

肘关节康复机器人研究进展

李明¹, 徐方竹², 王滇², 徐佳琳^{3,4}

- 宁波市第六医院创伤骨科 宁波市骨科与运动康复临床医学研究中心, 浙江宁波 315040
- 宁波大学医学部, 浙江宁波 315211
- 中国科学院宁波材料技术与工程研究所先进诊疗材料与技术实验室, 浙江宁波 315201
- 宁波慈溪生物医学工程研究所, 浙江宁波 315302

[摘要] 肘关节辅具为肘关节损伤的康复提供了简便的机械方式。人工智能与肘关节辅具结合, 产生了肘关节康复机器人, 以满足不同损伤类型患者的个性化康复需求。肘关节康复机器人主要由机械刚体结构、机械动力结构、仿生传感器和软件系统组成。康复机器人的机械刚体结构相当于人体骨骼和关节, 包括连杆结构和齿轮传动系统。机械动力结构相当于人体肌肉和韧带, 负责产生和控制运动所需的力和力矩, 其驱动器类型主要有气动驱动器、弹性驱动器和绳驱动器。仿生传感器相当于人体感受器, 主要包括光电编码器、力和力矩传感器、肌电信号传感器和温度传感器。各类软件系统(算法、控制、机器学习)构成了机器人的“神经中枢”, 相当于人体的大脑和脊髓, 负责核心的智能决策和运动控制。肘关节康复机器人的核心技术是通过物理构件与软件系统的结合, 实现对患者肘关节运动轨迹的精准跟踪, 并能依据实时交互力自适应地调节辅助力度, 提供被动、助力、主动及阻抗等训练模式, 从而为不同康复阶段的患者提供安全、个性和智能的运动训练支持。基于仿生结构设计、精确的阻抗控制、肌电信号的助力模式和虚拟现实任务训练等核心技术, 康复机器人明显提升了康复训练的舒适性、康复辅助的精准性和患者依从性。本文综述了肘关节康复机器人的研究现状, 阐述其关键组成和主要康复功能的训练模式, 分析其临床需求及未来发展方向, 旨在为康复机器人的优化提供参考。



[关键词] 康复机器人; 人工智能; 肘关节; 综述

[中图分类号] R68; TP18 **[文献标志码]** A

收稿日期(Received): 2025-04-25 修改返回日期(Revised): 2025-07-04 接受日期(Accepted): 2025-09-04 网络预发表日期(Online): 2025-12-31

基金项目(Funding): 宁波市科技创新2025重大专项(2022Z147)

第一作者(First author): 李明, 主任医师, 教授, 硕士生导师, 主要从事创伤骨科相关疾病研究; E-mail: david_abc123@163.com; ORCID: 0000-0003-0006-7021. 徐方竹, 主治医师, 硕士研究生, 主要从事创伤骨科相关疾病研究; E-mail: x13586666646@qq.com; ORCID: 0009-0009-1111-5042

通信作者(Corresponding author): 李明, 主任医师, 教授, 硕士生导师, 主要从事创伤骨科相关疾病研究; E-mail: david_abc123@163.com; ORCID: 0000-0003-0006-7021

Research progress on elbow joint rehabilitation robots

LI Ming¹, XU Fangzhu², WANG Dian², XU Jialin^{3,4} (1. Department of Traumatic Orthopaedics, Ningbo No. 6 Hospital, Ningbo Clinical Research Center for Orthopedics, Sports Medicine & Rehabilitation, Ningbo 315040, Zhejiang Province, China; 2. Health Science Center, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang Province, China; 3. Laboratory of Advanced Theranostic Materials and Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang Province, China; 4. Ningbo Cixi Institute of Biomedical Engineering, Ningbo 315302, Zhejiang Province, China)

LI Ming and XU Fangzhu contributed equally to this work.

Corresponding author: LI Ming, E-mail: david_abc123@163.com, ORCID: 0000-0003-0006-7021

[**Abstract**] Elbow orthoses offer a straightforward mechanical approach for rehabilitation following elbow joint injuries. The convergence of artificial intelligence with these orthoses has led to the development of elbow rehabilitation robots, designed to address the personalized rehabilitation requirements of patients with diverse injury profiles. A typical elbow rehabilitation robot system comprises four core components: rigid mechanical structure, an actuation system, bionic sensors, and integrated software. The rigid structure, analogous to the human skeletal system, includes linkage mechanisms and gear transmission assemblies. The actuation system, mimicking the function of muscles and ligaments, generates and modulates the necessary forces and torques for movement, employing actuators such as pneumatic, elastic and cable-driven types. Bionic sensors, serving as the robot's perceptual interface, encompass photoelectric encoders, force/torque sensors, electromyographic (EMG) signal sensors, and temperature sensors. The software system, encompassing control algorithms and machine learning models, functions as the "neural center," enables intelligent decision-making and motion control. The core technological achievement lies in the seamless integration of hardware and software to enable precise tracking of elbow joint kinematics and adaptive modulation of assistive forces based on real-time human-robot interaction. This integration supports multiple training modalities, including passive, assistive, active, and resistive modes and enables safe, personalized, and intelligent rehabilitation support across different recovery phases. By harnessing technologies like bio-inspired design, precise impedance control, EMG-based assistance, and virtual reality-integrated task training, these robotic systems improve training comfort, assistance accuracy, and patient adherence. This review outlines the current state of elbow rehabilitation robotics, details the key system components and primary training modalities, discusses clinical needs and future development trends, and aims to offer insights for the further refinement of rehabilitation robotic systems.

[**Key words**] Rehabilitation robots; Artificial intelligence; Elbow joint; Review

[J Zhejiang Univ (Med Sci), 2026, 55(1): 27-35.]

[**缩略语**] 串联弹性驱动器(series elastic actuator, SEA);变刚度驱动器(variable

stiffness actuator, VSA);比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)

随着我国竞技体育水平的提高以及全民体育运动的广泛开展,运动创伤越来越多见。与此同时,我国已步入老龄化社会,老年人在生活、锻炼时因机体功能下降发生损伤的现象频繁出现^[1]。老年脆性骨折严重威胁老年人健康^[2]。肘关节作为上肢重要的负重和活动关节,其创伤在老年人群中十分常见。由于老年人常伴有内科基础性疾病,手术风险大,多数患者最终选择非手术治疗^[3],预后常不够理想,会影响患者的正常生活。肘关节创伤主要包括肘关节脱位和各类肘部骨折(如尺骨鹰嘴、冠突、桡骨头、肱骨髁部骨折)^[1]。“恐怖三联征”则是一种更为严重的肘关节创伤,伴有广泛的骨骼和韧带结构破坏,需要手术治疗,但仍会出现关节僵硬和功能丧失等严重并发症^[4]。此外,肘关节创伤可能遗留一系列后遗症,包括关节不稳定、肌肉萎缩、创伤性关节炎、关节粘连及疼痛等,迫切需要后续规范化的康复治疗^[5]。

目前,临床上用于肘关节创伤康复的设备主要包括持续被动活动仪和铰链卡盘式辅具两类。肘关节持续被动活动仪可带动肘关节进行持续、被动的屈伸活动,对于维持良好关节活动度至关重要^[6]。但该设备功能单一,仅提供单向的被动缓慢屈伸^[7],不能满足肘关节三维空间精细运动要求,也不能根据患者肘关节长短粗细、骨骼大小进行适配,继发性康复伤害风险大。另一种常用设备肘关节铰链卡盘式辅具是一种外固定装置,由卡盘与支杆相连的铰链关节组成,允许精确调整和锁定关节活动角度,能为肘关节活动提供稳定保护,控制并引导肘关节在安全范围内进行屈伸运动。但该设备只能在二维空间内被动或主动屈伸活动,结构和功能较简单。临床研究显示,肘关节骨折术后使用该设备对于改善关节活动度和减少并发症等并无明显作用^[8]。综上,传统的肘关节持续被动活动仪和铰链卡盘式辅具在适配性和功能方面仍存在局限,难以满足快速康复的需求。

随着人工智能和材料科学技术的进步,肘关节康复机器人种类不断增加。与传统单一功能的康复设备比较,肘关节康复机器人的核心优势在于“智能化”和“人机交互性”,且功能趋于多样

化^[9]。一方面,机器人可通过多模态传感器和智能算法感知患者的主动运动意图,并调节自适应阻抗模型,确保训练过程的柔顺性^[10],解决传统康复设备无法识别患者主观努力及康复过程被动僵化的问题;另一方面,基于仿生设计的机器人能够模拟人体肘关节复杂的生物力学轴线和功能活动,实现三维空间的精细运动,也避免了传统康复设备与肘关节生物力学特征不匹配而导致的继发性损伤风险^[11]。此外,机器人还能实现运动控制(如关节活动度、力量)与认知功能(如注意力、决策规划)协同整合,通过虚拟现实技术构建趣味性、目标导向的任务,提升患者的训练动机和参与深度,从而达到更好的训练效果^[12]。本文通过阐述肘关节康复机器人的关键组成和主要康复功能训练模式,分析其临床需求及未来发展方向,以期对康复机器人的优化提供参考。

1 肘关节康复机器人的关键组成

1.1 机械刚体结构

机械刚体结构是肘关节康复机器人实现精准、安全、有效康复训练的基础。设计核心是模拟人体肘关节的屈伸和旋转运动,同时提供可控的辅助或阻力力矩。这主要依赖于连杆结构和齿轮传动系统的协同工作,两者分别构成了机器人的“运动骨架”和“力量肌腱”。

连杆结构是康复机器人的主体框架,决定了其与肢体的连接方式、运动范围以及整体刚度和重量,其中串联式连杆结构最为常见。例如,美国天主教堂大学设计的上肢康复机器人ULIX^[13],它由上臂杆、前臂杆及连接两者的旋转关节(即机器人的肘关节)组成。这种设计旨在匹配人体肘关节生物力学特征,确保机器人的运动轴线与人体肘关节的屈伸及旋转轴线对齐,从而实现精确的运动引导及高效的力传递。通过连杆结构设计的上肢康复机器人,其运动空间与人体上肢运动范围接近,符合上肢康复训练需求,且运行过程较为稳定^[14]。

齿轮传动系统是机器人增力和精控的核心,负责将电机的低扭矩、高速输出转换为关节所需的高扭矩、低速运动,作用在于力矩放大和运动

优化。肘关节康复运动(尤其是前臂抬起)需要克服重力,当患者肌力不足时,机器人需要提供足够的辅助力矩,通过齿轮可以将扭矩放大,使得机器人能够托起患者手臂进行康复训练;齿轮减速则将电机的高速旋转降至符合人体运动安全的低速范围,使运动更平稳、更易于高精度控制,从而优化了运动质量。齿轮传动系统还支持 360° 连续旋转,通过驱动机械臂绕其基座旋转,可快速切换手柄的空间方位,从而实现左手和右手训练模式的互换^[15]。

1.2 机械动力结构

机械动力结构是肘关节康复机器人实现运动功能的核心,其作用相当于跨越肘关节的肌肉和肌腱系统,负责产生和控制运动所需的力和力矩。目前主流的驱动器有气动驱动器、弹性驱动器和绳驱动器,它们在实现方式、性能特点及适用场景上各有侧重。

气动驱动器是一种将压缩空气的能量转换为机械运动的装置,能为肘关节的屈伸运动提供受控且柔顺的辅助力或阻力。空气的可压缩性使其具有固有的柔顺性和安全性,能产生自然的缓冲效果以避免对患者肢体施加过度应力。气动肌肉是一种特殊的、仿生式气动驱动器,通过调节内部气压使弹性体腔壁发生形变,产生沿轴向的收缩力,直接驱动与其相连的机械结构^[16]。气动肌肉不仅具有高功率重量比、结构简单(无复杂的齿轮、轴承等机械部件)、制造和维护成本相对较低的优点,而且其固有的柔顺性还能避免刚性电机可能造成的硬性冲击^[17],这对于安全的人机交互至关重要。

弹性驱动器主要包括SEA和VSA,均属于柔顺驱动装置。SEA和VSA通过在关节的传动部分布置弹性元件(如弹簧或扭簧)来降低关节刚度,增加被动柔性^[18]。SEA将弹性元件置于电机与连杆之间,利用其形变与力矩间的线性关系来获取关节力矩,实现高精度控制;VSA则通过调节弹性元件的预紧力、传动比或自身物理特性来改变刚度,其优势在于更宽的刚度调节范围和更快的响应速度,可满足上肢康复训练过程中的刚度变化需求,无需额外驱动和控制^[19]。

绳驱动器是一种将驱动源与执行端分离,通过柔性绳索进行远端动力传递的传动装置。它将传统的电机驱动装置安装于基座,通过缠绕在

滑轮上的绳索来远距离传递力和运动,不仅提高了机器人的承载能力,而且有利于柔性臂的运动轻量化,符合人机交互对安全性和便捷性的需求^[20]。绳驱动器的优点体现在两个方面:一是通过将沉重的电机移至基座,运动部件(如机械臂的末端)得以轻量化,从而使机器人运动更快、更敏捷,能耗也更低;二是绳索的柔性特质能使其较好地适应人体关节复杂的复合运动轴线,布局灵活,易于实现仿生设计^[20]。然而,绳驱动器机器人也存在着额外负载增加、关节间存在耦合关系、结构较复杂等不足^[21]。

1.3 仿生传感器

传感器是肘关节康复机器人感知外部环境和患者状态的关键,其功能相当于人体感受器。多模态传感器的融合应用是实现精准、安全、个性化康复治疗的基石。目前核心的传感器主要包括光电编码器、力和力矩传感器、肌电信号传感器和温度传感器等。

光电编码器是机器人关节空间的“本体感觉器”,其作用类似于人体感知肢体空间位置和运动的关节感受器。光电编码器安装在电机或关节旋转中心,通过光电信号精确测量转动角度和速度,基于这些数据,通过运动学模型计算出末端执行器(如手柄或前臂托)的空间运动轨迹,确保运动控制的准确性。瑞士Hocoma公司的六自由度Armeo®Spring上肢外骨骼式机器人采用光电编码器实现机械臂平移和绕轴旋转,引导患者进行康复训练^[22-24]。在临床应用中,康复师或工作人员须监控肘关节屈伸和旋转范围,防止因活动度超过预设的安全阈值而造成继发性损伤。

力和力矩传感器作为机器人的“力觉感受器”,相当于人体的触觉和本体感觉系统,能够感知接触状态及力的大小。力传感器通常安装在机器人与患者肢体直接接触的界面处(如手柄、绑带或末端执行器处),用于直接测量人与机器人之间的接触压力或拉力。力矩传感器则多安装在机器人的关节驱动链处(如电机输出轴或连杆连接处),用于测量关节所受的扭转力矩,从而判断肢体或关节的转动意图及用力情况。通过实时检测人机交互力,判断患者的主动运动意图和努力程度,从而实现柔顺控制。例如,美国加州大学研发的六自由度T-WREX肘关节外骨骼康复机器人能通过传感器实时监测患者握力变

化,并根据其运动需求自动调整辅助力度和平衡状态^[25],这一特性显著提升了训练的针对性和有效性。

肌电信号传感器是机器人捕捉神经肌肉活动的“前沿哨兵”。一方面,机器人通过贴附在皮肤表面的电极采集肌肉纤维兴奋时产生的肌电信号^[26],由于这种信号在肌肉收缩前就已出现,因此能为机器人提供超前的运动意图信息,实现极快的响应速度,为患者提供更为自然的助力体验。另一方面,机器人通过长期监测特定肌群(如肱二头肌、肱三头肌)的肌电信号幅值、频率等特征来分析不同频段中肌电信号的能量变化,提取信号几何特征来识别肌肉的疲劳程度^[27],这为医生客观量化患者肌力的恢复进程、制订并调整阶梯式个性化康复计划提供了依据。

温度传感器集成在机器人与肢体接触套筒的内表面,持续监测训练过程中患者肘关节周围的皮肤温度变化。局部皮肤温度升高,说明该区域血液循环加快、组织代谢水平提高,是康复训练产生有效生理响应的间接标志;若温度无明显变化或出现异常降低,提示康复强度不足或存在肢体血液循环障碍。因此,温度传感器充当了“代谢状态监测器”的角色,可评估患者康复训练的即时生理效应,尽管其应用尚处于探索阶段,但在预防过度训练和评估长期疗效方面具有潜力。

此外,柔性触觉传感电子皮肤是一种可附着于康复机器人表面的新型传感器,它能感知各种刺激,模拟人体皮肤触觉的功能。尽管该传感器的灵敏度和精度不断提升,但仍然难以与其他电子元器件一体化集成,目前尚无法实现与智能系统的连接和交互^[28]。

1.4 核心软件系统

软件系统是肘关节康复机器人的神经中枢,负责核心的智能决策和运动控制,分为算法软件和控制软件两大模块。算法软件是系统的智能核心,负责处理传感器信号(如肌电、位置)、识别患者运动意图以及制订个性化的康复训练策略(如设定助力大小、设置运动轨迹)。控制软件则是系统的执行单元,接收算法指令,并将其转换为精确的电机控制信号,确保机器人运动过程的平稳和安全^[29]。

目前有三种核心控制策略:PID控制、阻抗控

制和鲁棒控制。PID控制是一种经典的反馈控制方法,但其抗干扰能力和适应能力弱,不能达到随时跟踪的控制效果^[30]。例如,1993年美国Lum等^[31]将其应用于上肢康复机器人,但难以应对非线性特性生物力学系统的复杂动态变化。阻抗控制是一种交互控制方法,旨在调节机器人末端与外界环境之间的力-位移关系,使机器人在与患者互动时表现出期望的机械阻抗特性。比如,在康复过程中,通过设定期望的阻抗模型(如弹簧-阻尼系统),机器人可根据患者施加的力调整自身运动,达到自然的人机协作,这种阻抗控制能辅助患肢运动来达到康复训练的效果^[32]。鲁棒控制是一种即使在患者个体差异、模型不精确或外部干扰下,也能稳定、安全地实现预期控制目标(如柔顺助力、轨迹跟踪)的控制方法。它可以通过构建的上肢表面肌电信号与关节力矩之间的神经网络模型,计算出人体上肢关节力矩,实时监测关节的运动轨迹,以确保患者训练过程的安全性和柔顺性^[33]。

机器学习模型正为肘关节康复带来数据驱动的范式变革,其核心在于通过深度分析患者的长期康复数据,实现高度个性化的精准康复。该模型不仅能精准预测患者的康复趋势,还能据此动态优化训练策略和方案难度,形成真正意义上的“一人一策”,彻底改变了传统“一刀切”的康复模式,可为不同损伤类型、不同康复阶段的患者提供持续优化的自适应康复路径,从而提升康复效率和效果。

2 肘关节康复机器人主要康复功能的训练模式

肘关节康复机器人康复功能的实现基于多种训练模式,目前常用的有四种:被动模式、助力模式、主动模式和阻抗模式,满足患者不同康复阶段的需求。

被动模式是由机器人完全控制肘关节运动的训练模式,适用于肘关节早期康复,此时患者肌肉力量尚未恢复,难以完成主动活动。在创伤骨科医生指导下,机器人可辅助患者完成肘关节屈伸和旋转动作。PID及其衍生控制器的被动模式响应迅速、抗干扰、易调节,通过力和位置的精确控制实现对肘关节运动引导^[34-35]。为了应对机器人及人体关节固有的非线性、耦合效应等复杂动力学问题,系统还可以通过建立力矩控制的动

力学模型,实时计算并施加所需的关节力矩,从而进一步提升轨迹跟踪的精确度^[36]。

助力模式是辅助力量可调的训练模式,适用于肘关节中期康复,此时患者肌肉力量逐渐恢复。通过机器人提供助力,患者能够完成自主力量难以实现的肘关节屈伸或旋转动作,防止关节粘连并促进关节功能早期恢复。助力模式通常有两种控制策略:一种是基于力反馈的控制策略,即通过力传感器监测患肢肌肉力量,机器人根据检测到的力信号,提供相应的助力,确保运动顺利完成;第二种是基于肌电信号的控制策略,即肌肉细胞受到刺激时,细胞膜两侧的静息电位会转变为动作电位^[37],肌电传感器采集肌肉的电活动信号,机器人识别信号后判断患者运动意图,提供相应助力,辅助患者主动参与康复训练。此外,更前沿的脑机接口康复技术将患者的脑电信号与康复机器人的外骨骼结合,通过解码患者的运动想象助力康复训练,使患者的手臂动作试验评分平均提高 6.2 分^[38],表明该方式在促进上肢康复方面效果较好。

主动模式是患者主动发起并控制运动的训练模式,适用于肘关节中、晚期康复,此时患者肌肉力量已基本恢复。在此模式下,患者须自主施力完成肘关节屈曲和旋转动作,机器人提供保护和力反馈。美国国立康复医院借助 ARMin III 上肢康复机器人^[39]开发了一种创新的基于触觉反馈的训练方法,通过实时感知患者多关节(如肩、肘)的运动信息,并动态调整对应关节的辅助或阻力,以主动引导患者进行多关节协同运动,而非单一的关节活动。当检测到患者的运动轨迹偏离了预设模式时,机器人便会施加柔和的阻力进行矫正,实现对患者主动运动的安全有效辅助,防止异常运动导致的二次损伤。

阻抗模式是一种基于柔顺控制策略(力-运动耦合关系)的训练模式,其通过力-位混合控制算法,实时调节机器人系统输出的动力学参数(刚度、阻尼、惯性),建立可变的机械阻抗特性,实现人机协同交互,适用于肘关节晚期康复。在该模式下,机器人系统能够动态响应患者施加的作用力,建立患者上肢与机器人关节间的力矩映射模型,以判断患者的活动意图,实现自适应辅助或阻力训练^[40]。这种控制方式能使机器人根据患者肌力水平提供个性化可调节的训练方案:

既可在肌力较弱时提供动力支持,又能在肌力恢复阶段提供渐进式阻力训练。

在上述四种模式基础上,融合虚拟现实和/或增强现实技术的康复训练模式,为肘关节康复领域人工智能技术提供新的应用场景,可兼顾患者认知功能和情绪体验,在单调的肘关节机械活动中融合生活趣味性。例如,通过模拟打保龄球、捞金鱼等游戏化的任务场景,引导患者主动进行肘关节活动,调动患者康复训练的积极性,提升参与度和依从性,同时结合运动想象疗法,促进大脑皮层功能重组,加速运动功能恢复,增强整体康复疗效^[41]。

尽管肘关节康复机器人的多种功能模式覆盖了康复全周期,展现了巨大应用潜力,但在临床推广应用面临三个关键挑战。首先,模式的选择和转换过度依赖治疗师经验,缺乏客观标准。当前,从被动模式向助力、主动、阻抗模式转换时机的选择主要依赖治疗师主观经验判断和粗略的肌力分级,缺乏来自机器人多模态传感数据(如肌电信号、交互力矩、运动平滑度)的精确量化和客观决策支持。若治疗师经验不足,过于保守可能导致患者错过功能恢复的最佳时间窗;过于激进则易造成继发性康复损伤。其次,人机交互的个性化和精准性仍有待提高。在助力模式下,如何根据患者瞬时的运动意图(如通过肌电信号)精确计算出最适宜的辅助力矩大小仍是一个核心难题。当前的控制策略常存在延迟或助力不匹配的现象,导致患者产生对抗性,反而抑制了主动运动。在阻抗模式下,如何针对不同损伤类型(如骨折术后、韧带撕裂、神经损伤)的患者设定个性化的刚度、阻尼参数,尚缺乏坚实的循证医学证据支持。最后,机器人系统操作较传统设备复杂,购置和维护成本高,限制了其在基层医疗机构的普及,繁琐的穿戴适配过程也构成了临床应用壁垒。

3 结 语

肘关节康复机器人经过多年发展,已从概念探索进入临床应用和深度研发并行的新阶段。其核心系统整合了生物力学仿生结构、多模态感知和智能决策控制,正稳步推进人机协同能力的跨越式提升。在产品化层面,以 Armeo®Spring 为代表的早期商用外骨骼机器人已实现减重支撑、

关节屈伸运动轨迹跟踪及定量主动辅助训练等功能,主要解决了康复训练“从无到有”的问题,尤其在中枢神经损伤(如脑卒中)的康复领域证明了其临床价值,标志着上肢康复机器人实现了从理论到实践的突破。然而,真正的人机交互和智能协同仍是当前实验室攻关的核心。未来的发展趋势将聚焦于两大路径,一是机械结构硬件优化,设计符合肘关节生物力学特征的硬件装置(相当于人体运动系统,即完整的骨骼静力性稳定结构及其肌肉动力结构),通过集约化设计推动机器人向便携式、低成本和支持远程监护的方向发展,从而破解其临床普及的难题。二是软件系统升级,建立基于肘关节损伤及术后大数据的规范化康复标准,实现从实验室效能到床边疗效的转化,最终通过康复医学、人体工程学与机器人工程学的深度融合,建立起基于循证医学的智能精准康复新范式。

本文附加文件见电子版。



志谢 本研究得到宁波市科技创新2025重大专项(2022Z147)支持

Acknowledgements This study was supported by the Ningbo Science and Technology Innovation 2025 Major Project (2022Z147)

作者贡献 李明、徐方竹、王滇和徐佳琳参与论文选题和设计或参与资料获取、分析或解释,起草研究论文或修改重要智力性内容。所有作者均已阅读并认可最终稿件,并对数据的完整性和安全性负责。具体见电子版

Author Contributions LI Ming, XU Fangzhu, WANG Dian and XU Jialin participated in brewing and designing experiments, or acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; drafting the work, or revising it critically for important intellectual content. All authors have read and approved the final manuscript, and take responsibility for the integrity and security of the data. See the electronic version for details

数据可用性 本研究未生成任何新数据集,所有分析数据均已公开,并已在文中明确标引

Data Availability This study did not generate any new datasets, all data analyzed are publicly available, and have been properly cited

医学伦理 本研究不涉及人体或动物实验

Ethical Approval This study does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2026. 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(References)

- [1] ONIZUKA N, SWITZER J, MYEROFF C. Management of geriatric elbow injury[J]. *Orthop Clin North Am*, 2021, 52(4): 381-401.
- [2] 李明,童培建,陈华,等.老年脆性骨盆骨折围术期治疗的热点问题[J]. *中华创伤杂志*, 2020, 36(8): 678-685.
LI Ming, TONG Peijian, CHEN Hua, et al. Perioperative hot issues for fragility fractures of the pelvis in the elderly[J]. *Chinese Journal of Trauma*, 2020, 36(8): 678-685. (in Chinese)
- [3] DUCKWORTH A D, CARTER T H, CHEN M J, et al. Olecranon fractures: current treatment concepts[J]. *Bone Joint J*, 2023, 105-B(2): 112-123.
- [4] FAHS A, WALDRON J, AFSARI A, et al. Management of elbow terrible triad injuries: a comprehensive review and update[J/OL]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2024, 32(19): e982-e995.
- [5] MARINELLI A, GRAVES B R, BAIN G I, et al. Treatment of elbow instability: state of the art[J]. *J ISAKOS*, 2021, 6(2): 102-115.
- [6] MASCI G, CAZZATO G, MILANO G, et al. The stiff elbow: current concepts[J]. *Orthop Rev (Pavia)*, 2020, 12(Suppl 1): 8661.
- [7] O'DRISCOLL S W, LIEVANO J R, MORREY M E, et al. Prospective randomized trial of continuous passive motion versus physical therapy after arthroscopic release of elbow contracture[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2022, 104(5): 430-440.
- [8] CRUZ J P, SALAZAR B, VAN NIEKERK M, et al. The use of hinged elbow orthosis following surgical management of terrible triad injuries of the elbow[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2024, 34(3): 1675-1681.
- [9] 黄振明,邓海茵,何友泽,等.上肢康复机器人在脑卒中后不同时期上肢运动功能康复中的应用研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2024, 46(8): 751-755.
HUANG Zhenming, DENG Haiyin, HE Youze, et al. Advancements in upper limb rehabilitation robotics for post-stroke recovery at different stages[J]. *Chinese*

- Journal of Physical Medicine and Rehabilitation**, 2024, 46(8): 751-755. (in Chinese)
- [10] 陈锦锋, 李 颖, 曾建平. 不确定下肢康复机器人自适应主动交互控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(12): 4325-4335.
CHEN Jinfeng, LI Ying, ZENG Jianping. Adaptive active interactive control for lower limb rehabilitation robots with uncertainties[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2021, 52(12): 4325-4335. (in Chinese)
- [11] 杜妍辰, 孟 欣, 程 铭, 等. 上肢康复机器人测试平台结构设计与运动学分析[J]. 中国康复医学杂志, 2025, 40(8): 1208-1213.
DU Yanchen, MENG Xin, CHENG Ming, et al. Structure design and kinematic analysis of upper limb rehabilitation robot test platform[J]. **Chinese Journal of Rehabilitation Medicine**, 2025, 40(8): 1208-1213. (in Chinese)
- [12] ARMAN S, MENEKSEOGLU A K, SEZGIN B, et al. The effects of virtual reality-mediated tendon and nerve gliding exercises in the conservative management of carpal tunnel syndrome: a double-blind randomized placebo controlled trial[J]. **Eur J Phys Rehabil Med**, 2024, 60(3): 458-469.
- [13] CHEN T, CASAS R, LUM P S. An elbow exoskeleton for upper limb rehabilitation with series elastic actuator and cable-driven differential[J]. **IEEE Trans Robot**, 2019, 35(6): 1464-1474.
- [14] 胡新宇, 汤 亮, 潘明铮, 等. 六自由度上肢康复机器人结构设计与仿真[J]. 自动化仪表, 2018, 39(12): 43-47.
HU Xinyu, TANG Liang, PAN Mingzheng, et al. Structure design and simulation of upper limb rehabilitation robot with six degrees of freedom[J]. **Process Automation Instrumentation**, 2018, 39(12): 43-47. (in Chinese)
- [15] 张伟胜, 喻洪流, 黄小海, 等. 一种新型四自由度的上肢康复机器人[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(10): 1202-1208.
ZHANG Weisheng, YU Hongliu, HUANG Xiaohai, et al. A novel four-degree-of-freedom upper limb rehabilitation robot[J]. **Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice**, 2019, 25(10): 1202-1208. (in Chinese)
- [16] HAN K, KIM N H, SHIN D. A novel soft pneumatic artificial muscle with high-contraction ratio[J]. **Soft Robot**, 2018, 5(5): 554-566.
- [17] 阎宏伟, 刘 杰, 白乐乐, 等. 气动肌肉驱动的仿生肘关节康复训练器结构设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(12): 85-92.
YAN Hongwei, LIU Jie, BAI Lele, et al. Structural design of a pneumatic muscle-driven bionic elbow joint rehabilitation trainer[J]. **Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)**, 2024, 38(12): 85-92. (in Chinese)
- [18] 梁 涛, 梁延德, 何福本. 基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(2): 145-148, 153.
LIANG Tao, LIANG Yande, HE Fuben. Design and simulation analysis of a compliant robotic arm based on series elastic actuator[J]. **Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique**, 2020(2): 145-148, 153. (in Chinese)
- [19] 李守忠, 管昀毅, 马 冲, 等. 上肢康复机器人被动变刚度驱动器建模与试验[J]. 机械工程学报, 2024, 60(3): 47-54.
LI Shouzhong, GUAN Yunyi, MA Chong, et al. Modeling and experiment of passive variable stiffness actuator for upper limb rehabilitation robot[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2024, 60(3): 47-54. (in Chinese)
- [20] 钱书文, 郑天江, 沈雯钧, 等. 基于柔性传感器的绳驱动连续体机器人反馈控制[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(8): 87-90.
QIAN Shuwen, ZHENG Tianjiang, SHEN Wenjun, et al. Feedback control of cable-driven continuum robot based on flexible sensor[J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2024, 43(8): 87-90. (in Chinese)
- [21] 王从浩, 朱旭旭, 刘本奇, 等. 绳驱动仿人机器人下肢设计与仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2020(5): 261-264.
WANG Conghao, ZHU Xuxu, LIU Benqi, et al. The design and simulation analysis of humanoid robot lower limbs driven by rope[J]. **Machinery Design & Manufacture**, 2020(5): 261-264. (in Chinese)
- [22] BÜSCHING I, SEHLE A, STÜRNER J, et al. Using an upper extremity exoskeleton for semi-autonomous exercise during inpatient neurological rehabilitation-a pilot study[J]. **J Neuroeng Rehabil**, 2018, 15(1): 72.
- [23] GIJBELS D, LAMERS I, KERKHOFS L, et al. The Armeo Spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study[J]. **J Neuroeng Rehabil**, 2011, 8: 5.
- [24] BIFFI E, MAGHINI C, CAIRO B, et al. Movement velocity and fluidity improve after Armeo®Spring rehabilitation in children affected by acquired and congenital brain diseases: an observational study[J]. **Bio-med Res Int**, 2018, 2018: 1537170.
- [25] SANCHEZ R, REINKENSMAYER D, SHAH P, et al. Monitoring functional arm movement for home-based therapy after stroke[J]. **Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc**, 2004, 2004: 4787-4790.
- [26] 李沛业, 张小栋, 周正正, 等. 下肢康复训练机器人肌电感知患者主动力矩与按需助力控制方法[J]. 机器人技术与应用, 2024(2): 31-36.
LI Peiye, ZHANG Xiaodong, ZHOU Zhengzheng, et al. Myoelectric-sensing-based patient active torque estimation and on-demand assistive control method for lower limb rehabilitation training robots[J]. **Robot Technique and Application**, 2024(2): 31-36. (in Chinese)
- [27] 曹 震, 吕东瀚, 张 勇, 等. 基于 sEMG 信号几何

- 特征的肌肉疲劳分类[J]. **传感器与微系统**, 2024, 43(7): 145-148.
- CAO Zhen, LYU Donghao, ZHANG Yong, et al. Muscle fatigue classification based on geometric features of sEMG signal[J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2024, 43(7): 145-148. (in Chinese)
- [28] 程 斌, 陈家祥, 曹凌云, 等. 柔性触觉传感电子皮肤研究进展[J]. **科学通报**, 2024, 69(20): 2978-2999.
- CHENG Bin, CHEN Jiaxiang, CAO Lingyun, et al. Flexible electronic skin for tactile sensing[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2024, 69(20): 2978-2999. (in Chinese)
- [29] 陈密杰, 王 钰. 上肢康复机器人等速运动控制算法的研究[J]. **控制工程**, 2022, 29(1): 76-82.
- CHEN Mijie, WANG Yu. Control algorithms of isokinetic training process for upper limb rehabilitation robot [J]. **Control Engineering of China**, 2022, 29(1): 76-82. (in Chinese)
- [30] 吴涵宇, 马 旭. 基于变论域模糊比例积分微分控制的介入手术机器人系统研究[J]. **天津理工大学学报**, 2024, 40(2): 70-76.
- WU Hanyu, MA Xu. Research on interventional surgical robot system based on variable theory domain universe fuzzy proportional integral differential control[J]. **Journal of Tianjin University of Technology**, 2024, 40(2): 70-76. (in Chinese)
- [31] LUM P S, REINKENSMEYER D J, LEHMAN S L. Robotic assist devices for bimanual physical therapy: preliminary experiments[J]. **IEEE Trans Rehabil Eng**, 1993, 1(3): 185-191.
- [32] 吴 彤, 李 健, 李国栋, 等. 基于表面肌电信号的上肢康复机器人变阻抗控制技术研究[J]. **电气传动**, 2024, 54(1): 83-91.
- WU Tong, LI Jian, LI Guodong, et al. Research on variable impedance control technology of upper limb rehabilitation robot based on sEMG[J]. **Electric Drive**, 2024, 54(1): 83-91. (in Chinese)
- [33] 刘克平, 孙瑞玲, 李嘉聪. 基于无源性理论的上肢康复机器人人机交互鲁棒控制[J]. **长春工业大学学报**, 2022, 43(S1): 405-412.
- LIU Keping, SUN Ruiling, LI Jiacong. Interaction robust control of upper limb rehabilitation robot based on the passive theory[J]. **Journal of Changchun University of Technology**, 2022, 43(S1): 405-412. (in Chinese)
- [34] AMIRI M S, RAMLI R, IBRAHIM M F. Hybrid design of PID controller for four DoF lower limb exoskeleton [J]. **Appl Math Model**, 2019, 72: 17-27.
- [35] WU Q, WANG X, CHEN B, et al. Development of an RBFN-based neural-fuzzy adaptive control strategy for an upper limb rehabilitation exoskeleton[J]. **Mechatronics**, 2018, 53: 85-94.
- [36] 李国宁, 陶 亮, 孟京艳, 等. 基于交互力模糊识别的上肢康复机器人模式调整控制策略研究[J]. **生物医学工程学杂志**, 2024, 41(1): 90-97.
- LI Guoning, TAO Liang, MENG Jingyan, et al. Research on mode adjustment control strategy of upper limb rehabilitation robot based on fuzzy recognition of interaction force[J]. **Journal of Biomedical Engineering**, 2024, 41(1): 90-97. (in Chinese)
- [37] BEAN B P. The action potential in mammalian central neurons[J]. **Nat Rev Neurosci**, 2007, 8(6): 451-465.
- [38] BUNDY D T, SOUDERS L, BARANYAI K, et al. Contralateral brain-computer interface control of a powered exoskeleton for motor recovery in chronic stroke survivors[J]. **Stroke**, 2017, 48(7): 1908-1915.
- [39] BROKAW E B, MURRAY T, NEF T, et al. Retraining of interjoint arm coordination after stroke using robot-assisted time-independent functional training[J]. **J Rehabil Res Dev**, 2011, 48(4): 299-316.
- [40] 程 帆, 董宇欣. 基于力阻抗模型的上肢康复机器人交互控制系统设计[J]. **计算机测量与控制**, 2021, 29(1): 111-114, 125.
- CHENG Fan, DONG Yuxin. Design of interactive control system for upper limb rehabilitation robot based on force impedance model[J]. **Computer Measurement & Control**, 2021, 29(1): 111-114, 125. (in Chinese)
- [41] 胡继红, 张惠佳, 罗卫红, 等. 虚拟现实技术结合作业疗法对痉挛型偏瘫脑瘫患儿上肢功能康复的影响[J]. **中华物理医学与康复杂志**, 2016, 38(12): 916-919.
- HU Jihong, ZHANG Huijia, LUO Weihong, et al. Virtual reality technology can supplement occupational therapy in improving the upper extremity motor function of children with cerebral palsy[J]. **Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation**, 2016, 38(12): 916-919. (in Chinese)

[本文编辑 余 方 沈 洁]