

# Research on the Application of EMG Signals in the Development of Exoskeleton Powered Robots

Baocheng Li, Lei Shi, Dai He, Danna Gao

Department of Physical Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi  
Email: shilei@xjtu.edu.cn

Received: Dec. 12<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 1<sup>st</sup>, 2020; published: Jan. 8<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Exoskeleton assisted robots integrate advanced robot technology with rehabilitation medicine, and the ultimate goal is to achieve better recovery results. EMG signals have been greatly developed in the development of exoskeleton assisted robots. Human-computer interactive control based on surface EMG signals is superior to traditional fixed-program control. This paper discusses the current classification of exoskeleton robots, analysis and extraction of surface EMG signals, and human-computer interaction control. Finally, it looks forward to the future research trends of surface EMG signals in the development of exoskeleton assisted robots.

## Keywords

EMG Signal, Exoskeleton Assisted Robot, Sports Human Science, Human-Computer Interactive Control

---

# 肌电信号在外骨骼助力机器人发展中的应用研究

李宝成, 石磊, 何黛, 高丹娜

西安交通大学体育部, 陕西 西安  
Email: shilei@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2019年12月12日; 录用日期: 2020年1月1日; 发布日期: 2020年1月8日

---

## 摘要

外骨骼助力机器人将先进的机器人技术与康复医学进行融合, 最终目的是取得更好的恢复效果。肌电信

号在外骨骼助力机器人发展中得到了长足的发展, 基于表面肌电信号的人机交互控制优于传统固定程式控制。本文论述了目前外骨骼机器人的分类、表面肌电信号的分析与提取以及人机交互控制等内容, 最后展望了表面肌电信号在外骨骼助力机器人研发中的未来研究趋势。

## 关键词

肌电信号, 外骨骼助力机器人, 运动人体科学, 人机交互控制

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

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



Open Access

## 1. 引言

肌电信号(electromyography, EMG)在运动人体科学、基础医学、临床医学和康复医学领域中有着越来越多的应用, 它表达了肌纤维的动作电位在时空上的叠加, 与肌肉收缩和肌肉力量息息相关。针电极深入肌肉内部所得到的肌电信号比较精确、易于检测和识别, 但它的创伤性特征不易被人们接受。而表面肌电信号(surface EMG, sEMG)是指通过皮肤表面的电极来检测神经肌肉活动的电信号, 是多个运动单元的动作电位在时间和空间上叠加的综合结果, 也可以定量地记录神经肌肉活动的电生理特征、肌肉的疲劳程度和神经传导速度。sEMG 的检测手段操作相对简单, 具有无创性的特征, 因此, 它对运动人体科学、人机工效学和康复医学等领域备受重视, 具有重要的应用和学术价值, 有着广阔的推广前景。

随着社会老龄化进程和不断上升的伤残人口数量, 传统的康复手段已经难以满足人们运动和诊断治疗的需要, 外骨骼机器人的技术应用正在由工业生产领域逐渐延伸到运动人体科学和康复医学领域, 将在很大程度上弥补传统康复手段的缺陷。外骨骼机器人的辅助形式包括主动练习形式和被动练习形式, 对患者不同的康复阶段都有所介入, 而外骨骼机器人的主动练习形式和选择性助力形式日益受到关注, 这对患者的主动运动的意识判断尤为重要[1]。外骨骼助力机器人将精密的机器人技术与康复医学进行融合, 由人机互动设备辅助患者执行锻炼活动, 为有运动障碍的人提供精确的指导数据和信号, 合理设计康复计划, 以适宜的强度刺激肌肉, 缩短康复周期, 最终取得更好的恢复效果。sEMG 蕴含的人体信息准确而丰富, 基于 sEMG 融合外骨骼康复机器人的技术研究已经受到了众多学者的极大关注, 逐渐形成了运动医学和康复机器人领域的一个新的社会与经济发展点。

## 2. 外骨骼机器人的分类

### 2.1. 外骨骼机器人的练习形式

以往传统的康复联系计划主要通过医护人员和家人辅助患者利用一些助力设备支持患肢开展练习, 这种以人工为主的练习形式参与者较多, 易受参与者主观意识判断的干扰, 对练习强度、运动负荷、动作角度等练习因素的规范性难以掌控[2]。外骨骼机器人的辅助形式(主动练习形式和被动练习形式)解决了传统康复方法的不足, 对患者不同的康复阶段都有所介入, 其主动练习形式和选择性助力形式日益受到关注, 这对患者的主动运动的意识判断尤为重要。外骨骼机器人的辅助形式提高了康复质量, 其练习形式具体可分为主动练习、被动练习、助力练习和抗阻练习等四种模式。外骨骼机器人的练习执行系统囊括着一套完整的辅助联系结构和控制体系, 通过机电一体化模拟运算具体数据实现实时控制和指导患者的康复计划于实施, 从而帮助患者加快患侧的康复进程。

## 2.2. 外骨骼机器人的功能分类

外骨骼机器人是结合了控制技术、信息技术、传感技术和移动网络技术等多项模块,从而为人体提供人机结合的可穿戴机械装置的一种综合技术。依据人体练习部位的区别,外骨骼机器人可划分为全身式外骨骼机器人、上肢外骨骼机器人及外骨骼机器人等三种类别。如果依据运动形式的区别,外骨骼机器人可划分为悬挂式机器人、牵引式机器人和穿戴式机器人等三种类别。如果依据患者练习姿态的区别,外骨骼机器人可划分为直立式、坐卧式和起立助力式机器人等三种类别。如果依据外骨骼机器人的工作形态的区别,外骨骼机器人则包括了辅助行走、跑步助力、脚踏板助力、静力助力和各主要关节康复助力等五种类别。

外骨骼康复机器人于 20 世纪 90 年代逐渐出现在大众眼前,美国麻省大学机械工程学院开展外骨骼机器人的研究最早,他们在此领域的进展也较快。瑞士在 1999 年研发出一种名为 LOKOMAT 的外骨骼下肢康复机器人,其后在 2005 年研发出了 LOKOMAT 的更新换代版本,此机器人的两侧有两个自由度(膝关节、髋关节),另外还有骨盆的上下方向自由度,驱动装置是线性力传感器。荷兰 2000 年研发了一种名为 LOPES 的外骨骼步态康复机器人,此机器人包括了膝关节处的一个自由度和在髋关节处的两个自由度。德国在 2000 年研发了一种名为 GTI 的外骨骼脚踏板式下肢康复机器人,并在 2003 年得到了改良版,它可以利用人力自主和电机驱动进行康复练习。瑞士在 2005 年又研发了名为 MOTION 的外骨骼坐卧式下肢康复机器人,此机器人主要有躺椅与机械腿两个结构构成,其两侧有三个自由度(髋关节、膝关节、踝关节),在固定训练框架支撑下,患者能够以卧床姿态操控自己的患侧进行康复训练,通过肌电传感器的信号信息来反馈动作模式和控制训练的强度和角度。韩国在 2005 年也研发了一种名为 WHERE 的外骨骼移动式步行康复机器人。我国在外骨骼机器人的研发工作也得到了一定的进展:上海大学研发了一种外骨骼步态康复机器人,其主要装置有包括机械腿助行组件、减重组件和跑步机组件等环节。哈尔滨工程大学研发了一种外骨骼踏板式下肢康复机器人,其主要装置有脚踏板控制组件、整体框架组件、步态助理组件和导轨组件等环节。西安交通大学研发了一种外骨骼下肢康复机器人,并对生物电信号的人机互动技术进行了输入开发。浙江大学研发了一种外骨骼下肢康复机器人[3],其主要装置也包括了机械腿助行组件、减重组件和跑步机组件等环节。总之,关于外骨骼机器人的研发已然处在了快速的发展阶段,在某些发达国家外骨骼机器人已被许多患者所用,在我国外骨骼机器人的研发主要处于实验室层面,也取得了一定成效。

## 3. sEMG 的信号分析与提取

### 3.1. sEMG 的信号量化

sEMG 是指通过皮肤表面的电极来检测神经肌肉活动的电信号,是多个运动单元的动作电位在时间和空间上叠加的综合结果,sEMG 信号与肌纤维的构成比、解剖结构、肌肉收缩的贡献率、运动单位的同步化程度和募集能力有着较强的相关性,可以定量地记录神经肌肉活动的电生理特征、肌肉的疲劳程度、神经的传导速度等发展规律。sEMG 的检测手段操作相对简单,具有无创性的特征,因此,它对运动人体科学、人机工效学和康复医学等领域备受重视,具有重要的应用和学术价值。sEMG 的特征表现有:微弱性(一般只有 0~5 mV, 20~300  $\mu$ V)、交变性(是乱序的交流电压,其幅值与产生的张力基本成正比)、对称性(由正弦波叠加形成)和低频性(频谱在 0~1000 Hz,主要集中在 200 Hz 以下,波士顿大学的学者利用双极型模型发现,肌电频谱分布在 20~500 Hz,绝大部分集中在 50~150 Hz)。对 sEMG 信号进行量化研究,是在运动人体科学和临床医学领域展开应用的必经阶段,其信号的量化处理过程主要包括:检测肌肉收缩舒张的肌电信号变化,平滑处理信号以及标准化处理数据,取肌电信号的绝对值,通过标

准化处理后的肌电信号就可以理论上实现与其他个体的肌肉肌电值进行比较研究了。

### 3.2. sEMG 的时域分析

表面肌电信号分析包括时域分析与频域分析。时域分析是将肌电信号看作时间的函数,通过分析得到肌电信号的某些统计特征。频域分析常常是通过傅立叶变换而把肌电的时域特征转换为频域信号的频谱或功率谱来进行分析。时域分析参数包括振幅(AMP)、积分肌电值(iEMG)、均方根值(RMS)、时程(DUR)等,频域分析参数包括平均功率频率(MPF)、中位频率(MF)、中心频率(CF)等。上述指标是反映肌电信号频率特征的生物物理指标,其数值与肌纤维的构成比、解剖结构、肌肉收缩的贡献率、运动单位的同步化程度和募集能力有着较强的相关性。

## 4. 基于表面肌电信号的外骨骼机器人控制

### 4.1. 基于表面肌电信号的人机交互控制理论

外骨骼机器人的人机交互控制理论应融合运动再学习的理论原理,即受试者在损伤初期是难以做到主动运动的,此时需要在外骨骼机器人的辅助主导下练习预设的被动训练计划。而后在中后期练习时,基于患者的主动积极性以及机器人的辅助力,人机交互控制才会真正充分发挥作用。基于 sEMG 的人机交互控制理论的中心思路为:利用 sEMG 所包含的肌肉的生理状态以及具体肌电信息,首先要利用患者健侧的 sEMG 信号对主动运动的意识进行识别和判断,准确并及时地形成数字化的运动力度和关节角度,从而确定机器人的运动轨迹同步与患者的主动意识。然后,利用患侧的 sEMG 信号评测由人体肌肉收缩产生的自身力矩和运动角度对受试者的动作能力展开评价,最后利用人机体系的逆动力学准确地评估对机器人输出的运动轨迹进行实时监控,最终达到对患者的主动运动得以辅助的目的[4]。基于 sEMG 的人机交互控制理论的重要特征包括:实时性,即外骨骼机器人的目标运动轨迹并非既定轨迹,而是通过人机交互系统为患者进行实时的输入和自适应调整指导;适用性,即在外骨骼机器人的助力过程中应注重对受试者运动能力的针对性评价,要充分考虑受试者做动作能力的现实性,合理地控制和分配外骨骼机器人的驱动力以及运动轨迹;对称性,这主要是面向下肢单侧损伤的情况而提出的,即外骨骼机器人输出力和方向的控制要遵循运动对称的原则,要保证两侧肢体的关节运动角度的连续平滑和稳定。

### 4.2. 基于表面肌电信号的外骨骼机器人的人机交互优点

sEMG 是指通过皮肤表面的电极来检测神经肌肉活动的电信号,是多个运动单元的动作电位在时间和空间上叠加的综合结果,sEMG 信号与肌纤维的构成比、解剖结构、肌肉收缩的贡献率、运动单位的同步化程度和募集能力有着较强的相关性,可以定量地记录神经肌肉活动的电生理特征、肌肉的疲劳程度、神经的传导速度等发展规律。sEMG 的检测手段操作相对简单,具有无创性的特征,因此,它对运动人体科学、人机工效学和康复医学等领域备受重视,具有重要的应用和学术价值。表面肌电信号比较微弱且易受其他组织的阻抗和人体外部的电磁干扰,因此其电信号的采集和记录存在一定的困难,不过目前的电子设备日益发达,表面肌电图技术也愈加成熟,在一些发达国家已经实现了表面肌电采集系统在运动医学和康复医学等领域的广泛采纳。利用 sEMG 的多极和高密度电极放置与皮肤表面采集肌电信号,再经某些装置滤波、放大、计算、噪声处理后,就能够在人机交互体系中实现对自主运动的控制和助力目的[5]。基于 sEMG 的人机交互控制优于传统固定程式控制的主要方面有:① 能够使外骨骼机器人达到类似于人脑控制的主动式活动状态,因此它对于患者而言亲和力和较强。② 所采集的表面肌电信号来自于患者本身的健侧肌肉而不是固有的预定程序,所以对于受试者的患侧具有同步优势。③ 所采集的表面肌电信号超前于将要产生的动作,对于患者能够提供对动作的预判时机。④ 表面肌电信号包含了活

动角度、收缩力量和运动强度等丰富内容，而且便于研发可穿戴式的便携装置，在实现人机交互方面的综合性能具备优势。

## 5. 结语

外骨骼机器人将先进的机器人技术与康复医学进行融合，由人机互动设备辅助患者执行锻炼活动，为有运动障碍的人提供精确的指导数据和信号，合理设计康复计划，以适宜的强度刺激肌肉，缩短康复周期，最终目的是取得更好的恢复效果。肌电信号在外骨骼助力机器人发展中得到了长足的发展，基于 sEMG 的人机交互控制优于传统固定程式控制。由于人体结构和生理功能的复杂性以及表面肌电信号较弱的特点，基于 sEMG 外骨骼机器人的研发会有一定的难度，但是，sEMG 蕴含的人体信息准确而丰富，基于 sEMG 融合外骨骼康复机器人的技术研究已经受到了众多学者的极大关注，逐渐形成了运动医学和康复机器人领域的一个新的社会与经济发展点。

## 基金项目

陕西省重点研发计划项目(No. 2019GY-103)。

## 参考文献

- [1] 丁其川, 熊安斌, 赵新刚. 基于表面肌电的运动意图识别方法研究及应用综述[J]. 自动化学报, 2016, 1(42): 13-25.
- [2] 王秋惠, 魏玉坤, 刘力蒙. 康复机器人研究与应用进展[J]. 包装工程, 2018, 18(39): 83-89.
- [3] 张小栋, 陈江城, 尹贵. 下肢康复机器人肌电感知与人机交互控制方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 4(38): 649-657.
- [4] 胡进, 侯增广, 陈翼雄, 等. 下肢康复机器人及其交互控制方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(11): 2377-2390.
- [5] 陈江城, 张小栋, 尹贵. 基于表面肌电信号的人体步态事件快速识别方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 911-916, 924.