

文章编号: 1008-1542(2008)04-0299-06

创伤手指康复机械手嵌入式控制系统

张付祥¹, 王树国²

(1. 河北科技大学机械电子工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 针对研制的创伤手指功能康复机械手, 研究了以 ARM 芯片 S3C2410 为核心的嵌入式系统平台、基于 SPI 总线的电机控制和数据采集模块, 以及控制软件和图形用户界面的设计, 还结合机械系统设计了传感系统, 实现了康复运动产生、康复数据采集等系统功能, 为该系统用于临床康复试验奠定了基础。

关键词: 康复机械手; 嵌入式系统; ARM; SPI

中图分类号: TP24 文献标识码: A

Embedded control system of rehabilitation manipulator for injured fingers

ZHANG Fu-xiang¹, WANG Shu-guo²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Based on the developed rehabilitation manipulator, study on the control system is carried out, such as embedded system platform with the ARM microprocessor S3C2410 as its core, motor control module and data acquisition module based on serial peripheral interface (SPI) bus, control software and graphical user interfaces (GUI) etc. According to the mechanical system, a sensor system is also designed to realize the function of acquisition of rehabilitation data during rehabilitation motion. The test proves the feasibility of the system which can be used in clinic in future.

Key words: rehabilitation manipulators; embedded system; ARM; serial peripheral interface

人手是极易受到损伤的器官。国外文献报道, 在急诊创伤病例中, 手外伤所占比例为 15.0% ~ 28.6%^[1]。由于手部神经血管纵横交错, 小肌肉遍布全手, 致使手部损伤的治疗要求较高, 难度较大, 治疗后康复期长, 手完成精细动作的功能恢复多不理想。

笔者研究一种用于创伤手指功能康复的机器人, 并结合临床上对康复机器人的应用要求, 对其控制系统的设计与实现进行了详细阐述。

1 康复机械手本体结构

创伤手指康复机械手是一个能产生连续被动活动(continuous passive motion, 简称 CPM)的 CPM 机。由于康复机械手的操作对象是人的手指, 从空间上解决 CPM 装置驱动的问题就必须解决机构的微型型

收稿日期: 2008-04-23; 修回日期: 2008-06-15; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 黑龙江省科学技术计划项目(2006G0845)

作者简介: 张付祥(1973-), 男, 河北青县人, 讲师, 博士, 主要从事机器人技术方面的研究。

化问题。为此, 康复机械手采用了仿生肌肉的驱动技术^[4]以简化结构。为了能对患手手指连续被动活动进行精确控制, 同时也使佩戴方便舒适, 采用典型的外骨架式数据手套的基于四杆机构的机械联动装置^[5-6], 其结构示意图如图 1 所示。

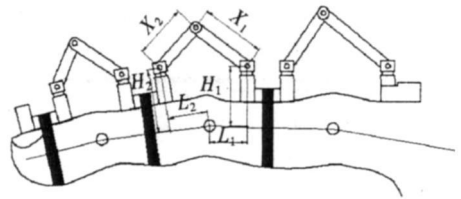


图 1 康复机械手结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rehabilitation manipulator

2 控制系统功能需求

整个康复机械手系统的实现原理如图 2 所示。首先由临床康复医师下达康复任务, 结合人手功能模型信息库中的信息和康复机械手关节力/位传感器采集的传感信息进行信息融合, 经过控制策略和控制算法得到关节驱动器的控制信息, 从而实现受伤手指的连续被动活动。

康复机械手系统将机械系统、传感系统、驱动控制以及用户(医生或患者)控制等综合起来, 集成驱动、控制、传感和能源为一体。

依据康复机械手系统的总体

结构, 整个康复机械手系统由机械系统(包括 1 个仿生手指模块和 1 个仿生肌肉模块)、电源和驱动系统、传感系统和嵌入式控制系统 4 大部分组成。对于康复机械手控制系统的总体要求可以归结如下。

- 1) 接受用户指令实现机器人运动。
- 2) 可以实现对创伤手指关节多关节不同组合的康复运动: ①拇指/食指/中指 DIP; ②食指/中指 PIP; ③食指/中指 MP; ④食指/中指 DIP+ PIP; ⑤食指/中指 PIP+ MP; ⑥食指/中指 DIP+ PIP+ MP(DIP 为远端指关节、PIP 为中间指关节、MP 为基关节)。
- 3) 控制系统小型化、轻量化, 嵌入式、便携, 界面友好, 操作方便灵活。
- 4) 系统具有良好的实时性且功能可扩展。
- 5) 具有关节力/位感知功能, 为控制提供传感信息。
- 6) 能够记录临床康复数据, 为评价康复效果提供依据。

3 控制系统集成

3.1 系统集成

康复机械手系统是康复机械手本体和嵌入式系统的有机统一, 整个系统的集成如图 3 所示。

康复机械手的传感器和驱动器分别集成在仿生手指模块和仿生肌肉模块。由于康复机械手本体尺寸和电子产品微型化技术水平的限制, 整个系统采用分布式控制结构从空间上实现起来难度很大。为了保证控制平台功能的可扩展性, 笔者把电机控制模块和数据采集模块挂接在 S3C2410 的串行外设接口(SPI)总线上, 可以通过在 SPI 总线上挂载其他功能模块的方法扩展控制平台的功能。另外, 也可以通过在 SPI 总线连接新的器件来增加数据采集模块中处理的传感器信号的数量和电机控制模块中控制的电机的数量。系统采用了所有传感器信号统一处理、所有电机统一进行驱动控制的方案。

3.2 以 S3C2410 为核心的嵌入式系统

康复机械手系统的机械本体在体积上和人手相匹配, 相应的驱动和控制部分也可以通过优化做到和机械本体的体积相似。从临床应用考虑, 将康复机械手做成嵌入式设备会增加系统的稳定性和安全性。

嵌入式系统平台以 Samsung 公司的 ARM 芯片 S3C2410 为核心。该平台由最小系统、扩展系统和输入输出设备 3 部分组成。

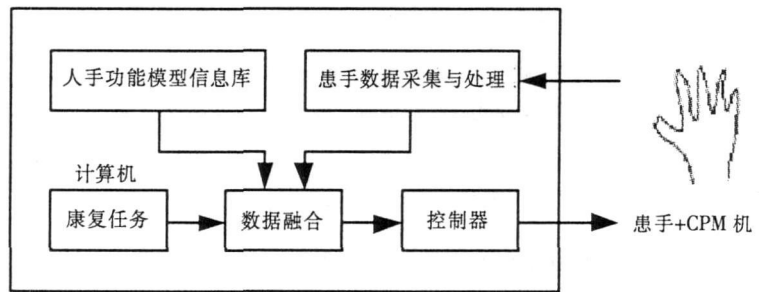


图 2 康复机械手系统的工作原理图

Fig. 2 Block diagram of rehabilitation manipulator system

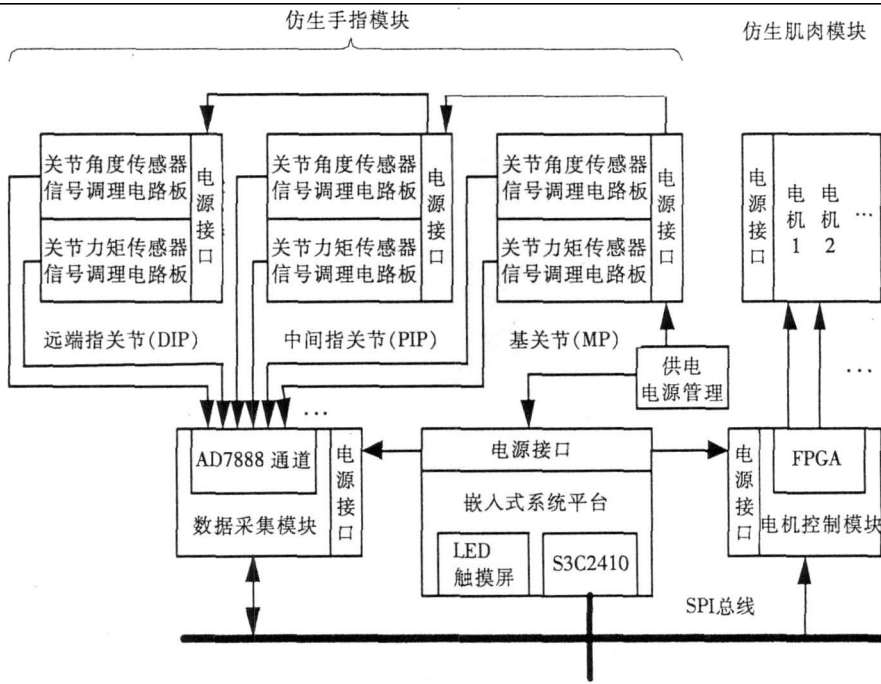


图 3 康复机械手系统集成

Fig. 3 System integration of the rehabilitation manipulator system

最小系统是嵌入式系统的核心部分, 主要由 CPU 和存储器构成。为了提高系统可靠性并加快研制进程, 选用了华恒科技公司基于 S3C2410 CPU 的核心板 HHARM 2410-K1。核心板的尺寸仅相当于名片的 2/3 大小, 可以用来设计制造出小体积、高性能的嵌入式应用产品, 其外观如图 4 所示。

扩展系统集成了 RS-232, USB 主设备、以太网、JTAG, SD 卡和液晶屏与触摸屏等众多接口。输入输出设备为液晶屏与触摸屏, 完成基于 GUI 的人机交互界面和机器人的控制。

3.3 直线步进电机及驱动器

为了简化 CPM 装置的结构, 驱动机构选用“仿生肌肉”的驱动模式, 每个电机驱动器驱动 1 个直线步进电机。这里使用海顿直线电机(常州)有限公司的直线步进电机和驱动器(如图 5 所示)。

直线步进电机(35H4N-2. 33-014)为固定轴式, 主要技术参数为连续推力 230 N, 行程 25.4 mm。电机驱动器(DCM 4010)是一种细分型高性能步进驱动器, 采用双极直流斩波方式, 适合驱动任何 1.5 A 以下相电流的两相混合式步进电机。

3.4 基于 FPGA 电机的电机控制模块

1 个完整的步进电机控制系统应含有步进电机、驱动器、直流电源和控制器。电机控制系统用 1 个 FPGA 作为控制器, 控制 8 个步进电机的运动。电机控制模块的组成如图 6 所示。

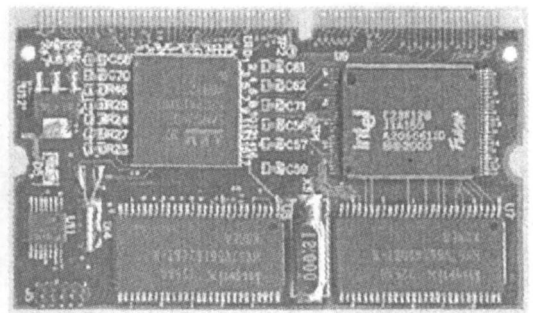


图 4 基于 S3C2410 的核心板

Fig. 4 Kernel board based on S3C2410

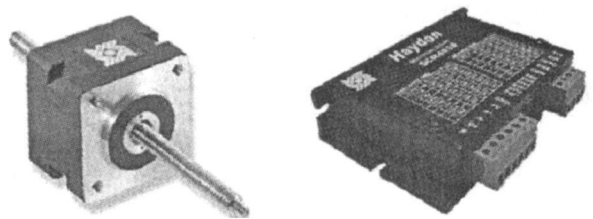


图 5 直线步进电机和驱动器

Fig. 5 Linear stepping motor and its driver

3.5 传感系统

应变测量是应用最广泛、技术最成熟的1种力传感方式。康复机械手力矩传感器是基于应变测量原理进行设计的。将传感器的弹性体和康复机械手的机构本体融合在一起,以杆机构运动的输入杆作为力矩传感器,可以分为一维和二维两种力矩传感器,其原理如图7所示。

康复机械手的关节位置传感器可测得关节的转动角度,是进行康复机械手位置控制的基础。由于康复机械手尺寸较小,对关节位置传感器的尺寸限制就成为选择位置传感器类型首要考虑的问题。采用基于霍尔传感器的非接触测量,并且基于SMD设计了微型信号处理电路和数字化电路,这样就可以实现关节位置传感器的微型化。Sentron公司的双轴霍尔传感器2D-VH-11,具有低偏差、性能稳定等优点。该传感器非常适合在较宽的温度范围内进行高精度、非接触式的角位置/速度测量。其核心是一个十字形正交的霍尔元件,其工作原理如图8所示。它的磁敏感平面垂直于芯片的表面,对平行于芯片的磁场敏感。当十字轴上方的磁场发生变化时,敏感元件有交变电流产生,形成二维的测量设备。经过相应处理后,得到绝对角位置。

根据测量原理,测量系统需要1个置于旋转轴上并能产生磁场的永久磁铁,使永久磁铁产生的磁场平行于霍尔传感器的表面,磁铁与霍尔传感器的放置关系如图8所示。安装时,磁钢的旋转轴与霍尔传感器上的十字中心要对心;磁钢的表面与霍尔传感器的表面要平行,且垂直于电机的转动轴。笔者研制的关节角度传感器的磁钢粘贴在康复机械手各个主动关节的转动轴上,磁钢的上方放置焊有霍尔传感器的关节位置传感器信号调理电路板。整个关节角度测量系统的安装示意图见图9。

3.6 软件设计

根据将来进一步产品化的考虑,本研究的嵌入式操作系统选择了自由免费软件嵌入式Linux。嵌入式Linux可以移植到不同结构的CPU和硬件平台上,具有很好的稳定性及各种性能的升级能力,而且开发更容易。

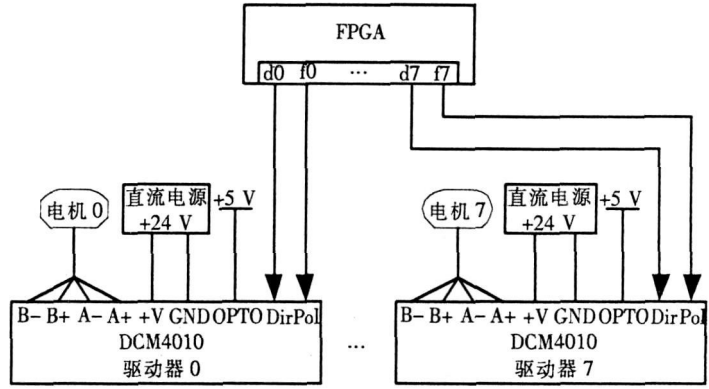


图6 电机控制模块
Fig. 6 Motor control module

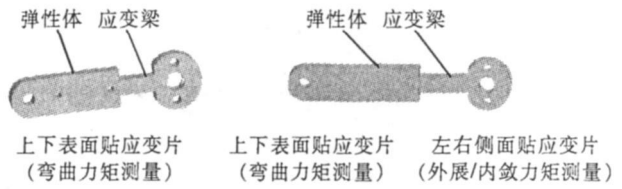


图7 力矩传感器
Fig. 7 Torque sensors

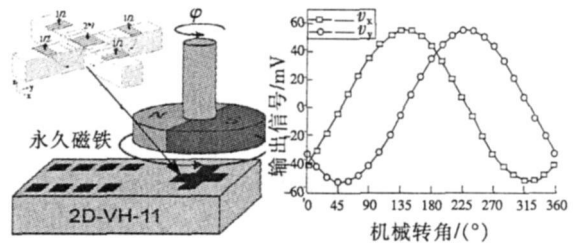


图8 角度传感器测量原理
Fig. 8 Operating principle of the hall sense

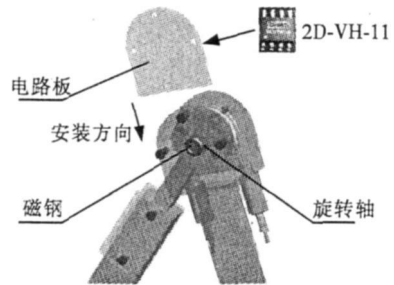


图9 角度传感器安装示意图
Fig. 9 Schematic of the fixing of the position sensor

康复机械手的控制采用分级并行竞争式控制结构^[7-8],如图 10 所示。该控制结构中低级模式受高级模式的制约。如果高级模式未被激活,则系统采用已被激活的低一级模式;如果高级模式已被激活,则其输出抑制低级模式的输出,高级模式接管控制系统,直到其对应的信息输入复原或被更高级的模式所抑制。

按照系统优先级从高到低的次序依次解释如下。

模式 0——紧急模式:用于电源电压超限、康复机械手运动受阻和急停按钮人工停车等。此时系统 GUI 给出图形文字报警,屏蔽所有低级模式。

模式 1——手动模式:用于手动控制。

模式 2——程控模式:由人机界面对康复任务和参数进行设定,自主的完成康复过程。

控制程序融合了包括操作系统在内的所有程序,实现康复机械手的软件平台的初始化、过程控制和系统监控等功能,其结构如图 11 所示。

基于 32 位嵌入式处理器的硬件平台有着较高的运算速度和大容量的内存,为人机交互建立图形用户界面最首选的方式。笔者以北京飞漫软件技术有限公司的 MiniGUI 为开发工具,开发了康复机械手嵌入式系统的图形用户界面。根据创伤手指康复的具体要求和实现方式,康复运动采用的具体康复方式为 1) 食指的外展/内收和食指、中指及拇指的弯曲 2 种康复运动分别进行, 2) 食指、中指及拇指的各个关节的康复运动可以单独进行或任意组合进行。康复机械手图形用户界面的设计采用了分层结构,主界面共有 4 个主要功能:康复训练、系统设置、娱乐和帮助(如图 12 所示)。康复训练和系统设置为系统的主要功能模块。其中,康复训练包括关节活动范围、康复周期、康复时间等康复参数的设定和实时控制指令的发送和实现。系统设置完成 2 个主要任务:其一是对康复训练过程中康复参数进行设置,其二是对康复过程中保存的关节力/位信息转存到 U 盘。

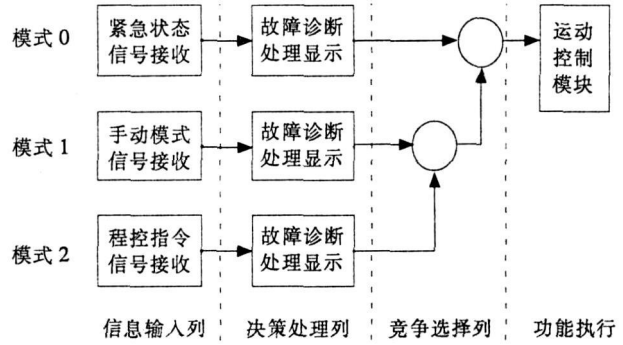


图 10 分级并行控制结构

Fig. 10 Hierarchical parallel competitive control architecture

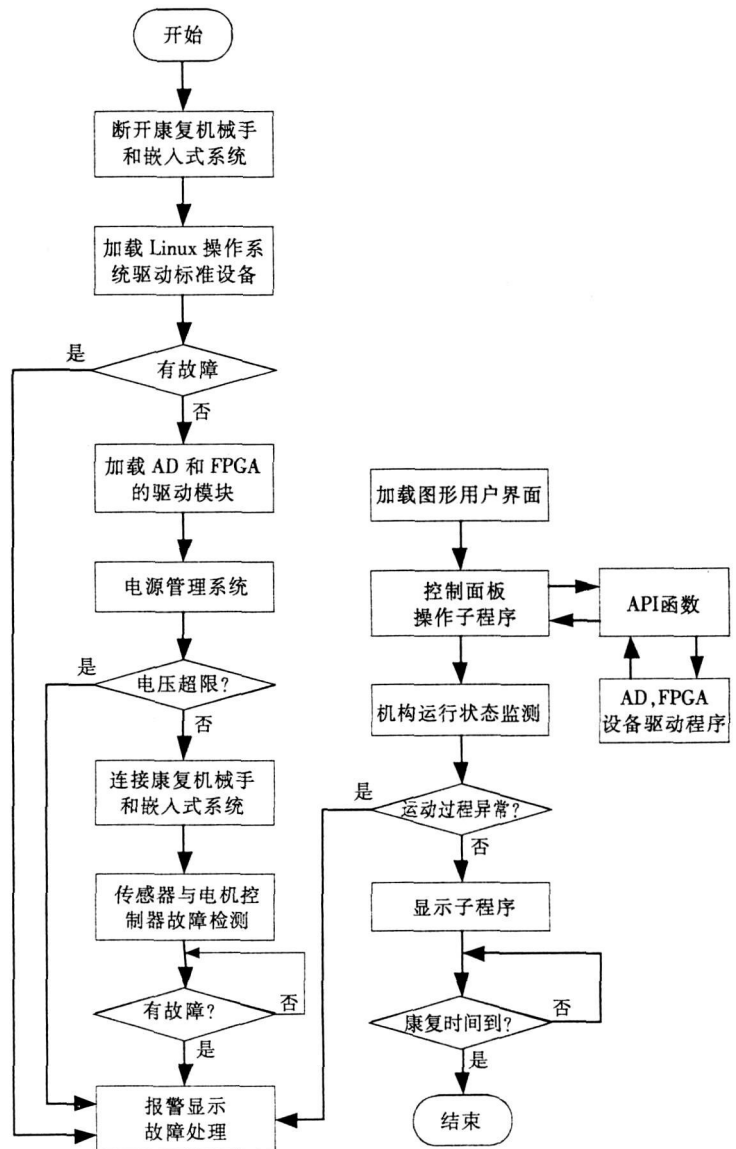


图 11 控制程序结构框图

Fig. 11 Diagram of control programme

4 试验研究

为了验证康复机械手嵌入式控制系统的控制性能,做了志愿者健康人手的康复运动试验,并对试验中的康复数据进行了采集,供评价研究使用。由于食指的康复最具代表性,考虑到研发成本的因素,第1台原理样机的机械本体部分只做了食指康复的CPM装置。图13为康复机械手系统在康复运动试验。

康复运动试验实现了健康人右手食指DIP关节和PIP关节的康复运动,在康复运动过程中进行了数据采样。为了考察食指全关节康复运动的使用效果,还进行了健康人手右手食指的康复运动试验。根据试验得到如下结论。

- 1) 康复机械手可以实现单关节和多关节的康复运动。
- 2) 由于采用含有绳索的“仿生肌肉”技术,换向时有回差,从而导致康复运动过程中力矩曲线存在突变和毛刺。
- 3) 电机驱动器DCM4010设置为8细分,关节在通常活动范围内时康复周期可以达到20s,考虑到创伤手功能康复初期手指活动范围受限,能满足多数情况的临床康复任务。随着康复进展,关节活动范围加大,若想加快康复运动的速度,可以把DCM4010设置为4细分,这时康复周期能缩减到10s。
- 4) 能够有效采集康复运动过程中的关节力矩和关节角度数据。
- 5) 康复过程中可以设定安全力矩,并提供紧急模式处理紧急情况,满足安全性需要。

5 结 语

结合创伤手指功能康复临床对其控制系统的要求,构建了以S3C2410为核心的嵌入式控制系统平台,结合传感系统、驱动系统搭建了康复机械手控制系统硬件,并完成了软件设计。经过试验研究,证实了研制的控制系统能够满足临床康复的需要。

参考文献:

[1] BURKE F D, DIAS J J, LUNN P G, et al. Providing care for hand disorders: Trauma and electives[J]. J Hand Surg, 1991, 16: 13-18.

[2] ANGERMANN P, LOHMANN N. Injuries to the hand and wrist: A study of 50272 injures[J]. J Hand Surg, 1993, 18: 642-646.

[3] Ó SULLIVAN M E, COLVILLE J. The economic impact of hand injures[J]. J Hand Surg, 1993, 18: 395-398.

[4] FU Yi-li, ZHANG Fu-xiang, WANG Shu-guo. Structure types design and genetic algorithm dimension synthesis of a CPM machine for injured fingers[A]. Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics[C]. [s. l.]: IEEE ROBIO, 2004.

[5] WRIGHT A K, STANISIC M M. Kinematic mapping between the EXOS Handmaster exoskeleton and the Utah/MIT dextrous hand[A]. IEEE International Conference on Systems Engineering, 1990. 101-104.

[6] 王家顺, 王田苗. 一种面向摇操作的新型数据手套研制[J]. 机器人, 2000, 22(3): 201-206.

[7] 徐 贺, 王树国, 付宜利, 等. 基于PC104和网络驱动电机的移动机器人控制系统[J]. 机器人, 2005, 27(4): 336-340.

[8] 周大威, 高学山, 王 炎, 等. 全方位移动清扫机器人控制系统的研究[J]. 高技术通讯, 2003, 6(1): 65-68.



图 12 图形用户界面

Fig. 12 Graphical user interfaces

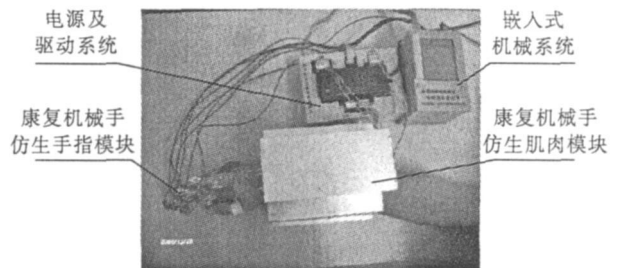


图 13 康复运动试验

Fig. 13 Rehabilitation motion test