

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614961

基于在线增量 DMP 的准直驱膝关节 外骨骼自适应柔顺控制*

朱 宇^{1,2}, 王向阳², 孙健铨², 袁 博³, 马 跃²

(1. 深圳大学计算机与软件学院 深圳 518060; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055;
3. 重庆市牛迪科技发展有限公司 重庆 400037)

摘 要:针对卒中偏瘫患者在使用下肢外骨骼进行康复时面临非对称步态生成实时性差与人机物理交互顺应性不足等问题,研制了一款轻量化准直驱膝关节外骨骼,并提出一种基于在线增量动态运动基元(DMP)的自适应柔顺控制框架。在硬件设计上,系统采用同轴集成的准直驱模组与碳纤维连杆相结合,显著降低了系统的整体惯量与关节反向驱动阻抗,为实现柔顺交互提供了极高透明度的物理基础。在控制策略层面,系统意图感知层采用自适应频率振荡器平滑提取参考侧运动相位;轨迹规划层提出融合分时计算机制的增量式 DMP 算法,将复杂的权重更新任务均匀分配至多个控制周期,突破了嵌入式硬件的算力瓶颈,在满足 1 kHz 高频控制的前提下,实现了对参考步态时空特征与波形幅值的在线解耦调节;底层则通过阻抗控制将偏差转化为柔顺辅助力矩。7 名受试者的双侧穿戴多工况(平地、爬坡、变频及变幅)实验结果表明:系统能够精准泛化参考侧运动节律,平地行走双侧一致性系数高达 0.977,跟踪误差控制在 8.30°;透明模式下系统残余物理干涉被限制在 $\pm 10 \text{ N}\cdot\text{m}$ 范围,辅助模式则平滑输出约 $\pm 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的协同辅助力矩。本系统在不干涉人体固有步态节律的前提下,成功实现了非对称步态的在线实时生成与自适应柔顺跟随。

关键词: 膝关节外骨骼;准直驱;动态运动基元(DMP);在线增量学习;柔顺协同控制

中图分类号: TH789 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 518.80

Adaptive compliant control of quasi-direct drive knee exoskeleton based on online incremental DMP

Zhu Yu^{1,2}, Wang Xiangyang², Sun Jianquan², Yuan Bo³, Ma Yue²

(1. College of Computer Science and Software Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese of Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;
3. Niudi Tech Co., Ltd., Chongqing 400037, China)

Abstract: To address the poor real-time performance of asymmetric gait generation and the lack of human-robot physical interaction compliance faced by hemiplegic stroke patients using lower-limb exoskeletons for rehabilitation, this article develops a lightweight quasi-direct drive knee exoskeleton and proposes an adaptive compliant control framework based on online incremental dynamic movement primitives (DMP). In terms of hardware design, the system combines a coaxially integrated quasi-direct drive module with carbon fiber links, which significantly reduces the overall system inertia and joint back-drivability impedance, providing a highly transparent physical foundation for compliant interaction. At the control strategy level, the intention perception layer utilizes an adaptive frequency oscillator to smoothly extract the motion phase of the reference side. The trajectory planning layer proposes an incremental DMP algorithm integrating a time-sharing computation mechanism. By evenly distributing complex weight update tasks across multiple control cycles, this algorithm breaks through the computational bottleneck of embedded hardware, achieving online decoupled adjustment of spatiotemporal features and waveform amplitudes of the reference gait while satisfying 1 kHz high-frequency control demands. The underlying impedance controller then converts the trajectory deviations into compliant assistive torques. Multi-condition bilateral wearing experiments (flat ground, slope

收稿日期: 2026-02-20 Received Date: 2026-02-20

* 基金项目: 深圳市医学研究专项资金(B2302002)项目资助

climbing, varying frequency, and varying amplitude) involving 7 subjects show that the system can accurately generalize the reference side's motion rhythm. The bilateral kinematic consistency coefficient (PCC) reaches up to 0.977 on flat ground, with a tracking error controlled at 8.30° . Residual physical interference is restricted within $\pm 10 \text{ N}\cdot\text{m}$ in the transparent mode, and a synergistic assistive torque of approximately $\pm 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ is smoothly output in the assistive mode. Without interfering with the human's inherent gait rhythm, the proposed system successfully achieves the online real-time generation and adaptive compliant tracking of asymmetric gaits.

Keywords: knee exoskeleton; quasi-direct drive; dynamic movement primitives (DMP); online incremental learning; compliant synergistic control

0 引言

卒中仍是全球范围内导致死亡与长期残疾负担的重要疾病之一;世界卒中组织(world stroke organization, WSO)在《Global Stroke Fact Sheet 2025》中报告,2021年全球约有9380万卒中存活者、1190万新发卒中病例^[1],相当比例的幸存者遗留有单侧运动功能障碍的偏瘫症状^[2]。这种症状通常表现为一侧腿部肌肉无力和异常痉挛,使得下肢运动功能受损影响患者独立行走能力。膝关节在下肢运动中作为关键的一环,患者的膝关节由于症状难以在行走时维持人体负重稳定并吸收冲击以及调动足部有效离地^[3-4]。为改善下肢行走困难的状况,下肢外骨骼机器人已成为重要的康复工具,能够通过提供高强度、重复性的步态训练来促进患者运动功能的重塑^[5-7]。

针对下肢运动功能障碍的康复需求,现有的外骨骼系统在结构形态与控制目标上呈现出显著的差异化发展。早期的研究多致力于开发覆盖髋-膝-踝的多关节联动系统。例如,香港中文大学下肢外骨骼(The Chinese University of Hong Kong exoskeleton, CUHK-EXO)用刚性连杆与高减速比电机直驱构建了髋膝踝一体化结构^[8],虽能辅助偏瘫患者,但这套原本主要为截瘫患者设计的全动员系统体积庞大,且过度约束了患者尚存的髋/踝关节运动能力;中国科学院深圳先进技术研究院(Shenzhen Institute of Advanced Technology, SIAT)康复外骨骼^[9]采用电机直驱与连杆机构,侧重于通过零矩点(zero moment point, ZMP)理论规划步长,但其刚性结构往往要求患者依靠拐杖保持平衡,增加了操作负担;截瘫辅助步行机器人第2代(walking assistant robot for paraplegia Ver. 2, WAP-2)^[10]则采用并联机构设计以提升刚度与稳定性,但复杂的机械构型导致穿戴极其繁琐。这类全下肢系统虽然功能全面,但对于仅需针对膝关节进行重点训练的偏瘫患者而言,存在显著的结构冗余与佩戴不便问题。

为实现更精准的关节康复,研究者转向了膝关节专用外骨骼的开发,并根据康复任务的不同形成了两条技术路线。第1类侧重于矫正特定步态缺陷:如第Ⅱ代仿生膝关节外骨骼(bionic knee exoskeleton II, BioKEX-II)^[11]采用齿条-滑块连杆结构和多传感器融合,旨在解

决偏瘫患者由于下肢肌肉无力而难以独立完成起立/坐下;Shepherd等^[12]研发的单侧膝关节外骨骼利用带有玻璃纤维片簧的串联弹性驱动器(series elastic actuator, SEA)提供高精度的力矩控制,专门用于辅助偏瘫患者完成高负载的起立/坐下转换动作,虽然这类设备在机械结构上专注于膝关节,但其康复目标不在行走功能的全面恢复;第2类侧重于双侧协同与对称性引导:如Kawasaki等^[13]研发的动力支具通过电机辅助患侧膝关节伸展以防止在行走的支撑相塌陷;单侧下肢外骨骼(unilateral lower limb exoskeleton, LiteStepper)^[14]利用健侧运动感知和集成触发按钮的智能肘拐协调驱动,专为亚急性期偏瘫患者过地行走训练;单侧助力对称增强外骨骼(symmetry reinforcer unilateral powered exoskeleton, REFLEX)^[15]采用自适应频率振荡器镜像控制或健康模式引导,专门用于增强偏瘫患者的步态对称性并减少健侧腿的代偿机制。Huang等^[16]研制的准直驱采用高扭矩密度电机与低减速比行星齿轮构建准直驱系统,配合基于刚度的连续力矩控制器实时估算并匹配人体生物力矩为多种步行模式提供顺从性助力支持。这类外骨骼在控制层面大都采用一种将健侧轨迹相位或动作事件镜像映射至患侧的镜像方法,这种镜像/对称方式虽然能在一定程度上能恢复患者的双侧对称性,但对个体化适配和实时步态调整仍有不足,忽略了患侧肢体在肌力与关节活动度上与健侧的客观差异。

要结合偏瘫患者极其异质化的病理特征,需要一种能实时学习并泛化患者个性化步态特征的自适应闭环控制策略。构建有效闭环的前提是获取连续、精准的运动意图与步态相位。尽管近年来基于深度学习与机器学习算法等的意图识别与步态相位分类研究^[17-20]显著提升了系统对运动特征的感知精度,但这类数据驱动方法往往面临计算开销大或输出相位离散的问题。而在闭环控制的策略制定端,现有控制策略多以恢复双侧对称性为目标,如Nam等^[21]研究发现,虽然机电辅助训练能改善患者的临床步行功能,但却未能有效改善其定量的步态对称性指标,这表明现有固定轨迹的引导方式在纠正不对称性上仍有局限。事实上,Patterson等^[22-23]的研究显示,不同患者的步态不对称模式存在显著差异,固定的引导轨迹难以匹配复杂的病理特征。在轨迹生成算法中,动

态运动基元(dynamic movement primitive,DMP)因其参数化特性具有调参优势,但现有应用在调节维度与实时性上仍存在不足。例如,Hwang 等^[24]虽然利用 DMP 生成步态,但仅通过单一增益系数对步长进行线性缩放,无法对步态的相位滞后或局部形态畸变进行修正;而 Yuan 等^[25]引入强化学习在线更新 DMP 的形状参数,但这种基于迭代搜索的优化方法计算耗时较长,且通常需要跨越多个步态周期才能完成收敛,难以满足康复训练中对轨迹参数进行瞬时调整的需求,也未能实现对参考轨迹时空演化特征与相位同步关系的解耦调节。

针对上述硬件动态响应与控制策略实时适应性之间的矛盾,本文研制了一款高扭矩密度、高透明度的准直驱膝关节外骨骼,并提出了一种具备周期学习能力与参数在线调节机制的 DMP 阻抗控制框架,可以实现在线对称与非对称步态的生成。不同于现有准直驱研究中常见的固定刚度策略,也区别于传统位置控制模式下的刚性轨迹跟踪,该算法利用 DMP 的非线性强制项对健侧步态特征进行编码,并通过周期性学习机制,实现了对参考轨迹幅值、相位偏移及波形特征的解耦与瞬时更新。最终,生成的自适应轨迹被送入底层阻抗控制器,将轨迹偏差转化为基于阻抗模型的柔顺辅助力矩。这种低反向阻抗硬件本体与自适应阻抗控制策略的深度融合,旨在复杂地面行走等工况下,在不破坏人体原有步态节律的前提下,为穿戴

者提供动态协同的柔顺辅助。本文的主要贡献包括:

1)面向单侧运动功能障碍的康复需求,研制了一套基于准直驱的膝关节外骨骼系统,该系统具备极低的反向驱动阻抗,为实现在线非对称步态轨迹生成与人机柔顺交互提供了高透明度的硬件基础,并在健康受试者群体中完成了双侧穿戴的早期工程验证;

2)提出了一种基于分时计算机制与在线参数调节的 DMP 阻抗控制框架。该算法有效解决了嵌入式系统在高频(1 kHz)实时控制下的算力瓶颈,能够根据参考侧(无助力侧)的实时运动状态,在线生成并动态调整适应个体非对称特征的柔顺跟随轨迹;

3)通过双侧穿戴模式下的多工况实验验证了软硬件系统的协同性能。实验结果表明,该系统具备稳定的轨迹跟踪能力与低交互阻抗特性,能够在不干涉人体固有步态节律的前提下,为穿戴者提供平滑、动态的自适应柔顺辅助。

1 系统概述

如图 1 所示,本系统采用模块化与拟人化的设计理念,整体构型旨在实现与人体下肢的紧密耦合与运动协同。外骨骼系统主要由图 1(b)背部能源控制总成、图 1(c)集成化膝关节驱动模组以及图 1(d)可调节下肢连杆结构 3 部分构成。



图 1 下肢外骨骼系统硬件架构概览

Fig. 1 Overview of the lower limb exoskeleton system hardware architecture

1.1 机械结构设计

背部能源控制总成作为系统的能源与计算中枢,采用轻量化背包式布局。其内部集成了大容量锂电池组与主控制器,外部采用人体工学背负系统,通过双肩带与宽体腰带将系统重量主要分散于穿戴者的躯干核心区域,有效减小了肢体末端的附加惯量,降低了行走的代谢成本。

图 1(c) 膝关节驱动模组是系统的核心动力来源,采用了高度集成的准直驱方案。根据图示硬件架构,该模组在物理结构上实现了无刷直流电机、伺服驱动模块与扭矩传感器的同轴集成。这种紧凑的机电一体化拓扑结构不仅大幅缩减了关节轴向尺寸,避免了行走过程中的腿部干涉,还通过缩短传动链提升了机械透明度,配合内置的扭矩传感器,能够精准感知人机交互力矩,为实现柔顺的力位混合控制提供了物理基础。

图 1(b) 下肢连杆机构负责将动力传递至人体下肢,主体采用碳纤维管制造,在保证结构刚度的同时实现了极致的轻量化。为了适配不同人体测量学特征,大腿与小腿连杆处设有滑动调节机制与张力调节旋钮,用户松开锁紧装置后即可沿碳纤维管轴向无级调节长度,以精确匹配身高在 155~185 cm 范围的使用者。此外,为了验证机械本体的穿戴舒适性与运动灵活性,图 1(e) 展示了受试者佩戴外骨骼后的多模态运动测试。得益于膝关节与踝关节构成的两自由度(two degrees of freedom, 2-DOF)仿生构型设计,系统能够适应人体大幅度的关节活动范围。在站姿、坐姿与蹲姿的静态测试中,外骨骼的关节节点能够自然跟随人体姿态变化,未出现机械干涉或对大腿软组织的挤压现象;而在高抬腿、大跨步行走以及深蹲等大动态工况下,这种 2-DOF 的结构设计赋予了穿戴者极高的运动自由度,配合准直驱关节极低的反向驱动阻抗,有效避免了传统刚性外骨骼常见的关节轴线错位与运动受限问题,验证了系统在无助力状态下优异的机械透明度与人机协同性。具体的机械参数如表 1 所示。

表 1 下肢外骨骼系统关键机械参数

Table 1 Key mechanical specifications of the lower limb exoskeleton system

参数	数值	单位
系统重量	10	kg
关节活动范围	0~135	°
最大关节速度	23.0	rad/s
最大运行时间	6	h
额定/峰值扭矩	20/75	N·m
电池电压	24	V

1.2 嵌入式电子系统架构

嵌入式电子系统采用分层分布式的拓扑架构,如图 1(b) 和(c) 所示,物理上划分为感知-决策层(背部)与驱动-执行层(关节),二者通过以太网控制自动化技术总线(ethernet for control automation technology, EtherCAT)进行实时通讯。

图 1(b) 内的背部主控单元是系统的“大脑”,选用高性能单板计算机屿腾 SI-N4200-EX 作为核心计算平台。该控制器负责运行顶层 DMP 轨迹规划算法与相位估计器,处理传感器数据并向各关节发送控制指令,系统控制周期设定为 1 kHz。电源管理模块包含高能量密度的 24 V 锂电池组及稳压电路,不仅为电机提供高压动力电,还经过降压处理后为控制器及传感器提供稳定的低压电源,确保了系统的续航能力与电气隔离安全性。

图 1 的(c) 内的关节驱动单元是系统的“小脑”与“执行末端”,选用了泰科 RGT-25D70 高性能伺服驱动模组以实现“感知-驱动”的一体化集成。该模组外径仅 $\varphi 81$ mm,采用圆形印制电路板(printed circuit board, PCB)设计直接贴合于电机背部。它基于先进的数字信号处理器(digital signal processor, DSP)和现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)双核异构架构,运行高带宽电流环,支持 18~65 VDC(volts direct current)的宽电压输入,并能提供 25 A 的额定电流与高达 50 A 的峰值电流,满足了外骨骼在瞬时高负载场景下的功率需求。在感知层面,驱动模块不仅集成了高精度编码器接口用于反馈关节角度 θ 与角速度 $\dot{\theta}$,还直接读取串联的扭矩传感器数据,将多源感知信息实时反馈至上层控制器,形成完整的闭环控制。

2 系统控制算法

基于第 1 章所述的高性能硬件平台,本章详细阐述下肢外骨骼的人机协同控制策略。针对偏瘫患者步态的时变性与不对称性,本系统构建了如图 2 所示的分层控制架构。该架构主要由上层的意图感知与轨迹规划层,以及底层的柔顺执行层组成。上层利用自适应频率振荡器(adaptive frequency oscillator, AFO)从参考侧运动中提取相位信息,并通过改进的 DMP 算法在线生成适应性参考轨迹;底层则采用高带宽阻抗控制器,确保外骨骼能够柔顺地执行运动指令并保证人机交互的安全性。

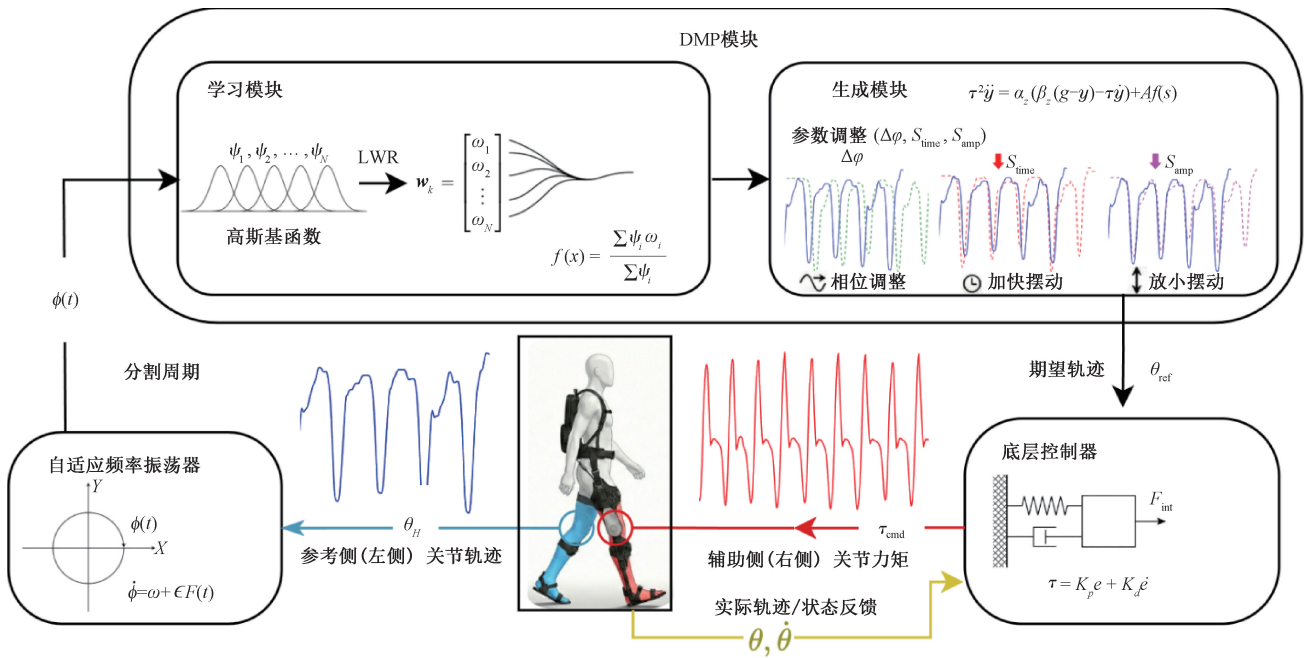


图2 系统总体架构与信号链路

Fig. 2 System overall architecture and signal links

2.1 意图感知与相位提取

在步态康复训练中,准确获取步态周期相位是实现双侧协同控制的前提。不同于传统的基于足底压力开关的离散事件检测,本系统需要连续平滑的相位变量以驱动周期性 DMP 模型。为此,本文采用了一种 AFO 算法^[26]。该算法将参考侧(左侧) θ_{ref} 作为输入信号,通过构建具有状态反馈的非线性振荡器,能够实时跟踪输入信号的基频 ω 并输出归一化的相位变量 $\phi(t) \in [0, 2\pi]$ 。相较于过零检测法,AFO 具有更强的抗噪性能,能够在外骨骼变速行走或步态不规则时保持相位的连续性与单调性,为后续的轨迹学习提供了稳定的时基基准。

2.2 周期 DMP 建模与参数映射

在轨迹规划层,系统采用离散型 DMP 的周期性变体对人体步态进行建模。该方法将膝关节的期望运动轨迹 θ_{ref} 视为一个受非线性强制项 $f(\cdot)$ 调制的二阶弹簧-阻尼系统。根据生成器代码逻辑,改进后的动力学方程定义如式(1)所示。

$$\tau_{act}^2 \ddot{y} = \alpha_z (\beta_z (g - y) - \tau_{act} \dot{y}) + S_{amp} \cdot f(\phi + \Delta\phi) \quad (1)$$

其中, y 为系统状态(即关节角度), g 为收敛目标, α_z, β_z 为系统增益。为了实现对步态特征的解耦控制,本文在标准方程中引入了3个核心调节变量:

1) 时间缩放系数 (S_{time}): 用于调节系统的实际时间常数 $\tau_{act} = S_{time} \cdot \tau$ 。通过在线改变 S_{time} , 系统可以直接缩放轨迹演化的时间轴,从而适应患者行走步频的实时变化。

2) 幅值缩放系数 (S_{amp}): 该系数作为增益项直接作

用于非线性强制函数 $f(\cdot)$ 。强制函数由一组高斯基函数加权求和构成:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i(x) w_i}{\sum_{i=1}^N \psi_i(x)} \cdot x \quad (2)$$

其中, $x(\phi)$ 为随相位单调变化的正则状态变量。通过调节 S_{amp} , 系统可以在不改变收敛目标 g 的前提下,对参考轨迹的波形幅度进行线性缩放,有效解决了单纯改变目标点导致的周期闭环不连续问题^[27]。

3) 相位偏移量 ($\Delta\phi$): 该项直接叠加于输入相位 ϕ , 用于精细调节辅助侧轨迹相对于参考侧信号的相位滞后或超前,以补偿偏瘫侧的运动迟滞。

2.3 在线增量式学习算法

为了使外骨骼能够适应不同患者的个体化步态特征,控制系统需要根据参考侧的实时状态在线更新 DMP 的权重参数 w_i 。针对嵌入式控制器算力受限的约束,本文提出了一种基于分时计算策略的局部加权回归在线学习算法。该算法摒弃了全量矩阵运算,转而利用 DMP 基函数的空间局域特性,采用增量累加的方式更新模型参数。为了避免单次计算耗时过长导致控制周期溢出,算法引入了分时计算机制,将庞大的权重更新任务分割为若干微小的计算片段,并利用分块大小参数 (ChunkSize) 将其均匀分配到连续的多个控制周期中执行。这种策略在保证轨迹拟合精度的同时,显著降低了处理器的瞬时计算负载,确保了系统在 1 kHz 高频控制下的实时性与稳定性。具体的算法实现流程如算法 1 所示。

算法1: 基于分时计算策略的DMP在线学习算法

输入:

参考侧重采样轨迹 $\mathbf{P}_{\text{demo}}(y, \dot{y}, \ddot{y})$;

DMP 参数 $\alpha_z, \alpha_x, \tau, g, y_0$

分块大小 ChunkSize

当前累加器向量 $\mathbf{num}, \mathbf{den}$ 当前索引指针 idx

输出:

更新后的权重向量 $\mathbf{w}$

```

1: 初始化;
2: 重置累加器:  $\mathbf{num} \leftarrow \mathbf{0}, \mathbf{den} \leftarrow \mathbf{0}, \text{idx} \leftarrow 1$ 
3: 计算基函数中心  $\mathbf{c}$  与宽度  $\mathbf{h}$ 
4: 归一化轨迹幅度:  $y_{\text{norm}} \leftarrow (y - y_{\min}) / A_{\text{scale}}$ 
5: 分时计算循环:
6:  $k_{\text{end}} \leftarrow \min(\text{idx} + \text{ChunkSize} - 1, \text{TotalLength})$ 
7: for  $k = \text{idx}$  to  $k_{\text{end}}$  do:
8: 提取状态: 从缓存  $\mathbf{P}_{\text{demo}}$  中读取第  $k$  点的  $y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k$ 
9: 计算相位变量:  $s_k \leftarrow \exp(-\alpha_x \cdot t_k)$ 
10: 计算目标强制项:
11:  $f_{\text{target}} \leftarrow \tau^2 \ddot{y}_k - \alpha_z(\beta_z(g - y_{\text{norm},k}) - \tau \dot{y}_k)$ 
12: 计算基函数激活度:
13:  $\psi \leftarrow \exp(-\mathbf{h} \odot (s_k - \mathbf{c})^{\odot 2})$ 
14: 增量累加 (LWR):
15:  $\mathbf{num} \leftarrow \mathbf{num} + s_k \cdot \psi \cdot f_{\text{target}}$ 
16:  $\mathbf{den} \leftarrow \mathbf{den} + s_k^2 \cdot \psi$ 
17: end for
18:  $\text{idx} \leftarrow k_{\text{end}} + 1$ 
19: 权重结算 (当处理完所有数据点):
20: if  $\text{idx} > \text{TotalLength}$  then
21:  $\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{num} \% (\mathbf{den} + \varepsilon)$  //逐元素除法
22:  $\text{Done} \leftarrow 1$ 
23: end if

```

为进一步说明所提分时计算在线学习算法的实时实现方式,设输入学习模块的当前单周期离散轨迹长度为 L 。该轨迹由步态事件触发获得,并经固定间隔抽样后输入在线学习模块;由于不同步态周期持续时间存在波动, L 随当前周期动态变化。本文 DMP 基函数个数固定为 400,每个控制周期内仅处理其中 10 个采样点,因此一次完整权重更新需在连续的 $\lceil L/10 \rceil$ 个控制周期内逐步完成。对每个采样点,算法依次完成相位变量更新、目标强制项计算、400 个基函数激活度求值,以及局部加权回归分子与分母项的增量累加;待整段样本处理完毕后,再统一完成权重结算。前期在实时控制平台上的测试结果表明,该分时更新模块的单周期新增计算开销约为 0.2 ms,可与其他控制模块共同运行于 1 kHz 控制框架下。该策

略避免了整段轨迹样本在单周期内集中计算所带来的瞬时计算峰值,提升了在线学习算法在嵌入式实时控制中的可实现性。

2.4 底层阻抗控制

在执行层,为了充分发挥准直驱关节的高透明度特性并简化控制模型,本系统采用了级联式阻抗控制策略^[28]。该控制器在电流环的基础上构建力矩闭环,将 DMP 生成的运动学参考轨迹 $(\theta_{\text{ref}}, \dot{\theta}_{\text{ref}})$ 转化为动力学关节力矩指令 τ_{cmd} 。该策略将外骨骼模拟为一个跟随参考轨迹的虚拟弹簧-阻尼系统,允许右侧肢体在存在步态偏差时产生柔顺的跟随运动。既能提供必要的运动导向,又能通过调节虚拟刚度系数 K_p 来改变人机交互的顺应程度,从而适应不同康复阶段的训练需求。

2.5 实验评价指标

为了定量评估系统在不同行走模式下的轨迹跟踪性能、步态对称性及人机交互特性,本文定义如下 3 个主要评价指标:

(1) 均方根误差 (root mean square error, RMSE), 采用 RMSE 评估外骨骼实际轨迹 θ_{act} 对 DMP 参考轨迹 θ_{ref} 的跟踪精度。该指标反映了控制系统复现参考侧步态特征的能力,计算公式如式(3)所示。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_{\text{ref}}(i) - \theta_{\text{act}}(i))^2} \quad (3)$$

其中, N 为采样点数。RMSE 数值越小,表明跟踪性能越好。

(2) 波形相似度与对称性指标,由于步态轨迹存在时变性,仅依靠欧氏距离 (RMSE) 难以全面衡量波形的几何特征。为此,引入两个辅助指标:

(1) 动态时间规整 (dynamic time warping, DTW) 距离:用于衡量生成轨迹与参考轨迹在时间轴非线性弯曲情况下的几何相似度^[29]。设参考轨迹序列为 $R = \{r_1, \dots, r_n\}$, 实际轨迹序列为 $A = \{a_1, \dots, a_m\}$, DTW 旨在寻找一条最优规整路径 $W = \{w_1, \dots, w_k\}$, 使得两序列间的累积欧氏距离最小:

$$\text{DTW}(R, A) = \min_W \left(\sum_{k=1}^K d(w_k) \right) \quad (4)$$

其中, $d(w_k)$ 为路径节点上的欧氏距离。DTW 距离越小,表明外骨骼生成的步态模式在几何形态上越接近自然行走的生物学特征,未发生波形畸变。

(2) 皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, PCC):用于评估双侧(辅助侧与参考侧)在时空上的对称性^[22]。PCC 取值范围为 $[-1, 1]$, 越接近 1 表明双侧肢体运动越协同,计算公式如式(5)所示。

$$\text{PCC} = \frac{\text{cov}(\theta_{\text{healthy}}, \theta_{\text{exo}})}{\sigma_{\text{healthy}} \sigma_{\text{exo}}} \quad (5)$$

其中, cov 为协方差, σ 为标准差。

3)交互力矩水平。通过关节模组内置的扭矩传感器实时测量人机交互力矩 τ_{int} 。该指标直接反映了系统的机械透明度与辅助能力,在透明模式下,交互力矩趋近于0,以减小对人体运动的干涉;在辅助模式下,交互力矩应平滑且与运动方向一致,表明外骨骼提供了有效的动力学辅助。

3 实验与结果

本章旨在通过系统性的穿戴实验,验证前文所述准直驱外骨骼硬件设计的合理性及分时计算 DMP 阻抗控制策略的有效性。实验将在搭建的跑步机与楼梯测试环境中进行,重点考察系统在不同步态工况下的轨迹跟踪精度、对个性化步态参数(频率、幅值)的在线适应能力,以及人机物理交互过程中的动力学特性。通过分析多名受试者的实验数据,量化评估系统在“透明模式”与“辅助模式”下的双侧协同性能,为系统的临床应用提供实验依据。

3.1 实验设置

为了验证本文研制的准直驱膝关节外骨骼的硬件性能以及基于分时计算 DMP 的控制策略有效性,本研究搭建了实验平台并邀请了7名健康受试者进行了穿戴行走实验。受试者均为无下肢运动功能障碍的男性,实验前均已签署知情同意书,具体人口学特征如表2所示。

表 2 受试者基本信息

Table 2 Demographic information of subjects			
受试者编号	年龄/岁	身高/cm	体重/kg
1	24	168	88
2	24	168	60
3	24	175	61
4	25	175	75
5	23	169	57
6	25	173	75
7	25	172	63

实验场景如图3所示。出于前期验证安全性考虑,本研究招募健康受试者进行工程学原理验证。实验中,受试者双腿均穿戴外骨骼,其中左侧设置为零助力模式(参考侧),仅利用高精度编码器实时采集参考运动学数据;右侧设置为阻抗辅助模式(模拟患侧),用于验证控制框架对非对称输入特征的在线生成与柔顺协同辅助能力。受试者在跑步机上以3.6 km/h的常规步行速度进行测试,系统通过EtherCAT总线实时采集双侧关节状态。



图 3 实验场景

Fig. 3 Experimental scenarios

为了全面验证2.5节所定义的评价指标,实验设计了如下3种典型行走工况:

- 1)基准镜像模式:平地行走,验证基础轨迹跟踪精度(RMSE);
- 2)频率/幅值适应模式:在线调整 S_{time} 与 S_{amp} ,验证控制算法对步态波形的解耦调节能力;
- 3)地形泛化模式:跑步机设置12°坡度,验证对爬坡步态的泛化能力。此外,选取单名受试者进行了楼梯攀爬的探索性测试(图3(b)),以初步评估系统控制策略在非结构化环境下的泛化潜力。

3.2 轨迹跟踪与多工况适应性

图4展示了一名典型受试者在5种工况下的关节轨迹跟踪结果。图4中实线为DMP生成的期望轨迹,虚线为外骨骼实际测量轨迹。

从图4(a)~(d)可见,系统展现出优异的参数解耦与适应能力。特别是在频率适应模式图4(c)中,步频随时间缩放系数 S_{time} 迅速切换,波形未发生畸变;在爬坡模式图4(b)中,DMP准确复现了坡道行走的屈膝特征。

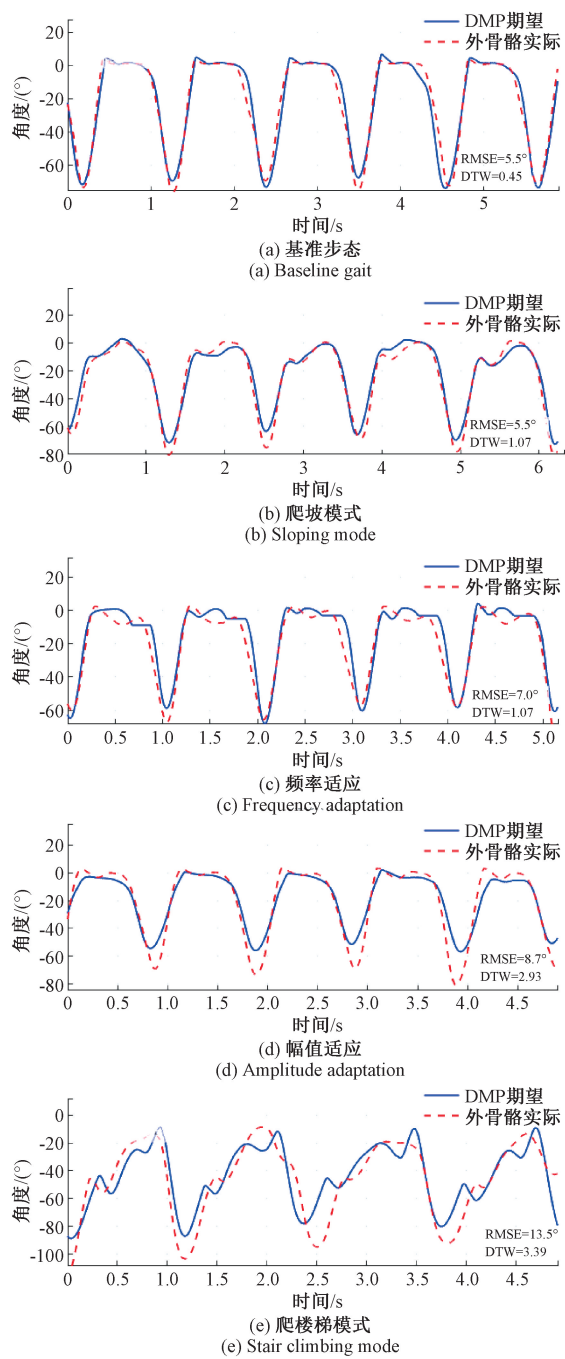


图4 多工况轨迹跟踪性能

Fig. 4 Trajectory tracking performance under multiple conditions

图5汇总了7名受试者的轨迹跟踪误差统计结果。在基准与爬坡模式下,系统平均RMSE分别为 8.30° 和 7.62° ,整体波形相似度(DTW)距离维持在较低水平(1.83 ± 0.82),表明系统具有稳定的跟踪精度。频率适应模式下的误差略高(12.33°),主要归因于变速过程中的人机相位动态调整,属于符合物理规律的正常响应。而在非结构化楼梯攀爬的单人探索性测试图4(e)中,尽管步态非

线性特征显著增强, RMSE 上升至 13.53° , 但外骨骼仍能提供与运动意图一致的辅助力矩, 未出现对抗现象。

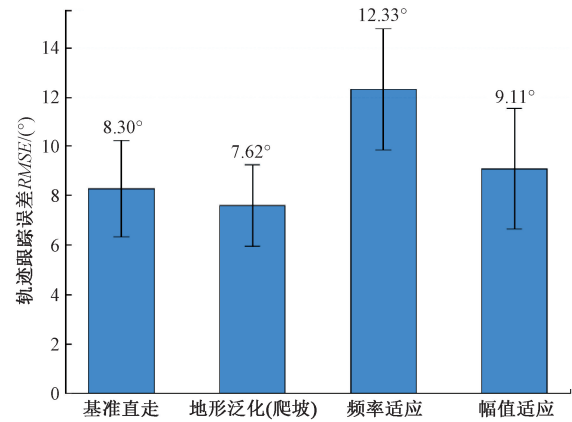


图5 不同工况下的轨迹跟踪误差统计

Fig. 5 Trajectory tracking error statistics under different conditions

3.3 双侧协同与人机交互性能

本节重点评估系统的双侧协同能力及人机交互特性。图6展示了辅助模式下的双侧关节角度对比与交互力矩曲线。

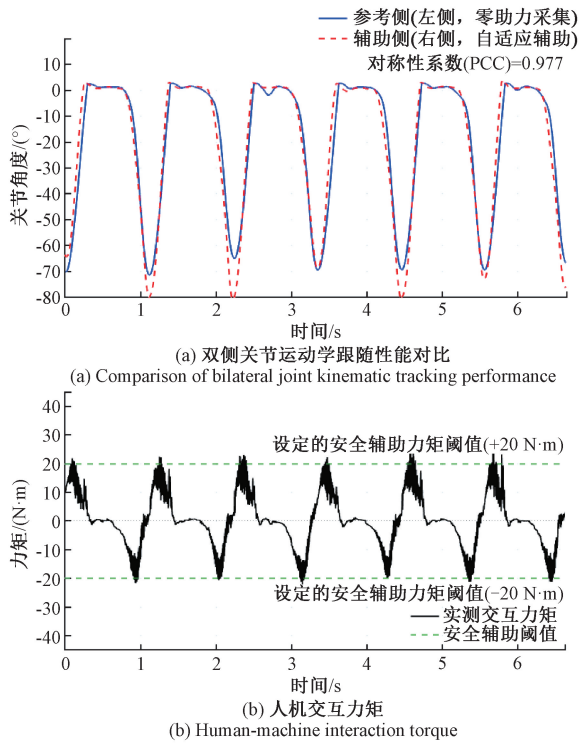


图6 人机交互力矩与对称性

Fig. 6 Bilateral gait symmetry and human-robot interaction torque

如图6(a)所示,辅助侧(右侧)与参考侧(左侧)的时空一致性极高。计算得出PCC达0.977,这表明阻

抗控制下的外骨骼成功将左侧的运动规律平滑泛化至右侧执行端,系统并未干涉受试者固有的步态节律,展现了优异的运动学跟随与双侧协同能力。在动力学层面,图 6(b)展示了系统在辅助模式下的响应。结果显示,电机在摆动相与支撑相转换期间提供了峰值约 $\pm 20\text{ N}\cdot\text{m}$ 的辅助力矩,且曲线整体平滑连续,无明显的高频抖动或对抗冲击,验证了系统的柔顺输出特性。此外,左侧零助力采集模式(数据未展示)下,得益于准

直驱构型低减速比,系统将包含未补偿惯量与动摩擦的残余交互力矩控制在 $\pm 10\text{ N}\cdot\text{m}$,有效降低了对人体自然行走的物理干涉,为控制算法提供了高保真的无助力侧参考数据。

为进一步评估本系统在行业前沿研究中的综合表现,表 3 除给出轨迹跟踪精度(RMSE)与双侧协同性(相关系数)外,还进一步比较了驱动形式、重量、输出扭矩、关节活动范围及控制频率等系统级参数。

表 3 本文系统与代表性下肢外骨骼系统性能对比

Table 3 Performance comparison with representative lower-limb exoskeletons

外骨骼/系统	核心控制策略	重量/kg	输出扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	关节活动 范围/ $(^\circ)$	控制频率/ Hz	RMSE/ ($^\circ$)	相关系数
单侧下肢外骨骼 ^[30]	时序卷积预测	-	-	-	100	7.43	0.912
悬吊减重外骨骼 ^[31]	自适应小波降噪融合	-	-	-	-	2.63	0.973
双侧穿戴式外骨骼 ^[32]	肌电神经力学控制	-	-	膝:0~100	-	1.41~1.77	0.86~0.94
动力髋关节外骨骼 ^[33]	视动融合自适应预测	-	-	-	-	3.45	0.971
本文准直驱膝关节系统	分时计算 DMP 柔顺控制	10	20、75	0~135	1 000	8.30	0.977

注:部分文献主要聚焦于轨迹预测或控制算法验证,其原文未系统报告整机重量、输出扭矩等力学参数,故以“-”表示。

当前,许多研究倾向于在特定外骨骼平台上引入先进的深度学习预测网络或神经力学模型(如 Yang 等^[30]、Durandau 等^[32])来提升轨迹的绝对跟随精度,部分系统的局部跟踪误差可压低至 $1.41^\circ\sim 3.5^\circ$ 。特别是在处理非线性步态时,引入自适应小波降噪融合(adaptive wavelet denoising fusion,AWDF)或视动融合策略(Jin 等^[31]、Zhao 等^[33])能在高精度下取得良好的运动学一致性。

相比之下,本文系统在基准平地工况下的轨迹偏差(RMSE)为 8.30° 。需要强调的是,在本文的阻抗控制框架下,该数值并非底层控制精度的不足,而是系统为保障人机物理交互的柔顺性所主动设定的弹性容差。得益于分时计算 DMP 对步态时空特征的毫秒级在线解耦,以及准直驱硬件极低的反向阻抗,本文系统在未对人体施加绝对刚性约束、保留自然运动容差(约 8° 偏置)的前提下,依然实现了极高的双侧运动学协同跟随(PCC 达 0.977)。这一结果表明,本文的软硬件协同架构能够出色地兼顾非对称步态的在线生成与人机物理交互的顺应性。

4 结 论

针对偏瘫患者在步态康复与日常辅助中对轨迹个性化及人机交互柔顺性的双重需求,本文研制了一套基于准直驱关节的轻量化膝关节外骨骼系统,并在健康受试者群体中完成了一套融合分时计算策略的 DMP 阻抗控制框架的早期工程验证。本研究的主要结论为:

1)在硬件拓扑与意图感知层面,同轴集成的准直驱

构型显著降低了系统的反向驱动阻抗。在参考侧的零助力模式下,系统能够有效克服未补偿惯量与动摩擦的物理干涉,为控制算法提供了连续、高保真的无助力侧参考数据。

2)在轨迹在线生成算法层面,本文提出的基于分时计算机制的增量式 DMP 在线学习算法,满足了底层高频实时控制的运行要求。该策略成功实现了对步态参考轨迹时间与幅值的解耦调节,验证了系统在步频变化与幅值自适应等工况下的平滑过渡能力。

3)在人机协同跟随性能方面,多工况的穿戴实验验证了系统优异的双侧运动学跟随与动力学柔顺特性。在平地步行、地形泛化(爬坡)以及非结构化楼梯攀爬的探索性测试中,外骨骼精准泛化了参考侧的运动节律(平地工况下双侧运动学一致性 PCC 达 0.977,跟踪误差 RMSE 为 8.30°)。在辅助模式下,底层阻抗控制平滑输出了峰值约 $\pm 20\text{ N}\cdot\text{m}$ 的辅助力矩,为穿戴者提供了潜在动力学辅助,且未干涉受试者固有的步态节律。

本研究当前的局限性在于,出于前期原理验证的安全考量,系统性能仅在健康受试者群体中以模拟辅助的形式进行了评估。未来的工作将推进该系统在真实临床环境中的应用,通过量化的代谢耗能与肌电分析,进一步评估该柔顺控制框架在改善病理性不对称步态及提升康复效能方面的实际医学价值。

参考文献

[1] FEIGIN V L, BRAININ M, NORRVING B, et al. World stroke organization: Global stroke fact sheet 2025[J].

- International Journal of Stroke, 2025, 20(2): 132-144.
- [2] LOUIE D R, SIMPSON L A, MORTENSON W B, et al. Prevalence of walking limitation after acute stroke and its impact on discharge to home [J]. Physical Therapy, 2022, 102(1): pzab246.
 - [3] BEYAERT C, VASA R, FRYKBERG G E. Gait post-stroke: Pathophysiology and rehabilitation strategies [J]. Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology, 2015, 45(4/5): 335-355.
 - [4] CHEN B, ZI B, WANG ZH Y, et al. Knee exoskeletons for gait rehabilitation and human performance augmentation: A state-of-the-art [J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 134: 499-511.
 - [5] WARUTKAR V, DADGAL R, MANGULKAR U R. Use of robotics in gait rehabilitation following stroke: A review [J]. Cureus, 2022, 14(11): e31075.
 - [6] 叶雯珺, 李智军. 可穿戴便携式康复外骨骼机器人的开发 [J]. 集成技术, 2013, 2(4): 27-31.
YE W J, LI ZH J. Development of a wearable and portable rehabilitation exoskeleton robot [J]. Journal of Integration Technology, 2013, 2(4): 27-31.
 - [7] HORNBLY T G, REISMAN D S, WARD I G, et al. Clinical practice guideline to improve locomotor function following chronic stroke, incomplete spinal cord injury, and brain injury [J]. Journal of Neurologic Physical Therapy, 2020, 44(1): 49-100.
 - [8] CHEN B, ZHONG CH H, ZHAO X, et al. A wearable exoskeleton suit for motion assistance to paralysed patients [J]. Journal of Orthopaedic Translation, 2017, 11: 7-18.
 - [9] 陈春杰, 张邵敏, 王灿, 等. 基于稳定阈值分析的外骨骼动态步长规划方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 523-529.
CHEN CH J, ZHANG SH M, WANG C, et al. Dynamic step length planning method based on stable threshold analysis for exoskeleton [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 523-529.
 - [10] HWANG S H, LEE S C, SHIN D B, et al. Intuitive gait pattern generation for an exoskeleton robot [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(11): 1905-1913.
 - [11] LIU X H, ZHOU ZH H, MAI J G, et al. Real-time mode recognition based assistive torque control of bionic knee exoskeleton for sit-to-stand and stand-to-sit transitions [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 119: 209-220.
 - [12] SHEPHERD M K, ROUSE E J. Design and validation of a torque-controllable knee exoskeleton for sit-to-stand assistance [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1695-1704.
 - [13] KAWASAKI S, OHATA K, TSUBOYAMA T, et al. Development of new rehabilitation robot device that can be attached to the conventional Knee-Ankle-Foot-Orthosis for controlling the knee in individuals after stroke [C]. 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics, 2017: 304-307.
 - [14] HUO C C, SHAO G J, CHEN T D, et al. Effectiveness of unilateral lower-limb exoskeleton robot on balance and gait recovery and neuroplasticity in patients with subacute stroke: A randomized controlled trial [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2024, 21(1): 213.
 - [15] LORA-MILLAN J S, SANCHEZ-CUESTA F J, ROMERO J P, et al. A unilateral robotic knee exoskeleton to assess the role of natural gait assistance in hemiparetic patients [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2022, 19(1): 109.
 - [16] HUANG T H, ZHANG S N, YU SH Y, et al. Modeling and stiffness-based continuous torque control of lightweight quasi-direct-drive knee exoskeletons for versatile walking assistance [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(3): 1442-1459.
 - [17] 崔占贺, 艾莉莎, 马欣雨, 等. 基于1D-CNN-SVM的下肢外骨骼步态信息识别研究 [J]. 电子测量技术, 2025, 48(12): 71-78.
CUI ZH H, AI L SH, MA X Y, et al. Gait information recognition study of lower limb exoskeleton based on 1D-CNN-SVM [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(12): 71-78.
 - [18] 付明凯, 王少红, 马超. 基于Densenet模型的步态相位识别研究 [J]. 电子测量技术, 2025, 48(1): 119-128.
FU M K, WANG SH H, MA CH. Research on gait phase recognition based on Densenet model [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(1): 119-128.
 - [19] 苏鸿, 马超, 苏鹏, 等. 基于XGBoost的下肢步态相位识别研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 95-101.
SU H, MA CH, SU P, et al. XGBoost algorithm-based method research on lower limb gait phase recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 95-101.
 - [20] 曹雨冬, 李慧, 陈怡, 等. 面向人体关节角度预测的运动意图识别方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 22-30.
CAO Y D, LI H, CHEN Y, et al. Research on motion

- intent recognition method for human joint angle prediction[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(6): 22-30.
- [21] NAM Y G, KO M J, BOK S K, et al. Efficacy of electromechanical-assisted gait training on clinical walking function and gait symmetry after brain injury of stroke: A randomized controlled trial [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 6880.
- [22] PATTERSON K K, PARAFIANOWICZ I, DANIELS C J, et al. Gait asymmetry in community-ambulating stroke survivors [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2008, 89(2): 304-310.
- [23] LITTLE V L, PERRY L A, MERCADO M W V, et al. Gait asymmetry pattern following stroke determines acute response to locomotor task [J]. *Gait & posture*, 2020, 77: 300-307.
- [24] HWANG S H, SUN D I, HAN J, et al. Gait pattern generation algorithm for lower-extremity rehabilitation-exoskeleton robot considering wearer's condition [J]. *Intelligent Service Robotics*, 2021, 14(3): 345-355.
- [25] YUAN Y X, LI ZH J, ZHAO T, et al. DMP-based motion generation for a walking exoskeleton robot using reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(5): 3830-3839.
- [26] WANG X Y, MA Y, CHEN CH J, et al. Effective prediction of gait phase for assisted walking by means of gait-based adaptive oscillators[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 10205-10215.
- [27] GINESI M, SANSONETTO N, FIORINI P. Overcoming some drawbacks of dynamic movement primitives [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 144: 103844.
- [28] WANG X Y, CHEN CH J, SUN J Q, et al. System design of a soft underwater exosuit to reduce metabolic cost across multiple aquatic movements during diving[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, 41: 2127-2143.
- [29] LEE H S. Application of dynamic time warping algorithm for pattern similarity of gait [J]. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 2019, 15(4): 526-530.
- [30] YANG S CH, YU K, ZHANG L, et al. FusionTCN-Attention: A causality-preserving temporal model for unilateral IMU-based gait prediction and cooperative exoskeleton control [J]. *Biomimetics*, 2026, 11(1): 26.
- [31] DURANDAU G, FARINA D, ASÍN-PRIETO G, et al. Voluntary control of wearable robotic exoskeletons by patients with paresis via neuromechanical modeling[J].

Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2019, 16(1): 91.

- [32] JIN L, LING L Y, YU ZH P, et al. Continuous lower-limb joint angle prediction under body weight-supported training using AWDF model[J]. *Fractal and Fractional*, 2025, 9(10): 655.
- [33] ZHAO R Q, YAN X B, FAN Y B. Terrain-aware stride-level trajectory forecasting for a powered hip exoskeleton via vision and kinematics fusion [J]. *ArXiv preprint arXiv: 2404.11945*, 2024.

作者简介



朱宇, 2023 年于广东工业大学获得学士学位, 现于深圳大学攻读硕士学位, 主要研究方向为外骨骼机器人。

E-mail: yu. zhu2@siat. ac. cn

Zhu Yu received his B.Sc. degree from Guangdong University of Technology in 2023.

He is currently pursuing his M.Sc. degree at Shenzhen University. His main research interest includes exoskeleton robots.



袁博, 分别于 2007 年和 2013 年获得国防科技大学学士和博士学位。现为牛迪科技有限公司总经理与技术总监, 主要研究方向包括外骨骼机器人和自学习机器人。

E-mail: ramboyuanbo@qq. com

Yuan Bo received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from the National University of Defense Technology in 2007 and 2013, respectively. He is currently the general manager and chief technology officer of NiuDi Technology Co., Ltd. His main research interests include exoskeleton robots and self-learning robots.



马跃 (通信作者), 分别于 2011 年至 2014 年获得重庆邮电大学学士和硕士学位, 并于 2020 年获得中国科学院深圳先进技术研究院智能仿生中心博士学位。现为中国科学院深圳先进技术研究院的副研究员。主要研究方向包括人工智能和外骨骼机器人。

E-mail: yue. ma@siat. ac. cn

Ma Yue (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2011 and 2014, respectively, and his Ph.D. degree from the Center for Intelligent and Biomimetic Systems, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences in 2020. He is currently an associate research fellow at Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include artificial intelligence and exoskeleton robots.