

基于神经网络的图像混合滤波及融合算法研究

李晓刚, 刘晋浩, 陈俊成, 耿思宇, 张毅

(北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 当图像中同时存在高斯噪声和椒盐噪声时, 单一的均值滤波或中值滤波很难达到最佳滤波效果。分析了噪声特点和各种滤波方法的优势, 提出了一种基于神经网络的图像混合滤波及融合算法: 首先建立概率神经网络, 检测椒盐噪声和高斯噪声点, 并分别利用中值滤波和均值滤波去除噪声点, 然后建立径向基函数神经网络, 利用训练好的径向基函数神经网络融合 2 种不同滤波的图像, 输出理想的融合图像。Matlab 仿真实验结果表明, 该算法有效去除混合噪声的同时, 能很好地保护图像的边缘与细节, 是一种有效的方法。

关键词: 概率神经网络; 径向基函数神经网络; 中值滤波; 均值滤波; 混合滤波; 融合算法

中图分类号: TB486; TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)09-0089-06

Research on Image Hybrid Filter and Fusion Algorithm Based on Neural Network

LI Xiao-gang, LIU Jin-hao, CHEN Jun-cheng, GENG Si-yu, ZHANG Yi

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: When Gaussian noise and salt and pepper noise both exist in image, single mean filter or median filter turn out to be dissatisfactory. The characteristics of noises and dominance of filter algorithms were analyzed. A hybrid filter and fusion algorithm based on neural network was proposed. Firstly, probabilistic neural network was built to detect the salt and pepper noise and Gaussian noise and remove them respectively by median filter and mean filter algorithm. Then trained radial basis function neural network was built to fuse the two kinds of different filtering image. The ideal fusion image was output finally. The results by Matlab simulation experiments showed that the proposed algorithm can effectively remove mixed noise and preserve image edges and details very well. It is an effective method of image denoising.

Key words: probabilistic neural network (PNN); radial basis function neural network (RBFNN); median filter; mean filter; hybrid filter algorithm; fusion algorithm

在物流包装生产线中应用的码垛机器人, 一般采用示教或离线编程的方式实现路径规划, 完成简单重复的抓取、搬运及码垛作业。当操作对象状态发生变化时, 机器人无法自动识别, 不能满足操作要求。借助视觉系统能够实时检测操作对象的信息, 用人工智能的理论与方法对这些信息进行处理, 机器人根据这些信息进行运动规划, 从而实现操作任务^[1]。在工业生产现场, 由于各种噪声的干扰, 目标图像质量大大降低, 图像变得模糊不清, 机器人无法从图像中获取目标对象精确清晰的状态信息, 势必将影响后续机器人的操作。为使机器人精确识别目标对象及完成抓

取、搬运及码垛等作业, 必须首先对图像进行滤波^[2]。

经典滤波方法主要有邻域均值滤波和中值滤波。邻域均值滤波属于空间域线性滤波器, 特别适合去除高斯噪声, 但增大邻域会导致图像模糊程度愈发严重。中值滤波属于非线性滤波器, 特别适合去除椒盐噪声, 同时能尽量保持图像的边缘信息, 滤波效果良好, 但不适用于点、线、尖顶较多的图像^[2-6]。

在传统滤波方法基础上发展起来的改进算法, 如基于能量最小化原理的邻域均值滤波^[7]、自适应均值滤波^[8-9]、加权均值滤波^[10-12]、优化均值滤波^[13]、快速均值滤波^[14]、自适应中值滤波^[15-17]、综合型中值滤

收稿日期: 2013-01-08

作者简介: 李晓刚(1977-), 男, 江西瑞昌人, 北京林业大学讲师, 主要从事包装机械、运输包装教学和研究。

波^[18]、基于神经网络的自适应中值滤波^[19-21]等改进型算法在对于单一噪声的去除和边缘信息保留方面相比传统方法有了一定程度的改善,但对于图像中多种噪声存在的情况下,滤波效果不够明显,且算法变得更为复杂,处理时间长。

针对以上问题,笔者提出了一种图像混合滤波算法,结合均值滤波和中值滤波两种传统滤波算法的优势,基于神经网络,构建噪声检测器,针对不同类型的噪声应用适宜的滤波方法,并融合不同滤波算法的图像,输出理想的融合图像。

1 滤波算法描述

1.1 均值滤波^[4,22]

均值滤波是最简单的线性滤波器。其基本思想是每一个像素值用其局部邻域内所有值的均值置换,即:

$$h[i,j] = \frac{1}{M} \sum_{(k,l) \in N} f[k,l] \tag{1}$$

式中: M 是邻域 N 内的像素点总数。具体方法是选择一个大小合适的模板(如 $n \times n$),该模板以当前像素为中心点,包含了其周围邻近的 M 个像素点。模板在图像上滑动,用窗内各像素点的平均值代替窗口中心的目标像素值。

均值滤波算法简单,计算速度快,对高斯噪声具有良好的去噪能力,但对椒盐噪声的抑制作用不好,而且削弱了图像边缘,使图像造成一定的模糊。

1.2 中值滤波^[4,22]

中值滤波是常用的典型非线性滤波器。其基本思想是用像素点邻域灰度值的中值来代替该像素点的灰度值。具体方法是选择大小合适的模板(如 $n \times n$),待处理的像素点为该模板的中心点,将邻域内的各个像素点的灰度值进行排序,取排序后的中间值作为中心点像素点灰度的新值。即:

$$\hat{f}(x,y) = \text{median} \{ g(s,t) \}_{(s,t) \in S_{xy}} \tag{2}$$

中值滤波能克服均值滤波所带来的图像模糊,能有效地去除椒盐噪声,保持良好的边缘特性,但对线、尖顶等细节多的图像不太适用。

2 神经网络滤波及融合算法描述

待处理的图像通常同时存在高斯噪声和椒盐噪

声等多种噪声,不同的噪声有不同的滤波方法,为了消除混合噪声,提高图像质量,提出了一种基于神经网络的图像滤波及融合方法,首先利用 PNN 神经网络对图像中的混合噪声进行检测分类,然后对检测出的高斯噪声和椒盐噪声分别利用均值滤波和中值滤波方法进行滤波处理,接着利用 RBF 神经网络对两种滤波方法滤波后的图像进行融合,输出理想的图像。该算法结构见图 1。

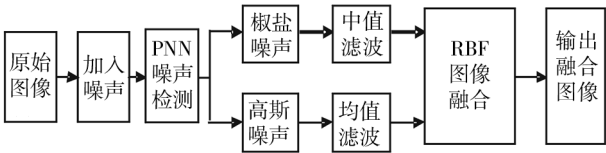


图 1 算法结构

Fig. 1 Structure diagram of algorithm

2.1 PNN 神经网络噪声检测及去除

径向基函数(RBF)神经网络是由 Moody 和 Darken 在 1988 年提出的一种神经网络,它是具有单隐层的 3 层前馈网络,能以任意精度逼近任意连续函数,特别适合解决分类问题。其网络结构见图 2。

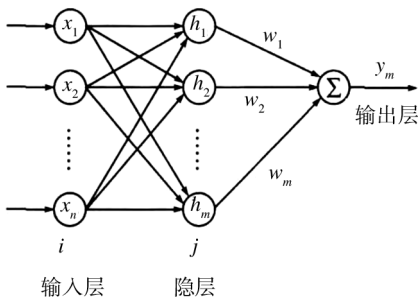


图 2 RBF 神经网络结构

Fig. 2 Configuration of RBF neural network

高斯噪声和椒盐噪声属于概率分布型噪声,因此将径向基神经元与竞争神经元结合,组建概率神经网络(PNN),于 1990 年^[23]首次提出,此类神经网络特别适合模式分类问题,其结构见图 3。

第 1 层的输入权值 $IW^{1,1}$ 为输入样本的转置矩阵 P' ,输出 $a^1 = \text{radbas}(\|IW^{1,1} - p\|b^1)$;输入向量与哪个输入样本最接近,则 a^1 对应元素为 1,如果输入向量与几个类别的输入样本均接近,则 a^1 对应的几个元素均为 1。第 2 层权值 $IW^{2,1}$ 设定为期望值向量矩阵 T , T 的每个行向量只有一个元素为 1,代表相应的类别,其余元素均为 0,输出 $a^2 = \text{compet}(LW^{2,1}a^1)$ 。

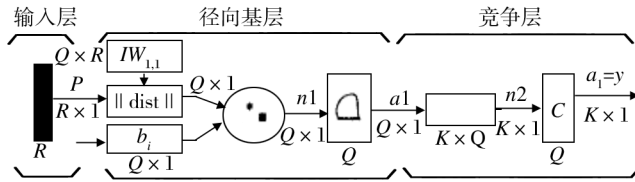


图3 PNN神经网络结构

Fig.3 Configuration of PNN neural network

相比高斯噪声,椒盐噪声具有孤立分布的特点,即噪声像素点幅值一定,位置随机,因此,先对图像中的极值点是否是椒盐噪声像素点进行模式分类。设 x_{ij} 为原始图像 X 在像素 (i,j) 处的灰度值, $[G_{\min}, G_{\max}]$ 是图像的 X 灰度取值范围, y_{ij} 为噪声图像 Y 在像素 (i,j) 处的灰度值,则密度为 p 的椒盐噪声定义为:

$$y_{ij} = \begin{cases} x_{ij} & \text{概率 } 1-p \\ \eta_{ij} & \text{概率 } p \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\eta_{ij} = [G_{\min}, G_{\max}]$ 。

用概率神经网络进行模式分类需要 2 个输入向量,定义如下。

1) PWMAD 向量^[24]。

y_{ij}, m_{ij}, d_{ij} 分别为噪声图像、中值图像和绝对差值图像在像素 (i,j) 处的灰度值, Y_{ij}, M_{ij}, D_{ij} 分别表示以 y_{ij}, m_{ij}, d_{ij} 为中心,窗口大小为 $(2N+1) \times (2N+1)$ 的图像块, PWMAD 可以定义为:

$$m_{ij} = \text{median}(Y_{ij}) \quad (4)$$

$$d_{ij} = \text{abs}(y_{ij} - m_{ij}) \quad (5)$$

$$\text{PWMAD}_{ij} = d_{ij} - \text{median}(D_{ij}) \quad (6)$$

该特征主要用于区分噪声和图像细节,取 $N=3$ 。

2) ROAD 向量。

y_{ij} 为噪声图像在像素 (i,j) 处的灰度值, Y_{ij} 是以当前像素为中心,窗口大小为 $(2N+1) \times (2N+1)$ 的图像块。 Y_{ij} 中除了中心点外的像素集合定义为 Y_{ij}^0 , Y_{ij}^0 中每一个像素 (m,n) 与中心点像素 (i,j) 的灰度值绝对差定义为 $s_{mn} = \text{abs}(y_{ij} - y_{mn})$ 。对 8 个 s_{mn} 的值排序,使得 $s_{mn}^{(r)} \leq s_{mn}^{(r+1)}$, $r=1,2,\dots,7$ 。因此, ROAD 向量定义为:

$$\text{ROAD}_p(y) = \sum_{r=1}^p s_{mn}^{(r)} \quad (7)$$

式中: $p=2,3,\dots,7$ 。

ROAD 值表示当前像素值与其邻近像素值的接近程度,因此取 ROAD 值作为 PNN 的第 2 个输入向量。

概率神经网络对以上 2 个向量进行综合,能有效地检测出椒盐噪声,其具体算法如下^[25]。

1) 选取图像中一定数量的噪声点和无噪声点作为样本点,计算样本点的 PWMAD 向量和 ROAD 向量,作为概率神经网络的输入,将椒盐噪声点记为 $(1, 0, 0)$,高斯噪声点记为 $(0, 1, 0)$,无噪声点记为 $(0, 0, 1)$,作为目标输出。

2) 创建 PNN 神经网络并训练^[26]。训练过程为网络的输入权重向量 $IW^{1,1}$ 设置为转置矩阵 P' , $LW^{2,1}$,训练完成后网络的输出矩阵和目标向量矩阵的残差为零。

3) 分别计算噪声图像中每一个像素的 PWMAD 向量和 ROAD 向量,并输入到训练好的神经网络,若输出为 $(1, 0, 0)$,则表示该点为椒盐噪声点,并对其进行中值滤波;若输出为 $(0, 1, 0)$,则表示该点是高斯噪声点,对其进行均值滤波;若输出为 $(0, 0, 1)$,则表示该点为图像点,对其不做滤波处理。

2.2 RBF 神经网络图像融合

图 1 所示的算法中,将分别经过中值滤波和均值滤波的图像作为 RBF 神经网络的输入,输出只有一个,即融合后的图像。基于研究对象输入、输出少,样本集合小等特点,选择自组织选取中心法,学习算法主要是决定网络中心和调节输出层权值。具体采用动态均值聚类学习法,该方法计算量小,能够实时找到网络中心^[27]。具体步骤如下。

1) 网络初始化。随机选取 h 个训练样本作为聚类中心 $c_i (i=1,2,\dots,h)$ 。

2) 将输入的训练样本集合按最近邻规则分组。计算 x_p 与中心 c_i 之间的欧氏距离,将 x_p 分配到输入样本的各个聚类集合 $\theta_p (p=1,2,\dots,p)$ 中。

3) 重新调整聚类中心。计算各个聚类集合 θ_p 中训练样本的平均值,即新的聚类中心 c_i ,如果 c_i 不再发生变化,那么计算得到的 c_i 即为 RBF 神经网络最终的基函数中心,否则返回 2),重新求解。

3 仿真实验

3.1 样本选取

选择物流包装生产线上最常见的瓦楞纸箱为图像采集对象,利用 300 万像素的工业相机获取瓦楞纸箱的图像作为实验原始图像,见图 4a,尺寸为 256×256 ,灰度级为 256。借助 Matlab 软件平台,在原始图

像中加入高斯噪声和椒盐噪声,在含有混合噪声的图像中选取一定数量的椒盐噪声点、高斯噪声点和非噪声点作为样本点来训练 PNN 神经网络。训练过程发现,随着样本点数量的增加,噪声点和图像点正确检测率有所下降,但仍均在 90% 以上,且网络训练时间也有所增加,因此在样本选取随机化原则下,以能够正确反映总体规律和提高检测效率的前提下,3 种像素点的样本数量均为 200 个。

3.2 实验结果

在原始图像上添加均值为 0,方差分别为 0.01, 0.03 和 0.05 的高斯噪声和椒盐噪声,使用峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)和熵(Entropy)3 个指标评价滤波性能和融合性能。滤波后,若 PSNR 越大,表明滤波输出图像越接近原始图像;若 MSE 越小,表明滤波效果越好;若熵值越大,表明图像包含的信息量越大,融合效果越好。在 Matlab 平台上分别利用均值滤波、中值滤波以及本文提出的基于神经网络的滤波及融合算法对含噪图像进行仿真实验,实验结果见图 4 和表 1。

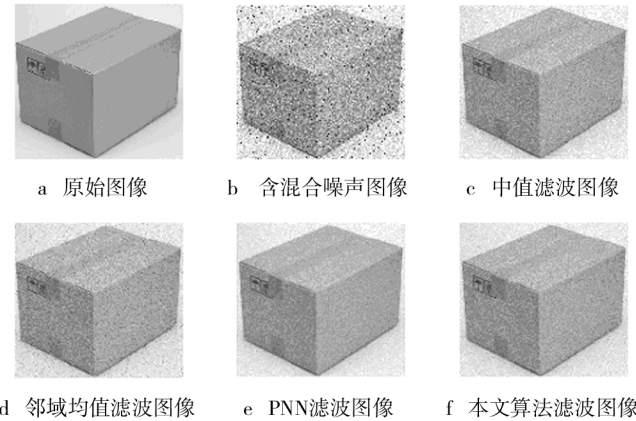


图 4 仿真实验结果
Fig. 4 Simulation experiment results

从图 4 可以看出,中值滤波和均值滤波 2 种单一滤波方法仅分别对椒盐噪声和高斯噪声的去除效果较为理想,但滤波后的图像边缘仍存在较多的噪声点且变得模糊。基于 PNN 的两步滤波方法去除两种噪声的效果要明显优于单一滤波方法。PNN 两步滤波的中值滤波图像和均值滤波图像经过 RBF 神经网络融合后的图像与原始图像更为接近,噪声的抑制效果更好,边缘保护能力更强,比单一的滤波方法更为优秀。

表 1 仿真实验结果对比
Tab. 1 Comparison of simulation experiment results

滤波方法	噪声参数	性能指标		
		PSNR	MSE	Entropy
未滤波	均值为 0	方差为 0.01		
		方差为 0.03	20.1547	6.27.4991
		方差为 0.05		6.9616
均值滤波	均值为 0	方差为 0.01	33.0036	32.5627
		方差为 0.03	31.6631	44.3377
		方差为 0.05	30.6362	56.1645
中值滤波	均值为 0	方差为 0.01	32.3564	37.7955
		方差为 0.03	32.2681	38.5717
		方差为 0.05	32.0415	40.6375
PNN 滤波	均值为 0	方差为 0.01	36.8150	13.5389
		方差为 0.03	36.6668	14.0087
		方差为 0.05	36.5174	14.4991
PNN 滤波及 RBF 融合	均值为 0	方差为 0.01	35.7181	17.4290
		方差为 0.03	34.8057	21.5037
		方差为 0.05	34.0839	25.3914

从表 1 可以看出,利用 PNN 检测并去除混合噪声以及利用 RBF 融合图像的方法的 PSNR 值明显大于单一滤波方法,且 MSE 值也明显小于单一滤波方法。随着噪声密度的增加,提出的方法在滤波效果和融合效果方面依然优于单一滤波方法,充分说明基于神经网络的混合滤波及融合方法能够保留更为丰富的图像信息,图像滤波效果更好,也证明了提出的基于神经网络的图像滤波方法要优于经典滤波方法。

4 结论

针对经典单一滤波方法对同时含有椒盐噪声和高斯噪声的图像滤波效果不理想的情况,提出了一种基于神经网络的噪声检测、混合滤波及图像融合的方法,用于机器人视觉系统对目标图像的处理。该方法首先利用 PNN 神经网络将椒盐噪声点、高斯噪声点和图像点进行检测并分类,分别采用中值滤波和均值滤波方法去除噪声点,然后构建 RBF 神经网络,通过对样本的学习,神经网络能汲取各种单一滤波算法的优势,融合出质量较好的图像。仿真实验结果表明,基于 PNN 神经网络的图像混合滤波方法及 RBF 神经网络的图像融合方法对含有混合噪声的图像具有较好的滤波效果,而且能有效地保护图像的细节信息。

参考文献:

- [1] 徐德,谭民,李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社,2011.
XU De, TAN Min, LI Yuan. Visual Measurement and Control for Robots[M]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [2] 谭志飞,毛美姣,龚娟. 改进滤波算法在机器人视觉目标图像处理中的应用研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(5): 823-832.
TAN Zhi-fei, MAO Mei-jiao, GONG Juan. Application of an Improved Filtering Algorithm to Robot Vision Target Image Processing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(5): 823-832.
- [3] 关雪梅. 数字图像噪声抑制算法比较研究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2012, 12(5): 40-42.
GUANG Xue-mei. Comparative Study on Digital Image Noise Suppression Algorithm[J]. Journal of Langfang Teachers College(Natural Science Edition), 2012, 12(5): 40-42.
- [4] 王俊芳,王正欢,王敏. 常用图像去噪滤波方法比较分析[J]. 现代商贸工业, 2009(16): 310-311.
WANG Jun-fang, WANG Zheng-huan, WANG Min. Analysis and Comparison of the Methods for Common Image De-noising Filtering[J]. Modern Business Trade Industry, 2009(16): 310-311.
- [5] 马向华. 数字图像中平滑去噪技术探讨[J]. 装备制造技术, 2012(7): 36-54.
MA Xiang-hua. Technology of Digital Image Denoising[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(7): 36-54.
- [6] 王文庆,晏婷. 基于空间域的图像去噪方法比较研究[J]. 西安邮电学院学报, 2012, 17(2): 75-79.
WANG Wen-qing, YAN Ting. Comparison on Image De-noising Methods Based on Spatial Domain[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2012, 17(2): 75-79.
- [7] 牛秀琴. 改进的领域均值滤波去噪算法研究[J]. 长治学院学报, 2012, 29(2): 4-8.
NIU Xiu-qin. Research on Improved Arithmetic of Neighborhood Mean Filtering[J]. Journal of Changzhi University, 2012, 29(2): 4-8.
- [8] 张文娟,康家银. 一种用于图像降噪的自适应均值滤波算法[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(12): 2495-2498.
ZHANG Wen-juan, KANG Jia-yin. Adaptive Mean Filtering Algorithm for Image Denoising[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(12): 2495-2498.
- [9] 杨樊,韩艳丽. 一种基于极值的自适应均值滤波算法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S4): 116-120.
YANG Fan, HAN Yan-li. New Adaptive Mean Filter Algorithm Based on Extreme Value[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S4): 116-120.
- [10] 郭明,朱敏,周晓东. 去除椒盐噪声的非对称有向窗加权均值滤波[J]. 激光与红外, 2011, 41(11): 1267-1272.
GUO Ming, ZHU Min, ZHOU Xiao-dong. Asymmetrical Orientation Weighted Mean Filter for Salt-and-pepper Noise Removing[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(11): 1267-1272.
- [11] 胡浩,王明照,杨杰. 自适应模糊加权均值滤波器[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(2): 15-17.
HU Hao, WANG Ming-zhao, YANG Jie. Adaptive Fuzzy Weighted Mean Filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(2): 15-17.
- [12] 吴朋波,王志巍,郭晓文,等. 自适应六边形窗口加权均值滤波[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(36): 177-180.
WU Peng-bo, WANG Zhi-wei, GUO Xiao-wen, et al. Adaptive Hexagonal Window Weighted Mean Filter[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(36): 177-180.
- [13] 何石,潘晓璐,李一民. 一种均值滤波的优化算法[J]. 信息技术, 2012(3): 133-137.
HE Shi, PAN Xiao-lu, LI Yi-min. Optimization Algorithm for Average Filtering[J]. Information Technology, 2012(3): 133-137.
- [14] 王博. 一种快速均值滤波算法[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012(10): 125-126.
WANG Bo. Fast Mean Filtering Algorithm[J]. Computer CD Software and Applications, 2012(10): 125-126.
- [15] 黄宝贵,卢振泰,马春梅,等. 改进的自适应中值滤波算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(7): 1835-1883.
HUANG Bao-gui, LU Zhen-tai, MA Chun-mei. Improved Adaptive Median Filtering Algorithm[J]. Journal of Computer Application, 2011, 31(7): 1835-1883.
- [16] 雷超阳,刘军华,张敏. 一种基于自适应的新型中值滤波算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(12): 60-62.
LEI Chao-yang, LIU Jun-hua, ZHANG Min. New Median Filter Algorithm Based on Adaption[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(12): 60-62.
- [17] 张霞,葛芦生. 自适应中值滤波算法的研究与应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(6): 217-237.
ZHANG Xia, GE Lu-sheng. A Well Adaptive Median Filtering Algorithm and Its Application[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(6): 217-237.
- [18] 张勇,陈大建,孙志军. 两种改进型中值滤波算法比较

- [J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 67-70.
- ZHANG Yong, CHEN Da-jian, SUN Zhi-jun. Comparison of Two Improved Median Filtering Algorithm[J]. Electro-optic Technology Application, 2010, 25(1): 67-70.
- [19] 邹文洁. 基于 PCNN 神经网络的图像去噪算法研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(8): 234-237.
- ZOU Wen-jie. An Image De-noising Algorithm Based on PCNN[J]. Computer Simulation, 2008, 25(8): 234-237.
- [20] 高超, 须文波, 孙俊. 图像椒盐噪声的自适应滤波算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(33): 188-191.
- GAO Chao, XU Wen-bo, SUN Jun. Adaptive Image Filtering Method for Salt & Pepper Noise[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(33): 188-191.
- [21] 宋寅卯, 李晓娟, 刘磊. 基于神经网络噪声检测的自适应中值滤波器[J]. 电视技术, 2011, 35(5): 39-53.
- SONG Yin-mao, LI Xiao-juan, LIU Lei. Adaptive Median Filter Algorithm Based on Neural Network Noise Detector[J]. Video Engineering, 2011, 35(5): 39-53.
- [22] 万小红. 常用图像去噪方法探析与比较[J]. 运城学院学报, 2011, 29(5): 60-63.
- WANG Xiao-hong. An Analysis and Comparison of the Method for Common Image Denoising[J]. Journal of Yuncheng University, 2011, 29(5): 60-63.
- [23] SEPOCHT D F. Probabilistic Neural Network[J]. Neural Networks, 1990(3): 109-118.
- [24] CMOJEVIC V, TRPOVSKI Z. Advanced Impulse Detection Based on Pixel-wise MAD[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(7): 589-592.
- [25] 蔡继亮, 叶微. 图像脉冲噪声的概率神经网络识别滤波方法[J]. 电讯技术, 2009, 49(12): 35-38.
- CAI Ji-liang, YE Wei. Image Impulsive Noise Detection and Suppression by Probabilistic Neural Network[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(12): 35-38.
- [26] 姬东朝, 宋笔锋, 易华辉. 基于概率神经网络的设备故障诊断及仿真分析[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(1): 82-85.
- JI Dong-chao, SONG Bi-feng, YI Hua-hui. Equipment Fault Diagnosis Based on Probabilistic Neural Network and Simulation Analysis[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(1): 82-85.
- [27] 孟飞, 杨小冈, 孙鹏, 等. 基于 RBF 神经网络的激光雷达图像滤波融合算法[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 615-618.
- MENG Fei, YANG Xiao-gang, SUN Peng, et al. Research on Filter Fusion of Laser Radar Image Based on RBF Neural Network[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 615-618.
- [28] 唐伟强, 王飞, 张冬至. 基于小波神经网络的激光散斑图像去噪技术研究[J]. 包装工程, 2009, 30(8): 28-30.
- TANG Wei-qiang, WANG Fei, ZHANG Dong-zhi. Filtering Technology of Laser Speckle Image Based on Wavelet Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8): 28-30.
- [29] 苏亮, 宋绪丁. 基于 Matlab 的概率神经网络的实现及应用[J]. 计算机与现代化, 2011(11): 47-50.
- SU Liang, SONG Xu-ding. Implementation and Application of Probabilistic Neural Network Based on Matlab[J]. Computer and Modernization, 2011(11): 47-50.

(上接第 35 页)

- [3] 高德, 刘壮, 孙智慧. 秸秆纤维 EPS 缓冲包装材料性能的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 201-204.
- GAO De, LIU Zhuang, SUN Zhi-hui. Study on the Properties of Cushioning Package Material Made of Corn Straw and EPS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 201-204.
- [4] 阿伦. 基于 ANSYS 的植物纤维包装制品静态特性模拟分析[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 8-10.
- A Lun. Simulation and Analysis of Static and Dynamic Characteristics of Plant Fiber Packaging Product Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 8-10.
- [5] 彭国勋. 运输包装[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999.
- PENG Guo-xun. Transport Packaging[M]. Beijing: Printing Industry Press, 1999.
- [6] 彭国勋, 王瑞栋, 郭延洪. 缓冲包装动力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1989.
- PENG Guo-xun, WANG Rui-dong, GUO Yan-hong. Cushioning Packaging Dynamics[M]. Changsha: Hunan University Press, 1989.
- [7] 骆光林, 朱大鹏. 蜂窝纸板缓冲机理[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 118-120.
- LUO Guang-lin, ZHU Da-peng. The Cushion Mechanism of the honeycomb Fiberboard[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 118-120.