分别表示点 P 在 t 时刻的位姿和在 $t-1$ 时刻的位姿以及从 $t-1$ 时刻到 t 时刻的位姿变化。根据矩阵 $\mathbf{K}$ 具体取值不同,空间 M_C 和空间 $M_{C'}$ 之间会有 $M_C > M_{C'}$ 、 $M_C < M_{C'}$ 以及 $M_C = M_{C'}$ 3 种情况。此外,由 HTC 所确定的操作者所处空间坐标系与由 Unity 所确定的机器人控制空间坐标系存在差异,在实际操作中发现二者的空间坐标系的 x 轴和 z 轴围绕 y 轴旋转了 180° ,由此本文将式(7)中的矩阵 $\mathbf{K}$ 定义如下:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -k_{xx'} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy'} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{zz'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{\phi\phi'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta\theta'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\varphi\varphi'} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $k_{xx'}$ 、 $k_{yy'}$ 、 $k_{zz'}$ 、 $k_{\phi\phi'}$ 、 $k_{\theta\theta'}$ 、 $k_{\varphi\varphi'}$ 分别为两个空间之间的映射比例在位置坐标 3 个坐标轴与姿态坐标 3 个坐标轴上的线性分量,且均为非负数。

最后,通过 HTC 套件中的头盔式显示器采集操作者头部的偏转角度,进行空间坐标映射以及姿态解算后生成机器人头部运动控制指令;同理,通过 VR 手柄采集操作者头部与手掌的相对位置,进行空间坐标映射以及逆运动解析后生成机器人手臂的运动控制指令,实现操作者与机器人之间行为级的自然动作交互。

3 实验验证

为了评估所设计的系统可行性和正确性,测量实际的变化量与代码计算的变化量评估系统性能,本文对面向风电巡检的 VR 机器人功能进行测试。实验分为机器人全向移动控制可行性和替身机器人人机交互性能两大部分。在机器人移动控制部分主要是对其前进、后退、水平横移以及在零转弯半径的情况下原地旋转等运动性能进行验证;此外,还进行了机器人人机交互性能测试,在该部分主要对机器人头部与机械臂控制功能上实现控制指令的延时验证。系统各部分配置如表 1 所示。

表 1 系统功能模块配置

系统部分	硬件环境	软件环境
VR 人机交互端	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz 2.90 GHz	Windows10、 unity3D、 steamVR、 steam
	机带 RAM: 32.0 GB	
	内存: WDC WDS500G2BOC -OOPXHO	
	显卡: NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER	
替身机器人	显示器: Generic Non - PnP Monitor	Ubuntu18.04.14LTS、 Python3.7
	VR 设备: HTC VIVE Pro	
数据传输	NVIDIA Jetson AGX Xavier	—
	华硕(ASUS)RT-ACRH17 千兆路由器	

实验 1: 机器人控制精度测试实验

1) 头部控制

本实验进行机器人头部跟随效果测试,本文对巡检机器人云台控制精度进行实际测试(图 6),测量舵机控制云台水平旋转角度与舵机控制云台垂直旋转角度,将其与输入期望角度比较,测得实际旋转角度与预想角度之间的误差。为体现测试结果的真实性,在头部舵机工作角度

范围内,由随机函数生成 20 组测试期望角度 ω_{i1} ,其控制水平旋转的角度为 $10^\circ \sim 260^\circ$ 之间,垂直旋转角度为 $45^\circ \sim 180^\circ$ 之间,并将此数值作为 VR 设备输入值。测试机器人实际转动角度值 ω_{i2} ,则 $\Delta = |\omega_{i1} - \omega_{i2}|$,产生的误差为 Δ ,得到误差精度曲线如图 6 所示。检测 VR 头盔位姿变化,将其和机器人位姿变化时间戳一起发送给 VR 主机,VR 主机接收后与当前时刻的时间戳比较得出机器人头部动作跟随的延迟。每秒采集一次控制指令的传输延迟,读取 20 次延迟数据,计算 VR 控制指令生成到控制指令到达云台的时间差,测得云台控制指令延时,延迟测试结果如图 7 所示。

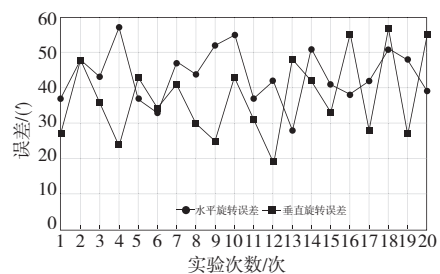


图 6 云台控制精度实验

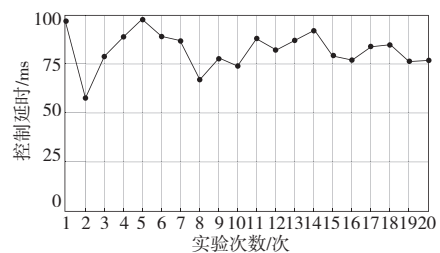


图 7 云台控制延时实验

通过以上精度和延时实验测试 20 次,结果如表 2 所示。从实验结果可计算得到云台的水平旋转平均误差、垂直旋转平均误差以及控制平均延时效果都达到预期。水平旋转平均误差为 $43.5'$,垂直旋转平均误差为 $37.3'$,这表示机器人头部视角能很好地跟随控制者视角转动。平均延时 82.15 ms ,操作者基本感受不到控制命令延时到达。

表 2 摄像云台控制测试

项目	结果
水平旋转平均误差/(°)	43.50
垂直旋转平均误差/(°)	37.30
云台控制平均延时/ms	82.15

2) 手臂控制

机械臂控制精度实验与上面实验类似,通过输入随机生成的测试角度值控制机械臂舵机转动

该角度值,再测量机械臂各舵机旋转实际角度,计算实际旋转角度与预想角度之间的误差 Δ_2 。每次控制1号舵机和2号舵机的角度为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间随机给定,3号和4号舵机为 $45^\circ \sim 180^\circ$ 之间随机给定。测量结果如图8所示。在VR主机读取到VR手柄的变化时刻后,将其与VR主机端接收到机械臂控制指令的时间相比较,每秒采集一个控制指令的传输延迟,读取20次延迟数据。

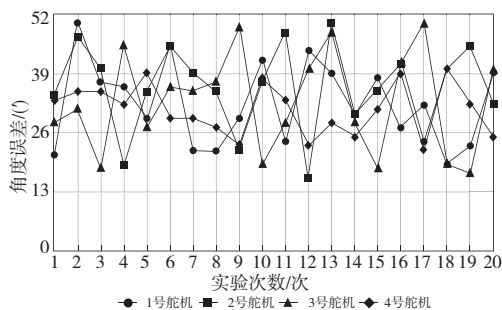


图8 机械臂控制精度实验

计算VR控制指令生成到控制指令到达机械臂的时间差,测得小车控制指令延时,测量结果如图9所示。通过机械臂控制精度和延时实验测试,从实验结果可看出机械臂各舵机的平均控制误差以及平均控制延时表现良好,结果如表3所示。

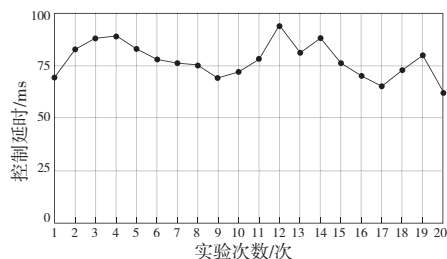


图9 机械臂控制延时实验

表3 机械臂控制测试结果

项目	结果
1号舵机控制平均误差/(°)	32.4
2号舵机控制平均误差/(°)	35.7
3号舵机控制平均误差/(°)	32.7
4号舵机控制平均误差/(°)	30.9
机械臂控制平均延时/ms	77.45

3) 小车行进控制

通过测量确定时间内小车的移动距离,可测得小车平移和前行的最高与最低速度,测量结果如图10所示。其中,前进和平移的最低速度过慢,为保证测量结果的准确性,相对延长了这两个方向的移动时间,分别为最低速度前进30s和最低速度平移60s。

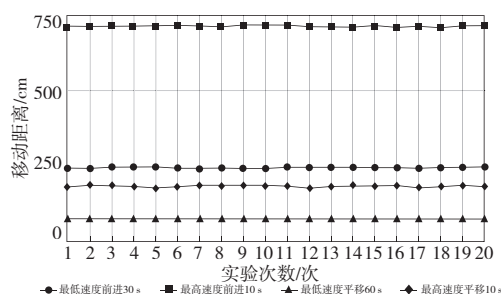


图10 小车行进速度实验

通过测量10s内小车的旋转角度,可测得小车的旋转速度,测量结果如图11所示。通过代码计算VR控制指令生成到控制指令到达小车的时间差,测得小车控制指令延时,测量结果如图12所示。

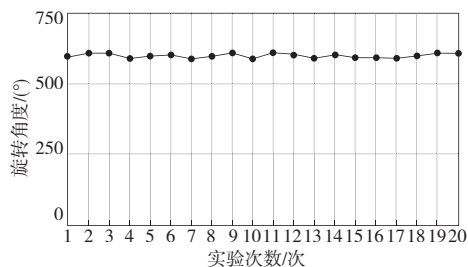


图11 小车旋转速度实验

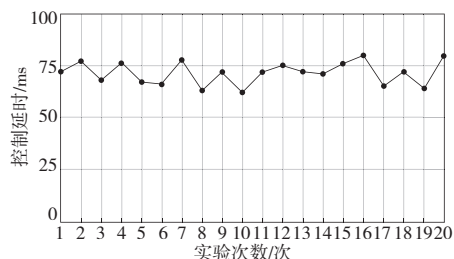


图12 小车控制延时实验

通过对小车行进速度、旋转速度和控制延时实验测试20次,从实验结果可计算得到小车的平均移动速度、平均旋转速度以及平均控制延时,如表4所示。

表4 小车控制测试

项目	结果
平移最低速度平均值/(cm/s)	1.22
平移最高速度平均值/(cm/s)	18.10
前进最低速度平均值/(cm/s)	8.11
前进最高速度平均值/(cm/s)	71.58
原地旋转速度平均值/(°/s)	59.99
小车控制延时平均值/ms	71.40

实验2:面向风电巡检的VR机器人全向移动实际测试

机器人全向移动功能是保证机器人灵活性与操作舒适性的重要保证,实验所使用是本文设计的可全向移动的麦克纳姆四轮移动机器人,通过控制4个车轮的差速实现机器人的全向移动,对机器人的移动控制实验如图13所示,其中图13(a)是VR机器人进行无转弯半径的原地转向实际效果,图13(b)则是VR机器人水平移动的实际效果。

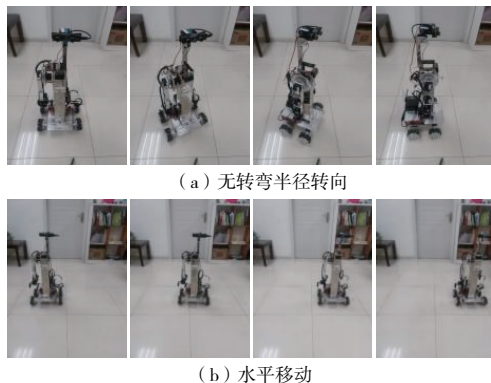


图13 VR机器人全向移动实验

由图13(a)可以看出,机器人左边两个车轮向后转动同时右边两个车轮以同样速度向前转动,可以实现机器人快速响应无转弯半径的原地逆时针转向功能。由图13(b)可以看出,机器人左边两个车轮以相反方向转动,同时右边两个车轮与左边两个车轮保持相反方向旋转,可以实现机器人水平直线移动。图13所进行的实验验证了基于麦克纳姆轮特殊运动学分析的机器人全向移动的可行性,这保证了机器人在复杂风电巡检环境中灵活自由移动的可能,使机器人作为操作者的替身也能满足灵活操作的可行性。

4 结语

本文设计开发了一个基于VR的移动机器人远程操作系统,帮助风电巡检者在远程未知环境中操作移动机器人。对VR机器人进行了功能性测试实验和机器人全向移动实验,结果表明:基于VR技术的移动机器人具有沉浸式自然人机交互难度低、沉浸感强和机器人操作流畅、交互自然等优点。系统的开发,使得风电巡检者可以在远程环境中自由导航,从不同视角、不同方向观察移动机器人,而不受机器人第一人称视觉的约束。提供VR视觉辅助,显示机械手末端执行器到目标的方向和距离,帮助用户更有效地操作机器人。基于三维沉浸式的VR机器人在远程未知环境中交

互操作中有着很好的应用前景。在本研究中,移动机械手没有配备传感器或编码器来校准或反馈电机旋转角度,未来可以做进一步的改进。

参考文献:

- [1] SHU Y, HUANG Y Z, CHANG S H, et al. Do virtual reality head-mounted displays make a difference a comparison of presence and self-efficacy between head-mounted displays and desktop computer-facilitated virtual environments[J]. *Virtual Reality*, 2019, 23(4): 437-446.
- [2] 曹力, 吴小威, 李琳. HMD-VR环境下基于平面辅助物的人机交互系统[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(5): 548-557.
- [3] 左轩尘, 韩亮亮, 庄杰, 等. 基于ROS的空间机器人人机交互系统设计[J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(12): 3370-3374.
- [4] 陆怀谷, 杨光, 李光彦, 等. 配电线路维护机器人虚拟现实仿真系统设计[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(1): 301-306.
- [5] DE PACE F, GORJUP G, BAI H D, et al. Leveraging enhanced virtual reality methods and environments for efficient, intuitive, and immersive teleoperation of robots[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China: IEEE, 2021: 12967-12973.
- [6] STOTKO P, KRUMPEN S, SCHWARZ M, et al. A VR system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019: 3630-3637.
- [7] 曹蜜, 胡凌燕, 熊彭文, 等. 基于PROSAC算法与ORB-SLAM2的RGB-D相机室内视觉定位研究[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(11): 1706-1712.
- [8] 姜旭东, 朱利丰, 宋爱国. 基于SLAM的虚拟现实六自由度输入系统研究[J]. *测控技术*, 2023, 42(4): 48-53.
- [9] 郭中远, 徐锋, 王贵洋, 等. 基于虚拟现实的移动机器人真实环境三维建模系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(2): 450-456.
- [10] 黄伟, 刘朝林, 师卫民, 等. 光伏电厂巡检效率优化及AR+VR技术辅助研究[J]. *电子元器件与信息技术*, 2025, 9(1): 26-29.
- [11] 吴士华, 庄勇, 王洪星. 浅析风力发电机组三维虚拟解剖式运维检修培训系统设计与开发[J]. *中国设备工程*, 2021(21): 18-21.
- [12] 胡建侠. 基于虚拟现实技术的变电站远程巡检方案及关键技术[J]. *城市轨道交通研究*, 2023, 26(10): 168-171.
- [13] 卜江辉, 肖水清. VR新技术在风电公司设备维检实训中的应用[J]. *智慧中国*, 2024(11): 84-85.
- [14] 芦佳硕, 王光华, 曹磊, 等. 基于VR技术的电力系统异常情况巡检系统设计[J]. *计算技术与自动化*, 2021, 40(1): 169-173.
- [15] 柴旭, 黎华, 李重阳, 等. VR仿真及智能监控系统在风电叶片运维行业中的应用[C]//第九届中国风电后市场交流合作大会论文集. 银川: [s. n.], 2022: 329-332.

收稿日期: 2023-08-31