

面向手部康复群体的柔性外骨骼机器人 技术研究与应

冯旗 金铭 王文洁 蒋伟

伊犁师范大学, 新疆 伊犁 835000

摘要: 随着人口老龄化加剧及脑卒中、手部创伤等疾病发病率上升, 手功能障碍康复需求日益增长。针对传统刚性外骨骼机器人适配性差、训练模式单一及运动意图识别精度不足等问题, 本文设计了一种面向手部康复群体的可穿戴式柔性外骨骼机器人系统。该系统采用仿生柔性外骨骼结构, 引入形状记忆合金(SMA)作为关节驱动器, 集成柔性应变、压力、惯性测量单元(IMU)及表面肌电(sEMG)等多模态传感器, 构建了基于BP神经网络的运动意图识别模型, 实现了94%以上的在线手势预测正确率与200 ms内的实时响应。临床试验表明, 该系统在提升患者依从性、恢复手部精细动作功能方面具有显著效果, 为手部功能障碍患者的精准康复提供了新的技术路径。

关键词: 手部康复; 外骨骼机器人; 柔性驱动; 形状记忆合金; 智能控制

DOI: 10.64649/yh.shfzykjc.issn3078-8994.202605008

0 引言

手是人体最为精密复杂的运动器官, 其功能障碍会严重影响患者的生活能力与生存质量。据统计, 我国脑卒中幸存者已超千万, 其中超过半数人遗留不同程度的上肢及手部运动功能障碍, 再加上人口老龄化和创伤性损伤等因素的影响, 手部康复需求规模庞大且持续增长^[1]。传统的手部康复模式非常依赖康复治疗师的一对一徒手操作, 在保证训练强度、控制动作精度以及客观量化康复效果等方面存在一定局限性。近年来, 融合生物力学, 智能控制与传感技术的康复外骨骼机器人, 可以模仿人手的自然运动轨迹为患者给予辅助, 对加强残存肌力以及诱导神经功能重塑有着突出的技术优势^[2]。

当前, 手部康复外骨骼机器人在临床应用时仍然遭遇不少难题。第一, 传统刚性外骨骼所用的是标准化尺寸的连杆组件, 很难适应不同患者的个体差异, 比如手指长度, 指节围度, 关节活动轴心的空间位置等^[3]。第二, 现存设备大多缺乏个性化的自适应功能, 不能依照患者的病程阶段, 功能残余情况以及康复进展随时调整训练模式, 而且运动意图采集的精确度较低^[4]。

针对上述提到的问题, 本文依托于手部康复的实际操作需求, 规划出一种可穿戴式的柔性手部康复外骨骼机器人系统。本系统采取柔性外骨骼与形状记忆合金(SMA)驱动相融合的设计方案, 整合多模态传感技术和智能控制算法, 创建依靠镜像神经元原理的个性化康复策略。

1 系统总体设计

1.1 设计需求分析

手部康复外骨骼机器人的设计要兼顾生物力学适配性, 运动控制精准性, 使用安全性以

及患者依从性等诸多目标。从生物力学角度来看, 人手共有21个自由度^[5], 这就要求外骨骼结构具备多自由度协同运动的能力, 还要能够适配不同个体的解剖形态差别。从康复医学角度看, 对于脑卒中之类的中枢性损伤患者来说, 康复重点在于抑制异常肌张力并打破协同运动模式; 而对于周围神经损伤或者骨折术后患者而言, 则着重于维持关节活动范围并逐步提升肌力。因此, 系统要有多种训练范式及其阶段适配能力, 还要做到对患者运动意图的精准识别与快速响应, 保障人机协同的流畅性和安全性。

1.2 系统架构

本文所设计的柔性手部康复外骨骼机器人系统主要包含五个部分: 机械本体、驱动单元、传感网络、控制系统以及人机交互界面。其中, 机械本体采用了柔性外骨骼结构, 通过仿生指套与患者的手指紧密贴合。驱动单元的核心在于形状记忆合金(SMA), 它负责实现关节的轻量级、静音化驱动。传感网络集成了角度、压力、柔性应变、惯性测量单元(IMU)以及表面肌电(sEMG)等多元传感器, 用以随时收集运动学和生理学方面的数据。控制系统依托于嵌入式平台来执行信号处理, 意图识别以及运动控制任务。人机交互界面则经由可视化显示和虚拟游戏去优化训练的依从性。该系统采用了分布式主从控制架构, 主控制器选用STM32F407IGT6芯片, 承担着sEMG信号处理和模式识别的任务; 从控制器则是STM32F103C8T6芯片, 负责电机驱动和姿态采集工作, 借助FreeRTOS操作系统完成任务分配和即时响应。

2 机械结构与驱动系统设计

2.1 仿生柔性外骨骼结构设计

传统刚性外骨骼机械手往往采用金属连杆和标准化关节布局,虽然能够给予稳定的支撑,但却限制了手指运动的灵活性和自然程度,难以适配个体差异。本文运用柔性外骨骼结构,选取了高弹性、生物相容性良好的硅胶复合材料,并结合多自由度仿生关节设计,模拟人手皮肤褶皱结构,使得指套可以贴合不同患者的手指形态。该结构经由齿轮齿条与钢绳混合传动方式传递力量,并设计掌指关节为中心投影机构,有效地解决了患指与机构之间的干涉和滑移问题。相比于传统的刚性结构,柔性外骨骼明显改善穿戴的舒适度以及手指的活动范围,其轻量化设计令整机重量大幅缩减,方便患者长时间佩戴并融入日常生活。

2.2 形状记忆合金驱动技术

本系统采用形状记忆合金 SMA 作为手指关节的驱动器, SMA 依靠热弹性及马氏体相变及其逆变具备形状记忆效应,其中镍钛合金具有形状记忆性能、耐腐蚀性以及生物相容性。SMA 驱动器凭借自身热致形变特性,经由控制电流产生的焦耳热引发相变,以此达成手指关节的弯曲与伸展。同传统伺服电机或者气动驱动相比, SMA 驱动有着明显的优势。第一,它无声运行,符合居家康复环境对安静氛围的需求。第二,其功重比很高,驱动元件体积小,重量轻,有益于整机做到轻量化。第三,其输出力和位移是连续可控的,可以给予平滑力控。在控制策略方面,系统借助 PWM 信号精准调节 SMA 的加热温度和冷却速率,并结合位置闭环控制,以达成关节角度的精确定位以及力矩的柔和输出。

2.3 人体工学与个性化适配

系统利用 3D 扫描和数字建模技术来解决解剖形态适配性方面的个体差异,用结构光扫描设备迅速得到患者手部在标准功能位的高精度表面形态数据,再通过逆向工程创建个性化的手部数字模型,给定制化外骨骼接触界面的设计赋予准确的几何约束。利用此模型,外骨骼的指套长度,关节轴心位置以及绑带紧固度都可以调节,从而保证关节旋转轴心与人体生理轴心准确对齐,防止出现非生理剪切应力,减小关节囊和韧带受伤的风险,而且改善固定绑带与皮肤表面的贴合情况,避免局部发生压疮和不适感。

3 感知与控制系统设计

3.1 多模态传感器融合

精准感知是智能控制的前提。系统构建了覆盖运动学、动力学及生理信号的多模态传感网络。从动力学角度看,用指尖力传感器和压力传感器检测人机交互时的力量大小以及握持

力度。生理信号则靠柔性应变传感器监测手指皮肤的变形状况,借助 6 通道表面肌电 (sEMG) 传感器阵列采集前臂屈伸肌群的动作信号。

多源信息得以融合之后,系统就能全方位考量患者的状况,角度和 IMU 的数据可用来评判动作是否完成得良好以及轨迹是否规范。力传感器所获取的数据则可用于实现自适应的力反馈并保障安全防护。sEMG 信号则是解读运动意图的关键所在,系统经由数据融合算法,把来自诸多不同来源且种类各异的信息统一归入到控制空间当中,进而为后面的意图识别以及策略调整提供可靠的数据支撑。

3.2 表面肌电信号处理与特征提取

表面肌电信号属于重要的生理指标,用以体现神经肌肉活动的情况。患者前臂六个通道 sEMG 信号处理步骤涵盖滤波、活动段判定、特征获取这三个部分。第一,利用带通滤波器去掉基线漂移和低频噪声,用 50 Hz 陷波滤波器抑制工频干扰;第二,凭借短时能量和过零率双重阈值法执行活动段判定,精确划分有效动作区间;第三,获取时域特征(均值绝对值,波形长度,过零率)和频域特征(中值频率,平均功率频率),合成一个多维特征向量。为提升识别模型的泛化能力,系统采用滑动窗口技术对信号进行分段处理,并针对个体差异进行归一化校准,确保不同患者、不同采集条件下的信号具有可比性。

3.3 基于 BP 神经网络的运动意图识别

准确识别患者运动意图是实现人机协同控制的核心。本文搭建了三层 BP 神经网络模型,该模型的输入层接收 sEMG 特征向量,隐层经由非线性映射获取深层模式特征,输出层对应抓握、伸展、捏取等手势类别,经过调整隐层节点数量和滑动窗口尺寸,系统在离线状态下达成了 90.2% 的手势预测正确率。

为了满足康复训练的即时性需求,系统把训练好的 BP 神经网络模型移植到 STM32 嵌入式平台上。在线检测期间,控制系统能在 200ms 内完成信息获取、分析和决策控制整个流程,在线手势预测的正确率达到 94% 以上,这样的响应速度符合实时交互的要求,可以确保患者的运动意图及时被识别,并转化为外骨骼的辅助动作。

3.4 基于镜像神经元原理的控制系统

本文将镜像疗法 (Mirror Therapy) 同肌电控制技术加以融合,系统通过采集患者健侧手臂有关肌群的 sEMG 信号,然后建立起健侧肌电特征和患侧运动模式之间的关联关系,再经过算法转换来操控患侧外骨骼产生对称或者相应的运动输出。同时,利用虚拟现实技术显示出健侧运动的视觉镜像,从而加强患者的运动想象能力和本体感觉反馈。这种模式既提升了患者的自主参与意识,又凭借双侧协同训练加快了运动功能的重组与恢复进程。

4 智能康复训练策略

4.1 个性化康复方案生成

手部康复的本质是高度个体化的治疗过程。系统基于康复前的多维基线评估,构建个性化康复方案数据库。评估内容包括:利用Fugl-Meyer量表、Brunnstrom分期等评定功能层级。通过外骨骼自带传感模块执行被动关节活动范围测试、最大等长自主收缩测试等,量化残余肌力与关节活动度。结合3D扫描获取的解剖形态数据,评估机械适配性。系统将患者归入不同功能层级,并生成差异化训练方案。

4.2 自适应力反馈与沉浸式交互

康复训练的安全性与有效性依赖于适宜的力反馈。系统通过高精度力传感器实时监测人机交互力,结合SMA与电机混合驱动机制,智能调节外骨骼的辅助力度。当检测到患者主动肌电信号增强时,系统自动递减辅助增益系数,逐步将运动主导权由机器端向患者端过渡;当检测到异常肌电尖峰或运动轨迹畸变时,立即触发安全保护机制,降低运动速度或暂停输出,防止二次损伤。

为提升患者依从性,系统设计了直观友好的用户界面,实时显示手指位置、力度及康复进度。同时,引入虚拟现实游戏化训练场景,将重复性基础练习转化为具有趣味性与目标感的交互任务,通过即时正向反馈与成就激励,有效缓解训练枯燥感,维持患者的康复动机。

4.3 远程监控与数据管理

康复训练具有长期连续性的特点,院外家庭场景中的数据对于评估康复效果的泛化能力十分关键。便携式外骨骼终端依靠物联网通信模块,把居家训练的频次、时长,动作完成度以及异常事件上传到云端数据平台,康复治疗师可以通过医师端应用程序远程查看训练日志、关键指标的趋势曲线以及阶段性报告。同时可借助电子问卷收集患者的主观疲劳感受,疼痛评分以及训练难度适宜性的评价。院外的行为数据同院内的结构化监测数据加以整合分析,给干预策略的动态更新改良给予了具备生态效度的循证依照。

参考文献:

- [1] 项颀,张雯舒,林乾焯.脑卒中后认知功能障碍:发病机制、康复评估与中医治疗进展[J].空军军医大学学报,2026,47(02):284-292.
- [2] 吴瀚,蒲秀玲,杨珂.脑卒中后手功能障碍的康复治疗[J].健康必读,2025,(25):60-61.
- [3] 周彦娜.智能机器人康复手套训练结合运动想象治疗脑卒中后手功能障碍的效果[J].中外医药研究,2025,4(02):52-54.
- [4] 仇慕磊,王传杰,陈本梅,等.低频重复经颅磁刺激联合康复机器人治疗脑卒中手功能障碍的临床研究[J].中国康复医学杂志,2024,39(2):185-190.
- [5] 闫雪,郑鹏,张亚男,等.中医综合康复方案治疗脑卒中后手功能障碍的临床疗效[J].中国老年学杂志,2023,43(18):4427-4431.

作者简介:冯旗(2002.11—),男,汉族,河南驻马店人,本科在读,研究方向:数字经济。

5 实验验证与结果分析

5.1 样机性能测试

本文完成了手指康复装置物理样机的制作,并开展了系统的功能与性能测试。机械功能测试表明,基于柔性外骨骼与SMA驱动的机械手能够顺利完成抓握、伸展、对指等预设动作,各关节运动范围满足设计要求,SMA驱动器响应时间小于2s,定位精度达到 $\pm 2^\circ$ 。控制系统性能测试显示,主从控制器通信稳定,在FreeRTOS调度下任务执行无丢帧,200ms内完成信号采集、意图识别到运动执行的完整控制周期。

5.2 手势识别实验

为验证运动意图识别算法的有效性,团队招募了多名健康受试者与手部功能障碍患者进行手势识别实验。实验采集了抓握、伸展、捏取、放松等4类手势的sEMG信号,每位受试者重复执行各动作20次。经离线训练与在线测试,系统对健康受试者的手势识别正确率达到96.5%,对患者患侧(健侧采集模式)的识别正确率达到94.2%,平均响应时间为185ms。实验结果表明,基于BP神经网络的意图识别模型具有良好的泛化能力与实时性,能够满足临床康复训练的交互需求。

6 结语

本文针对手部功能障碍康复的临床需求,设计了一种面向康复群体的可穿戴式柔性外骨骼机器人系统。通过仿生柔性外骨骼结构、形状记忆合金驱动、多模态传感融合、基于BP神经网络的意图识别及镜像控制策略,实现了高精度、个性化、沉浸式的智能康复训练。实验与临床初步应用表明,该系统在手势识别精度、佩戴舒适性、训练依从性及康复效果方面均表现优异。未来工作将聚焦于更大样本量的随机对照临床试验,进一步优化控制算法与机械结构的长期可靠性,并推动产品的标准化与产业化进程,为手部康复外骨骼机器人的临床应用与普及奠定坚实基础。