

仿生机械臂的肌电信号自适应抓取控制

张克平

安徽怀宁海螺水泥有限公司 安徽安庆

【摘要】聚焦仿生机械臂的肌电信号自适应抓取控制研究。先阐述通过肌电传感器获取人体肌肉运动产生的微弱电信号，经滤波、放大等预处理步骤提高信号质量。接着介绍从预处理信号中提取时域、频域及时频域特征以识别肌肉运动意图的方法。然后说明基于识别结果设计控制算法，如采用自适应控制策略使机械臂能依据抓取物体的特性及环境变化实时调整控制参数，实现稳定抓取。研究旨在提升仿生机械臂抓取的准确性、灵活性与适应性，推动其在医疗康复、工业生产等多领域的广泛应用。

【关键词】仿生机械臂；肌电信号；自适应控制；抓取控制；信号处理

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日

【出刊日期】2025 年 4 月 18 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250022

Adaptive grasping control of bionic arm via electromyographic signals

Keping Zhang

Anhui Huaining Conch Cement Co., Ltd., Anqing, Anhui

【Abstract】 This study focuses on the research of adaptive grasping control for bionic arms using electromyographic signals. The paper first explains how microelectromyographic signals generated by human muscle movements are acquired through electromyography sensors, followed by signal quality enhancement through preprocessing steps such as filtering and amplification. It then introduces methods for extracting time-domain, frequency-domain, and time-frequency domain features from the processed signals to identify muscle movement intentions. Subsequently, control algorithms are designed based on recognition results, including adaptive control strategies that enable real-time adjustment of control parameters according to object characteristics and environmental changes, achieving stable grasping. The research aims to enhance the accuracy, flexibility, and adaptability of bionic arm grasping, promoting its widespread application in medical rehabilitation, industrial production, and other fields.

【Keywords】 Bionic arm; Electromyographic signals; Adaptive control; Grasping control; Signal processing

引言

在科技飞速发展的当下，仿生机械臂作为融合生物与机械技术的产物，备受关注。从医疗康复助力残障人士重获生活自理能力，到工业生产提高作业效率与精度，其应用前景广阔。但要实现如人类手部般灵活、精准且自适应的抓取动作，面临诸多挑战。如何精确解读肌电信号，并据此实现机械臂的自适应抓取控制，成为亟待攻克的关键问题，对提升仿生机械臂性能意义重大。

1 肌电信号获取与预处理技术

肌电信号获取与预处理是实现仿生机械臂自适应抓取控制的首要环节。人体肌肉在神经系统的指

令下产生收缩运动时，会伴随生物电活动，这些微弱的电信号能够通过贴附在皮肤表面的肌电传感器采集。由于肌电信号幅值通常在微伏级，信号强度远低于环境噪声与人体其他生理电信号，因此信号采集过程面临诸多挑战。运动过程中产生的伪差会干扰真实肌电信号，而无处不在的工频电场、磁场干扰更会使信号质量严重下降，这些都要求必须采用专业的预处理技术来提升信号可用性。

信号预处理的第一步是信号放大。在这一阶段，信号的微弱电压被提升至一个更高的水平，以便于后续处理。为了实现这一目标，分级放大电路采用了多级放大器串联的设计方案。这种设计通过精心匹

配各个放大级的增益与带宽,确保信号在经过每一级放大器时都能得到适当的放大,最终将原始的微伏级信号放大至伏特级。在放大过程中,电路设计特别注重提高输入电阻,以降低对肌电信号源的负载效应^[1]。这样做可以确保信号在放大过程中不会产生失真,从而保持其原有的特性。这种放大处理不仅显著增强了信号的强度,还为后续的信号处理步骤提供了合适的信号幅值范围,使得后续处理变得更加高效和准确。

干扰抑制和噪声消除在信号预处理过程中扮演着至关重要的角色。为了有效地处理各种干扰信号,干扰抑制电路采用了滤波技术,专门针对不同频段的干扰进行精确处理。特别是针对 50Hz 的工频干扰,这种干扰通常是最主要的噪声源之一。为了应对这一问题,工频陷波电路通过精心设计陷波滤波器,能够有效地衰减这一特定频段的信号,从而显著降低其对原始信号的干扰。通过使用带通滤波器,可以进一步去除那些高频和低频的无关信号,确保只保留肌电信号所在的有效频段。经过多级滤波处理,原始信号中混杂的各种噪声得到了大幅抑制,最终得到的肌电信号变得干净、稳定且具有代表性^[2]。这样的处理为后续的特征提取和运动意图识别提供了坚实的基础,确保了信号处理的准确性和可靠性。

2 肌电信号特征提取与运动意图识别

肌电信号特征提取是连接原始信号与运动意图识别的关键桥梁。预处理后的肌电信号包含着丰富的肌肉活动信息,但这些信息以复杂波形的形式存在,需通过数学方法提取有效特征。时域特征的提取聚焦于信号在时间维度的变化规律,均值能够反映信号的平均幅度,方差则体现信号幅度的离散程度,这些特征可直观描述肌肉收缩的强度和稳定性。通过计算过零率等时域指标,还能捕捉肌肉活动的频率特性,为运动意图分析提供基础数据。

频域特征提取是一种从信号的频率成分角度来解析肌电信号的方法。通过这种方法,我们可以将信号分解到不同的频率段,并展示出各个频率成分的能量分布情况。在肌肉收缩的过程中,不同的运动模式会产生具有特定频率特征的电信号。通过分析这些信号的功率谱密度,我们可以区分出不同的肌肉活动状态。在快速有力的肌肉收缩过程中,信号的频率成分会呈现出一种特定的能量分布特性;而在缓慢持续的肌肉收缩过程中,信号的频率成分则会呈

现出另一种特定的能量分布特性。这种频率特征的差异为我们提供了识别不同运动意图的重要依据。时频域特征提取综合了时域和频域的分析优势。小波变换作为常用的时频分析工具,能够将肌电信号在时间和频率维度上进行联合表征,展现信号在不同时刻的频率成分变化^[3]。通过计算小波变换系数,可获取信号的时频分布图像,捕捉肌肉活动过程中频率成分随时间的动态变化。将时域、频域和时频域特征进行融合,形成多维特征向量,为后续运动意图识别提供更全面、准确的输入数据。

运动意图识别是将提取的特征转化为具体运动指令的过程。支持向量机和人工神经网络等模式识别算法,通过对大量样本数据的学习训练,建立肌电信号特征与运动意图之间的映射关系。在训练阶段,将包含不同运动意图的肌电信号特征向量作为输入,对应运动意图类别作为输出,通过优化算法调整模型参数,使模型能够准确识别各种运动意图^[4]。在实际应用中,将实时采集的肌电信号特征输入训练好的模型,即可快速判断出用户的肌肉运动意图,为机械臂的控制提供精确指令。

3 自适应抓取控制策略设计

自适应抓取控制策略在仿生机械臂的智能化操作中扮演着至关重要的角色。当机械臂执行抓取任务时,物体的表面材质、形状、重量等多种因素会导致抓取过程中存在大量的不确定性。为了实现稳定可靠的抓取效果,必须构建一个基于力和位置反馈的闭环控制机制。位置反馈主要依赖于安装在机械臂关节和末端执行器上的传感器,这些传感器能够实时监测机械臂的运动轨迹,确保机械臂能够按照预定的路径接近并准确抓取目标物体;而力反馈则通过力传感器来感知末端执行器与物体接触时的受力状况,为控制算法提供实时的力信息。

在抓取过程中,物体表面的材质会直接影响摩擦力的大小,而不规则的形状则会导致受力不均匀,这些因素都会对抓取的稳定性产生影响。自适应控制算法能够根据力和位置反馈的信息,动态地调整机械臂关节的驱动力和运动轨迹。当检测到物体表面的摩擦力较小时,控制算法会自动增大抓取力,以确保抓取的稳定性;如果物体受力不均,算法会调整机械臂各关节的运动角度,使抓取力均匀分布,从而避免物体滑落或损坏^[5]。这种自适应调整机制能够有效地应对抓取过程中出现的各种复杂情况,确保

机械臂在各种条件下都能实现稳定抓取。

为了进一步增强系统对复杂环境和不确定性因素的适应能力,可以将智能控制算法应用于抓取控制策略中。模糊控制利用模糊逻辑规则来处理不精确和不确定信息,能够根据力和位置反馈的模糊化输入快速做出控制决策。而自适应滑模控制则通过设计滑模面和切换函数,使系统状态能够快速收敛到期望的轨迹,具备较强的鲁棒性和抗干扰能力^[6]。将这些智能算法与传统的控制方法相结合,形成复合控制策略,可以更好地应对抓取过程中的非线性、时变性和不确定性,优化抓取控制效果,从而提升机械臂操作的灵活性和可靠性。

4 仿生机械臂系统集成与验证

仿生机械臂系统集成是将各功能模块整合为完整系统的过程。该系统由肌电信号采集模块、信号处理与识别模块、自适应控制模块及机械臂本体构成。肌电信号采集模块负责获取原始肌电信号,信号处理与识别模块对信号进行预处理并识别运动意图,自适应控制模块依据识别结果生成控制指令,机械臂本体则执行具体抓取动作。在集成时,需解决各模块间接口兼容性、数据传输稳定性和控制指令同步性等问题,以确保系统各部分协同工作。

为了确保系统的验证准确性,我们特别搭建了一个实验平台,通过模拟真实的抓取场景来进行测试。在这个实验平台上,我们精心设置了多种不同的测试条件,以确保覆盖各种可能的情况。这些测试条件包括了不同形状的物体,例如球形、方形以及不规则形状的物体;不同材质的物体,如金属、塑料和橡胶;以及不同重量的物体,以确保测试的全面性。在每一种测试条件下,我们进行了多次重复的抓取实验。通过这些实验,我们详细记录了机械臂的运动轨迹,抓取过程中力的变化情况,以及最终的抓取结果^[7]。为了确保数据的精确性,我们使用了高速摄像机和力传感器等多种先进的监测设备。这些设备能够精确地捕捉到机械臂在抓取过程中的每一个细微动作和力的变化,从而确保我们能够全面了解机械臂的性能和抓取效果。通过这些详尽的测试和记录,我们能够对系统的性能进行全面的评估和优化。

性能测试从抓取准确性、稳定性和适应性三个方面评估。抓取准确性通过计算机械臂末端执行器与目标物体实际接触位置和理想位置的偏差衡量;稳定性通过分析抓取过程中物体晃动程度和抓取力

波动情况评估;适应性考察机械臂在不同测试条件下完成抓取任务的成功率^[8]。根据实验结果,对系统参数进行优化调整,包括修改控制算法参数、改进信号处理算法性能、调整机械臂结构设计等。通过持续实验验证和参数优化,逐步提升仿生机械臂基于肌电信号的自适应抓取控制性能,使其符合实际需求。

5 结语

对仿生机械臂肌电信号自适应抓取控制研究进行总结,已实现从肌电信号获取到机械臂自适应抓取的完整流程构建。经实验验证,系统在一定程度上具备准确抓取能力。展望未来,需进一步提升肌电信号识别精度,拓展机械臂可抓取物体的种类与复杂程度,加强与其他先进技术融合,如人工智能、传感器融合技术等,推动仿生机械臂在更多领域实现更高效、智能的应用。

参考文献

- [1] 赵明阳,谢银辉,杨进兴,等.气电混合仿生机械臂运动建模及参数辨识[J].传感器与微系统,2025,44(07):75-80.
- [2] 刘九庆,刘凡,朱斌海.旋翼无人机仿生栖息机械臂设计[J].森林工程,2024,40(04):150-159.
- [3] 吴琪,王志刚,杨宇,等.机械臂结构的发展与应用综述[J].航空科学技术,2024,35(05):60-73.
- [4] 梁柱,陈思涛.7 自由度类肌腱驱动仿生机械臂的设计研究[J].模具制造,2024,24(05):40-42+46.
- [5] 王尧尧,刘卢芳,鞠锋,等.面向旋翼飞行器的仿生机械臂终端滑模控制[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(02): 471-481.
- [6] 罗颖杰,罗勇杰,张家伟,等.基于仿生机械臂与 AI 深度视觉的 ROV 水下机器人[J].长江信息通信,2022,35(01):19-22.
- [7] 陈涛,杜福鹏.基于肌电信号控制的仿生机械手掌控制系统设计[J].南方农机,2020,51(09):20+24.
- [8] 陈涛,杜福鹏.基于 MYO 的仿生机械臂随动控制系统设计[J].信息与电脑(理论版),2020,32(07):77-79.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS