

· 资助成果 ·

## 实现下肢假肢智能仿生控制的神经功能重建及行走意图识别方法

黄品高<sup>1,2</sup> 黄剑平<sup>1</sup> 黄博俊<sup>1,2</sup> 方鹏<sup>1</sup> 刘志远<sup>1</sup> 李光林<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院深圳先进技术研究院 粤港澳人机智能协同系统联合实验室, 深圳 518055

2. 桂林电子科技大学, 桂林 541004

**[摘要]** 智能仿生下肢假肢是集电子信息、控制、材料、机械和生物学为一体的新一代假肢,能较好地代偿截肢患者丧失的运动功能,提高患者的行动能力。在国家自然科学基金—联合基金项目(U1613222)支持下,针对当前智能仿生下肢假肢行走意图识别精度低、步态控制稳定性差等关键问题,研究了利用神经功能重建获取更多肌电信息源、利用生理电信号结合生物力学信号进行行走意图精确识别,以及利用柔性控制方法结合环境识别实现假肢仿生控制等基础理论技术。此外,项目团队设计了三种动力型下肢假肢,进行了系统集成与验证,实现了在五种地形下较为自然的行走。项目成果将能推进智能下肢假肢的产业化进程,对提高患者生活质量、减轻家庭和社会负担具有重要意义。

**[关键词]** 仿生下肢假肢;神经功能重建;行走意图识别;假肢智能控制

根据第六次全国人口普查数据,2010年末,我国各类残疾人总数为8502万,其中肢体残疾人数为2472万<sup>[1]</sup>。下肢截肢是肢体残疾中非常重要的一类,它会严重影响患者的运动能力,尤其是膝关节以上截肢会严重削弱患者的行走能力。据统计,因创伤和疾病等因素导致的肢体截肢者中,约70%为下肢截肢者<sup>[2-5]</sup>。除工伤、自然灾害、交通事故、意外伤害及战争等情况外,随着世界人口的持续增长和人口老龄化的加剧,各种高发慢性病,如糖尿病、高血压、脑卒中等引起的截肢者比例还将增加,预计到2030年我国下肢截肢者将达到233万。

虽然下肢截肢患者的行动能力会受到影响,但不同的截肢部位对患者行动能力的影响程度不同。在几种截肢情形中,膝上截肢几乎都会影响患者行走能力,尤其是髋关节截肢,往往会造成患者完全丧失行走能力。下肢截肢不但会影响患者的行动能力,还可能影响患者的身体状态,使两者形成不良循环,最终严重损害患者身体健康。佩戴适当的假肢



**李光林** 博士,中国科学院深圳先进技术研究院研究员(二级)、博士生导师,中国科学院人机智能协同系统重点实验室主任、粤港澳人机智能协同系统联合实验室主任、深圳市人工智能学会会长、神经工程中心主任。目前主要从事神经康复工程、神经反馈、人机智能增强与融合、生物医学信号处理及仪器等领域的研究工作,发表论文250余篇,授权/申请国内外发明专利100多项。承担国家自然科学基金重点项目、973课题和863项目等多项。



**黄品高** 博士,桂林电子科技大学电子工程与自动化学院高级实验师,中国科学院深圳先进技术研究院客座研究员。主要从事人机接口技术、智能假肢控制、生理信号检测与处理、运动意图识别、柔性可穿戴系统等方向的研究。

装置是辅助截肢者实现功能康复、回归日常生活及社会的关键。当前,被动、无动力型假肢成本低廉、技术成熟且佩戴方便,是残疾患者的首选,其产品也是当前市场的主流。然而,被动、无动力型假肢需要

收稿日期:2021-06-19;修回日期:2021-09-17

\* 通信作者,Email: gl.li@siat.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U1613222)的资助。

借助人体残端的力量进行运动,存在步态不自然、易疲劳等问题,不能完全弥补患者失去的运动功能。新型的智能仿生下肢假肢是集电子、信息、控制、材料、能源、机械及生物医疗技术为一体的精密复合系统,能很好地代偿下肢残缺者的基本功能,显著改善截肢者的行走步态<sup>[6,7]</sup>。

目前世界上以发达国家为代表,许多国家都在积极研发智能仿生下肢假肢系统<sup>[8-11]</sup>。随着我国“科技兴国”战略的推进,利用科技和技术创新来保障、改善我国人民健康受到党和政府的重视,帮助残疾人康复已成为我国各级政府要解决的重大民生问题之一。国务院在《“十三五”加快残疾人小康进程规划纲要》中提出了保障残疾人基本民生、促进残疾人如期脱贫和就业增收、提升残疾人公共服务水平、保障残疾人平等权益、凝聚加快残疾人小康进程的合力、加强残疾人事业基础保障条件等六大方面的政策措施。在此背景下,本项目受到国家自然科学基金—联合基金项目“实现下肢假肢智能仿生控制的神经功能重建及行走意图识别方法”(U1613222)资助而展开,取得了一系列原创性研究成果,为智能下肢假肢技术的应用提供了强有力支撑。

## 1 研究成果

### 1.1 基础理论

截肢后残肢肌肉产生的肌电信号(Electromyogram, EMG)是与运动模式密切相关的电生理信号,和步行者自主行走意图直接相关,因此,残肢 EMG 被用于假肢步态模式识别中<sup>[12-15]</sup>。但截肢后下肢残留肌肉有限,不能提供足够的肌电信号实现运动意图的精确识别,特别是截肢程度越高,残留肢体肌肉越少,能提供的神经肌肉电信号也就越少,而需要控制的肢体动作就越多。靶向肌肉神经功能重建(Targeted Muscle Reinnervation, TMR)将残端无肌肉可支配的神经(支配神经)与靶向肌肉连接使肌肉充当神经信号放大器,进而通过肌肉获取更多的信息源进行人体运动意图识别,为假肢提供更多的控制信号,是解决上述矛盾的方法<sup>[16]</sup>。神经功能重建的实现方法有两种:第一种是将支配神经植入到靶向肌肉(TMR, 神经到肌肉);第二种是将支配神经与靶向肌肉中的原神经进行端端吻合(靶向神经功能替代, Targeted Nerve Functional Replacement, TNFR), 神经到神经。TMR 的缺点是支配神经在靶向肌肉内再生周期较长,而 TNFR 的优点是支配神经再生周期较短,但

需要离断靶向肌肉的原神经,存在肌肉萎缩的问题。针对上述问题,本项目提出了联合神经—肌肉功能重建(Hybrid Reinnervation of Targeted Nerves & Muscles, HR-TNM)方法,并对不同手术方式以及如何加快术后康复进行了研究。

(1) 靶向神经功能替代(TNFR)手术的神经功能重建效果优于靶向肌肉神经功能重建(TMR)手术

神经功能重建手术实验:项目对多组大鼠分别实施了 TMR、TNFR 手术。为达到最优的运动神经功能重建效果,应遵循三个原则选取靶向神经/肌肉:就近浅层、不完全破坏及原神经与支配神经尺寸相当。前两个原则必须遵循;第三原则若满足,则以 TNFR 的方式对神经进行修复,否则以 TMR 的方式对神经进行修复。靶向肌肉遵循上述原则时,还应结合受试者残端留存肌肉的实际情况,尽量避免不同功能的肌肉发生重叠。术后使用肌内神经染色、肌肉染色和肌电信号对重建后的靶向肌肉进行评价。

肌内神经染色结果:TMR 手术方式重建的神经为局部密集分布,呈现团状(图 1);TNFR 手术在神经接口处较为粗大,整个肌肉神经分布均匀,分布与原来极为相似(图 2)。

肌电信号监测结果:TNFR 手术大鼠产生的肌电信号时间更早、幅度更大(图 3a/b)。

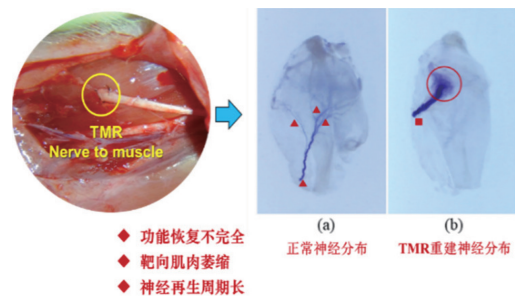
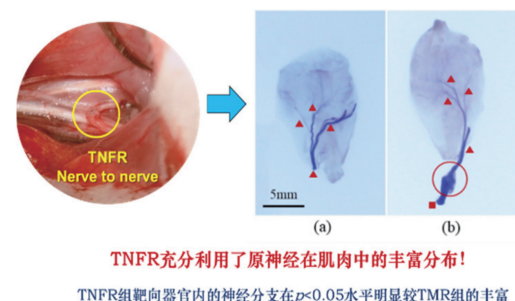


图 1 大鼠 TMR 手术后的肌内神经染色图



TNFR组靶向器官内的神经分支在 $p<0.05$ 水平明显较TMR组的丰富

图 2 大鼠 TNFR 手术后的肌内神经染色图

肌肉纤维染色结果：TNFR 手术肌肉纤维的横截面积更大、恢复更好(图 3c/d)。由此可见，TNFR 手术更适合用于神经功能重建。

(2) HR-TNM 方法吸取 TMR 和 TNFR 的优点，能更有效地重建运动神经功能

HR-TNM 方法结合了 TNFR 与 TMR 的双重要素，优先使用 TNFR 技术对神经进行修复。对于因靶向神经与残端游离神经直径差异较大而无法完全吻合的部分，则将未能吻合的部分神经植入靶向肌肉肌腹。对食蟹猴实施 HR-TNM 手术(图 4a~f)，康复三个月后对手术部位进行解剖发现，腓总神经与胫神经均能支配相应的靶向肌肉，并能诱发靶向肌肉产生动作电位(图 4g~h)。这说明 HR-TNM 方法能有效地重建运动神经功能。

(3) 功能电刺激(FES)干预明显提升 HR-TNM 方法的神经功能重建效果

神经功能重建手术后，远端神经会因脱离胞体的营养供给而产生不利于形态重构的溃变，靶向肌肉会因缺乏神经的支配而产生不利于功能康复的失神经萎缩，影响神经-肌肉功能恢复，如何尽快恢复神经对肌肉的支配是提高重建效果的关键。针对这两个问题，采用了以下两种方法促进神经-肌肉功能恢复。

FES 对 HR-TNM 模型进行干预(图 5a~c)：实验结果证明，功能电刺激后靶向肌肉的肌电幅度更高(图 5d)、肌力更强(图 5e)、肌肉更重(图 5f)，

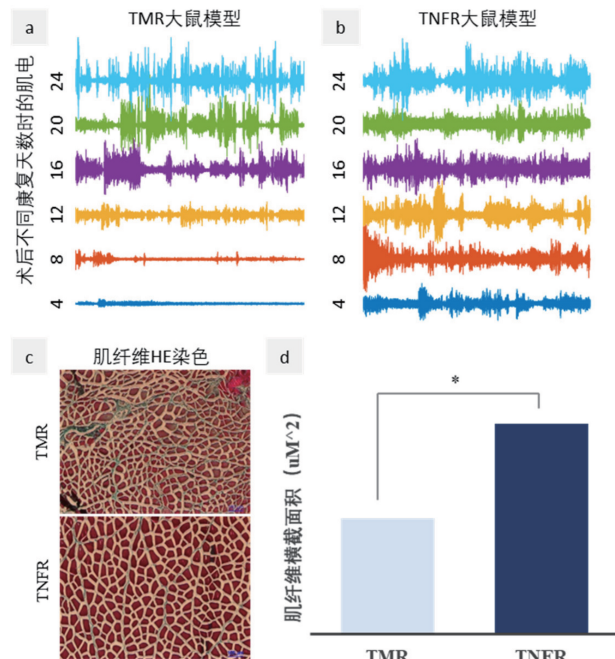


图3 TMR 与 TNFR 模型神经功能恢复效果比较

有增强神经再生与改善肌肉废用性萎缩的作用。

采用聚乙二醇(PEG)对神经断端进行干预处理；实验结果表明，PEG 干预对神经形态重构或功能康复未能发挥明显的积极作用(图 5e~f)。

### 1.2 共性关键技术

为实现假肢在多种地形上自然行走，需要将传感器、信号采集、模式识别、柔性控制、机械设计等多种技术相结合。首先，本项目设计了多种新型传感器和采集系统用于多模信号采集，并对地形进行识别实现行走模式预测；然后，根据假肢的力学传感器(压力、陀螺仪)和生物电信号传感器(肌电)对人体运动意图进行识别实现步态预测，同时进行行走环境识别实现对行走模式和步态的反馈修正，形成完整的闭环回路；最后，通过阻抗控制完成假肢行走控制。整体实现结构如图 6 所示。

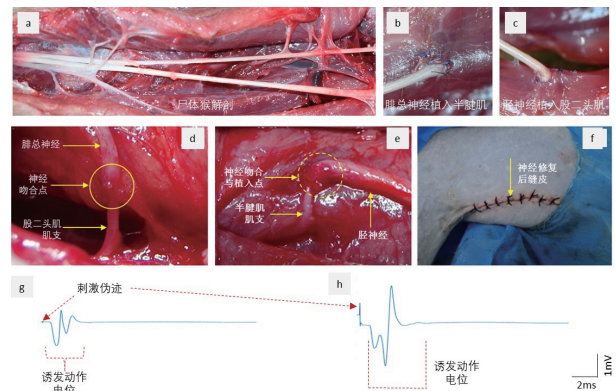


图4 食蟹猴 HR-TNM 模型

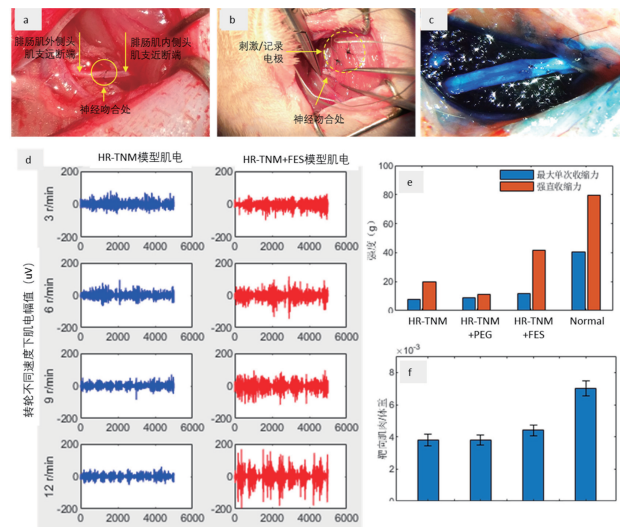


图5 FES 与 PEG 干预 HR-TNM 模型的神经功能重建效果

### 1.2.1 柔性传感器用于多模信号采集技术

运动意图识别准确率和信号数量成正相关,即增加信息源的通道数和种类数均可提高运动意图的识别准确率。本项目开发了多种传感器和采集系统进行多模信号采集。

针对常用的肌电电极(金属和凝胶电极)佩戴不够舒适的缺点,使用纳米金柔性导电材料制作了柔性可拉伸电极,在人体表面和大鼠体内实现了肌电信号采集<sup>[17, 18]</sup>(图 7a)。

针对高密度阵列布置繁琐耗时的不足,使用导电油墨和印刷技术制作了一种多通道印刷阵列电极(图 7b),并结合自粘附技术完成了一种低成本、一次性自粘附阵列电极,实现了高通道表面肌电采集。该自粘附阵列电极可在 1 分钟内完成部署,大大减少了部署时间。

针对肌电信号微弱、容易受到干扰的不足,根据肌肉形变现象,利用一种新型的纳米金柔性可拉伸导电材料制作了一种肌肉形变传感器(图 7c),用于测量肌肉形变。同时,这种传感器还可测量表面肌电。

### 1.2.2 复合信号用于运动意图识别技术

鉴于前述肌肉形变传感器既能测量肌肉的形变信号,又能作为电极测量肌电信号,本项目提出了将两种信号同时进行检测的肌电/肌肉形变复合传感

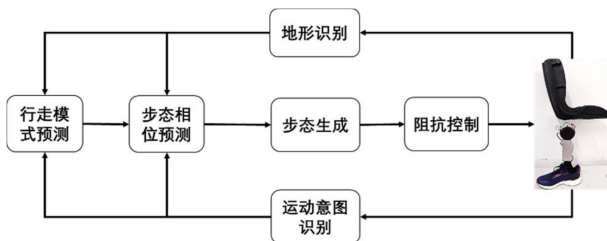


图 6 下肢假肢的仿生控制结构图

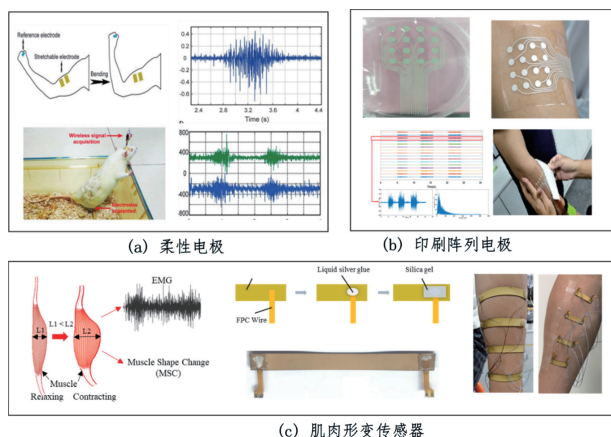


图 7 柔性传感器

器。结合频分复用技术,设计了相应的采集系统用于获取复合信号,实现了同一电极的同一层同时采集肌电和肌肉形变信号(图 8)。

实验结果表明:一对电极可同时采集 1 通道肌电和 2 通道肌肉形变信号(图 9a),两对电极可同时采集 2 通道肌电信号和 4 通道肌肉形变信号,对 11 类手势的分类准确率到达了 96%,高于使用肌电和惯性传感器的识别准确率(图 9b);将复合信号传感器用于截肢患者动作意图识别,其识别准确率也在 95% 左右(图 9c)。

### 1.2.3 基于分布式采集和计算的运动意图识别技术

为提高数据采集速度、降低系统数据传输量并缓解中央处模块动作识别的运算量,项目提出了一种分布式采集与计算的系统(图 10a)。对 6 个下肢的单关节动作和休息状态进行测试(图 10b/c),6 个动作包括 2 个髋关节动作、2 个膝关节动作、2 个踝关节动作。实验结果表明,分布式采集与运算模式可在不降低模式识别精度的情况下(准确率 98%,表 1),降低系统主机的运算负荷,并极大地降低对系统的通信带宽要求,使系统更加稳定。

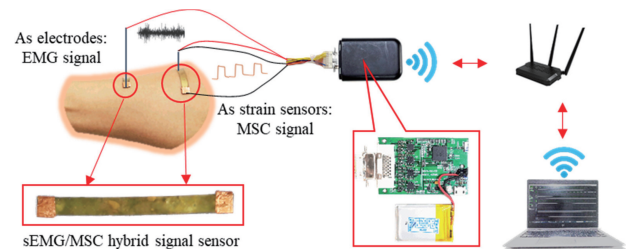


图 8 肌电/肌肉形变复合信号采集系统应用图

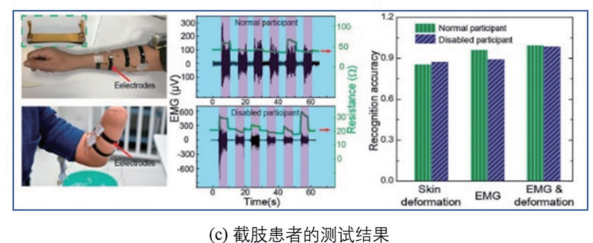
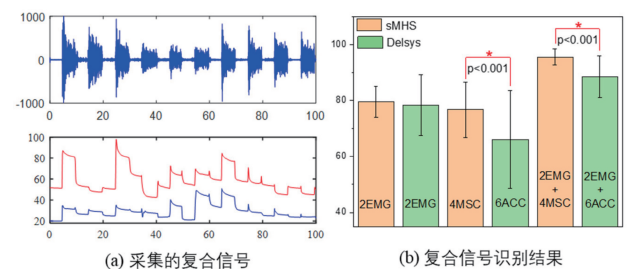


图 9 肌电/肌肉形变传感器在截肢者上的验证

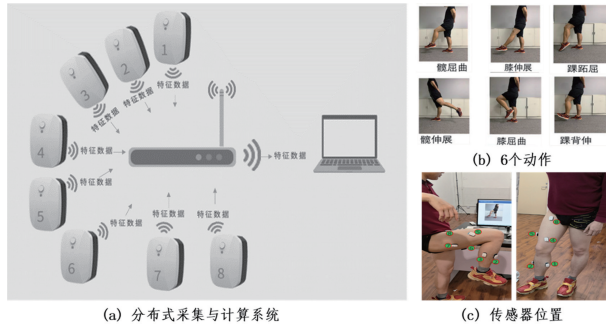


图 10 系统结构、6 个下肢动作及 8 个采集单元的位置设置图

表 1 下肢动作识别测试结果

被试者	训练模式	动作成功次数	动作失败次数	准确率 (%)
普通被试者	普通	97	23	80.83
	分布式	94	36	78.33
熟练被试者	普通	118	2	98.33
	分布式	118	2	98.33

1.2.4 基于激光雷达和惯性传感器(IMU)的地形识别技术

针对当前地形识别设备存在的体积和运算量大的问题,本项目提出了一种基于膝关节摆动完成单线激光雷达扫描方法。该方法先利用一段时间内激光雷达的距离信息和惯性传感器测得的姿态距离信息进行地形重建(图 11),再利用重建的信息对地形进行模式识别。实验结果表明,该方法对五种地形识别准确率达到 90%(表 2)。

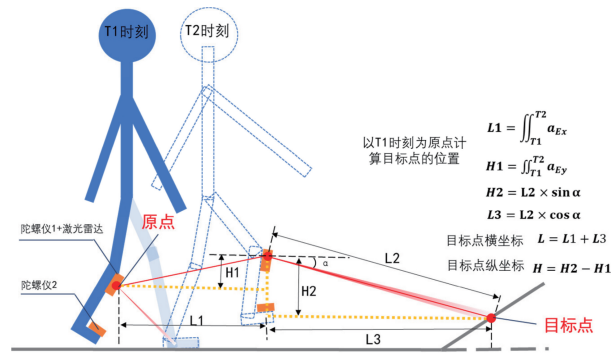


图 11 地形重建原理

表 2 对五种地形识别的混淆矩阵 (单位:%)

	平地—墙	平地—上楼梯	平地—下楼梯	平地—上斜坡	平地—下斜坡
平地—墙	82.06	8.83	0	0	21.03
平地—上楼梯	14.08	91.17	0	0	0
平地—下楼梯	0	0	100	0	0
平地—上斜坡	0	0	0	100	0
平地—下斜坡	3.86	0	0	0	78.97



图 12 实验设置

1.2.5 基于下肢多通道肌电和 IMU 的地形识别技术

针对平地、上楼梯、下楼梯、上斜坡和下斜坡 5 种地形,使用分布式无线多通道肌电采集系统的 8 个采集单元,共 16 通道肌电、24 通道加速度信号。8 个单元分别位于左右大腿,电极位置和场地如图 12 所示。使用肌电和 IMU 信号对地形实时识别准确率超过了 92%(表 3)。

1.2.6 基于柔性足底压力传感器的步态周期识别方法

项目利用 14 通道足底柔性阵列压力传感器对足底压力进行采集,从而进行步态周期识别。足底压力传感器的压力检测单元分布如图 13 所示。首先,对传感器按行(横向)分为 5 行,每行求平均值;然后,通过设定阈值判断脚跟着地和脚尖离地两个事件;最后,根据 5 行传感器压力到达峰值的时间,来判断人体重心是否位于踝关节上。这样可检测行走步态的 3 个关键事件(脚跟触底、脚尖离地和重心

表 3 下肢动作识别测试结果

被试者	训练模式	动作成功次数	动作失败次数	完成率 (%)
普通被试者	普通	97	23	80.83
	分布式	94	36	78.33
熟练被试者	普通	118	2	98.33
	分布式	118	2	98.33



图 13 柔性阵列传感器进行步态周期检测

处于踝关节),进而完成步态周期检测。实验结果表明,在三种地形(平地、楼梯和斜坡)上,通过矩阵压力传感器进行简单的阈值划分即可得到步态行走参数。

### 1.2.7 基于有限状态机和阻抗控制的步态控制技术

本项目将行走模式划分为平地行走、上楼梯、下楼梯、上斜坡和下斜坡五种,对应5种步态。每种步态划分为站立初期、站立末期、摆动初期、摆动末期4个主要周期,采用有限状态机进行步态控制,控制结构如图14所示。各状态的切换是通过当前步态周期和关节状态进行判断。在具体实现上,平地行走和斜坡行走采用同样的状态转换控制方法,而楼梯行走时需要较大的动力驱动,因此对上下楼梯分别采用了不同的转换参数。

在确定了步态以后,为了让使用者在运动过程中感受到舒适、平稳,项目使用了基于力阻抗控制方法。控制结构如图15所示,其内环是依赖力矩信号的力矩控制环,外环是基于位置的控制环,调节阻抗控制器的参数可实现不同阻尼和刚度。各种步态周期中,阻抗控制参数均可根据所需的刚度和阻尼进行调整。

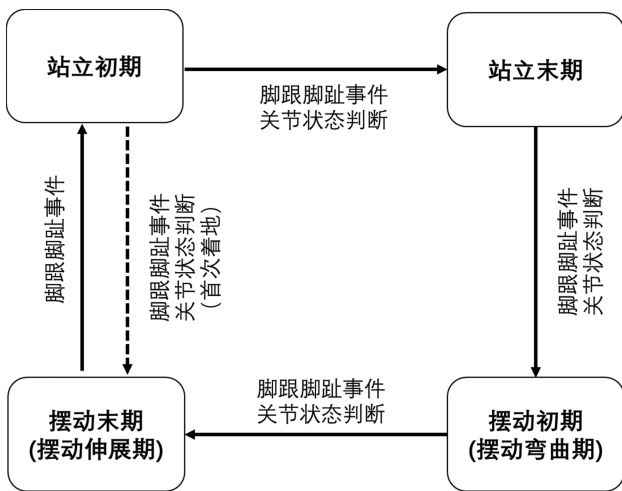


图14 行走步态周期切换方法

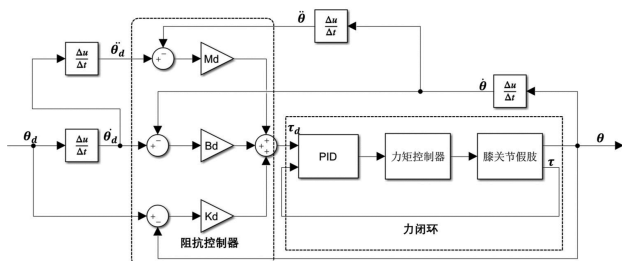


图15 阻抗控制的实现结构

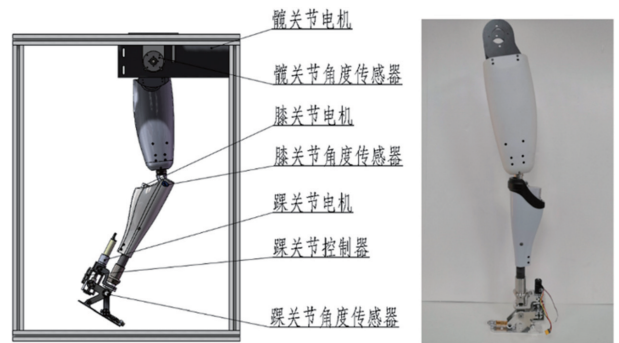
### 1.2.8 假肢关节设计

项目设计了三种类型的动力型假肢:基于丝杆和同步带传动机构的动力膝关节-主动踝关节假肢(图16a)、基于一体化行星减速电机的动力膝关节+被动踝关节假肢(图16b),以及新型的基于凸轮机构的主动膝关节-被动踝关节假肢(图16c)。

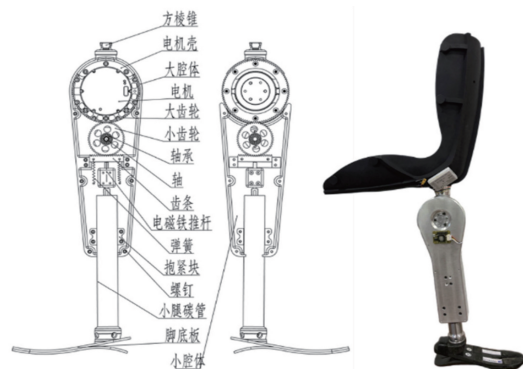
经测试,三种假肢膝关节的特点如下:

(1) 基于丝杆和同步带传动机构的动力膝关节:所需力矩要求相对较小、传动平稳、响应迅速,但噪声较大,整个结构狭长需要较大的活动空间,对装配要求较高,制造价格昂贵,维护困难。

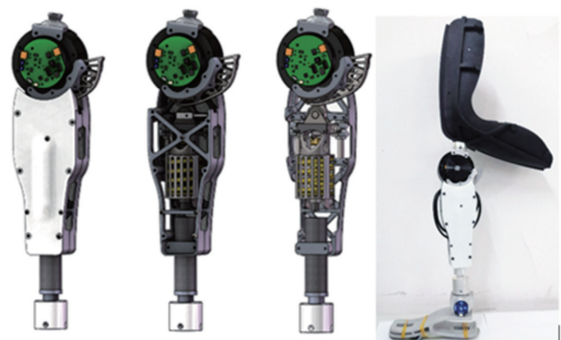
(2) 基于一体化行星减速电机的动力膝关节:



(a) 基于丝杆和同步带传动机构的动力膝关节-主动踝关节假肢



(b) 基于一体化行星减速电机的动力膝关节+被动踝关节假肢



(c) 新型的基于凸轮机构的主动膝关节-被动踝关节假肢

图16 本项目设计的三种下肢假肢

电机内置了一体化行星齿轮减速箱,整体重量轻,用于膝关节控制精度高。行星齿轮减速箱整体属于扁平状,横截面较大,多齿轮传动振动和噪声也相对较大。

(3) 基于多凸轮并联弹性驱动器的动力膝关节:最大化发挥电机的驱动功率,在膝关节需要较大力矩时,弹性组件可通过凸轮给电机进行补偿;当膝关节所需力矩较小时,电机多余的力矩可通过凸轮将能量储存在弹性组件中。该结构复杂、体积和重量相对较大,对加工和装配要求较高。

### 1.2.9 假肢系统集成及评估

项目采用了一体化行星减速电机的动力膝关节—被动踝关节假肢方案,并与上述采集和控制系统进行了集成(图 17)。假肢系统全重 2.53 kg,额定负载 75 kg。针对肢体健全者与截肢者分别设计了接受腔,并招募 1 名肢体健全受试者与 1 名截肢受试者进行了实验,实现了在五种地形较为自然的行走。

## 2 成果应用与行业影响

项目依托“中国科学院人机智能协同系统”重点实验室科研平台,在队伍建设、科研成果、合作交流等方面都取得了突出的成绩:资助培养了 3 名研究员、3 名副研究员、1 名高级工程师、25 名硕士和博士研究生、国家自然科学基金青年基金项目获得者 1 人。在 *Journal of the American Chemical Society*、*Advanced Materials* 等顶级期刊上发表具有影响力的高水平论文 40 余篇;申请专利 20 项,授权专利 6 项;出版教材和学术专著 2 部;获得省部级奖励 2



图 17 假肢穿戴行走实验

项。资助成员参加国内外学术会议共 50 余人次;举办国内外相关领域学术会议 3 场次,参会人员 480 人;邀请了牛津大学、加州大学、新加坡南洋理工大学和北京大学等国内外学者学术交流 10 余次;项目主持人及主要成员在日本、韩国及国内相关领域作特邀报告 8 次。项目构建了智能假肢领域的关键理论并突破了与之相关的多项关键技术,培养了一批青年科研骨干,在新型材料、智能假肢和康复工程等领域保持了与国际前沿研究同步,并扩大了国内在这一领域的影响。

## 3 总结

项目面向当前智能下肢假肢的行走意图识别精度低、步态控制稳定性差等关键问题,以实现智能下肢假肢在多种地形上的自然稳定行走为目标,在系统分析国内外智能下肢假肢研究现状的基础上,针对当前理论技术亟需解决的不足及问题,从“行走意图自动精确识别”“假肢步态智能控制策略”及“高性能智能假肢关节设计”三个方面开展研究,完成了项目预期计划任务。

项目的特色与创新之处主要体现在:(1) 针对截肢后肢体肌电信号源不足,综合两种神经功能重建技术(TMR 和 TNFR)的优点,提出了靶向神经—肌肉重建术(HR-TNM),不仅解决了 TNFR 术中神经端面可能无法完全吻合的问题,还充分利用了靶向肌内原有的神经网络形态;(2) 利用功能电刺激(FES)干预重建后的靶向神经—肌肉,探明了使用功能电刺激(FES)对 HR-TNM 模型进行干预可增强神经再生与改善肌肉废用性萎缩,使得术后恢复时间缩短了 50%,提高了 HR-TNM 的重建效果;(3) 研制了新型的柔性可拉伸传感器及复合信号采集系统,实现了生物力学、生物电学等多模信号的高精度同步采集,提高了信号采集密度,简化了采集系统;(4) 提出了一种分布式信号采集与运动意图识别系统,减少了系统数据传输量,降低了运动意图识别算法对核心模块计算能力的要求,提高了系统的实时性与稳定性;(5) 开发了一款综合性下肢假肢平台,重点研究了三种不同动力型膝关节假肢,开发了基于一体化行星减速电机的膝关节和被动踝关节假肢,并招募肢体健全者和下肢截肢者进行假肢穿戴行走测试,实现了假肢在不同地形下的实时、稳定、自然的行走。

项目对智能下肢假肢核心基础理论和关键技术

的研究与突破,将能极大地促进智能假肢技术领域的进步,在国内智能假肢、康复工程领域起到积极引领作用,为智能下肢假肢的研究与设计提供重要理论和技术支撑,可有力地推动我国智能下肢假肢的产业化进程。鉴于项目研究还存在不足之处,为进一步完善和探索智能下肢假肢以及神经康复相关技术和理论,课题组拟开展以下几方面的研究:(1)设计高密度生理信号采集系统,基于神经—肌肉功能重建方法,利用肌电信号分解等方法探索表面肌电信号与神经肌肉之间的关系;(2)研究假肢控制的新方法,结合多种传感器感觉外部环境(如地面硬度、摩擦、障碍物等),实现假肢在复杂环境中的行走;(3)设计新型假肢结构,提高假肢行走效率。

### 参 考 文 献

- [1] 赵燕潮. 中国残联发布我国最新残疾人口数据. 残疾人研究, 2012(A01): 11.
- [2] Ziegler-Graham K, MacKenzie EJ, Ephraim PL, et al. Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2008, 89 (3): 422—429.
- [3] Krueger CA, Wenke JC, Ficke JR. Ten years at war: comprehensive analysis of amputation trends. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 2012, 73 (6 Suppl 5): S438—S444.
- [4] Windrich M, Grimmer M, Christ O, et al. Active lower limb prosthetics: a systematic review of design issues and solutions. *BioMedical Engineering OnLine*, 2016, 15 (3): 140.
- [5] 中国残疾人联合会. 中国残疾人事业统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [6] Mileusnic MP, Rettinger L, Highsmith MJ, et al. Benefits of the Genium microprocessor controlled prosthetic knee on ambulation, mobility, activities of daily living and quality of life: a systematic literature review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2021, 16 (5): 453—464.
- [7] Varrecchia T, Serrao M, Rinaldi M, et al. Common and specific gait patterns in people with varying anatomical levels of lower limb amputation and different prosthetic components. *Human Movement Science*, 2019, 66: 9—21.
- [8] Mileusnic MP, Rettinger L, Highsmith MJ, et al. Benefits of the Genium microprocessor controlled prosthetic knee on ambulation, mobility, activities of daily living and quality of life: a systematic literature review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2021, 16 (5): 453—464.
- [9] Segal AD, Orendurff MS, Klute GK, et al. Kinematic and kinetic comparisons of transfemoral amputee gait using C-Leg and Mauch SNS prosthetic knees. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 2006, 43 (7): 857—864.
- [10] 王振平, 喻洪流, 杜妍辰, 等. 假肢智能膝关节的研究现状和发展趋势. *生物医学工程学进展*, 2015, 36 (3): 159—163.
- [11] 王蕾, 王辉, 黄品高, 等. 下肢截肢者行走意图识别方法研究进展. *自动化学报*, 2018, 44(8): 1370—1380.
- [12] Hargrove LJ, Simon AM, Lipschutz RD, et al. Real-time myoelectric control of knee and ankle motions for transfemoral amputees. *JAMA*, 2011, 305 (15): 1542—1544.
- [13] Ha KH, Varol HA, Goldfarb M. Volitional control of a prosthetic knee using surface electromyography. *IEEE Transactions on Bio Medical Engineering*, 2011, 58 (1): 144—151.
- [14] Huang H, Kuiken TA, Lipschutz RD. A strategy for identifying locomotion modes using surface electromyography. *IEEE Transactions on Bio Medical Engineering*, 2009, 56(1): 65—73.
- [15] Radmand A, Scheme E, Englehart K. High-density force myography: a possible alternative for upper-limb prosthetic control. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2016, 53(4): 443—456.
- [16] Kuiken TA, Li GL, Lock BA, et al. Targeted muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms. *JAMA*, 2009, 301 (6): 619—628.
- [17] Liu ZY, Wang H, Huang PG, et al. Highly stable and stretchable conductive films through thermal-radiation-assisted metal encapsulation. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2019, 31(35): e1901360.
- [18] Yan XZ, Liu ZY, Zhang QH, et al. Quadruple H-bonding cross-linked supramolecular polymeric materials as substrates for stretchable, antitearing, and self-healable thin film electrodes. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(15): 5280—5289.



## The Methods of Neuromuscular Function Reinnervation and Ambulation-Intention Recognition of Lower-limb Amputees to Realize the Intelligent and Bionic Control of Powered Prosthetic Legs

Huang Pingao<sup>1,2</sup> Huang Jianping<sup>1</sup> Huang Bojun<sup>1,2</sup> Fang Peng<sup>1</sup> Liu Zhiyuan<sup>1</sup> Li Guanglin<sup>1\*</sup>

1. *Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, and Guangdong-HongKong-Macau Joint Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Shenzhen 518055*

2. *School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004*

**Abstract** Intelligent bionic lower limb prosthesis integrates the key technologies in a number of scientific fields such as electronic information, control, materials, machinery and biomedicine. As a new generation of prostheses, an intelligent bionic lower limb prosthesis can compensate well for the loss of motor function of amputees and improve their daily activities. The accuracy of walking intention recognition and the stability of control are two important factors that would affect the function of intelligent leg prosthesis. The key issues of the current intelligent bionic lower limb prosthesis are less accuracy in walking intention recognition and poor control in gait stability. The project investigated the use of neural functional reconstruction to obtain multiple sources of electromyography information. The fusion of physiological electrical signals and biomechanical signals was used to recognize walking intentions accurately. A flexible control method was studied for bionic controlling of the prosthesis under the environment recognition. Three types of powered lower limb prostheses were also designed and prototyped. At last, the system integration and verification were carried out in natural walking of several leg amputees in the five terrains. The results are conducive to promoting the industrialization of intelligent lower limb prostheses, and are of great significance to improving the quality of individual life of amputees and reducing the burden on families and society.

**Keywords** bionic leg prostheses; neuromuscular function reinnervation; ambulation-intention recognition; prosthetic intelligent control

(责任编辑 李华一)

---

\* Corresponding Author, Email: gl.li@siat.ac.cn