

柔性手部可穿戴康复运动辅助系统

张海文¹, 林涵睿^{2*}, 贾丹平¹

¹沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

²辽宁省劳动经济学校机电工程系, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年2月13日; 录用日期: 2025年3月13日; 发布日期: 2025年3月21日

摘 要

随着我国人口老龄化加剧, 脑卒中患者数量逐年上升, 手部运动功能障碍成为常见后遗症。设计一款柔性手部可穿戴康复运动辅助系统, 解决现有手部康复设备价格昂贵、安全性低、力重比不足、气压需求较高以及患者参与度低等问题。以帮助脑卒中患者进行居家康复训练以及辅助患者完成日常生活任务。本文系统核心由柔性手部屈曲执行器和气动控制系统组成。执行器采用涂有TPU (Thermoplastic Polyurethane) 涂层的尼龙织物, 具备良好的柔顺性和舒适性; 气动控制系统由微型气泵、高频电磁阀和控制电路板构成。此外, 系统配备微信小程序和液晶触摸屏的人机交互界面, 用户可选择不同的康复模式、获取医疗资讯及历史康复数据等。实验结果表明, 当手部屈曲执行器的输入气压达到最大300 kPa时, 指尖终端输出力可达到11.6 N。证明了柔性手部可穿戴康复运动辅助系统在居家康复中的有效性, 为脑卒中患者自理能力的恢复提供了有力支持。经实验验证, 基于柔性织物材料的手部屈曲执行器具备舒适柔软的穿戴体验, 并具有较高的安全性, 有效避免了对患者的二次伤害。此外, 该执行器在较低气压下仍能实现较高的指尖终端输出力。通过引入基于表面肌电信号的主动康复模式, 使患者能够精确控制康复训练动作, 充分发挥自主意识的作用。与被动康复和镜像康复模式结合, 形成了一种适用于康复全周期的手部可穿戴康复运动辅助系统。

关键词

运动功能恢复, 柔性机器人技术, 多模式人机交互, 康复运动辅助, 智能可穿戴设备

Flexible Hand Wearable Rehabilitation Motion Assistance System

Haiwen Zhang¹, Hanrui Lin^{2*}, Danping Jia¹

¹School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning

²Department of Mechanical and Electrical Engineering, Liaoning Provincial School of Labor Economics, Shenyang Liaoning

Received: Feb. 13th, 2025; accepted: Mar. 13th, 2025; published: Mar. 21st, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张海文, 林涵睿, 贾丹平. 柔性手部可穿戴康复运动辅助系统[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(2): 350-361. DOI: 10.12677/airr.2025.142035

Abstract

Given the exacerbation of the aging population in China, the incidence of stroke patients is progressively increasing, leading to hand motor dysfunction as a prevalent sequela. This study aims to develop a flexible hand wearable rehabilitation motion assistance system to address the issues of high cost, low safety, inadequate force-to-weight ratio, excessive pressure requirements, and low patient engagement associated with current hand rehabilitation devices. The objective is to facilitate home-based rehabilitation training for stroke patients and assist them in performing daily activities. The core components of the proposed system include a flexible hand buckling actuator and a pneumatic control system. The actuator is fabricated from nylon fabric coated with TPU (Thermoplastic Polyurethane), ensuring excellent flexibility and comfort. The pneumatic control system comprises a micro air pump, high-frequency solenoid valves, and a control circuit board. Additionally, the system features a WeChat mini-program and an LCD touch screen for user-friendly human-computer interaction, enabling users to select various rehabilitation modes, access medical information, and review historical rehabilitation data. Experimental findings indicate that when the input pressure of the hand flexion actuator reaches a maximum of 300 kPa, the output force at the fingertip terminal can attain up to 11.6 N. These results substantiate the efficacy of the flexible hand wearable rehabilitation motion assistance system in home rehabilitation settings, providing substantial support for the restoration of stroke patients' self-care capabilities. The experimental results demonstrate that the hand flexion actuator constructed from flexible fabric materials offers a comfortable and soft wearing experience, ensuring high safety and effectively preventing secondary injuries in patients. Additionally, the proposed actuator achieves a high fingertip terminal output force even at lower pressures. By integrating an active rehabilitation strategy based on surface electromyography (sEMG) signals, patients can precisely control their rehabilitation training actions, thereby fully leveraging their autonomous consciousness. When combined with passive and mirror rehabilitation modes, this system forms a comprehensive wearable hand rehabilitation assistance system suitable for the entire rehabilitation process.

Keywords

Motor Function Restoration, Flexible Robotics Technology, Multimodal Human-Machine Interaction, Rehabilitation Exercise Assistance, Smart Wearable Devices

Copyright © 2025 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

脑卒中已经成为国内位居首位的过早死亡原因,严重危害中国国民的身心健康,是我国首位的成人致死、致残病因,其特点是高发病率、高复发率、高致残率和高经济负担[1]。康复运动辅助系统是机器人技术与康复医疗技术结合的产物,可帮助运动功能障碍患者重新恢复运动功能[2]。因此,手部可穿戴康复运动辅助系统针对手部功能为患者提供了居家自主康复的可行解决方案[3]。其中,刚性手部康复设备由电机驱动,其特点是具备高输出力和高位置精度[4] [5]; Houcheng Li 设计了一种用于手指双向运动的铝合金刚性联动手部外骨骼[6]。Lynne Weber 则提出了一种不需要与关节严格对齐的肌腱索驱动手部康复设备[7]。然而,刚性手部康复设备普遍存在结构复杂、重量大、舒适度差以及价格昂贵等问题[8]。在柔性手部康复设备中, Yulyan Wahyu Hadi 设计一种基于气动网络结构的手部执行器,通过腔室内气流的变化实现手指特定角度屈曲[9]。Panagiotis Polygerinos 使用液压流体驱动的弹性腔体和纤维增强材料设

计手部执行器[10]，但弹性体硅胶具备反弹性和较高气压需求限制了其有效性[11][12]。因此，针对上述问题，本文提出一种基于柔性织物材料的手部可穿戴康复运动辅助系统，以解决现有设备的重量大、安全性低和力重比小等问题。同时引入基于表面肌电信号的主动康复模式，采集人体生理信号，精准识别患者运动意图，旨在为脑卒中患者提供长期、低成本和有针对性的手部康复解决方案。进一步提高手部可穿戴式康复运动辅助系统的智能化水平。

2. 系统方案论证与设计

2.1. 基于 TPU 涂层织物的柔性执行器方案设计

柔性手部屈曲执行器是实现柔性手部可穿戴康复设备的关键，执行器的几何参数、结构及制作方法直接影响执行器的性能，也会进一步影响康复效果。所以在手部屈曲执行器的设计与制作上要综合多方面因素。

手部屈曲执行器通常由两部分组成：一个是在加压时膨胀的可延展层以及一个不可延展的应变限制层，限制其所在一侧线性延展。当充气加压时，手部屈曲执行器会产生围绕应变限制层的屈曲。本文中可延展层由带有 TPU 涂层的尼龙织物组成，应变限制层由不可延展的尼龙牛津布组成。在充气增加压力时，带有 TPU 涂层的尼龙织物拉伸，而牛津尼龙布则限制线性延展并转化为屈曲运动，辅助脑卒中患者手部进行屈曲运动。

2.1.1. 手部屈曲执行器参数确定

设定执行器长度为 L 为 140 mm，波纹形状是等腰三角形。折叠腔室高度 h 为 18 mm，折叠腔室跨度 a 为 18 mm，波纹管之间的距离 b 为 5 mm，远端距离 L_d 为 5 mm，近端长度 L_p 为 10 mm。执行器几何参数如图 1 所示。

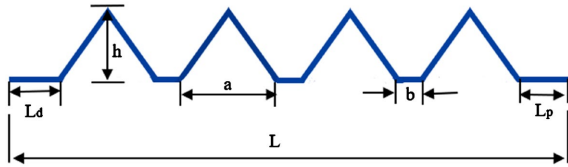


Figure 1. Hand flexion actuator geometry parameters
图 1. 手部屈曲执行器几何参数

2.1.2. 手部屈曲执行器参数确定

执行器材料选带有 TPU 涂层的尼龙织物，TPU 是一类加热可塑化溶解的弹性体，具有弹性好、耐磨性优异以及硬度大等特点，被广泛应用于医药卫生和服装等领域。带有 TPU 涂层的尼龙织物具有两层结构，其中织物层提供各向异性的机械性能，而 TPU 涂层经过热压溶解形成粘合剂，使复合材料可以与 TPU 薄膜粘合。应变限制层采用尼龙牛津布，其具备高强度、高耐磨性以及抗变形性。将带有 TPU 涂层尼龙织物的弹性、气密性与尼龙牛津布的高强度、抗形变性相结合，使执行器具备良好的柔顺性和便捷性的同时，在充气过程中精确转化为手部屈曲和对指运动。屈曲执行器制作材料如图 2 所示。



Figure 2. Actuator makes materials
图 2. 执行器制作材料

执行器的制作过程：首先，按照预设几何参数切割带有 TPU 涂层的尼龙织物和作为限制层的尼龙牛津布。其次，将带有 TPU 涂层的尼龙织物使用热压机进行热压，由于内部覆盖 TPU 涂层，可以保证良好的气密性并形成腔室。最后，将其折叠固定数量的波纹管并按照预设几何参数粘贴在限制层尼龙牛津布上。执行器两端，远端直接进行热压形成密封，近端预留气动接头后进行热压与专用胶水粘合密封。考虑柔性材料耐用性的问题，五根屈曲执行器通过魔术贴与织物载体集成，损坏可独立更换，无需更换整个手部屈曲执行器，提高设备的可维护性。当执行器充气加压时，如果缺乏应变限制层，波纹管会在气压作用下发生显著的应变和体积变化，从而产生线性延伸运动。但由于限制层尼龙牛津布的不可延展性，使执行器在线性方向无法延伸。与此同时，由于波纹管的三角形结构，彼此之间相互挤压，从而实现将线性延伸运动转化为手部屈曲运动。随着腔室内气压增大，波纹管体积变化越大，彼此之间的相互挤压也会随之增强，从而引起手部屈曲角度增加。如图 3 所示。

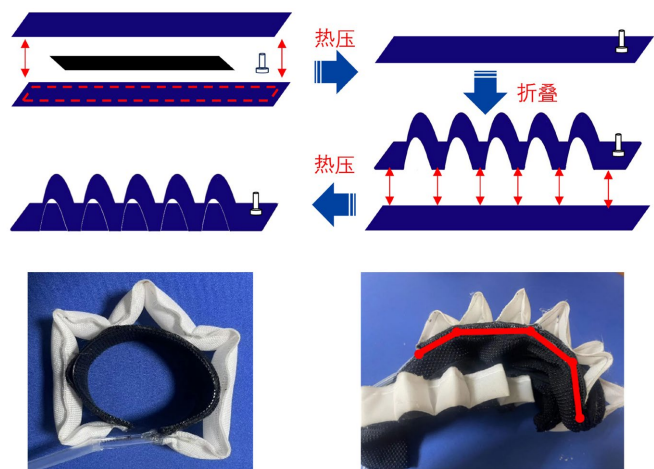


Figure 3. Buckling actuator production process and physical object
图 3. 屈曲执行器制作过程及实物

2.2. 柔性手部可穿戴康复运动辅助控制系统方案设计

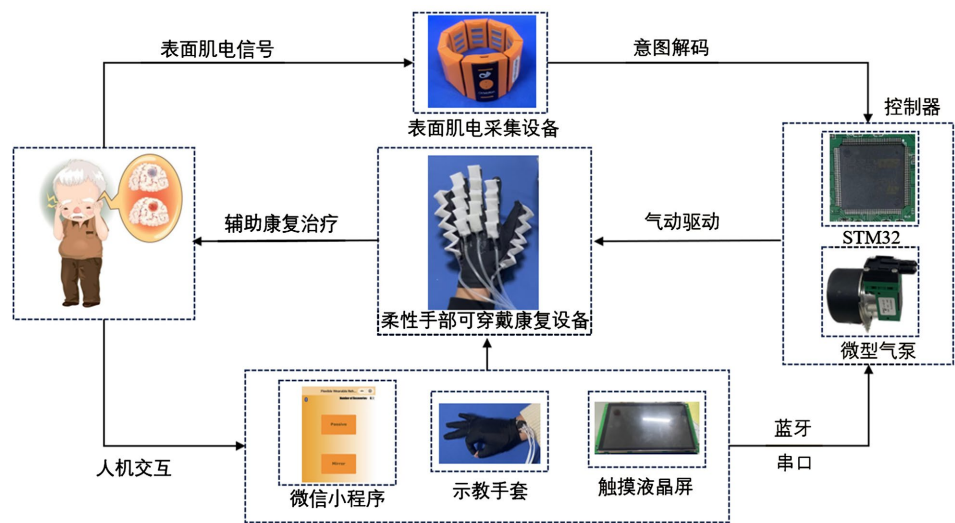


Figure 4. The overall scheme design of the control system
图 4. 控制系统总体方案设计

柔性手部可穿戴康复运动辅助控制系统主要分为上位机和下位机两部分。下位机以微控制器 STM32 作为处理核心, 搭建控制系统, 通过气动驱动电路, 驱动气泵。在电磁阀的控制下向对应的执行器充气以完成相应的康复动作。

上位机分为微信小程序和触摸液晶屏。微信小程序包括功能模式选择、不同模式下不同康复动作的选择、实时获取医疗资讯以及历史康复数据查询等功能。与触摸屏共同构成完整的人机交互系统。控制系统方案如图 4 所示。

3. 适应全周期的多种康复模式

3.1. 被动康复模式和镜像康复模式

被动康复模式通过预设手势动作, 每种手势动作对应特定串口指令。系统接收到指令后, 下位机控制系统对指令进行解析, 获取其中的运动参数。控制系统以运动参数为目标, 控制执行器辅助患者完成指定动作。

镜像康复模式通过利用薄膜压力传感器监测和识别健侧手的手部姿态, 同时执行器驱动患侧手完成相同的动作, 通过模仿实现了更自然、更精准的康复训练。示教手套每根手指部署一个薄膜压力传感器, 如图 5 所示。



Figure 5. Membrane pressure sensor and teaching gloves
图 5. 薄膜压力传感器和示教手套

3.2. 基于表面肌电信号的主动康复模式

主动康复模式是指患者在患侧同时佩戴无线肌电采集设备和手部可穿戴康复设备, 无线肌电采集设备采集患者前臂表面肌电信号, 提取特征信息作为输入, 利用机器学习算法 LDA (Linear Discriminant Analysis), 建立起人体生理信号与运动意图之间的准确映射, 以精准识别患者运动意图。通过主动康复策略, 患者可以主动参与患侧手部康复训练, 通过自主意识控制和完成手部动作, 仿佛是在主动进行手部运动, 而不是被动地接受设备的驱动。机器学习算法 LDA 是一种有监督的降维技术, 通过将数据投影到低维空间来实现分类。LDA 的目标是在投影后最小化类内方差, 使得同一类别的样本彼此间尽可能接近, 同时最大化类间方差, 使不同类别的样本尽可能远离。这一特点使得 LDA 能够有效区分不同类别的样本。其主要优点在于, 它通过学习类间和类内方差进行分类, 而非直接对样本进行训练, 因此能够避免由于数据不足而导致的过拟合问题。此外, LDA 计算效率较高, 满足本文在主动康复模式下, 辅助患者完成日常生活任务时, 对于人体运动意图识别的实时性要求。该模型训练时间较短, 训练过程仅需约 0.8 秒。主动康复模式流程如图 6 所示。

主动康复模式步骤: 首先患者在患侧手佩戴无线肌电采集设备采集前臂生理信号, 构建人体手部动作数据库, 共计 12 种手部动作进行分类。每种动作采集 3 次, 每次动作采集 6 秒, 放松 6 秒, 一次流程共计 12 秒。设置无线肌电采集设备采样频率为 500 Hz, 因此每种对应动作数据为 9000 个样本。然后, 使用滑动窗对数据进行分片, 考虑在线分类实时性, 窗长不宜超过 300 毫秒[13]。所以本文选择窗宽为

250 毫秒，滑动步长为 100 毫秒。其次，对分片后的数据进行特征工程，分别提取 WL (Waveform Length)，MAV (Mean Absolute Value)，RMS (Root Mean Square)，ZC (Zero Crossings)以及 SSC (Slope Sign Change)，共 5 种时域特征。由于每片数据包含 8 通道表面肌电信号，所以每片数据共计可获得 40 个特征向量。最后，将特征向量作为输入，调用 Scikit-learn 库中提供的 LDA 算法准确识别患者运动意图，并根据识别结果柔性手部可穿戴康复设备辅助患者完成手部动作。手部动作类别及不同种类手势识别准确率如图 7 所示。12 种手部动作离线识别准确率为 95.51%。动作类别和离线识别率均高于参考文献[14]。

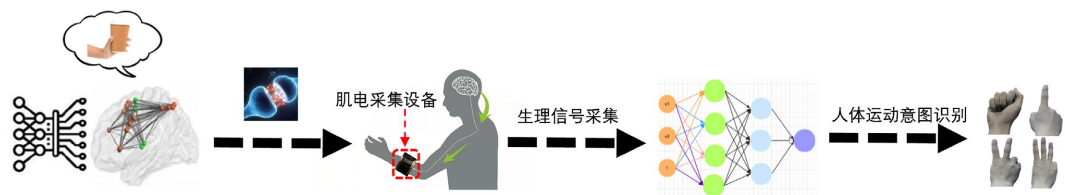


Figure 6. Active rehabilitation model process
图 6. 主动康复模式流程

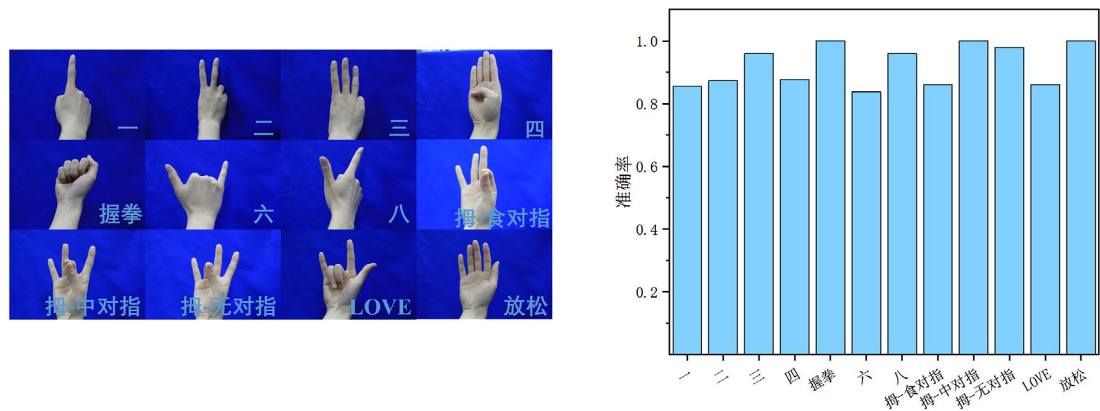


Figure 7. Hand movement types and the accuracy of different types of gesture recognition
图 7. 手部动作类别及不同种类手势识别准确率

在线手部动作识别准确率实验，按顺序遍历 12 种手部动作一次，随机遍历 12 种手部动作一次，随机抽取 6 种动作，每种动作执行 4 次，共计完成 48 次动作，稳定后成功识别 45 次，每次在线识别耗时 1.014 秒，在线识别准确率为 93.75%。基于机器学习的手部动作识别研究对比分析如表 1 所示。

Table 1. Comparative analysis of hand action recognition research based on machine learning
表 1. 基于机器学习的手部动作识别研究对比分析

作者	动作种类	传感器类别	算法模型	离线识别准确率
孟云等[14]	9 种	单目相机	MediaPipe	93.71%
Duan 等[15]	9 种	3 通道肌电传感器	LDA	91.7%
Y. Arayan [16]	5 种	8 通道肌电传感器	KNN	89.00%
本文	12 种	8 通道肌电传感器	LDA	95.51%

3.3. 基于微信小程序的人机交互界面设计

微信小程序主要功能为：康复模式选择：根据患者康复周期不同选择对应的康复模式。康复数据查

询：患者可以通过查询历史康复训练次数，帮助患者或医生进行训练量规划。有助于激发用户的积极性，更加专注于康复目标。医疗资讯：患者可以浏览与脑卒中有关的饮食习惯、康复方法以及医疗咨询等。有助于用户更好地进行自我居家康复。总体而言，加入医疗资讯的界面和历史康复数据查询界面可以使基于微信小程序的康复训练系统成为一个更全面、更人性化的工具。微信小程序实机界面如图 8 所示。



Figure 8. WeChat mini program human-computer interaction interface
图 8. 微信小程序人机交互界面

3.4. 基于触摸液晶屏的人机交互界面设计

触摸屏包含微信小程序的所有功能。在主机端脱离手机小程序控制或在外出便携式移动场景时，可通过触摸屏实现手部可穿戴康复运动辅助系统的各种功能。触摸屏界面如图 9 所示。

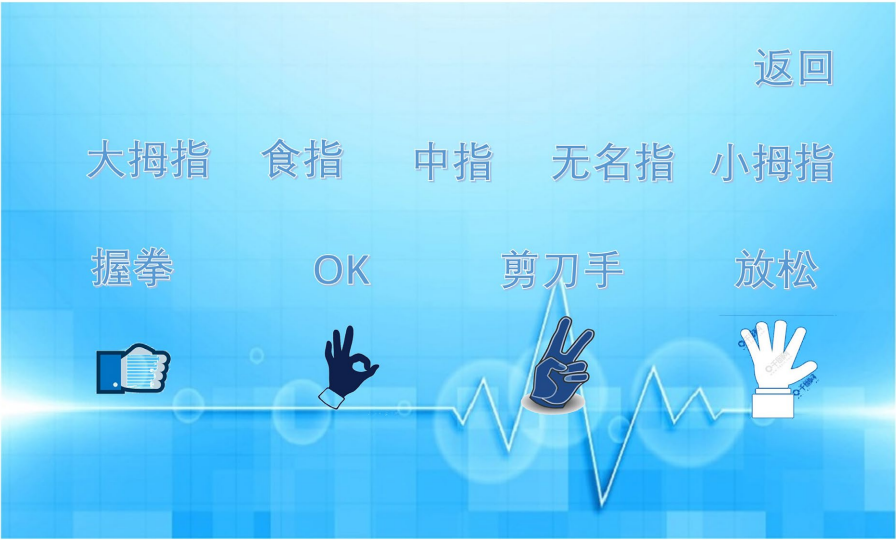


Figure 9. Touchscreen human-computer interface
图 9. 触摸屏人机交互界面

4. 系统测试与功能验证

4.1. 气路参数标定实验

执行器产生屈曲的动力依赖于气动驱动。因此，折叠腔室内部气压大小将与执行器的终端输出力以及康复手整体的康复效果息息相关。而波纹管折叠腔室内部体积直接决定充气量大小，又因为执行器长度固定，所以执行器的气路宽度决定了折叠腔室内部气压的大小。实验设计并制作三种不同气路宽度的手部执行器，气路参数分别为 1.6 cm、1.8 cm 以及 2.0 cm，分别测试指尖终端输出力大小。经过实验验证，在相同气压下，随着气路宽度的增加指尖终端力大小也随之增加。1.8 cm 宽度气道相较于 1.6 cm 宽度气道以指尖终端输出力作为指标，性能提升 48.4%。2.0 cm 宽度气道相较于 1.8 cm 宽度气道性能提升 31.9%。但执行器气道宽度过宽会引起执行器彼此之间的相互干扰。因此，本作品手部屈曲执行器确定为 2.0 cm。在防止执行器相互干扰的前提下，保证输出较高指尖终端输出力。测试结果如图 10 所示。

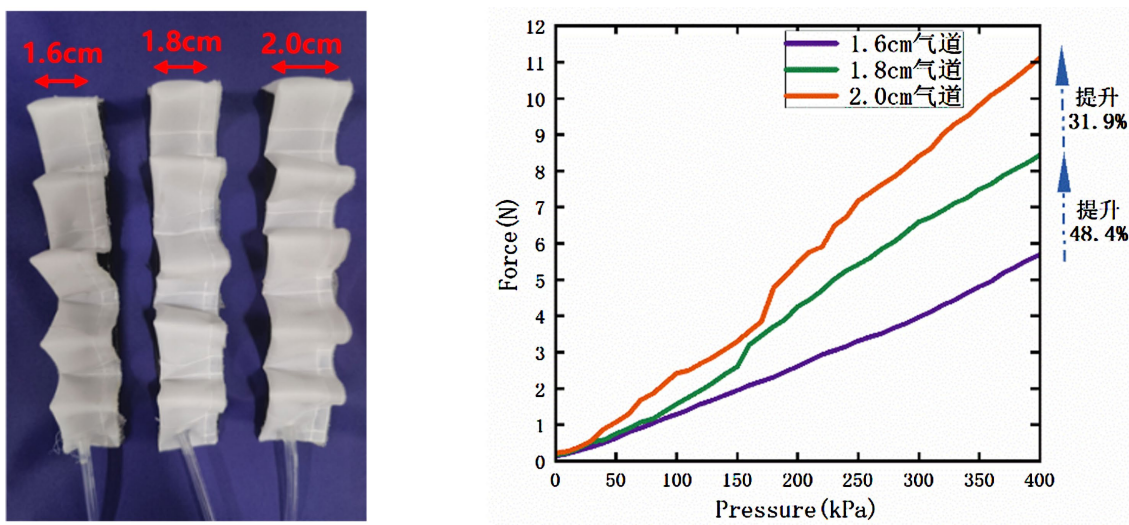


Figure 10. Calibration experiment of gas path parameters
图 10. 气路参数标定实验

4.2. 指尖终端输出力测试

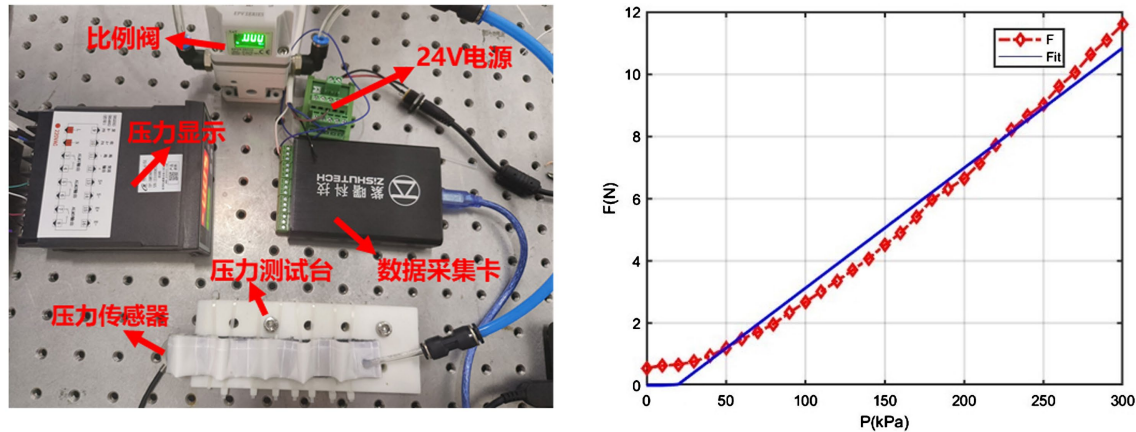


Figure 11. Fingertip terminal output force test platform and experimental results
图 11. 指尖终端输出力测试平台及实验结果

指尖终端输出力是衡量柔性手部可穿戴康复设备性能的重要指标，相同气压下终端输出力越大，证明柔性手部可穿戴康复设备性能越优秀。因此，搭建指尖终端输出力测试实验平台，测试不同气压下柔性执行器的终端输出力。指尖终端输出力由高精度称重压力传感器、压力显示器、比例阀以及数据采集卡组成。实验平台如图 11 所示。控制输入气压部分由比例阀和数据采集卡组成。压力测试部分由高精度称重压力传感器和压力显示器构成。压力传感器放置在屈曲执行器终端位置，测量指尖终端输出力。传感器输出数据到压力显示器，显示指尖终端力大小。测试结果证明随着比例阀输入气压逐步增大，指尖终端输出力也随之增大。考虑材料耐压性和患者佩戴安全，限制最大输入气压 300 Kpa。手部屈曲执行器在输入气压最大 300 Kpa 时，指尖终端输出力可达 11.6 N。

4.3. 柔性手部可穿戴康复设备性能分析

将五个屈曲执行器通过魔术贴与织物手套集成为柔性手部可穿戴康复设备，整体重量仅为 40.86 克。相较于参考文献[17]刚性手部康复设备重量更轻、安全性高、成本低且佩戴更舒适。相较于参考文献[18]弹性体制备的柔性手部康复设备，重量更轻且能够在较低的气压下输出较大的指尖终端输出力。织物材料的不足之处在于柔性执行器反复循环充气放气过程，可能出现织物疲劳效应，导致织物强度和性能下降等问题。因此，每根屈曲执行器通过魔术贴独立与织物手套集成。如果因异物刺破或到达使用寿命可便捷独立更换。不同材料的手部可穿戴康复设备对比，如表 2 所示。

Table 2. Performance analysis of hand wearable rehabilitation devices of different materials
表 2. 不同材料的手部可穿戴康复设备性能分析

作者	材料	重量	终端输出力	康复模式
Tobias Bützer 等[17]	不锈钢带 + 树脂	148 克	6.4 N (电机驱动)	被动、主动
Debin Hu 等[18]	橡胶 + 树脂	149 克	1.9 N (150 Kpa)	被动、阻抗
Fujun Wang 等[19]	硅胶 + 树脂	-	1.59 N (130 Kpa)	被动、辅助抓握
本文	织物	40.86 克	4.3 N (150 Kpa)	主动、被动、镜像

4.4. 多模式康复实验验证

设计实验测试柔性手部可穿戴康复运动辅助系统三种康复模式。首先是被动康复模式，通过触摸屏选择预设手势动作或者微信小程序选择需要进行康复训练的指定手指。气动控制系统按照预设手势动作向对应屈曲执行器充气，达成手部可穿戴康复设备辅助患者进行手部康复训练的目的。

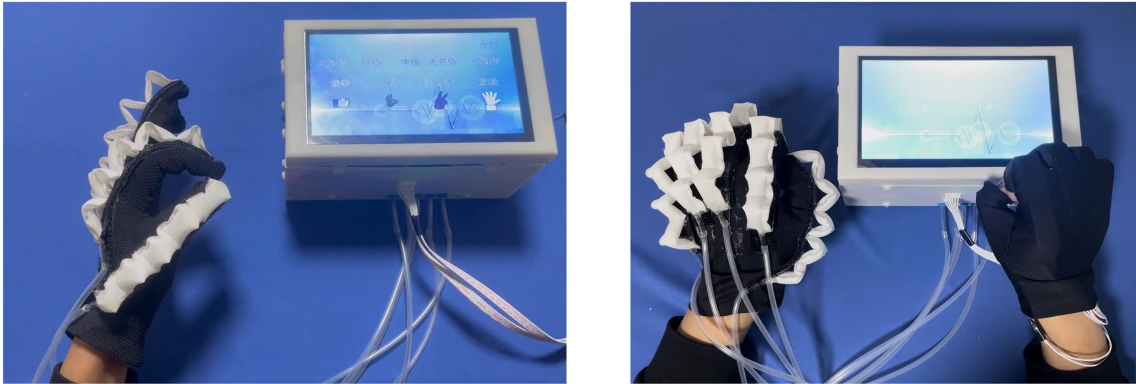


Figure 12. Passive and mirror rehabilitation modes
图 12. 被动和镜像康复模式

其次是镜像康复模式，患者于健侧手佩戴示教手套，根据健侧手部动作柔性手部可穿戴康复设备带动患侧手执行相同手部动作。这种模式可以更直观地激发患者的主动参与，从而增强康复训练效果，为患侧提供一种生动、直观的康复训练方式。验证结果如图 12 所示。

最后是主动康复模式，主动康复模式是通过佩戴肌电传感器采集患者同侧前臂肌电信号，识别患者运动意图，使患者可以主动切换康复动作。核心优势在于能够保证患者长期具备康复主动性，提高自我管理能力，使患者更加愿意投入到康复训练中，从而提高了康复训练的效果和效率[20]。主动康复模式如图 13 所示。

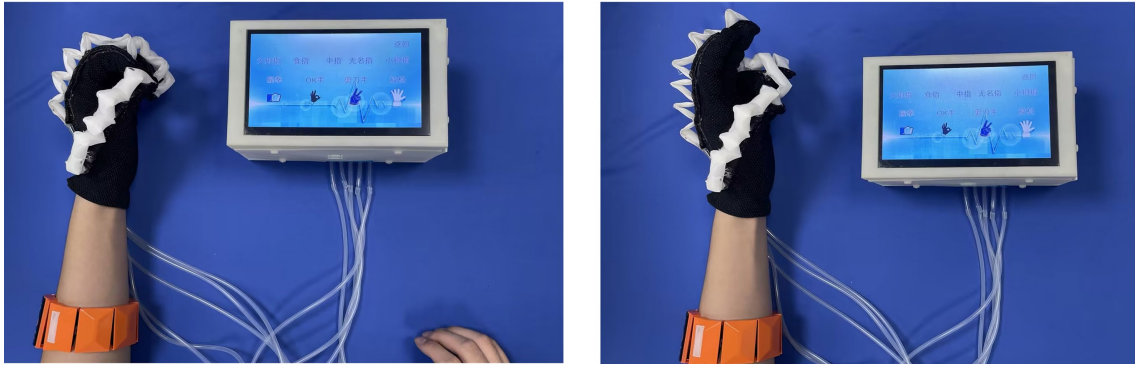


Figure 13. Active rehabilitation mode
图 13. 主动康复模式

4.5. 日常生活活动实验

为评估柔性手部可穿戴康复设备在模拟日常生活中的任务时对患者辅助效果，设计进行柔性手部可穿戴康复设备的 ADL (Activities of Daily Living)实验。实验内容为选择与日常生活活动相关的任务。如握取物体和旋转物体等。测试中设置了握和捏的动作手势分别应用于生活中常见的抓握水果和捏剃须刀。测试结果如图 14 所示。实验结果为柔性手部可穿戴康复设备可成功辅助受试者完成 ADL。与此同时收集受试者主观感受，在执行器加压时，明显感受到手部执行器对于完成任务的辅助作用。在没有加压时，由于执行器使用的柔性织物材料结构柔软，受试者佩戴没有明显不适感。



Figure 14. Wear and assist patients to perform daily living tasks as a whole
图 14. 整体穿戴及辅助患者进行日常生活任务测试

5. 结论

本文设计了一种基于 TPU 涂层织物材料的柔性手部可穿戴康复运动辅助系统,通过气动控制系统辅助患者进行手指屈曲,实现自主居家康复训练。实验结果表明,相较于刚性和柔性硅胶材质,所设计的柔性执行器在 300 Kpa 下,终端输出力为 11.6 N,证明较低气压下即可提供更高的终端输出力,整体重量为 40.86 克,佩戴更舒适。引入基于表面肌电信号的主动康复模式,成功实现识别人体 12 种运动意图,离线识别准确率达到 95.51%,根据识别结果手部可穿戴康复运动辅助系统辅助患者完成日常生活任务,增强了患者的主动参与感,进而提高了康复训练的效率。与被动康复模式和镜像康复模式共同构成适用于康复全周期的柔性手部可穿戴康复运动辅助系统。

基金项目

辽宁省教育厅面上项目(JYTMS20231213)。

参考文献

- [1] Report on Stroke Prevention and Treatment in China Writing Group. 《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] 刘勤, 冯灵, 汪锐, 周乾晓, 等. 康复机器人在脑梗死偏瘫患者中应用的研究进展[J]. 中国临床研究, 2024, 37(4): 621-625.
- [3] Qassim, H.M. and Wan Hasan, W.Z. (2020) A Review on Upper Limb Rehabilitation Robots. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 6976. <https://doi.org/10.3390/app10196976>
- [4] Liang, R., Zhang, Q., He, B. and Li, L. (2024) Visual Representation of the Compactness of a Stephenson-II Six-Bar Linkage Exoskeleton Using Solution Region Synthesis Theory. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **9**, 4415-4422. <https://doi.org/10.1109/lra.2024.3354625>
- [5] Chowdhury, A., Nishad, S.S., Meena, Y.K., Dutta, A. and Prasad, G. (2019) Hand-Exoskeleton Assisted Progressive Neurorehabilitation Using Impedance Adaptation Based Challenge Level Adjustment Method. *IEEE Transactions on Haptics*, **12**, 128-140. <https://doi.org/10.1109/toh.2018.2878232>
- [6] Li, H., Cheng, L., Sun, N. and Cao, R. (2022) Design and Control of an Underactuated Finger Exoskeleton for Assisting Activities of Daily Living. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **27**, 2699-2709. <https://doi.org/10.1109/tmech.2021.3120030>
- [7] Park, S., Weber, L., Bishop, L., Stein, J. and Ciocarlie, M. (2018) Design and Development of Effective Transmission Mechanisms on a Tendon Driven Hand Orthosis for Stroke Patients. 2018 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, 21-25 May 2018, 2281-2287. <https://doi.org/10.1109/icra.2018.8461069>
- [8] Copaci, D., Cerro, D.S.D., Guadalupe, J.A., Lorente, L.M. and Rojas, D.B. (2024) sEMG-Controlled Soft Exo-Glove for Assistive Rehabilitation Therapies. *IEEE Access*, **12**, 43506-43518. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3380469>
- [9] Hadi, Y.W., Sunarya, B.A.Y., Alifdhyatra, A.F., Hidayat, E., Salomo, J., Purwidyantri, A., et al. (2023) Programmable Soft Robotics Actuator with Pneumatic Networks (PneuNets). *IEEE Sensors Journal*, **23**, 19382-19389. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3297402>
- [10] Polygerinos, P., Wang, Z., Galloway, K.C., Wood, R.J. and Walsh, C.J. (2015) Soft Robotic Glove for Combined Assistance and At-Home Rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, **73**, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014>
- [11] Yang, Y., Zhang, Y., Meng, Q. and Yu, H. (2024) A Novel Pneumatic Soft Exoskeleton Rehabilitation Glove for Extension Training to Hand Rehabilitation. 2024 9th *International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, Jeju Island, 18-20 July 2024, 225-230. <https://doi.org/10.1109/cacre62362.2024.10635045>
- [12] Fidinillah, T., Risangtuni, A.G., Kurnia Putra, N., Virdyawan, V., Suprijanto, S. and Putri, S.M. (2023) Design of Soft Pneumatic Actuator in Hand Rehabilitation Robot with Fem-Based Modeling. 2023 8th *International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, Jakarta, 9-11 August 2023, 109-113. <https://doi.org/10.1109/ica58538.2023.10273084>
- [13] Li, K., Zhang, J., Wang, L., Zhang, M., Li, J. and Bao, S. (2020) A Review of the Key Technologies for sEMG-Based Human-Robot Interaction Systems. *Biomedical Signal Processing and Control*, **62**, Article ID: 102074. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102074>

-
- [14] 孟云, 韩建海, 李向攀, 等. 手型识别的手功能康复动作快速规划研究[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(1): 96-99.
- [15] Duan, F., Ren, X. and Yang, Y. (2021) A Gesture Recognition System Based on Time Domain Features and Linear Discriminant Analysis. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, **13**, 200-208. <https://doi.org/10.1109/tcds.2018.2884942>
- [16] Narayan, Y. (2021) SEMG Signal Classification Using KNN Classifier with FD and TFD Features. *Materials Today: Proceedings*, **37**, 3219-3225. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.089>
- [17] Bützer, T., Lambercy, O., Arata, J. and Gassert, R. (2021) Fully Wearable Actuated Soft Exoskeleton for Grasping Assistance in Everyday Activities. *Soft Robotics*, **8**, 128-143. <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0135>
- [18] Hu, D., Zhang, J., Yang, Y., Li, Q., Li, D. and Hong, J. (2020) A Novel Soft Robotic Glove with Positive-Negative Pneumatic Actuator for Hand Rehabilitation. 2020 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Boston, 6-9 July 2020, 1840-1847. <https://doi.org/10.1109/aim43001.2020.9158826>
- [19] Wang, F., Chen, Y., Wang, Y., Liu, Z., Tian, Y. and Zhang, D. (2022) A Soft Pneumatic Glove with Multiple Rehabilitation Postures and Assisted Grasping Modes. *Sensors and Actuators A: Physical*, **347**, Article ID: 113978. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113978>
- [20] 周平, 陈思韵, 李文兮, 等. 促进康复动机的策略在卒中康复中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(2): 280-287.