

# 人机智能协同在医疗康复机器人领域的应用\*

郑悦<sup>1,2</sup>, 景晓蓓<sup>1,2</sup>, 李光林<sup>1,2</sup>

1 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055; 2 中国科学院人机智能协同系统重点实验室 深圳 518055

**摘要:**生物智能(人类智能)和人工智能(机器智能)各有所长,具有很强的互补性。借助各种人一机接口技术和方法,将生物智能和人工智能结合起来,使它们优势互补、协同工作,从而产生更强大的智能形态,并将孕育出重大的理论创新和技术方法突破。首先介绍了人机智能协同的主要研究方向、关键科学问题和主要研究内容,之后对人机智能协同在服务、医疗和康复机器人领域的应用及推动作用做了进一步介绍,最后分析了应用存在的可能问题和挑战并做出总结。

**关键词:**人工智能;生物智能;协同;机器人

**中图分类号:** TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

## Application of human-machine intelligence synergy in the field of medical and rehabilitation robot

Zheng Yue<sup>1,2</sup>, Jing Xiaobei<sup>1,2</sup>, Li Guanglin<sup>1,2</sup>

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 2. Key Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Biological intelligence (human intelligence) and artificial intelligence (machine intelligence) have their good points, respectively and they also have strong advantage complementarity. With the aid of all kinds of human-machine interface technologies and methods, human intelligence and artificial intelligence are combined to form a new powerful hybrid intelligence, which will provide a significant theory innovation and breakthrough in technology. This paper firstly introduces the main research directions, key technology problems and major research contents of human-machine intelligence. Then, further introduction is made to illustrate the applications and promoting actions of human-machine intelligence synergy technology in the fields of service, medical and rehabilitation robot. Finally, the possible problems and challenges existing in the applications are analyzed, and conclusion is made.

**Keywords:** artificial intelligence; biological intelligence; synergy; robot

## 0 引言

人工智能(artificial intelligence, AI)是研究开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用的一门新兴技术科学<sup>[1]</sup>。生物智能(biological intelligence, BI)是生物脑所具有的信息感知、加工、投射整合决策及控制功能和行为,人类自身的智能是人类思维活动中表现出来的能力<sup>[2-3]</sup>。人工智能具有强大的记忆力、准确的执行力和快速的信息处理及推理能力,但目前人工智能仍然缺乏适应复杂环境或求解问题的高级智能属性<sup>[4]</sup>。

人类智能具有抽象思维、推理、学习等高级智能属性,但人脑的信息加工处理速度不高、记忆容量有限。因此,人机智能协同旨在结合脑的认知能力与计算机的计算能力,即将生物智能与人工智能紧密结合。人工智能与生物智能的协同作用能够发挥两种智能所长,使它们优势互补、协同工作,从而有望产生更强大的智能形态,并将孕育出重大的理论创新和技术方法突破<sup>[5]</sup>。人机智能协同被认为是影响21世纪最重要的科技之一。

人机智能协同的主要研究方向是以智能人机交互系统为目标,以信息技术和生物医学工程为支撑,围绕生物智能与人工智能协同的主题,重点研究多源感知觉与运

动信息的获取及计算理论,生物智能与人工智能增强及协同,以及人机智能协同系统智能行为的实现这3个关键科学问题。

在人机交互信息感知与计算方面,重点开展人机协同系统所涉及的多模感知觉和运动信息获取传感技术、信息处理算法及信息挖掘研究<sup>[6]</sup>;在生物智能增强方面,研究感知觉与运动功能的生物重建和增强方法;在人工智能增强方面,研究面向多源感知觉和运动信息解码的机器学习方法等;在人机智能协同方面,研究人机协同的认知模型、人机智能系统互适应学习方法与智能增强技术;在人机智能系统方面,研究人机智能协同控制方法与智能交互技术,研发面向人机智能协同的服务、交互及康复平台与应用系统。

## 1 人机智能协同的关键科学问题

### 1.1 多源感知觉和运动信息的融合与编解码原理

人机智能协同首先需要在人与机之间建立信息通道并进行双向通信,因此,人机智能系统所涉及到的多源环境信息、生物信息和交互信息的感知和计算是开展人机智能协同研究的基础,主要包括视觉、听觉、触觉等信息的感知与交互,运动信息和人体生理信息的感知与交互,以及人的情感信息的感知与交互等<sup>[7-8]</sup>。探索人机交互信息的获取、传输、分析、存储等方法,并对多源、高通量、时变、非线性的多源感知觉和运动信息,进行高效、动态、联合的解码分析,发现感知觉和运动信息的编码原理,将带动智能系统信息学领域的突破与发展<sup>[9]</sup>。

### 1.2 生物智能与人工智能的协同及互适应学习机理

实现生物智能与人工智能的有机融合需要研究生物智能与人工智能之间稳定、高效的接口方法、生物智能端的功能重塑和增强方法、人工智能端的智能增强方法以及生物智能和人工智能两种智能形式的有机融合模型等。人、机器以及外部环境都处于动态变化之中,机器必须具备学习能力以适应人的变化,人对机器与外部的变化具有可塑性,通过互适应学习促进人与机器相互适应对方的变化,因此,研究互适应学习机理是实现人机协同的关键。

### 1.3 人机智能协同系统智能行为的实现策略

实现人机智能系统高效、自然的交互研发及应用是研究人机智能协同工作的目标。为此,需要研究智能控制策略和方法,构建人机智能协同系统的应用技术平台与典型示范,研究人工智能和生物智能协同系统的整合结构,探索人机智能协同系统与环境交互的模式等问题。

## 2 人机智能协同的主要研究内容

传统的与智能相关的研究主要是面向“单一的智能形式”开展相关理论和技术研究工作<sup>[10]</sup>,例如,单纯的面向人工智能技术或单纯的面向生物智能的认知神经机理等基础问题开展研究,或者单纯的面向如何通过人工智能方法增强智能系统的性能开展研究等。与传统的与智能相关的研究不同,人机智能协同旨在结合脑的认知能力与计算机的计算能力,即将生物智能与机器智能紧密结合。围绕上述3个关键科学问题,人工智能协同的研究主要包括以下3个方向。

### 2.1 人机交互信息的获取与计算技术

人机智能协同首先需要在人与机之间建立信息通道,主要包括人-机信息交互、人-人信息交互及机-机信息交互等。人机智能协同的信息交互可以通过感知觉信息、运动通道和互联网技术来实现<sup>[11-13]</sup>。探索感知觉信息和运动信息的获取、传输、分析、计算、存储和挖掘方法,对其进行高效、动态、准确的解码分析,将为人工智能的增强、生物智能增强以及两者智能形式的融合研究提供可靠、准确和全面的信息数据,是人机融合与协同控制研究的基础<sup>[14-15]</sup>。

人机交互信息的获取与计算的研究重点包括3个部分。1)感知觉信息分析、理解与智能识别:人及智能协同将主要涉及到视觉、听觉、触觉等信息的感知、理解与交互。2)运动信息获取、分析与识别:人机智能协同系统的运动相关物理信息主要包括姿势、姿态等信息。利用3D视觉技术,研究快速三维实物数字化的实现方法,开展手势识别、体感交互、姿态分析等多通道融合交互方法的研究。3)多模人机交互信息的融合方法与认知机制:针对人机智能协同系统涉及多模信息处理的特点,研究多模感知觉和运动信息的整合机制,建立信息融合体系。

人机交互信息的获取与计算涉及多种关键技术。例如在高性能的传感技术中,触觉信息的获取需要能够测量物体相互间接触或者相互滑动的触觉滑觉传感器或压力传感器,运动信息的获取需要能够记录运动物体影像的光学摄像机等。在信息的分析与处理技术中,智能人脸识别技术将图像的特征提取与神经网络等智能算法相融合,步态分析技术将生物特征识别、模式识别和运动学相结合等<sup>[16-21]</sup>。人机交互信息的获取与计算技术涉及的技术范围广,其关键技术前沿性鲜明,在我国有着广阔的应用前景,也是实现人机智能协同系统的基础和关键。

### 2.2 生物智能和人工智能的增强与融合

针对“生物智能与人工智能的协同及互适应学习机理”这一关键科学问题,开展人工智能端的智能增强方

法、人机融合系统的反馈训练机制和自适应机器学习算法研究,使机器能够实时与人交互并自动学习;研究感知觉及运动功能增强的生物机制,建立感知觉-感知觉神经信息、运动功能-运动神经信息之间的对应关系;生物智能和人工智能两种智能形式的有机融合模型等。其中的重点包括3个部分。1)面向人脑信息编解码的机器学习方法:利用感知认知机制和大脑处理信息生理机理的研究成果,建立人脑信号统计解析模型;借鉴人类认知方法,探索适合智能系统的高效记忆机制,建立类人记忆的体系结构。2)感知觉和运动功能增强与互适应学习机制:利用虚拟现实技术,设计个性化的训练任务、刺激方式和神经信息反馈模式,诱发神经功能的适应性改变,实现感知觉和运动神经功能的进一步增强,设计自适应机器学习算法,建立具有自适应功能的运动信息解码模型。利用目标神经功能重建方法,建立缺失运动神经信号源重建的生物模型,在此基础上探讨运动神经功能的生物重建与增强机理。3)人机智能整合的计算模型与体系结构:探索层次化的计算模型,研究意图与目标层、决策与任务规划层、感知与行为执行层的层内交互以及层间调用的人机智能整合体系结构与计算方法;探索人机协同的反馈控制模型与互调策略,将生物感知能力与机器计算能力融合集成,达到生物智能与机器智能的优势互补,为构建生物与机器混成的智能系统提供计算理论与体系结构。

生物智能和人工智能的增强与融合的关键技术包括感知觉与运动功能的生物重建和增强、人机介入交互机理和先进的智能控制方法。其中,感知觉与运动神经信息源增强与重建技术是一种全新的神经-机器接口技术,通过将缺失或受损的感知觉或运动功能对应的神经移植到人体的某块替代肌肉或神经生长区域(“目标替代区域”)来实现缺失功能信号源的重建。通过对“目标替代区域”产生的运动神经信号进行采集和分析,可以预测患者想要执行的肢体动作,通过向目标区域传递外周感知觉信息,可以使患者的重新恢复缺失的感知觉功能<sup>[22-24]</sup>。运动神经功能重建技术在多功能神经假肢控制中得了初步的成功,并得到了国际学术界的极大关注<sup>[25]</sup>。

### 2.3 人机交互智能控制与人机融合系统

研究人机智能协同的控制方法与智能交互技术,研发面向人机智能协同的服务、交互及康复验证平台与应用系统。学习人的控制策略就是将人的自身经验与学习过程的行为进行建模,并应用于复杂的系统控制中以期达到良好的控制效果。通过对仿生学的研究并应用于控制技术中,能够对该类学习型控制器进行较为全面的分析,开辟一个控制设计的新思路。研究人机协同安全控制机制与方法,分析手术机器人不同区域的工作特性,研究自适应人-机协同柔顺控制方法。在上述理论和技

术研究研究成果的基础上,创建人机融合及协同控制系统和平台,验证人机智能系统的性能及应用。人机智能协同可以应用于以下几个智能系统中:面向人机智能协同的服务-智能外骨骼机器人;面向人机智能协同的交互-智能手术机器人与智能交互平台;面向人机智能协同的康复-运动功能康复系统。

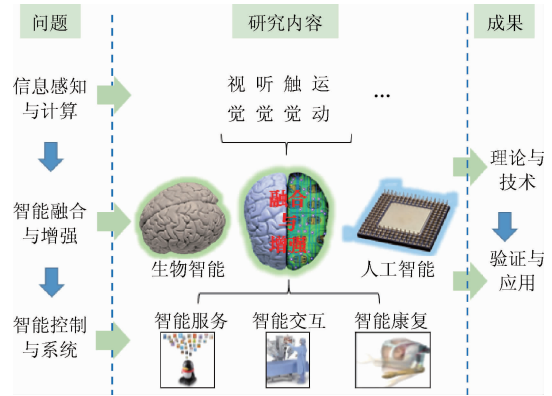


图1 研究方向与研究内容的关系

Fig. 1 Relationship between research directions and research contents

## 3 人机智能协同在医疗康复机器人领域的应用

目前,将人工智能和机器智能有机融合,通过人机接口技术实现多模生物和环境信息的感知和计算,建立信息整合与信息识别,实现人与机器的相互适应和协调控制,可以实现人与机器更加自然的、以人为中心的智能交互模式。基于人机协同的医疗康复机器人的一个重要特点是人与机器人共存环境中的人机交互。例如,在机器人参与的外科手术中,不论是在机器人的协助下由外科医生完成手术还是在外科医生的指导下由机器人完成手术,机器人与人之间的精准、互补的协同工作将使机器人最大限度的发挥其价值,保证手术的顺利完成。同样,功能康复和辅助机器人需要直接与患者接触,辅助患者实现功能的运动与补偿,服务机器人与使用者互动,实现人机交互的服务功能等。

人机智能协同的应用潜力已经开始展现,其在医疗康复机器人领域的应用,能突破现有的机器人技术壁垒,推动机器人的进一步发展。人机智能协同在服务机器人、手术机器人和康复机器人领域都有广泛的研究与应用。

### 3.1 人机智能协同应用于服务机器人

服务机器人需要与使用者进行互动完成人机交互的服务功能,借助人机智能协同技术,实现服务机器人由目前的简单机电一体化装备向生机电一体化和智能化等方面发展,进一步推动服务机器人自然、准确的人机交互能力<sup>[26-27]</sup>。

作为服务机器人一个非常重要的方向,人体外骨骼机器人目前是国际人机智能系统研究的热点之一。人体外骨骼机器人是一种可穿戴的人机一体化机械装置,它将人和机器人整合在一起,与传统的机器人根据程序执行命令不同,基于人机智能协同的外骨骼是人来控制,机器执行<sup>[28-30]</sup>。外骨骼机器人研究人与机器人系统的协同运动,主要研究内容包括基于运动理论的人体步态数据库的建立和分析<sup>[31-32]</sup>,根据人体生理结构和人体工程学设计紧凑的外骨骼结构,采用新型和柔性材料进行设计加工,在满足外骨骼行走需要的前提下,降低外骨骼整体重量并且增加外骨骼穿戴的便携性,实现外骨骼机器人整体的设计与优化。通过外骨骼传感系统,以足底压力传感器、关节角加速度传感器、腿部压力传感器等为主要判断手段精确判断机器人的当前步态,实现机器人对人体运动意图、运动趋势的智能判断,使外骨骼机器人与穿戴者进行协调与同步,从而实现穿戴者控制外骨骼机器人完成自然、平滑的步态和运动,这是人机智能协同作用的结果<sup>[33-35]</sup>。人机智能协同技术运用于下肢外骨骼的一个例子是基于表面肌电(electromyography, EMG)信号控制的下肢助力外骨骼系统。通过采集皮肤表面能够探查到大脑传出的微弱的肌肉运动信号,通过信号编解码原理判断出佩戴者的运动意图,进而控制外骨骼机器人模拟完成相应的动作。此外,外骨骼可以通过输入定量运动刺激,实现定量检测和评价手段,为佩戴者提供更为科学的康复训练、行走模式,并可为运动康复机理的研究提供平台。图2所示为中国科学院深圳先进技术研究院研制的一款下肢外骨骼机器人。该外骨骼用小型化的动力系统及欠驱动机械结构,具有8个自由度,其中4个自由度由电机通过滚珠丝杠驱动,采用基于力-位置的控制策略。通过传感器采集人体运动过程中关节的角度和角速度,能够较好地根据实际环境要求调整行走过程中的步态,并通过大量的临床穿戴行走试验,建立基于康复机理的科学步态规划,可用于下肢功能障碍患者的功能恢复。人体外骨骼机器人成不仅可以用于民用领域,还能用于军事领域。



图2 下肢外骨骼机器人

Fig. 2 Lower limb exoskeleton robot

### 3.2 人机智能协同应用于手术机器人

与传统手术系统相比,基于人机智能协同技术的手术机器人具备3个主要优势:1)突破了人眼的局限,借助内窥镜放大了手术视野<sup>[36]</sup>;2)突破了人手的局限,在人手不能到达的区域,机器手可以灵活穿行,且机械手上的稳定器可以防止人手的抖动现象<sup>[37]</sup>;3)手术创伤小。但手术机器人对手术的可靠实施,离不开精准、自然的人机交互。因此,研发基于人机智能协同技术的手术系统平台,是手术机器人能够在医疗外科手术规划与模拟、微创定位操作、无损诊疗等方面得以广泛的应用的的前提条件。

脊柱手术机器人属于专业性的骨科手术机器人,仍然需要通过外科医生的操纵才能协助医生完成手术,其手术范围涉及脊柱各关节段椎弓根螺钉固定、经寰枢关节螺钉固定等,手术精度和稳定性方面要求高,因此对人机自然、精准的交互有更高的要求<sup>[38]</sup>。脊柱手术机器人主要面向胸腰椎段的脊柱骨折、退行性病变等常见疾病,需要利用多重传感技术,多种功能模块的配合,以及人机智能协同技术,才能完成精细感知手术,并实现手术安全控制。如果没有医生与手术机器人之间的协同工作,就无法顺利操作手术机器人完成手术。由于大多外科手术精度要求高、难度大,因此,开发高安全、高精度、高稳定和易操作的脊柱手术机器人至关重要<sup>[39-40]</sup>。中科院深圳先进技术研究院研发的臂式脊柱手术辅助机器人(robotic spinal surgical system, RSSS)(见图3)能够完成个性化复杂手术操作,跟随和补偿呼吸的生理运动,具有精细介入感知、多模态实时监测和预警功能,配置手术模拟训练系统,通过配套手术规划和导航软件,可实现机器人辅助稳定性重建、减压手术和椎体成形术等。



图3 脊柱手术辅助机器人 RSSS

Fig. 3 Spinal surgery assistant robot RSSS

此外,人机智能协同技术可用于开发虚拟手术仿真系统。虚拟手术可用于实验教学及研究工作,相较于传统手术学习需要真实的手术载体,虚拟手术可以利用计算机技术来模拟、指导医学手术所涉及的过程,作为外科医生的训练器和手术规划工具<sup>[41-42]</sup>。



### 3.3 人机智能协同应用于康复机器人

康复机器人中人机智能协同的实现需要多源感知觉和运动信息等核心技术的发展,从而保证能够准确地感知、处理和分析相关的人机交互信息。康复机器人中的人机智能协同是通过双向反馈来实现的。以脑卒中后手部运动障碍患者的手部运动功能康复训练为例,传统的物理治疗需要治疗师一对一或者一对多的对患者进行人工的手部功能恢复训练,任务繁重且康复效果有限。而借助机器人进行的康复训练,一方面,患者可以在康复机器人的帮助下,对肢体的患侧进行准确的重复性的运动练习,从而加快运动功能的康复进程。另一方面,康复机器人还可以帮助病人实现镜像运动练习,即使用位置传感器、速度传感器和肌电信号对患者健侧的动作信息进行捕捉,然后通过电刺激等方式,驱动患侧进行相应的动作。这种方式可以激发患者对康复过程的参与度,加快运动中枢受损部分的再组织和重建<sup>[43]</sup>。因此,人们在基于工业机器人控制模式的传统康复机器人中引入肢体-机器互动功能,使患者能够主动参与到治疗过程中来,从而有利于提高康复治疗效果<sup>[44]</sup>。

基于虚拟现实的神经康复机器人系统是人机智能协同技术的又一应用。已有研究表明通过反馈训练可以有效的帮助中风等运动功能障碍患者恢复其运动功能。虚拟现实环境下的运动功能康复系统,可以在不使用物理辅助设备的情况下评估运动功能康复方案的实时操控性能,并且能够通过患者的控制效果给出患者康复情况的反馈提示<sup>[45]</sup>。该虚拟系统包括一套集成的图形用户界面,可以简化运动控制信号的数据获取、处理及实时操控过程。当多功能机器手臂产业化进入临床后,该平台将会成为康复医院机器手臂常规训练平台,为残疾提供机器手臂操作的学习与训练。

在多功能神经假肢控制方面,随着先进的信号处理技术及高性能微处理器的出现,通过体表肌电解码实现多功能假肢控制的思想成为可能<sup>[46]</sup>。以肌电信号解码得到的运动神经信息为基础,通过增加非肌电信号作为辅助控制信息(例如语音信息等),增加假肢可操控自由度的数量,提高假肢操控的灵活性,扩大多功能假肢对于高位截肢者的实用性。通过目标肌肉重建技术,将缺失或受损的感知觉或运动功能对应的神经移植到人体的某块替代肌肉或神经生长区域(“目标替代区域”)来实现缺失功能信号源的重建。通过对“目标替代区域”产生的运动神经信号进行采集和分析,预测患者想要执行的肢体动作,通过向目标区域传递外周感知觉信息,使患者重新恢复缺失的感知觉功能<sup>[47]</sup>。前述主动型康复就是利用了生物反馈的技术原理,通过获取和检测患者主动参与产生的肌电、脑电、多自由度压力等生物传感信息,分析患者的使用意图,然后控制机器人实现相应的动作,如图 4 所示。

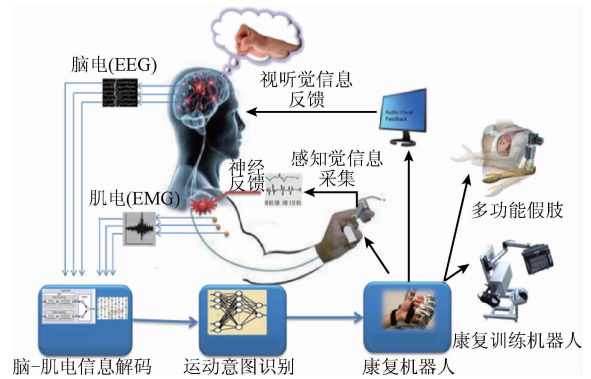


图 4 具有控制和感觉反馈功能的智能康复机器人系统示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the intelligent rehabilitation robot system with control and sensory feedback functions<sup>[4]</sup>

## 4 应用存在的问题与挑战

尽管人机智能协同技术在医疗康复机器人领域的应用广泛,但整体仍处于研发与试验阶段,很多关键问题需要进一步改进和完善。

### 4.1 安全性

人机智能协同技术首先要保证在使用医疗康复机器人过程中的人机交互是安全可靠的。大多数医疗康复机器人在使用时需要与使用者直接接触,因此,安全可靠的交互是医疗康复机器人使用的前提,这需要融合结构设计、过程控制和多源传感信息融合等关键技术的发展。比如基于软体材料的医疗康复机器人的研发、具有动作预判功能的机械臂的柔顺控制等。

### 4.2 精准性

手术和康复机器人作为康复治疗工具,控制的精准性是关键。目前仍存在因机器人手术控制不当而受伤的事件发生。此外,应设计并精确控制机器人,使之具备根据不同的手术类型和康复需求完成不同的手术方式和运动模式的功能,增强其适应性。英国国家医疗服务体系目前正在审查机器人辅助手术病例,以确定其究竟能适用于哪些科室的哪些手术。我国也应该加强这方面的研究。

### 4.3 可靠性

神经假肢能够替代或补偿缺失肢体的部分功能。目前,可通过解码 EMG 信号进行假肢动作的精确识别,从而直觉控制假肢的相应动作,但目前的假肢尚不具备直接的感觉神经反馈功能(触觉、滑觉和压力等)。现有的反馈方式大都是间接的或者可靠性较低,比如通过视觉反馈判断物体抓握情况,或使通过震动等方式刺激机体

完成反馈。因此,需要研究直接反馈方式-神经反馈,将假肢采集到的信息通过使用者的神经直接反馈给使用者,这也是人机智能交互的研究热点之一。

## 5 结 论

医疗康复机器人涉及人类生命健康的特殊领域,需要康复医学、生物力学、机械电子、计算机科学以及机器人学等诸多领域的支持。目前,我国在外科手术机器人及康复辅助机器人技术领域已经取得了一些进展和突破,但离临床应用尚有一定的差距。如何提高手术和康复机器人的性能,使它们在准确性、安全性及可靠性等方面进一步改善和增强,这需要一批关键零部件特别是机器人感知觉传感器件、电机减速器核心部件等的技术支持,更需要一系列核心技术特别是人机智能协同技术的支持。研发实用、可靠、安全的智能医疗康复机器人系统是下一步的研究方向。

## 参考文献

- [ 1 ] MUSIB M, WANG F, TARSELLI M A, et al. Artificial intelligence in research[J]. *Science*, 2017, 357(6346): 28-30.
- [ 2 ] PAN Y. Heading toward artificial intelligence 2.0[J]. *Engineering*, 2016, 2(4):409-413.
- [ 3 ] RAEDT L D, KERSTING K, NATARAJAN S, et al. Statistical relational artificial intelligence: Logic, probability, and computation[J]. 2016, 10(2):189.
- [ 4 ] GHAHRAMANI Z. Probabilistic machine learning and artificial intelligence[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 452.
- [ 5 ] 李光林, 郑悦, 吴新宇, 等. 医疗康复机器人的研究进展及趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2015(6):793-802.  
LI G L, ZHENG Y, WU X Y. Research progress and trend of medical rehabilitation robot[J]. *CAS Bulletin*, 2015(6):793-802.
- [ 6 ] SONG A, WU C, NI D, et al. One-therapist to three-patient telerehabilitation robot system for the upper limb after stroke[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2016, 8(2):319-329.
- [ 7 ] TANG X, LIU K, CUI J, et al. IntentSearch: Capturing user intention for one-click internet image search[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2012, 34(7):1342-1353.
- [ 8 ] GONG B, LIU J, WANG X, et al. Learning semantic signatures for 3D object retrieval[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(2):369-377.
- [ 9 ] BOUTERAA Y, ABDALLAH I B. Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation[C]. *IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 2016:1-6.
- [ 10 ] BULGER N J. The evolving role of intelligence: Migrating from traditional competitive intelligence to integrated intelligence [J]. *International Journal of Intelligence Security & Public Affairs*, 2016, 18(1): 57-84.
- [ 11 ] ZHANG L, HU Y, ZHANG J, et al. Multiview geometry in traditional vision and omnidirectional vision under the  $l_{\infty}$ -norm[J]. *IET Computer Vision*, 2011, 6(1):13-20.
- [ 12 ] KUMAR D, BEZDEK J C, RAJASEGARAR S, et al. A visual-numeric approach to clustering and anomaly detection for trajectory data[J]. *Visual Computer*, 2017, 33(3):265-281.
- [ 13 ] YE W, LI Z, YANG C, et al. Motion detection enhanced control of an upper limb exoskeleton robot for rehabilitation training [J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2017, 14(1):1650031.
- [ 14 ] BUCHHOLZ D, FUTTERLIEB M, WINKELBACH S, et al. Efficient bin-picking and grasp planning based on depth data [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013:3245-3250.
- [ 15 ] RASPOPOVIC S, CAPOGROSSO M, PETRINI F M, et al. Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses [J]. *Science Translational Medicine*, 2014, 6(222):222ra19.
- [ 16 ] CAMPAGNER D, EVANS M H, BALE M R, et al. Prediction of primary somatosensory neuron activity during active tactile exploration[J]. *Elife*, 2016, doi:10.7554/eLife.10696.
- [ 17 ] LIU W, TAO D, CHENG J, et al. Multiview Hessian discriminative sparse coding for image annotation [J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2014, 118(1):50-60.
- [ 18 ] QIAO M, CHENG J, BIAN W, et al. Biview learning for human posture segmentation from 3D points cloud[J]. *Plos One*, 2014, 9(1):e85811.
- [ 19 ] CHENG J, BIAN W, TAO D. Locally regularized sliced inverse regression based 3D hand gesture recognition on a dance robot[J]. *Information Sciences*, 2013, 221(1): 274-283.
- [ 20 ] SONG AI G, ZENG H, YANG R H, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction[J]. *Instrumentation*, 2014(3):1-16.
- [ 21 ] PARKHI O M, VEDALDI A, ZISSERMAN A. Deep

- face recognition[C]. British Machine Vision Conference, 2015:1-12.
- [22] QIU S, WANG Z, ZHAO H, et al. Using distributed wearable sensors to measure and evaluate human lower limb motions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(4):939-950.
- [23] KUIKEN T A, LI G, LOCK B A, et al. Targeted muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms[J]. JAMA, 2009, 301(6):619.
- [24] LI G L, LI Y, YU L, et al. Conditioning and sampling issues of EMG signals in motion recognition of multifunctional myoelectric prostheses [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2011, 39(6):1779.
- [25] 方鹏, 李光林. 神经控制多功能假肢为截肢者带来希望[J]. 科技纵览, 2015(6):80-81.  
FANG P, LI G L. Neural control multifunction prosthetics bring hope for amputees[J]. IEEE Spectrum, 2015(6):80-81.
- [26] SONG AI G, ZENG H, YANG R H, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction[J]. Instrumentation, 2014,1(3):1-16.
- [27] AINOYA T, KASAMATSU K, SHIMIZU K, et al. Service robot development with design thinking [C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Berlin: Springer International Publishing, 2016:102-109.
- [28] TUCKER M R, OLIVIER J, PAGEL A, et al. Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: A review[J]. Journal of Neuroengineering & Rehabilitation, 2015, 12(1):1.
- [29] KEYROUZ F. Advanced binaural sound localization in 3-D for humanoid robots [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(9):2098-2107.
- [30] SONG AI G, PAN L, LI G X H. Adaptive motion control of arm rehabilitation robot based on impedance identification[J]. Robotica, 2015, 33(9):1795-1812.
- [31] MURRAY S A, HA K H, GOLDFARB M. An assistive controller for a lower-limb exoskeleton for rehabilitation after stroke, and preliminary assessment thereof [J]. Engineering in Medicine & Biology Society, 2014:4083-4086.
- [32] SOLVANG B, SZIEBIG G, KORONDI P. Shop\_floor architecture for effective human-machine and inter-machine interaction[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2013, 9(1):183-201.
- [33] WANG S, WANG L, MEIJNEKE C, et al. Design and control of the MINDWALKER exoskeleton [J]. IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2015, 23(2):277.
- [34] HU Y, ZHANG J, WAN Z, et al. Design and analysis of a 6-DOF mobile parallel robot with 3 limbs[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25(12):3215-3222.
- [35] COLLINS S H, WIGGIN M B, SAWICKI G S. Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton[J]. Nature, 2015, 522(7555):212-5.
- [36] JIN H, HU Y, TIAN W, et al. Kinematics and cooperative control of a robotic spinal surgery system[J]. Robotica, 2016, 34(1):226-242.
- [37] LI B, CHEN Y, et al. Modeling and representation of a computer-aided conceptual design system[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2012, 26(11):3515-3524.
- [38] HU Y, JIN H, ZHANG L, et al. State recognition of pedicle drilling with force sensing in a robotic spinal surgical system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(1):357-365.
- [39] JIN H, HU Y, LUO H, et al. Intraoperative state recognition of a bone-drilling system with image-force fusion [C]. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2012:275-280.
- [40] CHEN M, ZHANG X, CHEN X, et al. FastICA peel-off for ECG interference removal from surface EMG [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 15(3):1-11.
- [41] GROSU V, RODRIGUEZ G C, BRACKX B, et al. Instrumenting complex exoskeletons for improved human-robot interaction [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2015, 18(5):5-10.
- [42] ANTONY A K, CHEN W F, KOLOKYTHAS A, et al. Use of virtual surgery and stereolithography-guided osteotomy for mandibular reconstruction with the free fibula [J]. Plastic & Reconstructive Surgery, 2011, 128(5):1080-1084.
- [43] SHANECHI M M, HU R C, WILLIAMS Z M. A cortical-spinal prosthesis for targeted limb movement in paralysed primate avatars[J]. Nature Communications, 2014, 5(5):3237.
- [44] PERRY J C, ROSEN J, BURNS S. Upper-limb powered

exoskeleton design [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(4):408-417.

- [45] LI B, CHEN Y, ZHANG J, et al. Modeling and representation of a computer-aided conceptual design system [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2012, 26(11):3515-3524.
- [46] LI G, LI Y, ZHANG Z, et al. Selection of sampling rate for EMG pattern recognition based prosthesis control [C]. International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 2010:5058-5061.
- [47] HE H, PING Z, LI G, et al. Spatial filtering improves EMG classification accuracy following targeted muscle reinnervation [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2009, 37(9):1849-1857.

### 作者简介



**郑悦**, 2011 年于河北科技大学获得学士学位, 2012 年于布里斯托大学获得硕士学位, 现为中国科学院深圳先进技术研究院工程师, 主要研究方向为康复机器人相关的机械、电子设计。

E-mail: yue.zheng@siat.ac.cn

**Zheng Yue** received her B.Sc. degree from Hebei University of Science & Technology in 2011 and M.Sc. degree from University

of Bristol in 2012, UK. Now, she is an engineer in Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS). Her main research interest includes mechatronics design relating to rehabilitation robotics.



**李光林**(通讯作者), 分别在 1983 年和 1987 年于山东大学分别获得学士学位和硕士学位, 1997 年于浙江大学获得博士学位, 现为中科院深圳先进技术研究院研究员、中科院人机智能协同系统重点实验室主任, 主要研究方向为神经康复工程、人机智能协同、生物医学工程等领域的研究工作。

E-mail: gl.li@siat.ac.cn

**Li Guanglin** (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Shandong University in 1983 and 1987, respectively, and received Ph.D. degree from Zhejiang University in 1997. Now, he is a research fellow in Shenzhen Institutes of Advanced Technology (SIAT), Chinese Academy of Sciences (CAS), and the director of the Key Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, CAS. His main research interest includes neural rehabilitation engineering, human-machine intelligence synergy and biomedical engineering, etc.