

Research on Intent Recognition and Intelligent Control of Upper Limb Mechanical Exoskeleton Movement Based on Artificial Intelligence

Yueyang Huang Chuangxin Chen Wei Wang Kun Wei Qing Cui

Harbin Institute of Petroleum, Harbin, Heilongjiang, 150028, China

Abstract

Based on artificial intelligence, this paper discusses the technical status and development trend of mechanical exoskeleton, analyzes the technical principle and application challenge, introduces the application of artificial intelligence in motion intention recognition, discusses the characteristics of different algorithms and their advantages and disadvantages in practical application, describes the design and implementation of intelligent control system, including the optimization of control algorithm and real-time feedback mechanism. The effectiveness and feasibility of the proposed method are proved. This paper aims to provide new ideas and methods for the study of upper limb mechanical exoskeleton and promote further development of this field.

Keywords

mechanical exoskeleton of upper limb; movement intention recognition; artificial intelligence

基于人工智能的上肢机械外骨骼运动意图识别与智能控制研究

黄悦洋 陈创新 王伟 尉坤 崔清

哈尔滨石油学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150028

摘要

论文对基于人工智能的上肢机械外骨骼的运动意图识别与智能控制技术进行了研究, 探讨了上肢机械外骨骼的技术现状与发展趋势, 分析了其技术原理及应用面临的挑战, 介绍了人工智能在运动意图识别中的应用, 讨论了不同算法的特点及其在实际应用中的优势与不足, 描述了智能控制系统的设计与实现, 包括控制算法的优化与实时反馈机制。通过实验设计与结果分析, 验证了所提出方法的有效性与可行性。论文旨在为上肢机械外骨骼的研究提供新的思路和方法, 并推动该领域的进一步发展。

关键词

上肢机械外骨骼; 运动意图识别; 人工智能

1 引言

随着机器人技术和人工智能的发展, 在康复治疗和提升人类运动能力等领域, 上肢机械外骨骼逐渐显示出广泛的应用前景, 作为一种新兴的辅助设备。传统的上肢功能障碍恢复方法通常依赖于通过精确的机械结构和智能控制系统,

使机械外骨骼能够提供个性化的辅助, 使患者的运动能力和生活质量得到显著提高的物理治疗和训练, 效果受到患者个体差异的影响。运动意图识别技术是直接影响外骨骼性能和用户体验的上肢机械外骨骼的一项重要技术。随着深度学习和传感器技术的进步, 能够实时分析用户的运动意图并作出相应反应, 从而实现智能控制的基于人工智能的运动意图识别方法逐渐成熟。

【项目名称】上肢仿生机械外骨骼机器人(项目编号: S202413299046S)。

【作者简介】黄悦洋(2003-), 男, 中国天津人, 从事智能化工程及可持续发展技术。

【通讯作者】崔清(1987-), 女, 中国黑龙江哈尔滨人, 硕士, 高级工程师, 从事过程装备与控制工程专业教学研究。

2 上肢机械外骨骼的技术现状与发展趋势

2.1 上肢机械外骨骼的技术原理

上肢机械外骨骼是一种借助机械结构帮助用户增强或恢复上肢功能的电动或液压驱动装置的穿戴式机器人系统。其核心技术包括用于实时监测用户生理信号和运动状态, 从而获得用户运动意图的传感器、执行器和控制算法^[1]。执行

人员负责对上肢实施辅助或增强,根据控制信号做出相应的动作。而控制算法则是负责处理传感器数据、判断用户意图、实时调整执行器动作以保证动作流畅自然的整个系统的“大脑”。随着技术的发展,许多上肢机械外骨骼都采用了减轻设备重量的先进材料和设计,使穿戴的舒适度和灵活度都得到了提高。整体而言,为康复和增强应用提供坚实技术基础的上肢机械外骨骼,其技术原理不断完善,正朝着智能化、自动化方向发展。

2.2 现有技术的应用和挑战

在医疗领域,这些设备被广泛应用于帮助患者恢复上肢功能,改善他们的生活质量,例如中风和脊髓损伤。外骨骼用于减轻军人和工人的负担,提高工作效率和安全,应用于军事和工业领域。现有的技术仍然面临着很多挑战,包括成本过高,技术复杂,还有用户适应能力方面的问题。很多外骨骼设备在费用上并不普及,在基层医疗、居家康复等方面的应用受到限制^[2]。复杂的运维要求也让一些用户很难自主使用。对于设备的设计和性能要求较高的用户,在实际使用中可能会出现不适应、不够舒适等问题。因此,研发上肢机械外骨骼将是未来发展的重要方向,更具经济性、易用性和适应性,以应对现有技术的不足。

2.3 上肢机械外骨骼的未来发展方向

技术的进步,将使机器学习算法在运动意图的辨识和控制策略方面发挥更大的作用。外骨骼也能更准确地理解和响应使用者的意图。随着个性化定制逐渐成为一种新潮流,将收集用户的生理数据和运动习惯,设计适合每个使用者的外骨骼,并提高舒适度和使用效果。将整合更多功能的外骨骼也将逐步成为现实,比如结合虚拟现实技术进行训练与康复,以增强使用者的体验和效果。另外,材料方面对轻量化、高强度、柔性材料的采用,也能有效提高外骨骼穿戴的舒适度,并拓展它的运用范围。随着技术的不断突破,相信外骨骼也能做到更多,为使用者带来更科学、更有效的帮助^[3]。随着技术的进步,相信外骨骼的应用领域会越来越大。

3 人工智能在运动意图识别中的应用

3.1 运动意图识别的基本概念

运动意图识别是指通过对使用者的生理信号和运动方式的分析,对其即将发生的动作或意图进行判断的过程。由于该技术直接影响设备的反应速度和精确度,因此在上肢机械外骨骼中具有重要意义。通常,基于肌电信号(EMG)、脑波(EEG)、动作传感器数据等多种生理信号来识别运动意图。系统可以通过实时监控和分析这些信号,将使用者的运动意图提取出来,然后带动机械外骨骼做出相应的动作。运动意图识别的精确性和实时性随着机器学习和深度学习的发展而显著提高,从而使机械外骨骼更加智能灵活地应用于实际应用。生理信号杂音干扰、个体差异导致信号变化、复杂环境下识别稳定性等问题,在这一领域还面临着不小的挑战。

3.2 人工智能算法的类型与选择

人工智能算法的选择在运动意图识别中,与识别的效率和准确度有着直接的关系。目前常用的算法主要有支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)、卷积神经网络(CNN)、递归神经网络(RNN)等算法。支持向量机的应用更广泛,初期的分类性能很好,但在处理复杂数据时灵活性较低。通过模拟人脑神经元的连接方式,人工神经网络可以更好地适应非线性数据,但要提高泛化能力,需要大量的训练样本。在图像和时序数据的处理上,卷积神经网络表现优异,可以有效地提取适合处理高维数据如肌电信号的局部特征。然而,能捕捉信号中时序特征的递归神经网络尤其适用于时间序列数据,对动态变化的运动意图识别优势明显^[4]。选择合适的算法除了要看数据的性质外,还和应用场景、实时性要求等因素有着很大的关系。

3.3 人工智能在运动意图识别中的优势与不足

运用机器学习技术,系统可以从大量的数据中自动提取特征,对识别模型进行优化,从而对运动意图的精确性有较大幅度的提高。相对于传统方法而言,AI系统对个体差异和复杂环境有更强的适应能力。特别是在动态变化的情况下,AI系统能够对识别策略进行实时的调整,从而保证机械外骨骼的精确响应。但是AI系统在算法上有一定的复杂性,对数据质量有一定程度的依存性。另外,资料噪音和讯号干扰等都可能影响识别结果的精确性和泛化能力。部分深度神经网络模型在可解释性方面较弱,导致用户很难理解系统的决策过程。有学者认为,这是由于深度神经网络的训练过程往往是黑盒模型造成的。

4 智能控制系统的设计与实现

4.1 智能控制系统的结构与组成

智能控制系统在上肢机械外骨骼中的基本结构包括感知层、决策层和执行层。感知层负责收集用户的生理信号和环境信息,常用传感器包括肌电传感器、加速度计和陀螺仪等。通过这些传感器,系统能够实时监测用户的运动状态和意图,提供必要的技术支持。决策层则是系统的核心,负责处理感知层获取的数据,运用人工智能算法进行运动意图识别和控制策略制定。在这一层中,模型的准确性和计算速度至关重要,确保系统能够快速做出反应。执行层则包含驱动装置,如电动马达或气动装置,负责将决策层的指令转化为具体的运动。

4.2 控制算法的设计与优化

控制算法有PID控制、自适应控制与模糊控制等。PID控制是以调节比例参数,积分和微分来精确驱动机械外骨骼运动的手段,非线性和复杂系统处理时却可能摆脱多次调整与优化。自适应控制能够借助环境变化及系统特性自行调整参数,从而提升系统的抗干扰能力。

在实际应用中,结合多种控制算法的优点或者采用混

合控制策略可以提高整体控制精度和稳定性。优化控制算法时,还需要考虑计算复杂度和实时性,确保在快速变化的环境下,控制系统能够及时响应。

4.3 控制系统的实时反馈与调节

用户的生理信号和外部环境受到系统的不断监测,为了即时获取状态变化并与预设控制目标进行比较。过程涉及传感器数据采集、信号处理以及信息传输等关键环节。实时反馈是基础,动作执行器通过控制系统得以动态调整,使其满足用户需求。对于用户运动意图的改变,速度快且准确地识别并调整输出是必要条件,这保证了机械外骨骼动作的平稳和自然。实时调节要求系统具备快速反应能力,需要有效的算法支持去处理复杂的动态数据^[5]。实时反馈系统还应具备一定的容错能力,能够应对传感器故障或外部干扰,确保系统的稳定性和安全性。

5 实验与结果分析

5.1 实验设计与测试方法

这项实验旨在评估包括10名志愿者在内的健康成年人、年龄在20至30岁之间的基于人工智能的上肢机械外骨骼的运动意图识别和智能控制系统的有效性。实验分锻炼意图鉴定和机械外骨骼控制检测两个阶段进行。第一阶段,志愿者为获得不同动作的肌电信号,佩戴肌电感应器,进行握拳、伸臂、提肩等一系列规范的上肢动作。系统通过对这些信号的实时采集,将每一个动作的EMG波形记录下来并加以处理。志愿者在第二阶段与第一阶段相同的动作中,要佩戴机械外骨骼的上肢。在这个过程中,系统对运动意图进行实时识别,并带动机械外骨骼进行相应的运动。在实验过程中,每一个动作的延迟时间、成功率以及使用者反馈都会被记录下来,以此来对系统的反应速度以及准确度进行评估。整个试验采用随机设计,为提高成绩的可靠性,每个志愿者都能在不同的条件下,保证接受多次试验。

5.2 数据采集与处理过程

在实验中,肌电信号和动作反馈数据通过LabVIEW软件实时采集和处理。每个志愿者在每种动作下进行至少五次重复,确保数据的充分性和可靠性。收集到的数据包括肌电信号的幅度、频率、延迟时间和动作成功率。表1展示了部分数据。

表1 实验相关数据

动作类型	肌电信号幅度 (μV)	延迟时间 (ms)	动作成功率 (%)
握拳	120 \pm 15	150 \pm 20	95
伸展手臂	110 \pm 10	140 \pm 18	90
抬肩	130 \pm 12	160 \pm 22	93
转动手腕	115 \pm 14	155 \pm 19	92

数据经过滤波和去噪处理后,采用统计软件进行分析,以评估不同动作下的肌电信号特征及其与控制响应的关系。

5.3 实验结果的分析与讨论

握拳、伸展手臂和抬肩等动作的成功率均超过90%,显示出系统对常见动作的高识别精度。根据数据分析,握拳动作的平均延迟时间为150ms,而抬肩动作的延迟时间较长,为160ms,表明在识别和控制过程中,复杂性较高的动作可能导致稍微延迟。这种延迟可能与肌电信号的变化速度和控制算法的处理时间有关。

通过对肌电信号幅度与动作成功率之间的关系进行相关分析,发现肌电信号幅度与成功率呈正相关,幅度越高,成功率也越高,反映出肌电信号强度对运动意图识别的影响。进一步的多元回归分析显示,延迟时间和成功率之间存在显著负相关关系,意味着控制系统在实时性方面的表现对用户体验至关重要。当前设计的智能控制系统能够有效识别运动意图并进行及时响应,为未来的上肢机械外骨骼研究提供了可靠的数据支持,同时也为进一步优化系统的设计和算法提供了基础。

6 结论

主要对利用人工智能的上肢机械外骨骼系统在运动意图识别和智能控制方面的现状及今后发展方向进行了讨论。实验和资料分析对所提出的智能控制系统在运动意图的实时识别和外骨骼动作的精确控制方面的有效性进行了验证。系统对常见动作的成功率超过90%,且反应速度与识别精度均达到合理范围,即延迟时间也在可接受的范围内。从肌电信号幅度与成功率的关联中,可见信号强度在识别过程中扮演着举足轻重的角色。基于人工智能的上肢机械外骨骼在康复医疗方面提供了新的思路,同时对智能控制系统的研究与应用打下了坚实的基础,对推进该领域的技术进步和实际运用提供了重要的借鉴与参考作用。因此,它对于该领域的深入研究与发展具有十分重要的意义。

参考文献

- 尹鹏,杨靓,石磊,等.无动力上肢助力机械外骨骼对手臂抬举作业的影响研究[J].机械,2023,50(8):16-25.
- 司冠军.针对上肢外骨骼的康复机器人的设计[J].自动化应用,2023,64(15):13-15.
- 付瑶瑶.上肢外骨骼机器人康复系统的设计与研究[D].南昌:南昌大学,2022.
- 吴冀.上肢助力外骨骼设计与研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2022.
- 李海涛.康复用外骨骼上肢机械臂仿生结构研究[D].青岛:青岛大学,2016.