·康复工程·

# 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*

肖喜玲[1] 杨朝辉[1,4] 黄 剑[2] 黄厚瑞[2] 王 双[1] 夏晓萱[1] 王 刚[1] 陈振兵[3]

**摘要**

**目的:**根据手外伤后手功能障碍的特点,基于虚拟现实技术研制出一种增强手部肌力和协调性的手功能康复训练系统。

**方法:**通过贴片式压力传感器实时采集患手的力学信息,将其输入到虚拟现实环境中驱动虚拟环境的运行,该系统能够智能设置虚拟环境中执行任务的难度,根据采集到的力学信息作出相应的康复评价。本文从总体构思,系统的组成和功能设计,系统实现所采用的力传感器模块、采集模块、虚拟现实模块和评估模块开发等方面进行介绍,并进行了初步的临床对照试验。

**结果:**研制出基于虚拟现实技术的手功能康复系统;通过2周的临床试验,试验组在侧捏力(0.64±0.75N vs 0.09±0.21N)、握力(2.14±1.57N vs 0.81±1.00N)、ADL评分(3.44±2.45 vs 0.67±2.82)方面改善均优于对照组($P$<0.05)。

**结论:**该系统具有成本低、结构简单、易于维护、安全性高等特点,有助于推动虚拟现实技术在手功能康复治疗领域中的应用。

**关键词** 手外伤;虚拟现实;捏力;手康复

**中图分类号:**R496 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2014)-06-0537-05

**Design and clinical application of a hand function rehabilitation system based on virtual reality technology/XIAO Xiling, YANG Zhaohui, HUAGN Jian, et al.//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2014, 29 (6): 537—541**

**Abstract**

**Objective:** To design a hand function rehabilitation system based on virtual reality technology to enhance hand strength and coordination in patients with hand dysfunction after hand injuries.

**Method:** The force information of affected fingers was online sampled by strain gauges and fed into the virtual reality (VR) game environment as a control input. The system could set the level of virtual game intelligently, and make rehabilitation evaluation according to the sampled strength information. The design and building of a virtual reality technology-based rehabilitation system for patients with hand injury was presented, including overall idea, functional design and structure of the system. And the key technology to achieve system implementation, such as the force sensor module, collection module, virtual reality module and evaluation module, were discussed in detail. A clinical controlled trial was conducted in patients with hand injuries.

**Result:** A system for hand rehabilitation was developed based on virtual reality. The difference of lateral pinch strength (0.64±0.75N vs 0.09±0.21N),grasp strength(2.14±1.57N vs 0.81±1.00N) and ADL(3.44±2.45 vs 0.67±2.82)between the trial group and control group had statistical significance($P$<0.05).

**Conclusion:** The advantages of this system include low cost, ease of manufactory, maintenance and good securi-

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2014.06.008

*基金项目:华中科技大学自主创新基金学科交叉项目(2011JC072)

1 华中科技大学同济医学院附属协和医院康复科,430022; 2 华中科技大学控制科学与工程系; 3 华中科技大学同济医学院附属协和医院手外科; 4 通讯作者

作者简介:肖喜玲,女,硕士,主治医师;收稿日期:2013-08-28

ty. So, it will have a good prospects in hand function rehabilitation field.

**Author's address** Dept. of Rehabilitation Medicine, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology,430022

**Key word** hand injury; virtual reality; pinch strength; hand rehabilitation

手是身体最常见的受伤部位，由于手部解剖精细、复杂，导致手外伤后手功能难以恢复，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术后患者的手部肌力、关节活动范围，以及手指的协调性、灵活性就显得尤为重要。

虚拟现实(virtual reality, VR)技术的出现促进了计算机技术和康复医学在更高层次的结合。VR技术通过提供对策模拟环境，使单调的重复训练趣味化[1]。研究表明，基于虚拟现实技术的人工智能康复治疗系统通过提供实时反馈、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，大大提升患者主动参与康复训练的积极性，从而促进患者运动功能恢复[2—3]。然而，目前的VR运动康复治疗系统主要应用于改善偏瘫患者的肢体功能障碍[4—5]。基于虚拟现实技术的手外伤后手部肌力和协调性训练系统，国内鲜有报道。因此，本文设计了一套简单易行的虚拟现实手功能康复训练系统，旨在提高手外伤后手部肌力以及手的协调性，促进手功能恢复。

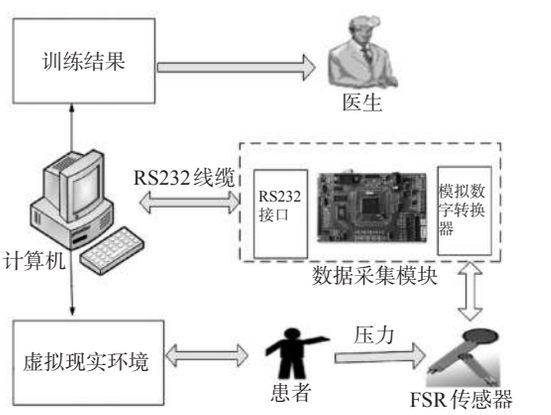
## 1 总体设计思想

根据手外伤后手功能障碍特点，在虚拟现实建模的基础上，实现人机交互的手功能康复训练和评估，本文设计的系统能满足以下要求：①设计摇杆作为触觉装置，结构简单、使用安全，不存在穿戴困难；②开发出适合于手外伤人群的虚拟环境，增加趣味性，提高患者主动参与康复训练的积极性；③能实时反馈患手握力、捏力等成绩，维持重复训练的动机；④使用力传感器实现测量手的握力、捏力，降低产品的成本。

## 2 基于虚拟现实技术的手功能康复训练系统的构成及功能设计

本系统包括力传感器模块、采集模块、虚拟现实模块和评估机制4大模块，系统原理图见图1。手功能康复训练内容包括捏力训练、握力训练、手的协调性训练3个方面。在训练过程中，力传感器实时读取患手的捏力或握力大小即力觉信息，同时采集模块会完成对力传感器数据的采集工作，采集周期为30ms。该数据信息由单片机C8051F410通过串口读取，单片机通过RS-232串口转USB线与计算机之间完成数据和指令的传输。计算机接收力觉数据信息后，虚拟现实模块将完成对此数据的分析操作、存储读取、按需回放等一系列操作。分析操作主要是根据患手力觉信息的变化，在虚拟环境中结合丰富的动画功能、文字提示功能和3D声音定域功能给予相应的反馈，增强患者的沉浸感，使之在轻松、愉悦的心情下完成康复训练过程。存储读取功能是指在患者完成一次康复训练之后，保存其相关康复数据，以便在下一次康复训练之初，读取其以前的数据，智能设置虚拟环境的级别和难度水平。按需回放是指根据患者的若干次的康复训练数据，进行康复效果评估。此外，该虚拟环境还限制了患者的训练时间，即训练10min后系统设置自动休息1min，然后继续训练10min后自动结束训练，以避免训练量过大而造成肿胀、疼痛加重等负面效果。

**图1 系统原理示意图**



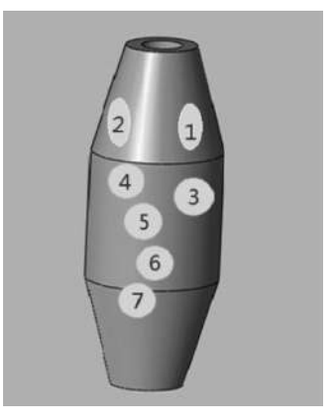

## 3 系统各模块功能分析

### 3.1 力传感器模块

本系统的力传感器选用由Interlink Electronics公司生产的压力感应电阻(Force Sensing Resistor,FSR),FSR是一种随着有效表面上压力增大而输出阻值减小的高分子薄膜(PVDF薄膜),在其有效的作用面积之内,相同的接触面积下,压力越大阻值越小。而FSR的电导值与压力之间并非线性关系。因此,本文采用数据拟合的方法来实现对FSR特性的标定。通过实验测出一系列(FSR阻值,压力)采样数据,再通过matlab拟合得出FSR基于阻值和压力的回归方程。

在康复训练阶段,把力传感器黏贴在专为手外伤患者设计的类椭球形摇杆结构上(图2),以便患手握取。为满足拇指腕掌关节外展活动度不同大小的需求,摇杆设计为"上小下大"的形状,其尺寸大小参考5例手外伤患者的测量数据而综合得出。压力传感器的位置见图1(以右手为例),其中图示传感器1、2处适合拇指腕掌关节外展活动严重受限时使用,分别为拇指、示指所用力的部位,传感器4—6为中、环、小指指腹用力部位;对于拇指腕掌关节外展活动无明显受限时,3—7分别对应1—5指。该力传感器可感知的力觉信息范围为1—100N。患者可完成侧捏、指腹捏及握持的肌力训练任务。力传感器可感知患手力觉信息的变化,并由采集模块完成对此变化的采集,交予虚拟现实模块进行处理。

**图2 力传感器位置示意图**




### 3.2 采集模块

本采集模块完成对力传感器感知的患手力觉信息的采集。该模块主要由C8051F410单片机构成,该单片机属于Silicon Labs的小外形微控制器系列。它在极小的封装中集成了高速8051 CPU、Flash存储器和高性能模拟电路,设计者可在提高系统整体性能的同时,大大减少所需元件的数目。该采集卡通过USB转串口线与计算机建立连接,实现与计算机之间数据和指令的传输。根据手功能评定结果,选择需要训练的手指,并设置其接触的压力传感器为有效传感器,将有效传感器采集的力量取平均值定义为$\overline{F}$,则有:

$$\overline{F}=[\sum(F_{ACTIVE(i)})]/n \quad (1)$$

i={1、2、3、4、5、6、7},$F_{ACTIVE(i)}$为FSR采集的有效力量,n为有效传感器的个数。

采集模块将以30ms为周期采集力传感器的数据信息,即患手的力觉信息,并通过串口通信传给上位机的虚拟现实模块进行分析处理。

### 3.3 虚拟现实模块

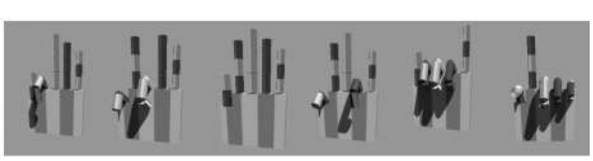
本系统的虚拟现实模块使用NeoAxis引擎完成。该引擎的最大特点是它的灵活性、强大的编辑工具和易于使用的素材流水线,能较好地完成具有优秀图形界面和高效率性的任何3D虚拟环境[6]。

目前已完成实地射击(图3)、手势变换(图4)、赛车等虚拟环境。这些虚拟环境使用多线程实现,主线程完成虚拟元素的载入和绘制以及鼠标键盘消息的响应,新线程完成力觉信息的读取和处理。训练开始时,根据患手的力量情况设置炮弹发射的阈值$F_t$,如果满足条件

**图3 实地射击虚拟环境**



**图4 手势变换实时运行画面**



$$\overline{F} \geq F_t \quad (2)$$

则坦克成功发射炮弹，射击目标。且随着手功能的恢复，可调节$F_t$的大小。通过腕关节尺偏或桡偏、背伸或掌屈、前臂旋前或旋后驱动摇杆的旋转来控制坦克的瞄准位置，同时摇杆的移动速度可根据患手现有功能状况进行相应调整。根据炮弹击中虚拟环境中其他角色的次数决定训练任务难易程度的进级。

手势变换虚拟环境实时运行画面见图4，此虚拟环境根据黏贴在摇杆上的5个力传感器所读取的力觉信息的大小作为区分手势变换和单个手指是否运动的标准。患者需实时地根据虚拟环境中虚拟手的各手指活动及手势变换（如“剪刀、石头、布”等），相应地对患手单个手指或手势进行调整以完成康复训练。此虚拟环境主要用于肌腱滑动练习和改善手的协调性、灵活性训练。

**3.4** 评估机制模块

根据康复系统采集数据的不同会形成基于位置、速度、力等数据量的各种评估策略[7]。因手指属于“小关节”，其位置和速度变化不如肩等“大关节”明显，故本系统将使用基于力场的评估策略，患手的力觉信息作为评估患手康复程度和训练情况的主要量化指标。

训练中，显示屏实时反馈击中目标的数目、力觉信息，并且在患者成功击中目标后系统给予正反馈的语音鼓励。训练结束后，系统会自动反馈本次任务完成情况，如击中目标数、训练时间、捏力/握力平均值等，同时将反馈信息储存在以患者注册名命名的TXT文件中，以方便治疗人员进行评定分析。

## 4 临床应用情况

为评价该手功能康复系统的安全性和有效性，客观评价该康复系统的临床实用价值，我们进行了小样本的临床观察试验。

**4.1** 参与者及分组

入选标准为：①年龄16—75岁；②受伤时间为手外伤术后4—8周；③病情稳定（肌腱损伤修复术后4周、神经修复术后6周、骨折术后4周），允许患手开始渐进性抗阻运动；④均签署知情同意书。排除标准：不能配合主动训练者或病情不稳定者。

选择2012年6月—2013年6月在我科诊治的手外伤患者53例，最终符合条件者为26例。按计算机产生的随机数字表，将其随机分为治疗组（虚拟现实组）和对照组（传统康复组）。其中对照组2例、治疗组1例因未坚持完成2周的治疗而中途退出，他们的资料未记录。两组均进行常规理疗及关节松动治疗，在此基础上试验组采用手功能康复训练系统进行训练，对照组采用传统的方法进行，即依靠治疗师徒手辅助或借助弹力带、橡皮泥等进行渐进抗阻肌力训练。两组治疗时间均为1次/d，20min/次，5次/周，疗程2周。

**4.2** 评定

在患者治疗前和疗程结束后分别进行评定，包括手部肌力(包括掌捏力、侧捏力、三指捏力、握力)，手的协调灵活性（九孔木钉板试验)，手日常生活活动能力（activities of daily living，ADL）评分[8]。记录在整个治疗期间出现的任何不良反应（包括发生时间、严重程度、持续时间、采取的措施、转归、与试验的关系）。

**4.3** 结果

①治疗前后组内比较：试验组患者第2周末单位时间击中目标个数均较训练前增加（$P$=0.000）、单次VR训练的平均捏力在第2周末均较训练前增强（$P$=0.008）（见表1），两组患者治疗2周后掌捏力、侧捏力、三指捏力、握力、手的协调灵活性、手的ADL评分均较训练前增加（$P$<0.01），表明计算机评估与临床评估结果具有一致性；②治疗后组间比较：治疗组在侧捏力（0.64±0.75N vs 0.09±0.21N）、握力（2.14±1.57N vs 0.81±1.00N）、ADL评分（3.44±2.45 vs 0.67±2.82）方面的进步优于对照组，且差异有显著性意义($P$<0.05)；③所有受试者在治疗过程中均未发生严重不良反应，试验组中1例在训练15min后感手与摇杆接触处疼痛，局部皮肤略发红，调整训练的难度等级后未再出现疼痛不适；④患者及治疗师一致认为VR手功能康复训练系统较传统治疗趣味性强，操作简单、方便，对其满意度较高。

## 5 讨论

手外伤属于外周骨骼肌肉系统病损，造成手的解剖结构破坏，其常见的功能障碍为伤口愈合障碍、

表1 治疗前、治疗2周后单位时间击中目标个数及平均捏力变化

| 试验组患者 | 单位时间击中数（个/min） | | 平均捏力（g） | |
|---|---|---|---|---|
| | 治疗前 | 治疗2周后 | 治疗前 | 治疗2周后 |
| 1 | 6.00 | 13.76 | 24.55 | 34.12 |
| 2 | 3.82 | 14.40 | 64.04 | 120.91 |
| 3 | 10.23 | 12.07 | 113.16 | 222.75 |
| 4 | 15.26 | 19.90 | 143.86 | 349.62 |
| 5 | 3.39 | 17.27 | 21.83 | 28.02 |
| 6 | 39.00 | 60.33 | 77.42 | 400.21 |
| 7 | 12.00 | 20.45 | 68.69 | 201.76 |
| 8 | 11.13 | 13.68 | 39.81 | 45.00 |
| 9 | 2.80 | 7.29 | 112.93 | 476.57 |
| 10 | 13.11 | 28.55 | 31.67 | 50.34 |
| 11 | 8.55 | 12.16 | 33.46 | 83.24 |
| 12 | 5.10 | 13.25 | 35.59 | 132.98 |

水肿、疼痛、肌肉或肌腱黏连、关节僵硬、肌无力、手的协调性障碍等[9],不存在偏瘫手的痉挛、运动控制等问题。有关脑卒中患者手功能训练的触觉装置(如数据手套[10]、气动手套[11]、罗格斯控制手套[12],以及机械装置[13—14]等)对手外伤患者来说,存在穿脱困难、繁琐,设备昂贵,并且有一定的安全隐患。因此,我们研制了这款专门适合手外伤患者手功能训练的摇杆装置,不存在穿戴问题,使用方便。同时,手指指腹与摇杆上的压力传感器接触,属于闭链运动,对受累关节的剪切力弱,相对安全[20]。此外,摇杆制作的材料采用低温热塑板,成型后变形度小,确保了力量测量的准确性。同时取材方便,价格低廉,制作方便,容易维护,能满足该系统向其他医疗机构和家庭推广使用的要求。

通过临床随机、对照、队列研究表明,虚拟现实手功能康复训练组在侧捏力、握力、日常生活活动能力方面的改善较传统组更明显,说明该系统的趣味性和良好的交互性使患者依从性和训练效率提高,从而减少治疗师人力资源成本,降低医疗费用。但是,本队列研究的样本量偏小,还需进一步大样本、随机研究证实该系统的有效性、安全性。本临床试验干预时间较短(2周),可能低估了该康复治疗系统的作用;本临床试验选择的病例病程较长,故较早开始应用本康复系统的安全性、有效性有待进一步研究。

## 6 结论

本文针对手外伤后功能障碍的特点而研制出结合捏力采集和虚拟现实技术的手功能康复训练系统。该系统由力传感器模块、采集模块、虚拟现实模块和评估机制组成,其设计巧妙、结构简单,克服了穿戴式触觉结构存在的穿戴困难、价格昂贵等问题。初步的临床试验结果表明该系统是训练手功能的一种安全而有效的方法,可用于手外伤的日常康复训练。

## 参考文献


[1] 龚文青,诸强.虚拟现实技术用于运动障碍康复的研究[J].生物医学工程学进展,2009,30(4):238—241.

[2] Straker LM, Campbell AC, Jensen Rational LM, et al. Rational design and methods for a randomized and controlled trial of the impact of virtual reality games on motor competence, physical activity, and mental health in children with developmental coordination disorder[J]. BMC Public Health, 2011,11:654—666.

[3] Shih CH, Shih CT, Chiang MS. A new standing posture detector to enable people with multiple disabilities to control environmental stimulation by changing their standing posture through a commercial Wii Balance Board[J].Res Dev Disabil,2010, 31(1):281—286.

[4] 赵翠莲,胡世东,李成梁,等.面向虚拟训练的脑卒中患者康复策略[J].中国康复医学杂志,2012,5(27):452—457.

[5] Crosbie JH, Lennon S, Basford JR,et al. Virtual reality in stroke rehabilitation: still more virtual than real[J]. Disabil Rehabil, 2007,29(14):1139—1146.

[6] Documentation/Getting Started-NeoAxis Engine Wiki (2010.4) http://www.neoaxisgroup.com/wiki/Documentation/Getting_Started.

[7] 吴小鹰,侯文生,郑小林,等.反馈技术在运动功能康复治疗中的应用[J].生物医学工程杂志,2008,25(5):1213—1216.

[8] 潘达德,顾玉东,侍德,等.中华医学会手外科学会上肢部分功能评定试用标准[J].中华手外科杂志,2000,(16)3:130—134.

[9] Cooper C.Fundamentals of Hand Therapy: Clinical Reasoning and Treatment Guidelines for Common Diagnoses of the Upper Extremity[M].1th.USA:Mosby Press,2007.4—18.

[10] Adamovich SV, Fluet GG, Mathai A, et al. Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study[J].J Neuroeng Rehabil,2009,6:28—37.

[11] Connelly L, Jia Y,Toro ML.A pneumatic glove and immersive virtual reality environment for hand rehabilitative training after stroke[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2010, 18(5):551—559.

[12] Heuser A, Kourtev H, Winter S,et al. Telerehabilitation using the Rutgers Master II glove following carpal tunnel release surgery: proof- of- concept[J].IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2007, 15(1):43—49.

[13] Ueki S, Nishimoto Y, Abe M,et al. Development of virtual reality exercise of hand motion assist robot for rehabilitation therapy by patient self- motion control[C].Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc,2008;2008:4282—4285.

[14] 王爱民,戴金桥.人机交互中的力/触觉设备进展综述[J].工业仪表与自动化装置,2007,(2):14—18.

[15] Kibler WB, Livingston B.Closed-chain rehabilitation for upper and lower extremities[J].J Am Acad Orthop Surg,2001,9(6):412—421.