

• 专题 •

康复工程在现代康复医学中的作用和进展

张济川 金德闻

[关键词] 康复工程;假肢;矫形技术;功能性电刺激;机器人技术;盲人交流技术

中图分类号:R496 文献标识码:A 文章编号:1006-9771(2004)05-0257-04

[本文著录格式] 张济川,金德闻.康复工程在现代康复医学中的作用和进展[J].中国康复理论与实践,2004,10(5):257-260.

康复工程学是工程技术与现代康复医学相结合的新兴交叉学科,其宗旨是研究人体功能康复的工程原理和方法。康复工程的主要任务是研究康复评定、康复治疗、康复训练和功能代偿所需要的装置、设备和器具的原理和设计方法及其临床应用。康复工程也是一种有别于纯医学的康复治疗方法。

在康复医学中引入以现代工程技术新成果为依托的康复工程是现代康复医学的重要特点之一,康复工程已经成为现代康复医学的重要组成部分,对有些疾患,如截肢、运动功能障碍、视听障碍等,康复工程方法已经成为唯一的康复治疗手段。作为医工结合的交叉学科,康复工程学所涉及的专业领域十分广泛,不仅涉及医学、生物力学等生物医学类学科,还涉及工程学科中的大部分专业领域。随着科学技术的进步和生活水平的提高,人们对生活质量的要求也不断提高。各国政府,特别是发达国家政府,十分重视发展康复工程技术,在医疗器械产业的国家投资中,用于研究开发康复工程产品的比例逐年增加,从而促进了康复工程各个领域的工作不断取得进展。下面仅从康复工程作为一种康复治疗方法的角度,介绍康复工程在康复医学中的作用和近几年取得的进展和研究成果。

1 假肢与矫形技术

肌电控制的上肢假肢和步态可控的下肢假肢是现代假肢技术的标志性成果。肌电假肢是从电动假肢发展过来的,它利用肌电信号取代机械式触动开关,实现对上肢的运动控制。肘关节以上截肢的患者,由于提取多路肌电信号同时控制多关节的运动技术难度大,可靠性差,仍以安装由机械开关控制的电动假肢为主。

解决关节的驱动力矩与手臂运动速度之间的矛盾,是电动假肢的关键技术。为满足电动假肢关节力矩(包括假手的握力)、手的运动速度和系统工作效率

的综合要求,德国研制了一种智能驱动器(Smart Actuator)^[1],采用电控的变换齿轮机构实现体积、重量、效率和速度的最佳匹配。日本的研究人员利用基于压电陶瓷电特性制成的超声马达作为假肢的驱动器^[2],以减轻假手的重量、降低噪声和增大假手的握力。

在解决多自由度上肢假肢的控制问题方面,正在研究神经肌肉再造的方法。由于神经信号微弱(在正常情况下也只有10—50μV),直接用于控制难度很大,故一般采用神经肌肉接口,即将神经移植到代用肌肉上,利用该肌肉的肌电信号进行控制。美国芝加哥康复研究所和纽约Osteopathic医学院等单位进行了神经移植的动物实验并获得初步成功^[3]。在我国,由上海医科大学负责,清华大学、上海交通大学参加的国家自然科学基金重点项目,正在研究假肢信息源的再造及其在肌电假肢中的应用,以解决多自自由度假肢的控制问题。

在有感假肢的研究方面也有新的进展。握力反馈信息以往是通过代用方式(如振动信号)反馈给使用者,现在英国正在研究利用植入式神经-传感器接口,将力信号直接传输给感觉神经,从而可大大提高患者的直感性^[4]。

下肢假肢设计一直在追求站立期的稳定性和摆动期的步态仿生性。美国在传统的四杆机构膝关节的基础上,开发出了六杆机构全功能膝关节。这种膝关节由6个构件组成,利用几何学原理,保证站立期关节被可靠锁定,在站立末期自动解锁,并能实现摆动期步态的仿生性。使用这种全功能膝关节行走所需的髋关节力矩小,从而降低了行走时的体能消耗。

智能型下肢假肢是20世纪90年代以来研究的热点。下肢假肢的智能化主要表现在对摆动期步态的控制中。日本首先研制成功跟踪步速变化的智能控制大腿假肢。中川昭夫于1989年公开推出新的下肢假肢智能化控制技术;1990年,英国Blatchford公司获得了该项技术的许可,开发出世界上第1个智能下肢假肢,

作者单位:100084 北京市,清华大学康复工程研究中心。作者简介:张济川(1931-),辽宁法库县人,教授,中国康复医学会专家委员会副主任,康复医学工程专业委员会名誉主任,研究方向:康复工程。

并于 1993 年投放市场。德国 Otto Bock 公司也相继推出能跟踪步速并能防止意外屈膝的智能大腿假肢。日本 Nosaka 研制支撑期用液压控制、摆动期用气动控制的智能膝关节,其性能优于德国 Otto Bock 公司的 3 R60 型膝关节^[5]。清华大学在国家自然科学基金的资助下,从 2000 年开始研究采用肌电信号进行路况识别,选择相应的力矩模式,利用可控力矩装置对摆动期进行控制的智能型下肢假肢。

在假肢接受腔制作技术方面,20 世纪 90 年代开发的接受腔计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)系统已得到进一步应用。我国民政部假肢研究所于 2000 年研制成功具有我国特点的 CAD/CAM 假肢接受腔制作系统。目前,接受腔的制作技术又有进一步发展,将快速成型技术(RMM)与 CAD 相结合,形成 CAD/RMM 接受腔制造系统^[6-7]。这一系统根据事先测得的残肢外形轮廓的断层轨迹,由电脑控制吐料器,按断层轨迹送料并快速成型。该系统的优点是不需要制作阳模。

到目前为止,世界各国采用的假肢装配技术均以接受腔作为人-机接口。这种装配技术存在无法克服的缺点:①通过软组织传力,不符合人体生物力学规律;②透气性差,残肢环境恶劣;③由于残肢肌肉萎缩,需经常更换接受腔。为克服上述缺点,瑞典于 1995 年推出不需要接受腔的骨植入式假肢装配技术,并为几十名患者试装,取得了初步成功。但植入体的形态结构设计还存在问题,结构复杂,植入体常出现弯曲和折断,经皮密封不良,常有体液溢出。Sullivan 等对这种装配技术及其临床应用效果作了详细报道^[8]。2001 年,受科技部委托,清华大学与四川大学生物材料工程中心合作,承担了国家“863 计划”的重点项目“生物活性经皮骨植入材料和植入式智能假肢研究”,从生物活性骨结合材料及可靠的经皮密封和假肢的智能化方面研制这种具有革命性的新一代假肢及其装配技术,目前已进入动物实验和样机制造阶段。

矫形技术与矫形器是康复工程疗法中应用非常广泛的传统技术。近几年,矫形器的发展主要侧重在适用于运动功能障碍和截瘫患者的活动矫形器上。英国的 Steeper 公司首先开发出被称为 ARGO 的交替步态下肢活动矫形器(活动支具),这种矫形器靠人体前倾时腿在重力作用下的自然摆动行走,可使胸腰段截瘫患者在肘杖的辅助下以交替步伐独立行走。为保证安全,行走时膝关节锁死,大小腿呈直棍状,步态严重失真。清华大学在国家自然科学基金资助下,从 20 世纪 90 年代初开始研究动力式截瘫步行器(动力式步态矫

形器)^[9],研究目标是使高位截瘫患者摆脱轮椅,独立行走。其结构特点是,腿的摆动机构由一组单自由度的多杆机构组成,机构的运动学设计采用最优化设计方法,根据模拟正常步态的要求设计机构的结构尺寸,行走时髌、膝关节可按正常人步态的规律弯曲。机构由小型直流伺服电机驱动,可自动产生交替步态,机构具有自锁功能,以保证安全。

2 功能性电刺激(FES)

自从发现利用可控制的电流刺激能恢复人体的某些功能以来,功能性电刺激已广泛用于运动功能恢复、排泄控制、刺激呼吸以及控制癫痫发作和帕金森病震颤等。功能性电刺激可引起肌肉的生理、生化改变和骨密度的变化。近几年功能性电刺激在以下几方面有所发展。

2.1 带有反馈控制的功能性电刺激 反馈的方法和作用各不相同,例如在截瘫助行器中,将 FES 与活动矫形器相结合,使截瘫患者站立实现交替步态运动。Jaspers 等报道了一种与电刺激相结合的半动力式步行器,在其第 1 代装置中,FES 采用开环控制;新 1 代装置将 FES 与智能矫形器结合起来,利用智能矫形器的足底压力和运动测量传感器,由微型计算机对信号进行实时处理,用于控制 FES 系统。所采用的分析软件可预报运动状况,当得到膝关节弯曲信号时,启动 FES,既可防止摔倒,又能避免肌肉疲劳^[10-12]。此外,在用于机能恢复的 FES 系统中,目前也采用各种反馈控制,例如,肌电信号反馈控制用于上肢康复训练等^[13]。实验证明,这种训练方案对于恢复神经-肌肉的控制能力和防止疲劳有重要作用。

2.2 FES 与微型技术结合实现神经-肌肉系统康复 微传感器、微电极和高密度电路的发展与医学的结合将为神经系统的康复带来革命性变化。利用这些微系统可提供直接与受损神经精确连接的接口,直接接受由周围神经甚至中枢神经传出的信号,利用这些信号控制 FES 系统,可使神经肌肉系统功能的恢复达到更高的层次^[14]。美国 Case Western Reserve 大学研制出可接受膀胱充满时神经传出信号的微系统,将其与 FES 系统连接,用于控制膀胱的活动。他们还研究了用于手运动控制的神经替代物,利用植入式传感器和刺激器,使高位截瘫者腕部动作转换成手部的协调动作,实现手的抓取。

3 机器人技术在康复治疗中的应用

虽然工业机器人已成功地应用于许多工业领域,但在康复领域应用的机器人,与一般工业机器人有许多不同,其主要区别在于人机接口的柔顺性和端点阻

抗的可控性。20 世纪 80 年代以来,康复机器人的发展主要用于残疾者的生活辅助。最近几年,在机器人辅助神经肌肉康复(robot-aided neuro-rehabilitation)训练方面有相当多的研究并取得重要进展。美国麻省理工学院(MIT)、美国退伍军人部康复研究与开发中心、加州大学和西北大学等都开展了大量研究工作,其中退伍军人部康复研究与开发中心在已研制的 5 代生活助理机器人的基础上,又在康复治疗机器人方面取得突破性进展,已进行了 3 代康复机器人的开发和试验。他们开发的第 3 代 MI ME(Mirror Image Enabler)机器人,可实现上臂被动运动和主动-辅助运动(即由患者发起运动,当患侧无能力完成所选择的运动时,机器人进行辅助)^[15]。机器人的位置数据采集装置安装在患侧或健侧的机械臂上,当装在健侧时,可通过主-从控制系统使患侧跟随健侧做对称运动。反之,则可记录患侧的运动,进行功能评定。对照试验表明,受试者肩部、肘部的功能评定法(Function Measure)评分和肌力明显高于对照组。麻省理工学院研制的 MIT-MANUS 机器人,采用了阻抗控制技术实现端点平缓和柔顺,用机械臂的末端引导患者手部运动,完成上肢有感康复训练^[16],患者可进行自主运动,在不能达到预期运动时,由机器人导引。76 例脑卒中患者参加了对照试验,结果表明,肘关节和肩关节的肌力比常规训练提高 1 倍,而且对 20 例患者的 3 年随访表明,疗效具有长期性。以英国 Reading 大学为首的欧洲跨国研究小组,于 2002 年研制出一种叫做 GENTLE/S 的上肢康复训练机器人^[17],该机器人有 3 个主动运动自由度和 3 个被动运动自由度,医生根据所需要的训练处方,将规定的手臂运动模式(各种图形)输入电脑并显示在显示屏上。患者手臂的运动相当于鼠标,手臂需按规定图形运动,一旦离开规定图形轨迹,机器人将对手臂产生很大阻力。

4 盲人交流技术

助行和交流是盲人回归社会遇到的主要问题。经过多年的研究开发,导盲设施已有很大发展,但在解决盲人交流问题上,仍有许多工作要做。特别是在当今信息时代,计算机网络技术的广泛应用,迫切需要解决盲人利用计算机交流问题。欧共体早在 1997 年前就资助开发了供盲人使用的与多媒体系统的专用接口 DAHNI(Demonstrator of the ACCESS Hypermedia Non-visual Interface)^[18],该系统可输出合成的数字式语音、非语言声音以及布莱尔盲文。输入可用大小不同的触摸板、游戏手把或普通键盘。日本 1996 年研制成能使盲人读写图的触-听系统,近几年又开发了适合

盲-聋人用的交流工具,如供盲-聋人用的便携式交流辅助装置^[19],可将使用者在布莱尔终端输入的盲文信息转换成语言文字,显示在显示屏上,供明眼人阅读进行交流。反之,也可将交流者用键盘输入的信息转换成盲文,并显示在布莱尔屏上。

由于汉语的特殊性,必须有适合我国盲人使用的电脑软件,这方面近年来已取得重要进展。由上海铁道大学开发的“福音盲文处理系统”软件具有多种功能^[20]。可将盲文转换成汉字打印输出,与健康人进行文字交流。2003 年中国科学院已成功开发出盲人用电脑。

5 其他相关的基础研究

康复工程的发展与生物力学、生理学、检测技术、微型工程技术等密切相关,其中对康复工程的发展影响较大的,主要有以下几个方面:

5.1 人体运动分析与控制的建模 早期的人体生物力学模型以多刚体力学模型为基础,广泛用于体育、航天工程、汽车安全以及假肢设计等。第 2 代模型为含肌肉特性以及神经-肌肉特性的模型,近几年已有较多的研究^[21-22]。利用此类模型可以分析各肌群对不同运动功能的贡献,从而为损伤的诊断和康复的途径提供依据。第 3 代模型不仅含神经-肌肉模型,还将骨关节的模型嵌入上述模型中,从而实现对关节内的应力分析,为关节病的分析与研究提供依据。此外,对人体平衡的控制机理也有不少人研究^[23]。平衡能力的研究对研究防止老年人摔倒问题以及假肢支撑期控制问题等,有重要意义。

5.2 人体运动功能的评定 科学地评定运动功能,对于功能障碍的诊断和康复效果的评定,有重要意义,甚至被认为是本世纪康复事业能否持续发展的关键之一。目前运动功能的检测设备种类很多,随着计算机的普及和多媒体技术的广泛应用,基于普通摄像机的低成本运动分析系统已开发成功,但在软件方面仍有许多工作要做。国外在人体步态的定量分析、运动质量的评估指标方面已有不少研究。美国密尼索达大学提出了单指标定量分析法,该方法应用主元分析法从选择的 16 个步态参数中得到 16 个独立变量,然后取其平方和作为偏离正常步态的指标。统计结果和初步临床应用表明,此方法由于只有 1 个指标,可操作性好^[24]。在康复评定中,对于各种患者康复程度的评定标准,尚需要通过大量的临床试验确定。

5.3 机械生理学(mechanobiology) 这是由美国康复研究与开发中心新定义的一个领域^[25],主要研究各种外界机械作用(包括物理环境)对组织细胞的分裂、生

长和功能的调节作用。外界的力学环境会影响骨组织的生长和发育已在矫形器的研究开发实践中得到证实。近期的研究表明,利用机械生理学的原理,可对诸如老年骨质增生和骨质疏松等病理过程进行模拟和预测。目前正在进一步研究外力与骨骼、软骨、韧带、肌腱等组织的相互作用,研究所得的结果与分子生物学的发现完全一致。这些研究成果可望对肌肉、骨骼损伤和关节病的预防和治疗创造新的途径。

综上所述,近几年康复工程及其相关领域的研究除原有的一些领域外,又开拓了一些新的领域。目前虽然尚未取得重大突破,但随着康复工程学与现代康复医学的紧密结合,具有划时代意义的研究成果正在孕育之中。

[参考文献]

- [1] Puchhammer G. A comparison of actuator concepts or the role of control gears in electric hand drives[C]. Book of Abstracts, the 10th World Congress of ISPO, 2001, MO 6.1.
- [2] Nishihara K. Development of an electric artificial hand with a supersonic motor[C]. Book of Abstracts, the 10th World Congress of ISPO, 2001, MO 6.3.
- [3] Wells MR, Vaidya U, Ricci JL, et al. A neuromuscular platform to extract electrophysiological signals from lesioned nerves[J]. J Rehabil Res Dev, 2001, 38(4): 385 - 390.
- [4] Andrews B. Development of an implanted control interface for artificial limbs[C]. Book of Abstracts, the 10th World Congress of ISPO, 2001, MO 8.6.
- [5] Nosaka T. Biomechanical evaluation of a new prototype prosthetic knee joint for trans-femoral amputees[C]. Book of Abstracts, the 10th World Congress of ISPO, 2001, THO 8.7.
- [6] Lee PVS. Computer aided design (CAD)-finite element analysis (FEA)-rapid manufacturing machine (RMM), integration for prosthetic socket design[C]. Book of Abstracts, the 10th World Congress of ISPO, 2001, FO 2.4.
- [7] Rolock J. An automatic fabrication device for prosthetic sockets [C]. Book of Abstracts, the 10th World Congress of ISPO, 2001, FO 2.4.
- [8] Sullivan J, Uden M, Robinson KP, et al. Rehabilitation of the trans-femoral amputee with an osseointegrated prosthesis[J]. The United Kingdom Experience, Prosthetics and Orthotics International, 2003, 27: 114 - 120.
- [9] 张济川, 金德闻, 周文. 双关节单自由度截瘫步行器的研究 [J]. 中国康复医学杂志, 1991, 6(6): 1 - 5.
- [10] Jaspers P, Van Petegem W, Van der Perre G, et al. Development of a low-cost FES-bicycle system[C]. Proceedings, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1996.
- [11] Jaspers P, Van Petegem W, Van der Perre G, et al. Design of an automatic step intention system for a hybrid gait orthosis [C]. Proceedings, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1996.
- [12] Jaspers P, Van Petegem W, Van der Perre G, et al. Optimization of a combined ARGO-FES system: Adaptation of the knee mechanism to allow flexion of the knee during the swing phase. Proceedings, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1995.
- [13] 毕胜, 鄢达来, 王福根, 等. 基于肌电信号分析的功能电刺激控制系统及其应用[J]. 中国康复医学杂志, 2001, 16(1): 40 - 42.
- [14] Peckham PH. Restoration of function: Current challenge and future opportunities through electrical stimulation[J]. J Rehabil Res Dev, 2001, 38(1): x iii - x vi.
- [15] Bugar CG, Lum PS, Shor PC, et al. Development of robot for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Stanford experience [J]. J Rehabil Res Dev, 2000, 37(6): 663 - 673.
- [16] Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, et al. Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neuro-rehabilitation[J]. J Rehabil Res Dev, 2000, 37(6): 639 - 652.
- [17] Harwin S, Loureiro RCV, Amirabadollahian F, et al. The GENTLES/S project: A new method of delivering neuro-rehabilitation[C]. Proc of Assistive Technology-added Value to the Quality of Life, R. Andrich. Ljubljana, 2001, 10: 36 - 41.
- [18] Helen P, Sarah M. Initial design and evaluation of an interface to hypermedia system for blind user[C]. Proc. ACM Conference on Hypertext, 1997, Apr. 6 - 11. 48 - 56.
- [19] Su MC, Chen CY, Su SY, et al. Portable communication aid for deaf-blind people[J]. Computer and Control Engineering Journal, 2001, 12(1): 37 - 43.
- [20] 朱双六, 宋文兰. 汉语盲人电脑软件的开发[J]. 中国康复医学杂志, 2000, 15: 223 - 224.
- [21] 黄昌华, 李波, 王人成, 等. 等长收缩时食指肌力分析[J]. 中国生物医学工程学报, 1999, 18(4): 417 - 425.
- [22] 王人成, 杨年峰, 朱长虹, 等. 人体下肢摆动相冗余肌力分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(11): 104.
- [23] Patton JL, Pai YC, Lee WA. Evaluation of a model that determine the stability limits of dynamic balance[J]. Gait Posture, 1999, 9: 38 - 49.
- [24] Schutte LM, Narayanan U, Stout JL, et al. An index for quantifying deviation from normal gait[J]. Gait Posture, 2000, 11: 25 - 31.
- [25] Carter DR. Mechanobiology in Rehabilitation Science[J]. J Rehab Res Dev, 2000, 37(2): vii - viii.

(收稿日期: 2003-08-15 修回日期: 2004-01-18)