

文章编号: 1001-0920(2003)03-0336-04

基于神经网络的力觉临场感系统的预测控制

陈启宏¹, 费树岷¹, 宋爱国²

(1. 东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对力觉临场感系统传输通道中存在时变通讯时延, 造成系统不稳定和操作性能降低的问题, 利用前向神经网络建立主机械手、从机械手和环境的模型, 并通过神经网络模型预测主机械手速度和从机械手受力, 以消除或减少通讯时延对系统的影响。实验结果表明了该方法的有效性。

关键词: 力觉临场感; 时延; 神经网络; 预测控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Predictive control of force telepresence systems based on neural network

CHEN Qi-hong¹, FEI Shu-min¹, SONG Ai-guo²

(1. Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Time varying communication time delays in communication channels of a telepresence system usually cause instability and bad performance of the system. In order to eliminate or reduce the effect of time delays to a telepresence system, back propagation neural network is used to build the models of the master hand, slave hand and environment. The velocity of the master hand and the force of the slave hand are predicted through the neural network models. This method makes the system meet stability and achieve good performance. The experimental results show effectiveness of this method.

Key words: Force telepresence; Time delay; Neural network; Predictive control

1 引言

随着力觉临场感被广泛地应用到空间和深海等领域, 人们在感受到遥控机器人工作能力提高的同时, 也认识到了其中的不足: 由于远地从机械手和本地控制站间的距离越来越远, 两者间的信号传输存在通讯时延(可由几秒到十几秒), 严重影响了系统的正常工作, 降低了系统操作性能, 甚至造成系统不稳定。所以解决该系统中的通讯时延问题具有十分重要的意义。

研究人员已提出几种消除或减缓时延影响的方

法, 归纳起来主要有 3 种, 即预测显示控制、双向控制和遥程序。在双向控制方面, 文献[1]提出了基于无源性和散射理论的时延补偿方法, 能保证任何时延下系统的稳定性, 但时延越大, 系统操作性能越差。[2]在无源的基础上引入了波变思想, 得出的结论与[1]相同。[3]提出了无源控制的阻抗匹配概念, 保证系统稳定性的同时, 操作性能也有所提高。[4]提出了改进的 Smith 预测加波变的思想。

空间遥操作机器人、水下遥操作机器人和基于 Internet 的遥操作机器人的时延往往是时变的, 鉴

收稿日期: 2002-01-08; 修回日期: 2002-03-21。

基金项目: 国家高技术基金资助项目(2001AA423140)。

作者简介: 陈启宏(1975—), 男, 湖北公安人, 博士生, 从事机器人控制技术的研究; 费树岷(1961—), 男, 安徽宣州人, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制技术、非线性控制系统分析与综合等研究。

于此,文献[5]提出了虚拟时延的概念。其具体思想是主手的信息加载时间量,以固定周期发送到从手,在从手端加一个时延缓冲器,使得系统时延为定值,从而用定常时延的方法来对系统进行分析和设计。文献[6]通过设计滑模控制器,来保证遥操作系统在时变时延下的稳定性。[7]提出波变积分思想,即在波变控制中,将波信号进行积分,然后传输到从手,在从手端用滤波器对积分信号进行重构,使得系统稳定。[8]在从端用PID控制器对接收到的信号进行校正,效果比较明显,但有时不能保证系统的稳定性。[9]将H控制方法应用到遥操作领域,将时延当作系统扰动,使系统对时变时延具有鲁棒稳定性。以上文献考虑的都是环境已知或非时变的情况,本文则主要考虑环境未知或缓时变的控制。

本文利用前向神经网络建立主、从机械手和环境的模型,通过对主、从机械手输出的预测来消除时延的影响,在前向传输时延和反向时延时不变但不等的条件下,获得了良好的操作性能。神经网络模型和预测算法都在本地控制站,简化了远地设备,提高了系统的可靠性。结合文献[5]提出的虚拟时延方法,可方便地将本文结果推广到时变时延情形。

2 力觉临场感系统的构成

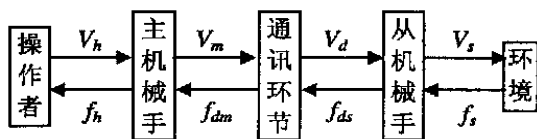


图 1 力觉临场感系统的构成

力觉临场感系统的结构如图 1 所示,它由操作者、主机械手、通讯环节、从机械手和环境构成。操作者的位置指令通过主机械手、通讯环节和从机械手作用于环境,而环境对从机械手的作用力经过上述环节返回到操作者手部。在力觉临场感理想状态下,从机械手工作稳定,从手的速度等于主手的速度,人手受力等于环境对从手的作用力,即 $V_m = V_d, f_{dm} = f_{ds}$ 。然而,由于时延(假定时延时不变)的存在, $V_d(t) = V_m(t - T_1), f_{dm}(t) = f_{ds}(t - T_2)$,其中 T_1 为前向传输时延, T_2 为反向时延。设离散系统采样周期为 T_c ,且 $T_1 = d_1 T_c, T_2 = d_2 T_c$,则 $V_d(k) = V_m(k - d_1), f_{dm}(k) = f_{ds}(k - d_2)$ 。

3 基于神经网络的模型

在预测控制算法中,需要一个描述对象动态行为的模型,而神经网络就是一类有效的建模方法。3层BP神经网络可以逼近任意连续函数和非连续函

数,而不需要知道系统的阶次和其他先验知识。根据系统特点,本文利用BP神经网络建模。

3.1 BP神经网络

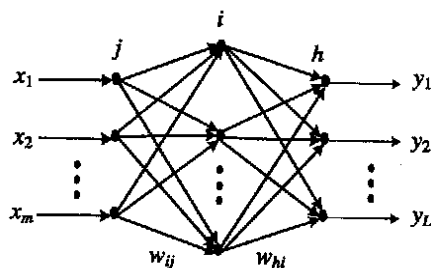


图 2 神经网络结构

BP神经网络的结构如图 2 所示。其中: x_j 为神经网络的输入, y_h 为神经网络的输出; w_{ij} 为第 j 输入到隐含层第 i 神经元的连接权, w_{hi} 为隐含层第 i 个神经元到第 h 个输出的连接权; $net_i = \sum_{j=1}^M W_{ij} o_j$ 为隐含层第 i 个神经元的输入; $o_i = g(\text{net}_i)$ 为隐含层第 i 个神经元的输出,其中 $g(\cdot)$ 为活化函数,取

$$g(\text{net}_i) = \frac{1}{1 + \exp[-(\text{net}_i + \theta)/\theta_0]}$$

θ 表示偏置或阈值。输出层第 h 个神经元的总输入为 $net_h = \sum_{i=1}^M W_{hi} o_i$,于是输出层第 h 个神经元的实际输出为 $o_h = g(\text{net}_h)$ 。

输出层任意神经元加权系数的修正公式为

$$w_{hi}(k+1) = w_{hi}(k) + \eta_{o_h}(k) [1 - o_h(k)] \times [d_h(k) - o_h(k)] \alpha_i(k) \quad (1)$$

其中 $d_h(k)$ 为对象当前实际输出。

隐含层节点加权系数的修正公式为

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta_{o_i}(k) [1 - o_i(k)] \times \sum_{h=1}^L \delta_h(k) w_{hi}(k) \alpha_j(k) \quad (2)$$

其中

$$\delta_h(k) = o_h(k) [1 - o_h(k)] [d_h(k) - o_h(k)] \quad (3)$$

本文神经网络模型的输出均为单输出。

3.2 神经网络建模

主机械手在本地,输入和输出可测得,其输入可作为神经网络的输入,输出则与神经网络输出进行比较,然后对神经网络模型进行校正。对本地控制站来说,远地从机械手和环境是一个对象,所以对从机械手和环境只需建一个模型。由于时延已知,可用缓冲技术模拟时延,将时延隔离在神经网络之外,即将主机械手的速度经过时延 T_1 后输入从机械手和环境的神经网络模型,模型的输出经过时延 T_2 后与

从机械手返回的力信号进行比较,用比较的结果对模型进行修正。当模型充分逼近时,投入在线运行。

4 预测控制

4.1 系统结构

预测控制算法的结构如图 3 所示。其中 NN1 为从机械手和环境模型, NN2 为主机械手模型。

4.2 模型调整

由神经网络建立的模型投入运行后,由于对象参数的缓慢变化和干扰的存在,或多或少存在建模误差,而且随着时间的积累,这些误差将会变得越来越大,因此必须通过反馈来修正模型。在预测算法中,每一步都要检测实际输出,并与模型输出比较构成误差信息,对神经网络模型进行校正。对主机械手而言,其当前输出为 $V_m(k)$,可以定义误差 $e_2(k) = V_m(k) - \hat{V}_m(k)$,把 $e_2(k)$ 当作建模误差对神经网络进行调整。但远地当前输出本地控制站无法检测,考虑到建模误差较小,且被控对象即使有变也会很缓慢,故可由建模误差 $e_1(k) = f_{ds}(k - d_2) - \hat{f}_{ds}(k - d_2)$ 来调整模型。

4.3 参考轨迹

参考轨迹是预测操作员 T_1 时刻后对主机械手的作用力,并使主、从机械手沿一条光滑的轨迹运动到指定位置。参考轨迹在给定 w 发生变化后,第 i 个时刻的值为

$$\hat{f}_h(k+i) = \beta f(k) + (1-\beta)w \quad (4)$$

式中: β 为柔化因子, w 为输入设定值。

4.4 主机械手速度预测

由于时延的存在, $V_d(k) = V_m(k - d_1)$, 为使 $V_d(k) = V_m(k)$, 预测 $\hat{V}_m(k + d_1) = O_3(k) + h_3[V_m(k) - \hat{V}_m(k)]$, 经过传输时延后, $V_d(k) = \hat{V}_m(k)$, 正好抵消时延。其中: $O_3(k)$ 为主机械手神经网络模型的输出, h_3 为误差校正系数。

4.5 从机械手受力预测

4.5.1 $f_{ds}(k)$ 的预测

本地控制站和从机械手间存在时延, 操作者当前感觉到的从机械手的作用力是 T_2 时刻前的信号, 如将该信号直接用于控制, 将导致系统操作性能降低甚至不稳定, 所以有必要对从机械手当前的受力进行预测。

由上节的建模可知, 神经网络 NN1 已充分逼近从机械手和环境模型, 所以将主机械手的预测速度信号经过同样的时延 T_1 后输入神经网络, 神经网络的输出 $O_1(k)$ 就是 $f_{ds}(k)$ 的估计值, 当然, 这必定存在误差, 因此必须对它进行修正, 即

$$\hat{f}_{ds}(k) = O_1(k) + h_1[f_{ds}(k - d_2) - O_1(k - d_2)] \quad (5)$$

其中: $\hat{f}_{ds}(k)$ 为 $f_{ds}(k)$ 的预测值, $O_1(k)$ 为神经网络 NN1 的当前输出, h_1 为误差校正系数。

4.5.2 $f_{ds}(k + d_1)$ 的预测

要预测 $V_m(k + d_1)$, 首先必须给出 $f_{ds}(k + d_1)$ 的预测值。将主机械手的预测速度信号不经过时延, 直接输入神经网络模型 NN1, 其输出 $O_2(k)$ 经过校正后即成为预测值

$$\hat{f}_{ds}(k + d_1) = O_2(k) + h_2[f_{ds}(k - d_2) - O_1(k - d_2)] \quad (6)$$

其中: $\hat{f}_{ds}(k + d_1)$ 为 $f_{ds}(k + d_1)$ 的预测值, h_2 为误差校正系数。

以上分析的是时延不变的情况。如果时延是时变的, 设最大通信时延为 T_m , 主、从机器人以一定的周期互相发送信息, 且带上时间信号; 如果时延小于 T_m , 则经过缓冲, 使其时延为 T_m 时再发给对方。所以系统时延实际上是时不变的, 可用本文的方法对系统进行设计。

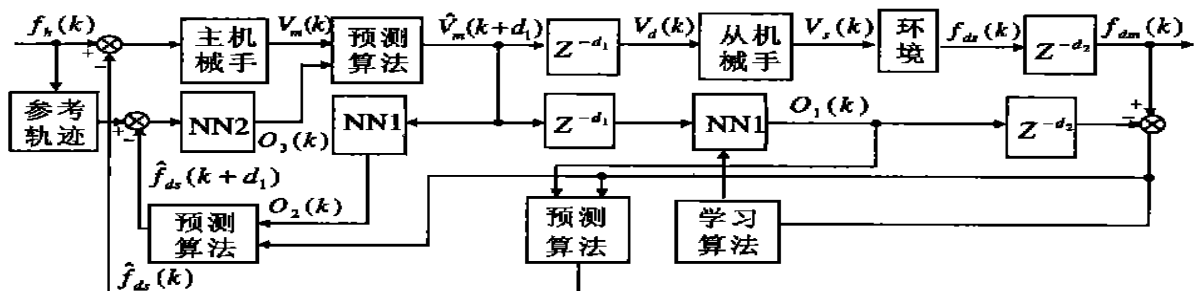
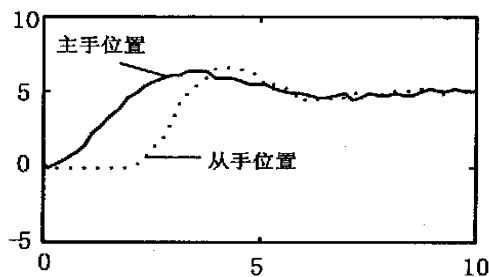


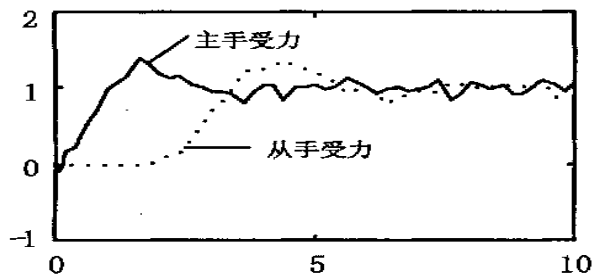
图 3 力觉临场感系统预测控制原理

5 实验结果

临场感系统的实验装置由力矩电机、主从机械手、力和位置传感器、数据采集及控制板和586微机组成。数据采集及控制频率为2 kHz, 通讯时延($T_1 = 1.2\text{ s}$, $T_2 = 0.8\text{ s}$) 通过缓冲技术模拟实现。实验环境为已知的质量-弹簧-阻尼体, 实验结果如图4所示。



(a) 位置跟踪曲线



(b) 力跟踪曲线

图4 预测控制结果

实验表明: 主从机械手工作稳定, 主机械手的位置和力变化情况与2 s后从机械手的情况较为一致, 说明系统预测准确, 具有良好的操作性能。

6 结 语

针对通讯时延对临场感系统稳定性和操作性的影响, 提出了一种预测算法, 分析和实验表明该方法具有以下优点: 1) 在传输时延时变的情况下, 能保证系统的稳定性和良好的操作性能; 2) 不需要事先知道环境模型, 并可适应环境的变化。

参考文献(References):

- [1] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Trans Automation Control*, 1989, 34(4): 494-501.
- [2] Niemeyer G, Slotine J J E. Stable adaptive teleoperation[J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1): 152-162.
- [3] 宋爱国, 黄惟一. 空间遥控作业系统的自适应无源控制[J]. *宇航学报*, 1997, 18(3): 26-32.
(Song A G, Huang W Y. Adaptive passive control of space telemanipulation systems[J]. *J of Astronautics*, 1997, 18(3): 26-32.)
- [4] Munir S, Book W J. Internet based teleoperation using wave variables with prediction[A]. *Proc of IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics* [C]. 2001. 43-50.
- [5] Kosuge K, Murayama H, Takeo K. Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network[A]. *Proc of the 1996 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems* [C]. 1996. 1380-1385.
- [6] Park J H, Cho H C. Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay[A]. *Proc of Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics* [C]. 1999. 311-316.
- [7] Niemeyer G, Slotine J J E. Towards force-reflecting teleoperation over the internet[A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. 1998. 1909-1915.
- [8] Yokokohji Y, Imaida T, Yoshikawa T. Bilateral teleoperation under time-varying communication delay[A]. *Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems* [C]. 1999. 1854-1859.
- [9] Sano A, Fujimoto H, Tanaka M. Gain-scheduled compensation for timedelay of bilateral teleoperation systems[A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. 1998. 1916-1923.
- [10] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 267-273.

(上接第335页)

- [5] Corbett C J, Groote X D. A supplier's optimal quantity discount policy under asymmetric information[J]. *Management Science*, 2000, 46(3): 445-450.
- [6] Gauder G, Pierre L, Long I V. Real investment decisions under adjustment costs and asymmetric information[J]. *J of Economic Dynamics and Control*, 1998, 23(1): 71-95.

price for coordination and control within a firm[J]. *Review of Quantitative Finance and Accounting*, 2000, 14(2): 161-192.

- [8] Tsay A A, Nahmias S. *Modeling Supply Chain Contracts: A Review*, in *Quantitative Models for Supply Chain Management* [M]. Kluwer Academic Publishers, 2000. 299-336.