基于图像处理和神经网络的光环境优化控制研究*

叶德堃，段中兴，于甜甜，李昊伦
（西安建筑科技大学 信息与控制工程学院，西安 710055）

摘　要：为了精确定位人体目标区域，以达到照明节能最优化，提出了一种改进的 Canny 算子与数学形态学相结合的图像处理技术，对室内图像进行边缘检测和噪声处理，得到含有人体目标的二值化图像，将得到的二值化人体背影模板的七个 Hu 不变矩作为 LVQ 神经网络的输入向量，训练出能够准确识别出人体背影的网络；再建立出室内图像特征与人体数量和坐标的匹配模型，从而根据人体坐标和数量来实现对灯具的优化控制。仿真和实验结果表明，改进的 Canny 算子与 LVQ 神经网络的结合对室内光环境的优化控制具有很好的应用价值。

关键词：Canny 算子；数学形态学；矩量保持法；Hu 不变矩；LVQ 神经网络
中图分类号：TP391　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2013)03-0953-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.03.081

Study of light environment optimization and control based on image processing and neural network

YE De-kun, DUAN Zhong-xing, YU Tian-tian, LI Hao-lun
(*School of Information & Control Engineering, Xi' an University of Architecture & Technology, Xi' an* 710055, *China*)

Abstract: In order to positioning the target area of human body to achieve the optimization of the lighting energy saving, this paper put forward an image processing technique combined the improved Canny operator and mathematical morphology, detected the edge of the indoor image and noise processing, and then to get the binary image containing human as target. It took seven Hu moment invariants of binary human figure template as the input vector of LVQ neural network, which were calculated to get, and trained network to identify the human figure accurately. After that, building the matching model of indoor image characteristics and the personnel quantity and coordinates was well designed to realize the optimization control to indoor lamps according to personnel quantity and coordinates. Simulation and experimental results show that with the combination of the improved Canny operator and LVQ neural network has quite application value on the optimization control of indoor light environment.

Key words: Canny operator; mathematical morphology; method of moment keeping; Hu moment invariants; LVQ neural network

公共建筑的光环境直接影响到工作人员的工作效率及身心健康，因此在使人们满足舒适性、高效性的前提下，又可以节能环保，是值得研究的一个重要课题。公共建筑内人群流动性大、情况复杂的特点，使得安装在其内的灯具不易控制，从而导致了许多能源浪费[1]。国内外关于光环境方面的研究也比较丰富，目前许多可调光、智能化、网络化的照明控制系统随着计算机信息技术的发展都孕育而生，但仍存在许多问题。Galasiu 等人[2]提出在未来室内照明的发展中利用智能遮阳设备及材料来改善光环境，这种方法虽然可行，但对天气情况依赖性较大，不易得到控制。陈晶[3]提出了采用光敏、红外传感器对光环境进行探测，利用单片机进行决策控制的照明控制设备。这种方法虽然结构简单，但仍存在功能单一、误判率高，无法根据实际情况作出控制的缺陷。王晓恩等人[4]提出的红外检测和 CCD 图像处理照明系统，将摄像头连接至下位机，下位机通过以太网连接至服务器，应用相关的软件读取并显示视频图像；再将相应的控制信息发送至下位机，通过下位机进行灯光控制从而来改善光环境，但无法准确检测出人员数量和具体位置，并且耗费了大量的工程布线和设备资源。

1　Canny 算子概述

传统的 Canny 算子获得边缘检测的具体步骤有：a)用高斯滤波器平滑图像；b)用一阶偏导有限差分计算梯度幅值和方向；c)对梯度幅值进行非极大值抑制；d)用双阈值算法检测和连接边缘。但高斯滤波和双阈值法有其不足之处，本文将对其作出改进，以得到更好的边缘检测效果[5]。

1.1　高斯滤波的不足之处

传统的 Canny 算子利用二维高斯函数进行滤波，滤波函数为

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1}$$

图像卷积：

$$I_G(x,y)=G(x,y)\otimes I(x,y) \tag{2}$$

其中：$I(x,y)$ 为原始图像，$I_G(x,y)$ 为滤波平滑后图像。平滑参数 σ 的选取对去除噪声有着决定性的影响，且人为地选取参

收稿日期：2012-08-10；**修回日期**：2012-09-29　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(51178373)

作者简介：叶德堃(1986-)，男，陕西商洛人，硕士研究生，主要研究方向为嵌入式系统在图像处理、光环境检测的应用(donghai_1123@163.com)；段中兴(1969-)，男，湖南茶陵人，教授，硕导，主要研究方向为智能信息处理、智能控制；于甜甜(1987-)，女，山东烟台人，硕士，主要研究方向为自动检测技术与信息处理；李昊伦(1987-)，男，云南昆明人，硕士，主要研究方向为智能控制.

数更加不够准确。σ 越小,则函数越集中,即仅在一个很小的局部范围内平滑,易使去噪能力变弱;σ 越大,则表示图像在一个较大的范围内进行平滑,容易丢失边缘细节,使滤波效果受到限制,得不到理想结果。

1.2 用双阈值法检测和连接边缘的缺点

双阈值算法对非极大值抑制的两个阈值分别为 T_1 和 T_2,可得到两个阈值边缘图像为 $N_1[i,j]$ 和 $N_2[i,j]$。由于 $N_2[i,j]$ 是使用高阈值得到的,因而含有很少的假边缘,但有间断(不闭合)。双阈值法要在 $N_2[i,j]$ 中把边缘连接成轮廓,当到达轮廓的端点时,该算法就在 $N_1[i,j]$ 的 8 邻点位置寻找可连接到轮廓上的边缘,这样算法不断地在 $N_1[i,j]$ 中收集边缘,直到将 $N_2[i,j]$ 连接起来为止。

两个阈值的检测比一个阈值更加灵活,但也存在问题。若高阈值 T_2 越大,则可去除假边缘,但同时误除的边缘目标信息就会越多;若低阈值 T_1 越小,则连接的边缘轮廓就越多,但同时也会生成较多的虚假边缘,当 T_1 增大时,阈值图像中的边缘轮廓可能会缩减,最终可能得到的是间断的轮廓边缘。

综上所述,由于 Canny 算子进行边缘检测时,参数的选取很难兼顾到各个方面的要求,对不同背景或转换角度后的图像,同样的参数可能会得到很差的结果,所以本文在求取阈值时采用矩量保持法,以改善检测效果。

2 改进的 Canny 算子

2.1 数学形态学滤波

考虑到高斯滤波不够理想,所以采用形态学滤波代替高斯滤波。数学形态学的基本思想是用一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状以达到对图像分析和识别的目的。数学形态学方法在本文的使用中显示出了一些明显的优势,如基于数学形态学的形态滤波器可借助于先验的几何特征信息,利用形态学算子有效地滤除噪声,又可保留图像中的原有信息。在腐蚀和膨胀的操作中,结构元素的选取对处理结果具有决定性的意义,结构元素必须在几何上比原图简单且有界,同时结构元素的形态应该具有一些凸性。当与 Canny 算子综合运用后,去噪能力、边缘细化能力更为突出。$F(x,y)$ 为灰度图像,$B(m,n)$ 为结构元素,形态学图像处理主要运算为腐蚀、膨胀、开运算、闭运算等,定义如下:

$$\text{腐蚀运算}: F\otimes B = \{F(x-m,y-n)+B(m,n)\}\max \tag{3}$$

$$\text{膨胀运算}: F\otimes B = \{F(x+m,y+n)-B(m,n)\}\min \tag{4}$$

$$\text{开运算}: F^{\circ}B = (F\otimes B)\otimes B \tag{5}$$

$$\text{闭运算}: F\cdot B = (F\otimes B)\otimes B \tag{6}$$

当在 Canny 算子中引入形态学开闭运算,也就是依次用两种不同类型的结构元素对灰度图像进行顺序开闭运算,平滑图像,去除噪声,来改善滤波效果。

本文中采用的结构元素分别是指定大小为 R 的菱形形状的结构化元素(R 是从结构化元素原点到其点的距离)和指定半径为 R 的平面圆盘形的结构元素,其中 R 必须为非负整数。两个结构元素分别为 1×1 菱形元素和半径为 1 的圆盘形结构,用以上两个元素对图像分别进行开闭运算,既能够去除噪声,又能够保持边缘细节,这是因为菱形结构元素相对来说尺度较小,去噪能力弱,但它能够保持边缘细节,而圆盘形结构元素尺度较大,去噪能力强,但同时会去除掉许多细节边缘。如果将两者综合使用则能同时发挥出两者的优点。

2.2 矩量保持法求阈值

在传统的 Canny 算子中,双阈值法的使用有其不足之处,因此可采用矩量保持法求阈值。矩是随机变量的一种数学特征,具有高效率的正态检验性,矩法是用样本矩函数的估计来作为相应的总体矩函数的估计量,图像也可看做是二维随机量的一个样本。阈值分割也是对整体矩函数的一种描述和估计,它可利用样本来估计总体特征,并且可利用样本的分布来估计总体的分布。因此可利用参数估计的方法来对目标图像进行分割。矩量保持法的核心思想是求得一个最优的阈值,使分割前后图像的矩量保持不变[5~7]。二维图像的 k 阶矩定义为:

$$m_k = \frac{1}{NM}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{M} f^k(x,y) \quad m_0 = 1 \tag{7}$$

其中:M、N 是 $f(x,y)$ 灰度图像的行列数。对图像进行分割之后的两个灰度级为 h_0、h_1、h_0 代表图像中灰度值为 0 值,h_1 代表图像中灰度值为非 0 值。假设图像区域中低于和高于指定阈值像素占整个图像像素的比例分别为 p_0 和 p_1。那么分割后二值图像的前三阶矩由式(8)计算。

$$m'_k = \sum_{i=0}^{1} p_i (h_i)^k \quad k=1,2,3 \tag{8}$$

要取得最优阈值,图像进行分割前后的前三阶矩应该相等,即

$$m_k = m'_k \tag{9}$$

即可得:

$$p_0 h_0^0 + p_1 h_1^0 = m_0 \tag{10}$$

$$p_0 h_0^1 + p_1 h_1^1 = m_1 \tag{11}$$

$$p_0 h_0^2 + p_1 h_1^2 = m_2 \tag{12}$$

$$p_0 h_0^3 + p_1 h_1^3 = m_3 \tag{13}$$

由上式可解得:

$$p_0 = \frac{A - m_1}{(r_1^2 - 4r_0)^{0.5}} \tag{14}$$

其中:

$$r_0 = \frac{m_1 m_2 - m_2^2}{m_2 - m_1^2}, r_1 = \frac{m_1 m_2 - m_3}{m_2 - m_1^2} \tag{15}$$

$$A = \frac{1}{2}[(r_1^2 - 4r_0)^{0.5} - r_1] \tag{16}$$

求得 p_0 后,阈值 t 应该满足

$$p_0 = \sum_{i\leqslant t} p_i \tag{17}$$

则可求得阈值 t。当无法得到精确的灰度值适应 p_0 时,可选择最接近的灰度值作为代替。把矩量保持法加入到 Canny 算子中来代替双峰阈值检测,可克服双峰阈值法的不足,同时可根据图像自身的特点来选取最合适的阈值,也无须迭代或搜索,运算速度快,可满足实时性的要求,分割效果好,在实际运用中是一种较好的阈值求解法。本文以从教室内采集到的图像进行处理,仿真效果如图 1、2 所示。

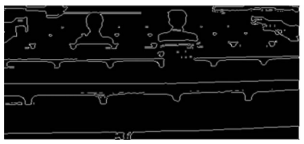

图1 Canny算子边缘检测

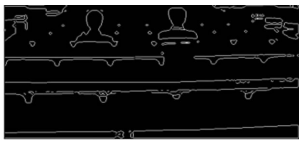

图2 改进算子边缘检测

将改进过后的 Canny 算子与其他传统算子进行对比,显现出信噪比好、定位精度高,对虚假边缘响应能够得到最大抑制等优良的性能。实验结果证明,改进的 Canny 算子可有效地检测出人体背影轮廓,可较准确地得到边缘细节。与其他边缘检测算子相比,具有较高的准确率,能够更精确地保留图像中的目标边缘信息。边缘检测效果如图 1、2 所示。

2.3 最终算法对比仿真

将改进的 Canny 算子加入到图像的形态学综合处理中可

以说明,改进的综合算法在提高对图像边缘敏感性的同时,能够抑制噪声、填补空穴、消除断口,以及从线结构中分离厚层区域,更进一步地分割出了目标区域,能很好地显示出人体目标,与传统的图像分割法相比,效果十分明显。算法对比效果如图 3、4 所示。

图3　传统阈值分割

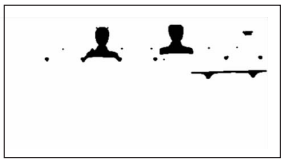

图4　本文算法

3　LVQ 神经网络的识别

学习向量量化神经网络主要用于训练竞争层的有监督学习方法的输入前向神经网络,LVQ 神经网络在模式识别和图像处理领域的应用很广泛。其能精确地对图像信息进行分类,从而建立一个对各种人体背影进行综合判断的模型。与 BP 算法相比,LVQ 网络更适合处理图像分类问题,利用 LVQ 网络可以更好地提高系统整体的学习能力和收敛性[8,9]。

教室中的人体背影通常有几个大众化的姿势,经过统计,决定用三种常见的人体背影作为模板进行神经网络的训练。再对采集到的每幅图像分成六个区域进行操作,对每个区域进行 LVQ 神经网络的人体识别。如果经过网络识别出人体背影,则进行模板匹配,确定人体数量和坐标,如果未能判断出人体背影,则进行新一轮判定。

3.1　Hu 不变矩

针对 LVQ 神经网络输入向量的特点,将 Hu 不变矩引入到图像的分析中。Hu 不变矩是由代数不变量的理论推出一系列的矩不变量用于形状识别的,这里的“不变”意味着图像或图形的某些特征量在大小变化(尺度)、位置变化(平移)、方向变化(旋转)的情形下保持不变。其中对于灰度图像分布为 $f(x,y)$ 的图像,其 $(p+q)$ 阶矩定义为

$$m_{pq}=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}x^p y^q f(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad p,q=0,1,2\cdots \tag{18}$$

$(p+q)$ 阶中心矩定义为

$$\mu_{pq}=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}(x-\bar{x})^p(y-\bar{y})^q f(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad p,q=0,1,2\cdots \tag{19}$$

其中,$(\bar{x},\bar{y})$ 代表其重心:

$$\bar{x}=\frac{m_{10}}{m_{00}},\bar{y}=\frac{m_{01}}{m_{00}} \tag{20}$$

归一化中心距定义为

$$\eta_{pq}=\frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\rho}},\rho=\frac{(p+q)}{2}+1 \tag{21}$$

从而利用二阶和三阶归一化中心矩构造了七个不变矩:M_1 ~ M_7。

3.2　LVQ 神经网络识别分类

将三种背影图像的七个 Hu 不变矩作为 LVQ 神经网络的输入,通过 LVQ 神经网络模型的识别,可精确地辨识出图像中是否出现有人体目标。如果有,则保留图像,为模板匹配提供输入,通过模板匹配算法计算出室内的人数,同时得到人员的精确位置。本文把实地采集到的五十组含有三种人体背影的图像作为网络的训练样本,将每个图像的七个 Hu 不变矩作为网络的输入量。为了显示出 LVQ 神经网络能够更快速地精确分类,在此,采用 BP 神经网络进行对比仿真。将网络的目标误差设定为 0.000 1,学习速率设定为 0.01,隐含层神经元数为 20。数据经过反复实验,LVQ 神经网络迭代到第 33 次时达到预设精度,迭代停止时,误差为 9.09842e－005,仿真曲线如图 5 所示;而 BP 神经网络迭代到 113 次时才达到预设精度,迭代停止时,误差为 9.99979e－005,仿真曲线如图 6 所示。所以迭代次数和误差结果表明了 LVQ 神经网络可以更快速精确地判断出三种人体背影。

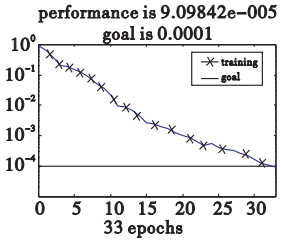

图5　LVQ神经网络误差曲线

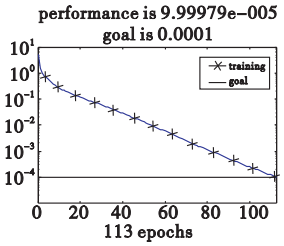

图6　BP神经网络误差曲线

4　模板匹配及灯具控制

4.1　快速模板匹配

模板匹配就是在一幅大图像中搜寻目标,已知该图中有要找的目标,且该目标同模板有相同的尺寸、方向和图像,通过一定的算法可以在图中找到目标,确定其坐标位置[10]。传统的模板匹配算法具有计算量大、速度较慢的特点,而改进过后的算法克服了这些问题。

$$R(i,j)=\frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}S^{ij}(m,n)\times T(p,q)}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[S^{ij}(m,n)]^2}\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[T(p,q)]^2}} \tag{22}$$

其中:$R(i,j)$ 是指待测图像与模板图像的归一化互相关函数;$S^{ij}(m,n)$ 表示为 $m\times n$ 维的待测图像的像素点;$T(p,q)$ 为 $p\times q$ 维的模板图像的像素点,其中,$p\leqslant m$,$q\leqslant n$ 在被搜索图中完成全部搜索后,找出 R 的最大值 $R(i,j)$,其对应的子图 $S^{ij}(m,n)$ 即为匹配目标。

对已经用 LVQ 神经网络做出有人体背影判定的画面,要得到一个背影数量和坐标的精确位置,就必须利用模板匹配算法进行人体数量的计算和坐标定位。模板匹配就是在一幅大图像中搜寻目标,已知该图中有要找的目标,且该目标同模板有相同的尺寸、方向和图像,通过一定的算法可在图中找到目标,确定其坐标位置及数量。传统的模板匹配算法是利用匹配图和原图矩阵之间的相关系数值进行目标识别,匹配的程度跟选取的阈值大小相关,算法的运行时间长,计算量大。

本文采用基于灰度的快速模板匹配算法,在传统算法上作了改进。将一次的模板匹配过程更改为两次匹配。

第一次匹配为粗略匹配。取模板的隔行隔列数据,即 1/4 的模板数据,在被搜索图上进行隔行隔列匹配,即在原图的 1/4 范围内匹配。由于数据量大幅减少,匹配速度显著提高。同时需要设计一个合理的误差阈值 H_0:

$$H_0=\frac{h_0\times(m+1)\times(n+1)}{2} \tag{23}$$

其中:h_0 为各点平均的最大误差,一般取 35 ~ 45 即可;m、n 为模板的长宽。

第二次匹配是精确匹配。在第一次误差最小点 $(i_{\min},j_{\min})$ 的邻域内,即在对角点为 $(i_{\min}-1,j_{\min}-1)$,$(i_{\min}+1,j_{\min}+1)$ 的矩形内进行搜索匹配,得到最后结果。

4.2 灯具控制

图 7 中虚实线分别为基于灰度快速模板匹配算法所查找出的人体背影区域。图中实线所圈人体背影中心坐标为

$g = [j + (\text{pipei_width})/2, i + (\text{pipei_height})/2] = [138, 48]$

图中虚线所圈人体背影中心坐标为

$g = [j + (\text{pipei_width})/2, i + (\text{pipei_height})/2] = [268, 41]$;

人体数量:$r = 2$;

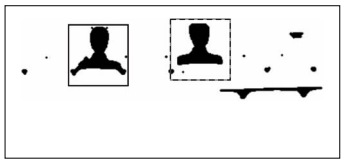

图7 人体背影模板匹配

灯具控制器可选用 ARM 系列的 STM32 控制芯片来作信号处理,照度传感器采用 BH1710,扩展芯片采用 8155,使用 I^2C 总线来进行数据传输,I^2C 总线连接方式为先发送起始信号等待应答,应答成功后发送地址信号等待应答,应答成功后开始对从器件进行操作。

当初始化成功后即可进行数据的读取,读取后的数据存入控制芯片存储器,并通过判断进行一系列控制操作。其中根据不同的数据产生不同的功能,可将开灯控制字设置为 1,关灯控制字设置为 0,8155 芯片的输出口是与教室内每个座位上方的控制区域严格对应的,当检测出人体背影所在的坐标区域,就向对应座位区域控制器的端口写入控制命令。如此就实现了根据人体坐标来控制相应位置灯具的功能。

室内灯具的照明范围与背影座位的坐标范围是一一对应的,当背影中心坐标被锁定后,由控制器判定此坐标在哪一个坐标范围之中,由此来判定各个灯具的开关。本文将室内灯具的范围划为六个区域,分别为

A 区($0 < j < 126, 0 < i < 77$);B 区($126 < j < 252, 0 < i < 77$)

C 区($252 < j < 378, 0 < i < 77$);D 区($0 < j < 126, 77 < i < 154$)

E 区($126 < j < 252, 77 < i < 154$); F 区($252 < j < 378, 77 < i < 154$)

4.3 最终方案评价

本文中选取灯具控制方案的评价标准主要有误判率、精确度、低功耗、低成本。评价系统中的对比控制方案主要采用引言中提到的两种光环境控制方法,A 为陈晶等人的利用光敏红外传感控制方案,B 为王晓恩等人提出的红外检测和 CCD 图像处理照明系统,C 为本文方案。采用关联矩阵法对以上三个因素进行权重计算,如表 1 所示,然后对评价系统的各个方案计算其综合评价值[11]。

表 1 关联矩阵法权重计算

评价因素	1	2	3	4	5	6	7
误判率	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	3.0
精确度	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	2.0
低功耗	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
低成本	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
合计	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	6.0

经计算后得到误判率、精确度、低能耗、低成本的权重因子分别为:$\alpha = 0.5$, $\beta = 0.33$, $\gamma = 0.17$, $\delta = 0$。随后由评价主体(一般为专家群体或标准参考)确定评价尺度,以使方案在不同指标下的实施结果能统一度量。对方案 A、B、C 的综合评价值分别为:$V_1 = 2.67$, $V_2 = 2.83$, $V_3 = 3.33$。与其他三个的照明控制方案的对比中,本文控制方案具有较高的综合评价值,因此能够得到令人满意的结果。

5 结束语

本文提出了基于改进的 Canny 算子与 LVQ 神经网络相结合的光环境控制方法,利用了 Canny 算子和数学形态学良好的边缘检测特性和矩量保持法的实时性和适应性,同时克服了其他算法在图像处理上抑制噪声差的缺点,与一些分类识别算法相比,LVQ 神经网络对目标图像的分类识别更精确、更迅速。两者的结合为最终的匹配算法和灯具的精确控制奠定了基础。仿真实验表明,本文方法可很好地去除图像噪声,得到边缘细节,比传统图像分割算法更理想,在人体识别上 LVQ 神经网络能够更快速地精确分类,两者在光环境的优化控制应用上,得到了令人满意的结果。

参考文献:

[1] 尚喆. 住宅室内光环境人性化设计研究[D]. 江苏:江南大学,2008.

[2] GALASIU A D, VEITCH J A. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(17): 728-742.

[3] 陈晶. 基于单片机的教室灯光自动控制器的研究[D]. 福建:福建农林大学,2007.

[4] 王晓恩,叶永伟,林海,等. 基于 multi-agent 的楼宇智能照明系统节能技术[J]. 照明工程学报,2011,22(4):78-83.

[5] 罗诗途,罗飞路. 基于梯度调整的矩不变自动阈值图像分割算法[J]. 电子技术应用,2004,30(6):11-13.

[6] 李永平,张爱华,郭卫刚. 基于矩不变散焦原理的脉搏波形提取[J]. 科学技术与工程,2008,8(16):4550-4553.

[7] 张娟,李贻斌,宋锐. 基于矩保持法的彩色目标深度测量[J]. 计算机测量与控制,2007,15(11):1455-1458.

[8] 郑波,朱新宇. 基于 LVQ 神经网络模型的飞机故障分类诊断[J]. 中国民航飞行学院学报,2009,20(4):3-5.

[9] 陈红,王巧华. 基于神经网络与图像处理的花生仁霉变识别方法[J]. 农业工程学报,2007,23(4):158-161.

[10] 洪流,张荫锡. 神经网络的二值图像模式识别技术[J]. 红外与激光工程,2001,30(6):432-438.

[11] 汪应洛. 系统工程[M]. 北京:机械工业出版社,2005:124-130.

[12] CHEN Zi-kuan, TAO Yang, CHEN Xin. Wavelet based adaptive thresholding method for image segmentation[J]. Optical Engineering, 2001, 40(5): 868-874.

[13] FENG Q J, QIN A, WU F. SIFT and population statistics based segment of CT protage image[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(6): 873-878.

[14] 邓超,王瑞. 基于改进神经网络的 CCD 图像去噪方法[J]. 中北大学学报:自然科学版,2010,31(2):128-132.

[15] 杨朝辉. 基于全局优化相关系数的边缘检测算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(8):3159-3162.

[16] 张涛,肖永豪,余卫宇. 基于鱼群算法的图像阈值分割[J]. 计算机应用研究,2011,28(3):1168-1170.

[17] 杨淑莹. 图像模式识别—VC++技术实现[M]. 北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2005.