

模型预测控制在网络闭环控制中的应用研究

苏小会, 徐淑萍

(西安工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 在基于 Internet 的远程控制系统中, 通过 Internet 进行信息传输的时间延时的不确定性对实时闭环控制系统的设计带来较大的困难. 研究了网络传输延时对网络闭环控制系统的影响, 提出了通过基于神经网络的预测控制方法解决存在网络随机延时的控制系统闭环控制的可行性. 仿真结果表明该方法能够反映并预测该测量数据所代表的网络路径之间的时延特性, 并能在基于 Internet 的闭环控制系统的设计中有效地替代实际网络进行研究; 而所用的方法具有快速、准确的特点, 能用于在线学习网络模型并对网络的时延值进行预测, 为基于 Internet 的远程闭环控制提供了新的思路.

关键词: 远程控制; 网络时延; 模型预测控制

中图分类号: TM343

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)06-0161-06

The Research of Network Closed-loop Control Based on the Model Predictive Control

SU Xiao-hui, XU Shu-ping

(College of Computer, Xi'an Technological University, Xi'an 710072 China)

Abstract: Because of the uncertainty of network time-delay in the remote control system based on the Internet, which will bring greater difficulty to the design of the closed-loop control system. The influence of the network transmission delay on the closed loop control system is researched, the predictive control method based on the neural network is proposed in the paper. The method provide the feasibility to solve the random delay of network control system. The simulation results show that the model can effectively substitute the actual network in Internet-based closed loop control system research under time-delay condition; the methods used in the modeling, due to the virtue of speediness and exactness, is capable of learn and predict the network time-delay on line, this gives a new idea in Internet-based remote closed-loop control.

Key words: remote control; network time-delay; model predictive control

1 引言

稳定、快速、准确依然是网络控制系统中追求的最终目标^[1]. 基于 Internet 这样的复杂的计算机网络上的远程控制, 由于信息在网络上的传输及处理均需要时间, 对于信息的发送方和接收方来说都可以看作网络的传输产生的延时, 传输延时的存在使得网络的实时性受到限制, 这是由网络系统的固有属性决定的响应时间, 传输延时的大小即其响应时间除了和网络的结构有关外, 还与传送的数据量及

传送的时间有关以及所用的传输协议密切相关^[2]. 计算机网络中通用的 TCP/IP 协议用于可靠传输, 可以确保将一台计算机上的数据包发送到另一台计算机, 但并不保证数据包的到达时间^[3].

网络时延的存在及其不确定性不利于实现基于网络的闭环控制, 因为网络的传输延时不但出现在系统的前向控制通道, 还出现在信息的反馈通道中. 反馈通道中的延时使得控制器不能及时发觉被控变量的变化情况; 前向控制通道中的延时使得控制信号不能及时作用于被控对象^[4]. 这些因素不但对系

统的动态品质有影响,还会影响系统的稳定性.

具有网络传输延时环节的闭环控制系统的传递函数的特征方程是复变量 s 的超越函数,所以特征方程的根不再为有限多个,而是无限多个.这也是时滞系统的一个重要特点,所以从信息传输的角度来看,网络延时闭环系统时间上就是一个在前向通道和反馈通道中都包含了传输延时的时滞系统.对大多数线性控制系统来说,时滞的存在,使系统由稳定变为不稳定^[5].国内外研究工作者在时滞不确定系统的鲁棒稳定性分析和鲁棒控制器设计上进行了广泛的研究,并已取得了丰硕成果.

2 网络延时对系统闭环控制影响

为了研究网络延时对闭环控制系统的影响,以远程控制中典型的二阶系统,一个简单的单连接的机械臂为控制对象,研究网络闭环控制存在的问题.该系统的动力学方程为^[6]

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -10\sin\phi - 2\frac{d\phi}{dt} + u,$$

式中, ϕ 代表机械臂的角度, u 代表 DC 电机的转矩.根据上式可以画出机械臂的 simulink 框图如图 1 所示.

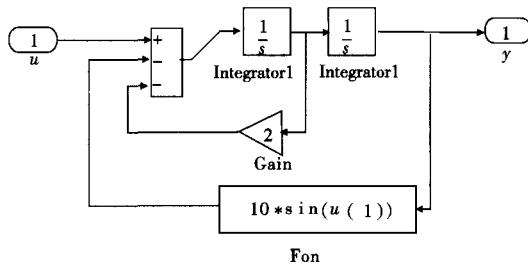
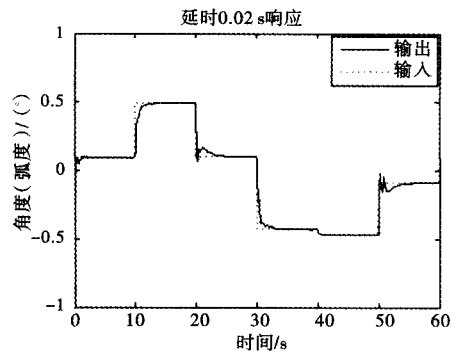
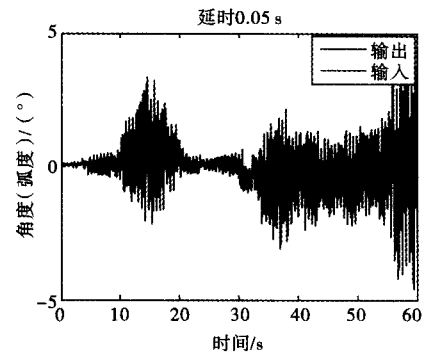


图 1 机械臂的 simulink 框图

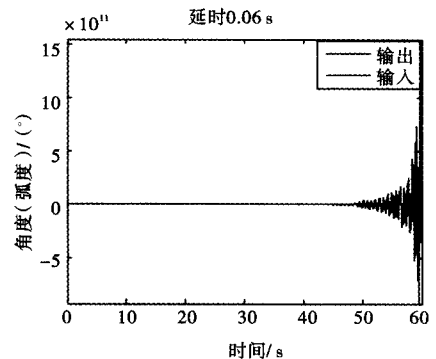
按照网络闭环控制的实际情况,将一个延时环节连在系统的控制器和被控对象之间,将另外一个延时环节连接在系统的反馈通道中.由于在网络控制系统中,前向通道和反馈通道一般是同一条物理链路,且在同一时刻双向传送,可以认为这两个延时环节的值是相同的,所以本文在研究中将两个 Delay 环节的延时值设定为相同进行研究.首先,将延时环节的延时时间调节为 0,即不包括延时环节,反复调节 PID 参数得到满意的响应曲线.然后,保持 PID 参数不变,从 0.02 s 开始慢慢加入网络延时,得到图 2 所示的一组响应曲线,由图 2 可以看出随着网络延时值的不断增大,系统的性能逐渐变坏,当延时加大到 0.05 s 系统变成了振荡系统,继续加大延时到 0.06 s 时系统响应发散,即系统变得不稳定了.



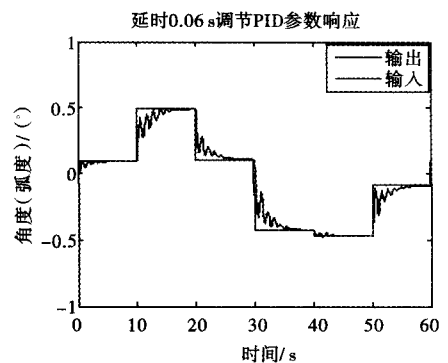
(a) 加入 0.02 s 的延时时的响应



(b) 加入 0.05 s 的延时时的响应



(c) 加入 0.06 s 的延时时的响应



(d) 0.06 s 延时调节 PID 参数后的响应

图 2 加入网络延时后的响应

对加入了 0.06 s 延时环节的不稳定控制系统的 PID 参数重新进行调整,可以获得图 2(d)所示响

应曲线.可见,通过调节控制器参数确实可以使得原来不稳定的闭环控制系统变得稳定,可以满足对机械臂这样的对快速性要求不是很高的系统的远程闭环控制的要求.但是系统控制参数的调节也是一个较为麻烦的事情,且随着延时的大小和系统参数的变化不断地进行调整,限制它的应用范围,尤其不适合于星际探险之类的、系统的工作环境未知的被控对象,因此,需要引入具有自适应功能的智能控制环节.

仍以图1中的机械臂控制系统为例进行分析,假定图1中的采样周期为0.05 s,当设定延时环节的值为0.05 s时,系统在当前的 k 时刻的状态0.05 s之后才能传输给控制器,相对于系统的采样时刻0.05 s,在控制器收到 k 时刻的状态信息时,已经过了1个采样点,系统的状态已经变成了 $k+1$ 时刻的.也就是说 k 时刻的状态在 $k+1$ 时刻才能反馈给PID控制器,对于 k 时刻的PID控制器来说, $k+1$ 时刻的状态还没有到来,而此时它所能利用的最新状态为 $k-1$ 时刻系统的状态值,经过了1个采样时刻的延时才传给控制器,所以,控制器此时能根据 $k-1$ 时刻的状态决定 k 时刻应该施加的控制量 $u(k)$,并且该控制量也要经过1个时刻的延时才能真正地作用在系统上,而此时已是 $k+1$ 时刻了,系统的状态已经变成了 $k+1$ 时刻的状态 $X(k+1)$,而 $u(k)$ 是根据 $k-1$ 时刻的状态产生的,所以所给的 $u(k-1)$ 与所需的 $u(k+1)$ 相差了两个采样周期.在这两个采样周期中,系统的状态已进行了状态转移,即由 $x(k-1)$ 转移到了 $x(k+1)$,由于 $x(k-1)$ 与 $x(k+1)$ 往往是不同的,导致了 $u(k-1)$ 与 $u(k+1)$ 是不同的,也就是说,系统的控制量产生了偏移,并且延时越大,偏移也越大,这是导致系统闭环控制性能变差乃至不稳定的根源.

网络时延所导致的系统性能变坏是由于不能正确地计算出控制器应该给系统施加的控制量所导致的,如果系统的模型已知,延时的大小已知,那么就可以按照系统预测补偿的原理提前预测系统的状态,并按照预测的状态量计算出要加给控制系统的控制量的大小,即在 k 时刻应用预测的 $k+1$ 时刻的状态 $\hat{x}(k+1)$,而不是 $k-1$ 时刻的状态 $x(k-1)$ 计算将要在 k 时刻施加给系统的状态,那么此时实际产生 $k+1$ 时刻的控制量 $u(k+1)$,该 $u(k+1)$ 经过延时传输在 $k+1$ 时刻传输给系统,此时正好经过了1个采样周期,系统的状态也变成了 $x(k+1)$,那么,如果预测的状态 $\hat{x}(k+1)$ 无限接近于实际的状

态 $x(k+1)$,网络时延闭环控制系统的性能就能无限接近不含延时环节的闭环控制系统的性能,而这正是模型预测控制的基本思想.然而,网络的时延是时变的,被控对象也往往存在随即干扰因素,所以不能用一成不变的模型预测系统的状态,也不能用特定的延时时间进行固定步长预测控制,而神经网络能在线的学习系统的状态,且基于神经网络的预测控制具有较强的鲁棒性,是解决网络延时闭环控制的一条途径.

3 模型预测控制

所谓模型预测控制就是指能根据系统当前及以前的运行状态,较精确的预测出系统在将来时刻的期望输出值,并能根据所需要的输出值按照一定的优化算法计算出应该加给系统的控制量^[7].可见,模型预测控制算法是基于被控对象的将来状态或输出的动态预测值,在线求解当前控制量的一种自适应控制方法^[8].模型预测控制是20世纪70年代后期发展起来的一类较新的计算机控制算法,该算法上包涵了三个步骤:预测模型、滚动优化和反馈校正^[9].

3.1 预测模型

预测模型是一个描述被控对象行为的模块,在基于神经网络的预测控制中,就是系统的正向模型,这里采用如图3所示的训练方法,其中虚线框图为实际的被控对象,在这里为机械臂的simulink框图,在随机输入信号 u 的作用下,产生输出 y .选取含一个隐含层的前向三层BP神经网络作为被控对象的训练模型,设定隐层神经元的个数为10,采用高效的Levenberg-Marquardt学习规则,用该组 $[u, y]$ 数据训练被控对象的神经网络模型,结果如图4所示.其中图4(a)为训练所用的数据,4(b)为训练的收敛图^[10].

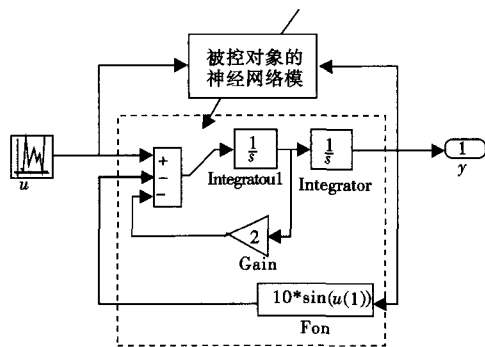
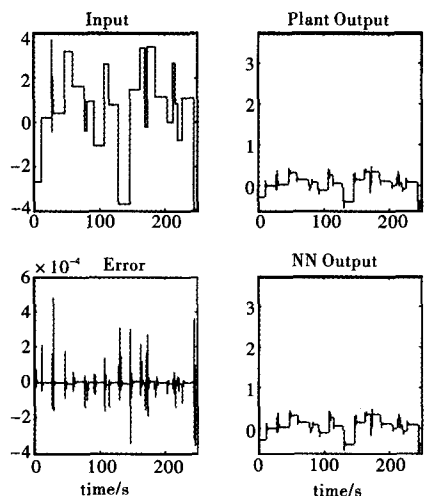
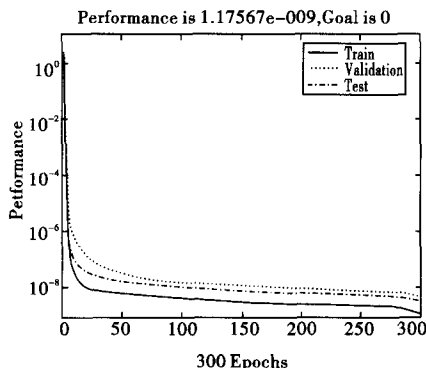


图3 机械臂的神经网络训练框图



(a)



(b)

图4 机械臂的神经网络模型训练结果

3.2 滚动优化

滚动优化是一种优化控制算法,它采用滚动式的有限时域的输出优化,也就是说优化的目标是随时间推移的.预测控制在每个时刻都提出一个基于该时刻的优化指标,而不是采用全局优化指标.滚动优化指标的局部性,虽然使其在理想情况下只能得到全局的次优解,但是当模型失配或者存在时变、非线性或干扰因素时,能够顾及这种不确定性,及时进行弥补,减小偏差,保持实际上的最优化控制,也易于利用有限时域的输入/输出值较快地辨识出被控对象的状态,从而实施控制律的在线调整.

本文中的优化算法也采用神经网络来实现,设定参与优化的时域值为2,采用隐层神经元个数为7的BP网络,同样以Levenberg-Marquardt学习规则进行在线训练,实现控制信号的不断优化.训练框图如图3中的虚线框所示.神经网络优化器依据给定的输入信号 u 产生预测的输出 u_1 , u_1 施加给被控对象的神经网络模型产生预测的输出 y_1 , y_1 与系统

期望的输出即给定值 u 比较,并用两者的差值训练神经网络优化器.然后,将 e_2 足够小时的输出 u_2 作为实际的控制量施加给实际的被控对象.可见,这里的优化器在调节系统中就是被控对象的逆模型.同时, y_1 也可于此时的实际输出 y_2 进行比较,并用该误差 e_1 及被控对象的实际输入 u_2 、输出 y_2 作为训练被控对象神经网络模型的数据.

3.3 反馈校正

反馈校正是指预测控制要不断地动态修正预测模型,保证预测模型与实际被控对象无限接近,使得优化算法建立在对系统状态正确预测的基础上,然后再进行新的优化.如图5中的误差 e_1 对被控对象的神经网络模型的不断修正过程.因为神经网络的预测模型是建立在系统以往运行数据的基础上的,新的运行环境和实际系统中存在的非线性、时变和干扰等因素,使得基于神经网络的预测模型需要不断的进行学习,修正自己的权值甚至于结构,确保它能良好的代表实际的被控对象进行控制信号的预测.

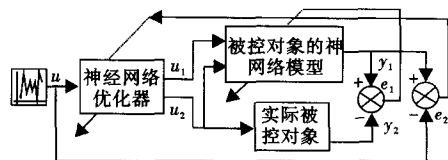


图5 神经网络优化器的在线优化原理

4 仿真分析

在Smulink环境下建立如图6所示的机械臂的仿真框图,按照图3~图5的步骤对基于神经网络预测控制的网络进行训练,并在同一随机输入的信号的作用下逐渐调整时时延环节的值进行仿真,结果如图7所示.图7的结果表明,基于神经网络的预测控制对网络的固定延时具有良好的控制性能.进一步将图4中的固定延时模块用图8(a)所示的随机延时模块代替,随即延时模块对输入的延时特性如图8(b)所示,其中的In.mat文件中存放了图5中的随机输入信号,为了对仿真结果进行比较,在仿

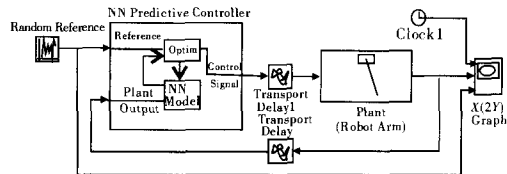
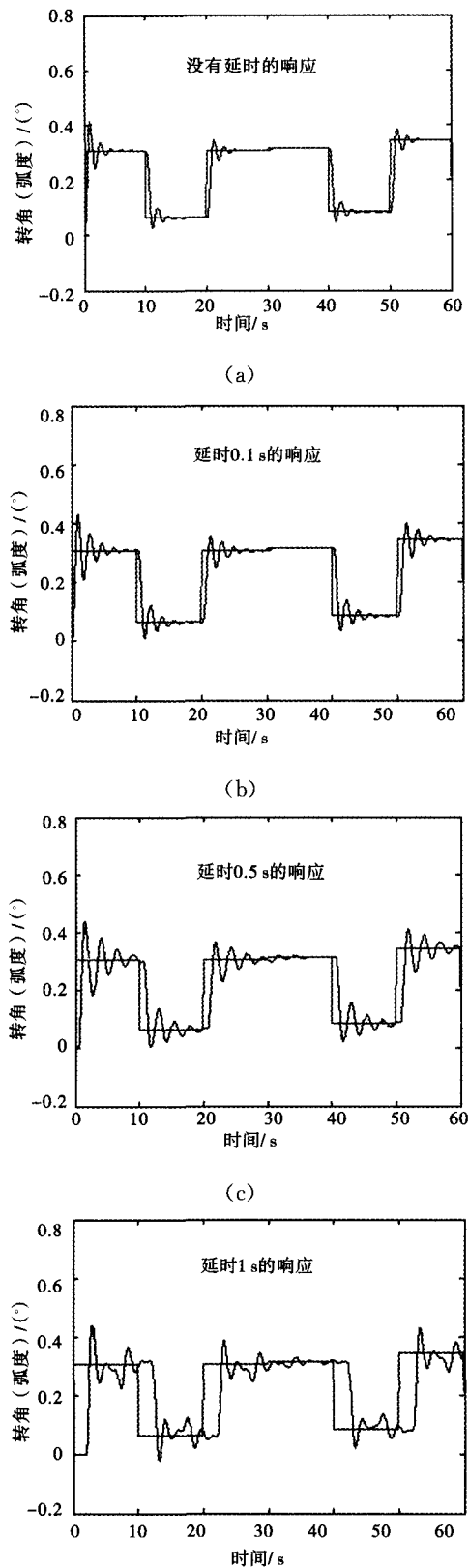


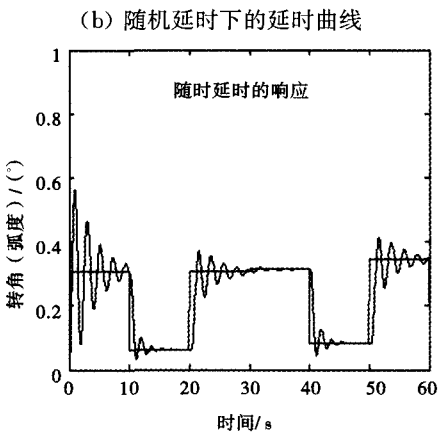
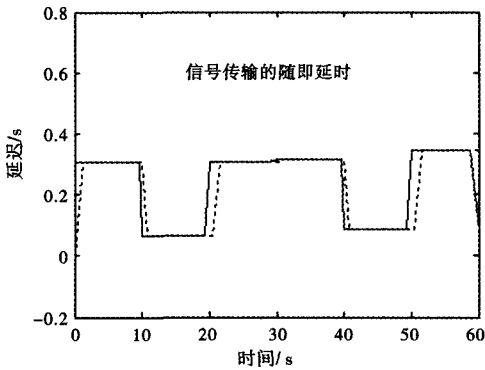
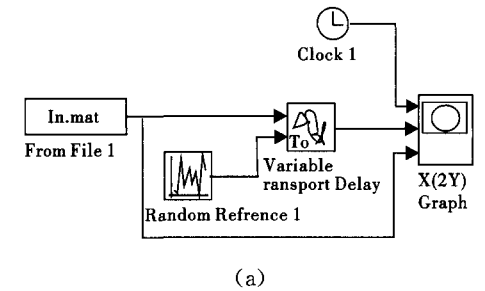
图6 基于神经网络的网络闭环预测控制系统 simulink 仿真图



(d) 0.06 s 延时调节 PID 参数后的响应

图 7 基于神经网络的预测控制随即响应曲线

示,可见,无论对于固定延时还是对于随机延时,神经网络预测控制器都能满足网络时延条件下的闭环控制的要求。



(c) 随机延时下的响应

图 8 随机延时环节下的响应

5 结束语

本文从不确定网络延时的产生到包涵网络延时控制器的设计方法,阐述了网络闭环控制存在的问题,并研究了网络传输延时对网络闭环控制系统的影响,提出了通过基于神经网络的预测控制方法解决存在网络随机延时的控制系统闭环控制的可行性,并通过仿真验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] Zhang Wei, Michael S Branicky, Stephen M. Phillips,

真中都用了保存在这一文件中的随机输入信号. 最后在随机延时条件下再进行仿真,结果如图 8(c)所

- Stability of Networked Control Systems [J]. IEEE Control Systems Magazine February, 2001, (21):84-99.
- [2] Goodwin C, Juan Carlos Aguero, Arie Feuer, State estimation for systems having random measurement delays using Errors in Variables [C]// Proceedings The 15th Triennial World Congress. Barcelona, Spain; IFAC, 2002.
- [3] Lee Kyung Chang, Lee Suk. Remote controller design of networked control system using genetic algorithm [C]// Proceedings of the International symposium on Industrial Electronics. PuSan; IEEE, 2007: 1845 - 1850.
- [4] Almutairi Naif B, Chow Moyuen, PI Parameterization Using Adaptive Fuzzy Modulation (AFM) for Networked Control Systems-Part I: Partial Adaptation [C]// IEEE Proceedings of IECON 2008, Sevilla, Spain; IEEE, 2008: 3152-3157.
- [5] Huang J Q, Lew is FL, Liu K A, Neural predictive control for telerobot swith time delay [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2000(29):1-25.
- [6] Lian Fengli. Analysis, design, modeling, and control of networked control systems[D]. Ann Arbor, Mich: UMI, The University of Michigan, 2001.
- [7] Huang J Q, Lew is FL, Liu K A. Neural predictive control for telerobot swith time delay [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2008(29):1-25.
- [8] Chen S, Cowan C F N, Grant P M, Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1991, (2): 302-309.
- [9] Huang J Q, Lew is FL, Liu K A. Neural predictive control for telerobot swith time delay [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2000(29):1-25.
- [10] Chen S, Cowan C F N, Grant P M. Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1991 (2): 302-309.

作者简介:

苏小会 男,(1970—),研究生,副教授.研究方向为计算机应用方向.

(上接第 160 页)

- [4] Ramponi G, Strobel N, Mitra S K, et al. Nonlinear unsharp masking methods for image contrast enhancement[J]. Electron Imag, 1996(5):353-366.
- [5] Ramponi G. A cubic unsharp masking technique for contrast enhancement[J]. Signal Process, 1998(6): 211-222.
- [6] DeVries F P. Automatic, adaptive, brightness independent contrast enhancement [J]. Signal Process, 1990(21). 169-182.
- [7] Andrea Polesel, Giovanni Ramponi, John V Mathews. Image enhancement via adaptive unsharp masking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(3): 505-510.
- [8] Vanzo A, Ramponi G, Sicuranza G L. An image enhancement technique using polynomial filters [C]// Proc 1st IEEE Int Conf Image Processing ICIP' 94 Austin, TX; IEEE, 1994:477-481.

作者简介:

朱莉 女,(1976—),硕士,讲师.研究方向为计算机数据库集成及图像处理.