

儿童康复机器人控制系统研究现状与发展趋势

郭进^{1,2*}, 李慧^{1,2}, 唐心意^{1,2}, 程铭^{1,2}, 李明^{1,2}, 孟巧玲^{1,2}, 喻洪流^{1,2}

¹上海理工大学康复工程与技术研究所单位, 上海

²上海康复器械工程技术研究中心, 上海

收稿日期: 2023年3月23日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月9日

摘要

经过多年的发展, 面向成人的康复机器人已在临床上得到实际应用, 针对多种肢体障碍而设计的康复机器人在成年患者群体中取得了较好的治疗和康复效果。然而, 专门为儿童患者群体所设计的康复机器人依然处于发展的起步阶段, 儿童康复机器人所搭载的控制系统也处于探索、改进的过程中, 应用于成人康复机器人上的驱动系统、感知系统以及人机交互系统也随之产生出新的发展思路与应用前景。本文通过对国内外儿童康复机器人控制系统研究进行综述, 总结不同类型儿童康复机器人驱动方式、感知技术、控制策略、康复训练的应用特点, 探讨运动控制、智能控制、信息控制的技术重点, 展望国内同类型研究的发展方向。

关键词

儿童, 康复机器人, 肢体障碍, 控制系统

Research Status and Development Trend of Control System of Children Rehabilitation Robot

Jin Guo^{1,2*}, Hui Li^{1,2}, Xinyi Tang^{1,2}, Ming Cheng^{1,2}, Ming Li^{1,2}, Qiaoling Meng^{1,2}, Hongliu Yu^{1,2}

¹Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai

Received: Mar. 23rd, 2023; accepted: May 29th, 2023; published: Jun. 9th, 2023

Abstract

After years of development, adult-oriented rehabilitation robots have been maturely applied in

*通讯作者。

文章引用: 郭进, 李慧, 唐心意, 程铭, 李明, 孟巧玲, 喻洪流. 儿童康复机器人控制系统研究现状与发展趋势[J]. 软件工程与应用, 2023, 12(3): 393-401. DOI: 10.12677/sea.2023.123039

clinical practice. Rehabilitation robots designed for a variety of limb disorders have achieved good treatment and rehabilitation effects in adult patients. However, rehabilitation robots designed for children are still in the initial stage of development, and the control system carried by children's rehabilitation robots is also in the process of exploration and improvement. The driving system, perception system and human-computer interaction system applied to adult rehabilitation robots also generate new development ideas and application prospects. This paper summarizes the research on the control system of rehabilitation robots designed for children at home and abroad. It summarizes the application characteristics of different types of rehabilitation robots designed for children in terms of driving methods, perception technology, control strategy and rehabilitation training, discusses the technical focus of motion control, intelligent control and information control, and looks forward to the development direction of similar research in China.

Keywords

Children, Rehabilitation Robot, Physical Barriers, Control System

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

肢体障碍(Physical Impairment)是指人体因器官损伤或功能缺陷而导致的肢体功能丧失、运动困难,肢体障碍给患者的个人日常生活和社会活动带来了极大的不便。如今在中国,患有肢体障碍病症的人数已超过了 2000 万,其中患有肢体障碍的儿童已经超过 500 万[1]。临床上对于肢体障碍这种病症往往采用以物理治疗为主的综合治疗方法。

随着科学技术的蓬勃发展和医疗技术的不断进步,用于治疗肢体障碍的康复机器人被首先应用在成人患者身上,这是一种以现代康复医学为基础,结合现代工程技术(计算机、机器人、人工智能等)形成的一种用于人体功能辅助或康复治疗的康复设备[2]。康复机器人在肢体障碍患者的日常生活和康复治疗过程中均取得了良好的效果。因此,针对各类型康复机器人的研究成为近些年的关注热点。与此同时,对于患有肢体障碍的儿童,一直以来都主要采用传统的物理治疗方法,在康复训练的过程中始终都需要具有丰富经验的康复医师介入,这不仅受限于医师人力,也受限于治疗成本,因而实际治疗效果往往不能达到预期。而康复机器人在成年患者群体中的成功应用也让这种先进的康复设备走进儿童患者群体,这种特殊的物理治疗方法也采用了不同的康复训练模式,其借助非侵入性机器人设备帮助肢体障碍的患儿恢复运动功能[3]。儿童康复机器人辅助训练通过提出目标导向的任务来提高治疗依从性。与传统疗法相比,儿童康复机器人辅助治疗更加灵动,因为这种康复设备主要进行功能性训练,动作准确且集中而不是没有目标的重复性动作。此外,机器人训练器减少了传统疗法的物理负荷和成本,同时集成了新的系统来客观地监测治疗的进展,因此,治疗的次数、频率、强度以及最终的积极影响通常都会增加。不同于成人康复机器人,这些针对肢体障碍患儿的疗法也对机器人的整体控制系统提出了新的要求与应用场景。本文主要介绍国内外儿童康复机器人控制系统的研究现状,探讨其中得到应用的关键技术并展望未来的发展趋势。

2. 研究现状

儿童康复机器人作为一种康复辅助治疗设备,在临床中的应用非常广泛。本文按照人体作用部位将

儿童康复机器人分为上肢康复机器人和下肢康复机器人进行介绍。

2.1. 上肢康复机器人

上肢康复机器人主要用于治疗患儿的上肢功能障碍，能够对单关节或多关节进行训练，按照作用机制可分为悬吊式、牵引式和外骨骼式三种。

2.1.1. 悬吊式上肢康复训练机器人

悬吊式上肢康复训练机器人的主体由连杆及绳索机构所构成，患儿的前臂可通过线缆驱动的末端执行机构进行辅助康复训练，患儿的上肢在减重的情况下可针对性的进行各种位置、角度的主、被动训练[4]。意大利帕多瓦大学研发了一款悬吊式上肢康复机器人 NeRebot，除了用于治疗中风后上肢损伤的成人款外，针对儿童患者，也能够进行上肢功能障碍的辅助治疗[5]。该机器人采用悬吊式线驱动，可执行前臂的屈伸，肩关节旋前和旋后、内收和外展，以及旋转运动。在控制系统方面，该机器人基于模块化的设计理念，分别由滑台模块、悬吊系统模块、支撑模块、以及安全功能模块构成，在主要的悬吊系统模块中，则集成了步进电机与驱动绳。NeRebot 通过线驱动带动患儿手臂进行连续路径作业模式，步进电机的位置输出则依靠 PWM 波进行角度定位及调速，运动精度很高，但人机交互依赖悬吊系统，只能进行完全被动的训练。日本大阪大学研发的悬吊式上肢机器人 PLEMO 采用了关节的制动扭簧来进行驱动，并借助电流变液制动器改变训练阻力[6]。在控制系统方面，PLEMO 采用主动和被动训练模式结合的控制策略，具有自适应迭代学习能力，并与虚拟现实技术相结合，大大提高患儿在进行康复训练时的积极性。为解决主动训练过程相较于被动训练模式存在的人机交互力响应速度慢，运动控制精度较低的问题，PLEMO 还搭载了基于力的阻抗控制算法的力控制器，这种技术的应用关键在于如何处理好运动过程中力、速度及位置的误差，需要非常精确的动力学模型作为理论基础。

2.1.2. 牵引式上肢康复训练机器人

牵引式上肢康复训练机器人的主体由连杆或串联机构所构成，对上肢功能障碍患儿的前臂提供一定程度的引导支撑，使患儿按照预先制定的运动轨迹进行主、被动训练[7]。ArmeoSpring Pediatric 是由瑞士 Hocoma 公司研制的一款牵引式上肢康复训练机器人，专门用于治疗儿童上肢功能障碍[8]。该机器人可提供实时的运动反馈与评估，可对从肩关节到手掌部位的完整运动链进行治疗，并可以根据患儿的运动情况自动提供辅助。ArmeoSpring Pediatric 拥有一整套的主动式人机交互模式，可实时跟踪定位患儿手臂并进行坐标转换，再由正、逆解及轨迹规划计算出机械臂各个关节的运动参数，这也是目前绝大多数上肢康复训练机器人轨迹规划研究的重点。早期的有源康复机器人，在运动控制的选择上几乎都采用路径规划，这种控制方式仅考虑起始点与目标点之间的路径，并不考虑患者使用过程中运动参数的变化，因而对身体机能的恢复效果非常有限，大多只能归类为辅助设备，而脱胎于工业机器人的轨迹规划控制方式能够对运动中参数变化、时序均给予反馈，对于不同病症阶段的患者都能起到很好的训练效果。因此，由于不同康复阶段的患儿运动特性的不同，一套完整的轨迹规划更具针对性和精确性。比利时 AXINESIS 公司研制了一款牵引式上肢康复训练机器人 REAplan [9]，该机器人的整体控制系统设计是基于力反馈与位置反馈，因此在控制方式上能够同时结合力控制与位置控制的特点，通过检测末端交互力来调整电机输出力矩，实现精确的力控制。在实际应用中，REAplan 将多轴力矩传感器布置在机械臂末端，能够直接检测到作用力信息，然而由于驱动端远离机械臂末端，两者之间机械本体的惯性影响无法避免，力控制的动态性能受到限制，响应速度也较慢。

2.1.3. 外骨骼式上肢康复训练机器人

外骨骼式上肢康复训练机器人的设计依据是人体上肢关节独特的运动机制，符合人体仿生学。在康

复训练过程中,其特殊的机械结构可以贴合患儿的上肢,带动患儿进行上肢的主、被动训练[10]。RUPERT 是美国亚利桑那大学研制的一款外骨骼式上肢康复机器人[11],其采用表面肌电信号传感器采集人体上肢各关节肌电信号,并将采集到的肌电信号进行处理使机器人将患儿的手臂动作识别为预先设定的上肢运动分类器中的运动,从而带动患儿手臂进行康复训练,并保留单次训练中上肢运动的特征值,从而在后续的训练中通过神经网络逐步改善患儿上肢运动功能。目前绝大多数外骨骼式康复训练机器人的研究也逐渐引入神经网络,这是一种模仿生物神经网络行为特征,采用分布式的方法对各种输入信息进行处理算法数学模型,与大多数儿童康复机器人所应用的单一位置或力交互算法相比,神经网络具有自学习、自适应的特点,使外骨骼与人体运动的肢体控制信号相匹配,提高运动性能的同时,也能增强对不同类型患儿的适应性,而应用单一算法仅能提升单一场景下的某种性能。苏黎世大学针对儿童手神经障碍患者研制了一款外骨骼式上肢康复机器人 PEXO [12],这是一款手部外骨骼机器人,针对患儿群体的独特需求对成人款进行了设计修改。PEXO 由手持模块和背部模块构成,其中背部模块上集成了电子元件、电机以及电池,整体的硬件集成度很高。PEXO 通过线缆驱动手部执行模块进行运动,预先对患儿手部功能进行评估后,可实时反馈检测患儿手部各关节运动参数,同时结合虚拟现实技术搭建符合儿童患者的康复训练场景,虚拟现实技术是目前很多儿童康复机器人研究的另一大热点,这种技术原本用于训练飞行员,但虚拟现实技术提供的逼真的三维多感官虚拟世界使其同样适用于康复阶段的患儿,与常规的现实康复环境相比,虚拟现实技术能够提供各种感官信息,同时对人体头、眼、肢体的运动跟踪系统能极大地增强参与感,引导患儿自主参与康复训练,提高康复训练效果。

2.2. 下肢康复机器人

下肢康复机器人主要用于治疗患儿的下肢功能障碍,能够提供各种类型步态训练,帮助患儿恢复行走能力,按照患儿训练时的运动形式可分为固定式和移动式两种。

2.2.1. 固定式下肢康复训练机器人

固定式下肢康复训练机器人专注于引导患儿肢体运动,以便从治疗和功能角度获得最佳的康复训练效果。这种康复设备的训练目标是使患儿肌肉得到有效强化,以及恢复关节的灵活性和运动协调性[13]。Lokomat 是一款由瑞士 Hocoma 公司研制的固定式下肢康复训练机器人[14],其结合了静态减重系统、弹簧式被动动态减重系统以及主动动态减重系统,在患儿进行康复训练时能有效减少因体重对患儿下肢的压迫,同时也能随着步态运动的推进自适应调整减重程度。步态控制策略上 Lokomat 采用的是参考轨迹自适应控制,控制台采集患儿穿戴 Lokomat 进行康复训练的下肢关节运动参数,并进行反馈处理,将实际的步态运动轨迹与参考系中根据运动功能分级而生成的标准步态轨迹进行对照,对患儿的下肢运动轨迹进行自适应修正,从而实现完整可控的康复训练模式。加拿大 Trexo Robotics 公司研制了一款固定式下肢康复训练机器人 Trexo 用于对脑瘫患儿进行一致、精确和重复的强化步态训练[15]。Trexo 采用了基于位置的控制策略,可进行步态轨迹控制和骨盆控制,布置在关节部位的传感器能够准确获取患儿的主动运动意图,在避免患儿肢体因痉挛与机器产生对抗,造成二次伤害的前提下,矫正患儿的步态运动轨迹,提供辅助行走力矩,实现可控的主动式交互控制。LokoHelp 作为一款由德国 LokoHelp 公司研制的固定式下肢康复训练机器人[16],本体高度模块化,由悬吊减重系统、跑步机以及腿部矫形器组成,功能上除了基础的步态康复训练,LokoHelp 还为患儿提供了上下坡训练,控制策略上采用基于位置的控制模式,训练前能够预先设定特定的步幅、步速、离地距离等参数,从而在训练过程中输出固定的步态运动轨迹,同时不同于其他产品,LokoHelp 还能针对患儿踝关节进行固定轨迹的运动,形成模式化的感觉输入。上述三种固定式下肢康复训练机器人均采用了基于位置的导纳控制模式,对于患儿的步态轨迹能够进行很好的纠正,然而缺乏力控制也使得患儿的主动运动意图无法得到有效的利用,因此目前儿童康复机器人

的控制系统研究重点大多集中于如何实现力位混合控制。

2.2.2. 移动式下肢康复训练机器人

移动式下肢康复训练机器人的特点在于,在进行患儿下肢的主、被动康复训练的同时,还可以辅助患儿自由行走,这类机器人体积及结构较为轻巧[17]。艾动 AiLegs 是一款由北京大艾机器人科技有限公司研制的下肢外骨骼康复训练机器人[18],其融合多种传感器,实时监测并采集穿戴者的关节运动角度、角速度、加速度等姿态信息,信号反馈并进行融合处理后反馈给控制器进行不同训练场景下的步态规划,在这种控制模式下,穿戴者主动的运动信息作为输入量输入到 AiLegs 的处理器中进行融合解析处理,随后个性化的步态轨迹作为输出量反映到机器人的关节驱动单元,这种自适应控制器解决了单纯靠位置控制或力控制的实际轨迹精确性不足问题,并且患儿的步态参数能够通过机器学习来改善后续的步态训练,提高了康复训练效果。日本筑波大学针对患有下肢功能障碍的儿童群体研制了一款穿戴式下肢外骨骼康复机器人 HAL [19],作为成人款产品的小尺寸版本,HAL 搭载了针对儿童患者群体的安全功能检测装置。在控制策略方面,HAL 实时采集穿戴者的表面肌电信号,分析穿戴者的主动运动意图,经过处理和判断后,发出控制指令,使得机器关节位置产生一定的辅助力矩,而不会压迫穿戴者的患肢,增加舒适度,此外 HAL 还采集并分析穿戴者的足底压力信号,调整电机输出力矩,降低足部落地冲击力,增加康复训练过程中的行走稳定性。日本 Honda 公司推出了一款髌关节外骨骼机器人 HWA [20],用于步态训练,辅助髌关节屈伸运动,在步态训练过程中引导髌关节运动。HWA 采用小型化的驱动系统,运用柔性控制来确保穿戴者步态训练时的稳定性。在步态训练过程中,HWA 通过采集穿戴者髌关节的角度、角速度信息,确定穿戴者的运动状态,再发出运动指令,使髌关节电机提供一定的辅助力矩,同时控制髌关节的运动角度,引导穿戴者按照正常的步态轨迹行走,并且 HWA 还能准确识别多种包括起立、坐下、上下坡等不同的下肢运动任务,应用的场景丰富。可以看出,目前移动式下肢康复训练机器人的控制策略研究发展出智能化学习与传感器实时监测两种路线,智能化学习的优势在于其自适应的特点,能够在训练过程中不断进行预测学习,目前研究中的智能化学习主要包括神经网络、机器学习和深度学习,其中神经网络通过识别处理人工预先设置的训练特征,建立特征之间的系统关系从而在训练过程中处理运动信息;机器学习的自适应特点来源于对多次训练效果的不断积累,通过对预先设置的训练特征不断监测与处理以达到最佳的训练效果;而深度学习则是一种由机器人控制系统自行对训练过程中的运动特征进行提取与优化的方法,结合数据库能够做到对训练过程中细微的运动特征产生反馈,拥有能够处理大量运动数据的高扩展性。传感器的实时监测面对复杂的运动训练时更具实时性的优势,但在患儿长期的康复训练中,难以处理不同阶段运动特性的变化。

3. 关键技术分析

儿童康复机器人是一种将交互智能与机械结构相结合的人机交互式康复治疗设备。涉及领域涵盖了机械、电子、计算机、控制理论、仿生学、生物医学、人机交互以及康复医学等等[21]。经过了多年的发展,如今儿童康复机器人技术已趋近成熟,绝大部分都主要由机械系统、驱动系统、感知系统以及主控制系统四大部分组成,而驱动方式、感知技术、控制策略及训练模式等技术成为儿童康复机器人研发过程中的关键[22]。

3.1. 驱动方式

儿童康复机器人的驱动方式种类繁多,目前应用较多的驱动方式主要包括电机驱动、液压驱动、气压驱动、线缆驱动和人工气动肌肉驱动等[23]。不同的驱动方式也影响着控制方案的制定,通常在保证机器人输出力矩满足需求的前提下,要求整体的驱动系统传动效率高、结构紧凑、轻量化且响应快速。在

便携性要求较高的儿童康复机器人设计中,电机驱动的应用较多,其利用电机转子通过减速器带动相应的关节旋转,或通过连杆机构将电机输出的旋转运动转化为推杆的直线运动,推动相应的关节运动[24],这种驱动方式运动精度高、响应快速、驱动过程无污染等优点,但同时由于其瞬时输出功率较大,导致系统惯性较大,容易受外部负荷影响;对于固定式儿童康复机器人或是负载需求较大的场合,液压驱动或气压驱动更受青睐,这两种驱动方式原理类似,均使用液压缸或气压缸中密封活塞的来回伸缩运动用于驱动相应的关节转动[25]。虽然原理类似,但在实际的应用中,由于液压驱动的体积较大,功率质量比更大,稳定性较高,可靠性也较高,易受温度影响,因此多用于高负载、温度变化较小的固定式儿童机器人;相比之下,气压驱动的体积更小,驱动过程无污染,安全性更高,然而其功率质量比小,运动精度较低,稳定性不足,因此多用于可移动的轻型机器人平台;线缆驱动排布灵活,占用空间小,适用于空间狭小且运动自由度多的场合,通常合理的排布是将质量较大的驱动器布置在远离末端执行器的位置[26],这样可以减轻末端执行器的惯量,提升机器人整体的动态性能,然而这种驱动方式带负载能力较弱,传动效率较低,同时可靠性也较低;人工气动肌肉驱动使用气动人工肌肉在关节处的收缩运动,使关节产生转动,相较于传统气压驱动提高了传动效率和运动精度,稳定性也有所提高,是一种新型的柔性驱动方式[27],但同时也对控制方案的制定提出了更高的要求。

3.2. 感知技术

在儿童康复机器人的康复训练过程中,感知系统需要实时监测患儿的运动参数或生物信号并及时反馈到主控制系统中进行处理分析,再对驱动系统发出相应的运动指令[28]。因此,高灵敏度、高准确度且容错率较高的感知系统是机器人做出快速、准确响应的前提。目前儿童康复机器人感知系统技术主要基于物理量感知和生物量感知。其中基于物理量的感知技术主要对患儿关节角度、关节角速度、关节角加速度、关节力矩以及足底压力等进行监测[29],向主控制系统反馈的主要是运动学信息与力信息;基于生物量的感知技术主要监测表面肌电信号、肌力信号和脑电信号等[30],反馈的主要是患儿的生物特征信息,包括人体肌肉收缩反映出的神经肌肉活动,肌肉力量信息反映出的肌力情况,脑神经组织的电生理活动反映出的运动意图与神经系统活跃度等。物理量感知技术直接反映了患儿的实时运动状态,具有更好的确定性,并且信号的提取和处理更加稳定可靠,多数需要带领患儿进行被动康复训练的儿童康复机器人都依赖物理量感知技术采集的运动学信息与力信息,以保证运动的正确性;生物量感知技术则反映患儿肢体的主观运动意图,有利于恢复患者神经系统对肢体的控制功能,采用主动控制方式或主被动混合控制方式的儿童康复机器人往往都需要患儿的肌肉电信号等生物特征信息来判断主观运动意图,然而这种信号提取困难,抗干扰能力差,因此在实际运用中局限性较高。

3.3. 控制策略

儿童康复机器人虽然种类繁多,但都需要保证在康复训练过程中的正确性及患儿的舒适性,因此具有针对性的运动控制策略,可对患儿实时的运动参数信息或生物信息进行分析处理,不仅可以实现机器人的精准控制,还可以有效避免因痉挛、肌张力变化对患儿造成的二次伤害。控制策略的种类划分具有多个标准,根据获取患儿运动意图所使用的信号不同,可分为基于位置的控制、基于力的控制、基于生物信号的控制等[31]。其中,基于位置的控制策略可分为轨迹跟踪控制、骨盆控制等[32];基于力的控制策略可分为阻抗控制、力/位混合控制、灵敏度放大控制、零力矩点控制、地面反作用力控制等[33];基于生物信号的控制策略可分为基于表面肌电信号的控制、基于脑电信号的控制等。其中,基于位置的控制方式主要是对患儿训练中的肢体运动位置进行精确控制,多适用于无法独立完成肢体动作的患儿;基于力的控制方式主要是对训练过程中人体与机器人之间的交互力进行监测并处理,多用于对患儿进行辅

助或是锻炼肢体机能；基于生物信号的控制方式主要是采集患儿运动过程中的生物电信号，作为判断患儿运动意图的依据，能够很好地重塑患儿的受损神经功能。此外，近些年来随着科学技术的发展，儿童康复机器人的智能化程度日益提高，因此智能控制策略也逐渐成为研究热点，如今已进行应用的智能控制策略主要基于神经网络、模糊控制及机器学习等[34]。不同标准下的控制策略大同小异，都是对感知技术、通讯技术、算法、计算机技术及信息处理等技术的高度融合，均是為了实现对患儿肢体的实时监测与运动意图判断，同时及时向机器人发出控制指令以达到精准控制。目前，随着技术的成熟，儿童康复机器人的性能需求逐步提高，而单一的控制理论已无法满足，只有融合多种控制策略，提高智能化水平才能有效地提高机器人的性能。

3.4. 训练模式

儿童康复机器人需要带动或协助患儿进行康复训练，因此多是被动或半被动方式，不同的方式对应着患儿不同的病症时期，因此训练模式也主要分为被动训练、助力训练、主动训练以及阻抗训练等[35]。在康复的初期，患儿的肢体无法产生任何主动力，因此需要完全由机器人带动进行被动康复训练；渡过康复的初期后，患儿的肢体能够产生一定的主动运动力，但仍不足以进行运动，需要由机器人提供主导控制，辅助患儿进行助力康复训练；当来到康复的中、后期时，患儿的肢体已能够产生足够的主动力，此时患儿的主观运动意图成为主导，机器人按需提供一定的辅助力，帮助患儿完成更加复杂的主动康复训练；当患儿已基本恢复运动能力，需要增强相应的肌肉力量时，机器人可通过阻抗装置提供反向阻力来训练肢体能力，进行阻抗训练。针对患儿不同的肢体部位、特性、康复阶段应采取相对应的训练模式，逐步恢复患儿的肢体运动功能。

4. 展望

经过多年的发展，机器人技术也逐渐成熟，我国在儿童康复机器人领域也得到了多方面的发展，并取得了一定成果，但与部分国外的机器人产品相比还存在一定的差距，尤其是在智能控制和康复训练效果评估方面。在驱动方式上，电机驱动、气压驱动、线缆驱动等轻便小巧、易于操作的驱动方式无疑更适用于儿童康复机器人的特殊需求；在感知技术上，不局限于单一的物理量感知技术与生物量感知技术，混合应用二者能够实现患儿在整个康复阶段的训练信息采集，是多控制策略融合的基础；在智能控制方面，我国应该学习并吸纳国外先进技术，注重结构模块化设计，融入更先进的人工智能控制系统，在控制系统研究中引入机器学习、神经网络、深度学习等智能化系统，使得儿童康复机器人针对不同病症、不同类型的患儿都能够发挥作用，拓展同一控制系统的兼容性；在康复训练过程中，多种能够提高康复训练效果的先进技术也应当被运用到控制系统中，如虚拟现实技术、增强现实技术等，丰富康复训练内容的同时也能大大提高患儿的积极性，儿童康复机器人也不再是冷冰冰的机器人。此外，机器人助力效果、肢体稳定性、新陈代谢值、患儿舒适程度等方面并不能在训练过程中实时监测并反馈，此外，康复训练的效果也不能在每次的康复训练结束后直接体现出来。因此，在控制系统的研究中，建立机器人的康复训练效果评估系统具有很大的价值。随着儿童康复机器人功能完善、产品性能和可靠性的提高，康复训练效果会更好，未来将会在儿童康复医疗领域普遍应用。

参考文献

- [1] 卢梨娜. 残疾人社会支持体系及其优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [2] 杨昭显, 梁兴波, 党海钊. 康复机器人设计分析[J]. 科技资讯, 2022, 20(7): 73-75.
- [3] 华裕, 朱敏, 张跃. 儿童康复机器人应用现状及发展趋势[J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(6): 667-670.

- [4] 杨婷婷, 李鑫, 俞鑫璐, 等. 上肢康复机器人在脑性瘫痪儿童康复中的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(12): 1717-1721.
- [5] Charafeddine, J., Maassarani, I., Chevallier, S. and Alfayad, S. (2021) Purposeful Proposal for CP-Afflicted Upper Limbs Exoskeletons. 2021 6th International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME), Werdanah, 7-9 October 2021, 59-62. <https://doi.org/10.1109/ICABME53305.2021.9604854>
- [6] Furusho, J. and Takesue, N. (2019) Research and Development of Rehabilitation Systems for the Upper Limbs "PLEMO" Series. *Journal of Robotics and Mechatronics*, **31**, 35-44. <https://doi.org/10.20965/jrm.2019.p0035>
- [7] 李辽远, 韩建海, 李向攀, 郭冰菁, 夏鹏鹏, 王新杰. 上肢康复机器人关键技术研究进展[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 28-34.
- [8] Rossa, C., Najafi, M., Tavakoli, M. and Adams, K. (2021) Robotic Rehabilitation and Assistance for Individuals with Movement Disorders Based on a Kinematic Model of the Upper Limb. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, **3**, 190-203. <https://doi.org/10.1109/TMRB.2021.3050512>
- [9] Gilliaux, M., et al. (2015) Age Effects on Upper Limb Kinematics Assessed by the REAplan Robot in Healthy School-Aged Children. *Annals of Biomedical Engineering*, **43**, 1123-1131. <https://doi.org/10.1007/s10439-014-1189-z>
- [10] 张宏翔. 外骨骼上肢运动康复机器人的系统设计[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [11] Shum, L.C., Valdés, B.A., Hodges, N.J. and Van der Loos, H.F.M. (2020) Error Augmentation in Immersive Virtual Reality for Bimanual Upper-Limb Rehabilitation in Individuals with and without Hemiplegic Cerebral Palsy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **28**, 541-549. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2959621>
- [12] Lieber, J., et al. (2022) Clinical Utility of a Pediatric Hand Exoskeleton: Identifying Users, Practicability, and Acceptance, and Recommendations for Design Improvement. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **19**, Article No. 17. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-00994-9>
- [13] 丁逸苇, 涂利娟, 刘怡希, 等. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人研究进展[J]. 机器人, 2022, 44(5): 522-532. <https://doi.org/10.13973/j.cnki.robot.220256>
- [14] van Kammen, K., et al. (2020) Amplitude and Stride-to-Stride Variability of Muscle Activity during Lokomat Guided Walking and Treadmill Walking in Children with Cerebral Palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*, **29**, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2020.08.003>
- [15] Goo, A., Laubscher, C.A., Wiebrecht, J.J., Farris, R.J. and Sawicki, J.T. (2022) Hybrid Zero Dynamics Control for Gait Guidance of a Novel Adjustable Pediatric Lower-Limb Exoskeleton. *Bioengineering*, **9**, Article No. 208. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9050208>
- [16] Eguren, D. and Contreras-Vidal, J.L. (2021) Navigating the FDA Medical Device Regulatory Pathways for Pediatric Lower Limb Exoskeleton Devices. *IEEE Systems Journal*, **15**, 2361-2368. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3025111>
- [17] 韩稷钰, 王衍鸿, 万大千. 下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2022, 42(2): 241-246.
- [18] Chen, S.J., et al. (2022) Safety and Feasibility of a Novel Exoskeleton for Locomotor Rehabilitation of Subjects with Spinal Cord Injury: A Prospective, Multi-Center, and Cross-Over Clinical Trial. *Frontiers in NeuroRobotics*, **16**, Article 848443. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.848443>
- [19] Nakagawa, S., et al. (2019) Newly Developed Hybrid Assistive Limb for Pediatric Patients with Cerebral Palsy: A Case Report. *Journal of Physical Therapy Science*, **31**, 702-707. <https://doi.org/10.1589/jpts.31.702>
- [20] Kawasaki, S., Ohata, K., Yoshida, T., Yokoyama, A. and Yamada, S. (2020) Gait Improvements by Assisting Hip Movements with the Robot in Children with Cerebral Palsy: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 87. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00712-3>
- [21] 史瑶, 曹建国, 贡国俊, 王景刚. 儿童脑瘫康复机器人研究进展[J]. 中国康复, 2021, 36(10): 628-632.
- [22] 陶璟, 霍宇飞, 于随然. 面向儿童的下肢康复外骨骼机器人研发进展[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(11): 1445-1449.
- [23] Choi, E.Y. (2015) Literature Review of Robots Used for the Rehabilitation of Children with Autistic Spectrum Disorder. *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, **9**, 265-273.
- [24] Peng, B., Hu, H. and Hu, D. (2021) Children Rehabilitation Training Robot, Has Supporting Unit Comprising Fixing Rod, Fixing Cylinder, Fixing Belt, Supporting Seat and Supporting Plate, Where Supporting Plate Is Provided with Four Supporting Plates. CN Patent No. 215132692-U.
- [25] Rahman, R.A.A., Hanapiah, F.A., Basri, H.H., Malik, N.A. and Yussof, H. (2015) Use of Humanoid Robot in Children with Cerebral Palsy: The Ups and Downs in Clinical Experience. *Procedia Computer Science*, **76**, 394-399.

-
- [26] Zhang, J. (2022) Upper Limb Rehabilitation Robot for Treating Cerebral Palsy Children, Has Connecting Groove Whose Inner Wall Is Provided with Balance Training Mechanism for Controlling Shaking of Upper Limbs of Brain Paralysis Patient According to Movement of Upper Limb Rehabilitation Robot Main Body. CN Patent No. 114587923-A.
- [27] Falzarano, V., Marini, F., Morasso, P. and Zenzeri, J. (2019) Devices and Protocols for Upper Limb Robot-Assisted Rehabilitation of Children with Neuromotor Disorders. *Applied Sciences*, **9**, Article No. 2689. <https://doi.org/10.3390/app9132689>
- [28] Michmizos, K.P. and Krebs, H.I. (2017) Pediatric Robotic Rehabilitation: Current Knowledge and Future Trends in Treating Children with Sensorimotor Impairments. *NeuroRehabilitation*, **41**, 69-76. <https://doi.org/10.3233/NRE-171458>
- [29] Grosu, V., Grosu, S., anderborght, B., Lefeber, D. and Rodriguez-Guerrero, C. (2017) Multi-Axis Force Sensor for Human-Robot Interaction Sensing in a Rehabilitation Robotic Device. *Sensors*, **17**, Article No. 1294. <https://doi.org/10.3390/s17061294>
- [30] Ahamed, N.U., et al. (2011) Recent Survey of Automated Rehabilitation Systems Using EMG Biosensors. *Journal of Physical Therapy Science*, **23**, 945-948. <https://doi.org/10.1589/jpts.23.945>
- [31] Cao, J.H., Xie, S.Q., Das, R. and Zhu, G.L. (2014) Control Strategies for Effective Robot Assisted Gait Rehabilitation: The State of Art and Future Prospects. *Medical Engineering & Physics*, **36**, 1555-1566. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2014.08.005>
- [32] Dalla Gasperina, S., Roveda, L., Pedrocchi, A., Braghin, F. and Gandolla, M. (2021) Review on Patient-Cooperative Control Strategies for Upper-Limb Rehabilitation Exoskeletons. *Frontiers in Robotics and AI*, **8**, Article No. 745018. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.745018>
- [33] Chen, J.C., Zhang, X., Wang, H., Shi, Q. and Li, R. (2014) Control Strategies for Lower Limb Rehabilitation Robot. 2014 *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 28-30 July 2014, 121-125. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2014.6932638>
- [34] Sarajchi, M., Al-Hares, M.K. and Sirlantzis, K. (2021) Wearable Lower-Limb Exoskeleton for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review of Mechanical Design, Actuation Type, Control Strategy, and Clinical Evaluation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **29**, 2695-2720. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3136088>
- [35] Conner, B.C., Fang, Y. and Lerner, Z.F. (2022) Under Pressure: Design and Validation of a Pressure-Sensitive Insole for Ankle Plantar Flexion Biofeedback during Neuromuscular Gait Training. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **19**, Article No. 135. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01119-y>