·综述·

# 手部功能康复机器人研究最新进展*

郭晓辉[1,2] 王 晶[1,2,3,4] 徐光华[1,2]

脑卒中(stroke)具有发病率高、死亡率高和致残率高的特点[1]。据统计,2015年中国大约会有超过一千万脑卒中患者[2]。目前脑卒中是手功能失效的主要原因之一[3],脑卒中后患者可出现多种神经功能缺损症状,其中偏瘫和运动障碍最为常见,而上肢残疾患者的手功能障碍往往临床表现为屈曲挛缩,手的屈肌张力占优势,指间关节和掌指关节伸展困难,丧失握持、侧捏、对掌及对指等精细运动功能[4],也会丧失一部分触觉感知和本体感受功能,失去对运动的反馈感知。具体表现在屈肌的过度激活和对抗肌群间的力量不平衡而导致的手和手腕总是处在屈曲的状态下,手指和手腕不能伸展[5]。目前国内外对于因脑卒中引起的手部偏瘫运动功能受损的改善和康复治疗方法主要是通过修复或重塑受损神经,加强肌肉肌腱的强度锻炼,完成运动学习来重建或改善脑卒中患者手部的运动功能[6—7],防止患者肌肉的废用性发生,促进脑神经代偿。传统的康复治疗中,治疗师手把手的对患者进行一对一式康复疗法[8],这种方法不仅劳动量大、费用昂贵,而且训练效率和强度难以保证,缺乏评价训练参数和康复效果关系的客观数据,难以对训练参数进行优化以获得最佳治疗方案。为了解决以上弊端,将机器人应用与康复领域的辅助康复疗法相结合的手部功能康复机器人技术的研究及运用应运而生。本文主要研究康复机器人中手指功能康复机器人的国内外现状及其未来的发展趋势。

## 1 人手运动自由度及其运动范围分析

手是人体重要的也是最常见的受伤部位之一,由于手部解剖精细、复杂,导致手外伤或者偏瘫后手功能难以恢复,致残率高,严重影响患者的日常生活和工作能力。手功能主要通过腕和手指灵活、协调的运动来完成。因此,如何尽快恢复手外伤或者偏瘫患者的手部肌力、关节活动范围,以及手指的协调性、灵活性就显得尤为重要。人手骨骼结构主要由腕骨、掌骨、指骨所组成,指骨又由近端指骨、中指骨和远端指骨组成。人手自由度(degrees of freedom, DOF)共有21个,前端四指每个手指有4个自由度,其中掌指关节(MCP)具有2个轴线垂直相交的转动自由度,近端指间关节(PIP)和远端指间关节(DIP)各有1个自由度。大拇指除了指间关节(IP)以及掌指关节各1个自由度外,腕掌关节(CM)具有3个自由度,共有5个自由度。人手关节的运动范围因人而异,它们大致有一个通用的范围,见表1[9]。

**表1 正常成人手指活动范围**

| 手指关节 | 运动方式 | 运动范围(°) |
|---|---|---|
| 掌指关节(MCP) | 内收/外展 | -20—20 |
| 掌指关节(MCP) | 屈曲 | 0—90 |
| 近端指间关节(PIP) | 屈曲 | 0—110 |
| 远端指间关节(DIP) | 屈曲 | 0—70 |

## 2 手部功能康复机器人国内外研究现状

手是人体各器官中关节自由度最多最集中、生理结构也最为复杂的部位,其功能精细、灵敏、复杂,使得手部功能康复机器人的研制也相对的复杂和多样化。

现有手部功能康复机器人按照控制的部位可以分为指端控制、关节控制、接触物体控制、外骨骼等[10]。指端控制是将辅助力施加在手指远端,这种方式简单,可以分别控制每一根手指,但是只能对手指远端临近的关节提供有限的控制,容易出现反常的手部运动形式。关节控制是将力矩按比例施加给手指上的每个关节,每根手指和每个关节都可以分别控制,但是通常力矩的比例难以调节。物体控制是控制手抓握物体的膨胀和缩小,这种方式简单,但是手指运动的范围较小。外骨骼方式可以直接控制每一个关节,减少反常的手部姿势,但为了减小控制的复杂性,一般会减少控制的关节数目和关节自由度,这被认为是机器人康复装置训练之后并没有表现出相对于传统训练方式优势的原因之一[11—12]。

手部功能康复机器人的分类标准有很多,除了按照控制部位分以外还有以下分类标准:执行器的类型、驱动力的转换方式、自由度数、意图传感方法和控制方法[13]。在这些标准里面本文选择按照提供驱动力的执行器不同为主要分类标准,可分为:电机、气缸、气动人工肌肉、形状记忆合金和柔性材料。目前手部功能康复机器人所采用的执行器见表2。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2017.02.025
*基金项目:国家863计划高科技项目(SQ2013GX03D00128);"香江学者"人才计划项目(XJ2013045);中国博士后科学基金面上项目(2014M552431)
1 西安交通大学,710049; 2 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室; 3 香港中文大学电子工程系; 4 通讯作者
作者简介:郭晓辉,男,在读硕士研究生; 收稿日期:2015-09-10

**表2　手部功能康复机器人的执行器**

| 种类 | 优点 | 缺点 |
|---|---|---|
| 电机 | 结构简单、可靠和易于正反转控制、精确度高 | 刚性元件，存在一定的安全隐患 |
| 气缸 | 结构简单、控制方便和易于正反转控制、清洁卫生 | 噪音大、体积大，由于气体的压缩性不利于精确控制 |
| 气动人工肌肉 | 柔性结构、噪音小、安全性和卫生性好 | 存在时变性、非线性和滞后性，难以精确控制力和速度 |
| 形状记忆合金 | 能随温度变化、超弹性、速度快和带负载能力强 | 高非线性、高滞后和高饱和度，难于精确控制，且存在疲劳和寿命等问题 |
| 高分子等柔性材料 | 类肌肉特性比如质量轻、柔韧性好、低功耗，响应速度快 | 驱动力小、配套感知装置不利于安装 |

**2.1**　以电机提供驱动力的手部功能康复机器人研究现状

美国应用生物力学和康复研究中心(CABRR)的Schabowsky等[14]研制的手外骨骼康复机械人HEXORR，共有2个自由度。其采用模块化的设计思想，主要有两个模块组成：手指模块和拇指模块。手指模块采用四连杆结构，能够提供手指MCP和PIP关节的耦合运动。每一个模块均采用电机驱动，而且安装有扭矩传感器可以感知使用者的运动意图。该装置有三种操作模式：CPM、主动独立运动、主动助力运动，第二种模式装置本身的重量和摩擦力为患者手指康复提供一定的阻力补偿作用。第三种模式装置是在患者手指主动运动不足以达到要求时提供一定的辅助力。

美敦力(意大利)公司设计了手功能康复机器人HANDEXOS(图1)[15—16]，共有5个自由度，它能克服偏瘫患者手部伸展、屈曲等运动范围的限制，使其在人手安全范围内做运动功能的康复训练。主要特征是每根手指都有5个独立的模块，每个模块由3个连杆机构组成，其每一连接处的转动中心都与人手关节相对应。掌指关节由类似曲柄滑块的机构驱动，PIP、DIP则由钢缆线传动带动，每根手指均由一个执行器独立驱动、拉线传动，属于欠驱动方式。每个手指模块在与手接触的内表面，均安装有三个压力传感器。在MCP关节处安装的线性滑块配备有拉力应变仪，以此来测量传递力的大小，从而驱动线缆。

日本岐阜大学的Ueki等[17]研制了基于虚拟现实(VR)技术的手部外骨骼康复机器人(图2)，共有18个自由度，其中拇指有4个自由度，四指各有3个自由度，腕部有2个自由度。大拇指靠三个电机实现伸展或屈曲，一个电机实现外展或内收；其余四指，每个手指都装有3个电机提供驱动力，辅助MCP、PIP关节的伸展或屈曲以及MCP关节的外展或内收；腕部的运动依靠2个电机控制实现。为提高康复训练效率，该机器人建立了基于VR技术由临床医生输入的可视化操作指示，患者可独立进行康复训练。同时配有提供双边康复疗法的数据手套，患者可通过戴在健康手指上的数据手套来自主控制戴在患肢上的外骨骼以驱动患肢手指，实现实时交互的力觉和位置信息。

**图1　手功能康复机器人HANDEXOS[15—16]**

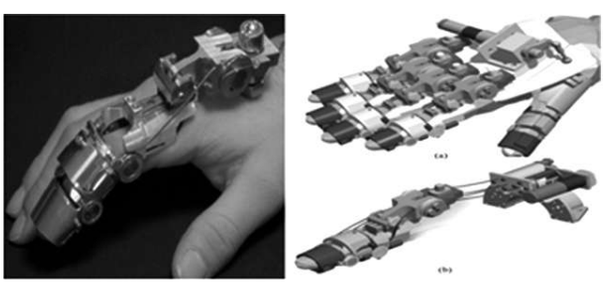
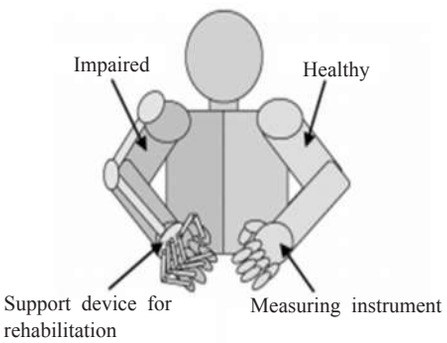


**图2　日本岐阜大学的手部外骨骼康复机器人[17]**




香港理工大学的研究者们自主研发的神经康复机器手Hand of Hope[18—19]，共有5个自由度，其中每个手指都配有专门的线性微型电机提供驱动力。采用的是EMG驱动手部训练的康复系统。它是通过采集患者大脑意念驱动患侧肢体的EMG和EEG信号，控制机械手上的线性微型电机，使患侧实现与康复手共同屈曲或伸展的康复训练。它可以促进肌肉再学习能力，鼓励患者以EMG信号形式通过自身肌肉运动带动患侧动作，且不依赖电刺激。利用电机协助受损肌肉进行训练，患者还可穿戴该机械手进行日常生活的功能运动，做简单抓握动作。该装置可实现四种训练模式：①CPM；②EMG触发运动；③连续EMG驱动运动；④完全独立运动。

**2.2**　以气缸或气动人工肌肉提供驱动力的手部功能康复机器人研究现状

日本东京工业大学研制的双向机制的采用气动人造橡胶肌肉的外骨骼康复机器手(图3)[20]，共有10个自由度，其中每个手指有2个自由度，属于欠驱动。该装置中每根手指通过设置一个双向联动机构来实现手指的屈曲和伸展运动。通过在每根手指末端安装一个防水的气囊传感器来测

量患者抓握力的大小,从而实现精确地力辅助控制。同时通过压力调节器、伺服阀、压力传感器的气动控制回路按比例放大所提供的外力,实现患手抓握动作的训练。通过实验发现,该装置的防水功能使其能在水下实现对3kg物体的抓握,而且从水中取出仍可继续正常用于康复实验。

韩国韩国东义大学研发了两代气动的手功能康复机器人,其中DULEX-Ⅰ(图4)[21],其外骨骼由ABS塑料制成,包括三根人工肌肉总重504克。它主要用来康复大拇指以外的其余四指,该装置共有3个自由度,分别是食指、其余三个手指和腕部。进行康复训练时通过人工肌肉收缩带动手指部分、腕部的机构使患者手指做重复伸展运动。第二代DULEX-Ⅱ,如图5[22],对第一代的控制方式做了改善。机构仍有3个自由度,但腕部改由一个双作用气缸来驱动,除拇指外的其余四指由两个线性的电机控制伸展运动。进行康复训练时,亦可以通过功能完好的手带上数据手套,患肢带上DULEX-Ⅱ,进行主从控制,可以达到良好的康复效果。

华中科技大学学者研制了由气动人工肌肉-扭簧结合驱动的可穿戴手功能康复机器人,如图6[23],共有2个自由度。该机构在轴向设计上克服了人工肌肉单向运动的不足,将其与提供手指伸展力的扭簧结合,用于关节驱动,最终实现手指的屈曲或伸展运动。但该方法只是将辅助力施加在手指远端,只能对手指远端临近的关节提供有限的控制,控制精确度还不高。

**图3 日本东京工业大学的康复手[20]**

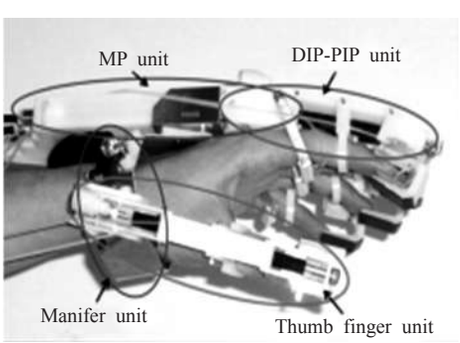



**图4 韩国的DULEX Ⅰ[21]**

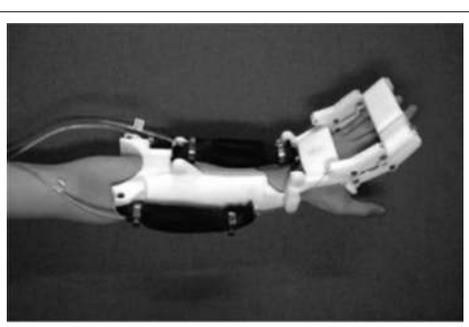


**图5 韩国的DULEX Ⅱ[22]**

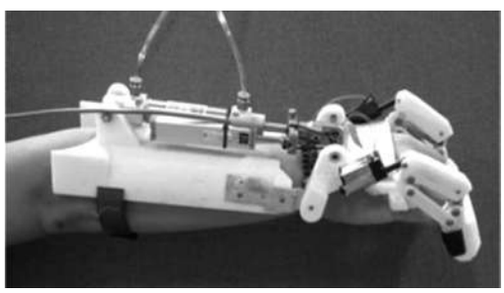
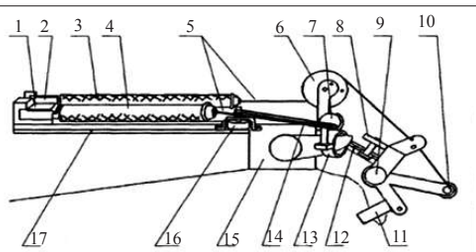


**图6 华中科技大学的气动人工肌肉–扭簧驱动手康复机器手[23]**




1,2—力传感器;3,4—气动肌肉;5—钢丝绳;6—行程转换滑轮;7,9,16—角度传感器;8—压指板;10—拉杆;11—手托;12—滑轨;13—指套;14—拇指拉杆;15—手掌外骨骼;17—小臂外骨骼

**2.3** 以形状记忆合金提供驱动力的手部功能康复机器人研究现状

加拿大西安大略大学的学者Makaran等人研制的腕-手矫形器(wrist-hand orthosis,WHO)[24],该装置有一个驱动机构可以绕手指MCP关节轴旋转,形状记忆合金则被用作手指屈曲的执行器,手指的伸展运动则通过弹簧来实现。该装置是通过一个吹啜式开关的肌电图信号控制,作为开/关操作与适当的定义的阈值的命令。采用形状记忆合金作为机器人系统的执行器,可增加驱动速度,提高带负载能力。尽管记忆合金是一种较新颖的用于康复医学工程上的驱动执行器,但由于记忆合金比较容易产生疲劳问题,其使用寿命有限,因此目前一般不采用形状记忆合金作为机构执行器。

**2.4** 以气动或液动为驱动方式的柔性手部功能康复机器人研究现状

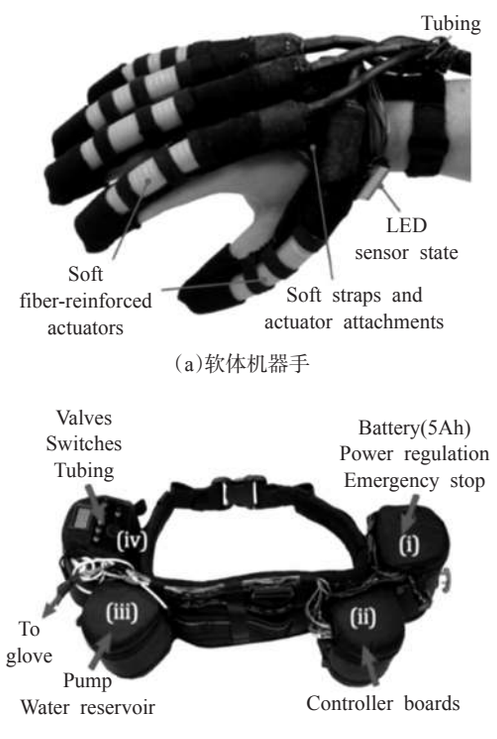
日本冈山大学的Kadowaki等人研制出两款力量辅助手套,可以辅助手部抓握力量弱的患者进行康复训练[25—26],共有6个自由度,该装置仍然采用气动橡胶肌肉作为执行器。第二代与第一代的不同之处在于两者采用的气动肌肉类型和操作方法。第一代使用的是平弯橡胶肌肉,由于该肌肉在平行方向有两个纵向可扩展单元,屈曲方向上的运动,即手指的屈曲和伸展是通过对某一单元加压来实现。第二代使用的是螺旋橡胶肌肉,该肌肉是由一个可膨胀扩展的橡胶管和一块在斜方向可伸缩的弹性纤维布组成,这使得该肌肉在

加压时屈曲。该气动手套是通过数据手套或者患者患肢小臂的EMG信号来控制手指的运动姿态的。

哈佛大学的Polygerinos等学者研制出一款针对手功能抓握障碍个体的辅助与家庭康复相结合的软机器手套，如图7[27]，共有5个自由度。该手套采用的软体执行器由使用纤维增强材料的成型弹性腔组成，该纤维增强材料具有诱导特定的屈曲、扭转和流体加压下的延伸轨迹的特性。这些软体执行器通过机械的编程来达到匹配和支持单个手指运动的目的。并且在加压时产生显著地力来辅助手指完成抓握动作，在未加压时表现出低阻抗性。为了操作该手套还设计了包括流体压力传感器、液压致动器以及一个调节压力的闭环控制器组成的硬件控制系统。该手套通过其便携式腰带包和开放式手掌设计能够增加用户的使用的自由和独立性。该手套在操作过程中有很好的精确性。

近几年由于相关材料领域技术的发展，使得具有仿生性好、安全性高、穿戴便捷等特点的柔性手功能康复机器人也成为研究的热点，目前柔性手功能康复机器人的驱动主要采用气动和液动两种方式。为了简化柔性手功能康复机器人的驱动部分，目前柔性手功能康复机器人舍弃了一些自由度，多数采用一根手指一条或两条气道或液道的方式，来帮助患者手指实现屈曲或伸展运动，最新的研究成果还有麻省理工研制的具有辅助功能的轻量级手套[28]，以及意大利的智能康复机器手Gloreha[29]等。

**图7 哈佛大学的软机器手套[27]**




## 3 目前存在的缺点与不足

目前，康复工程所采用的装置主要依据现代循证医学（evidence-based medicine，EBM）和连续被动活动（continuous passive motion，CPM）理论，尽管各国专家学者都在积极致力于手部康复功能机器人的研究，但是手部功能康复机器人的发展仍处于初步阶段，还有许多关键技术亟需解决。

目前手部功能康复机器人尚存在如下缺点：①康复训练运动模式及训练过程比较单一[30]，康复训练模式还是局限于手指的屈曲/伸展，缺乏对各手指外展/内收运动的实现，训练过程的单调与枯燥乏味，不利于激发患者主动运动意念和参与训练的积极性。②康复机器人的机械结构和控制系统还有待提高，在康复训练过程中，缺乏对患者手指关节角度、关节力矩和关节速度等参数的实时精确地控制。③康复机器人的驱动和执行结构过于复杂，体积较大，便携性差，安全性和舒适性也有待提高。④康复训练效果的反馈机制有待完善，还无法对训练过程中手的姿态和力的大小等进行精确地反馈，造成训练效率低，因而影响对康复训练的有效评估。⑤对于柔性康复机器人需要研发更先进的高分子聚合物作为柔性可变材料，而且柔性康复机器人的驱动力大小也有待进一步的提高。⑥由于手部机器人较小的尺寸和丰富的触觉感知能力的要求，手外骨骼仍面临许多技术领域的许多挑战，包括手部生物力学、神经生理学、康复、执行器和传感器、物理的人机交互和人机工程学。

## 4 未来手功能康复机器人的发展

目前的手部功能康复机器人都能够在一定程度上为患者提供简单的训练方案，而且具有一定的康复效果。从现有文献及临床需求来看，今后手功能康复机器人的研究应该集中在以下几个方面：①手部功能康复机器人的系统设计：机械结构设计是手部功能康复训练机器人系统的基础，要求简洁轻巧，自由度多，灵活性好，训练动作种类丰富，能够做到在三维空间内对患者手指各关节进行协调运动训练，同时发展“多路复用”的网络康复机器人系统，使康复地点不再局限于医院，提高资源利用率。②手部功能康复机器人运动模式与控制策略的设计：由于患者病情的差异性，所设计的机器人要能够感知患指的状态信息（力觉和位置）并采用相应的训练模式及控制策略，在控制系统的适应性和稳定性、传感器技术运用以及控制算法设计等方面需要作进一步的研究。③力反馈与位置信息反馈：手部功能康复机器人应该能够实时检测和感知患指与康复机器人之间的相互作用力与运动位置信息，在患者主动运动不足时提供适当的辅助，而且在患者有能力完成动作时，适当减小辅助力或者施加一定

阻力,以便充分发挥患者患指残存的功能,达到更好的治疗康复效果。④安全保护机制:由于患者对手的主动运动能力差,安全问题始终是康复机器人设计要考虑的一个重要方面,康复机器人的设计必须符合临床康复训练的基本动作与安全性的要求,除了要实现康复训练的动作外,要防止二次伤害的发生,这就要求设计时要从机构设计(硬件)和控制系统(软件)两方面保证康复训练机器人的安全性。⑤康复效果的评价机制:通过与肌电信号或脑电信号检测等相结合,探究康复效果与各训练参数的内在联系和规律,针对不同患病状态的患者进行相应的康复运动训练,建立有效的康复训练评估系统,缩短患者康复治疗的周期,并最大限度地恢复患者手部的运动功能。⑥随着康复医学的发展和当今世界各种先进机器人技术的广泛应用,将其应用到康复工程领域也是手部功能康复机器人发展的推动力,比如传感器技术、计算机技术、遥控操作技术、导航技术[31]等,同时还可以引入各种先进的机器人控制技术、微驱动技、人机接口、脑机接口等技术[32],在做康复训练时实现由被动转为主动,自适应反馈控制与临床康复治疗相结合[33],使患者和医生能实时地进行沟通与交流,从而改善康复运动训练的治疗方案,节省成本,提高效率。⑦虚拟现实技术的出现促进了计算机技术与康复医学在更高层次的结合。虚拟现实技术通过提供对策模拟环境,使单调的重复训练趣味化,基于虚拟现实技术的手功能康复机器人可以通过提供实时反馈、设计个性化训练方案、编制丰富的虚拟环境等,增加任务的趣味性,大大提高了患者主动参与康复训练的积极性,从而更好地促进患者运动功能恢复[34]。

## 5 结论

机器人具备许多人类所无法比拟的优点,例如:长期稳定的重复训练,精确、客观的测定训练与运动参数,提供实时反馈、远程训练等等。康复机器人作为医疗机器人的重要分支之一,它的研究贯穿了康复医学、脑神经学、生物力学、机械力学、电子学、材料学、计算机科学以及机器人学等诸多领域,已经成为国际机器人领域的一个重要研究热点[35]。但是,目前手部功能康复训练机器人的研究仍然处于初步阶段。而随着人们生活水平的不断提高,患者对手部功能康复机器人的期望和要求也越来越高。从近年的发展来看,国外一些比如美国、日本、韩国等国家和大学机构比如MIT、Stanford等对这一领域的研究都十分重视,处于世界领先。国内在这一领域仍存在一定的差距,针对国内康复医学事业相对落后,患者数量多,治疗师资源匮乏的现状,发展手部功能康复机器人更具实际意义。随着手部功能康复机器人的研究和使用,有望简化医师与患者"一对一"的繁重治疗过程,推动手功能障碍患者"人人享有康复服务"这一目标的实现[36],真正做到人性化、产品市场化、小型模块化和智能化,有效提高手功能患者和老年人的实际生活质量与家庭幸福感。随着科技的进步,手功能康复机械人在现代康复医学和神经反馈训练方面有着广泛的应用前景以及巨大的商业利益。

## 参考文献


[1] 周维金,王玉琴,崔利华. 脑卒中康复研究新进展[J].中国康复医学杂志,2002,17(2):124—127.

[2] Pan YQ. Predictors of health in adult child care-givers of parent stroke survivors in China[D].California: Loma Linda University,2014.

[3] 王坚,王爱民,曹阳.基于力反馈的手部康复训练装置研究进展[J].测控技术,2013,32(2):1—4.

[4] 邢科新.手功能康复机器人系统若干关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2010.

[5] Carpinella I, Jonsdottir J, Ferrarin M. Multi-finger coordination in healthy subjects and stroke patients: A mathematical modelling approach[J]. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, 2011, 8:19.

[6] 王茂斌.脑卒中康复研究的进展[J].中国康复医学杂志, 2001, 16(5): 264—265.

[7] Fu YL, Zhang QC, Zhang FH.Design and development of a hand rehabilitation robot for patient-cooperative therapy following stroke[C]//Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation,Beijing,2011: 112—117

[8] 吴贵军,国秀丽.基于创新方法的手指康复训练器设计[J].河南科技,2015,2(4):47—49.

[9] Lee Y J,Kim J,Ko S Y,et al. Design of a compact laparoscopic assistant robot:KaLAR[J].ICCAS2003,2003:2648—2653.

[10] Sareh S, Rossiter J. Kirigami artificial muscles with complex biologically inspired morphologies[J]. Smart Materials and Structures,2013,22(1):205—206.

[11] Prange GB, Jannink MJ, Groothuis-Oudshoorn CG, et al. Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke[J]. Journal of Rehabilitation Research and development, 2006, 43(2): 171—184.

[12] Kwakkel G, Kollen BJ, Krebs HI.Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: A systematic review[J]. Neurorehabil Neural Repair,2008,22(2):111—121.

[13] Heo P, Gu G M, Lee S J,et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering[J].International Journey of Precision Engineering and Manufacturing,2012,13(5):807—824.

[14] Schabowsky CN, Godfrey SB, Holley RJ, et al.Development and pilot testing of HEXORR: Hand EXOskeleton Rehabilitation Robot[J].Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation,2010,7(3):36.

[15] Chiri A, Giovacchini F, Vitiello N, et al. HANDEXOS: towards an exoskeleton device for the rehabilitation of the hand[C].//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, USA,2009:1106—1111.

[16] Chiri A, Vitiello N, Giovacchini F, et al. Mechatronic design and characterization of the index finger module of a

hand exoskeleton for post stroke rehabilitation[J].IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2012，17(5)：884—894.

[17] Ueki S，Kawasaki H，Ito S，et al. Development of a hand-assist robot with multi-degrees-of-freedom for rehabilitation therapy[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2012, 17(1):136—146.

[18] Tong KY, Ho SK, Pang, PM K,et al. An intention driven hand functions task training robotic system[C].//the 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,Buenos Aires, Argentina, 2010:3406—3409.

[19] http://www.rehab-robotics.com/HOH.

[20] Tadano K, Akai M, Kadota K, et al. Development of grip amplified glove using biarticular mechanism with pneumatic artificial rubber muscle[C].//IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District,Anchorage,AK,2010:2363—2368.

[21] Kim Y,Jung S,Moon I. Design of a Wearable upper-limb rehabilitation robot using parallel mechanism[C].//ICROS-SICE International Joint Conference,Japan,2009:785—789.

[22] Bae J, Kimand Y, Moon I. Wearable hand rehabili-tation robot capable of hand function assistance in stroke survivors [C].//The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics,Roma,Italy, 2012:1482—1487.

[23] Jun Wu, Jian Huang, Yongji Wang,et al. A Wearable rehabilitation robotic hand driven by PMTS actuators[M].Inxelligent Robotic and Applications cestions,springer Berlin ,2010: 440—450.

[24] Makara JE,Dittmer DK,Buchal RO,et al. The SMART wrist hand orthosis(WHO) for quadriplegic[J].Journal of Prosthetics and Orthotics,1993,5(3):73—76.

[25] Sasaki D, Noritsugu T, Takaiwa M,et al.Wearable power assist device for hand grasping using pneumatic artificial rubber muscle[C].//the 2004 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication,Okayama,Japan,2004:655—660.

[26] Kadowaki Y, Noritsugu T, Takaiwa M,et al.Development of soft powerassist glove and control based on human intent [J]. Journal of Robotics and Mechatronics,2011,23(2):281—291.

[27] Polygerinos P, Wang Z, Galloway KC, Wood RJ,et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J].Robotics and Autonomous Systems.2014:1—9.

[28] http://www.technologyreview.com/news/

[29] Gloreha.(2012),“The Hand Rehabilitation Glove”, http://www.gloreha.it/index.php?lang=en.

[30] 刘洪山.手创伤康复机械手结构设计与分析[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2007.

[31] Ali AMM,Ambar R,Jamil MMA,et al.Artificial hand gripper controller via smart glove for rehabilitation process[C].// Biomedical Engineering(ICoBE),Penang,2012:300—304.

[32] Hioki M, Kawasaki H, Sakaeda H,et al.Finger rehabilitation system using multi-fingered haptic interface robot controlled by surface electromy-ogram[C].//3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatr-onics(BioRob), Tokyo, Japan, 2010: 26—29.

[33] Hasegawa Y,Tokita J, Kamibayashi K,et al. Evaluation of fingertip force accuracy in different support conditions of exoskeleton[C]. //2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai,China,2011:680—685.

[34] 肖喜玲,杨朝辉,黄剑,等. 基于虚拟现实技术手功能康复训练系统的设计及临床应用[J].中国康复医学杂志，2014,29(6): 537—541.

[35] Krebs HI,Hogan N.Therapeutic robotics:A Technology push [J]. Proceeding of the IEEE,2006,94(9):1727—1738.

[36] 李会军,宋爱国.上肢康复训练机器人的研究进展及前景[J].机器人技术与应用.2006:32—26.