

· 康复医学工程 ·

一种机器人辅助的自主循迹训练控制方法*

陈宏伟¹ 黄立男¹ 季林红^{1,2}

中枢神经损伤性运动功能障碍患者的康复过程中需进行必要的运动刺激,以促进患者正常运动模式的再建立过程。康复机器人相对于治疗师可以更长时间为偏瘫患者提供更加精确和定量的运动刺激^[1-2]。在康复训练过程中,为了使患者与康复机器人之间建立更加适于患肢运动模式再学习的方法,以提高训练效果,目前许多研究机构都为此展开了相关的研究工作,并取得了一些有价值的成果^[3-4]。但在考虑机器人手臂动作的柔顺性的同时不能兼顾患肢自主循迹,以及在临床试验方面还存在一些不足。本文在清华大学研制的上肢复合运动神经康复机器人基础上,研究基于机器人辅助的患肢自主循迹训练控制方法。

1 上肢复合运动康复训练机器人

清华大学上肢复合运动神经康复机器人^[5-6]如图1所示,其主体结构包括:实现平面两自由度运动的机器人机械臂、位于机械臂端部用于固定患者腕部的固定托架、机械臂升降台、用于获取患者患肢运动过程的图像采集系统、两轴联动驱动系统和视觉反馈系统等。

图1 上肢复合运动康复训练机器人



2 对象与方法

2.1 对象

在2010年4月10日—2010年5月10日期间,对北京市第二医院的11例脑卒中偏瘫患者进行上肢复合运动康复机器人辅助自主循迹训练临床实验。入选条件:①发病时间

在8个月以上,之前1—2个月的康复记录显示,经过传统人工辅助康复训练,患者上肢运动功能简式Fugl-Meyer评价得分提高均不到1%(总分66分);②患者Brunnstrom III—IV期;③患肢近端关节无明显活动受限现象;④患者无视力、理解能力障碍,理解训练要求,接受动作指令;⑤患者了解训练条件和实验目的,同意参加训练和测试。11例患者中,男性6例,女性5例;年龄60 20(40—80)岁;左侧偏瘫6例;右侧偏瘫5例。

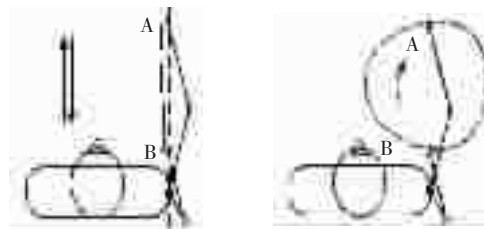
2.2 机器人辅助患肢自主循迹训练方案

11例患者均采用上肢复合运动神经康复机器人进行上肢康复训练,1次/日,每次训练持续20min,训练过程中均有专业的康复医师陪同。开始训练前用绑带将患者躯干固定在座椅上,患肢腕部固定于机器人机械臂端部的固定托架上。

患者处于恢复期,安排的训练内容为:机器人辅助患肢自主循迹训练模式下的推直线和推外圆两个动作(见图2),设计的目标运动轨迹都经过患肢的几何最远点A和靠近体侧的最近点B,动作速率为5m/min。每个训练动作连续重复2min,中间休息16min,推直线和推外圆两个训练动作分组进行,训练疗程为期1个月。

使用表面肌电信号采集仪(Noraxon Myosystem-2400)提取患肢在肱桡肌、肱二头肌、肱三头肌及三角肌前中后部位的表面肌电信号^[7-8]。训练时采集患肢的表面肌电信息,患者可以通过训练用户界面看到目标轨迹和实际轨迹的位置和偏差。

图2 训练运动中推直线和推外圆的轨迹



A:患肢的几何最远点; B:患肢靠近体侧的最近点

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2011.02.017

* 基金项目:国家科技支撑项目(2009BAI71B03)

1 清华大学精密仪器与机械学系,北京,100084; 2 通讯作者

作者简介:陈宏伟,男,博士后;收稿日期:2010-06-01

3 基于机器人辅助的患肢自主循迹控制策略

上肢康复机器人应能够实现控制机器人与外界环境之间的动态作用,即系统一方面要求机器人具有辅助患肢的可达性(以设定的速度、位置精度完成患肢的循迹运动),另一方面要求机器人在辅助患肢自主循迹训练的过程中适时调整驱动力矩,以体现患肢自主循迹的训练效果。

3.1 基于机器人辅助的患肢自主循迹控制模型

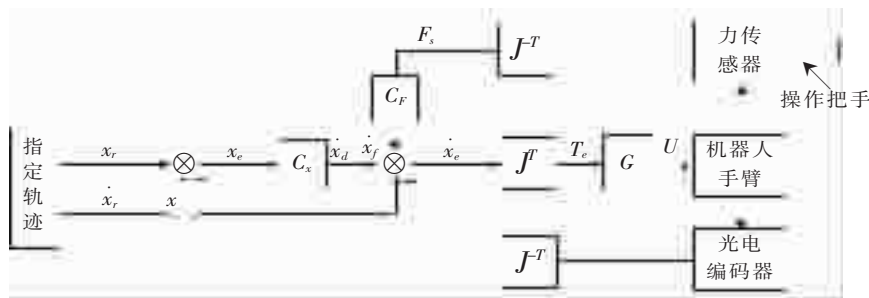
控制上肢康复机器人,要以患者的肌力输出(作用力)、指定训练轨迹以及实际的位置、速度等参数为目标进行控制。故本文基于机器人辅助患肢自主循迹训练控制,把系统

控制器设计为内环依赖于速度信号而外环基于位置信号的控制模型。该控制模型可表示为:

$$\dot{x}_e = \dot{x}_r - (x_r - x')C_x - F_s C_F \quad (1)$$

由于康复机器人机械臂在平面内工作,建立的控制系统模型的方框图,如图3所示。图3中, x_r, \dot{x}_r 为机器人工作空间采样时刻的理论位置和设定速度; F_s 为患肢对机器人的作用力; C_x 为位移与速度转换器; C_F 为力与速度转换器; G 为PI控制器; U 为电机的输入量; J^T 为规划坐标空间到工作坐标空间的雅可比转换矩阵(J^T 为逆矩阵)。

图3 系统控制简图



基于机器人辅助的患肢自主循迹控制在实际应用中可以使患者手臂以设定的速度并按照指定轨迹进行运动,同时,可根据患肢肌力的变化适时调整机械臂的输出力矩,充分挖掘患肢的自主运动能力。在系统控制模型的方框图中,速度内环使用了PI控制器 \$G\$,其主要作用是速度环闭合时消除速度误差,同时在没有力信号时($F_s=0$),PI控制器 \$G\$ 对位置和速度都有调节作用。

3.2 基于机器人辅助的患肢自主循迹控制模型的工作原理

患肢自主循迹训练过程中,依据控制系统中力闭环是否封闭,将自主循迹训练分为两种情况讨论。

3.2.1 力传感器信号 $F_s=0$ 时(力环自动断开)。这时,力传感器的反馈信号没有引入控制系统,也就是 $\dot{x}_e=0$,从而电机的输入量为:

$$U = [\dot{x}_r - (x_r - x')C_x] \cdot J^T \cdot G \quad (2)$$

机器人手臂的末端位置和运动速度由指定轨迹和设定速度决定,PI控制器对机器人手臂的位置、速度特性有一定的调节作用。

3.2.2 力传感器信号 $F_s \neq 0$ 时(力环接入控制系统)。这时,电机的输入值 \$U\$ 由设定速度值、指定轨迹位置以及 \$F_s\$ 共同决定的。

$$U = [\dot{x}_r - (x_r - x')C_x - F_s C_F] \cdot J^T \cdot G \quad (3)$$

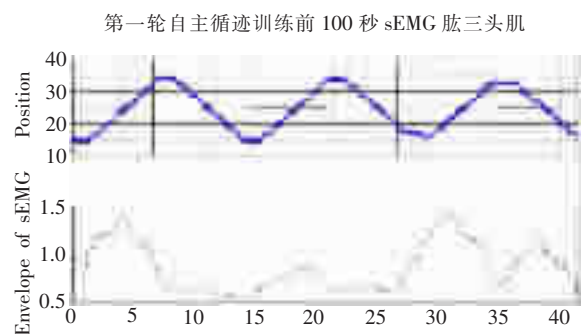
由速度误差 $\dot{x}_e = \dot{x}_r - \dot{x}_e - \dot{x}_e$ 并经过PI控制器 \$G\$ 产生电机的

输入值 \$U\$,从而实现了对位置和速度的跟踪控制。由3式可以看出:电机的输入值 \$U\$ 实现了随着患肢手臂的肌力 \$F_s\$ 的变化进行实时调整的功能。

4 临床实验结果

对11例患者进行为期一个月的机器人辅助自主循迹训练后,患者的上肢手臂做推直线和推外圆运动时,患肢肌力以及患肢协调运动功能的得到了很好的训练,没有患者出现不适现象。图4为某患者在自主循迹训练中推直线运动肱三头肌表面肌电(sEMG)与患肢手臂可达位置时刻的关系图,接受康复机器人辅助自主循迹训练的过程中,所考察患肢的肱三头肌肌电信号幅值变化明显,说明在推直线训练过程中肱三头肌有明显参与,肱三头肌肌力在第二周期减小后,患

图4 肱三头肌 sEMG 与手臂可达位置关系图



者手臂的位置显示,机器人辅助患者手臂完成了自主循迹运动,保证了患者手臂在推直线训练中的可达性。同时,患肢自主循迹训练的周期性明显,说明该控制方法实现了对患肢自主循迹训练的控制要求。

5 讨论

运动训练的目的,是为偏瘫患者创造一个适合运动模式再学习的环境^[9-11]。机器人辅助患肢自主循迹训练的控制方法实现了机器人与外界环境之间的动态相互作用,即机器人一方面具有辅助患肢的可达性(以设定的速度、位置精度完成患肢的循迹运动),另一方面在辅助患肢自主循迹训练的过程中适时调整机器人电机的驱动力矩,充分体现患肢自主循迹训练时的肌力作用效果。另外,机器人辅助患肢自主循迹训练可提高患者的肌力感觉,这对于培养患者自信心方面有较好的帮助。由于临床实验的对象肌力较弱,所以研究中尚未涉及阻抗模式下的自主循迹训练控制方法,如何进一步提高患者的主动参与意识,也是今后研究工作的方向。

参考文献

- [1] Reinkensmeyer DJ, Hogan N, Krebs HI, et al. Rehabilitators, robots, and guides: new tools for neurological rehabilitation. In: Winter J M and Crago P E, eds. Biomechanics and neural control of movement [M]. New York: Springer-Verlag, 2000. 516—533.
- [2] Reinkensmeyer DJ. Rehabilitators. In: Kutz M, eds. Standard Handbook of Biomedical Engineering & Design [M], Milan: McGraw-Hill, 2003. 1—17.
- [3] 张立勋,杨勇,张今瑜,等. 手臂康复机器人阻抗控制实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008, 29: 69—72.
- [4] 王岚,李趁前,刘艳秋,等. 基于力阻抗控制的手臂康复机器人实验研究[M]. 中国机械工程,2008, 19:1518—1522.
- [5] 谢群,季林红,王子羲,等. 上肢复合运动康复机器人的多位姿调整机构和控制系统设计 [C]. The 3rd Beijing International Forum on Rehabilitation, 2008, 577—583.
- [6] 王子羲,陈里宁,姚重阳,等. 上肢机器人辅助康复治疗中变换作业面对复合运动训练的影响[J].中国康复医学杂志, 2009, 25 (1):65—67.
- [7] 叶晓勤,季林红,谢雁鸣,等. 康复训练机器人与传统中医康复方法相结合的探讨 [J]. 中国康复医学杂志, 2010,25(8):781—784.
- [8] 黄立男,陈宏伟,叶晓勤,等. 经皮电神经刺激在机器人辅助上肢运动训练中对表面肌电信号的影响 [J]. 中国康复医学杂志, 2010, 25(10): 963—969.
- [9] Miltner WH, Bauder H, Sommer M, et al. Effect of constraint-induced movement therapy on patients with chronic motor deficits after stroke: a replication [J]. Stroke, 1999, 30: 586—592.
- [10] Taub E, Uswatte G, Pidikiti R. constraint-induced movement therapy: a new family of techniques with broad application to physical rehabilitation: a clinical review [J]. Rehabilitation of Research and Development, 1999, 38(3): 237—251.
- [11] Page SJ, Sisto SueAnn, Levine P, et al. Modified constraint induced therapy: a randomized feasibility and efficacy study[J]. Rehabilitation of Research and Development, 1999, 38 (5): 583—590.
- [1] plasma lipid levels but absence of a significant effect on glyceimic control[J]. Am J Obstet Gynecol, 1987,157(6):1359—1363.
- [8] Hardman AE, Hudson A. Brisk walking and serum lipid and lipoprotein variables in previously sedentary women—effect of 12 weeks of regular brisk walking followed by 12 weeks of detraining[J]. Br J Sports Med, 1994, 28(4):261—266.
- [9] Trenell MI, Hollingsworth KG, Lim EL, et al. Increased daily walking improves lipid oxidation without changes in mitochondrial function in Type 2 diabetes [J]. Diabetes Care, 2008, 31(8):1644—1649.
- [10] Mestek ML, Garner JC, Plaisance EP, et al. Blood lipid responses after continuous and accumulated aerobic exercise[J]. Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2006, 16(3):245—254.
- [11] Gotto AM Jr, Brinton EA. Assessing low levels of high-density lipoprotein cholesterol as a risk factor in coronary heart disease: a working group report and update [J]. J Am Coll Cardiol, 2004, 43(5):717—724.
- [12] Duffy D, Rader DJ. Emerging therapies targeting high-density lipoprotein metabolism and reverse cholesterol transport [J]. Circulation, 2006, 113(8):1140—1150.
- [13] Assmann G, Schulte H. Relation of high-density lipoprotein cholesterol and triglycerides to incidence of atherosclerotic coronary artery disease (the PROCAM experience). Prospective Cardiovascular Munster Study [J]. Am J Cardiol, 1992, 70(7): 733—737.
- [14] Nash MS, Jacobs PL, Mendez AJ, et al. Circuit resistance training improves the atherogenic lipid profiles of persons with chronic paraplegia[J]. J Spinal Cord Med, 2001,24(1):2—9.
- [15] 雒生杰,李寿霖,孟申,等. 青壮年男性四肢瘫痪患者血脂状况调查[J]. 中国康复医学杂志,2009,24(11):1009—1011.

(上接第155页)