

康复机器人系统数据通信技术应用现状

吴伟铭^{1,2,3}, 孟巧玲^{1,2,3}, 倪伟^{2,3}, 喻洪流^{1,2,3}

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海康复器械工程技术研究中心, 上海 200093;

3. 民政部神经功能信息与康复工程重点实验室, 上海 200093)

摘要: 为实现康复数据传输的及时性和数据使用的有效性, 确保康复机器人能够发挥智能化、个性化康复训练功能, 从康复机器人与其协同工作的人机交互系统之间采用的通信技术出发, 对康复机器人数据通信技术的发展现状在有线与无线两个方面进行分类综述。首先, 总结了现有康复机器人通信技术的基本特点与应用方式。其次, 基于准确性与实时性在通信方面的重要性, 阐述并分析了案例中通信技术应用的局限, 并结合现有技术提出解决方案。接着, 总结了有线与无线通信技术在康复机器人应用上的适用性与优缺点。最后, 基于现有技术与期望目标间的差距, 提出了改善康复机器人通信技术的解决方案。

关键词: 通信技术; 康复机器人; 有线通信技术; 无线通信技术

中图分类号: R 496 文献标志码: A

Application status of data communication technology in rehabilitation robot systems

WU Weiming^{1,2,3}, MENG Qiaoling^{1,2,3}, NI Wei^{2,3}, YU Hongliu^{1,2,3}

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai 200093, China; 3. Key Laboratory of Neural-functional Information and Rehabilitation Engineering of the Ministry of Civil Affairs, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to realize the timeliness of rehabilitation data transmission and the effectiveness of data use, and to ensure that the rehabilitation robot can perform intelligent and personalized rehabilitation training functions, from the perspective of the communication technologies used between rehabilitation robots and their cooperative human-computer interaction systems, the current development status of rehabilitation robot data communication technologies was categorized and reviewed from both wired and wireless aspects. Firstly, the basic features and application methods of existing communication technologies for rehabilitation robots were summarized. Secondly, based on the importance of accuracy and real-time in communication, the limitations of the communication technology application in the case were described and analyzed, and solutions were proposed in

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2007501); 上海市“科技创新行动计划”生物医药领域科技支撑项目(18441907300)

第一作者: 吴伟铭(1997-), 男, 硕士研究生。研究方向: 人机智能交互技术。E-mail: weiming_wu@aliyun.com

通信作者: 喻洪流(1966-), 男, 教授。研究方向: 人体仿生机械及智能控制、康复机器人、人机智能交互技术。E-mail: yhl98@hotmail.com

conjunction with existing technologies. Then, the applicability, advantages, and disadvantages of both wired and wireless communication technologies of the rehabilitation robot application were summarized. Finally, based on the gap between the existing technology and the desired goal, a solution was proposed to improve the communication technology of the rehabilitation robot.

Keywords: *communication technology; rehabilitation robot; wired communication technology; wireless communication technology*

康复机器人是以康复医学理论为基础，结合机器人技术进行康复训练和康复辅助的设备统称^[1]。功能障碍患者可以通过康复机器人的辅助训练与康复治疗重塑神经功能，改善功能状况，增强日常生活自理能力及社会交流能力等^[2]。除此之外，康复机器人还能代替治疗师工作，为患者提供重复性的康复训练。治疗师可通过上位机对康复机器人进行智能控制，并把实时记录的康复训练数据直观地进行可视化呈现。智能化的康复机器人已成为康复医院、社区、家庭等解决老年人康复医疗与助老助残的一大助力^[3]。

康复机器人数据通信一方面是下位机接收并解释来自上位机的控制指令，然后控制系统执行指令完成康复训练；另一方面，下位机将采集到的生物电信号、力或力矩等物理信号转换为康复训练数据传输给上位机进行记录，并对记录的数据进行有效处理^[4]，从而对康复训练方案实施的有效性、患者训练时的生理状态变化等进行评估。康复机器人数据的获取分为：数据采集、数据传输、数据的存储和调用。数据传输作为获取数据最为重要的步骤，对于存储与调用采集的数据起着承上启下的连接作用。

随着康复机器人使用频率和使用人数的增加，以及人机交互游戏与数据可视化呈现等功能的技术迭代加快，对康复机器人数据管理的要求也逐步提升。其中，最为关键的是保证数据传输的可靠性与实时性^[5]，这对于数据后续管理、康复机器人控制方式选择等有着较为重要的影响。本文将对目前的康复机器人数据通信技术进行综述，对不同的数据通信方式进行探讨，以促进康复机器人人机交互体验，为康复机器人提供切实有效的设计研究依据。

1 康复机器人数据通信技术的分类

结合康复机器人人机交互系统具有的信息反

馈与引导人主动参与信息交互的特点，患者或康复治疗师需及时地将控制信息通过人机交互系统传递给康复机器人。康复机器人在接收控制信息之后将机器人信息、运动学、动力学等信号转换为训练信息、训练数据等直观内容，通过人机交互系统反馈给医生或治疗师，这些信息的反馈有助于对康复治疗作出更有效的调整与规划。这一过程中人机交互系统与康复机器人之间的信息反馈主要通过数据通信技术来实现，本文将数据通信技术分为有线通信(串口通信、USB 通信)和无线通信(蓝牙通信、ZigBee 通信、Wi-Fi 通信)。各通信方式的特点如表 1 所示。

2 有线通信技术

2.1 串口通信技术

串口通信(serial communication)指通过数据信号线、控制线和地线等在计算机和外设间进行按位传输数据的通信方式。这种通信方式传输接线数少，成本低，开发扩展性好，操作简单，成为康复机器人常用的通信技术之一。串口通信在康复机器人领域的应用可分为 3 个部分：康复机器人电机驱动；康复机器人的虚拟现实交互；康复机器人控制指令的发送与训练数据接收。

2.1.1 康复机器人电机驱动

电机驱动是控制康复机器人机械臂进行康复训练的核心，主要通过上位机与康复机器人控制系统之间建立串口通信，将控制指令传输至电机驱动器完成机械臂的控制。串口通信的实现需进行串行接口电路的设计。设计好的串行接口电路会将接收自 CPU(central processing unit)的并行数据字符转换为连续的串行数据流进行发送，同时将接收的串行数据流转换为并行的数据字符供给 CPU 器件，通常会选择使用 STM32 单片机等进行串行接口电路的设计。刘修泉等^[6]设计的上肢康

表 1 康复机器人通信技术类型特点

Tab.1 Characteristics of different types of rehabilitation robot communication technology

通信技术类型	通信技术	分类	优点	缺点	康复应用场景	应用方式	准确性与实时性
有线通信	串口通信	同步通信	传输接线数少,传输距离较长,使用成本低,开发扩展性好,操作简单	数据收发速率约定好不易修改,传输效率受数据量与磁场等干扰,有线连接繁琐不便	上肢康复机器人 ^[6] , 脚踏式下肢康复机器人 ^[7] , 腰部顶推牵引治疗装置 ^[8]	上下位机通信进行电机控制,虚拟现实数据交互,控制指令发送与训练数据接收	读取的实时性与准确性与后台软件从串口缓冲区读取的时间有关 ^[9]
		异步通信					
	USB通信	批量传输 同步传输 中断传输 控制传输	可靠性高,传输速度快,可扩展性强	采用线缆方式连接,抗干扰能力弱,通信过程不稳定,传输距离受数据线长短影响	柔性外骨骼行走增力装置 ^[10] , 上下肢康复机器人 ^[11] , 康复机器人语音控制 ^[12]	控制继电器通断,采集传感器数据,康复机器人数据传输,传输语音数据,控制康复机器人训练	准确性与实时性高,但因采用线缆连接,受传输线缆长度影响且操作不便
无线通信	蓝牙通信	经典蓝牙	功耗低,成本低,使用方便,体积小,集成方便,无线传输	低版本蓝牙传输距离有限,传输速度受距离影响,墙壁等障碍物的信号反射会产生相互干扰	拇指功能康复机器人 ^[13] , 下肢主动康复训练系统 ^[14] , 上肢腕关节功能训练 ^[15]	康复指令发送与数据采集,采集姿态信息与虚拟场景匹配,采集sEMG信号驱动虚拟环境目标物	数据传输准确性与实时性受通信距离影响,通信距离越长准确性与实时性越差
		低功耗蓝牙 双模蓝牙					
	ZigBee通信	星型 树型 网状网型	组网方便,低功耗,无线传输,复杂度低,误报率低,可扩展性强	受电磁干扰,受墙体等障碍物影响大,数据传输速率低,传输距离受ZigBee网关节点部署位置影响	上肢康复机器人 ^[16] , 家庭生理康复生理监测 ^[17] , 上肢家庭康复训练系统 ^[18]	采集姿态数据并传输,监测患者的生命体征,采集传感器数据用于人机交互	数据传输速率低,实时性低,ZigBee网络丢包率受网络负载影响大
	Wi-Fi通信	HTTP通信 TCP/IP通信 UDP通信	覆盖范围广,传输速度快,无线传输	功耗大,数据安全性低,传输质量易受同频的无线设备的干扰和屏蔽而降低	远程康复机器人系统 ^[19] , 下肢外骨骼机器人 ^[20] , 运动损伤康复机器人 ^[21]	控制指令传输与数据采集,视频语音数据传输,传感器阵列数据上传,自定义通信协议进行数据传输	实时性与网络状态有关,准确性与网络协议选择有关,TCP准确性高,UDP实时性好

复机器人采用串口通信的方式，从 PC 端将数据传输给 STM32 控制器进行电机控制，从而带动机械臂进行运动。但由于计算机的处理速度高于调制解调器的发送速度，这导致调制解调器的数据会被很快读取，此时，串口电路模块会向计算机发送中断信息。同时，STM32 串口电路缓存数据容量小的特点，会增快中断信息的发送频率，降低计算机的数据处理效率，导致延迟的增加，不利于数据的高速传输与电机驱动的控制。朱玉成等^[22]、张旭等^[23]、张继国^[24]都提出利用 FPGA(field programmable gate array)功耗较低、容量较大、设计灵活性较高等特点进行串口通信电路的设计。FPGA 在采样速度、时序控制等性能上都优于 STM32 串口电路，可以为高速信息传输提供较快的计算能力，实现与计算机之间的高速串口通信，也可以为高速信息传输提供较快的计算能力，实现与计算机之间的高速串口通信^[25]。

2.1.2 康复机器人的虚拟现实交互

虚拟现实交互可减少康复训练中的枯燥乏味，提高患者康复训练的积极性。串口通信可实现虚拟现实游戏与康复机器人之间的交互。河北工业大学设计的下肢康复机器人采用串口通信与基于 MFC(microsoft foundation classes)设计的虚拟

现实康复系统进行交互，实行虚拟现实康复训练系统与康复机器人之间的控制指令传输与数据交互^[7]。虚拟现实交互对于数据的实时性反馈有着较高的要求，串口通信的传输速率主要受波特率和帧格式两种参数的影响，常用 RS-232，RS485 等串行接口传输，但传输时波特率一旦约定好就不易修改。而随着虚拟现实交互的更新升级，版本更新前约定的波特率无法满足更新之后虚拟现实交互数据量增大的传输需求。对此，孙夫文等^[26]提出一种基于 FPGA 的串行通信速率自动检测、自动设置的模块，采用该设计，通信主机可发出重置通信速率的命令，此时，通信从机会开启通信速率自测试与自设置功能，重新设定新的速率与主机建立通信链路。

2.1.3 康复机器人控制指令的发送与训练数据接收

华中科技大学设计的上肢康复机器人通过 RS232 串口与下位机工控系统建立连接，实时将指令发送给上肢康复机器人进行反馈控制，同时将采集的训练数据在 Windows 交互界面上实现动态曲线绘制^[27]。严泽宇等^[8]通过在腰部推顶牵引治疗装置中开发基于 PyQt 平台的上位机，通过 RS485 串口建立上位机与主控板的通信，用于发送控制指令执行康复治疗方案，同时采集数据进

行康复效果分析。随着当前无线通信技术的兴起,串口有线传输受场地制约的缺点被放大。针对这一缺陷,杨怡婷等^[28]提出 UART(universal asynchronous receiver/transmitter)与射频模块(radio frequency)之间的数据通信,将 ZigBee 技术嵌入无线射频模块中,实现串口的无线数据传输,消除了串口通信有线传输的制约。

2.2 USB 通信技术

USB(universal serial bus)作为外部总线标准,用于规范电脑与外部设备的连接和通信。USB 虽然也是用串行方式进行通信,但在通信时序和信号电平上和串口完全不同,在使用上相比串口传输速度更快,支持设备的即插即拔与热插拔,功能应用范围更广。USB 通信在康复机器人上的应用可分为:康复机器人与人机交互设备通信;数据转换接口。

2.2.1 康复机器人与人机交互设备通信

USB 接口在众多硬件设备上都有,因此,康复机器人在设计时也会选用 USB 接口作为数据传输的通用接口。山东大学设计的踝关节行走增力装置可通过上位机与电路板中自带的 USB 接口进行通信,实现继电器的通断控制,以及气体压力传感器数据的采集与记录^[10]。谷士鹏等^[11]设计的上下肢康复训练机器人采用 USB 2.0 接口与 PC 机通信,开发时调用封装好的函数实现传输数据的读写^[29]。但直接通过 USB 将康复机器人上下位机进行连接限制了机器人的灵活性,特别是上位机采用 PC 端设计时不利于康复机器人的多场景应用。孙恒等^[30]借助 USB 转 NRF24L01 模块将上位机发送的指令通过无线传输至以单片机为核心单元设计的下位机系统,这样很好地解决了 USB 有线传输的限制,使 USB 有线通信与无线通信有机地结合起来。

2.2.2 数据转换接口

由于串口通信使用的串行通信接口大多为 COM 口,在物理接口上多用于工控设备,对于设备接口有特殊要求,而此类接口的设备可以采用 USB 作为转换接口的形式进行数据传输。大连海事大学采用 RS485-USB 转换器实现 3 个编码器与计算机的串行通信,通过 USB 转换器连接计算机后与虚拟应用场景进行交互,实现被动式上肢康复机器人数据的接收和处理^[31]。李少坤等^[12]通过 RS232 串口转 USB 接入语音识别模块作为独立的

子系统,与康复机器人控制系统软件进行通信,通过语音识别控制系统进行数据交换,从而执行相应的康复运动。东南大学采用 USB 转串口芯片 PL2303 解决 PC 机没有串行接口进行通信的问题,通过转换之后的 USB 接口与 PC 端监护软件通信进行生理数据的监测^[32]。

USB 虽然可作为统一接口与康复机器人进行通信,但转换之后还是以有线方式进行传输。虽然传输速度较快,但 USB 的抗干扰能力弱^[33],通信过程不稳定,传输距离与稳定性受 USB 数据线长短与外界干扰影响较大,限制了其应用场合。牟奎霖^[34]提出基于 NS1021 延长器收发芯片的增强型 USB 传输方案,弥补了标准 USB 接口传输距离近和抗干扰性差的不足,同时也扩展了 USB 接口的使用范围。马萍^[35]以 USB 总线接口实现 CAN 总线控制的多个主节点同计算机进行通信,该设计使 USB 传输具有较强的稳定性、可靠性和实时性,且抗干扰能力较强。

综上,有线通信技术更多地用于康复机器人与 PC 端进行通信的情况,一般利用 PC 端作为人机交互平台的康复机器人都具有康复场所固定、康复机器人训练时不可移动的特点,对于不考虑通信灵活性的设备可选择使用有线通信。尽管有线通信在数据传输上较为稳定,但使得康复机器人不具备灵活性与便携性。同时通信线缆的连接在物理空间上容易受到不确定外力的破坏导致通信中断。为确保在康复机器人使用过程中不被破坏与干扰,设计中需要重点考虑康复机器人通信线缆位置的布置与保护。

3 无线通信技术

3.1 蓝牙通信技术

蓝牙通信技术是一种短距离无线通信技术,它可为固定的或移动的设备建立一种特殊的近距离无线通信环境^[36]。蓝牙通信主要利用一个蓝牙设备搜索到另一个具有蓝牙功能的设备,迅速建立起两个设备之间的联系,在控制软件的操作下,实现数据传输^[37]。蓝牙通信在康复机器人上的应用可分为:康复机器人控制指令的发送与训练数据接收;康复机器人的虚拟现实交互。

3.1.1 康复机器人控制指令的发送与训练数据接收

蓝牙作为移动设备间的一种小范围无线连接技术,可为康复机器人与其共同工作的人机交互

设备之间进行控制指令的发送和训练数据的接收提供方便快捷、低成本、低功耗的数据传输。重庆大学通过 Android 上位机与设计好的三自由度上肢康复机器人的蓝牙设备连接实现康复训练参数的发送^[38]。哈尔滨工业大学采用 HC-06 从机蓝牙模块将 Android 平板电脑与拇指功能康复机器人间建立通信连接，发送指令进行机器人控制与训练参数设定，同时采集相关数据进行可视化显示并保存^[13]。胡杰^[39]通过多模态下肢康复训练轮椅上外接蓝牙从机模块与平板电脑蓝牙模块建立主从机蓝牙通信，实现压力传输与虚拟现实游戏交互训练。

当前康复机器人采用的蓝牙无线通信技术大多是基于蓝牙 4.0 及以下版本进行开发的，虽然具有功耗和成本低的优点，但通信距离短的缺点，导致康复机器人与上位机通信时存在距离间隔越大数据传输的准确性和实时性越差的问题。而第五代蓝牙的出现，将通信速度提高了一倍。通信速度的提高减少了通信所需时间与蓝牙使用的功耗，同时，相较于蓝牙 4.2 版本，数据承载量提高了 8 倍，通信距离也提高了 4 倍^[40]。此外，蓝牙 5.0 后加入了 Mesh 技术可以实现蓝牙设备“多对多”的连接通信^[41]。

3.1.2 康复机器人的虚拟现实交互

蓝牙通信用于虚拟现实交互是当前最为常见的方式，通常会使用蓝牙手柄、键盘等设备进行虚拟现实游戏的操控，对于康复机器人中的虚拟现实交互也可以通过蓝牙通信进行。李文肖等^[14]设计的下肢主动康复训练系统通过 Unity 3D 软件平台开发人机互动游戏^[42]，将采集到的传感器姿态信息通过蓝牙通信与虚拟康复场景匹配完成训练，同时实现康复效果的评估。王洪等^[15]针对上肢腕关节功能训练，将表面肌电信号(sEMG)处理技术与虚拟现实技术结合，将采集的 sEMG 信号以蓝牙通信的方式传输到上位机，用于驱动虚拟训练环境中目标物的运动。

虚拟现实交互需保证数据传输的准确性与实时性，故在蓝牙通信设计时应避免使用低功耗蓝牙(BLE)。低功耗蓝牙虽然在使用上保证了低功耗，但是限制了数据的传输量，当数据量较大时就会出现数据包丢失的现象，不利于虚拟现实交互的进行。

3.2 ZigBee 通信技术

ZigBee 技术是一种近距离、低复杂度、低功耗、低速率、低成本的双向无线通信技术，它的最大特点是可自组网^[43]。一个 ZigBee 协调器可对应上万个 ZigBee 终端，在通信范围内，ZigBee 可通过动态路由的方式选择数据传输路径。当一条路径因为网络堵塞或建筑物阻挡等原因导致数据传输被中断，动态路由结合 ZigBee 的网状网拓扑结构则可以重新选择另一条路径直至数据传输完成^[44]。ZigBee 通信在康复机器人的应用可分为：监测康复机器人使用状态；家庭康复通信网络的构建。

3.2.1 监测康复机器人使用状态

ZigBee 可在一定的监测区域内部署节点网络通信，构成监测网络，监测康复机器人康复训练时人体与机器人的状态。Braidot 等^[45]开发了一个名为 ZIMUED 的便携式传感器系统用于上肢康复机器人，通过 ZigBee 终端设备将采集的人体数据传输到 ZigBee 协调器上。蒋兴松^[16]通过 ZigBee 终端节点将肢体康复监测系统采集的病人姿态、关节活动度等数据传输给 ZigBee 协调器，再以串口连接 PC 将数据传输到 PC 端软件上，由 PC 端软件进行数据处理。

3.2.2 家庭康复通信网络的构建

ZigBee 通信若用在康复机器人上会受限于 ZigBee 协调器的放置位置，且 ZigBee 数据传输需要以上位机作为中转，限制了机器人使用的范围。张毅等^[46]通过设计 ZigBee-Wi-Fi 无线网关解决了不需要有专门与 ZigBee 协调器相连的上位机进行数据的中转，这样的设计对于协调器的放置位置不受限，在数据传输上更加灵活方便。另外，可忽视墙体等障碍物对于数据传输的干扰。

数据传输可靠性高的特点可应用于远程监控家庭、医院等室内康复机器人的使用、患者康复生理状态等情况^[47]。Chen 等^[17]通过 ZigBee 模块构建家庭康复生理监测系统用于监测患者的生命体征，ZigBee 终端将监测对象的穿戴设备所采集的数据传输至 ZigBee 协调器上，实现对监测对象的跌倒和生理监测。李尧^[18]针对中风病人设计了上肢家庭康复训练系统，通过 ZigBee 无线发送模块将采集到的数据发送到 PC 端设备的外接 ZigBee 协调器上，PC 端通过串口连接读取 ZigBee 协调器上的数据用于人机交互和游戏驱动。

3.2.2 家庭康复通信网络的构建

ZigBee 用于家庭康复通信网络构建时，由于 ZigBee 通信频段与 Wi-Fi 相同，这种情况下 ZigBee 通信易受干扰。曾鹏等^[48]针对无线局域网(WLAN)

在同一区域共存将造成 ZigBee 网络性能显著下降的问题，提出了多信道干扰避免策略。通过应用多信道通信的方法提高 ZigBee 通信时信道切换的成功率，增强了 ZigBee 通信在 WLAN 干扰下的可靠传输。

3.3 Wi-Fi 通信技术

Internet 作为当今全球信息交互最活跃的领域，在利用计算机进行收集连接时，家居、医疗健康、教育、金融等领域的电子装备也逐步融入互联网技术，这有利于装备之间经由互联网进行资源共享^[49]。基于 Wi-Fi 通信可以实现数据在局域网或者无线网之间的传输，最底层的 IP 协议与上一层的 TCP(transmission control protocol) 协议或 UDP(user datagram protocol) 协议的组合可实现网络层与应用层之间通过接口进行数据流传输，从而进行数据交互。TCP 是一种面向连接的、可靠的通信协议，适合通信质量要求较高的场景的应用，例如 http 传输、文件传输、smtp 等，目前大部分的传输都是基于 TCP 协议进行的。UDP 通信则提供了无连接的、实时性好的数据报服务，适合对网络通信质量要求不高，但速度要求尽量快、更实时的情况，例如语音、视频等。本文 Wi-Fi 通信在康复机器人上的应用介绍包括：康复训练时视频语音等数据交互；康复机器人控制指令传输与数据采集。

3.3.1 康复训练时视频语音等数据交互

随着远程医疗概念的提出，远程康复系统可为康复患者提供线上与康复医师面对面的康复诊疗，成为康复机器人系统研究领域的一大热门，通过 UDP 数据传输过程中延迟小、数据传输效率高的特点可进行远程视频康复诊疗的应用。王楠^[19]设计的基于物联网的远程康复训练机器人系统一方面将控制指令通过 TCP 传输发送至康复机器人设备，另一方面，视频语音数据采集使用 UDP 协议进行传输，保证虚拟现实游戏交互的体验。Tamez-duque 等^[20]设计了实时压力皮带传感器系统，用于监测 Rehab Rex 下肢动力外骨骼使用时的压力，将采集的传感器阵列数据通过 UDP 通信传送至 GUI 软件处理并显示。

UDP 通信虽然相较于 TCP 在传输数据前不需要建立连接，但是在数据传输上受连接的主机在线情况、网络拥挤、阻塞等影响，数据传输可能会丢失，且无法监测数据传输的状态，是一种可靠

性不高的数据传输方式^[50]。Google 提出的 QUIC(quick udp internet connections)^[51] 协议是一种基于 UDP 并且融合了众多其他协议优点的新型多路复用和安全传输协议。它具备连接建立迅速的优点，解决了队头阻塞、重传模糊等问题，保证了网络切换时业务的连续性。

3.3.2 康复机器人控制指令传输与数据采集

TCP 通信在数据传输上可靠性较强，对于控制指令这类需要可靠传输的数据通信较为适用。贺玲玲^[21]借助 TCP/IP 协议具备的跨网络通信的特点，提出了基于运动损伤康复机器人的康复关节多数据交互协议(RJMIP)，用以满足康复机器人对运动时角度的数据传输误差要求与多关节多数据交换需求。沈丽云等^[52]基于 Android 平台与 Wi-Fi 转换器设计了上肢康复医疗机器人，通过 Wi-Fi 无线通信实现对康复医疗机器人本体肩关节、肘关节三自由度的驱动，同时将数据实时反馈至 Android 客户端。

TCP 通信前需要建立连接，且需时时监听连接是否正常，存在传输时队头阻塞、网络切换导致连接中断等问题，使得移动端的传输效率低、延迟高^[53]。袁凯等^[54]提出了一种联合应用层纠错、检错和重发机制的 UDP 传输方案，在提供低时延传输服务的同时也能保障报文的可靠性，该方案针对 TCP 不能保障实时性以及 UDP 不能保障可靠性的问题提出了解决方案。

综上，康复机器人无线通信技术的使用根据不同的应用场景不尽相同，蓝牙通信技术适用于便携式设备与康复机器人近距离的无线数据传输；ZigBee 通信技术则适用于构建家庭等室内康复无线通信网络；Wi-Fi 通信技术适用于远程康复与数据传输量较大的无线通信。虽然无线通信技术的可移动性和不受传输线缆限制的特点，为康复机器人的使用带来了极大的方便，但其对信号及通信双方网络连接状态的要求较高，通信过程中若出现信号抖动、连接中断等情况，均会对机器人控制、训练数据接收、虚拟现实交互体验等产生不同程度的影响。因此，在保证通信实时性的同时，如何确保连接的可靠性，需要进一步的研究。

4 对未来康复机器人通信技术研究的几点启示

作为用于康复机器人控制、数据获取、交互

的通信技术,在设计时应当遵循“以人为本”的设计思想,从患者、康复治疗师的角度出发,结合康复机器人使用特点,选择适合康复机器人的通信技术,在确保数据传输的可靠性与实时性的前提下,提高康复机器人人机交互体验。从现有技术与期望目标之间的差距,对康复机器人通信技术在功能实现、通信技术缺陷与改进办法上进行了总结,在未来的康复机器人通信设计开发上可以参考以下几个方面的策略。

a. 复合通信策略。

单一的通信技术不能满足复杂的人机交互功能的实现,通过在康复机器人设计过程中结合多种通信技术的使用,可以满足多功能多需求的人机交互。如 ZigBee 具有的多节点接入的优势结合 Wi-Fi 远程通信的优点可以满足患者居家康复与康复医师远程指导康复训练的结合,实现康复方式更便捷化的目标。

b. 便携式设备无线通信。

随着手机、平板电脑、智能手环等便携式智能通信设备的兴起,康复物联网朝着轻型化、智能化的方向发展。基于智能手环与智能手机等小型化智能设备可结合自身功能在通信技术上选择 NFC 无线通信、5G 通信等, NFC 近场通信具有的连接速度、传输速度快,功耗低等优点,可通过移动设备存储的身份信息为康复机器人的使用提供身份确认康复训练数据存储,以确保康复机器人使用的安全保障与数据传输。5G 通信高速率、低延迟的优点可提供时时刻刻的远程指导训练。

c. 高速安全通信。

随着大数据、物联网、康复医疗等行业的蓬勃发展,未来对于康复训练数据的传输、读取、上传、下载等功能在保证准确性与可靠性的同时,对于传输的安全性有着更高的要求,未来在设计康复机器人人机交互系统时,对于通信数据的加密、校验、存储等都应按照法律法规加入相应的安全防范措施。

参考文献:

- [1] 周媛,王宁华. 康复机器人概述 [J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30(4): 400–403.
- [2] 励建安. 人机共融,天人合一——关于康复机器人应用与发展的思考 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(8): 897–899.
- [3] 喻洪流. 康复机器人: 未来十大远景展望 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(8): 900–902.
- [4] 李慧,陈颖伟,喻洪流,等. 下肢外骨骼康复机器人运动感知系统的研究进展 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2021, 43(1): 82–86.
- [5] 胡永利,孙艳丰,尹宝才. 物联网信息感知与交互技术 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(06): 1147–1163.
- [6] 刘修泉,马研,宋爱国. 基于物联网远程控制的上肢康复机器人系统研究 [J]. *高技术通讯*, 2015, 25(1): 82–88.
- [7] 王秀丹. 脚踏式下肢康复机器人虚拟场景建立与交互实现研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [8] 严泽宇,喻洪流. 腰部推顶牵引治疗装置控制系统研究 [J]. *软件导刊*, 2021, 20(3): 182–188.
- [9] 王卫峰,姚正治,刘金刚. 基于定时器控制的串口通信软件研究 [J]. *微计算机信息*, 2008, 24(1): 254–255, 303.
- [10] 谷雨潼. 踝关节行走增力装置的研制与性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [11] 谷士鹏,宋爱国. 基于单片机的上下肢康复训练机器人 [J]. *南京信息工程大学学报*, 2011, 3(5): 408–413.
- [12] 李少坤,江先志,王增怀. 康复机器人的语音控制及实现 [J]. *信息通信*, 2012(1): 260–261.
- [13] 牟洋. 拇指功能康复的外骨骼机器人研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [14] 李文肖,郭冰菁,韩建海,等. 基于虚拟现实的下肢主动康复训练系统 [J]. *现代电子技术*, 2019, 42(4): 61–64, 70.
- [15] 王洪,赵翠莲,范志坚,等. Android 平台上肌电虚拟训练系统设计与实现 [J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(7): 1966–1970, 1980.
- [16] 蒋兴松. 基于无线传感器网络的肢体康复监测系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [17] CHEN S K, KAO T, CHAN C T, et al. A reliable transmission protocol for ZigBee-based wireless patient monitoring [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2012, 16(1): 6–16.
- [18] 李尧. 中风病人上肢家庭康复训练系统设计与实现 [D]. 青岛: 青岛大学, 2014.
- [19] 王楠. 基于物联网的远程康复训练机器人系统 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [20] TAMEZ-DUQUE J, COBIAN-UGALDE R, KILICARSLAN A, et al. Real-time strap pressure sensor system for powered exoskeletons [J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 4550–4563.
- [21] 贺玲玲. 基于康复机器人的多数据融合管理系统的研究 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2020.
- [22] 朱玉成,董文学. 基于 FPGA 的串口通信电路设计与实现 [J]. *通讯世界*, 2018(3): 35–36.
- [23] 张旭,彭月祥. FPGA 芯片的抗强电磁干扰串口控制器设计 [J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2021, 21(4): 56–60.
- [24] 张继国. 一种利用 FPGA 实现串口通信的设计 [J]. *电子世界*, 2020(12): 124–125.

- [25] CHEN Z, QIN Z T. Design and implemented motion control system based on FPGA[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(12): 42–47.
- [26] 孙夫文, 郑采君, 刘昕卓, 等. 基于 FPGA 串口波特率自适应功能的设计与实现 [J]. *电子设计工程*, 2019, 27(9): 69–73.
- [27] 王砚秋. 基于串口通信的人机交互系统的设计与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [28] 杨怡婷, 欧阳名三. 基于 ZigBee 技术的无线串口通信系统的实现 [J]. *企业技术开发*, 2018, 37(12): 52–54.
- [29] WANG Y J, SONG A G. Software design of a force-feedback virtual driving tele-rehabilitation system[J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2010, 14(35): 6479–6482.
- [30] 孙恒, 谷君豪, 罗红梅, 等. 无线遥控小车的设计与实现 [J]. *汽车实用技术*, 2020, 44(15): 25–28.
- [31] 秦江伟. 被动式上肢康复机器人虚拟现实控制系统开发 [D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [32] 李晓鹏. 面向老人康复训练的远程多生理参数监护系统 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [33] 马敬东, 陈明方. 基于 USB 串口通信数据采集技术的实施 [J]. *仪表技术与传感器*, 2007(2): 68–69, 75.
- [34] 牟奎霖. 一种增强 USB 2.0 延长传输方案和应用实例 [J]. *电子产品世界*, 2020, 27(10): 63–64, 69.
- [35] 马萍. 电力 USB 和 CAN 总线监控数据采集系统技术研究 [J]. *电力系统装备*, 2019(4): 38–39.
- [36] 朱昭华. 浅析蓝牙技术 [J]. *电声技术*, 2018, 42(4): 70–72.
- [37] 林满山. 浅谈蓝牙技术的发展现状和前景 [J]. *黑龙江科技信息*, 2016(14): 165.
- [38] 关鑫. 三自由度上肢康复辅助训练装置设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [39] 胡杰. 多模态下肢康复训练轮椅控制系统研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2017.
- [40] 倪俊杰, 刘宗凡, 邱元阳, 等. 蓝牙: 我们可以这样用 [J]. *中国信息技术教育*, 2021(3): 68–74.
- [41] 黄东香, 孙华. 为物联网而来的蓝牙 5.0[J]. *西部皮革*, 2018, 40(22): 39.
- [42] YANG Z, ZHU Q Q, AI Z Y, et al. Optimization design of lumped parameter band-pass filter based on ADS[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2014(14): 147–149.
- [43] 刘震. 基于 MEMS 传感器与 ZigBee 网络的人体手臂运动状态测量和识别方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [44] 陆鹏, 葛嵩韬, 吴响, 等. 基于 ZigBee 的个人健康信息管理与隐私保护系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29(4): 170–174.
- [45] BRAIDOT A A, CIFUENTES C C, NETO A F, et al. ZigBee wearable sensor development for upper limb robotics rehabilitation[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2013, 11(1): 408–413.
- [46] 张毅, 吴锦, 罗元, 等. 新型 ZigBee-WiFi 无线网关的设计及其抗干扰技术的研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2014, 31(5): 122–124, 187.
- [47] CIFUENTES C A, GENTILETTI G G, SUAREZ M J, et al. Development of a Zigbee platform for bioinstrumentation[C]//*Proceedings of 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*. Buenos Aires: IEEE, 2010: 390–393.
- [48] 曾鹏, 王旭, 汪扬, 等. 智能电网应用中 ZigBee 网络多信道干扰避免策略 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2012, 42(8): 609–616.
- [49] 李丛巍. 嵌入式 Internet 互联网技术的研究及应用 [J]. *中国科技投资*, 2021(4): 37, 39.
- [50] 谷峰. TCP 和 UDP 协议在网络通信中的应用 [J]. *数字化用户*, 2019, 25(32): 33–34.
- [51] 王俊峰, 刘婷, 高展, 等. 一种基于 QUIC 协议的拥塞改进方法 [P]. 中国, CN105827537A. 2016-08-03.
- [52] 沈丽云, 尹孟征, 郭凤仙, 等. 基于 Android 的康复医疗机器人控制系统设计与实现 [J]. *装备机械*, 2016(1): 37–41.
- [53] SCOTT J, MAPP G. Link layer-based TCP optimisation for disconnecting networks[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2003, 33(5): 31–42.
- [54] 袁凯, 李俊娥, 刘开培, 等. 一种基于 UDP 的电力广域保护系统可靠通信方法 [J]. *自动化学报*, 2021, 47(7): 1598–1609.

(编辑: 丁红艺)