

可穿戴技术在骨科康复中的应用进展

Application of wearable technology in the rehabilitation of orthopaedic disease

岳雨珊, 李 翀[△]

YUE Yu-shan, LI Chong

江苏省昆山市第一人民医院, 江苏 昆山 215300

【摘要】 随着科技发展, 可穿戴技术已逐渐深入至骨科康复领域。本文通过检索近年来可穿戴技术在骨科康复领域的研究, 简要总结其在骨科退行性疾患、骨科术后及脊髓损伤方面的康复评定及治疗进展, 并分析目前所存在的问题, 提出未来展望, 为可穿戴技术在骨科康复领域的发展提供科学指导。

【关键词】 可穿戴; 骨科; 康复

【中图分类号】 R496

【文献标志码】 B

【文章编号】 1672-6170(2024)05-0189-04

骨科康复是以骨科领域外伤及疾病所致功能障碍为主要研究对象, 是康复医学的重要分支^[1]。目前骨科康复临床工作内容主要涵盖两个方面: 骨科保守治疗患者的康复治疗及骨科手术患者围手术期的康复治疗^[2]。近年来, 可穿戴评估及治疗设备在骨科康复领域的应用受越来越多人关注。可穿戴技术的发展将为骨科康复搭建新平台, 为骨科领域难题解决提供新思路。相较于传统康复治疗, 运用可穿戴技术, 医务人员可更及时、专业、精确及全面的评估使用者的健康状况, 并提供更科学的康复方案, 且尽可能降低医务人员主观因素对评估结果及治疗方案的影响, 显著提升骨科康复诊疗水平^[3,4]。随着体域网、嵌入式、传感器等诸多技术迅速发展, 可穿戴设备逐步进入医疗健康领域, 更深入到骨科康复领域。可穿戴技术主要具有以下优势: 设备操作简单方便; 数据评定客观定量; 使用环境多样选择; 资料存储信息化^[5,6]。本文主要阐述可穿戴技术在骨科康复评定及康复治疗中的实际应用, 并指出目前存在的问题, 及提出未来发展方向。

1 可穿戴技术

可穿戴技术由美国麻省理工学院媒体实验室于 20 世纪 60 年代提出, 该技术旨在将传感器、多媒体及无线通信等技术嵌入进人们衣着及配件中, 支持手势、眼动等多种交互方式^[7,8]。可穿戴设备为

可穿戴技术具体实现方式, 指可穿戴或佩戴在身体上的设备, 共包括三个基础部分, 即传感单元、通信单元及处理单元^[9,10]。随着可穿戴技术迅猛发展, 可穿戴设备形式千变万化, 已由最初智能眼镜、智能手表等逐步发展到智能鞋垫、智能服装、睡眠床垫、步态分析传感器及外骨骼机器人等^[11-14]。可穿戴设备所实现的功能也由简单的生命体征监测拓展到远程健康监护、药物调整、运动指导等, 进而协助更为有效地预防、干预及控制疾病^[15-17]。

可穿戴技术在骨科康复领域中的应用范围涉及早期评估、康复指导、康复复评及远程随访等, 从疾病早期至恢复期, 从院内至院外, 均有运用。伴随智能硬件、互联网、软件支持、数据交互、云端交互等技术发展, 及医患双方对骨科康复认知度提高, 可穿戴技术及设备在骨科康复领域的应用已成为近些年来研究热点之一。

2 可穿戴技术在骨科退行性疾患康复评定及治疗中的应用价值

2.1 康复评定 可穿戴技术主要通过陀螺仪、加速度计、磁力计等各类传感器, 获取骨科退行性疾患人群运动参数, 评估此类人群运动功能, 指导康复治疗。

现有研究进一步证实了可穿戴技术在临床步态分析中的有效性和可靠性。Item-Glatthorn 等的研究显示, 可穿戴步态姿势分析仪与 GAITRite 步态分析仪在测量关键步态参数如步频和步速时, 组内相关系数达到 0.783 以上, 证实了其高可靠性^[18]。此外, Tierney 等通过臂带式传感器与心肺功能测试仪联合评估类风湿关节炎患者的能量消耗, 皮尔逊相关系数值达到 0.852, 显示其良好的精确度^[19]。Walha 等的研究则利用内含惯性测量传感器的袜子对关节炎所致足部损伤者的步态进行分析, 发现组内相关系数值介于 0.625~0.798 之间, 表明中等至良好的可靠性^[20]。这些结果凸显了现代传感器技

【基金项目】 国家重点研发计划项目(编号: 2020YFC2006100); 江苏省老年健康科研项目(编号: LX2021023); 苏州临床重点病种诊疗技术专项(编号: LCZX202024); 昆山市重点研发计划社会发展科技专项(编号: KS1930); 江苏大学医教协同创新基金一般项目(编号: JDYY2023058); 昆山市级科技专项(社会发展)指导性项目(编号: KSZ2301); 昆山市第一人民医院广仁基金科研课题(临床研究专项)重点项目(编号: KRY-YN2022003)。

[△]通讯作者

术在评估和指导退行性疾患患者康复过程中的关键作用,为临床诊疗提供了强有力的科学依据。

2.2 康复治疗 可穿戴技术通过智能手环等设备为骨科退行性疾患患者提供远程康复指导,已成为促进功能恢复的有效工具。这种技术的应用能够有效地协助患者在家中康复训练,同时显著改善其功能障碍。

Perraudin 等研究发现,使用智能手环进行为期 4 周的居家康复训练,不仅提高了训练完成度,还明显缓解了患者的疼痛感和僵硬程度^[21]。此外, Li 等的研究表明,经过八周的远程指导康复训练后,类风湿关节炎患者的日常体育活动时间增加,疼痛感减少,运动功能得到明显改善^[22]。另一项针对膝关节骨性关节炎患者进行的十二周远程康复指导研究也证实了其在增加体育活动时间及改善坐姿指数评分方面的效果^[23]。这些研究结果凸显了智能手环等可穿戴设备在远程康复领域的潜力与实用性,说明这些技术不仅能提供个性化的康复方案,还显著提高患者的康复效果和生活质量。因此,运用可穿戴技术实施远程康复指导对于改善退行性疾患的治疗效果至关重要,有望为更多患者带来显著的健康改善。

3 可穿戴技术在骨科术后康复评定及治疗中的应用价值

3.1 康复评定 可穿戴技术通过陀螺仪、加速度计、磁力计等传感器获取术后运动参数,分析这些参数以评估术后患者的功能恢复,并指导治疗。

近期研究表明,可穿戴技术在术后功能评估中具有高度的可靠性和准确性。例如, De Vroey 等的研究通过对比传感器和传统运动捕捉系统在全膝关节置换术后患者的步态分析中的应用,发现两种方法在运动参数的测量上具有很高的一致性,组内相关系数在 0.826 ~ 0.971 之间,均方根误差值极低,从而证实了传感器评估运动功能的可行性^[24]。同样, Pratt 等的研究也显示,在膝关节前交叉韧带重建术后患者进行单腿负荷任务时,传感器与光电运动捕捉系统所得的运动参数值高度一致,相关系数超过 0.947,传感器的特异性达到 100%,敏感性为 81.2%,进一步验证了其在运动功能评估中的有效性^[25,26]。此外, Huang 等的研究通过对比传感器与等速肌力测试仪在全膝关节置换术后患者的膝关节摆动任务的测量结果,发现在不同角速度下,两种方法所得参数的组内相关系数均超过 0.982,显示出传感器测量数据的高准确性^[27]。这些研究表明,可穿戴技术在术后功能评估和治疗指导中具有显著应用价值。医疗专业人员可以利用这些技

术有效监测患者的恢复进程,并优化治疗方案。

3.2 康复治疗 下肢外骨骼康复机器人作为一种新型可穿戴仿生装置,已在骨科术后康复中显示出显著的应用潜力。这种技术不仅为患者提供必要的支撑保护,还能在康复训练中提供动力支持,从而加速功能恢复。

近期研究表明,使用外骨骼机器人的康复训练相较于传统方法能显著提高运动功能。例如, Yoshikawa 等的研究指出,全膝关节置换术后患者在使用外骨骼机器人进行 8 周运动康复后,步速、屈膝角度和伸膝肌力均有明显改善,证明了外骨骼技术在提高术后恢复效率方面的有效性^[28]。Setoguchi 等的研究也发现,全髋关节置换术后患者在使用外骨骼机器人康复 3 周后,关节活动度和步态显著改善,疼痛感明显减少^[29]。此外, Mrotzek 等的研究进一步证实,相比持续被动运动疗法,使用外骨骼机器人的康复训练更能有效增加膝关节屈曲角度,并显著提升患者的功能评估得分,同时降低疼痛评分^[31]。这些研究集中表明,外骨骼康复机器人不仅能够提供安全的康复环境,还能通过提高关节活动度和减轻疼痛等方式显著提升术后患者的康复质量。因此,外骨骼机器人的进一步研究与开发值得持续关注。

4 可穿戴技术在脊髓损伤康复评定及治疗中的应用价值

4.1 康复评定 可穿戴技术通过集成多种传感器如加速度计、陀螺仪和气压传感器,为脊髓损伤者的康复提供了精确的上下肢活动功能和能量代谢评估。这些技术的应用不仅优化了康复方案的制定,也为临床干预提供了实时监测和评估的可能。

近年来的研究进一步证实了传感器在脊髓损伤康复中的实用性和准确性。例如, Schneider 等指出,传感器在监测日常生活中的上肢及躯干运动功能时,其数据的可重复性随疾病阶段不同而变化,展现了其在不同恢复阶段的高适应性^[32]。Popp 等的比较研究也表明,传感器测得的能量消耗与传统便携式代谢车和生物电阻抗分析仪的结果相比误差较小,验证了其较高的测量准确性^[33]。Lemay 等的研究进一步强调了传感器在追踪治疗进度方面的可靠性,表明同一传感器对同一受试者在两周间隔内的测量结果具有良好的一致性^[34]。此外, Bravi 等的研究发现,在评估颈段脊髓损伤者的上肢活动功能时,传感器与传统量角器的测量结果高度一致,证明了其评估的可靠性和稳定性^[35]。总体而言,这些研究成果共同突显了可穿戴技术在脊髓损伤康复中的重要作用,为患者提供了精准和个性化

的康复支持,从而显著优化了治疗效果。随着技术的不断进步和研究的深入,基于传感器的康复评估方法预计将在临床上得到更广泛的应用和认可,有效提升康复治疗效率和质量。

4.2 康复治疗 可穿戴技术,尤其是肢体康复外骨骼机器人,在脊髓损伤者的康复进程中展现出显著潜力。这些高级外骨骼机器人不仅促进了肢体和躯干运动功能的恢复,还辅助改善了患者的二便功能。

研究表明,经过外骨骼机器人的辅助训练,脊髓损伤者的运动功能有了明显改善。例如,Jansen 等的研究中,患者在 12 周的机器人辅助训练后,步行时间、距离和速度等指标均有显著提升,体现了外骨骼机器人在提高运动效率方面的有效性^[36]。此外,Okawara 等的研究也观察到脊髓损伤者在接受 20 个疗程的外骨骼机器人训练后,躯干肌力显著增强,进一步说明了外骨骼技术在加强核心肌群方面的重要作用^[37]。Brinkemper 等的研究进一步证实,通过 12 周的外骨骼机器人训练,患者的关节屈曲角度、步长和步速等运动参数得到了显著改进,表明外骨骼技术对于提升关节运动范围和步行能力具有重要影响^[38]。在脊髓损伤者的康复中,外骨骼机器人的应用不仅可提高运动功能,还可有效改善患者二便功能,如同年同组研究人员的研究报告所示,患者在接受 12 周的训练后,Wexner 失禁评分和 Cleveland 便秘评分均有所下降,显示了外骨骼技术在改善患者生活质量方面的潜力^[39]。综上所述,外骨骼机器人在脊髓损伤康复中的广泛应用展示了其巨大的康复潜能,从提升运动功能到改善日常生活能力,为患者提供全面的康复支持。随着技术的进一步发展,预计这些设备未来将在康复医学中扮演越来越重要的角色。

5 可穿戴技术存在的问题及展望

在骨科康复领域,可穿戴设备面临多项挑战。首先,这些设备由于需要长期监测、存储及传输数据,对电池性能的要求较高,常出现续航能力不足的问题,影响正常使用。其次,肢体康复外骨骼机器人等设备,其佩戴和操作过程繁琐且复杂,限制了其广泛应用。同时,尽管这些设备在骨科疾患康复评定中的精确度基本可接受,但评定指标种类和数据分析方法仍需优化和提升。最后,目前关于可穿戴技术的临床研究较少,且多存在样本量小、缺乏对照组等问题,主要聚焦于智能手环和肢体康复外骨骼机器人。这些因素表明,需要更多高质量的临床研究来验证并改进这些技术,以促进其在骨科康复中的有效应用。

为提升可穿戴设备的续航能力和用户体验,未来工作需集中在通过技术创新降低设备功耗、改良电池性能,以及优化工艺设计和使用高质量材料。同时,增强评估精准性也是关键,这包括优化传感器配置、完善数据评价指标和分析方法,并采用金标准进行对照研究。此外,为确保可穿戴技术在骨科康复评估及治疗中的应用有效性,必须增加临床研究数量并完善临床研究设计。具体措施包括增加样本量、完善对照组设置、丰富研究的疾病类型和设备种类。通过这些高质量临床研究,可以为临床实践提供可靠的科学指导。

6 小结

可穿戴技术具有便捷化、智能化、微型化的特点,为骨科康复领域的发展提供新思路。未来随着技术发展及高质量临床研究的不断开展,可穿戴设备将在骨科康复领域得到越来越广泛的应用,进而影响康复医疗模式。

【参考文献】

- [1] He Q, Ge G, Wu Q, et al. Application value of the workshop practice teaching method based on target-oriented study modules on the internet in orthopedic rehabilitation[J]. *J Healthc Eng*, 2022, 2022:5166219.
- [2] Rohringer M, Kellerer JD, Fink C, et al. The role of health literacy in orthopaedic rehabilitation after total knee and hip arthroplasty: A scoping review[J]. *Int J Orthop Trauma Nurs*, 2021, 40:100793.
- [3] Braun BJ, Grimm B, Hanflik AM, et al. Wearable technology in orthopedic trauma surgery-An AO trauma survey and review of current and future applications[J]. *Injury*, 2022, 53(6):1961-1965.
- [4] Zarowin J, Warnick E, Mangan J, et al. Is wearable technology part of the future of orthopedic health care? [J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(3):99-101.
- [5] Loncar-Turukalo T, Zdravevski E, Machado da Silva J, et al. Literature on wearable technology for connected health: Scoping review of research trends, advances, and barriers [J]. *J Med Internet Res*, 2019, 21(9):e14017.
- [6] Hasan A, Klintworth K, Hajat C. Wearable technology and health improvement[J]. *Occup Med (Lond)*, 2021, 71(2):53-55.
- [7] Hessels RS, Niehorster DC, Holleman GA, et al. Wearable technology for "Real-World Research": realistic or not? [J]. *Perception*, 2020, 49(6):611-615.
- [8] Godfrey A, Hetherington V, Shum H, et al. From A to Z: wearable technology explained[J]. *Maturitas*, 2018, 113:40-47.
- [9] Lee JH, Lee JI, Kim DH, et al. Validation of a gyroscope-based wearable device for real-time position monitoring of patients in a hospital[J]. *Technol Health Care*, 2021, 29(4):843-848.
- [10] Cheng Y, Wang K, Xu H, et al. Recent developments in sensors for wearable device applications [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2021, 413(24):6037-6057.
- [11] Chen D, Asaekheybari G, Chen H, et al. Ubiquitous fall hazard identification with smart insole[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2021, 25(7):2768-2776.

- [12] Wang JJ, Chang WT, Wu WH, et al. Applying noncontact sensing technology in the customized product design of smart clothes based on anthropometry[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(23):7978.
- [13] Nguyen TQ, Young JH, Rodriguez A, et al. Differentiation of patients with balance insufficiency (vestibular hypofunction) versus normal subjects using a low-cost small wireless wearable gait sensor [J]. *Biosensors (Basel)*, 2019, 9(1):29.
- [14] Pignolo L, Servidio R, Basta G, et al. The route of motor recovery in stroke patients driven by exoskeleton-robot-assisted therapy: A path-analysis[J]. *Med Sci (Basel)*, 2021, 9(4):64.
- [15] Park YS, An CS, Lim CG. Effects of a rehabilitation program using a wearable device on the upper limb function, performance of activities of daily living, and rehabilitation participation in patients with acute stroke[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(11):5524.
- [16] Pardamean B, Soeparno H, Budiarto A, et al. Quantified self-using consumer wearable device: predicting physical and mental health [J]. *Health Inform Res*, 2020, 26(2):83-92.
- [17] Kim NH, Ko JS. Introduction of wearable device in cardiovascular field for monitoring arrhythmia [J]. *Chonnam Med J*, 2021, 57(1):1-6.
- [18] Item-Glatthorn JF, Casartelli NC, Petrich-Munzinger J, et al. Validity of the intelligent device for energy expenditure and activity accelerometry system for quantitative gait analysis in patients with hip osteoarthritis[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012, 93(11):2090-2093.
- [19] Tierney M, Fraser A, Purtill H, et al. Study to determine the criterion validity of the SenseWear Armband as a measure of physical activity in people with rheumatoid arthritis[J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2013, 65(6):888-895.
- [20] Walha R, Lebel K, Gaudreault N, et al. The accuracy and precision of gait spatio-temporal parameters extracted from an instrumented sock during treadmill and overground walking in healthy subjects and patients with a foot impairment secondary to psoriatic arthritis[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(18):6179.
- [21] Perraudin C, Illiano VP, Calvo F, et al. Observational study of a wearable sensor and smartphone application supporting unsupervised exercises to assess pain and stiffness[J]. *Digit Biomark*, 2018, 2(3):106-125.
- [22] Li LC, Feehan LM, Xie H, et al. Efficacy of a physical activity counseling program with use of a wearable tracker in people with inflammatory arthritis: A randomized controlled trial [J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2020, 72(12):1755-1765.
- [23] Li LC, Feehan LM, Xie H, et al. Effects of a 12-week multifaceted wearable-based program for people with knee osteoarthritis: randomized controlled trial[J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2020, 8(7):e19116.
- [24] De Vroey H, Staes F, Weygers I, et al. The implementation of inertial sensors for the assessment of temporal parameters of gait in the knee arthroplasty population [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2018, 54:22-27.
- [25] Pratt KA, Sigward SM. Detection of knee power deficits following anterior cruciate ligament reconstruction using wearable sensors[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2018, 48(11):895-902.
- [26] Pratt KA, Sigward SM. Inertial sensor angular velocities reflect dynamic knee loading during single limb loading in individuals following anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Sensors (Basel)*, 2018, 18(10):3460.
- [27] Huang YP, Liu YY, Hsu WH, et al. Progress on range of motion after total knee replacement by sensor-based system [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(6):1703.
- [28] Yoshikawa K, Mutsuzaki H, Sano A, et al. Training with Hybrid Assistive Limb for walking function after total knee arthroplasty[J]. *J Orthop Surg Res*, 2018, 13(1):163.
- [29] Setoguchi D, Kinoshita K, Kamada S, et al. Hybrid Assistive Limb improves restricted hip extension after total hip arthroplasty [J]. *Assist Technol*, 2022, 34(1):112-120.
- [30] Yoshioka T, Kubota S, Sugaya H, et al. Feasibility and efficacy of knee extension training using a single-joint hybrid assistive limb, versus conventional rehabilitation during the early postoperative period after total knee arthroplasty [J]. *J Rural Med*, 2021, 16(1):22-28.
- [31] Mrotzek SJ, Ahmadi S, von Glinski A, et al. Rehabilitation during early postoperative period following total knee arthroplasty using single-joint hybrid assistive limb as new therapy device: a randomized, controlled clinical pilot study[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2022, 142(12):3941-3947.
- [32] Schneider S, Popp WL, Brogioli M, et al. Reliability of wearable-sensor-derived measures of physical activity in wheelchair-dependent spinal cord injured patients[J]. *Front Neurol*, 2018, 9:1039.
- [33] Popp WL, Richner L, Brogioli M, et al. Estimation of energy expenditure in wheelchair-bound spinal cord injured individuals using inertial measurement units[J]. *Front Neurol*, 2018, 9:478.
- [34] Lemay JF, Noamani A, Unger J, et al. Using wearable sensors to characterize gait after spinal cord injury: evaluation of test-retest reliability and construct validity[J]. *Spinal Cord*, 2021, 59(6):675-683.
- [35] Bravi R, Caputo S, Jayousi S, et al. An inertial measurement unit-based wireless system for shoulder motion assessment in patients with cervical spinal cord injury: a validation pilot study in a clinical setting[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(4):1057.
- [36] Jansen O, Schildhauer TA, Meindl RC, et al. Functional outcome of neurologic-controlled HAL-Exoskeletal neurorehabilitation in chronic spinal cord injury: a pilot with one year treatment and variable treatment frequency [J]. *Global Spine J*, 2017, 7(8):735-743.
- [37] Okawara H, Tashiro S, Sawada T, et al. Neurorehabilitation using a voluntary driven exoskeletal robot improves trunk function in patients with chronic spinal cord injury: a single-arm study [J]. *Neural Regen Res*, 2022, 17(2):427-432.
- [38] Brinkemper A, Aach M, Grasmücke D, et al. Improved physiological gait in acute and chronic SCI patients after training with wearable cyborg Hybrid Assistive Limb [J]. *Front Neurobot*, 2021, 15:723206.
- [39] Brinkemper A, Grasmücke D, Yilmaz E, et al. Influence of locomotion therapy with the wearable Cyborg HAL on bladder and bowel function in acute and chronic SCI patients[J]. *Global Spine J*, 2023, 13(3):668-676.

(收稿日期:2023-10-26;修回日期:2024-03-10)

(本文编辑:侯晓林)