医疗康复机器人研究进展及趋势*

文 / 李光林[1,2] 郑悦[1,2] 吴新宇[1,3] 胡颖[1,3] 方鹏[1,2] 熊璟[1,2] 夏泽洋[1,2] 王灿[1,3]
1 中国科学院人机智能协同系统重点实验室 深圳 518055
2 中国科学院深圳先进技术研究院生物医学与健康工程研究所 深圳 518055
3 中国科学院深圳先进技术研究院先进集成技术研究所 深圳 518055

【摘 要】随着人们对医疗健康手段和过程提出的精准、微创、高效及低成本等方面的更高需求，医疗康复机器人技术也获得了各国的极大关注，并得到了日新月异的发展。目前医疗康复机器人主要用于外科手术、功能康复及辅助护理等方面，但随着重要技术的突破和进展，未来机器人技术有可能会应用到医疗健康的各个领域。医疗康复领域越来越倾向于人与机器自然、精准的交互，近年来，以人的智能和机器智能结合及人机交互为代表的技术突破使得人与机器之间的结合越来越紧密，借助人机交互技术和方法，将人的智能和机器智能结合起来，使二者优势互补、协同工作，并将在医疗康复方面孕育出重大的理论创新和技术方法突破。社会需求、技术革新和人机智能融合极大的促进了医疗康复机器人的发展。医疗康复机器人涉及人类生命健康的特殊领域，存在潜在的经济市场，已被多个国家列为战略性新兴产业，我国也需进一步大力开展医疗康复机器人的研发，推动该战略新兴产业的发展，以应对我国国民对健康服务的需求（医疗、康复及老龄化）。

【关键词】 医疗机器人，康复机器人，人机交互，人机智能融合

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.06.013

随着智能控制和人工智能技术的不断发展和进步，智能机器人正在成为工业制造、医疗健康、家庭与社会服务、国防及空间等领域发展的重要支撑技术[1]。目前，在医疗健康领域，智能机器人技术和系统已经应用于医疗手术与功能康复等多个方面。将

* 基金项目：国家重点基础研究发展计划“973”计划（2013CB329505），国家自然科学基金重点项目（61135004），深圳市知识创新计划项目（JCYJ20130402113127532）
修改稿收到日期：2015 年 10 月 20 日

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机器人应用于外科手术中，不仅可以极大提高手术的精准度、减少手术创伤和副作用，还能加快手术后的恢复并降低手术成本。如今医疗机器人已经广泛应用于脑神经、前列腺、心脏病、脊柱及微创介入等外科手术中，取得了非常好的手术效果。机器人在功能康复与辅助方面的应用也得到了国际学术界、工业界及临床康复界的广泛关注，成功研发了一系列的功能康复机器人系统、智能假肢及外骨骼机器辅助系统，来帮助功能残疾和障碍患者恢复或补偿丧失的肢体运动功能。

1 医疗康复机器人研究进展

半个多世纪以来，当工业机器人技术日趋成熟并成为机器人应用市场主流的时候，医疗健康机器人技术也得到了各国的极大关注，并得到了日新月异的发展，以满足人们对医疗健康手段和过程提出的精准、微创、高效及低成本等方面的更高需求，同时应对人口老龄化及对医疗资源需求的增长。虽然机器人技术有可能会应用到医疗健康的诸多领域，但目前还主要用于外科手术、功能康复及辅助护理等方面。如今一些医疗康复机器人，例如微创外科手术机器人、脊柱手术机器人、血管介入机器人、肢体功能康复机器人、智能假肢、外骨骼辅助机器人等，已经开始应用于临床或具备了临床应用的技术条件和基础。

1.1 医疗手术机器人

自20多年前首次报道机器人技术用于外科手术以来，医疗手术机器人已经被广泛应用于外科手术和介入手术过程中。据统计在过去几年中，发达国家的医疗手术机器人应用数量年增长率为40%以上。医疗手术机器人最初主要应用于心胸外科、妇科、泌尿科等手术中，最近医疗手术机器人也开始广泛应用于整形外科、脑神经外科以及普通外科等手术，取得了令人满意的手术效果[1]。统计表明，在外科手术中使用机器人能够减少80%的并发症，可极大地缩短患者的住院治疗时间，从而使患者能更快地恢复其劳动力和正常生活。

目前，外科手术机器人在外科医生的操控下协助完成手术过程。通常情况下，外科医生利用一个远程手术场景，操纵一个主输入装置根据手术要求发出手术操作指令，置于病人床边的手术机器人接收到手术指令后，按照外科医生输入的命令执行相应的手术操作。相比传统的微创手术，外科手术机器人可以让外科医生提高体内操作灵巧性,超越人类手术动作距离的局限，实现更微小的手术动作，完成更精准的手术操作。外科手术机器人的杰出代表之一是美国直觉外科公司（ISRG）设计制造的达芬奇手术机器人（da Vinci®）。达芬奇手术机器人不仅拥有三维高清晰度视觉系统，还拥有能完成精细运动和组织操作的机械腕装置，其弯曲和旋转的程度远远超出人类的手腕，因此，它能提供灵巧操控、精准定位以及术前手术规划，从而极大减少患者手术创口、加速手术后的恢复，实现精准、微创的外科手术。目前，达芬奇手术机器人是世界范围应用广泛的一种智能化手术平台，适合普外科、泌尿外科、心血管外科、胸外科、妇科、五官科和小儿外科等微创手术。在世界范围内，达芬奇手术机器人已经累计销售3 000多台，为超过250万患者成功实施微创手术。由于价格等原因，达芬奇手术机器人在我国的拥有数（二三十台）和使用率还都非常低。为此，我国相关研究机构和医院积极合作，开展外科手术机器人的研发工作，在手术机器人技术和系统等方面取得了一些重要突破。例如，针对腹部手术的机器人辅助手术系统；具有自主控制、视觉定位和远程互动的神经微创外科机器人辅助手术系统；胸腹外科机器人；影像引导的经自然腔道介入仿生型放疗机器人、血管介入机器人、经皮穿刺腹腔介入机器人等研究工作。此外，我国一些科研单位还相继开展了面向脊柱外科手术的机器人系统研究，取得了一些重要技术的突破和进展，一些脊柱手术辅助机器人系统完成了动物实验。需要指出的是，国外手术机器人系统已经成功应用于临床外科手术，而我国大部分外科手术机器

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

人系统还处在研发阶段或动物试验验证阶段，距离临床外科手术实际应用还有不小的距离，有待进一步的发展。

1.2 功能康复与辅助机器人

近年来，随着生机电交互、智能控制及机器人等技术的不断发展，功能康复与辅助机器人在国际上已经逐步成为临床康复治疗的重要技术手段之一，并催生了一批新型康复机器人技术及系统。

针对因脑卒中等疾病造成的肢体运动功能障碍患者，除了传统的由物理治疗师来进行的肢体训练外，康复机器人技术也已经应用到康复治疗中。诸多临床试验表明，康复机器人能一定程度上帮助长期瘫痪的中风患者恢复自身主动控制肢体的能力[2,3]。患者可以在康复机器人的帮助下，对肢体的患侧进行准确重复性的运动练习，从而加快运动功能的康复进程。根据脑神经可塑性理论，脑功能重组的恢复训练应该强调患者的主观参与，按照科学的运动学习方法对患者进行再教育以恢复其运动功能，患者积极参与到功能恢复训练中，能够获得更好的恢复效果。为此，人们开始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-机器人互动功能，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。美国麻省理工学院研制了上肢康复机器人系统（MIT-MANUS）[4]。利用一系列视频游戏，MIT-MANUS 可以实现脑中风患者手臂肩关节及肘关节功能康复。随后，他们又进一步扩展MIT-MANUS 的功能，开发了不同版本的上肢康复机器人系统，例如：三自由度的腕关节康复机器人[5]及手部功能康复机器人[6]。下肢功能康复机器人的典型产品是由瑞士医疗器械公司与瑞士苏黎世大学合作推出的洛克马（LOKOMAT）。它是第一台通过外骨骼式下肢步态矫正驱动装置辅助，用于有步态障碍的神经科病人进行步态训练，例如：脑卒中、脊髓损伤、脑外伤等。另外，美国姆特瑞卡（Motorika）公司研制的下肢康复机器人系统（REO）可通过大量重复性训练，诱导患者形成正确步态。需要指出的是，这些肢体功能康复机器人系统在临床应用中取得了一定的效果，但存在操作复杂、价格昂贵、缺乏主动康复功能等问题，因此，这些康复机器人在我国的临床康复中应用比较少。我国一些科研机构与大学也相继开展了肢体康复机器人的研发，取得了一些技术上的突破。随后，我国一些康复企业也开始关注肢体康复机器人的研发，推出了一些康复机器人系统，例如，广州一康医疗设备实业有限公司与上海璟和机器人公司分别研发了多种下肢康复机器人系统，并应用于临床。但这些康复机器人系统主要采用被动康复模式，康复效果有限。

为截肢患者安装假肢是帮助其恢复肢体功能的主要手段。利用肌电信号与肢体动作的直接关联关系，早在1959年，德国科学家Reihold就研制了世界上第一只肌电控制的假手。随后，经过几十年的努力与技术积累，德国奥托博克（OttoBock）公司和奥地利助听器公司（Viennatone）合作研发出第一代肌电假肢系统。目前，从残存肢体表面记录的肌电信号（electromyogram, EMG）已被广泛应用于人工肢体的控制中。目前的肌电假肢利用一对残留肌肉（主缩肌与拮抗肌）控制一个动作自由度。肢体截肢后，肌电信息源是有限的，截肢的程度越高，残留的肢体肌肉越少，而需要恢复的肢体动作越多，因此传统的肌电控制方式很难实现假肢的多自由度控制及直觉操控[7,8]。为了提高多功能假肢的性能，人们从假肢本体设计和控制策略两个方面研发多自由度智能假肢系统。世界上已有多家假肢与机器人公司

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

开发了多功能的机电一体化人工肢体或部件，例如，英国接触仿生（Touch Bionics）公司的仿生手（i-LIMB）有5个可以独立控制的手指。遗憾的是，由于截肢后可用于假肢控制的肌电信息源有限、传统肌电假肢控制方法的局限以及假肢系统价格的昂贵，目前这些先进的多功能人工肢体还很难得到广泛的临床应用。在假肢控制策略方面，随着先进的信号处理技术和高性能微处理器的发展，一些先进的假肢控制方法得以实现。当截肢者通过“动作想象”做肢体动作时，大脑产生的运动神经信号使残存肌肉收缩产生肌电信号。用模式识别的方法解码该肌电信号，可以得到截肢者想要做的肢体动作类型，控制系统便可驱动假肢完成相应的动作。利用这种控制方法，假肢使用者可以自然而直接地选择并完成他们想要做的不同肢体动作。研究表明，针对前臂截肢的情况，该方法对于10个不同手臂动作的识别精度高达90%以上[8]。利用这种基于肌电模式识别的假肢控制方法，我国研发了3自由度的机器人前臂，实现了前臂假肢的自然控制。

辅助外骨骼机器人是一种可穿戴的人机一体化机械装置，是机器人与康复医学工程交叉领域的研究成果，它将人和机器人整合在一起，利用人来指挥、控制机器人，通过机器人来实现辅助患者正常站立行走功能。外骨骼机器人的应用使得丧失行走能力或有行走障碍的患者能重新正常站立、行走。这极大地改善了患者的血管神经调节功能，防止因久坐引起的肌肉萎缩、痤疮等，还能防止下肢关节挛缩，减轻骨质疏松，促进血液循环等。近几年，国内外外骨骼机器人研究取得令人瞩目的发展，部分外骨骼机器人已经开始进入实际应用阶段。日本筑波大学Cybernics实验室研制了系列穿戴型助力机器人系统（HAL）[9,10]，帮助老年人和下肢残障者完成正常步行运动。以色列埃尔格医学技术（Argo Medical Technologies）公司研究了一套下肢助动外骨骼（ReWalk），它由电动腿部支架、身体感应器和一个背包组成，并需要一副拐杖帮助维持身体平衡，它可帮助下身麻痹患者站立、行走和爬楼梯[11,12]。与此同时，我国一些科研机构与大学也相继开展了辅助外骨骼机器人的研发工作，取得了一些技术上的突破[13,14]。

2 医疗康复机器人发展趋势

2.1 社会需求驱动医疗康复机器人的发展

随着社会和经济的不断进步和发展，人们对高水平医疗健康的需求也在不断增加，期待着精准、微创、高效及低成本的医疗手段和过程，正是这样的社会需求驱动了手术机器人的快速发展。手术机器人可以极大提高手术的精准度、减少手术创伤和副作用，能加快手术后的恢复、降低患者的手术成本；同时，手术机器人系统还可以作为外科实习医生更加有效的训练手段，从而降低医疗手术失误的数量等。手术机器人所带来的这些对手术的改善可以极大降低手术风险及手术成本，从而降低手术的社会成本（家庭、雇主及健康保险）。残疾人是世界上最大的少数群体。根据世界卫生组织（WHO）的统计数据，大约有10%的世界人口即6.5亿人身体存在不同残疾。长期以来，疾病、工伤、自然灾害、交通事故、意外伤害及战争造成成百万截肢患者，残疾人的数量随着人口的增长、医疗水平的提高以及老龄化在持续增长。在预期寿命超过70岁的国家中，平均每人有8年，大约11.5%的生命是在残疾中度过的。截至2010年末我国各类残疾人的总数为8 502万，约占全国总人口数的6.2%，其中肢体残疾人2 472万，占总残疾人数量的29.07%，在所有残疾种类中所占比重最大（图1）。目前，世界上许多国家（包括中国）已进入老龄化社会，人口老龄化带来的社会服务问题（医疗、康复与护理）对经济和社会发展产生了巨大的压力。随着残疾人和老年人口不断增加，依靠科技创新来保障和改善他们的健康已经成为当前许多国家的战略需求。研究和开发先进的功能康复机器人，实现功能障碍或缺失患者功能补偿与功能重建，对推动关乎我国重大民生问题的老年健康服务与助残公益事业发展具有十分

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重要的社会意义。

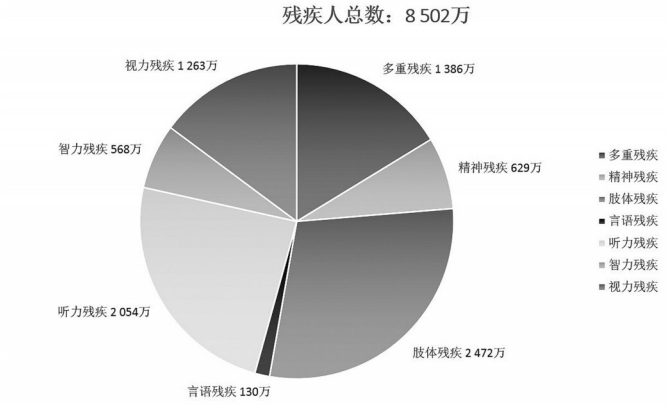

图1 我国各类残疾人数(截至2010年末)

2.2 技术推动医疗康复机器人的发展

随着医学、机器人学、计算机科学等多学科领域的交叉技术的发展，手术机器人在操作准确性、可靠性、工作空间及对肌体的损伤小等方面的优势，成为世界各国外科手术治疗的研究热点和重点发展方向。目前，为了提高手术机器人的性能、安全性及扩展其应用领域，外科手术/介入机器人的主要技术发展方向在于基于图像引导的术前精确手术规划、术中精准手术导航与手术实施等。由于人体不同部位外科手术的实施环境和条件不同，不同的外科手术机器人具有特定的技术发展需求。例如，脊柱外科手术机器人需要突破的主要技术难点有：(1)脊柱手术机器人手术操作精细感知方法。脊柱手术中穿透内层骨皮质将对患者造成巨大危害。现有感知机制只能识别是否穿透骨皮质，无法实现预警，为此需要开展基于力、声、图像等信息的手术状态精细感知方法研究。(2)脊柱手术机器人手术操作中的安全预警。人体脊柱内有着复杂的中枢神经系统，如何使机器人在术中对脊椎神经不造成损害至关重要，因此开展安全控制和预警技术是临床应用最关键的核心问题。介入技术是实现手术机器人微创精准治疗的重要手段之一。手术机器人介入将在医学影像的引导下，将特制的导管、导丝、穿刺针等精密医疗器械引入人体并对体内病态进行诊断和局部治疗，具有创伤小、效果好等特点，可以避免外科手术的痛苦，为许多以往临床上难以治疗的疾病开辟了新的有效治疗途径。研发影像引导的机器人辅助介入技术，可以使介入治疗更为精确、灵巧与安全，是解决传统介入治疗中稳定性和准确性不足等诸多问题的重要途径。

目前，利用神经工程、信息解码及智能控制工程等学科的最新理论与技术，研究神经系统损伤或丧失后运动功能康复的科学与技术问题，进而研发先进的运动功能康复机器人系统，已成为国内外康复工程和机器人领域的一个研究热点，以应对和满足肢体残疾和障碍患者日益增长的对运动功能康复或增强的迫切需求。针对目前肌电假肢系统存在的功能简单、使用困难、非直觉控制及缺乏感觉反馈功能等问题，研究和开发先进的假肢及假肢控制策略，改善和提高假肢的操控性能，为截肢者提供高性能、智能化、多功能的假肢系统是国内外康复机器人研究的重点方向之一。对于高位截肢者，肢体残留肌肉有限或完全丧失，不能为多功能假肢提供足够肌电控制信息，为此，人们提出了利用神经机器接口技术获取更多的假肢控制信息，其中最有效的技术之一是肢体运动神经分布重建技术。神经功能重建是将残留的臂丛神经移植到人体肌肉(称之为靶点肌肉)或吻合到替代神经来实现缺失运动功能信号源的重建。对于肩部截肢者，将

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

残留臂丛神经移植到胸部肌肉，经过数月的生长，臂丛神经便会在胸部肌肉内重建。当截肢者通过“意识”做幻影手臂的某一动作时，运动指令会通过臂丛神经传递至胸部肌肉并引起胸部肌肉收缩。采集胸部肌肉的表面肌电信号并解码分析，就可预测截肢者的手臂运动意图，实现对多自由度假肢的神经控制[15]。通过运动神经重建技术研究，可以为多功能神经假肢提供附加神经控制信息，有望实现多功能假肢的直觉控制。外骨骼机器人与穿戴者有着紧密的联系，机器人必须准确、快速地判断穿戴者的运动意图并做出决策。传统的力反馈、位置跟踪等基于物理信号的控制策略具有信号易获取、可控、鲁棒性好等优点。但由于其具有明显的时滞性、传感数量多等缺点，以及穿戴者是运动障碍患者，单纯依靠力、位置等物理信号较难以实现自由行走等功能，因此需要能更加准确、快速地判断穿戴者运动意图的新方法。脑电、肌电等生物信号由于能快速反应人的意图，近年来成为人机交互领域研究的热点。但也存在信号微弱、信噪比低等问题，使得基于单一生物信号的运动意图识别精确度较低。因此，通过将脑电、肌电等生物信号与力、位置等物理反馈信号融合，有望提高运动意图识别的精度，实现外骨骼机器人行为的自然操控。

2.3 人机智能融合促进智能医疗康复机器人的发展

医疗康复机器人应用中的一个重要特点是机器人与人共存环境中的人机交互。在机器人参与的外科手术中，不论是机器人协助外科医生完成手术，还是在医生的指导下机器人完成手术，机器人与人之间的精准互动和协同将是确保机器人在手术中最大限度发挥其价值的重要保障。例如，为了确保机器人辅助手术操作的安全性，希望机器人可以模仿医生手感对手术状态进行实时感知，并将术中的感知信号实时反馈给手术医生进行决策。因此，机器人术中人机智能交互成为新的研究热点。同样，功能康复与辅助机器人系统需要直接与患者接触和互动，来实现患者运动功能的恢复、补偿或辅助。例如，在多功能假肢机器系统应用中，假肢使用者直接将人工机器手臂穿戴在残肢上，并操控机器手臂完成各种日常动作，假肢使用者运动意图与机器手臂之间的运动和感觉功能协调统一是实现机器手臂自然、精确抓握物体的关键和保障。因此，借助人机融合系统实现人与医疗康复机器人之间的信息互动与交互控制，使人和机器有机地结合在一起，充分发挥各自的优势，将是医疗康复机器人发展的一个重要目标。

从物理层面来看，医疗康复机器人应用中的人机融合需要机器人系统和人体之间的自然、精准交互，而人机物理层面的融合目标是通过人机智能协同来实现的，即机器人系统的人工（机器）智能和人类大脑的生物智能之间的有机融合。人机融合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。人工智能与生物智能的融合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的突破[16]，从而推动智能机器人技术与系统的发展。因此，如何通过机器智能与生物智能的融合实现机器人与人的自然、精准交互，目前已经成为智能机器人研究的一个热点。

医疗康复机器人应用中人机智能融合的实现需要传感、感知及运动等机器人领域核心技术的进步，从而保证能准确地感知、处理和分析各种人机交互信息。人机交互主要涉及的信息有感知觉信息（如接触、握紧、滑动、脱离及力等）及视听觉信息等。基于各种人机交互信息的处理和分析，医疗康复机器人的人机交互是通过双向反馈来实现的。以脑卒中后瘫痪患者手部运动功能康复训练为例，他们需要借助机器人手进行康复训练。根据脑神经可塑性理论，患者主动参与康复训练可以得到更好的康复效果。为此，康复机器人系统需要具有人机智能互动功能，以实现患者与机

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

器人的自然交互，提高康复训练的效果。目前的运动功能康复机器人不具备直觉的触觉神经反馈功能，患者只能依靠视觉反馈，判断待抓握物体的大小等感觉信息。为了实现感觉信息的神经反馈，智能康复机器人手需要实时地获取接触、握力、温度等感觉信息。然后，把这些信息通过适当的方式反馈给患者大脑，将患者的主观运动意识与客观获取的感觉信息融合，进行互适应控制（图2）。感觉信息神经反馈的可能方式有体表物理刺激、皮下电刺激、植入式外周神经刺激等，如何实现感觉信息的精确神经反馈仍然需要进一步的研究[17,18]。

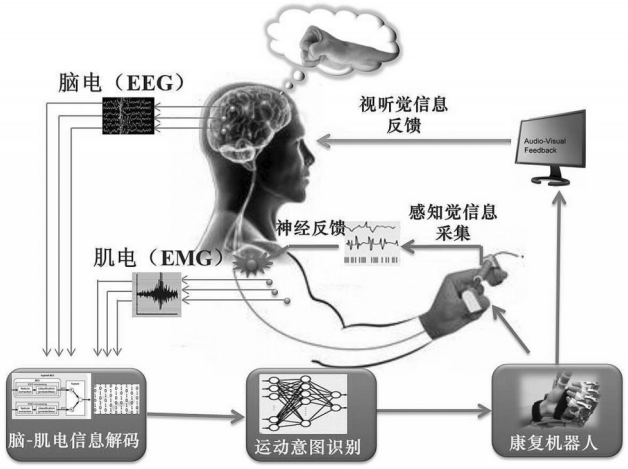

图2 具有控制和感觉反馈功能的智能康复机器人系统示意图

3 医疗康复机器人发展展望

医疗康复机器人涉及人类生命健康的特殊领域以及潜在的经济市场，已经被多个国家列为战略性新兴产业。例如，美国和欧洲先后发布机器人发展路线图[1]，都将医疗机器人列为优先发展方向。在美国机器人发展路线图中，医疗健康机器人被列为重点发展的5大类机器人领域之一，指出机器人系统将会应用于医疗健康所涉及的多个层面（从手术室到家居、从年轻人到老年人、从体弱/体残者到体健者、从常规手术到脱离人干涉的康复训练），以应对精准/微创手术、功能补偿与康复、老年服务等对医疗健康的新需求。欧洲机器人发展规划布局中明确指出，医疗机器人为医疗体系带来的变革堪比几十年前机器人技术对工业领域带来的影响，医疗康复机器人是应对人口老龄化、医疗资源需求增长的必然发展方向，医疗康复机器人产业将成为新世纪拉动国民经济增长的重要引擎之一。

相对于一些发达国家，我国目前提供健康服务的医疗机构和设施相对较少，特别是优质的医疗服务资源更加有限。一方面，我国许多医务工作者（特别是在大型综合医院）每天都要面对众多需要医疗服务的患者，工作量相当繁重；另一方面，有限的医疗服务资源也难以满足我国国民对健康服务日益增长的庞大需求及应对老龄化社会的到来。因而，将机器人技术融入到医疗事业可以有效缓解我国患者及残障人群的医疗服务压力、推动民生科技快速发展。随着我国经济和社会的发展，对于服务于人民医疗健康、服务于老龄化社会康复等方面的需求也越来越强烈，在国家及地方政府的大力支持下，我国医疗康复机器人技术及系统研究也取得了一些令人瞩目的成果。未来，基于在医疗康复机器人领域已经取得的技术基础，我国需要进一步大力开展外科手术和康复辅助机器人技术及系统的研发，推动医疗康复机器人战略性新兴产业的发展，以应对我国国民对健康服务的需求（医疗、康复及老龄化）。

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突破和进展，但这些机器人系统离临床应用还有

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一定的差距，手术和康复机器人系统的性能、安全性及可靠性等方面仍需进一步的改善与提高。为了提高我国手术和康复机器人系统的性能，需要重点突破一批核心关键技术，特别是在机器人机构学、动力学、环境适应技术等方面的研究，开发一批新型感知觉传感、电机、减速器等关键核心部件；在脑/肌电信号运动意图识别、多自由度灵巧/柔性操作、基于多模态信息的人机交互系统、感知觉神经反馈、非结构环境认知与导航规划、故障自诊断与自修复等关键技术方面实现突破，为智能医疗康复机器人系统的人机自然、精准交互提供共性支撑技术。另外，由于医疗康复机器人的应用环境是医院或家庭，因此机器人研发科学家和工程师应积极与临床外科手术及康复医师积极合作与配合，根据医疗手术和康复的真实临床需求，研发实用、可靠、安全、好用的智能医疗康复机器人系统。

参考文献

1 Georgia Institute of Technology, Carnegie Mellon University, et al. A roadmap for U.S. robotics from internet to robotics. 2013 Edition, 2013.

2 Gert K, Boudevijn K, Hermano IK. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review.Neurorehabilitation and Neural Repair, 2008, 22: 111-121.

3 Gerdienke P, Michile J A, Catherina G M, et al. Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke.Journal of Rehabilitation Research and Development, 2006, 43: 171-184.

4 Neville H, Nernano I K, Charnnarong J, et al. MIT-MANUS: A workstation for manual therapy and training I. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication RO-Man92, 1992: 161-165.

5 Krebs H I, Volpe B T, Williams D, et al. Robot-Aided Neurorehabilitation: A Robot for Wrist Rehabilitation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 54:847-853.

6 Krebs H I, Dipietro L, Levy-Tzedek S, et al. A paradigm shift for rehabilitation robotics. IEEE engineering in medicine and biology magazine, 2008, 27(4):66-70.

7 Hudgins B, Parker P, Scott R. A new strategy for multifunction myoelectric control. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1993,40(1):82-94.

8 Li G, Schultz A, Kuiken T. Quantifying pattern recognition based myoelectric control of multifunctional transradialprostheses. IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2010, 18(2):185-192.

9 Tsukahara A,Kawanishi R, Hasegawa Y, et al. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit HAL. Advanced Robot. 2010, 24:1615-1638.

10 Sankai Y. HAL: hybrid assistive limb based on cybernics, in: RoboticsResearch. Springer, 2011, 25-34.

11 Esquenazi A, Talaty M, Packel A, et al. M. The rewalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoraciclevel motor-complete spinal cord injury. American journal of physical medicine & rehabilitation, 2012, 91:911-921.

12 Zeilig G, Weingarden H, Zwecker M, et al. Safety and tolerance of the ReWalk™ exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study. The journal of spinal cord medicine, 2012, 35(2):96-101.

13 Wang M, Wu X, Liu D, et al. Human motion prediction algorithm for non-binding lower extremity exoskeleton. IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA), China, 2015, 369-374.

14 Yang C, Zhang J, Chen Y, et al. A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(8): 1599-1612.

15 Kuiken T, Li G, Lock B, et al. Targeted muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunctional artificial arms. Journal of the American Medicine Association, 2009, 301(6): 619-628.

16 Chouard, T.Special Issue on Turing 100. Nature, 2012, 482 (7386): 455-455.

17 Raspopovic S, Capogrosso M, Petrini F M, et al. Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Science Translational Medicine, 2014, 6(222):222ra19.
18 Tan D W, Schiefer M A, Keith M W, et al. A neural interface provides long-term stable natural touch perception. Science Translational Medicine, 2014, 6(257):257ra138.

State of the Art of Medical and Rehabilitation Robotics and Their Perspective

Li Guanglin[1,2] Zheng Yue[1,2] Wu Xinyu[1,3] Hu Ying[1,3] Fang Peng[1,2] Xiong Jing[1,2]
Xia Zeyang[1,2] Wang Can[1,3]

(1 Key Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems of Chinese Academy of Sciences(CAS), Shenzhen Institutes of Advanced Technology (SIAT), Shenzhen 518055, China;
2 Insititute of Biomedical and Health Engineering, SIAT, CAS, Shenzhen 518055, China;
3 Institute of Advanced Integration Technology, SIAT, CAS, Shenzhen 518055, China)

Abstract Currently, robots have been developed and used across the various areas such as manufacturing, services, healthcare/medical, defense, and space. While the manufacturing robotics have been widely accepted by industries and have been achieving many successes, the medical and healthy robots have been paid close attention to by researchers and clinicians. The robots may be used in various divisions of medical and healthy procedures, but now they are majorly developed and successfully applied in the fields of surgery, rehabilitation, and assistance. With the assistance of medical robotics, existing surgical medical procedures could be greatly improved with less invasive and fewer side effects, which result in faster recovery times and in substantially improving both risk-benefit and cost-benefit ratios. Currently, the major successful areas of applying a medical robotics include prostate surgery, cardiac surgery, brain neural surgery, and spinal-cord surgery. In the healthy applications of robots, another successful area is rehabilitation in which both multifunctional prostheses and exercising robots have been developed and used for limb amputees and paralyzed patients, respectively. The intelligent prostheses are used to help the amputees restore some limb functions in their daily life. The paralyzed people can use a rehabilitation robot to do limb exercise for recovery of the lost functions of their arm and leg locomotion. In addition, with the fast-growing elderly population, some robots also have been developed and used as assistive equipment in their daily activities for increasing locomotion and mitigating occurrence of dementia and as a companion at home for reducing isolation and depression. In this review paper we first summarized the state of the art of the robots developed for surgeries and rehabilitations. Then the up-to-date most interesting and popular research fields related to the medical and rehabilitation robots were introduced. Recently, a number of medical and rehabilitation robotics were designed and introduced into the clinical applications. Some minimally invasive surgery robotic systems such as the da Vinci Surgical System(Da Vinci Surgery)have been commercially available and are successfully utilized to perform clinical cardiac surgeries in many countries. And robotic systems such as MIT-Manus(commercially, InMotion)and Lokomat(Hocoma)are also successfully delivering physical and occupational therapy. Although many great processes of medical and rehabilitation robotic technologies and systems have been made, there are still some limitations and issues of current robotics technologies and systems. For example, the current medical surgery robots are lack of natural and precise interactions between the robotics and doctors, which would limit the performance and safety of medical robotics. And most

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of the rehabilitation and assistive robots are passively operated by the users. Thus the efficiency of these robots in the recovery of limb functions is limited. In order to further improve the performance of the current medical and rehabilitation robots, the precise interaction and synergy between robots and human would be very important and critical for making use of robotics in healthy fields since one of major characteristics of healthy robots is that they will work in a human-machine-interaction environment. The natural and precise interactions between robots and human will be able to be realized by the fusion of human-machine-intelligence synergy that would make use of the cognitive abilities of human brains and the computing capacities of a computer. Finally, this paper made a perspective of the medical and rehabilitation robots briefly. It can be predicted that robotic systems will have a large number of potential application niches from youth to the elderly, and from able-bodied to disabled. In the future, medical and rehabilitation robots will be able to have the ability to capture human state and behavior (aided with wearable sensors) in controlled environments such as physical therapy sessions and working places of a doctor or paramedic. Thus the medical and rehabilitation robotics will finally have an ability to realize the natural and precise interactions between human (such as patients and doctors) and machine (robots).

Keywords medical robotics, rehabilitation robotics, human-machine interaction, human-machine intelligence-synergy

李光林 中科院深圳先进技术院研究员，中科院人机智能协同系统重点实验室主任，中科院深圳先进技术院生物医学与健康工程所常务副所长、神经工程中心主任。主要从事神经机器接口、神经反馈、神经康复工程、人机智能增强与融合、生物医学仪器等领域的研究工作，发表*SCI/EI*论文80多篇，包括*JAMA*、*IEEE Transactions*等。*Journal of Physiological Measurement*国际咨询顾问；*IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*副主编；中国人工智能学会脑机融合与生物机器智能专业委员会副主任委员。E-mail: gl.li@siat.ac.cn

Li Guanglin, Ph.D., He has been with Shenzhen Institutes of Advanced Technology (SIAT), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shenzhen, China, where he is currently a Professor and the director of the Research Centre for Neural Engineering and serves as a deputy director of the Institute of Biomedical and Health Engineering. And he also is the director of the Key Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems of CAS. His current research interests include neural-machine interface, neural rehabilitation engineering, neural feedback, and biomedical signal processing. He has published more than 80 scientific papers in the internationally renowned journals such as *Journal of American Medical Association* (*JAMA*) and *IEEE Transactions*. He serves as an International Advisory Board Member of the *Journal of Physiological Measurement*, an Associate Editor-in-chief of the *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, and a deputy director for the Division of Brain-Machine Synergy and Bio-machine Intelligence of China Artificial Intelligence Society. E-mail: gl.li@siat.ac.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net