·专论·

脑卒中后手部康复机器人辅助训练系统研究

韩逢霖 王丽珍 刘鹏举 樊瑜波

（北京航空航天大学生物力学与力生物学教育部重点实验室，北京市生物医学工程高精尖创新中心，
生物与医学工程学院，北京 100191）

【摘要】 物理康复训练对于脑卒中后患者手部功能的恢复起着至关重要的作用。目前，脑卒中患者的手部康复训练工作主要由康复医师承担。手部康复机器人辅助训练，能够有效缓解当下康复医疗资源紧缺的困境，同时降低康复医师的工作强度。其康复效果已在临床试验中得到证实，不过，在可靠性和智能化方面仍有提升空间。本文从人体手部的生理结构以及脑卒中后手部运动特征入手，引出脑卒中患者的康复需求；接着，依据结构方式与驱动形式，对现有的手部康复机器人进行分类，详细阐述其应用场景和特点，并归纳典型控制策略，总结脑卒中后手部运动能力的评定标准；最后，分析当前手部康复机器人存在的问题，并对其发展趋势进行展望。

【关键词】 脑卒中；康复机器人；柔性结构；人机交互控制；可靠性

【中图分类号】 TH772 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202502002

Review of research on hand rehabilitation robots research

Han Fenglin, Wang Lizhen, Liu Pengju, Fan Yubo

[Key Laboratory of Biomechanics and Mechanobiology (Beihang University), Ministry of Education, Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, School of Biological and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China]

【Abstract】 Physical rehabilitation training plays a crucial role in the recovery of hand function for patients after stroke. Currently, the hand rehabilitation training for stroke patients is mainly carried out by rehabilitation physicians. Hand rehabilitation robots can effectively alleviate the shortage of rehabilitation medical resources and reduce the workload of rehabilitation physicians. Their rehabilitation effects have been confirmed in clinical trials, but there is still room for improvement in terms of reliability and intelligence. This paper starts with the physiological structure of the human hand and the movement characteristics of the hand after stroke to introduce the rehabilitation needs of stroke patients. Then, it classifies the existing hand rehabilitation robots based on their structural forms and driving methods, elaborates on their application scenarios and features in detail, and summarizes typical control strategies and the evaluation standards for hand motor ability after stroke. Finally, it analyzes the existing problems of hand rehabilitation robots and looks forward to their development trends.

【Key words】 Stroke; Rehabilitation robot; Flexible structure; Human–machine interaction control; Reliability

随着我国老龄化程度的加剧，脑卒中患者的基数也急剧增加。《中国脑卒中防治报告》明确指出[1]，我国40岁及以上人群中，脑卒中患者数量高达1242万，且发病人群日趋年轻化。脑卒中后，约80%以上患者会出现反射增强、肌无力、失语症、痉挛、协调性丧失等运动功能障碍，严重影响其回归正常生活。通过康复治疗使患者恢复正常运动功能，尤其是手功能，以实现基本自理能力尤为重要[2]。

脑卒中发生后的前三个月被认为是最重要的康复时期，也是治疗效果最明显的时期。患者在此期

第一作者：韩逢霖，男，硕士研究生，研究方向：智能康复设备

间接受康复训练或药物治疗，能够有效改善病情。脑卒中康复的主要理论依据是神经可塑性理论。研究表明，健康的皮质层区域具有重新接管损伤区域功能的能力[3]，通过使皮质层厚度增加，引起脑功能的区域性变化，即大脑中的受损神经元网络具有生长、重组变化的能力，这种能力被称为神经可塑性[4]。康复医师为脑卒中患者进行的物理康复训练或药物治疗，能在不同程度上激发神经重塑能力，从而加速患者恢复。此外，临床应用较多的方式还包括电刺激治疗、想象疗法等。大量的临床实践表明，物理康复训练具有较好的安全性和普适性[5]。对于脑卒中康复具有不可替代的重要作用。当前，脑卒中患者的物理康复训练主要由康复医师进行，我国现有康复医疗资源十分紧缺[6]。但庞大的脑卒中患者群体对康复治疗的需求却在日益增长。相对于人工康复训练，康复机器人具有较高的一致性、持久性、精确性，能够较好地替代医师完成治疗。因此，面向康复机器人的研究有着重要的社会意义。本文首先分析了手部生理结构、脑卒中后手部运动功能障碍及康复需求，根据结构与驱动形式对现有手部康复机器人进行了分类和对比，并列举了目前主流的运动控制方式。最后总结了手部康复机器人需要攻克的技术难点以及未来的发展方向。

1 手部生理结构与康复训练需求

1.1 手部生理结构

手部康复机器人作为穿戴式设备，其设计应基于手部生理结构与运动形式。人手的主要解剖结构可分为四个部分。第一部分是骨骼结构，主要由腕骨、掌骨、指骨组成，指骨之间形成关节，是实现手部功能的骨性基础[7]，如图 1 所示。第二部分是肌腱结构，分为掌侧屈指肌腱和背侧屈指肌腱，肌腱的运动驱动关节运动，进而完成手部动作。第三部分为神经结构，主要负责手部的感觉功能。第四部分为血管系统，包括动脉与静脉，负责手部的血液供应与回流。手指各个关节的运动主要包括 4 个自由度，分别为近指关节、中指关节、远指关节的屈曲 / 伸展和近指关节的内收 / 外展。各关节之间还存在运动约束关系。

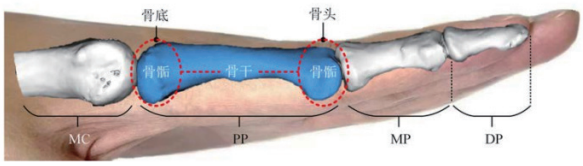


图 1 手指骨骼结构[7]

1.2 脑卒中后手部运动功能障碍及康复需求

脑卒中后，患者常表现为手部运动无力或完全丧失运动能力，尤其是精细动作（如捏取、抓握）的完成能力显著下降。与此同时，患者手部肌肉张力增高（痉挛），导致手部僵硬，难以完成伸展动作。部分患者还会出现手部感觉异常，如麻木、刺痛或温度感知障碍、不自主震颤等。针对上述一系列手部运动功能障碍及其他临床病征，物理康复训练的主要目的是提高患者的手部肌力、缓解关节痉挛和疼痛、改善手指各关节活动角度、增强各指运动的协调性、帮助患者重新获得完成日常生活活动的能力，进而提高患者生活质量。

物理康复训练首先应协助患者完成基本的屈伸动作，训练过程中逐步提升患者关节活动度，运动范围尽可能与人手自然运动范围匹配。在此基础上，通过单指运动的组合完成特定康复训练动作，如三指对捏［如图 2（a）所示］、手掌反屈［如图 2（b）所示］等[8]。这些动作对于提高指关节灵活性和恢复关节围肌群的肌力有重要作用。作为人工康复训练的替代方案，手部康复机器人须具有良好的结构适应性和多样的运动功能。

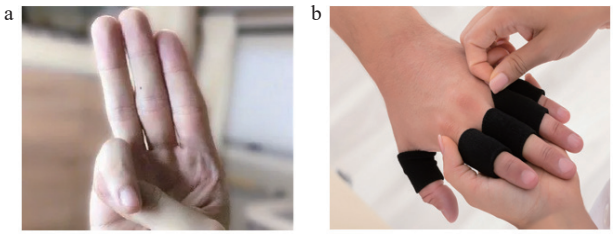


图 2 手部物理训练康复动作[8]

注：a.三指对捏动作；b.手掌反屈动作。

2 手部康复机器人结构与驱动方式

随着康复学科的不断发展，手部康复机器人进入了快速发展阶段，至今已有数十种样机问世，其结构与功能多种多样。根据结构形式，手部康复机器人可分为刚性结构和柔性结构；根据驱动器类

型，可分为流体驱动、电机驱动、新材料致动等。不难发现，康复机器人的结构类型与驱动形式密切相关，刚性结构一般采用电机驱动，柔性结构则一般采用流体驱动或新材料驱动。本节主要依据执行构件组成形式，对现有手部康复机器人进行归纳总结。

2.1 刚性结构手部康复机器人

刚性结构因其高精度和高刚度特性，成为实现手指端传动的主要方式，常见的机构形式包括连杆[9]、齿轮[10]以及同步带轮[11]等，其中连杆机构的应用最为典型。在早期研究中，范德堡大学为NASA研发的手部穿戴装置采用了具有远程转动中心的交叉机构。该机构的设计能使轴线与关节的转动中心始终保持对齐，从而避免了运动过程中与关节发生干涉[12]。Ertas等[13]基于人体抓握动作的等效分解原理，设计了一种采用单关节四杆机构的外骨骼机器人。其设计理念是将抓握动作分解为两个阶段：首先，MCP关节产生屈曲运动，直至近节指骨接触障碍物；随后，PIP关节进行屈曲运动，直至完全握紧物体。此外，研究者还开发了五连杆、八连杆、十二连杆等复杂机构。然而，随着连杆数量的增加，佩戴者手部的负重也随之增大，这会在一定程度上影响其临床应用。

在连杆的基础上，部分刚性结构手部康复机器人通过增加齿轮机构实现对指端的驱动，从而改良和简化传动机构。中科院自动化所的程龙等研发的CAS手部康复机器人[14]是齿轮与连杆机构结合的典型代表，实现了食指的自然抓握动作模拟。其样机如图3(a)所示，运动学分析如图3(b)所示。该设计的核心在于，近端齿轮机构通过高效的传动比匹配，确保了动力的有效传递，优化了杆组的运动轨迹，提高了传动的稳定性，同时降低了能耗。

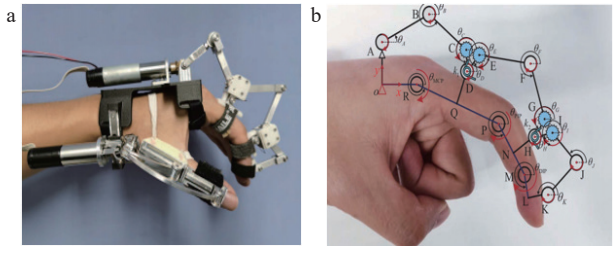


图3 连杆结构手部康复机器人[14]

注：a.CAS样机；b.CAS杆组运动学分析。

Kawasak等研发的手外骨骼具有18个自由度，样机如图4(a)所示。其传动采用了齿轮与连杆的组合，在实现各关节独立运动的同时，设置了多个冗余自由度，从而避免了因错位引发的手部关节与外骨骼结构的干涉。Lei等[15]研发的手康复装置采用了差速器和齿轮齿条作为主要传动部件，样机如图4(b)所示，实现了欠驱动下的手指关节屈伸运动。该装置设计了快拆机构，方便穿戴，最大限度考虑了家庭康复的便捷性。虽然齿轮等机构的引入降低了整体结构的复杂度，但重量大、可靠性低等固有问题仍有待解决。

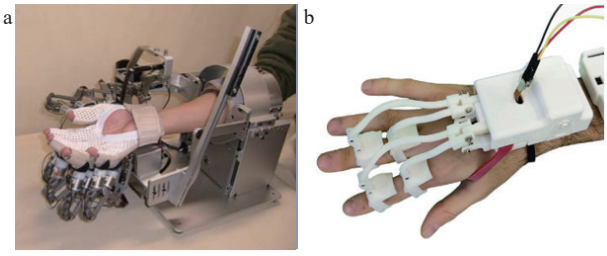


图4 齿轮结构手部康复机器人[15]

注：a.齿轮＋连杆结构；b. 差速器＋齿轮齿条结构。

燕山大学的田宇等研制了一款新型手部康复外骨骼[16]，主要结构如图5所示。机器人主体重3.5kg，主要零件由金属3D打印而成，S副的部分则采用了镍合金丝。机器人执行器由2UPS+U并联机构与包含人体指骨的两个四杆机构（其中一个演化成了曲柄滑块机构）组成，机构整体的自由度数为3，输入分别为两并联分支和曲柄滑块机构中推杆的伸缩量，输出为人体食指MCP关节的屈曲/伸展运动、内收/外展运动以及PIP关节的屈曲/伸展运动。与多数刚性结构的手部康复机器人不同，考虑到PIP关节与DIP关节存在解剖学上的耦合关系，以及减小机器人体积并提高灵活性，该设备放弃了对DIP关节的控制。设计者还基于解剖学的手部运动等效模型，对手部康复过程中常被忽略的屈曲/伸展运动与内收/外展运动之间的关系开展了定量分析。

综上，刚性结构通过多样的机构设计，能够实现带动患手的高精度运动，但需在重量、复杂性与临床实用性之间权衡，在结构方式方面仍有一定的研究空间。

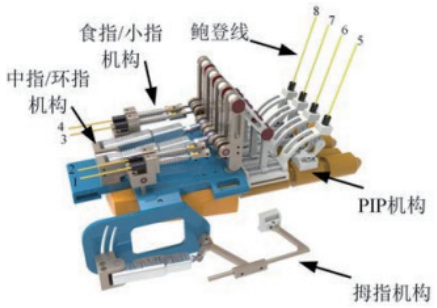


图 5 3D 打印手部康复机器人 [16]

2.2 柔性结构手部康复机器人

近年来，柔性结构手部康复机器人的研究与应用取得了显著进展，此类机器人系统具有质量轻、适应性强等优势，但在运动模式和控制精度方面存在局限性。柔性结构手部康复机器人结构主体采用软活动材料，根据驱动原理和结构特征，可划分为气/液驱动型、电机驱动型和基于材料致动型三类。

气/液驱动型康复手套主要通过附着于手背的可伸缩人工肌肉驱动器实现运动功能，其工作原理是利用气/液充盈产生的形变驱动软体执行器弯曲 [17]。为了独立控制手指并提高抓握驱动力，Poly 等开发了一种基于液压驱动原理的软体机器人手套 [18]，与与传统使用空气作为流体介质的气动驱动系统相比，其功率密度得到显著提高。该研究团队采用纤维增强弹性体材料设计并制造了液压驱动的多段式软体致动器，实验设计如图 6 所示，初步临床实验结果表明，手套可以在无外部辅助的情况下产生移动 500 g 锡罐的作用力，且受试者能够在 SEMG 控制下，利用该手套有效完成木块等的抓取、保持和释放动作。该执行器还可根据用户的手部生理特征定制，并通过运动捕获系统进行评估，结果显示其运动范围与使用者的生理特征高度匹配。



图 6 液压驱动手康复机器人 [18]

注：a.抓取方块；b.抓取圆柱；c.抓取电话；d.抓取遥控器。

电机驱动型的柔性结构手部康复机器人，通常使用高功率电动机驱动鲍登电缆进行沿手指方向的动力传递，较为典型的有 EXO Glove 系列手康复装置，其从设计之初就提出了多种构型。SNU Exo–Glove 和 HERO 等康复手套也是基于这种思想开展结构设计 [19]，样机分别如图 7（a）和图 7（b）所示。得益于成熟的电机控制算法，电机驱动方式在力矩输出控制方面具有较大优势。Lince 等 [20] 提出了一种柔性结构手部康复设备，其通过调节直流电动机控制回路的限流参数实现精确的力控制，并通过实验验证了设备在稳态条件下能够向人体指骨传递足够的康复训练力。

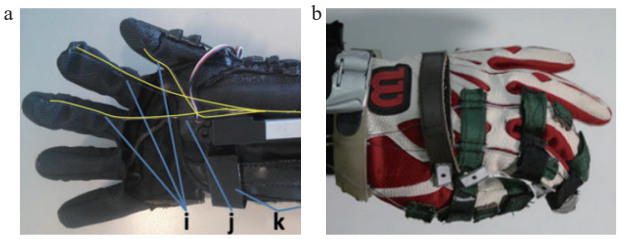


图 7 线绳驱动软体康复手套 [19]

注：a.SNU Exo–Glove；b.HERO。

上述气/液驱动型及电机驱动型手部康复机器人，往往均具有复杂的结构和较大的重量，可靠性与便携性难以提升。材料致动的驱动方式能够很好地解决这一问题，形状记忆合金由于高功率重量比、较大的变形能力、较低的驱动电压和无噪声驱动，一直是机器人技术领域中广泛采用的执行器。中科大研制了一款软包便携式康复手套 [21]，样机如图 8 所示，其创新性的整合了 15 个弯曲传感器和 10 个形状记忆合金（SMA）执行器来完成不同的 FMS 康复任务。系统通过精确感知每个手指的三个关节角度，并将这些数据实时反馈至控制系统，实现了 SMA 执行器的闭环控制。软体手套系统整体仅重 0.49 kg，具有优异的便携性，可以根据临床需要进行重复的手部康复训练。驱动机制方面，通过一对 SMC 驱动器提供康复训练所需的双向力，并整合了可控磁流变阻尼器以提供可调节的阻尼力。

综上，柔性结构的材料和驱动方式较为多样，一般都具有较好的适应性，对于不同应用场景可进行灵活选择。

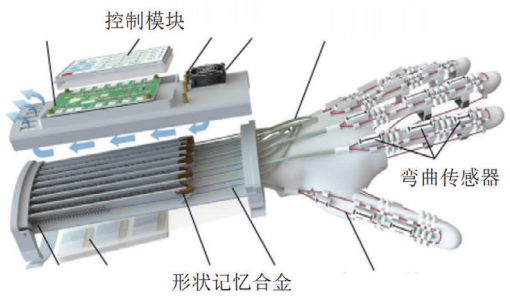


图8 SMA致动手部康复机器人[21]

2.3 新型结构手部康复机器人

随着对手部康复机器人结构形式的深入研究，研究者提出了将金属丝、弹簧等元件与传统的连杆、齿轮机构相结合的“刚柔耦合”创新设计理念，如采用弹性体作为整体支撑结构，或采用线绳、弹簧片等替代传统的机械传动方式[22]，以提高手部康复机器人的综合性能。“刚柔耦合”的优势主要体现在：首先，能有效地降低机械系统的结构复杂度，通过线绳或者簧片伸缩进行动力传输，能减少齿轮、连杆等刚性结构的大量使用[23]，其次，在简化结构的同时，仍能确保运动输出的多样性和准确性。然而，在实际使用中该种设计常常面临传递效率降低、装配难度增大等问题，必须采取改进措施，如运动补偿、整体结构优化等，弥补上述不足，保证系统稳定运行[24]。Roger等[25]设计了一种具有三层滑动弹簧结构的手康复外骨骼RELab tenoexo]，样机如图9所示，这款机器人结构轻巧，实用性强，能够辅助患者完成日常抓握动作，但滑动弹簧在手指弯曲时可能与指关节发生干涉，关节弯曲角度受到限制。沈阳自动化所研制的手康复机器人HSRexo采用了改进的多层滑动弹簧结构，解决了关节弯曲角度受限的问题，同时通过优化内部滑块与支架间的接触面，显著降低了摩擦损耗，提高了力传递效率。



图9 刚–柔耦合结构手部康复机器人[25]

通过本节分析可知，刚性结构的手部康复机器人发展最早，结构形式最多，能够实现精细康复动作；柔性结构的手部康复机器人具有质量轻、适应性强等显著优点，临床应用较为广泛，但存在运动模式单一、控制精度低等不足；刚柔耦合等新型结构的手部康复机器人能够结合两种结构形式的优势，在保证患者关节活动度与抓握力需求的同时，实现运动训练模式的多样性，是目前结构设计研究中的热点方向。

3 手部康复机器人运动控制方式

康复机器人不同于其他机器人类型，作为一种人机交互系统，其运动轨迹和运动中人机接触力需要进行严格控制。由于其动力学模型较为复杂，控制系统应具备处理非线性系统和不确定性系统的能力，同时应具备足够的鲁棒性，以便能够评估患者的康复状态，并据此对控制器进行动态调整。为满足上述复杂的控制需求，自适应控制、变阻抗控制等智能控制方法在康复机器人领域得到了广泛应用。相对而言，大关节如上肢等康复机器人的运动控制方式较为成熟，手部康复机器人可以借鉴和沿用，但对稳定性和实时性等提出了更高要求。

3.1 动力学模型补偿与自适应控制

系统建模是手部康复机器人运动控制面临的核心问题，人机交互系统具有强非线性和时变性，导致其动力学建模难度较大。为了避免复杂系统的动力学建模，一些研究使用了无模型控制器。例如，Abane等[26]使用模糊PID算法实现了5自由度康复机器人力矩控制。此外，迭代学习控制（ILC）算法同样无需依赖系统动力学模型，其通过上次的控制量和误差对下一次控制进行修正，在非线性系统的固定轨迹控制中表现出良好的控制效果，尤其在机器人带动手部被动运动的场景中得到了应用。尽管无模型控制器具有简单可行的优势，但基于模型设计的控制器能够实现更多的功能（如阻抗控制提供柔顺性）。在基于模型的控制器设计中，通常利用人工智能方法（比如模糊集合和神经网络）的非线性拟合能力，对人机交互系统中的动力学特征及干扰进行估计，作为模型或控制器的补偿项。李继婷等[27]将康复机器人惯性矩阵等动力学参数拆分为

标称部分和不确定部分，并使用模糊逻辑系统对不确定参数进行估计，消除了系统干扰量的影响。针对不确定或者变化的物理量，自适应控制也是常用的方法。Brahmi等[28]基于反步法设计了手部康复机器人控制器，为了得到控制算法中不确定的动力学特征，提出了一种基于控制误差迭代更新动力学特征估计值的方法，并通过实验证实了该控制器的高精度效果。综上，无模型控制适用于简单、稳定的康复任务，而基于模型控制更适合高精度的交互场景。

3.2 变阻抗控制

在脑卒中后康复治疗早期，患者手部肌力显著降低，需要依赖康复机器人辅助其进行被动运动，以维持关节活动度并防止肌肉萎缩。为确保安全，机器人常在被动康复模式下引入阻抗控制这种柔顺控制策略。阻抗控制器能够将人机交互系统的动力学特征转化为指定的弹簧–阻尼二阶系统，从而为人机交互提供所需的柔顺性。阻抗参数的选取决定了控制系统的特性。当阻抗控制器使用低阻抗参数时，康复机器人的跟踪轨迹误差增大，轨迹变形严重；相反，较高的阻抗参数虽能提高轨迹跟踪精度，但会导致人机交互力过大。此外，由于运动过程中手部刚度不断变化，接触力随之改变，阻抗参数固定的阻抗控制器难以适应复杂多变的环境[29]。手部刚度变化受到多种因素影响，包括手部姿态、肌肉协同效应、牵张反射等，如手部拮抗肌群同时收缩时，关节刚度会大幅增大。因此，在人机交互控制中，如何合理选择阻抗控制的刚度系数和阻尼系数是亟待解决的关键问题。Ajoudani等[30]在远程阻抗控制算法的启发下提出了一种在线估计健侧手的刚度、带动患侧手镜像运动的康复策略。在偏瘫患者佩戴康复机器人之后，测量健侧的肌电信号来估计手部刚度。患侧手在机器人的带动下跟随健侧手的轨迹，并模仿其刚度。除了模仿人手刚度实现变刚度控制，张福海等[31]提出了一种基于模糊神经网络的变阻抗控制方法，系统的输入为手部与康复机器人的接触力及关节角度，通过采用 k 均值聚类的方法训练的模糊神经网络实时获取阻抗参数。Tran等[32]设计了基于简化对象级的手部康复机器人阻抗控制策略，其系统的控制方程忽略了指尖与接触物体之间的力矩作用，在不同的康复任务中可以改变系统的阻抗特性，以保证抓握动作的稳定性。

4 结论与展望

综上所述，本文归纳了国内外手部康复机器人的设计理念、结构特点、控制方法，分析了其涉及的关键技术，结合当前设备在适应性、可靠性等方面存在的问题，预测未来手部康复机器人的研究热点及发展趋势如下：（1）部分设备在设计中未充分考虑人机工程学原理，应通过对手部解剖结构、肌腱分布模式及肌肉协同机制的深入分析，依据手部生理特征进行结构优化，提高康复训练舒适度，降低患者康复运动中的疼痛感。（2）受驱动形式所限，刚性结构的手部康复机器人普遍存在结构笨重、价格高昂等问题，若采用人工肌肉、磁流变液、形状记忆合金等新型智能材料，能够大大降低手部康复机器人的重量，且利用这些材料的驱动–传动–感知一体化特性，可以简化繁冗的系统结构，解决多自由度机电系统在有限空间内的布局难题。（3）作为典型人机交互系统的手部康复机器人，其在运动控制精度和灵活性方面仍存在一定缺陷，控制系统的鲁棒性较差。尽管脑电和肌电等生物信号能够快速反映人体的运动意图，但由于其信号强度微弱、信噪比较低以及易受环境干扰等固有局限性，导致基于单一生物信号的运动意图识别准确率显著受限。因此，将脑电等生物信号与力、位置等物理反馈信号融合，实现多模态运动意图识别，能够有效提高运动意图识别精度。（4）训练模式缺乏个性化设计，无法根据患者的康复需求和进展情况进行动态调整。通过收集处理不同患者的康复数据，能够有效建立训练参数与康复效果之间的量化关系，为个性化康复治疗方案的设计提供科学依据。

[参 考 文 献]

[1] 王陇德,刘建民,等.《中国脑卒中防治报告2021》概要[J].中国脑血管病杂志,2023,20(11):783–793.

[2] Lin BL, Zhang ZX, Mei YX, et al. The influential factors of adherence to physical activity and exercise among community–dwelling stroke survivors: a path analysis[J]. J Clin Nurs, 2022, 31(17/18):2632–2643.

[3] Muprhy TH, Corbett D. Plasticity during stroke recovery:From

synapse to behaviour［J］. Nat Rev Neurosci, 2009, 10(12):861–873.

［4］ Biasiucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain–actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke［J］. Nat Commun, 2018, 9(1):1–13.

［5］ Li YH, Li YW,Chen XW, et al. Effect of task–oriented training assisted by force feedback hand rehabilitation robot on finger grasping function in stroke patients with hemiplegia: a randomised controlled trial［J］. J Neuroeng Rehabilitation, 2024, 21(1):77.

［6］ 彭亮,侯增广,王晨,等.康复辅助机器人及其物理人机交互方法［J］.自动化学报,2018,44(11):2000–2010.

［7］ 奥村于力子,高楚荣.手关节活动范围评价［J］.国外医学(物理医学与康复学分册),1991,11(3):120–122.

［8］ Salter RB, Field P. The effects of continuous compression on living articular cartilage:An experimental investigation［J］. JBJS, 2020, 42(1):31–90.

［9］ Serrano D, Copaci D, Arias J, et al. SMA–Based Soft Exo–Glove［J］. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(9):5448–5455.

［10］Kim HI, Han MW, Song SH, et al. Soft morphing hand driven by SMA tendon wire［J］. Compos Part B–Eng, 2016, 105:138–148.

［11］Kim SJ, Kim Y, Lee H, Ghasemlou P, Kim J. Development of an MR–compatible hand exoskeleton that is capable of providing interactive robotic rehabilitation during fMRI imaging. Med Biol Eng Comput. 2018 Feb;56(2):261–272.

［12］Shields BL, Main JA, Peterson SW, et al. An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during extravehicular activities［J］. IEEE Trans Syst Man Cybern A Syst Hum, 1997, 27(5):668–673.

［13］Ertas IH, Hocaoglu E, Patoglu V. AssistOn–Finger: An under–actuated finger exoskeleton for robot–assisted tendon therapy［J］. Robotica, 2014, 32(pt.8):1363–1382.

［14］Li C, Cheng L, Sun N, et al. Design and control of an underactuated finger exoskeleton for assisting activities of daily living［J］. TMECH, 2022, 10(5):2699–2709.

［15］Zhang F, Hua L, Fu Y, et al. Design and development of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries［J］. Mechanism & Machine Theory, 2014, 73:103–116.

［16］田宇,王洪波,刘颖,等.一种食指康复外骨骼机器人设计与分析［J］.机械工程学报,2023,59(9):40–50.

［17］彭广帅,樊星雨,刘笑宇,等.柔性可穿戴康复手套的设计与控制［J］.医用生物力学,2019,34(6):637–643.

［18］Polygerinos P, Wang Z, Galloway K,et al.Soft robotic glove for combined assistance and at–home rehabilitation［J］. Robotics & Autonomous Systems, 2015, 73:135–143.

［19］Yurkewich A, Kozak IJ, Hebert D, et al. Hand extension robot orthosis (hero) grip glove: enabling independence amongst persons with severe hand impairments after stroke［J］. J Neuroeng Rehabilitation, 2020, 17(1):1–17.

［20］Lince A, Celadon N, Battezzato A, et al. Design and testing of an under–actuated surface EMG–driven hand exo– skeleton［C］//2017 International Conference on Rehabilitation Robotics,September 24–28,2023,London,UK. Piscataway:IEEE,2017:670–675.

［21］Sui M , Ouyang Y, Jin H, et al. A soft–packaged and portable rehabilitation glove capable of closed–loop fine motor skills［J］. Nat Mach, 2020, 13(3):1149–1160.

［22］Agarwal P, Fox J, Yun Y, et al. An index finger exoskeleton with series elastic actuation for rehabilitation:design, control and performance characterization［J］. IJRR, 2015, 34(14):1747–1772.

［23］Secciani N, Brogi C, Pagliai M, et al. Tailor–made hand exoskeletons at the university of florence: Mechatronic design［J］. Machines, 2021, 15:750385.

［24］Shahid T, Gouwanda D, Nurzaman SG, et al. Moving toward soft robotics: A decade review of the design of hand exoskeletons［J］. Biomimetics, 2018, 3(3):1–20.

［25］Butzer T,Lambercy O,Arata J,et al. Fully wearable actuated soft exoskeleton for grasping assistance in everyday activities［J］. Soft Robot,2021,8(2):128–143.

［26］Abane A, Guiatni M, Alouane MA, et al. Auto–tuning fuzzy force/position control of a 5 DOF exoskeleton for upper limb rehabilitation［C］//IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway,USA: IEEE, 2017:1731–1736.

［27］Zhao YT, Liang CY, Gu ZZ, et al. A new design scheme for intelligent upper limb rehabilitation training robot［J］. Int J Environ Res Public Health, 2020, 17(8):23–25.

［28］Brahmi B, Saad M, Ochoa–Luna C, et al. Adaptive tracking control of an exoskeleton robot with uncertain dynamics based on estimated time–delay control［J］. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2):575–585.

［29］Tsuji T, Tanaka Y. On–line learning of robot arm impedance using neural networks［J］. Rob Auton Syst, 2005, 52(4):257–271.

［30］Ajoudani A, Tsagarakis N, Bicchi A, et al. Tele–impedance: Teleoperation with impedance regulation using a bodymachine interface［J］. Int J Robot Res 2012, 31(13):1642–1656.

［31］Zhang FH, Lin LG, Yang L, et al. Variable impedance control of finger exoskeleton for hand rehabilitation following stroke［J］. Ind Robot, 2020, 47(1):23–32.

［32］Tran P, Jeong S, Lyu F, et al. Flexotendon Glove–III:Voice–controlled soft robotic hand exoskeleton with novel fabrication method and admittance grasping control［J］. IEEE ASME Trans Mechatron, 2022, 27(5):3920–3931.