

陈彩文,杜永贵,周超,等. 基于支持向量机的鱼群摄食行为识别技术[J]. 江苏农业科学,2018,46(7):226-229.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.057

# 基于支持向量机的鱼群摄食行为识别技术

陈彩文<sup>1,2</sup>, 杜永贵<sup>1</sup>, 周超<sup>2</sup>, 孙传恒<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学信息工程学院, 山西太原 030024;

2. 国家农业信息化工程技术研究中心/农业部农业信息技术重点实验室/北京市农业物联网工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:**应用计算机视觉技术对镜鲤鱼群的摄食行为进行识别,减少养殖过程中人力的损耗,提出了一种基于图像纹理的鱼群摄食的自动检测识别方法。首先利用相机采集鱼群正常状态和摄食时的图片,之后对图片进行预处理,利用灰度差分统计法、灰度共生矩阵和高斯马尔科夫随机场模型提取鱼群的 13 个纹理特征,最后利用支持向量机(support vector machine,简称 SVM)算法对鱼群图像进行分类识别。结果表明,支持向量机对测试集的识别率达到 96.5%,运行时间为 39.04 s,且使用主成分分析(principal component analysis,简称 PCA)算法后,支持向量机对测试集的识别率达到 93.5%,运行时间为 0.63 s,可以达到对鱼群摄食自动识别的要求。

**关键词:**计算机视觉;图像纹理;支持向量机;主成分分析;鱼群摄食;自动识别;自动监测

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)07-0226-04

随着中国水产养殖业的快速发展,鱼类的精细养殖技术在现代工厂化水产养殖中受到了越来越多的关注。在生产中,鱼的摄食行为能够反映其生理状况及养殖条件是否合适等。同时正确地识别鱼群摄食行为不仅可以提高鱼类的养殖效率,避免水质污染,而且可以压缩生产成本。因此,研究鱼群的摄食行为对提升鱼类养殖技术具有积极作用<sup>[1-3]</sup>。但当前大部分的鱼类养殖还是基于人工观测的投喂模式,而人工投喂须要养殖人员具有一定的养殖经验<sup>[4-5]</sup>。通过人眼正确地判断出鱼群的摄食状态,并根据经验人为地投放相应的投饵量。但是,高昂的人工成本及投喂饲料的主观性极大地影响了生产过程中的效率。因此,正确识别出鱼群的摄食行为对工厂精细化养殖具有重要的实用价值<sup>[6-7]</sup>。

利用计算机视觉技术及时发现和检测鱼类的运动状态,可以为鱼类的饵料量提供重要的参考信息。计算机视觉技术因其非接触、高精度、可量化的优点,目前已逐渐应用于动物

自动识别研究领域。随着现代鱼类养殖检测技术的进步,不少国内外专家已将计算机视觉技术应用到水产品检测与分级中,并取得了一定的成果<sup>[8-10]</sup>。在运动目标检测方面,Kato 等开发了 1 个金鱼目标检测与跟踪系统,实现了对金鱼的自动检测与行为识别<sup>[11]</sup>;Ma 等利用计算机视觉系统跟踪鱼的轨迹来监测水质<sup>[12]</sup>;张志强等利用计算机视觉技术实现了对鲢鱼、鲫鱼、鳊鱼和鲤鱼的分类识别,准确率高达 96.67%<sup>[13]</sup>。于欣等利用光流法和特征统计的方法对鱼群的异常行为进行检测,取得了较好的试验效果<sup>[14]</sup>。但目前对鱼群运动状态识别的相关研究还较少。因此,本研究尝试利用计算机视觉技术对鱼群的运动状态进行分类识别,以期达到对鱼类的自动监测。

## 1 试验材料和设备

本试验在北京小汤山国家精准农业示范基地的循环水养殖系统的养殖池中进行。本研究选用镜鲤鱼群作为试验对象,为保证图片的成像质量,相机架在养殖池的斜上方,拍摄时适当地调整相机的角度,使相机的视野能够清晰地拍到鱼群的运动情况。然后从所拍摄的图片中,挑选成像质量较好的鱼群正常游动时的图片和摄食时的图片进行分析。

本试验所采用的数据集为自制的鱼群图片,鱼群图片库共有 420 张图片(210 张鱼群在正常游动下的图片和 210 张鱼群在摄食时的图片),分别把鱼群运动图片库中鱼群正常

收稿日期:2016-11-15

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2014BAD08B09-02);北京市自然科学基金(编号:6152009)。

作者简介:陈彩文(1988—),女,山西忻州人,硕士,主要从事图像处理研究。E-mail:877594254@qq.com。

通信作者:孙传恒,副研究员,博士,主要从事农业信息化的研究。E-mail:sunch@nercita.org.cn。

[9]李金梦,叶旭君,王巧男,等. 高光谱成像技术的柑橘植株叶片含氮量预测模型[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(1):212-216.

[10]王植,周连第,李红,等. 桃树叶片氮素含量的高光谱遥感监测[J]. 中国农学通报,2011,27(4):85-90.

[11]易时来,邓烈,何绍兰,等. 锦橙叶片氮含量可见近红外光谱模型研究[J]. 果树学报,2010,27(1):13-17.

[12]黄双萍,洪添胜,岳学军,等. 基于高光谱的柑橘叶片氮素含量多元回归分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):132-138.

[13]王巧男,叶旭君,李金梦,等. 基于双波段植被指数(TBVI)的柑

橘冠层含氮量预测及可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(3):715-718.

[14]刘燕德,熊松盛,陈洞滨. 赣南脐橙果园土壤全氮和有机质近红外漫反射光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(10):2679-2682.

[15]钟林生. 赣南脐橙果园土壤中稀土元素的分布特征研究[D]. 赣州:赣南师范学院,2012.

[16]张光伟. 赣南脐橙叶片生长信息光谱诊断方法[D]. 南昌:华东交通大学,2014.

游动状态和鱼群在摄食状态的前 110 张图片作为训练集,后 100 张鱼群正常游动时的图片和鱼群在摄食时的图片作为测试集,即训练集共有 220 张图片、测试集共有 200 张图片。试验所采用的相机为尼康 D90,图像为  $1\,280 \times 720$  的真彩图像,格式为 JPEG。图像分析软件采用的是 MATLAB R2013a 和 libsvm-mat-2.89 工具箱。图像采集装置如图 1 所示。

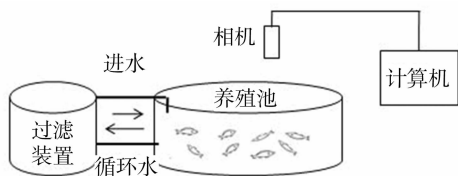


图1 图像采集装置示意

## 2 数据处理

由于鱼类具有应激性,且鱼类在水中活动会引起水面不断波动,因此在水中检测鱼群的运动状态难度较大,但笔者通过对循环水养殖系统的长期观察发现,鱼群在摄食时,会在水面激起强烈的水花,引起水面晃动,而鱼群在正常游动的情况下,不存在这一状况,因此利用鱼群在不同运动状态下所对应的纹理可以识别出鱼群的运动状态<sup>[15]</sup>。

图像的纹理分析是指通过一定的图像处理技术抽取物体的纹理特征,从而获得对纹理定量或定性描述的过程。一般情况下图像的纹理特征具有周期性,它能反映物品的质地,如粗糙度、光滑度、颗粒度、随机性、规范性等。关于纹理,国内外的研究学者做了大量的研究,并从中总结了多种描绘纹理的方法<sup>[15-18]</sup>,但各种方法的适用场合各不相同,经过对比大量文献资料,在本试验中选择 3 种较为典型的纹理特征提取方法来提取鱼群的纹理特征,分别为灰度差分统计法、灰度共生矩阵、高斯-马尔科夫随机场模型<sup>[19-21]</sup>。

对于一幅鱼群图片,首先须要对图片进行预处理,然后用这 3 种方法提取鱼群的纹理特征,最后利用支持向量机(support vector machine,简称 SVM)对鱼群的运动状态进行分类识别,继而判断出鱼群的运动状态,以达到对鱼群运动状态分类识别的目的。本试验的系统流程如图 2 所示。

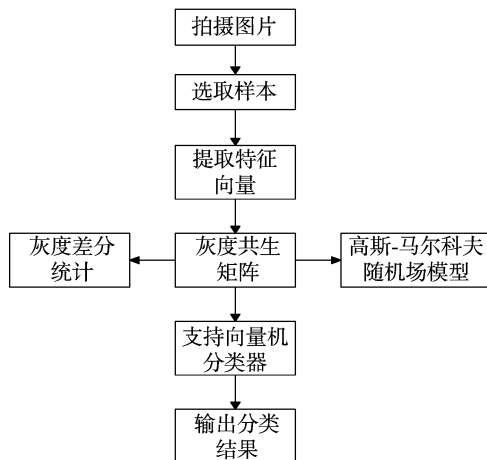


图2 本试验的系统流程

### 2.1 基于灰度差分统计法的纹理特征提取

灰度差分统计法的核心思想是通过计算图像的统计特征,从中推导出一些特征量来描述纹理。设  $(x, y)$  为图像中

的一点,该点和它只有微小距离的点  $(x + \Delta x, y + \Delta y)$  的灰度差值为

$$g_{\Delta}(x, y) = g(x, y) - g(x + \Delta x, y + \Delta y)。$$

式中:  $g_{\Delta}$  称为灰度差分。若设灰度差分值的所有可能取值为  $m$ ,则令点  $(x, y)$  在整个画面上移动,统计出  $g_{\Delta}$  取各个数值的次数,由此可以得到  $g_{\Delta}$  的直方图。由直方图可以得到  $g_{\Delta}$  取值的概率  $P(k)$ ,当取较小差值  $k$  的频率  $P(k)$  较大时,说明纹理较粗糙,反之,则说明纹理较细致<sup>[22]</sup>。相关的纹理特征有

平均值  $f_1 = \frac{1}{m} \sum_i i P(i)$ , 对比度  $f_2 = \sum_i i^2 P(i)$ , 熵  $f_3 = - \sum_i P(i) \log_2 [P(i)]$ 。

### 2.2 基于灰度共生矩阵的纹理特征提取

灰度共生矩阵是一种典型的分析纹理图像的二阶统计法,它描述了灰度图像关于方向、相邻间隔、变化幅度等的综合信息,这种方法在许多文献中得到了推广应用,是最为有效的描述纹理的算子之一。一般取其中的 4 个常用的纹理特征参数,这 4 个纹理参数分别为

(1)能量:它反映的是灰度图像分布均匀的程度和纹理粗细的程度,当其值越大时,纹理越粗糙。公式如下:

$$f_4 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P^2(i, j, \theta, d)。$$

式中:  $i$  代表灰度图像中的一个像素点;  $j$  代表灰度图像中的另一个像素点;  $\theta$  代表灰度图像中像素点  $i$  和像素点  $j$  与坐标横轴的夹角;  $d$  代表像素点  $i$  和像素点  $j$  之间的距离。

(2)相关性:它度量了空间灰度共生矩阵元素在行或列方向上的相似程度,因此,其值的大小反映了图像中局部灰度的相关性。公式如下:

$$f_5 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} [i \times j \times P(i, j, d, \theta) - u_1 \times u_2] / d_1^2 d_2^2;$$

式中:  $u_1 = \sum_{i=0}^{L-1} i \sum_{j=0}^{L-1} P(i, j)$ ;  $u_2 = \sum_{j=0}^{L-1} j \sum_{i=0}^{L-1} P(i, j)$ ;  $d_1^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - u_1)^2 \sum_{j=0}^{L-1} P(i, j)$ ;  $d_2^2 = \sum_{j=0}^{L-1} (j - u_2)^2 \sum_{i=0}^{L-1} P(i, j)$ 。

(3)逆差矩:反映了图像纹理局部变化的大小,当纹理越规则时,其值越大。公式如下:

$$f_6 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P(i, j, d, \theta) / [1 + (i - j)^2]。$$

(4)对比度:刻画了图像纹理的清晰程度,当图像越清晰时,其值就越大。公式如下:

$$f_7 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - j)^2 p^2(i, j, \theta, d)。$$

### 2.3 基于高斯马尔科夫随机场模型的纹理特征提取

马尔科夫随机场(Markov random field,简称 MRF)作为一种描述图像结构的概率模型,能够兼顾纹理局部的随机性和整体上的规律性,它在描述物理现象空间或背景依赖性方面有着无可比拟的优越性。在本试验中选用高斯-马尔科夫随机场(Gauss Markov random filed,简称 GMRF)模型来描述鱼群的纹理特征,该模型以邻域系统为基础,通过一个邻域系统,可以把图像中的点和其邻域中任意其他的点联系起来。现取图像中某一点  $s$ ,其灰度值  $y(s)$  是  $s$  邻域  $N_s$  灰度的函数,  $N_s$  是以  $s$  点为中心,  $r$  为半径,但不包括  $s$  的对称邻域<sup>[23]</sup>。则在一个  $M \times M$  的网格点集  $S$ ,GMRF 模型可以用包含多个未知数的线性方程来表示:

$$y(s) = \sum_{r \in N_s} \theta_r [y(s+r) + y(s-r)] + e(s)。$$

式中: $\theta_i$  为未知系数; $e(s)$  为零均值的高斯噪声序列。在 GMRF 模型中,邻域系统的阶数决定了模型描述图像纹理的能力,阶数越高,模型描述的纹理越复杂,结合鱼群运动时的纹理情况,并参考相关文献,最后选定系统的阶数为 3,此时共提取了鱼群的 6 个纹理特征向量。如图 3 所示,a、b 分别为鱼群在正常游动状态和摄食状态下的原始图片,c、d 分别为鱼群在正常游动状态和摄食状态下的灰度图片。

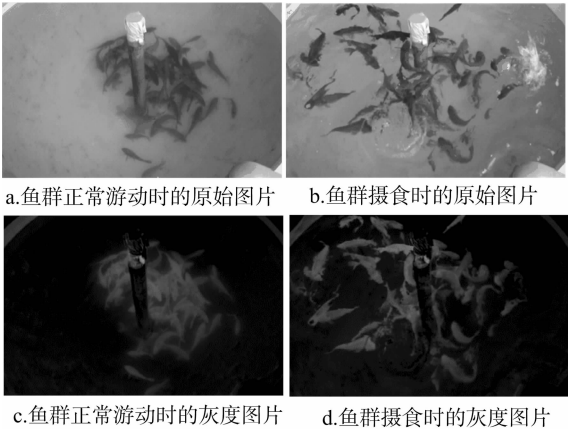


图3 鱼群的原始图片和灰度图片

3 结果与分析

3.1 SVM 对鱼群运动状态的识别

支持向量机是根据 Vapnik 提出的结构风险最小化原则来提高学习机泛化能力的方法,其本质是通过非线性变换将原始的特征空间变换到一个高维的空间,在这个新的空间里求取最优分类面。支持向量机因其须要调整的参数较少,准确率高,鲁棒性强,且有着良好的抗干扰能力,因此在分类识别中得到了广泛的应用<sup>[24-25]</sup>。

假设训练样本为  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ , 其中  $x_i \in R^d$  代表输入,  $y_i \in \{\pm 1\}$  代表输出。设最优决策面方程为  $w^T x_i + b = 0, y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i$  为约束条件,其中  $\xi_i$  为线性不可分条件下的松弛变量。最优决策面的求解必须尽量使平均错误误差减到最小,因此利用 Lagrange 乘子将求解问题转化为以下的约束优化问题<sup>[25]</sup>:

$$Q(a) = \sum_{i=1}^N a_i - 1/2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j y_i y_j K(x_i, x_j);$$

式中:满足约束条件的 Lagrange 乘子为  $\{a_i\}_{i=1}^N$ , 约束条件为  $\sum_{i=1}^N a_i y_i = 0, 0 \leq a_i \leq C, i = 1, 2, 3, \dots, N; K(x_i, x_j)$  为核函数,由于支持向量机的准确率与核函数的选取有很大的依赖关系,因此,构建 SVM 分类器的重点就是选择一个合适的核函数,相关试验结果表明径向基(radial basis function, 简称 RBF)核函数具有良好的性能,因此为了降低参数选择的复杂性,本试验使用的是 RBF 核函数,即

$$K(x, y) = \exp\left(\frac{-\|x - y\|^2}{2\sigma^2}\right)。$$

由于核函数参数  $g$  和惩罚因子  $c$  的确定影响了 SVM 的精度,因此为了提高分类效率及减少分类的时间,在本试验中使用 libsvm 程序包来实现参数的最优选择,libsvm 程序包不仅分类效果好,而且提供了很多默认的参数值,免去了后期的

调试,大大减少了人力物力的消耗。在本试验中是通过 libsvm 来对支持向量机的核函数进行自动寻优,经过参数寻优后, $g$  取 0.707 1,  $c$  取 4。最后根据对整个训练集进行训练获得支持向量机的模型,利用获取的模型分别对训练样本图像和测试样本图像的纹理特征向量所组成的数据集进行测试,测试样本分类准确率达到 96.5%, 程序运行时间为 39.04 s。

3.2 特征降维后 SVM 对鱼群运动状态的识别

要想对纹理特征进行全面的描述,须要将这些特征有机地融合在一起,本试验决定用主成分分析法(principal component analysis, 简称 PCA)来对这 13 个特征向量进行降维,这样做的好处就是去掉特征向量中的冗余信息,保留主要信息。

主成分分析法是一种线性降维方法,能够降低样本的维度,主要是基于变量协方差矩阵对原始信息进行压缩和提取处理。它的核心思想如下:

假设有  $m$  个  $n$  维数据,首先将数据进行中心化,即计算该维数据平均值,再利用原数据与平均值相减,得到以下结果:

$$\sum_{i=1}^m x_i = 0 (x_i \in R^n)。$$

求出协方差矩阵:

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i x_i^T = 0。$$

计算协方差矩阵的特征向量以及特征值。假设矩阵  $C$  的秩为  $p$ , 特征值顺序排列记为  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4 \geq \dots \geq \lambda_p > 0$ 。

选取较大的前  $i$  个特征值对应的特征向量  $v_i = x^T v_i, i = 1, 2, \dots, l$ , 则样本  $x$  可以表示为  $[y_1, y_2, y_3, \dots, y_k]^T$ , 其维数由  $n$  维降到了  $l$  维。

在本试验中通过 PCA 算法把提取出来的特征向量降到了 3 维。由表 1 可知,测试样本的准确率有所下降,运行时间大大缩短。但分类准确率还是相对较高的,为 93.5%。

表1 SVM 的识别结果

项目	测试样本的 准确率(%)	错分样本数 (个)	运行时间 (s)
SVM 的分类结果	96.5	7	39.04
PCA 降维后 SVM 的分类结果	93.5	13	0.63

4 结论

本试验利用计算机视觉技术,对鱼群的运动状态进行分类识别。结果表明,利用灰度差分统计法、灰度共生矩阵法和基于高斯马尔科夫随机场模型的方法共提取了鱼群的 13 个纹理特征,在识别鱼群的摄食行为中具有较高的精度和识别速度,在 220 张训练样本,200 张测试样本中,SVM 对测试集的识别率达到 96.5%, 运行时间为 39.04 s,通过 PCA 降维后,使得提取的纹理特征向量的维数降为 3 维,SVM 对测试集的识别率达到 93.5%, 运行时间为 0.63 s,虽然识别率有所下降,但是识别速度有了大大的提高,这样更能达到鱼群实时分类的目的。

本试验充分利用了鱼群摄食时产生的水花及由水面抖动等引起的图像纹理变化,对鱼群的运动状态进行分类识别,避

免了对鱼群其他特征的提取,且本试验所需的设备种类较少,成本低,操作简单,对计算机性能要求不高。本试验所介绍的方法对于鱼群运动状态的识别提供了一种全新的思路。

#### 参考文献:

- [1] Liu Z Y, Li X, Fan L Z, et al. Measuring feeding activity of fish in RAS using computer vision[J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 60(1): 20–27.
- [2] 周应祺, 王 军, 钱卫国, 等. 鱼类集群行为的研究进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(5): 734–743.
- [3] 胡金有, 王靖杰, 张小栓, 等. 水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 251–263.
- [4] 陈 红, 夏 青, 左 婷, 等. 基于纹理分析的香菇品质分选方法[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 285–292.
- [5] Israeli D, Kimmel E. Monitoring the behavior of hypoxia – stressed *Carassiu auratus* using computer vision [J]. *Aquacultural Engineering*, 1996, 15(6): 423–440.
- [6] Wu T H, Huang Y, Chen J M. Development of an adaptive neural – based fuzzy inference system for feeding decision – making assessment in silver perch (*Bidyanus bidyanus*) culture [J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 66: 42–51.
- [7] Mallet D, Pelletier D. Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: a review of sixty years of publications (1952–2012)[J]. *Fisheries Research*, 2014, 154(3): 44–62.
- [8] Papadakis V M, Papadakis I E, Lamprianidou F, et al. A computer – vision system and methodology for the analysis of fish behavior[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 46(2): 53–59.
- [9] 李 贤, 范良忠, 刘子毅, 等. 基于计算机视觉的大菱鲃对背景色选择习性研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 189–193.
- [10] 段延娥, 李道亮, 李振波, 等. 基于计算机视觉的水产动物视觉特征测量研究综述[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 1–11.
- [11] Kato S, Tamada K, Shimada Y, et al. A quantification of goldfish behavior by an image processing system [J]. *Behavioural Brain Research*, 1996, 80(1/2): 51–55.
- [12] Ma H, Tsai T F, Liu C C. Real – time monitoring of water quality using temporal trajectory of live fish [J]. *Expert Systems With Applications*, 2010, 37(7): 5158–5171.
- [13] 张志强, 牛智有, 赵思明. 基于机器视觉技术的淡水鱼品种识别[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 388–392.
- [14] 于 欣, 侯晓娇, 卢焕达, 等. 基于光流法与特征统计的鱼群异常行为检测[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 162–168.
- [15] 任立辉, 李文东, 慈兴华, 等. 基于 LIBSVM 的石油录井中岩屑岩性识别方法研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(9): 131–136.
- [16] Sadoul B, Mengues P E, Friggens N C, et al. A new method for measuring group behaviours of fish shoals from recorded videos taken in near aquaculture conditions [J]. *Aquaculture*, 2014, 430: 179–187.
- [17] Pautsina A, Cisar P, Stys D, et al. Infrared reflection system for indoor 3D tracking of fish[J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 69: 7–17.
- [18] Zhao J, Gu Z B, Shi M M, et al. Spatial behavioral characteristics and statistics – based kinetic energy modeling in special behaviors detection of a shoal of fish in a recirculating aquaculture system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 271–280.
- [19] Rakowitz G, Tušer M, Štíha M, et al. Use of high – frequency imaging sonar (DIDSON) to observe fish behaviour towards a surface trawl [J]. *Fisheries Research*, 2012, 123–124(3): 37–48.
- [20] 徐小军, 邵 英, 郭尚芬. 基于灰度共生矩阵的火焰图像纹理特征分析[J]. *计算技术与自动化*, 2007, 26(4): 64–67.
- [21] 刘 丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(4): 622–635.
- [22] 范良忠, 刘 鹰, 余心杰, 等. 基于计算机视觉技术的运动鱼检测算法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 226–230.
- [23] 王慧勤, 雷 刚. 基于 LIBSVM 的风速预测方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(22): 5440–5442, 5450.
- [24] Ashley P J. Fish welfare: current issues in aquaculture[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2007, 104(4): 199–235.
- [25] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. *自动化学报*, 2000, 26(1): 32–42.
- [1] 间的博弈分析[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2008, 26(3): 362–365.
- [11] 李佳怡, 李同昇, 李树奎. 不同农业技术扩散环境区农户技术采用行为分析——以西北干旱半干旱地区节水灌溉技术为例[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 201–205.
- [12] 代小平, 陈 菁, 陈 丹, 等. 基于层次 – 集对分析方法的区域农业节水技术选择方法[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(5): 91–95.
- [13] 郑金奎. *Mathematica 辅助中学数学教学的实践、意义及其思考* [D]. 福州: 福建师范大学, 2001.
- [14] 付意成, 杜 霞, 彭文启, 等. 流域农业土地生态价值内涵及应用分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 243–250.
- [15] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价[J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1535–1544.
- [16] 田晓璐, 李香颜, 张金平. 基于 AHP 和 PCA 的暴雨灾害风险区划——以河南省卫辉市为例[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(23): 135–141.
- [17] 彭 红. 建筑工程项目经济后评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

(上接第 222 页)

- [5] Draginčić J, Vranešević M. AHP – based group decision making approach to supplier selection of irrigation equipment [J]. *Water Resources*, 2014, 41(6): 782–791.
- [6] Minatour Y, Bonakdari H, Aliakbarkhani Z S. Extension of fuzzy delphi AHP based on interval – valued fuzzy sets and its application in water resource rating problems[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(9): 3123–3141.
- [7] Pourghasemi H R, Pradhan B, Gokceoglu C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran [J]. *Natural Hazards*, 2012, 63(2): 965–996.
- [8] 顾丹丹. 小型农田水利重点建设县工程经济与社会评价研究——以宝应县为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [9] 赵志英. 基于 CVM 的小型农田水利工程绩效评价研究——以沅江渡水库除险加固工程为例 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [10] 江 煜, 王学峰. 干旱区灌溉水价与农户采用节水灌溉技术之