

文章编号:1001-9944(2006)03-0001-03

## 双关节测力机械臂设计与控制方法研究

沈勇<sup>1</sup>, 聂余满<sup>1</sup>, 陈峰<sup>1,2</sup>, 宋全军<sup>1,2</sup>, 石振<sup>1</sup>, 葛运建<sup>1</sup>

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027)

**摘要:**根据关节机械臂的运动特性,在分析用于测试人体手臂运动爆发力机械臂模型设计的基础上,利用人工神经网络的函数逼近、最优化计算等方面理论,结合实际人-机力交互系统的控制特点,提出一种神经网络控制方法。对基于力控制策略的机械手伺服系统进行优化,同时保证了系统的鲁棒性。通过实时信息获取与分析,准确地反映出人手臂随着时间推移的施力情况。

**关键词:**爆发力;机械臂;神经网络;运动生物力学

**中图分类号:**TP241.3 **文献标志码:**A

### Study on Designing and Controlling Method for Double Joint Interactive-force Manipulator

SHEN Yong<sup>1</sup>, NIE Yu-man<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>1,2</sup>, SONG Quan-jun<sup>1,2</sup>, SHI Zhen<sup>1</sup>, GE Yun-jian<sup>1</sup>

(1.Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, HeFei 230031, China; 2.Department of Automation, University of Science and Technology of China, HeFei 230027, China)

**Abstract:**This paper presents a method of neural network for interactive-force manipulator on the base of kinematics. And analyses the explosive force of human arm model and neural network theory such as function approach, optimizing calculation. The method optimizes the whole servo-system, and ensures the system's robust. Through acquisition and analyses of real time information, the system can show the magnitude of man's arm force along with time.

**Key words:**explosive power; mechanical arm; neural network; sports biomechanics

机器人关节伺服系统控制的精度和高速性是机器人技术中备受关注的问题之一。近几十年来,国际上对机器人的控制问题进行了大量研究,尤其是机器人的力/位置控制问题吸引了许多学者和专家们的注意。许多学者不断运用新的控制理论和方法,从不同的角度对机器人的力/位置控制进行理论和实际应用上的尝试<sup>[1-9]</sup>。然而,机器人本身是一

种高度非线性、强耦合且含有诸多不确定性因素的对象,当机器人的末端执行器与外界环境接触时,工作环境接触刚度的不同对控制性能也有较大的影响,机器人的应用范围因而受到极大制约<sup>[2,9]</sup>。人工神经网络吸取了生物神经网络的许多优点,具有高度的并行性,非线性的全局作用,以及良好的容错性与联想记忆功能,并具有很好的自适应、自学

收稿日期:2005-09-28;修订日期:2006-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60475005 60343006)

作者简介:沈勇(1980-),男,硕士研究生,研究领域为运动生物力学、嵌入式系统;聂余满(1981-),男,硕士研究生,研究领域为信息获取、机器人控制;葛运建(1947-),男,研究员,博士生导师,研究领域为信息获取、机器人控制、仿生感知。

习能力<sup>[3]</sup>。它是继专家模糊控制之后的又一不需要建立数学模型的控制方法,为复杂非线性和不确定系统的控制开辟了一条新途径<sup>[4]</sup>。同时,由于大量随动系统的参考输入  $r(t)$  通常是时间的低次幂函数,  $r(t)$  不仅含有阶跃输入,还含有加速度等时间函数。一个优良的随动系统,不仅对阶跃控制输入应有快速平稳的响应,而且对匀速、匀加速的响应也都应该具有优化的性能指标<sup>[5]</sup>。基于上述问题,该文在机械臂结构设计的基础上,设计了一种单神经网络的控制方案,这种方法具有算法简单、实时性强的特点,且在线计算量很少,保证了系统对高速控制的要求。

## 1 系统结构设计

总体框架结构如图 1 所示。

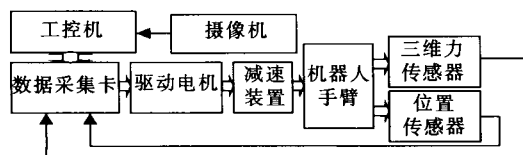


图 1 系统结构

Fig.1 System structure

### 1.1 机械臂设计

机械手主要由臂座和手臂两部分组成。臂座的主要任务是支撑和完成手臂回转,实现其在整个空间的运动,电机固定在臂座上。在机械臂的腕关节处装有一个二维力传感器,用来检测测力者腕部在 X 和 Y 两个方向的力,在肘关节处安装有一个一维力传感器,用来测试测力者的臂力。腕力、臂力传感器均采用应变式力传感器。考虑到如果将应变片直接置于粗臂之上时,由于受到的形变较大,经过一段时间后,应变片会鼓起,直至发生脱落现象。因此,在用 ANSYS 模拟了应变片受力状况后,在图 2 所示的小臂凹陷处对称放置应变片。

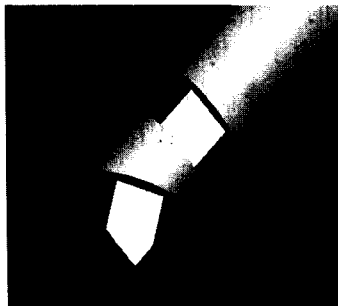


图 2 手臂设计

Fig.2 Design of arm

肢体的用力与人的姿势、着力部位、用力方向、施力方式和人的疲劳程度有关。人体猛烈动作的最大操纵力达 120 公斤,在平稳情况下的最大操纵力为 80 公斤,而正常的操纵力在 12.7~17.6 公斤时才能持久工作。在站立的情况下,人的最大拉力产生于 18 度方向(臂下垂由下向上用力)数值约为体重的 130%,当臂平举时(90 度)推力与拉力均最小。在直立姿势下弯臂,不同角度产生不同的力量,在 70 度左右时可达最大值,即产生相当于体重的力量<sup>[6]</sup>。据此设计机械臂长度 35cm,腕部最大力量 1200N,力矩 420N·m。

### 1.2 驱动系统

整体控制方案如下:根据测试者力量的大小(通过传感器检测出),适时地改变电机的输出力矩大小,但也并不是一味地跟随测试者的变化。在相持阶段根据测力者预先选定的力等级,系统实时检测肘、腕关节传感器的输出,并综合速度传感器输出和手臂与测力者肘部圆垫的相对位置,通过综合判断,给出合适的驱动电压来驱动电机运转,达到与外力抗衡或胜过或负于被测者的预定目标。通过设定不同的阈值,决定最终输赢。当然还有一些辅助功能,如力曲线、视频等,这里就不一一介绍了。驱动模块连接采用方式:手臂+连轴器+减速箱轴。

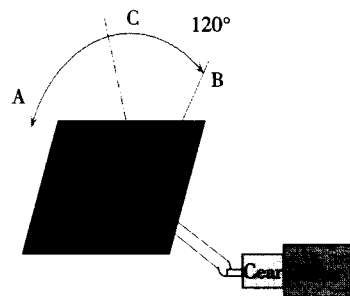


图 3 驱动传动

Fig.3 Drive transmission

在电机功率的选择上,由于电机堵转力矩通常是正常工作下的 2 倍(1.5~1.7),为保证安全工作,驱动电机功率要适当选择大一些。正常出力力矩为 400N·m 的电机,堵转力矩要达到 800N·m。

如果减速比为 1:20,传动效率为 70%,则电机正常工作时出力应该达到  $800 \times (1/20) \times (1/70\%) = 57 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,电机功率  $P_{\text{mec}} = T_{\text{mec}} \omega$ ,其中,  $P_{\text{mec}}$  为异步电机上的机械功率。

为选择间歇工作而设计的电机:

$$\varepsilon\% = \frac{t_w}{t_w + t_0} \cdot 100\%$$

其中： $\varepsilon\%$ 为负载持续率； $t_w$ 为工作时间； $t_0$ 为停歇时间。

按频繁使用情况下的统计周期性，工作/停歇时间分别选(在控制策略和软件中设定)120 s, 30 s, 得到负载持续率为 80%。

驱动器采用速度模式即驱动器按用户设定好的速度驱动电机运行,它不受模拟指令和脉冲指令的影响<sup>[7]</sup>。对于模拟指令输入采用+7.5 V~-7.5 V 模拟电压。驱动器工作在模拟调速模式下时,驱动器输入+7.5 V 的模拟指令对应电机转速 3000 r/min,-7.5 V 模拟指令对应电机-3000 r/min(可由 48 号参数的值设定),如图 4 所示,这里的速度是电机的裸速,手臂的速度是减速器的输出速度。

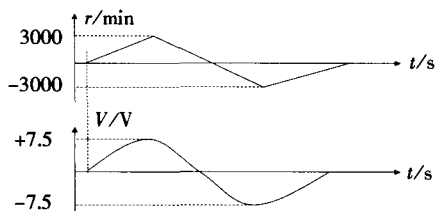


图 4 典型模拟指令调速模式  
Fig.4 Timing mode of typical analog instruction

## 2 控制算法

在两关节机械臂控制过程中,通过控制机械手臂的位置间接达到力控制的目的。但是由于系统的自重和运动惯性,使得系统具有明显的非线性特征。而由于神经网络理论上能够任意的逼近非线性连续有理函数的能力,并且,神经网络还能够比其它的逼近方法得到更加易得的模型。如果采用大规模神经网络的话,虽然能得到非常好的控制精度,但是在速度方面就会有一定的欠缺<sup>[10]</sup>。因此,从控制观点出发,使用一种单个自适应神经元控制器,其结构简单,并且具有比较好的鲁棒性。如图 5 所示。

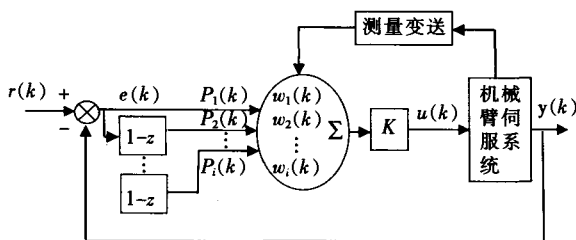


图 5 神经元控制系统框图  
Fig.5 Control system diagram of nerve cell

图 5 中变换器的输入量为控制对象的输出  $y(k)$  和控制设定值  $r(k)$ ,经过变换,得到单神经元控制所需状态  $P_i(k)$ 。神经元的输出经传递单元  $K$  放大后为系统的控制电压  $u(k)$ 。

$$u(k) = K \sum_{i=1}^n w_i(k) p_i(k)$$

在这里, $K$  代表神经元的比例系数, $p_i(k)$  代表神经元的输入, $w_i(k)$  表示输入的权值  
定义一个输出误差函数<sup>[3]</sup>为

$$E(W, B) = \frac{1}{2} [T - A]^2 = \frac{1}{2} [T - WP - B]^2$$

其中, $T$  为目标矢量, $A$  为输出矢量。

对于这种单神经元控制器,采用如下学习规则:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i \frac{\partial E}{\partial w_i}$$

$$b_i(k) = e(k) u(k) p_i(k)$$

$\eta_i$  为对应输入  $p_i(k)$  的学习速率。

从保证系统的收敛性考虑,权值学习算法为

$$w'_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^n |w_i(k)|$$

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i [r(k) - y(k)] u(k) p_i(k)$$

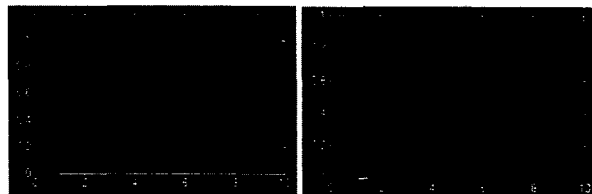
其中:

$$p_1(k) = r(k) - y(k)$$

$$p_2(k) = p_1(k) - p_1(k-1)$$

$$p_3(k) = p_2(k) - p_2(k-1)$$

从图 6 可以看出,阶跃响应没有超调,调节时间较短,加速度相应跟踪较快,有比较令人满意的动态性能。



(a)阶跃响应曲线 (b)加速度响应曲线

图 6 仿真响应曲线  
Fig.6 Simulation responding curve

## 3 结语

本文从测力机器人的结构出发,详细给出了机械臂的设计与分析,并在此基础上,提出了一种交流伺服系统的神经网络控制方案。由于神经网络的自主学习能力能够对系统控制参数进行在线学习调整,使得机械臂系统有了较好的自适应控制能力,(下转第 11 页)

地址	用户数据包结构	地址	CS8900 数据包结构
地址 0	源节点地址	地址 0	源节点地址
地址 1	目的节点地址	地址 1	目的节点地址
地址 2	数据长度高位	地址 2	数据偏移位置 COUNT
地址 3	数据长度低位		未用
地址 4	数据 1	COUNT	数据 1
⋮	⋮	⋮	⋮
地址 4+N-1	数据 N		
地址 4+N	未用	地址 254	数据 N-1
地址 255	未用	地址 255	数据 N-1

图 5 数据包的格式转换示意图

Fig.5 Format conversion of data package

```
while(1)
{
    char *msg;
    int err;
    msg = sc_pend(&Box,0L,&err);
    switch(&msg)
    {
        .....
    }
}
```

当网络控制器 CS8900 的其它任务有网络发送请求时, 向网络任务的信箱发送一请求发送消息, 网络任务激活之后对信箱中的消息类型进行判断, 然后将相应的数据组成一帧数据包, 写入 CS8900

进行发送。在数据送往总线后, 就挂起网络任务, 等待应答。若控制器的网络产生接收中断, 首先将 CS8900 中的数据取出放入 FIFO 缓冲区中, 然后向网络任务信箱发送接收到数据的信息, 网络任务被激活以后, 从 FIFO 中取出数据包, 根据数据包的类型, 交由不同的任务进行处理。

#### 4 结语

本系统通过 32 位的 ARM 作为主芯片, 把嵌入式操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  与嵌入式图形界面 ( $\mu\text{C}/\text{GUI}$ )、网络传输协议作为一个整体, 这样通过扩展的以太网接口就可以把控制器的火灾信息及时地传输到区域火灾报警中心或者“119”消防中心, 对火灾情况做出准确、及时地反映, 使火灾损失减小到最小程度, 减少不必要的经济损失。虽然该系统已被成功用于嵌入式网络监控系统中, 但是就如何提高系统传输性能方面还有大量的研究工作需要研究。

#### 参考文献:

- [1] 国家消防规范标准 GB4717-200X《火灾报警控制器通用技术条件》[S].2005.
- [2] 火灾报警控制器标准 GB4717-93[S].2004.
- [3] JEAN J.LABROSSE. $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ —源码公开的实时嵌入式操作系统[M].邵贝贝译.北京:中国电力出版社,2001.
- [4] 王田苗.嵌入式系统设计与实例开发[M].北京:清华大学出版社,2002.

(上接第 3 页) 从而得到了比较好的控制效果。在下一步的工作中, 将根据得到的力信息数据, 对测力人员在发力过程中的肌肉收缩、关节运动等状况进行深入研究, 充分了解人体在此过程中的生物力学信息, 从而建立比较完善的人体生物力信息分析平台。

#### 参考文献:

- [1] Li J, Mizukami Y, Wakasa Y, Tanaka K. Intelligent control for pneumatic servo system [J]. SICE 2003 Annual Conference, 2003 (3): 3193-3198.
- [2] 金耀初. 机械手伺服系统的两级智能模糊控制[J]. 浙江大学学报, 1994, 28(6): 644-654.
- [3] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [4] Wang Jun-song. Intelligent control of servo system based on a novel neural network [J]. Control Conference, 2004, 5th Asian

Volume 2.2004(2):1319-1323.

- [5] 胡清. 基于交流伺服电机的关节位置多目标优化控制[J]. 电气传动, 2001(4): 27-30.
- [6] 相清清. 人机工程学简析[J]. 江苏陶瓷, 1995, 69(2): 37-40.
- [7] 王伟. 装源机械手关节速度伺服控制研究[J]. 机械与电子, 2001, (2): 17-20.
- [8] Sato Y, Kawasaki H. Robust fuzzy neural network based control for macaronis servo systems with high nonlinearity [J]. SICE 2001, Proceedings of the 40th Sice Annual conference. International Session 2001, (7): 326-330.
- [9] Mbede J B, Xinhan Huang, Min Wang. Robust neuro-fuzzy sensor-based motion-control among dynamic obstacles for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2003, 11 (2): 249-261.
- [10] Zimmer D, Bector M, Kinsner W, Menzies R. Investigation of a robust adaptive nonlinear controller for induction motors [J]. Electrical and Computer Engineering, 2001, Canadian Conference Volume 1, 2001(1): 13-20.