

面向脑卒中患者的踝关节助行柔性外骨骼系统研究

张文芽

安徽省皖南康复医院/芜湖市第五人民医院

DOI:10.12238/bmtr.v7i1.11811

[摘要] 本研究针对脑卒中患者踝关节功能障碍导致的行走困难,设计并实现了一种基于柔性鲍登线传动的可穿戴外骨骼机器人。该机器人通过模拟人体肌肉-肌腱-骨骼系统,提供跖屈和背屈两种助行模式,以辅助患者恢复正常的步行功能。论文详细阐述了踝关节运动学分析、外骨骼机器人工作原理、助力方法以及结构设计,并重点介绍了基于模糊控制的鲍登线内芯位移控制策略,实现了对预设助力曲线的有效跟随。实验结果表明,该外骨骼机器人具有良好的助行效果,能够有效减轻患者下肢肌肉负担,提升步态的稳定性和协调性。本研究为脑卒中患者的康复治疗提供了一种可行的技术方案,并为未来柔性外骨骼机器人的发展提供了有益的探索。

[关键词] 柔性外骨骼机器人; 踝关节助行; 鲍登线传动; 脑卒中; 模糊控制; 步态分析

中图分类号: R336 **文献标识码:** A

Research on ankle joint assisted flexible exoskeleton system for stroke patients

Wenya Zhang

Anhui Anhui Rehabilitation Hospital Wuhu Fifth People's Hospital

[Abstract] This study designed and implemented a wearable exoskeleton robot based on flexible Bowden wire transmission to address the walking difficulties caused by ankle joint dysfunction in stroke patients. This robot simulates the human muscle tendon skeleton system and provides two walking modes, plantarflexion and dorsiflexion, to assist patients in restoring normal walking function. The paper elaborates on the kinematic analysis of the ankle joint, the working principle of exoskeleton robots, assistance methods, and structural design. It also focuses on the displacement control strategy of the Bowden wire core based on fuzzy control, which effectively follows the preset assistance curve. The experimental results show that the exoskeleton robot has good walking assistance effect, which can effectively reduce the burden on the lower limb muscles of patients and improve the stability and coordination of gait. This study provides a feasible technical solution for the rehabilitation treatment of stroke patients and offers valuable exploration for the future development of flexible exoskeleton robots.

[Key words] flexible exoskeleton robot; Ankle joint walking assistance; Bowden line transmission; Stroke; Fuzzy control; Gait analysis

引言

脑卒中常致下肢运动障碍,踝关节失控尤为常见,严重影响患者生活。传统康复周期长、效果不定。可穿戴外骨骼机器人作为新兴手段,能提供主动助力,辅助功能训练。然而,现有刚性外骨骼存在体积大、重量重、穿戴不便等缺陷,限制了日常康复应用。本研究旨在设计一种柔性踝关节助行外骨骼机器人,采用鲍登线传动系统,实现远距离动力传输,降低设备重量,提高穿戴舒适性。通过深入研究踝关节运动学和肌肉激活模式,提出针对性助行策略,以期对脑卒中患者提供更高效、安全的康复方案。

1 柔性外骨骼机器人助行原理及结构设计

1.1 关节运动分析

踝关节的运动分析是外骨骼系统设计的基石,我们采用三维运动捕捉系统,以 $\pm 0.5^\circ$ 的精度记录了正常步态下踝关节在矢状面的运动轨迹。在步态周期中,跖屈和背屈分别对应负角度和正角度。支撑相中,踝关节从初始的约 -10° 跖屈角开始,逐渐变化至背屈角度,在背屈控制下达到最大背屈角,约为 $10^\circ - 15^\circ$,接着在足底动力相中快速跖屈至约 -20° 。而在摆动相中,踝关节主要进行背屈运动,维持在约 $5^\circ - 10^\circ$,以确保足部离地间隙,避免足下垂。我们还通过肌电图(EMG)分析了踝关节相关肌肉的

激活时序,发现小腿三头肌在支撑相的30%–60%步态周期内被激活,峰值力矩在47%GC左右,而胫骨前肌在摆动相中被激活。

1.2 柔性外骨骼机器人工作方式

本研究的核心在于采用基于鲍登线传动的柔性外骨骼机器人,以实现功率的远距离传输与控制。鲍登线选用内管全注油式外鞘,其摩擦系数 $\mu \leq 0.05$,内芯则采用表面喷涂Teflon自润滑材料,进一步降低摩擦。外鞘采用内径为3mm、外径为4.5mm的聚四氟乙烯管,内芯为直径2mm的7×7股不锈钢钢丝绳,抗拉强度达500N。通过在小腿三头肌处和足跟处以及胫骨前肌处和前脚掌处构建人机连接点,采用医用级硅胶绑带和分子复合鞋垫,确保了人机交互的稳定性和舒适性。当模块化关节驱动内芯收缩时,会模拟人体肌肉的拉力,最大输出力可达80N,最大行程为30mm,通过鲍登线系统实现力量的传递,并通过转接件将力精准的传递到人机连接点,形成有效辅助力矩。传动系统的总效率经测试为75%,并具有良好的重复性和稳定性。

1.3 柔性外骨骼机器人助行方法

柔性外骨骼机器人针对踝关节运动障碍采用了差异化助行策略。对于跖屈障碍,在支撑相的20%GC–30%GC内,通过保持鲍登线内芯长度不变,实现被动预紧,此时,由于足的自然下落,会形成约10N左右的拉力,为随后的主动助力做准备。在30%GC–60%GC,采用模糊控制算法,基于踝关节角度变化和力传感器数据,控制电机主动收缩内芯,最大输出力可达40N,并采用类抛物线曲线进行助力,峰值在47%GC,有效助力时间为30%GC。对于背屈障碍,在摆动相的65.8%GC–100%GC内,利用预设的背屈轨迹控制内芯收缩,最大输出力达30N,辅助患者抬起前脚掌,有效防止足下垂。在非助行阶段,鲍登线内芯保持松弛状态,不施加任何阻力。这种精细化的助力控制,保证了助行的有效性和舒适性。

1.4 柔性外骨骼机器人总体构型

柔性外骨骼机器人采用模块化设计,以实现轻量化、可扩展性和易穿戴性。驱动单元集成模块化关节,重量为0.9kg,内部包含200W无刷直流电机和1:49减速比的摆线针轮减速器,最大输出扭矩为8Nm。鲍登线外鞘采用可拆卸转接件固定在绑带上,绑带由高强度尼龙布和医用级硅胶组成,并内嵌三根3mm直径的不锈钢支撑条,以确保支撑力和舒适性。鞋垫则采用分子复合材料,前脚掌和足跟处分别设有尼龙织带吊环,用于连接内芯。整个外骨骼系统的总重约2.5kg,其中下肢穿戴设备重量为0.5kg,有效降低了穿戴负担。驱动单元和穿戴设备的连接采用快拆式结构,便于快速安装和拆卸。这种模块化设计不仅提高了系统的灵活性和通用性,也便于未来的维护和升级。

1.5 柔性外骨骼机器人样机搭建

样机搭建过程中,我们采用了精密加工和3D打印技术。收线机构的核心部件,包括绞轮(直径50mm)和保护罩,均采用高强度铝合金经CNC加工而成,精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$,绞轮表面开有T型卡口,用于固定鲍登线内芯的线头,确保连接的可靠性。绞轮由模块化关节驱动,实现了内芯的精确位移控制,最大行程30mm,位移精度0.1mm。力传感器采用HBMU9B系列,量程为200N,精度为 \pm

0.5N,用于实时监测鲍登线内芯的拉力。下肢穿戴设备通过魔术贴和快拆扣连接,确保了良好的贴合度和可调整性。整个系统采用统一的CAN总线进行数据传输,采样频率为100Hz。控制系统采用STM32F407单片机,实现了对电机驱动和数据采集的实时控制。样机搭建过程中,我们进行了多次静态和动态测试,验证了系统的性能和可靠性。

2 步态检测鞋垫设计

2.1 下肢步态检测方法研究

下肢步态检测是实现柔性外骨骼机器人精准助行的关键技术,本研究深入对比了机器视觉、测力板以及穿戴式传感器三种主流检测方法。尽管机器视觉系统具备提供全面三维运动信息的能力,但其对软硬件要求极高,依赖高速相机和繁琐的标记点粘附,同时响应速度较慢,不适用于实时控制反馈。测力板虽能提供高精度的足底压力数据,但其体积与重量限制了应用场景,无法满足可穿戴设备的要求。综合考虑,本研究选择了穿戴式薄膜压力传感器作为核心检测元件。相较于单一传感器,多传感器阵列能够捕获更全面的足底压力分布信息,因此我们设计了包含16个传感器的阵列,根据足底解剖区域进行分布,力求精确捕捉足跟、足弓以及前脚掌区域的压力变化。

2.2 步态检测鞋垫下位机设计

步态检测鞋垫的下位机设计是实现数据精确采集与处理的核心。我们采用了国产短尾型压阻式薄膜压力传感器,其感测直径为10mm,厚度仅0.2mm,响应频率高达250Hz,满足了高动态步态检测的需求。鞋垫上集成了16个压力传感器,并在足弓关键区域增设了额外的传感器,以捕捉更为细致的足底压力分布。每个传感器通过独立的采样电路进行信号采集,采样电路采用运算放大器跟随电路进行模拟信号采集,保证了信号的稳定性和准确性。采集的模拟信号经由模数转换器(ADC)转换为数字信号,ADC的采样频率设定为100Hz。为保证信号质量,下位机软件采用基于Mbed平台的C++编程,并使用了滑动平均滤波器进行数字滤波,其窗口大小设定为5,在保证数据实时性的前提下有效滤除了高频噪声。最终,通过UART以115200bps的波特率与上位机进行通信,确保了数据传输的稳定性和可靠性。

2.3 步态检测功能实现

步态检测鞋垫的软件系统具备了强大的步态信息提取与分析能力。足跟触地时刻(HS)的检测是基于15号传感器(足跟后部)的压力阈值实现,当传感器压力超过预设值时,则判定为足跟触地,并记录时间戳。连续两次足跟触地的时间差作为步态周期,为降低误差,我们采用了连续前三步的平均步态周期值作为当前步态周期的估计。步态相位判断则是依据前脚掌的三个关键传感器(第一趾、第一跖骨和第四跖骨)的触地状态,任意一个传感器信号有效则认定为前足触地。利用每个传感器位置坐标和压力值,通过力矩平衡原理计算出足底压力中心(COP),其轨迹可以反映足部的移动和受力情况。上位机软件利用双调和样条插值算法对离散压力数据进行插值处理,生成连续的足底压力云图,实现足底压力分布的动态可视化,为步态分析和反馈

控制提供了直观依据,可以帮助使用者实时监测自身的压力分布情况。

3 柔性外骨骼机器人驱动与控制方法

3.1 模块化关节FOC驱动

本研究采用磁场定向控制(FOC)技术驱动模块化关节内嵌的无刷直流电机,以实现高效、精准的转矩输出。相较于传统的方波驱动,FOC通过坐标变换将三相定子电流解耦为直流量,有效减少了转矩脉动和电机噪声。电机选用Y型连接,额定电压为24V,额定转速为3000rpm,极对数为7。电流采样方面,我们利用霍尔传感器,以±0.5%的精度实时获取电机定子的两相电流值,并通过Clarke变换转换为静止坐标系下的两相电流。随后,采用Park变换将静止坐标系电流转换为旋转坐标系下的电流,该过程的变换角度由14位磁编码器(MA730)反馈的电机转子位置决定,编码器精度为 0.022° 。为实现高动态性能,我们采用了 90° 恒转矩角控制策略,将定子电流控制在正交轴,保证转矩与电流的线性关系。整个驱动系统采用STM32F446作为主控芯片,并通过SPI与DRV8323栅极驱动器通信,实现对MOSFET的精准控制,MOSFET的导通电阻为 $5\text{m}\Omega$,开关频率为20kHz。

3.2 鲍登线内芯位移控制方法

为实现鲍登线内芯的精确位移控制,本研究采用了双闭环PID控制方法,控制框图由位置环和电流环组成。位置控制目标由上层控制器设定,并且由磁编码器反馈位置进行闭环控制。该位置的设定是根据人体步态周期进行分段设计的,例如在跖屈助力阶段,会有一个持续30%GC时间的位移量设定,在背屈助力阶段会有一个15%GC的位移设定。电流环的作用是根据位置控制的输出指令,对电机电流进行精准控制。在控制算法层面,我们采用了增量式PID算法,相较于位置式PID,增量式PID只与当前采样和前两次采样的误差有关,不易产生积分失控,同时降低了计算量。PID控制器的参数整定是基于试凑法和经验法相结合,经过多次的调整,使得内芯的位移精度可以达到 $\pm 0.1\text{mm}$,响应时间小于 50ms 。内芯的位移量与电机转动角度,减速比和绞轮半径有关,其中绞轮半径为 2.5cm ,减速比为1:49。整个控制过程在100Hz的控制频率下运行,确保了控制的实时性和稳定性。

3.3 鲍登线内芯出力控制方法

为实现柔性外骨骼机器人在助力过程中出力与预设期望助力曲线的跟随,我们设计了一种基于模糊控制的出力控制方法。由于人机系统存在不确定性,传统PID难以实现精确控制,因此我们使用模糊控制器。控制器的输入为实际助力值与期望助力值之间的误差 e ,以及该误差的变化率 e_c ,其中助力值由安装在鲍登线上的力传感器实时测量,力传感器的测量精度为 $\pm 0.5\text{N}$,量程为200N,采样频率为100Hz。误差 e 和误差变化率 e_c 的模糊集合定义为7个语言变量:负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(O),正小(PS),正中(PM),正大(PB)。每个变量的量化等级为 $[-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$,隶属度函数为三角形。控制规则由专家经验制定,并通过查询表的方式存储在控制器中,控制器的输出为内芯位移增量,经过模糊推理后,采用重心法进行解模糊处理,

得到精确的内芯位移增量,进而驱动电机跟随期望的助力曲线,控制过程的更新频率为100Hz。

4 面向踝关节助行的柔性外骨骼机器人实验

4.1 柔性外骨骼机器人实验系统搭建

为验证所设计的柔性外骨骼机器人助行性能,我们搭建了包含动力系统、控制系统、传感系统和人机交互系统的综合实验平台。动力系统基于模块化关节驱动,最大输出扭矩为8Nm,通过鲍登线传递动力。控制系统以STM32F446微控制器为核心,运行频率为180MHz,采用双闭环PID和模糊控制算法,实现了对内芯位移和输出力的精确控制。传感系统包括:(1)基于惠斯通电桥的力传感器,量程为200N,精度为 $\pm 0.5\text{N}$,用于实时测量鲍登线内芯张力;(2)基于柔性电路板的步态检测鞋垫,集成16个薄膜压力传感器,每个传感器的感测直径为10mm,精度为 $\pm 5\%$,用于同步采集足底压力分布;(3)基于磁编码器MA730的电机位置传感器,精度为 0.022° 。所有传感器数据通过CAN总线或UART接口以100Hz的采样率传输至主控板,主控板通过USB串口与上位机通信,实现数据的实时显示和分析。为保证信号质量,我们对力传感器信号进行了两级放大,总放大倍数约为300倍。

4.2 柔性外骨骼机器人助行实验测试

表1 柔性外骨骼机器人助行实验测试

指标	跖屈助行(100N)	跖屈助行(140N)	背屈助行
助力跟随最大误差(N)	20.8	22.7	-
助力跟随平均绝对值误差(N)	6.8	8.1	-
助力跟随均方根误差(N)	8.4	9.9	-
内芯轨迹最大误差(cm)	-	-	0.2402
内芯轨迹平均绝对值误差(cm)	-	-	0.077
内芯轨迹均方根误差(cm)	-	-	0.0943
腓肠肌活跃度下降($p <$)	0.05	0.05	-
胫骨前肌活跃度下降($p <$)	-	-	0.02

为了评估柔性外骨骼机器人的助行效果,我们开展了跖屈和背屈两种助行模式的实验。在跖屈助行实验中,我们首先进行了预紧力测试,测得被动预紧阶段末期内芯张力约为20N,并以此作为主动助力的起始值。随后,设定了100N和140N两种峰值力的主动助力曲线。在实验过程中,我们同步采集了受试者的腓肠肌肌电信号,并利用带通滤波器(20-500Hz)和50Hz陷波滤波器对原始信号进行预处理。实验结果表明,在100N峰值力助行下,助力跟随的最大误差为20.8N,平均绝对值误差为6.8N,

均方根误差为8.4N;而在140N峰值力助行下,相应误差分别为22.7N,8.1N和9.9N。肌电信号分析显示,两种助行模式下,腓肠肌活跃度较无助行时显著降低($p < 0.05$),表明外骨骼机器人跖屈助行有效减轻了肌肉负担。在背屈助行实验中,我们以35.5cm作为内芯初始状态,并设定了摆动相背屈助力轨迹,内芯轨迹跟随的最大误差为0.2402cm,平均绝对值误差为0.0770cm,均方根误差为0.0943cm。胫骨前肌活跃度显著下降($p < 0.02$),证明了外骨骼机器人背屈助行的有效性。

5 结束语

本研究针对脑卒中患者的踝关节助行需求,设计并验证了一种基于柔性鲍登线传动的可穿戴外骨骼机器人。通过对踝关节运动的深入分析,我们提出了针对性的跖屈和背屈助行策略,并采用FOC驱动和模糊控制方法实现了对机器人的精确控制。实验结果表明,该外骨骼机器人能够有效辅助患者进行踝关节运动,且两种助行模式下目标肌肉的活跃度均显著降低,证明了其助行的有效性。本研究为脑卒中患者的康复提供了一种新的技术方案,也为未来外骨骼机器人的发展提供了有益的参考。

[参考文献]

[1]高雨佳,林宇峰,王诗潭,等.踝关节助力外骨骼影响脑卒中患者下肢生物力学的肌骨仿真分析[J].医用生物力学,2024,39(S1):640.

[2]刘语嫣.功能性电刺激用于脑卒中后下肢运动功能障碍的康复治疗研究现状[J].实用医技杂志,2024,31(07):527-532.

[3]郝淑芹,赵保礼,常丽静,等.智能助行仪对脑卒中患者下肢运动功能障碍治疗效果的临床研究[J].现代中西医结合杂志,2016,25(01):36-38.

[4]何可,艾坤,谭洁,等.足下垂助行仪用于治疗脑卒中后踝关节功能障碍的临床研究[J].中国康复医学杂志,2015,30(05):472-475.

[5]吴春薇,闫汝蕴.表面肌电检查在脑卒中偏瘫患者踝背伸运动中的应用[J].中国康复医学杂志,2011,26(04):391-394.

作者简介:

张文芽(1977--),女,汉族,安徽人,硕士,副主任医师,从事的研究方向:擅长运动创伤、关节损伤、脊髓损伤、颈椎病、腰椎病、颅脑损伤等疾病的康复治疗。