

本文引用格式: 王思棋,梁礼铿,曹东.康复监测机器人中物联网技术的应用进展与发展趋势[J].自动化与信息工程,2026,47(4): 1-7.

WANG Siqi, LIANG Likeng, CAO Dong. Application progress and development trends of IoT technology in rehabilitation monitoring robots[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(4):1-7.

康复监测机器人中物联网技术的应用进展与发展趋势

王思棋¹ 梁礼铿¹ 曹东²

(1.广州南方学院, 广东 广州 510970

2.广州中医药大学, 广东 广州 510006)

摘要: 近年来, 康复监测机器人已演进为融合传感器、通信网络与智能算法的复杂系统。在这一演进过程中, 康复监测机器人面临着内部各传感器数据的同步采集与预处理、跨设备数据整合与安全通信, 以及围绕康复训练中运动感知、功能评估、居家训练等方面提出的新需求。本文从物联网系统的采集层、传输层、应用层阐述各层在康复监测机器人领域的应用现状及面临问题, 并对其发展趋势进行展望。

关键词: 康复监测机器人; 物联网; 多源感知; 数据通信; 智能康复

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2026)04-0001-07

DOI: 10.12475/aie.20260401

开放获取

Application Progress and Development Trends of IoT Technology in Rehabilitation Monitoring Robots

WANG Siqi¹ LIANG Likeng¹ CAO Dong²

(1.Nanfang Collage, Guangzhou 510970, China

2.Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In recent years, rehabilitation monitoring robots have evolved into complex systems integrating sensors, communication networks, and intelligent algorithms. Throughout this evolution, rehabilitation monitoring robots face challenges including synchronous acquisition and preprocessing of data from internal sensors, cross-device data integration and secure communication, as well as emerging demands in motion perception, functional assessment, and home-based training for rehabilitation. This paper elaborates on the application status and challenges faced by the sensing, transmission, and application layers of IoT systems in the field of rehabilitation monitoring robots, and provides an outlook on their development trends.

Keywords: rehabilitation monitoring robots; internet of things; multi-source perception; data communication; intelligent rehabilitation

0 引言

康复监测机器人是康复医学、机器人、信息等技术相结合的有机整体^[1], 其依托多源传感器进行康复监测, 广泛应用于神经康复、骨科康复及老年辅助等领域。随着此类机器人向智能化、集成化方向演进, 其在实时感知、跨设备通信协同、智能监测与决策支持等方面均面临着越来越高的要求。

物联网技术通过定义统一的通信协议与数据接口标准, 对内可帮助康复监测机器人实时完成多源异构传感器数据的采集、同步与预处理, 对外可为跨设备协同作业、数据交互提供安全性与一致性保障。得益于云-边-端协同计算架构, 物联网通过融合端侧感知、边缘实时计算与云端高算力分析, 有效缓解实时监测低延迟与复杂决策高算力的矛盾。此外, 物联网系统能够提供统一的设备管理平台与全链路监控机

制，可对设备状态进行实时监测和故障预警。

目前临床应用较多的康复监测机器人主要借助各种传感器以及电子屏幕完成本地监测，帮助治疗师和患者实时查看康复评估结果或训练状态，但数据整合与深度处理分析能力有限，亟需引入新技术加以提升。对此，本文从采集、传输、应用三个层面，系统性回顾物联网技术在康复监测机器人领域的应用现状，探讨该技术如何推动康复训练从阶段性结果评价向过程性动态评价转变，并分析这一过程所面临的问题以及未来发展趋势。

1 康复监测机器人的物联网系统框架

物联网系统利用信息传感和网络技术，通过人-机-物的全域互联体系，为康复监测机器人实时感知、安全通信与智能评估、决策管理提供基础支撑。具体而言，物联网系统分别从采集层、传输层、应用层对康复监测机器人提供支持，其整体框架如图 1 所示。

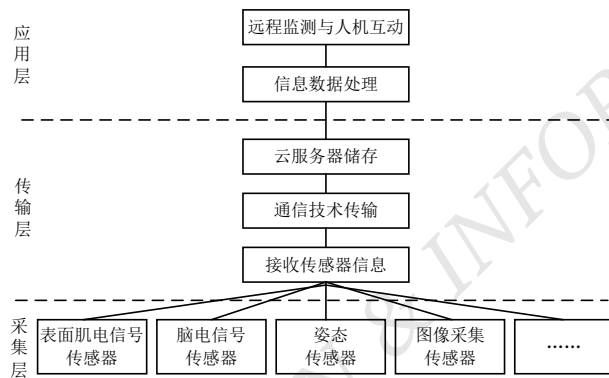


图 1 物联网系统的整体框架

1.1 采集层

康复监测机器人需在人体表面或外界环境广泛部署传感器，以实现运动行为、神经活动与生理状态等信号的同步采集。物联网系统通过采集层以高精度、低延迟的方式，实时进行数据的归集、同步与分析，为后续的数据传输、融合分析与临床决策提供数据基础。

1.1.1 采集运动行为

康复监测机器人为实现个体感知，通常集成多个传感器以实现运动意图识别、训练参与度评估等^[2-4]。

其中，表面肌电信号（surface electromyographic signals, sEMG）传感器采集的信号能够直接反映肌肉激活程度与激活时序，为康复监测机器人判断患者的自主用力水平并实时调整辅助策略提供依据^[5-10]。文献[11]采用分布式 sEMG 采集系统实现患者训练过程中的肌肉协同模式实时解析。文献[12]利用 sEMG 采集双侧髂腰肌信号，量化患者在辅助训练中的主动参与程度，为调整训练难度提供客观依据。为保障训练安全性，需监测肌痉挛等突发病理状态。文献[13]针对下肢康复机器人开发了电容式力/力矩传感器，通过实时监测关节力矩识别肌痉挛。文献[14]为手部康复外骨骼设计了专用痉挛感知模块，为触发急停或缓释策略提供毫秒级响应依据。

关节活动度作为评估患者运动功能恢复程度的关键指标，其精准测量对于康复疗效量化至关重要。文献[15]研发的摩擦电关节传感器，实现了手部关节康复进程的连续追踪监测。

1.1.2 采集神经活动

脑机接口技术为重度瘫痪患者开辟了绕过受损运动通路的控制新途径^[16-21]。文献[22]研发的可穿戴低功耗干电极信号采集装置，为脑卒中患者通过意念控制康复监测机器人奠定了硬件基础。

1.1.3 采集生理状态

患者整体生理状态的宏观监测是实现其全面康复评估的必要补充。文献[23]基于 HL7 FHIR 标准构建的开源生物医学信号采集框架，实现了患者多路生理信号的实时获取与医疗物联网互操作。文献[24]设计的超低功耗连续时间 Delta-Sigma 调制器，以较低能耗实现了对患者心电信号的连续监测。文献[25]开发的 StressFit 系统展示了多模态同步监测的临床价值。

实时获取传感器数据，使康复训练过程中对患者功能状态的连续监测成为可能。基于实时采集的数据，可进一步计算患者的运动轨迹平滑度、到达时间等运动学指标，为其功能评估提供客观量化的依据^[26]，从而促进训练过程与功能评估的实时同步和一体化。

1.1.4 从多源感知到康复场景理解

当前，康复监测机器人的临床价值在于从连续的

物理信号中提取康复语义标签,因此传感器的分析维度不应局限于单一靶向指标,而应面向多元化的康复需求进行多角度特征挖掘。这要求物联网系统需实现多个信号源的采集起始时刻与时间基准的严格同步,以有效应对信号类型、采样频率、传输带宽与量化精度等方面的固有差异,并具备对异构多模态数据进行整合分析的能力。为此,在数据接入环节,物联网系统应建立基于统一时间基准的硬件级同步触发机制,从根源上缓解时序错位对后续分析的影响。

在康复场景理解层面,通过引入自监督学习、无监督学习等方法构建预训练模型,结合主动学习、弱监督学习等策略高效生成标注数据,逐步构建基础多模态大模型,从而实现少样本、零样本学习,以快速应对复杂的康复场景理解任务。

1.2 传输层

在康复监测机器人的物联网系统框架中,传输层承担着衔接感知终端与云端智能决策中枢的关键作用。面向复杂多变的网络环境、人机交互的实时需求、高度敏感的隐私数据,传输层的设计在跨协议数据融合、动态算力调度及安全防御韧性等方面均面临着新的挑战。

1.2.1 通信技术与协议

在康复监测机器人的物联网系统框架中,采集层获取的多源异构数据需经传输层实现可靠上传与远程交互。物联网传输技术的迭代演进,使康复训练过程中数据采集的连续性和数据整合成为可能。

物联网传输技术经历了从 ZigBee、Wi-Fi 等短距离通信协议^[27]到 LoRa、NB-IoT 等低功耗广域网技术^[28]的演进。前者解决了局域场景下的数据上传问题,后者以广域覆盖与低功耗特性为构建大规模分布式康复监测网络提供了底层支撑。第五代移动通信技术(5G)的商用进一步重塑了传输层的能力,其低时延特性确保了治疗师端下达的远程控制指令能近乎实时地抵达终端设备,避免了因通信延迟导致的人机运动不同步或本体感觉错乱等问题。此外,5G 的高可靠性保障了关键传感器数据在传输过程中的完整性与时序一致性^[29]。在应用层面,文献[30]将工业物

联网中成熟的无线通信技术迁移至医疗物联网场景,实现了高质量数据传输与异常实时监测。文献[31]对传输链路的精度、速率及安全性进行了系统性增强。

1.2.2 云-边-端协同计算架构

算力瓶颈与康复训练监测的实时推理需求,共同推动采用云-边-端协同计算架构。其中,端侧负责信号预处理与轻量意图识别;边侧填补端侧算力不足与云端响应延迟之间的功能空白;云端承担需大规模算力支撑与长期历史数据积累的宏观分析任务。

5G 接入边缘计算将计算与存储资源下沉至网络边缘,使康复训练过程中的感知-决策-执行闭环成为可能^[29]。文献[32]提出面向医疗大数据的雾计算架构,利用物联网计算节点作为中间层,实现数据的即时聚合与压缩,显著减轻云端负载。

云端为复杂机器学习模型的训练提供了算力保证。文献[33-34]利用 ThingWorx 工业物联网云平台实现了跨平台康复数据存储与训练效果分析。将长短期记忆网络、支持向量机等涉及高维特征空间迭代优化的算法^[35-36]部署在云端,训练生成的高精度模型可由边侧节点动态下发至端侧设备,形成从数据驱动建模到临床反馈干预的闭环。

在协同机制方面,文献[37]提出的“云-机器人-可穿戴”系统将协同逻辑落实到双侧康复场景,患侧可穿戴传感器采集运动数据,经边缘节点实时提取特征后上传至云端,云端通过对比双侧运动数据,识别患侧运动偏差并量化运动质量,从而实现从数据采集到质量评估的完整闭环。文献[38]开发了感应纺织物联网手套与云端控制系统,手套端的柔性传感器捕捉手部运动信息,边缘节点进行手势分类,云端汇总训练数据并生成康复训练报告。

1.2.3 通信安全

康复数据不仅包含患者的生理指标和运动状态,还涉及疾病史等敏感隐私信息。在居家康复场景中,康复数据经公共网络传输,面临被截获、篡改或伪造的攻击风险。针对上述风险,学术界已展开多维度的防御探索。文献[39]开发了基于端到端的轻量级部分同态加密技术,在加密强度与计算开销之间取得平衡,

适用于算力受限的便携式康复终端设备。文献[40]提出 SecAODV 安全医疗路由方案, 基于混合密码学在无线体域传感器网络中建立安全路由。文献[41]构建区块链辅助认证框架以保障隐私安全。文献[42]集成了可解释的人工智能与区块链技术, 在保障数据安全的同时赋予系统可解释性。

1.2.4 从技术验证到系统集成

Wi-Fi、NB-IoT、5G 等通信技术、云-边-端协同计算架构以及隐私保护加密协议在康复监测机器人中的技术可行性均已得到文献证实。然而, 高速通信协议虽能保障物理层的数据通信能力, 但统一的协议与接口规范尚不完善, 跨设备与跨节点的数据交互仍面临语义对齐障碍。对此, 可考虑先将高复杂度模型依托云端完成训练, 再通过知识蒸馏、模型剪枝与参数量化等手段压缩后部署至边端, 以降低对持续高带宽与中心化算力的依赖。

传输层的瓶颈在于通信、计算与安全三者之间存在非协同耦合关系, 系统整体性能受制于三者中的最短板。因此, 未来研究的核心内容包括: 根据信道质量与动作紧急程度动态调节加密强度与任务策略; 建立涵盖传输成功率、端到端时延、加密开销与康复训练有效性等多维指标的统一评估基准, 从而为不同技术路线在系统集成层面的横向比较与临床工程选型提供客观依据。

1.3 应用层

在康复监测机器人的物联网系统框架中, 应用层承担着数据汇聚后的智能解析、状态评估、风险预警及干预策略生成等功能。得益于机器学习、时序数据分析、神经网络等算法的持续发展, 应用层正从被动数据展示向主动智能分析转变, 其能对生命体征、运动姿态等多模态数据进行深度挖掘, 从而实现疲劳度量化、动作规范性评判、康复疗效评估等功能。文献[43]提出一种智能数据传输模型, 将工业物联网中的无线通信技术应用用于医疗领域, 提升了医疗物联网的实时异常监测能力。文献[44-45]提出多模态可穿戴生物传感器设备, 用于在运动过程中通过物联网技术进行连续生理信号监测。文献[46]基于物联网云平台建

立了系统模型, 并应用于体育康复训练的远程监测。

尽管底层感知技术已能提供海量的连续监测数据, 但应用层在数据的高级语义理解和动态评估建模方面仍存在显著滞后。未来研究应重点考虑对采集数据进行多模态融合, 并对多种算法模型进行模拟验证, 以保证其在康复医疗领域的适用性。

2 康复监测机器人中物联网技术的应用场景

物联网技术与康复监测机器人结合, 能够识别患者动作意图, 从而为不同康复阶段的患者提供安全、个性化与智能化的运动训练支持^[47]。

2.1 实时辅助与安全监控

在康复训练过程中, 物联网技术使传感器数据实时驱动训练参数调整成为可能。在人机交互方面, 文献[48]提出基于偏好反馈的动作表征学习方法, 能够根据用户特性调整机器人行为; 文献[49]提出混合感知架构, 通过视觉与触觉的双感知融合, 使机器人实时感知人类的动作意图; 文献[50]为机器人构建了兼顾任务特征与人体状态的角色分配框架, 以避免人类疲劳, 实现人机友好交互。在实时安全方面, 力矩传感器的痉挛检测与异常力矩预警机制为训练安全提供了毫秒级响应保障。

2.2 评估与疗效量化

物联网技术使康复评估不再滞后于康复训练, 实现了训练、评估一体化。文献[21]通过临床试验证实, 基于虚拟现实的上肢康复训练, 将训练场景与评估任务融于同一交互界面, 患者在完成虚拟游戏任务的过程中同步接受运动功能的量化评定。评估监测数据通过物联网上传至云平台, 为治疗师调整后续训练方案提供客观依据。

2.3 居家-机构场景切换与云端评估

物联网技术与机器人技术协同收集患者数据, 自动处理并上传数据, 使数据不受地域限制, 从而实现居家远程康复。

在居家康复训练方面, 患者借助可穿戴设备通过物联网上传训练数据, 治疗师则通过 Web 端实时获取数据并动态调整训练方案^[51]。在跨场景连续性方面,

院内评估数据与居家训练数据通过物联网无缝衔接,从而实现患者功能的连续测量。文献[52]开发了基于物联网技术的远程康复训练系统,使脑卒中患者能够在家中上进行上肢和手的功能训练。文献[53]设计的上下肢康复训练系统,实现了机器人本体与云平台之间训练数据管理与策略更新的信息交互。近年来,还有很多团队将物联网技术与康复监测机器人、可穿戴设备等结合,用于康复训练监测或康复评估^[54-55],证明了物联网技术能够打破康复资源在时间、空间上的限制,促进康复行业的整体发展。

3 结论与展望

在物联网技术驱动下,康复监测机器人正从基础数据采集转向康复场景深度感知,向智能化与集成化方向持续演进。当前,物联网技术在康复监测领域的应用已形成采集层、传输层和应用层的技术体系,实现了对运动行为、神经活动及生理状态的连续感知、远程协同与智能评估。在此演进过程中,物联网的关键作用已不再局限于信号的传输与存储,而是上升为深度理解并主动适配复杂康复场景的核心驱动力。

然而,现有研究仍主要聚焦于单项技术优化,多模态感知、通信网络与智能算法之间缺乏统一的协同机制,在跨设备互操作、实时决策、安全通信及临床泛化能力等方面仍存在不足。未来研究应着力于整合统一协议栈、构建安全通信体系并实现云端、边端计算资源的智能调度,通过多维度的综合性能评估提升系统整体的可靠性与实时性。

展望未来,康复监测机器人的发展应以开放互联、智能协同为核心理念,着力构建统一数据标准与智能计算框架,最终形成覆盖感知、通信、分析、决策与服务的链路闭环系统。在人工智能领域,面向运动、生理信号分析的基础模型正成为研究重点,通过大规模无监督预训练学习泛化表征,为步态识别、肌力评估等下游任务提供共性支撑,降低对标注样本的依赖并提升跨个体迁移的鲁棒性。连续长时程监测能力的实现,将推动康复医学评估方法论的根本性改变,使评估范式从依赖单次测试结果转为关注动态演变过

程。这一转变有助于全面理解患者功能状态,进而支撑个性化康复方案的动态优化与精细化调整,最终实现数据驱动的精准康复目标。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 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.
- [2] 姜彤, 傅巍, 张彤, 等. 传感器技术发展现状及发展方向[J]. 传感器与微系统, 2026, 45(5): 1-7.
- [3] 杨晓君, 张梦琦, 任萌娜, 等. 基于微流控芯片的生物传感器发展现状与展望[J]. 电子与封装, 2022, 22(6): 060502.
- [4] DEVINE J K, SCHWARTZ L P, HURSH S R. Technical, regulatory, economic, and trust issues preventing successful integration of sensors into the mainstream consumer wearables market[J/OL]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2731 [2026-08-16]. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2731>.
- [5] BU L Y, YIN X G, LIN M X, et al. Motion intention recognition using surface electromyography and arrayed flexible thin-film pressure sensors[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2025, 16(4): 486-497.
- [6] 朱鹏霖, 苏宗信, 唐家曦, 等. 基于肩部肌肉表面肌电的下肢外骨骼控制系统[J]. 北京生物医学工程, 2022, 41(5): 510-515.
- [7] XUE J, LAI K W C. Dynamic gripping force estimation and reconstruction in EMG-based human-machine interaction[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, 80: 104216.
- [8] OGUL O E, COSKUNSU D K, AKCAY S, et al. The effect of electromyography (EMG)-driven robotic treatment on the recovery of the hand nine years after stroke[J/OL]. *Journal of Hand Therapy*, 2023, 36(1): 234-240 [2026-08-16]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894113021000697>.
- [9] MCDONALD C G, SULLIVAN J L, DENNIS T A, et al. A myoelectric control interface for upper-limb robotic rehabilitation following spinal cord injury[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2020, 28(4): 978-987.
- [10] 谢平, 肖俊明, 于金须, 等. 基于 sEMG 和肌肉骨骼模型的手指多关节力矩耦合分析[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 266-275.
- [11] CHELLAL A A, LIMA J, GONÇALVES J, et al. Robot-assisted rehabilitation architecture supported by a distributed

- data acquisition system[J/OL]. *Sensors*, 2022,22(23):9532 [2026-08-16]. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9532>.
- [12] JENSEN E R, PEPPER K K, EGGER M, et al. Monitoring active patient participation during robotic rehabilitation: comparison between a robot-based metric and an EMG-based metric[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023,31:4156-4166.
- [13] CHEN L, YANG S, ZHANG X, et al. Development of a capacitive force/torque sensor for lower limb rehabilitation robots for spasm detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023,72:1-12.
- [14] ZHANG F, YANG L, FU Y. Development and test of a spasm sensor for hand rehabilitation exoskeleton[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022,71:1-8.
- [15] ZHANG Z, CAI J. A triboelectric joint sensor imitating soft robot for human joint rehabilitation monitoring[J]. *Nano*, 2022,17(8): 2250059.
- [16] VAIDA C, RUS G, PISLA D. A sensor-based classification for neuromotor robot-assisted rehabilitation[J]. *Bioengineering*, 2025,12(3):287.
- [17] KHAN M A, DAS R, IVERSEN H K, et al. Review on motor imagery based BCI systems for upper limb post-stroke neurorehabilitation: From designing to application[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2020,123:103843.
- [18] 卢振利,王乾,王红,等.基于脑机接口的机器人辅助脑瘫康复面部表情训练系统设计[J].*高技术通讯*,2023,33(4):419-427.
- [19] 刘璇,高玲,褚凤明,等.脑机接口联合上肢康复机器人对脑卒中患者上肢功能的影响[J].*中国康复理论与实践*,2025,31(6):703-710.
- [20] 蔡楚杰,李四楠,刘天,等.运动想象脑机接口在脑卒中后上肢康复中的研究进展[J].*中国康复医学杂志*,2023,38(6): 851-857.
- [21] 王庆雷,睦有昕,朱兰,等.虚拟现实上肢康复机器人对脑卒中偏瘫患者脑网络的影响[J].*中国康复医学杂志*,2025,40(7):995-1001.
- [22] NA R, ZHENG D, SUN Y, et al. A wearable low-power collaborative sensing system for high-quality SSVEP-BCI signal acquisition[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(10): 7273-7285.
- [23] ADOCHIEI F C, TOI F A, ADOCHIEI I R, et al. HL7 FHIR-based open-source framework for real-time biomedical signal acquisition and IoMT interoperability[J]. *Applied Sciences*, 2025,15(23):12803.
- [24] KIM J, GUO T, DUAN Q, et al. Ultralow-power ECG monitoring sensor based on a continuous-time Delta-Sigma modulator with an on-chip PMIC[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025,74:1-6.
- [25] HOSSAIN N I, NOUSHIN T, TABASSUM S. StressFit: A hybrid wearable physicochemical sensor suite for simultaneously measuring electromyogram and sweat cortisol[J]. *Scientific Reports*, 2024,14(1):1-14.
- [26] MUKHERJEE P, HALDER ROY A. EEG sensor driven assistive device for elbow and finger rehabilitation using deep learning[J/OL]. *Expert Systems with Applications*, 2024,244: 122954 [2026-08-16]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417423034>.
- [27] 周斯亮.基于 ZigBee 无线传感网络的大棚农业监测与控制系统设计与实现[D].黄石:湖北师范大学,2025.
- [28] 严朝阳,方飞,曹侯,等.基于 LoRa 的物联网数据传输系统研究与设计[J].*重庆邮电大学学报(自然科学版)*,2021,33(3): 354-363.
- [29] 施振祥.基于 5G 多接入边缘计算实现医院应用提升的探索[J].*中国新通信*,2021,23(21):83-84.
- [30] DING X, ZHANG Y, LI J, et al. A feasibility study of multi-mode intelligent fusion medical data transmission technology of industrial Internet of Things combined with medical Internet of Things[J]. *Internet of Things*, 2023,21:100689.
- [31] 朱少鹏.物联网远距离链路传输质量增强技术研究[D].北京邮电大学,2023.
- [32] QIN B. Research on a fog computing architecture and BP algorithm application for medical big data[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2023,37(1):255-267.
- [33] MODI P P, SUNNY Md S H, KHAN Md M R, et al. Interactive IIoT-Based 5DOF robotic arm for upper limb telerehabilitation [J]. *IEEE Access*, 2022,10:114919-114928.
- [34] K MODI P P, SUNNY M S H, WANG I, et al. Developing robot-assisted telerehabilitation system[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2022,103(12):e160.
- [35] LU Z, XU Z, ZHAO D, et al. Ankle joint motion recognition system and algorithm optimization based on plantar pressure [J]. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2024, 24(10):2450008.
- [36] 郑熠,田辉,马茜.基于 LSTM 模型的无线物联网设备识别方法[J].*无线电通信技术*,2024,50(3):597-602.
- [37] CHEN C H, TANG L H, YE H C H, et al. A cloud-robot-wearable system for bilateral reaching rehabilitation: affected-

- side identification and quality quantification[J]. *Electronics*, 2026,15(7):1459.
- [38] OZLEM K, GUMUS C, YILMAZ A F, et al. Cloud-based control system with sensing and actuating textile-based IoT gloves for telerehabilitation applications[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2025,7(8):2400894.
- [39] BALASUBRAMANIAN S K, VELUSAMY M S. An improved lightning search algorithm-based end-to-end lightweight partially homomorphic encryption approach for enhanced IoT security[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2024,67:e24231193.
- [40] JEONG H, LEE S W, HUSSAIN MALIK M, et al. SecAODV: A secure healthcare routing scheme based on hybrid cryptography in wireless body sensor networks[J]. *Frontiers in Medicine*, 2022,9:829055.
- [41] JIA X, LUO M, WANG H, et al. A blockchain-assisted privacy-aware authentication scheme for internet of medical things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(21):21838-21850.
- [42] ARSLANOĞLU K, KARAKÖSE M. An efficient clinical decision support framework using IoMT based on explainable and trustworthy artificial intelligence with transformer model and blockchain-integrated chunking[J]. *Diagnostics*, 2025, 16(1):7.
- [43] DING X, ZHANG Y, LI J, et al. A feasibility study of multi-mode intelligent fusion medical data transmission technology of industrial Internet of Things combined with medical Internet of Things[J/OL]. *Internet of Things*, 2023,21:100689 [2026-08-16]. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542660-523000124>.
- [44] PHAN D T, PHAN T T V, HUYNH T C, et al. Noninvasive, wearable multi biosensors for continuous, long-term monitoring of blood pressure via internet of things applications[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022,102:108187.
- [45] PHAN D T, NGUYEN C H, NGUYEN T D P, et al. A flexible, wearable, and wireless biosensor patch with internet of medical things applications[J]. *Biosensors*, 2022,12(3):139.
- [46] LI C, CHENG Y. Construction of sports rehabilitation training remote monitoring system in cloud platform based on the internet of things[J]. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2025,25(5):2540031.
- [47] 李明,徐方竹,王滇,等.肘关节康复机器人研究进展[J].*浙江大学学报(医学版)*,2026,55(1):27-35.
- [48] WANG R, ZHAO D, SUH D, et al. Personalization in human-robot interaction through preference-based action representation learning[C]/2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2025:7377-7384.
- [49] TRINIDAD BARNECH G, TEJERA G, VALLE-LISBOA J, et al. Enhancing robotic perception through synchronized simulation and physical common-sense reasoning[J]. *Sensors*, 2024,24(7):2249.
- [50] MERLO E, LAMON E, FUSARO F, et al. An ergonomic role allocation framework for dynamic human-robot collaborative tasks[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023,67:111-121.
- [51] 谢锋云,王玲岚,闫少石,等.基于云平台 and 物联网技术的电机远程监测系统[J].*机械设计与研究*,2023,39(2):153-157; 161.
- [52] DURFEE W K, WEINSTEIN S A, CAREY J R, et al. Home stroke telerehabilitation system to train recovery of hand function[C]/9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. IEEE, 2005:353-356.
- [53] 余成.一种融合物联网技术和人机交互的上下肢康复训练系统[D].合肥:合肥工业大学,2024.
- [54] MEGALINGAM R K, MANOHARAN S K, MOHANDAS S M, et al. Wearable hand orthotic device for rehabilitation: Hand therapy with multi-mode control and real-time feedback [J]. *Applied Sciences*, 2023,13(6):3976.
- [55] MOGHBELAN Y, ESPOSITO A, ZYRIANOFF I, et al. A smart motor rehabilitation system based on the internet of things and humanoid robotics[J]. *Applied Sciences*, 2024,14 (24):11489.

作者简介:

王思棋,女,1999年生,硕士研究生,助教,主要研究方向:智能康复诊断。E-mail: wangsiqi@nfu.edu.cn

梁礼铿(通信作者),男,1988年生,博士研究生,讲师,主要研究方向:医学自然语言处理、医学多模态表征学习。

E-mail: lianglk@nfu.edu.cn

曹东,男,1975年生,博士研究生,教授,主要研究方向:中医人工智能、医学自然语言处理。E-mail: caodong9@163.com