

一种用于上肢外骨骼中安全和意图整合辅助的语义感知框架

Yu Chen, Shu Miao, Chunyu Wu, Jingsong Mu, Bo OuYang, and Xiang Li

Abstract—上肢外骨骼主要设计用于通过准确解释和响应人类意图来提供辅助支持。在家庭护理场景中，外骨骼需要根据任务的语义信息调整其辅助配置，适当地根据所操作对象的性质进行调整。然而，现有解决方案通常缺乏理解任务语义或与用户协同规划动作的能力，限制了其通用性。为了解决这一挑战，本文介绍了一个语义感知框架，将大型语言模型整合到任务规划框架中，从而实现安全且整合意图的辅助。所提出的方法首先让外骨骼在透明模式下运行，以捕捉穿戴者在抓取对象时的意图。一旦从任务描述中提取到语义信息，系统会自动配置适当的辅助参数。此外，基于扩散的异常检测器用于持续监测人机交互状态，并在检测到异常时触发实时重新规划。在任务执行过程中，使用在线轨迹优化和阻抗控制来确保安全并规范人机交互。实验结果表明，所提出的方法能够有效地与穿戴者的认知一致，适应语义变化的任务，并可靠地响应异常情况。

Index Terms—Upper-limb exoskeleton, semantic-aware assistance, large language models, online adaptation to wearers.

I. 引言

外骨骼机器人已成为应对人口老龄化相关挑战的一个有前途的解决方案 [?]，提供精确的帮助以改善用户的移动能力。下肢外骨骼，如 ReWalk [?] 和 HAL [?]，被广泛用于支撑体重并促进各种步行任务 [?]。然而，它们的主要重点仍然是运动。接受家庭护理的老年人往往需要除步行外的多样化帮助，尤其是在需要上肢功能的任务中。上肢外骨骼 [?], [?], [?] 旨在支持日常生活活动所需的运动范围，并能够增强上肢功能，特别是在涉及重复动作的任务中。外骨骼机器人被开发用来协助用户执行各种任务。然而，这些任务中涉及的人机密切和频繁互动使安全性成为整个过程中的重中之重。为了确保安全性，在硬件和软件系统中都实施了几项措施。在硬件方面，系列弹性执行器 (SEAs) [?] 和电缆驱动机制 [?] 已被结合到外骨骼设计中，以增强顺应性和灵活性。在软件方面，使用了先进的控制方法，例如反步控制 [?] 和奇异摄动理论 [?]，以实现精确的位置和力调节，即使在高阶非线性动力系统中也是如此。尽管这些发展提高了控制精度，但现有的框架仍在整个辅助过程中依赖预定义的轨迹，这限制了系统的适应性。为了满足上肢运动的多样化需求，结合人类意图并在不同运动模式之间进行模式切换，提供了一种灵活且响应迅速的辅助方法 [?]。例如，力感应电阻器已被用于准确确定用户预期运动的方向，使外骨骼能够以与穿戴者动作相对应的方式提供辅助 [?]。此外，已经开发了使用脑电图信号的脑机接口以直接提取用户意图 [?]。为了提高意图估计的准确性并扩大这些方法的应用，研究人员探索了多模态传感器基础的方法。通过整合深度学习 [?] 和高斯径向基函数网络 [?] 等先进技术，这些系统能够有效识别多样的运动模式，为更加个性化和自适应的外骨骼辅助铺平了道路。然而，现有框架仍受限于固定的控制器设置和安全约束 [?]，通常导致过于保守的运动规划，无法适应任务的具体要求。此外，在整个辅助过程中没有整合人类意图，降低了系统对于各种任务的灵活性和泛化能力。

为了向人类提供全面的辅助，大语言模型 (LLMs) 的发展为机器人系统引入了先进的推理能力和对语义信息的深刻理解。这些模型支持对描述任务的逻辑分析和逐步响应的生成。同时，它

们还能直接从动作空间生成运动指令。然而，在外骨骼机器人领域，有效地将人类意图与 LLMs 生成的计划动作整合仍然是一个未解决的挑战。充分利用 LLMs 来解释和利用这些语义信息，可以显著增强外骨骼辅助的范围和适应性。

为了解决这些挑战，本文提出了一种用于上肢外骨骼的语义感知框架，该框架能够以安全的方式协助穿戴者，使穿戴者的运动意图可以在协助过程中干预和调整当前的协助策略。其贡献总结如下：

- 1) **LLM 赋能外骨骼**：这项工作通过引入推理和规划能力，使系统能够理解和响应基于语言的命令，同时考虑语义信息，从而实现将大语言模型 (LLMs) 与上肢外骨骼集成。通过将辅助任务分解为多步骤过程，LLM 提高了任务成功率，增强了外骨骼在不同操作中的普适性，从而提高了外骨骼的用户友好性和交互质量。
- 2) **意图整合策略**：所提出的框架为穿戴者提供了高度的自由度以表达运动意图。通过使用外骨骼的透明模式，用户可以独立确定要操作的对象，从而防止误抓等错误。只有在明确需要的任务中才提供帮助。一个新颖的异常检测网络确保任何不一致的运动意图都会中断当前的辅助策略并触发重新规划过程，从而提高适应性和精度。
- 3) **语义感知的辅助**：除了推理和规划，LLM 还用于提取和解释嵌入在任务描述中的语义信息。这一能力使外骨骼在提供帮助时能够考虑到任务环境中安全相关属性。结合所提出的阻抗控制器和在线轨迹优化方法，外骨骼能够根据语义洞察动态调整阻抗参数和轨迹约束，确保辅助的控制、全面和上下文有效性。

所提出的框架使外骨骼机器人能够设置阻抗和速度参数、应用安全约束，并根据任务描述规划行动。同时，它允许穿戴者实时干预，以解决任务执行过程中可能出现的异常。这种方法的可行性已经通过绳索驱动的上肢外骨骼进行了验证。

II. 系统结构

本研究中所使用的上肢外骨骼的结构如图 ?? 所示。为了提供灵活而全面的辅助，外骨骼结合了弹性致动器 (SEAs) 和电缆驱动机构，这有效地减少了肢体运动过程中固有惯性的影响，并提高了交互质量。外骨骼具有五个主动关节 (关节 1-5) 和一个被动关节 (关节 0)，以支持在关节空间中满足日常活动所需的上肢运动范围。这六个关节的具体功能总结在表 I 中。

在主动关节中，直接驱动模块 (RJSIIT-17-RevB2 和 RJSIIT-17-RevB5) 用于肩部运动 (关节 1 和 2)，以增强鲁棒性并在动态肢体运动过程中提供高输出扭矩。电缆驱动的关节配备了 SEAs (AK80-64)，提供轻质传动和改进的减震等优点。在关节侧 (用于内外旋转关节的 3590S-2-104L 和用于肘关节的 QY2204-SSI)，安装了电位计和编码器以确保精确的位置感知，如图 ?? 所示。为了实现精确的扭矩辅助，通过在所有电缆驱动的关节上集成扭矩传感器 (TK17-191151) 实现全关节扭矩感知能力，以确保在辅助过程中精确执行扭矩指令。

TABLE I
外骨骼关节的功能

Joint	Function
Joint 0	Shoulder eccentric movement
Joint 1	Shoulder abduction/adduction
Joint 2	Shoulder flexion/extension
Joint 3	Upper-arm internal and external rotation
Joint 4	Elbow flexion/extension
Joint 5	Forearm internal and external rotation

Y. Chen, S. Miao, and X. Li are with the Department of Automation, Tsinghua University, China. This work was supported in part by the Science and Technology Innovation 2030-Key Project under Grant 2021ZD0201404, in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant U21A20517 and 62461160307, in part by the Beijing National Research Center for Information Science and Technology, and in part by China Postdoctoral Science Foundation 2025M771713. Corresponding author: Xiang Li (xian-gli@tsinghua.edu.cn)