

· 康复医学工程 ·

基于嵌入式计算机的上肢康复机器人虚拟现实训练系统研究

易金花 张颖 简卓 喻洪流

虚拟现实(virtual reality, VR)技术是利用计算机生成一种模拟真实事物的虚拟环境(如行走、跑步、取物、绘图等),并通过多种传感设备使用户“投入”到该环境中,实现用户与该虚拟环境直接进行自然交互的技术。研究表明,如果能够在训练过程中提供多种形式的信息反馈(如音乐、画面和语言提示等),充分发挥患者的主观能动性,并根据患者状态给予暗示或建议等,将会使康复效果得到很大提高^[1-3]。因此,研究者们设计了基于虚拟现实的康复训练系统,以激发患者进行康复训练的兴趣^[4-5]。随着相关学科的发展和研究的深入,康复机器人联合运用虚拟现实技术应用于脑卒中偏瘫患者上肢功能康复,是一个前景广阔的新兴方法^[6-8],能更好地改善患肢功能^[9-11]。

目前,国内外研究的具有虚拟现实功能的上肢康复机器人,大多基于 PC 设计,如苏黎世大学 Nef 等^[12]研制的一款上肢康复机器人 ARMin 和意大利 Technobody 公司生产的多关节训练系统 MJS(Multi-Joint System)。这 2 款机器人虽然能实现上肢功能障碍患者和虚拟环境的交互,激发上肢功能障碍患者的康复训练兴趣,但由于虚拟现实控制系统基本都是由键盘和鼠标操作,且医护人员要时刻了解上肢功能障碍患者的康复情况,因而在进行康复训练时需要医护人员对机器人进行操作和全程陪同,这种情况不仅会降低医护人员的工作效率,还会限制上肢功能障碍患者对机器人控制的主动性。因此,虚拟现实技术在嵌入式计算机上的开发将会是一项新的突破,嵌入式计算机不仅能提供虚拟现实所需的硬件设施,还能集触摸和无线操控为一体,使得虚拟现实技术具有移动性和便携性,大大方便了医护人员及患者对上肢康复机器人的操控。本研究主要针对上肢功能障碍患者,提出设计一款基于嵌入式计算机的上肢康复机器人虚拟现实训练系统。

总体设计方案

基于嵌入式计算机的上肢康复机器人虚拟现实训练系统的总体方案:上肢功能障碍患者在上肢康复机器人上进行上肢康复训练。患者可以在嵌入式计算机的虚拟现实游戏界面上触摸选择康复游戏,在进行康复训练的同时,上肢关节的运动信息通过与上肢功能障碍者相连的上肢康复机器人上的角度传感器进行检测;上肢康复机器人将得到的角度信息通过无线传输到上肢功能障碍者用的嵌入式计算机中,与虚拟现实场景进行匹配,完成上肢功能障碍患者进行虚拟现实游戏的视觉反馈和基于嵌入式计算机的上肢康复机器人虚拟现实训练,进而达到患者上

肢康复的目的。系统总体结构框图如图 1 所示。

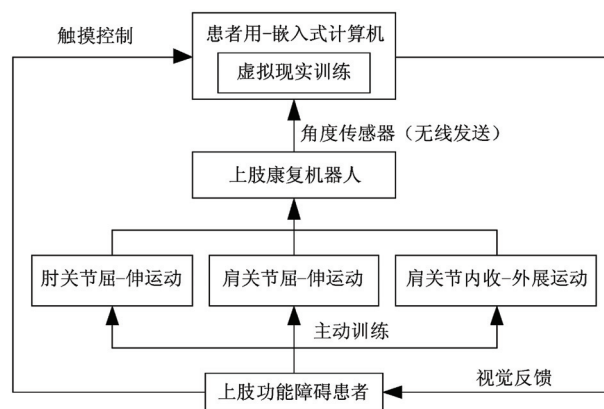


图1 系统总体结构框示意图

结构设计

本研究设计的基于嵌入式计算机的上肢康复机器人虚拟现实训练系统,其系统结构由上肢康复机器人、电气箱、嵌入式计算机和机架组成,总体结构示意图如图 2 所示,实物图如图 3 所示。

上肢康复机器人能带动上肢功能障碍患者实现空间 3 个自由度的运动,包含肘关节屈-伸自由度(活动范围 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$)、肩关节内收-外展自由度(活动范围 $-45^{\circ} \sim 180^{\circ}$)和肩关节曲伸自由度(活动范围 $-45^{\circ} \sim 180^{\circ}$);同时每个关节均安装有光电编码器,能时刻测量得到各关节转动的速度与角位移。

电气箱中主要是集中放置步进电机、减速箱、变压器、步进电机驱动器等为上肢康复机器人运动提供动力的电气装置以及控制整个系统的硬件设施。嵌入式计算机是搭建虚拟现实训练系统的平台,为实现虚拟现实的触摸控制与开发虚拟现实场景提供硬件基础。机架主要起固定嵌入式计算机的作用,可以根据功能障碍者需求调整嵌入式计算机的位姿,便于上肢功能障碍者控制。

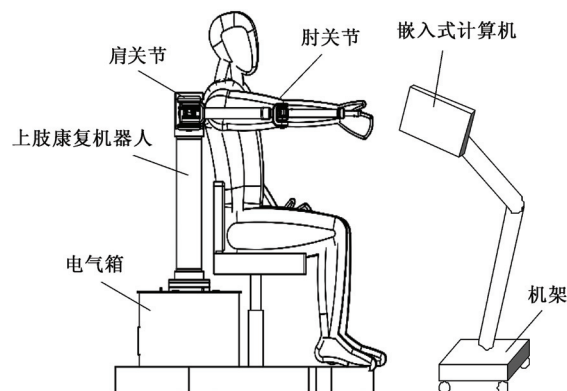


图2 系统总体结构示意图

DOI:10. 3760/cma. j. issn. 0254-1424. 2014. 08. 020

基金项目:上海科技支撑项目(12441903400);上海市研究生创新基金项目(JWCXSLI302)

作者单位:200093 上海,上海理工大学医疗器械与食品学院康复工程与技术研究所

通信作者:喻洪流, Email: yhl98@ hotmail. com

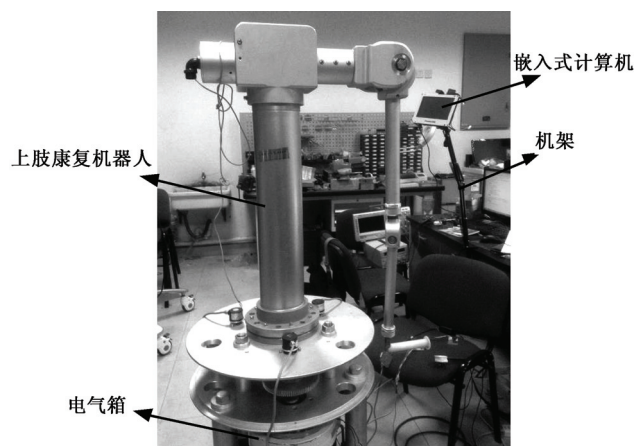


图3 系统总体实物图

基于嵌入式计算机的虚拟现实训练系统设计

一、嵌入式计算机及其开发环境

本研究选用的嵌入式计算机是基于友善公司推出的 mini210 开发板,该开发板以 S5PV210 微处理器为主控芯片进行设计,配备 7 寸电阻式触摸屏(分辨率 800 像素 × 480 像素);该计算机上新增自制的无线通信模块,增加嵌入式计算机的无线通信功能。

本研究搭建的嵌入式 Linux^[13] 应用程序开发环境包括 GUN/Linux 操作系统选择 Ubuntu12.10;文本编辑软件使用 Vim,编译器使用的是 gcc/g++ 编译器;图形用户界面的制作使用 Qt;开发语言为 C++;串口调试终端使用 Minicom。

二、虚拟现实游戏设计

为提供上肢功能障碍者的视觉反馈效果,使上肢功能障碍患者能够看到训练时关节运动对应在虚拟现实中的情况,同时为激发功能障碍者康复的兴趣,提高功能障碍者进行康复训练的主动性,本研究基于嵌入式计算机设计了一个名为反弹球的康复训练游戏。该游戏是通过 Qt 程序社区提供的开源游戏 QBall 进行移植而实现的。

本研究设计反弹球共有 3 关,每关有 3 个球,3 个球均用完为游戏结束。该游戏主要是通过某一个关节运动,控制一个可以左右移动的挡块水平运动。挡块将落下的红球反弹回去,撞击上方各种颜色的积分块使它们消失,不同颜色的积分块会有不同的得分,积分块全部消失即进入下一关,游戏结束时给出最终得分。

原始的 QBall 游戏只允许使用触摸屏、计算机键盘或鼠标进行控制,本研究则需要使用各关节真实的运动信息来控制游戏中虚拟的挡块进行左右移动,所以程序移植的工作主要集中在关节运动与挡块位置之间的关联。在具体的程序中,嵌入式计算机在获得关节运动信息后,发出信号函数为 UpdateStat-Data(float),该信号函数与槽函数 UpdateGameData(float) 连接在一起,同时,该信号函数将调用自定义类 GameState() 的成员函数 UpdatePos(newLoc),并将新的关节运动信息传递给 newLoc 参数。在 UpdatePos(newLoc) 函数中,关节的运动位置将换算成游戏中挡块的 X 轴坐标位置。本研究设计的反弹球游戏中,由于嵌入式计算机屏幕分辨率为 800 像素 × 480 像素,因而挡块的 X 轴活动范围为 0 ~ 800 像素。对于肘关节屈-伸运动来说,

其活动范围为 0° ~ 90°。假设采集到的关节位置用 loc 表示,那么换算成挡块的 X 轴坐标值为公式(1):

$$X_d = loc \times (800/90) \quad (1)$$

其中, X_d 表示虚拟现实中的挡块的位置。

对于肩关节屈-伸运动来说,其活动范围为 -45° ~ 180°,则 X 轴坐标值为公式(2):

$$X_d = loc \times (800/225) + 160 \quad (2)$$

由于肩关节内收-外展运动与肩关节屈-伸运动的活动范围一样,因此 X 轴坐标值计算公式与肩关节屈-伸运动得到的坐标值计算公式一样。

在计算完成之后,程序根据反馈的关节运动信息计算出挡块的 X 轴坐标值后,将会在新的坐标值绘制挡块图形,使得挡块在视觉上会跟随关节运动而左右移动,从而实现其在康复训练中的应用。游戏的难易取决于反弹球的速度,反弹球速度越快,要求上肢功能障碍患者关节活动给的速度就越快。反弹球游戏设计界面如图 4 所示。

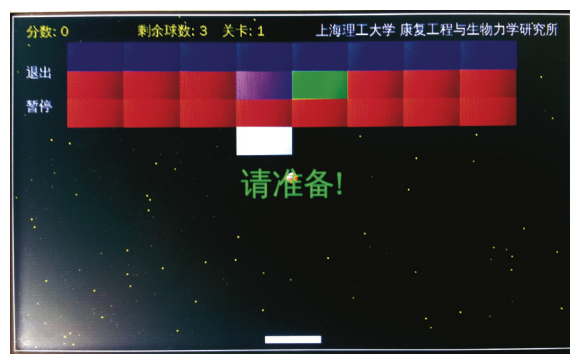


图4 反弹球康复训练游戏界面

三、关节运动信号采集

本研究采用分辨率为 1000 脉冲数/转的增量式光电编码器,该光电编码器可得到的最小角度为 0.36°。

1. 方向判断:编码器产生 A、B 相正交脉冲的先后情况可以用于判断被测转轴的旋转方向。在 A 相脉冲的下降沿,若 B 相为高电平,则为正向旋转,若 B 相位低电平,则为反向旋转;在 A 相脉冲的上升沿,若 B 相为低电平,则为正向旋转,若 B 相位高电平,则为反向旋转。

2. 角位移测量:为了提高测量精度,本研究使用 2 倍频法采集 A、B 相的数据。2 倍频法是指在 A 相或 B 相的上升沿和下降沿均对数据进行采集,能够将分辨率提高一倍。编码器每旋转一周产生的 1000 个 A 相或 B 相脉冲会分别产生 2000 个上升沿或下降沿,对这 2000 个电平变化都进行采集使得得到的最小角度值为 0.18°。关节角位移计算与其旋转方向有关,正向旋转时角位移计数值增加,反向旋转时则应该减小,所以主要处理过程同样是在通用定时器的捕获中断服务函数中,需要与方向判断函数配合设计。

四、无线通信接口设计

对于上肢功能障碍患者使用的嵌入式计算机,无线传输的上肢康复机器人关节运动的角位移值将与虚拟现实中的游戏目标运动进行匹配,实现患者的虚拟现实训练功能。

嵌入式计算机与上肢康复机器人中的无线通信模块配对,硬件上没有区别且通用。本研究使用 Silicon Labs 公司生产的

无线收发芯片 Si4432 设计无线通信模块。软件方面,本研究利用嵌入式 Linux 内核中的 SPI 设备驱动架构,实现读写 Si4432 数据的功能模块。

在嵌入式计算机中,若要使用主控芯片 S5PV210 的串行外围设备接口 SPI(serial peripheral interface)来控制无线通信模块进行收发,需要实现 2 个驱动程序。其中 1 个是 S5PV210 的 SPI 外设模块的控制器驱动程序,该驱动程序实现了操作 S5PV210 的 SPI 外设模块的函数接口,通过这些接口可以使用其 SPI 外设模块进行数据的收发。该驱动程序由三星官方集成于嵌入式 Linux 内核中,可以直接使用。另 1 个则是无线通信模块在嵌入式 Linux 中的设备驱动程序,该驱动程序需要定义好 Si4432 无线收发芯片的 SPI 特性参数,并提供 S5PV210 的 SPI 控制器对 Si4432 无线收发芯片读、写的功能函数接口。本研究具体实现的函数接口主要包括 `spi_si4432_open()`, `spi_si4432_read()`, `spi_si4432_write()`, `spi_si4432_interrupt()`, `spi_si4432_ioctl()`, `spi_si4432_poll()`, `spi_si4432_probe()`, `spi_si4432_message()` 等。

实 验

在完成虚拟现实游戏设计、关节运动信号采集和无线通信接口设计之后,本研究通过上肢康复机器人实验样机,选用上肢功能正常的人(实验者)对虚拟现实在嵌入式计算机上应用的可行性以及本研究设计的上肢康复机器人虚拟现实训练系统的合理性进行验证。

由于反弹球康复训练游戏是平面(一维)运动,且在样机实验过程中,选用实验者的肩关节屈-伸运动来做实验,因此,在程序设置中,将肩关节屈-伸运动的信号传递给 `UpdatePos(newLoc)` 函数中的 `newLoc` 参数,实现挡块的左右移动。实验者在游戏开始前先启动无线通信,再在嵌入式计算机中通过触摸操作选择开始新游戏后,运行游戏。在游戏过程中,实验者上臂伸展对应反弹球游戏中挡块的左移,上臂屈曲对应反弹球游戏中挡块的右移,进而完成一维的虚拟现实康复训练。样机实验如图 5 所示。

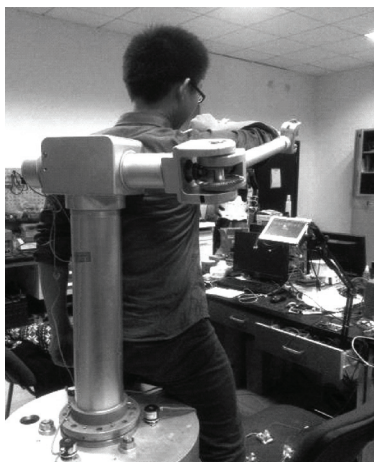


图 5 虚拟现实样机实验

在进行游戏训练时,本研究将肩关节屈-伸运动的信号通过上位机调试串口输出,直至游戏结束,肩关节屈-伸运动角度值

曲线如图 6 所示。

由图 5 可以看到,实验者肩关节的屈-伸运动能带动反弹球虚拟现实游戏中挡块左右移动,实现了基于嵌入式计算机的虚拟现实训练功能,同时也验证了无线通信接口设计的可行性。从图 6 可以看出,在虚拟现实游戏的激发下,实验者在不断的进行肩关节的屈-伸训练,同时,从串口发出的肩关节屈-伸运动角度值完全在 $-45^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内,满足结构设计的运动范围。

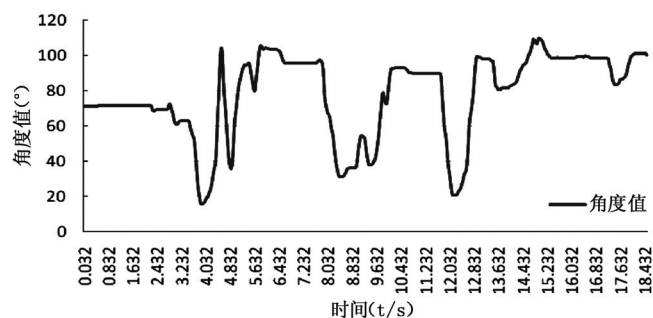


图 6 肩关节屈-伸运动的时间-角度值曲线

结 论

本研究通过在嵌入式计算机上开发虚拟现实游戏,同时设计嵌入式计算机与机器人之间的无线通信接口和关节运动信号的采集,完成了基于嵌入式计算机的上肢康复机器人虚拟现实训练系统设计。实验者在上肢康复机器人样机上进行反弹球虚拟现实实验,结果表明,实验者肩关节屈-伸运动能带动挡块左右移动,同时通过串口得到的肩关节屈-伸运动曲线在设计运动范围之内,验证了虚拟现实在嵌入式计算机上应用的可行性及上肢康复机器人虚拟现实训练系统的合理性。由于本研究目前仍处于实验阶段,因而选择健全人进行样机实验。希望通过不断完善和优化,该系统能较好地用于上肢功能障碍患者的上肢康复训练,改善其患肢功能。

参 考 文 献

- [1] Rionef R, Wellner M, Nef T, et al. A view on VR-enhanced rehabilitation robotics [C]. New York: Proceeding of 5th International Workshop on Virtual Rehabilitation (IWVR 2006), 2006: 149-154.
- [2] Cardoso LS, da Costa, Piovesana A, et al. Using virtual environments for stroke rehabilitation [C]. New York: Proceeding of 5th International Workshop on Virtual Rehabilitation (IWVR 2006), 2006: 1-5.
- [3] 周柳, 王英华, 刘强, 等. 虚拟现实技术在运动康复中的应用 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(5): 957-960.
- [4] Hodges LF, Anderson P, Burdea GC, et al. Treating psychological and physical disorders with VR [J]. IEEE Comput Graph, 2001, 21(6): 25-33.
- [5] Harwin WS, Patton JL, Edgerton VR. Challenges and opportunities for robot-mediated neurorehabilitation [J]. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng, 2006, 94(9): 1717-1726.
- [6] 岳红, 王小龙, 张娟. 虚拟现实在手臂外骨骼康复系统中的应用 [J]. 科技通报, 2006, 22(1): 112-114.
- [7] Kiper P, Piron L, Turola A, et al. The effectiveness of reinforced feedback in virtual environment in the first 12 months after stroke [J]. Neurol Neurochir Pol, 2011, 45(5): 436-444.

- [8] 李成梁,赵翠莲,胡世东,等. 一种支持代偿运动识别的上肢虚拟现实训练方法[J]. 中国康复医学杂志,2012,27(8):732-737.
- [9] 徐丽丽,吴毅. 虚拟现实技术在脑卒中患者手功能康复中的应用[J]. 中华物理医学与康复杂志,2007,29(2):136-137.
- [10] Merians AS,Jack D,Boian R,et al. Virtual reality-augmented rehabilitation following stroke[J]. Phys Ther,2002,82(9):898-915.
- [11] 李红玲. 虚拟现实技术及其在康复医学中的应用进展[J]. 中华物理医学与康复杂志,2013,35(5):414-416.
- [12] Nef T,Mihelj M,Colombo G,et al. ARMin-Robot for rehabilitation of the upper extremities[C]. Orlando: Proceeding of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006),2006:3152-3157.
- [13] 邓冬梅,杨铁林. 嵌入式系统和 Linux[J]. 计算机与现代化,2004,20(12):50-52.

(修回日期:2014-06-15)

(本文编辑:汪 玲)

· 短篇论著 ·

低能量激光治疗颈椎病的疗效观察

王勇军 杜金刚 孙长城 高艳青

当颈椎间盘、椎体及其骨关节、软骨、韧带、肌肉、筋膜等组织发生原发性或继发性退行性改变时,将会导致与其相邻的神经根、血管(主要是椎动脉)、交感神经、脊髓等组织受到压迫和刺激,进而引起相应的临床症状与体征^[1-2]。随着生活节奏的加快和工作方式的变化,颈部屈曲的频率不断增高,导致颈椎病的发病率上升,且发病年龄呈现出年轻化趋势,对人类健康造成了很大威胁,严重影响人们的正常工作及生活^[3]。目前,治疗颈椎病颈部疼痛的方法较多,如药物、针灸、直流电离子导入等,有关低能量激光治疗颈椎病颈部疼痛的研究尚较为少见^[4-5]。为此,本研究采用低能量激光治疗颈椎病颈痛患者,旨在为患者提供方便、安全的新型治疗技术。

一、对象与方法

(一)一般资料

选取 2013 年 1 月至 2013 年 8 月在我院门诊就诊的颈椎病患者 60 例。入选标准:①符合中华医学会《临床诊疗指南-疼痛学分册》制订的颈椎病诊断标准^[1];②主诉为颈部疼痛;③近 3 个月或以上有颈部疼痛发作史,且未接受过相关治疗;④意识清楚,无失语、无智能障碍,能配合治疗;⑤均签署治疗知情同意书。排除标准:①有颈部外伤史、骨折史或手术史者;②神经功能缺损(如肌无力或脊髓神经反射检查异常)、先天性脊椎异常、系统性骨关节疾病者;③脊髓型颈椎病患者;④合并严重心脑血管、肝、肾、造血系统疾病者;⑤孕妇、发热、凝血功能障碍者;⑥有药物及光过敏史;⑦甲状腺疾病及恶性肿瘤患者。按照随机数字表法将患者分为对照组和治疗组,每组 30 例。2 组患者性别、年龄、病程、颈椎病分型等一般资料比较,差异无统计学意义($P>0.05$),具有可比性,详见表 1。

(二)治疗方法

1. 药物治疗:给予对照组患者双氯芬酸钠缓释片治疗(北京产),批准文号为国药准字 H10980297,规格 75 mg/片,每日口服 1 次,共 7 d。

2. 低能量激光治疗:采用北京产 SUNDOM-3001B 型半导体激光治疗机,波长 810 nm,探头内包含 6 个光束,每个光束的输

表 1 2 组患者一般资料比较

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)
		男	女	
对照组	30	14	16	43.1 $\pm$ 14.2
治疗组	30	17	13	42.2 $\pm$ 13.1

组别	例数	病程 (月, $\bar{x} \pm s$)	颈椎病分型(例)		
			颈型	神经根型	椎动脉型
对照组	30	10.4 $\pm$ 7.4	14	10	6
治疗组	30	11.3 $\pm$ 8.2	15	9	6

输出功率为 200 ~ 500 mW,连续可调,最小输出 200 mW,最大输出 3000 mW。工作环境:温度 5 ℃ ~ 40 ℃,相对湿度 < 80%,电压(220 $\pm$ 22) V,频率(50 $\pm$ 1) Hz。操作方法:将主机钥匙从“O”旋转至“I”位置,LCD 液晶面板显示开机后,默认连续工作方式,设定总时间和总功率,将探头中心对准 C₇ 棘突,距离皮肤 3 cm,光照半径 5 cm。按下待机键,治疗机发出声音信号后,进入待机状态,再按下启动键,待液晶屏启动后,探头开始输出激光,治疗完成后,激光停止输出,治疗师将主机钥匙从“I”旋回至“O”位置。每次治疗用 6 个光束,功率 2300 mW,10 min/次,每日 1 次,共 7 d。

(三)临床疗效评定

治疗前、治疗 7 d 后及治疗后 1 周采用神经病理性疼痛量表(neuropathic pain questionnaire, NPQ)和简化 McGill 疼痛问卷(short-form of McGill pain questionnaire, SF-MPQ)对 2 组患者的疗效进行评定。症状基本消失或明显减轻,肌力正常,颈部、肢体功能基本恢复正常,能正常参加劳动和工作, NPQ 评分较治疗前下降 20% 以上评定为有效;症状无改善或改善不明显, NPQ 评分无变化或较治疗前下降低于 20% 评定为无效^[6]。

(四)统计学分析

采用 SPSS 11.0 版统计学软件对数据进行处理,数据采用($\bar{x} \pm s$)形式表示,计量资料采用 t 检验,计数资料采用卡方检验,组内比较采用配对样本 t 检验,组间比较采用独立样本 t 检验, $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

二、结果

治疗前,2 组患者 NPQ 评分、McGill 评分间比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。治疗 7 d 后,2 组患者 NPQ 评分、McGill