

脑卒中手功能康复机器人的研究现状

连雅雯 李贞兰 陈晓伟 李贺 崔银星 张红 徐国兴 谢建航 李莹华 段好阳
吉林大学第一医院康复医学科,吉林 130021
通信作者:李贞兰,Email:zhenlan@jlu.edu.cn

【摘要】 随着科学技术的改革和创新,机器人技术的应用与康复医学的联系日渐紧密,在促进手功能恢复方面实现了跨越式的发展。脑卒中后手功能康复机器人作为一种新型的康复治疗手段,目前主要应用于脑卒中后患者手部运动功能障碍的康复训练,它可通过控制系统实现多种运动形式,采用脑卒中手功能康复机器人进行训练,可以显著改善患者手指的运动功能和生活质量,促进患者回归家庭和社会。本综述旨在介绍国内外各种类型脑卒中手功能康复机器人,并阐述其应用现状及其研究的发展趋势。

【关键词】 手功能; 脑卒中; 康复机器人; 执行器类型
基金项目:长春市科学技术局科技创新(医药健康产业发展)重大专项(17YJ016)
Funding: Changchun Science and Technology Bureau Science and Technology Innovation (Medical and Health Industry Development) Major Project (17YJ016)
DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.017

脑卒中也称为脑血管事件,是指突然发生的、由脑血管病变引起的局限性或全脑功能障碍的临床综合征,若持续时间超过 24h 可能引起死亡^[1],是我国成人致死、致残的首位病因,且逐渐呈现年轻化趋势^[2]。脑卒中后上肢运动功能障碍会使患者的日常生活活动受到极大限制^[3],尤其手指感觉和运动功能恢复对于脑卒中患者的生活质量具有重要意义。有研究指出,手功能的康复很大程度上依赖于神经可塑性,通过反复的运动训练可使大脑建立新的神经连接来重组和修复手功能^[4-5]。

传统的手功能康复治疗主要依赖于治疗师的经验性治疗,一般为一对一或一对多徒手操作^[6],这种方法不仅耗时耗力,而且缺乏客观的评价和实时反馈分析,很难精准地评估患者的手功能障碍程度和水平,无法制定最佳的治疗方案。手功能康复机器人为脑卒中后患者手功能的康复开辟了新的治疗途径,随着不同类型的康复机器人问世,临床应用越来越广泛^[7]。本综述旨在介绍国内外各种类型脑卒中手功能康复机器人,并阐述其应用现状及其研究的发展趋势。

手功能康复机器人分类

手功能康复机器人主要以执行器分为电机式、气缸式、气动式、形状记忆合金式、液压式和高分子柔性材料手功能康复

机器人^[8-9](表 1)。

一、电机提供驱动力的手功能康复机器人

以电机驱动的手功能康复机器人的结构较简单,应用灵活易于操作,运动控制精确度高,因此应用较为广泛。

日本岐阜大学的 Ueki 等^[10]研制的基于虚拟现实(virtual reality,VR)技术的手部康复机器人是由电机来驱动 18 个自由度协调腕手部的运动,可完成前臂旋前和旋后、腕部掌屈和背伸、拇对指及各手指屈伸、外展和内收等运动,由健侧手指传输信号控制患侧手指活动(图 1)。



图 1 基于 VR 技术的手部康复支持系统

表 1 手功能康复机器人的执行器

种类	优点	缺点
电机	应用广泛,结构简单灵活,可操作性高,易于控制,精确度高	电机的刚性结构在使用过程中存在一定的安全风险
气缸	控制方便,驱动力强,结构简单,维护要求相对较低,可在负载下停止,安全性较好	对于气体的储存空间有一定需求,体积较大,不易携带,压缩空气时产生噪音,具有一定的滞后性
气动人工肌肉	柔性结构,与人手相近。质量较轻,体积相对较小,安全性高	造价相对较高,因其滞后性和非线性,故在精确控制上有一定缺陷,不易到达预期康复手的康复水平
形状记忆合金	形状记忆效应,可随温度变化,变形恢复力强,负载能力强	难以进行精确控制,具有一定的时间滞后性以及易疲劳性
液压	输出功率大,响应速度快	易漏油,影响工作稳定性,污染环境
高分子等柔性材料	类肌肉特性比如质量轻、柔韧性好、低功耗,响应速度快	驱动力小、配套感知装置不利于安装

意大利 Handexos 康复机器人^[11]共有 5 个自由度,不同执行器单独驱动每一根手指,拉线传动,采用波顿拉索传输的欠驱动方式控制手指屈伸、内收、外展,但由于传输的信号不是实时生物电信号,所以不能精确控制拇指,也不能单独控制每个关节(图 2)。Almenara^[12]等认为,Handexos 康复机器人对脊髓损伤或脑卒中患者日常生活活动能力的改善具有极大的潜力。

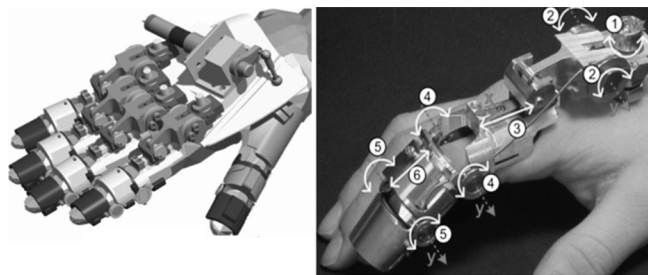


图 2 Handexos 康复机器人

意大利学者 Cempini 等^[13]研发的可穿戴式外骨骼康复机器人也是通过电机来驱动手指运动,有拇指、食指和手背 3 个模块,每个模块由 4 个电机驱动。在该可穿戴式外骨骼康复机器人的多个自由度中,有 9 个用于拇指运动(可实现拇指的内旋、外展、伸展、弯曲等运动),剩余 4 个则用于食指运动(图 3)。该可穿戴式外骨骼康复机器手在测试中取得了较好的效果,但目前仍处于临床试验阶段。

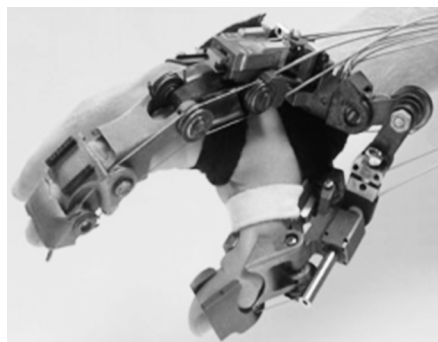


图 3 可穿戴的外骨骼康复机器人手

德国的 Klug 等^[14]研制了一款基于肌腱状金属丝的软外衣康复机器人手,除小指外,其余四个手指均由电机双向控制,单独驱动控制每个手指的运动模式,可进行力量或精细抓握训练。该装置结构简单、柔软,重量轻,可实现通过力控制抓握不同大小的物体(如茶杯、铅笔或叉子),既可用于日常生活活动,还可用于康复训练(图 4)。

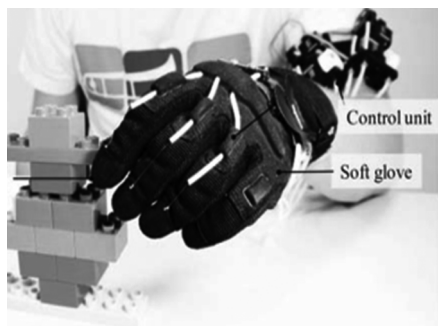


图 4 软外衣康复机器人手

韩国的 Unist 可穿戴外骨骼手^[15]结构简单轻便,可帮助手指在 1 个自由度(degrees of freedom, DOF)内屈伸运动,为了减少执行器的数量和系统的复杂性,可穿戴外骨骼手分两部分设计,一部分用于拇指,另一部分用于其他手指,仅由两个线性电机驱动(图 5)。

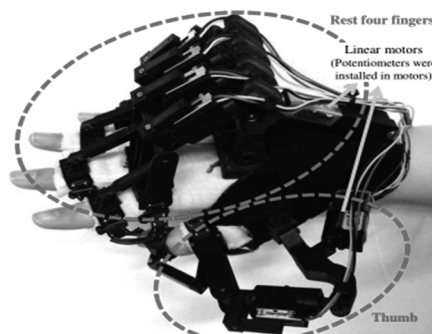


图 5 Unist 外骨骼手

Randazzo 等^[16]开发了一种新颖的手外骨骼机器人 mano,该机器人可用于辅助受试者日常生活活动和神经康复场景的训练,它由伺服电机驱动控制手指的屈伸,具有功能性、体积小和舒适性等特点,适合居家康复在内的各种环境下使用(图 6)。手外骨骼机器人 mano 的拇指、食指和中指均可独立驱动,而无名指和小指是联合驱动,可以实现三种类型的抓握(力量抓握、精度抓握和侧向抓握)。受试者在测试中采用手外骨骼机器人 mano,可完成如喝水、写字等日常生活活动和功能性任务,但不能主动控制手指的外展和内收,因此该机器人不适用于肌痉挛严重的患者。



图 6 手外骨骼机器人 mano

香港理工大学研发的神经康复机器人 Hand of Hope^[17](图 7),其每个手指均配有专用微型电机来提供运动驱动力,通过患侧手部表面肌电信号来控制各个关节。刘霖^[18]等的回顾性分析结果表明,15 例慢性期脑卒中患者采用神经康复机器人 Hand of Hope 进行治疗后,其上肢肌肉痉挛和手指运动功能均显著改善。

哈尔滨工业大学研发了一种自适应外骨骼和波顿缆绳驱动执行器的新型手外骨骼装置^[19],该装置采用对称的齿轮齿条机构和平行滑动机构组成环形关节,可实现关节的非线性拉伸位移(图 8)。哈尔滨工业大学新型手外骨骼装置将驱动和控制系统置于前臂,执行机构有两条缆绳双向驱动每个关节,外骨骼则由三个串联的迂回关节组成,分别对应于手指的三个关节

(近端指间关节、远端指间关节和掌指关节),可适应手指的屈曲和伸展,通过改变螺钉的连接位置来调整连杆的长度,从而匹配手指的不同大小。

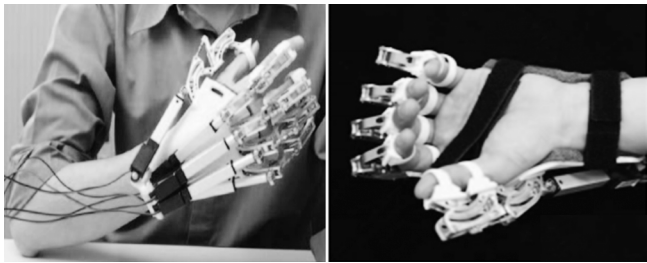


图 7 康复机器手 Hand of Hope



图 8 哈尔滨工业大学的新型手外骨骼装置

早期研究的手功能康复机器人主要采用电机驱动,通过电动机产生力和转矩,经过减速器获得工作转速。这种驱动方式精确度较高,结构简单灵活,容易控制。Vanoglio^[20]等的研究发现,康复机器手可改善改良 Ashworth 分级<3 级的脑卒中患者手指的灵活性和握力。Varalta^[21]等的研究则发现,康复手套不仅可以改善脑卒中后单侧空间忽略患者的视觉空间注意能力,还可提高患手的运动速度和灵活性。Hsu^[22]等认为,常规手功能康复治疗联合外骨骼机器人辅助手部被动关节活动度训练可能是一种促进慢性脑卒中患者手部运动功能和力量恢复的有效康复手段。Coskunsu^[23]等的研究也发现,康复机器手可有效地促进急性脑卒中患者患侧手指的运动功能恢复,然而电机始终是刚性元器件,可能给康复训练带来一定的安全风险。

二、以气缸或气动提供驱动力的手功能康复机器人

气动驱动器利用空气作为工作介质,并使用气源发生器将压缩空气的压力能转换为机械能,以驱动执行器以完成预定的运动方式。这种驱动方式安全性较好,控制方便,驱动力强^[24]。

美国芝加哥康复中心的 Connolly 等^[24]研发了气动手套 PneuGlove(图 9),该手套是利用气压辅助手指掌指关节伸展,可实现在真实物体或 VR 环境中对虚拟物体的抓取和释放。Connolly 等^[25]的后续研究发现,慢性脑卒中患者经气动手套 PneuGlove 进行手部功能康复训练 1 个月后,其 Fugl-Meyer 上肢评分均显著改善。

德国气动公司的 Festo 发明了一款 ExoHand 仿生机械手^[26],该机械手是用 8 个双作用气动执行器来实现单个手指的主动运动(图 10)。ExoHand 仿生机械手的外骨骼手套的内置传感器可以记录手部动作,并实时传输至机器人手臂,通过力反馈系统感觉到仿生手抓到的物体,气缸助力器会提高受试者手部的抓取力,与脑机接口相连,可建立大脑与手部之间的闭合反馈回路。该装置可完成手部主要的生理自由度,抓取和释

放物体,提高手指肌力、耐力和关节活动范围,但其缺点是机械手体积庞大,结构十分复杂,不易携带。



图 9 美国芝加哥康复中心气动手套 PneuGlove

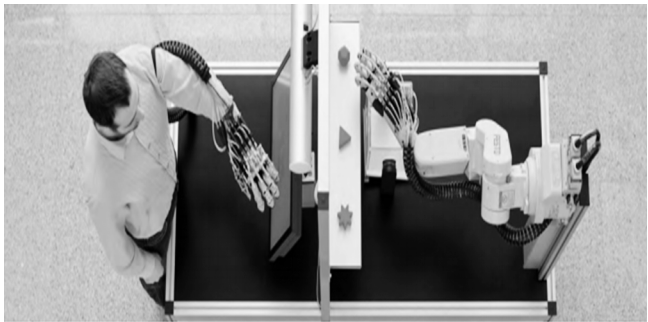


图 10 ExoHand 仿生机械手

新加坡 Ang 等^[27]设计了一款 3D 打印气动式康复辅助手套,该手指背部的波纹式气囊是通过腰部的气泵来带动手指的屈伸运动,指浅屈肌肌电图传感器可测量手指屈肌肌肉活动,适合在家庭环境下进行任务-导向康复训练(图 11)。3D 打印气动式康复辅助手套的缺点是,无法达到手指的正常运动范围,食指近端指间关节、远端指间关节和掌指关节仅达到 33%、82%和 30%,拇指指间关节、掌指关节和腕掌关节仅达到 9%、7%和 45%。

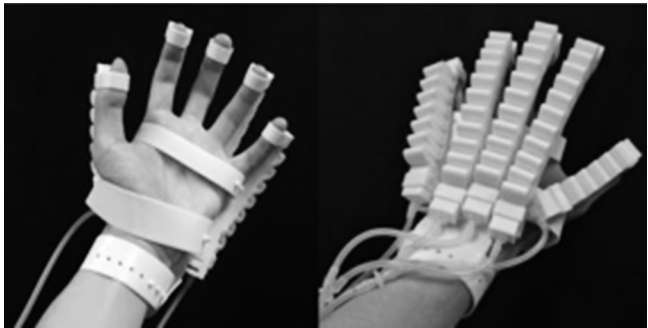


图 11 3D 打印气动式康复辅助手套

2009 年,华中科技大学研制了一款气动人工肌肉—扭簧驱动的可穿戴手功能康复机器人^[28](图 12),该机器人采用气动肌肉(pneumatic muscle,PM)和扭转弹簧(torsion spring,TS)组成新型的 PM-TS 驱动器,在掌指关节和近端指间关节有两个自由度,可实现手指的伸展、屈曲运动,也可进行重复的手部训练。

上述研究表明,以气缸或气动/气动人工肌肉提供驱动力的手部康复机器人控制方便,驱动力强,结构简单,质量较轻,体积相对较小,柔性结构,适合于手指抓握等精细动作的康复

训练中;但其缺点是,对于气体的储存空间有一定需求,压缩空气时会产生噪音,精确控制上仍有滞后性缺陷,不易达到预期的康复目标^[29-30]。

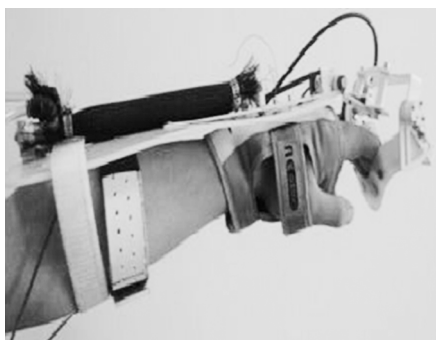


图 12 气动人工肌肉—扭簧驱动的可穿戴手功能康复机器人

三、以形状记忆合金提供驱动力的手功能康复机器人

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是通过热弹性与马氏体相变及其逆变而具有形状记忆效应的由两种以上金属元素所构成的材料。作为一种特殊的合金,SMA 可随温度变化,变形恢复能力强。

1993 年 Makara 等^[31]采用镍钛合金致动器研制了腕-手矫形器(wrist-hand orthosis, WHO),该机器人通过电流来改变 SMA 的温度,温度的变化可使合金变形产生动力,以此可驱动机器人对受试者进行康复训练。该研究发现,WHO 可辅助脑卒中后上肢功能障碍患者完成大部分的日常生活活动,如穿衣、修饰、操纵电动轮椅以及打字等。

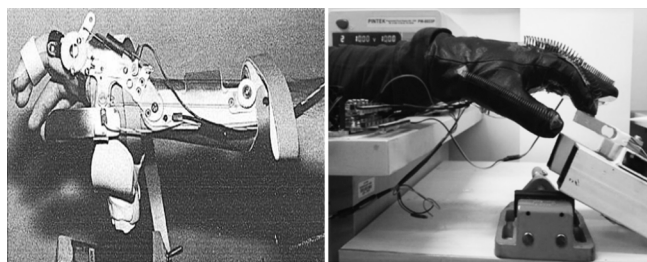


图 13 腕-手矫形器

图 14 基于 SMA 驱动的手部外骨骼系统

Kazeminasab 等^[32]研制了一种基于 SMA 驱动的手部外骨骼系统(图 14),该系统有 5 个自由度,与传统的单自由度外骨骼相比,具有更好的灵活性,可用于手指的屈伸训练,具有体积小、结构简单、重量轻等优点,便于携带。

2019 年,燕山大学研发了以新型智能化材料形状记忆合金丝驱动的可穿戴手指康复机器人^[33](图 15),该机器人具有柔性化、轻量化、便携性和舒适性优点,不仅能够完成手指伸展的连续被动训练,还可通过肌电信号来实时反映活动意图,对受试者进行主动和镜像康复训练。

SMA 是可用于康复工程上的一种驱动执行器,它具有形状记忆效应,可随温度变化,变形恢复力强,负载能力强。郝丽娜等^[34]的研究发现,SMA 可实现手指的独立驱动,改善手指的灵活性,提高受试者抓取物品的成功率。Yao^[35]等的研究表明,基于 SMA 手套可以模仿人手的肌腱和肌肉功能。张瑛如^[36]等实验研究也发现,基于 SMA 的机器人不仅可以实现正常的手指功

能活动,还可增强手指的抓握力。然而记忆合金难以实现精确控制,且具有一定的时间滞后性,以及易产生疲劳等缺点。

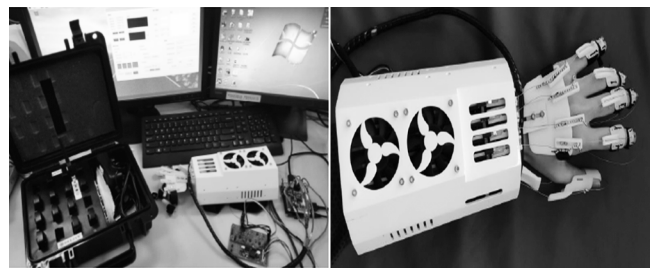


图 15 燕山大学的手指康复机器人系统

四、以气压或液压为驱动方式的柔性手功能康复机器人

液压驱动的康复机器人通过控制液压泵的增减压来控制带液压油通道弹性变形单元的屈曲和伸展,从而带动与弹性变形单元相固定的相应手指的屈曲和伸展运动^[37]。气压驱动与液压驱动工作原理类似。下面将介绍几种气动或液压为驱动方式的柔性手部功能康复机器人。

新加坡国立大学于 2016 年开发了一款软体机器人手套^[38](图 16),该机器人通过内置充气执行器(由柔性塑料板热粘合而成)驱动手指伸展,可产生显著的伸展扭矩,帮助患者伸展痉挛的手指。但该机器人的训练模式单一,仅能实现手指伸展,且不易携带,基于此,该研究组于 2017 年又研制出一种基于织物的气动双向柔软机器人手套^[39](图 17),该机器人可独立地协助每根手指屈曲和伸展,执行不同形式的抓取和释放动作。此外,机器人还设计了一个图形用户界面,用户不仅可以选择所需的康复训练计划和控制模式,还可实时观察受试者的手功能康复训练情况。



图 16 新加坡国立大学软体机器人手套



图 17 基于织物的双向柔软机器人手套

2015 年, Polygerinos 等^[40]设计了一款液压驱动多段式软致动器软体机器人手套(图 18),该手套可在流体加压时诱导出特定的弯曲、扭曲和延伸轨迹,匹配和支持单个手指的运动范围,能够复制手指的动作,适用于典型的抓取动作。其缺点在于,流体减压时弹性体的弹性有限,只能被动地驱动致动器的伸展,缺乏主动控制手指伸展的能力。

2013 年,浙江工业大学研发了一款气动柔性手指康复机器人(图 19),该机器人配有肌电信号传感器和数据手套,可采集肌电信号进行主动康复训练和健手控制患手进行双手训练,受限于气动柔性驱动器的大小,该机器人的整体结构尺寸较大,无法进行掌指关节的转动训练^[41]。

2019 年,中国香港大学研发了一种新型个性化 3D 打印软机械手^[42],是由气动部件作为软弹性复合材料执行器(soft-elastic composite actuator, SECA)的驱动力,该机器人可以有效地

促进手指的屈曲和伸展,为卒中患者提供康复训练和日常生活协助(图 20)。



图 18 软机器人手套

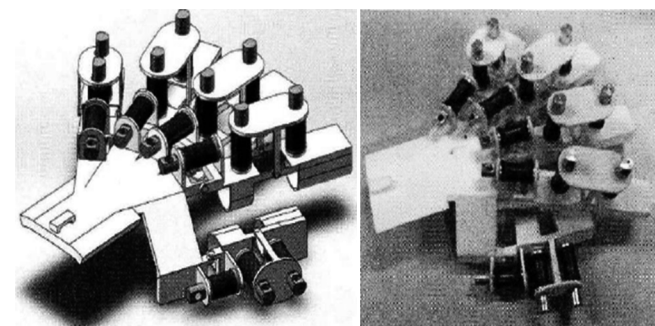


图 19 气动柔性手指康复机器人

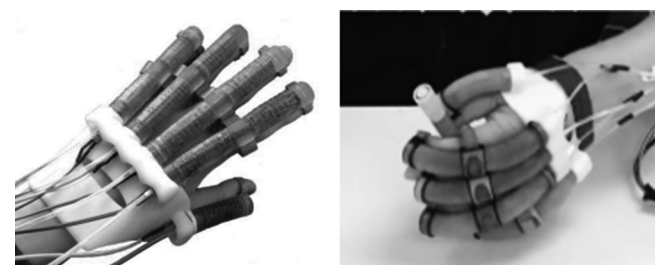


图 20 个性化 3D 打印软机械手

高分子柔性材料具有类肌肉特性,比如柔韧性高、功耗低,响应速度快。Low 等^[43]的研究发现,基于织物的触觉软机器人手套能够辅助脑卒中后手指运动障碍患者在日常任务中成功地识别物体,并采取不同的抓取模式。Zhu 等^[44]的研究发现,在软机器人手套的辅助下进行康复训练,可以改善手指运动障碍患者手部运动的协调性,显著提高抓取的精确度和准确度。Cappello 等^[45]和 YAP 等^[46]的研究也都发现,软机器人手套可以改善提高脑卒中患者的手部功能和日常生活活动能力。然而,本课题组仍认为,高分子柔性材料仍具有驱动力小、配套感知装置不利于安装等缺陷。

小结

手功能康复机器人在辅助康复训练中具有明显的优势,不仅能够实时反馈运动学参数,还可实时记录训练过程,使治疗更具有针对性和个性化^[47],节省治疗师的时间和体力。目前,手功能康复机器人仍存在训练模式单一、单纯被动活动较多、主动运动模式少、不易携带、材料昂贵等问题。

高分子柔性材料结构简单,便于携带,价格低廉,可提供不同的训练模式,能够在家庭环境中进行康复训练,是研究的新

热点,有望成为更加安全、可靠、实用的手功能康复机器人驱动方式。

参考文献

- [1] 黄晓琳,燕铁斌,王宁华,等. 康复医学[M]. 6 版. 北京:人民卫生出版社,2018:143.
- [2] 王陇德,吉训明,康德智,等.《中国卒中中心报告 2020》概要[J]. 中国脑血管病杂志,2021,18(11):737-743. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2021.11.001.
- [3] Lin SH, Yang TR, Chuang IC, et al. Upper extremity motor abilities and cognitive capability mediate the causal dependency between somatosensory capability and daily function in stroke individuals[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 690. DOI: 10.1038/s41598-021-04491-2.
- [4] Singh N, Saini M, Kumar N, et al. Evidence of neuroplasticity with robotic hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation: a randomized controlled trial[J]. J Neuroeng Rehabil, 2021, 18(1): 76. DOI: 10.1186/s12984-021-00867-7.
- [5] Chu CY, Patterson RM. Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: a narrative review[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1): 9. DOI: 10.1186/s12984-018-0350-6.
- [6] Cui Y, Ma N, Liu X, et al. Progress in the clinical application of constraint-induced therapy following stroke since 2014[J]. Front Neurol, 2023, 14:1170420. DOI: 10.3389/fneur.2023.1170420.
- [7] Xue X, Yang X, Deng Z, et al. Global trends and hotspots in research on rehabilitation robots: a bibliometric analysis from 2010 to 2020[J]. Front Public Health, 2022, 9: 806723. DOI: 10.3389/fpubh.2021.806723.
- [8] Ang BWK, Yeow CH, Lim JH. A critical review on factors affecting the user adoption of wearable and soft robotics[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3263. DOI: 10.3390/s23063263.
- [9] Dai Y, Ji J, Yang G, et al. A novel robotic exoskeleton for finger rehabilitation: kinematics analysis[J]. Appl Bionics Biomech, 2022, 2022: 1751460. DOI: 10.1155/2022/1751460.
- [10] Ueki S, Kawasaki H, Ito S, et al. Development of a hand-assist robot with multi-degrees-of-freedom for rehabilitation therapy[J]. IEEE-Asme T Mech, 2012, 17(1): 136-146. DOI: 10.1109/tmech.2010.2090353.
- [11] Chiri A, Vitiello N, Giovacchini F, et al. Mechatronic design and characterization of the index finger module of a hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation[J]. IEEE-Asme T Mech, 2012, 17(5): 884-894. DOI: 10.1109/TMECH.2011.2144614.
- [12] Almenara M, Cempini M, Gómez C, et al. Usability test of a hand exoskeleton for activities of daily living: an example of user-centered design[J]. Disabil Rehabil Assist Technol, 2017, 12(1): 84-96. DOI: 10.3109/17483107.2015.1079653.
- [13] Cempini M, Cortese M, Vitiello N. A powered finger-thumb wearable hand exoskeleton with self-aligning joint axes[J]. IEEE Asme T Mech, 2015, 20(2): 705-716. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2315528.
- [14] Klug F, Hessinger M, Koka T, et al. An anthropomorphic soft exosuit for hand rehabilitation[C]. IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics, Toronto, Canada, 2019. New York: IEEE Int Conf Rehabil Robot, 2019: 1121-1126.
- [15] Jo I, Lee J, Park Y, et al. Design of a wearable hand exoskeleton for exercising flexion/extension of the fingers[C]. International Conference on Rehabilitation Robotics, London, UK, 2017. New York: IEEE Int Conf Rehabil Robot, 2017: 1615-1620.
- [16] Randazzo L, Iturrate I, Perdakis S, et al. Mano: A wearable hand exoskeleton for activities of daily living and neurorehabilitation[J].

- IEEE Robot Autom Let, 2018, 3(1): 500-507. DOI: 10.1109/LRA.2017.2771329.
- [17] Heung KHL, Tang ZQ, Ho L, et al. An EMG-driven exoskeleton hand robotic training device on chronic stroke subjects: Task training system for stroke rehabilitation[C]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011. New York: IEEE, 2011: 1-5.
- [18] 刘霖, 朱琳, 单桂香, 等. 机器人辅助卒中偏瘫患者上肢运动功能康复的初步应用[J]. 中国脑血管病杂志, 2015, 12(6): 306-310. DOI: 11.3969/j.issn.1672-5921.2015.06.006.
- [19] Zhang F, Hua L, Fu Y, et al. Design and development of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries[J]. Mech Mach Theory, 2014, 73: 103-116. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.10.015.
- [20] Vanoglio F, Bernocchi P, Mulè C, et al. Feasibility and efficacy of a robotic device for hand rehabilitation in hemiplegic stroke patients: a randomized pilot controlled study[J]. Clin Rehabil, 2017, 31(3): 351-360. DOI: 10.1177/0269215516642606.
- [21] Varalta V, Picelli A, Fonte C, et al. Effects of contralesional robot-assisted hand training in patients with unilateral spatial neglect following stroke: a case series study[J]. J Neuroeng Rehabil, 2014, 11: 160. DOI: 10.1186/1743-0003-11-160.
- [22] Hsu CY, Wu CM, Huang CC, et al. Feasibility and potential effects of robot-assisted passive range of motion training in combination with conventional rehabilitation on hand function in patients with chronic stroke[J]. J Rehabil Med, 2022, 54: jrm00323. DOI: 10.2340/jrm.v54.1407.
- [23] Coskunsu DK, Akcay S, Ogul OE, et al. Effects of robotic rehabilitation on recovery of hand functions in acute stroke: a preliminary randomized controlled study[J]. Acta Neurol Scand, 2022, 146(5): 499-511. DOI: 10.1111/ane.13672.
- [24] Connelly L, Jia Y, Toro M, et al. A pneumatic glove and immersive virtual reality environment for hand rehabilitative training after stroke[J]. IEEE T Neur Sys Reh, 2010, 18(5): 551-559. DOI: 10.1109/TNSRE.2010.2047588.
- [25] Connelly L, Stoykov ME, Jia Y, et al. Use of a pneumatic glove for hand rehabilitation following stroke[C]. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, USA, 2009. New York: IEEE, 2009: 2434-2437.
- [26] Festo CN. ExoHand-new areas for action for man and machine[EB/OL]. [2023-1-26]. <https://www.festo.com/group/en/cms/10233.htm>.
- [27] Ang BWK, Yeow RCH. Print-it-Yourself (PIY) glove: a fully 3D printed soft robotic hand rehabilitative and assistive exoskeleton for stroke patients[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 2017. New York: IEEE, 2017: 1219-1223.
- [28] Wu J, Huang J, Wang Y, et al. A wearable rehabilitation robotic hand driven by PM-TS actuators[J]. Lect Notes Comput Sci, 2010, 6425: 440-450. DOI: 10.1007/978-3-642-16587-0_41.
- [29] Xikai T, Jiping H, Yue W, et al. Cooperation of electrically stimulated muscle and pneumatic muscle to realize RUPERT bi-directional motion for grasping[C]. 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, USA, 2014. New York: IEEE, 2014: 4103-4106.
- [30] 李姝颖. 气动式手部装置训练对脑卒中后手功能恢复的临床研究[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2020. DOI: 10.27202/d.cnki.gkmyc.2020.000174.
- [31] Makaran OE, Dittmer DK, Buchal RO, et al. The SMART wrist-hand orthosis (WHO) for quadriplegic patients[J]. J Prosthet Orthot, 1993, 5(3): 73-76. DOI: 10.1097/00008526-199307000-00002.
- [32] Kazeminasab S, Hadi A, Alipour K, et al. Force and motion control of a tendon-driven hand exoskeleton actuated by shape memory alloys[J]. The Ind Robot, 2018, 45(5): 623-633. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-01-2018-0020>.
- [33] 冯晓彬. 形状记忆合金丝驱动的手指康复机器人设计和分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019. DOI: 10.27440/d.cnki.gysdu.2019.000636.
- [34] 郝丽娜, 郭少飞, 陈洋. SMA 驱动的模块化仿人手指设计与研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(8): 1137-1141. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.08.016.
- [35] Yao ZJ, Linnenberg C, Argubi-Wollesen, et al. Biomimetic design of an ultra-compact and light-weight soft muscle glove[J]. Prod Eng, 2017, 11(6): 731-743. DOI: 10.1007/s11740-017-0767-y.
- [36] 张瑛如, 王扬威, 刘凯, 等. SMA 丝驱动的手指康复机器人设计及实验研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(6): 191-196. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.06.039.
- [37] Yao J, Chen X, Chen J, et al. Design and motion analysis of a wheel-walking bionic soft robot[J]. Chin J Mech Engin, 2019, 55(5): 27-35. DOI: 10.3901/JME.2019.05.027.
- [38] Yap HK, Lim JH, Goh JCH, et al. Design of a soft robotic glove for hand rehabilitation of stroke patients with clenched fist deformity using inflatable plastic actuators[J]. J Med Devices, 2016, 10(4): 044504. DOI: 10.1115/1.4033035.
- [39] Yap HK, Khin PM, Koh TH, et al. A fully fabric-based bidirectional soft robotic glove for assistance and rehabilitation of hand impaired patients[J]. IEEE Robot Autom Let, 2017, 2(3): 1383-1390. DOI: 10.1109/LRA.2017.2669366.
- [40] Polygerinos P, Wang Z, Galloway K, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. Robot Auton Syst, 2015, 73: 135-143. DOI: 10.1016/j.robot.2014.08.014.
- [41] 黄鹏程. 基于多点连续肌电控制的仿生康复手关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013: 9-36. DOI: 10.7666/d.Y2411765.
- [42] Heung KHL, Tang ZQ, Ho L, et al. Design of a 3D printed soft robotic hand for stroke rehabilitation and daily activities assistance[C]. IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics, Toronto, Canada, 2019. New York: IEEE, 2019: 65-70.
- [43] Low JH, Lee WW, Khin PM, et al. Hybrid tele-manipulation system using a sensorized 3-D-Printed soft robotic gripper and a soft fabric-based haptic glove[J]. IEEE Robot Autom Let, 2017, 2(2): 880-887. DOI: 10.1109/LRA.2017.2655559.
- [44] Zhu Y, Gong W, Chu K, et al. A novel wearable soft glove for hand rehabilitation and assistive grasping[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6294. DOI: 10.3390/s22166294.
- [45] Cappello L, Meyer JT, Galloway KC, et al. Assisting hand function after spinal cord injury with a fabric-based soft robotic glove[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1): 59. DOI: 10.1186/s12984-018-0391-x.
- [46] Yap HK, Lim JH, Nasrallah F, et al. Design and preliminary feasibility study of a soft robotic glove for hand function assistance in stroke survivors[J]. Front Neurosci, 2017, 11: 547. DOI: 10.3389/fnins.2017.00547.
- [47] 王平, 刘爱贤. 上肢康复机器人对脑卒中患者上肢功能康复的临床疗效观察[J]. 医学综述, 2019, 25(12): 2492-2496. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2084.2019.12.039.

(修回日期: 2023-12-29)

(本文编辑: 阮仕衡)