

基于自适应 PCNN 与 PCA 的 遥感影像感知哈希认证算法

丁凯孟^{1,2}, 朱长青³, 罗文³, 刘岳明²

(1.金陵科技学院网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169)

(2.中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

(3.南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 针对现有遥感影像感知哈希认证算法存在的鲁棒性不足的问题, 本文利用 PCNN 在边缘检测过程中能够抑制噪声的特点, 提出一种基于自适应 PCNN 与 PCA 的遥感影像感知哈希认证算法. 首先, 对遥感影像进行四边形隐形网格划分之后, 根据网格单元的信息熵自适应地决定 PCNN 的时间衰减参数. 然后, 通过 PCNN 提取网格单元的边缘特征, 进而构造网格单元的特征矩阵. 接下来, 对特征矩阵进行基于 PCA 和信息熵的自适应摘要化, 得到的序列进行加密处理后就是该网格单元的感知哈希序列. 实验表明, 该算法在保持篡改敏感性的同时, 对无损压缩和 LSB 水印嵌入具有近乎 100% 的鲁棒性, 对有损压缩的鲁棒性在 95% 以上, 相比于现有算法有了较大提高.

[关键词] 遥感影像, 感知哈希, 完整性认证, 自适应 PCNN, 主成分分析

[中图分类号] TP391 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2019)02-0017-06

Perceptual Hash Algorithm Based on Adaptive PCNN and PCA for Remote Sensing Image Authentication

Ding Kaimeng^{1,2}, Zhu Changqing³, Luo Wen³, Liu Yueming²

(1.School of Networks and Tele-Communications Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

(2.State Key Laboratory of Resource and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences
and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

(3.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Due to the disadvantage of the existing perceptual hash algorithm for remote sensing image has, a perceptual hash algorithm based on adaptive PCNN and PCA for remote sensing image authentication is proposed making use of the characteristic PCNN can suppress noise during edge detection. Firstly, grid division is applied on the remote sensing image, and the parameter of decay time is adaptively defined based on the entropy of the grid. Secondly, the edge feature of each grid is detected by the PCNN, and the feature matrix of the grid is then constructed. Thirdly, the feature matrix is adaptively summarized based on PCA and grid entropy, the result is then encrypted to generate the perceptual hash value of the grid. The experiment results show that the robustness of the algorithm is greatly improved while it is sensitive to malicious tamper of the remote sensing image; it can keep nearly 100% robust to lossless compression and LSB watermark embedding, and can keep more than 95% robust to lossy compression.

Key words: remote sensing images, perceptual hashing, integrity authentication, adaptive PCNN, PCA

随着遥感技术的飞速发展, 遥感影像数据的军事和经济价值日益凸显. 但是, 由于存储方式的数字化、网络环境的开放性以及人为因素的影响, 数据的完整性、真实性等问题给遥感影像安全传输和高效共

收稿日期: 2018-12-18.

基金项目: 国家自然科学基金(41801303)、江苏省自然科学基金(BK200170116)、金陵科技学院基金(jit-flxm-201604)、资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金、江苏高校“青蓝工程”资助.

通讯联系人: 丁凯孟, 博士, 中国科学院地理科学与资源研究所博士后, 主要研究方向: 地理数据安全. E-mail: dingkaimeng@foxmail.com

享带来了巨大的挑战^[1]。遥感影像一般具有高精度、机密性等特性,如果其完整性、真实性受到质疑,那么使用价值将大打折扣,更为严重的甚至可能影响到国家安全与国防安全。这种情况下,遥感影像的安全认证等问题逐步得到人们的重视。

遥感影像与普通图像在存在形式上相似,所以,一定程度上可以借鉴图像的认证方法实现遥感影像的认证。目前,图像数据的认证方法主要包括密码学 Hash 函数、数字签名、脆弱水印技术以及感知哈希等。密码学 Hash 函数和数字签名技术对数据的比特级变化过于敏感,只要待认证数据发生一个比特的变化,都视为待认证数据遭到了篡改。这种敏感性非常适合文本数据,但是,在图像(包括遥感影像)的使用、传输过程中,经过数据无损压缩、不可见水印嵌入等操作之后,图像数据的有效内容信息并没有改变,变化的仅仅是有效内容的载体。脆弱水印技术通过将认证信息嵌入数据,当数据完整性受到质疑时,提取嵌入的认证信息鉴别数据的真伪。脆弱水印技术主要利用了水印本身的性质,同样无法检测图像的有效内容是否发生变化,而且,脆弱水印会对原始图像数据进行一定的修改。感知哈希(Perceptual Hashing)则能够实现图像数据基于感知内容的认证,较好地解决了上述问题。

感知哈希,是指一个多媒体对象的感知特征通过压缩生成的简短摘要,即将具有相同感知内容的多媒体数字表示唯一地映射为一段数字摘要,并满足感知鲁棒性和安全性^[2]。感知哈希能够解决图像认证过程中的鲁棒性、篡改敏感性等问题。已经有诸多学者展开相关研究,并取得丰硕成果。

但是,现有的图像感知哈希算法没有顾及遥感影像的数据特点和应用环境。普通图像一般只是满足视觉需求,而遥感影像则是为了表现其蕴含的数据价值^[3],因此,遥感影像的认证方法更多地是要为数据的后续使用提供完整性安全保障。

现有关于遥感影像的相关研究中,文献[4]提出一种基于 Gabor 滤波器组与 DWT 的遥感影像感知哈希认证算法,有着较高的认证精度,一定程度上满足了遥感影像基于感知内容的认证需求。但是,该算法采用的经典边缘特征检测算法,容易受到噪声影响,因此在鲁棒性方面存在一定不足。实际上,遥感影像的辐射特征受多种因素的影响,而且往往不存在明确的主题信息,因此,对影像内容解释具有模糊性和多样性。

针对现有方法存在的问题,本文以经过辐射、几何校正的遥感影像为研究对象,利用 PCNN 在边缘检测过程中能够抑制噪声的特点,提出一种基于自适应脉冲耦合神经网络(pulse coupled neural networks, PCNN)与主成分分析(principal component analysis, PCA)的遥感影像感知哈希认证算法。

1 相关理论

1.1 感知哈希与遥感影像

与密码学 Hash 函数相比,感知哈希的最大区别在于它具有鲁棒性,也就是数据经过无损压缩、格式转换等不改变内容的操作之后,相应的感知哈希序列不变,或者变化很小。与密码学 Hash 函数相似的是,感知哈希也能够将任意长度的多媒体数据(如图像、音频、视频数据)映射成为一定长度的摘要序列,亦即能够有尽可能少的信息表征多媒体数据的内容信息,所以被应用于多媒体数据的检索^[5]、拷贝检测^[6]、完整性认证^[7-8]等。图像感知哈希算法一般包括图像预处理、特征提取、量化与压缩、安全化处理等步骤,其中,特征的提取是关键步骤。

根据多媒体数据及其应用环境的不同,感知哈希往往具有不同的属性要求。应用于图像认证时,理想的图像感知哈希算法具有如下特征:

(1)鲁棒性,是感知哈希与密码学 Hash 函数最主要区别,是指感知内容相同或者相近的图像的感知哈希序列应当相同或者相近,而密码学 Hash 函数关注的是数据的二进制表示是否发生变化。

(2)篡改敏感性,是指算法能有效识别出图像的篡改,与“可区分性”、“唯一性”联系较为紧密。对于遥感影像,感知哈希算法应对可能的内容变化进行准确识别。

(3)摘要性,是指算法生成的哈希序列应尽可能的简短,以利于存储与传输。

(4)安全性,是指从感知哈希序列中得不到原始图像的有效内容信息。

(5)高效性,是指算法能够高效地生成图像数据的感知哈希序列,并完成相应的认证。遥感影像的数据量普遍较大,如果高效性得不到满足,算法将失去实用价值。

此外,随着应用的推动和研究的深入,“篡改定位”的需求在有些情况下也受到人们重视。

遥感影像实质上是反映地物目标电磁辐射特征的能量分布图,是传感器所获得的信息的产物,不仅包含丰富的光谱信息,还包含大量地物目标的形状结构、纹理信息等。遥感影像与普通图像在成像范围、成像过程、关注的对象以及后期使用过程等均有较大差别。遥感影像中,每个波段均为一幅灰度图像,波段中每个像素都具有空间特征和属性特征。而且,由于地物在不同波段的辐射电磁波的特征不同,相同地点在不同波段上的像素属性可能不同。遥感影像有着空间数据独有的特征,遥感影像感知哈希认证算法的设计也应依据其数据特性和应用环境。

在遥感影像中,边缘特征包含丰富的物体轮廓、边界的重要信息,是影像分割、对象识别等影像后期应用的基础^[9-10],尤其是应用越来越广泛的高分辨率遥感影像,边缘部分集中了大部分信息。如果遥感影像的边缘特征发生较大变化,往往意味着影像的实用价值已经受到影响,因此,基于边缘特征的感知哈希算法能够以较高的更高的精度实现遥感影像的完整性认证。

在图像感知哈希算法研究中,以边缘特征为基础的研究相对并不多见,这主要是因为边缘特征对于旋转操作的鲁棒性较差。然而,该算法的研究对象是“经过校正”的遥感影像,其中的每个像素都有自己的坐标,可以根据比例尺进行量测与定位。所以,遥感影像感知哈希算法不宜对旋转操作保持鲁棒性。因此,该算法以边缘特征为基础设计遥感影像感知哈希认证算法。

1.2 自适应脉冲耦合神经网络

传统边缘检测算法主要通过微分算子进行边缘检测,包括 Canny 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子以及 LOG 算子等。这些检测算子通过检测图像局部的颜色、亮度等的急剧变化来提取边缘,容易受到噪声的影响,而噪声会引起伪边缘的产生,继而影响感知哈希算法的鲁棒性。基于人工神经网络的边缘检测算法能够获得更好的边缘检测效果^[11]。

众多的基于神经网络的边缘检测算法中,基于脉冲耦合神经网络(PCNN)的算法得到了广泛的关注^[12-13],并显示了其优越性。PCNN 是与传统神经网络有着根本区别的新型神经网络,其模型具有现实的生物学依据。与经典的神经网络相比,PCNN 不需要进行训练就能实现图像边缘检测,只需要设置恰当的门限参数、加权因子、衰减时间常数以及连接系数等。PCNN 不仅能够弥补细小灰度差别造成的图像边缘间隙的不连续性^[14-15],而且能够较好地抑制噪声对边缘检测的影响^[16],因此,将 PCNN 引入感知哈希的研究能够增强感知哈希算法的鲁棒性。

但是,遥感影像普遍具有数据海量性的特点,同一幅影像的不同区域的信息量可能差别较大,这就使得 PCNN 模型进行影像边缘检测的过程中,对不同区域不宜采用相同的参数。因此,基于“自适应策略”,对于影像的不同区域,根据其信息丰富程度,采用不同的 PCNN 参数进行边缘特征检测。

1.3 主成分分析

“摘要性”是感知哈希算法的重要属性。提取原始图像的感知特征后,对其进行去噪、降维等操作能够很好地增强摘要性和鲁棒性。主成分分析法(PCA)能用较少的特征数据近似表示整个数据集,是一种常见的数据降维和特征提取方法^[17-18]。

PCA 的本质是寻找最能代表数据特征的投影向量子空间;在最小均方意义下,PCA 对原始高维数据进行某种线性变换,将其映射到低维空间,构造少数新变量(主成分)来压缩表示原始数据,并尽可能保留其主要信息,也就是寻找最能代表原始数据的投影。换言之,PCA 是将原始高维向量集投影到低维空间,并依据贡献率的大小确定主成分,转换之后的新特征称为主成分,并根据对应方向上的方差贡献率降序排列,其中,贡献率最大是第一主成分,其次是第二主成分、第三主成分,依次类推。

遥感影像普遍数据量较大,且内容信息可能分布不均匀,如果将影像作为一个整体进行降维,就可能影响全局特征的相关性。该算法基于“格网划分”理论,提取影像格网单元的特征主成分,保留更多局部信息特征,能够避免全局特征降维的不足。

2 算法流程描述

该算法的总体流程如图 1 所示:首先,对原始遥感影像进行隐性格网划分;然后,根据格网单元的信息熵自适应地决定 PCNN 的参数,并基于 PCNN 提取格网单元的边缘特征;接下来,采用 PCA 对格网单元的

边缘特征进行“自适应摘要化”,对得到的简短序列进行加密后,就得到格网单元的感知哈希序列。

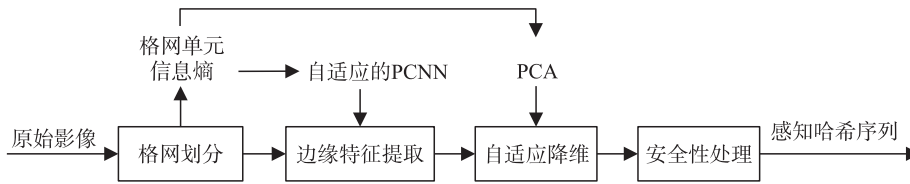


图 1 算法总体流程

Fig. 1 The process of the proposed algorithm

2.1 遥感影像的预处理

格网划分是将连续的工作区域进行平面空间离散化的过程. 该算法中,将遥感影像分割成互不重叠的格网单元,不仅是“篡改定位”的需要,更重要的是根据格网单元的信息熵对影像不同区域进行自适应处理:自适应地进行基于 PCNN 的边缘特征提取、自适应的摘要化。

常用的影像格网划分包括三角形格网划分、四边形格网划分、六边形格网划分等. 顾及后期数据处理的便利性,该算法将原始影像转化的单通道影像后,采用“四边形格网划分”对其进行隐性分割,并通过双线性插值将每个格网单元标准化为 $m \times m$ 像素大小(实验中, $m = 64$),记为 G_{ij} (i 和 j 用以标识格网单元的位置)。

2.2 基于自适应 PCNN 的边缘特征提取

格网单元预处理之后,基于 PCNN 提取影像格网单元 G_{ij} 的边缘特征,并对其进行序列化,得到格网单元的边缘特征矩阵,记为 E_{ij} 。

PCNN 在进行图像边缘检测时,是一个局部连接的、单层的二维神经网络. 神经元的数量与图像像素点的数量相同,且与图像像素点一一对应. 每个神经元不仅仅与相邻的神经元相连,还与相应的图像像素点相连. PCNN 的单个神经元由接收部分、调制部分和脉冲产生部分组成. 其中,接收部分包括两个分支,分别接收来自其它神经元的输入或者外部的输入,并将输入信号分成两个通道进行传输. 每个神经元只有两种输出状态:点火或不点火。

采用 PCNN 进行图像边缘检测,结果主要取决于图像本身的特征. 然而,遥感影像作为记录地球表面地理信息的载体,不仅数据量较大,而且往往不存在明确的主题或者具有多个主题信息,这就为 PCNN 的参数确定带来了困难. PCNN 作为多参数的神经网络模型,PCNN 提取的边缘特征与模型中参数的选取有密切关系,其中,时间衰减参数 α_θ 不仅关系到算法运算效率,而且对算法鲁棒性有较大影响: α_θ 越小,单个神经元的脉冲等级越多,迭代次数越多,边缘提取结果较为精细;反之,迭代次数相对较少,提取的边缘信息较为稀疏. 因此,对于遥感影像,边缘特征较为密集的区域,往往需要设置较小的时间衰减参数 α_θ ;而对于森林、农田等边缘特征较少的区域,则适合较大的 α_θ . 因此,根据格网单元的信息熵的大小自适应地决定 PCNN 的时间衰减参数 α_θ 。

对于格网单元 G_{ij} ,其信息熵为:

$$E(G_{ij}) = - \sum_{i=0}^{255} p_i \ln p_i, \quad (1)$$

式中, p_i 表示灰度值为 n 的像素在格网单元 G_{ij} 中出现的概率。

设定信息熵的阈值 T (实验中, T 取格网单元的信息熵均值),另设 $\alpha_{\theta 1} < \alpha_{\theta 2}$,如果格网单元的信息熵 $E(Q_{ij})$ 大于或等于 T ,时间衰减参数采用 $\alpha_{\theta 1}$;反之,时间衰减参数采用 $\alpha_{\theta 2}$,如式(2)所示:

$$\alpha_\theta = \begin{cases} \alpha_{\theta 1}, & E(Q_{ij}) \geq T \\ \alpha_{\theta 2}, & E(Q_{ij}) < T \end{cases}. \quad (2)$$

2.3 基于 PCA 的特征自适应摘要化

得到格网单元的特征矩阵 E_{ij} 后,再对其进行基于 PCA 分解的摘要化. 特征矩阵进行 PCA 分解后,前几个主成分包含了特征矩阵的大部分内容信息,因此,该算法将格网单元的边缘特征矩阵 E_{ij} 进行 PCA 分解后,选择主成分作为格网单元的感知特征。

另一方面,信息丰富的影像格网单元,往往需要进行更为严格的认证. 为增强算法摘要性,并降低噪

声的影响,该算法对格网单元的边缘特征进行基于信息熵的“自适应摘要化”:如果格网单元的信息熵 $E(Q_{ij})$ 大于或等于阈值 T ,取第一主成分和第二主成分作为格网单元的感知特征;反之,仅取第一主成分作为该格网单元的感知特征。

对选取的主成分进行标准化处理后,再通过加密算法进行加密处理,就得到该格网单元的哈希序列,记为 PH_{ij} 。串联所有格网单元的哈希序列 PH_{ij} ,得到影像的最终感知哈希序列,记为 PH 。

3 实验与分析

为了验证算法有效性,以图 2 所示的 4 幅 TIFF 格式的遥感影像为例进行测试与分析,大小分别为 2 500 像素×2 500 像素、3 000 像素×3 000 像素、5 000 像素×5 000 像素、10 000 像素×10 000 像素。硬件平台为:2.4 GHz 主频的双核 CPU,可用内存 4 GB;软件开发平台为 Matlab 2009a。

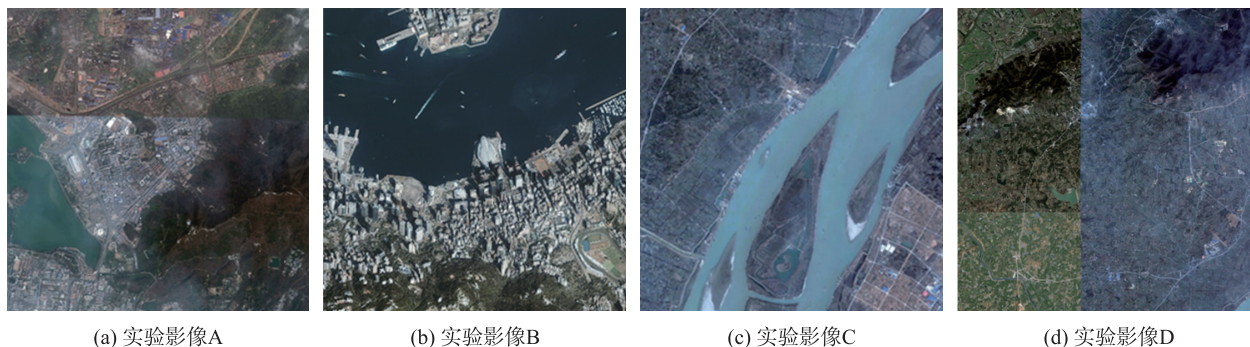


图 2 实验影像

Fig. 2 The experiment images

综合考虑影像实际大小、影像信息分布情况、篡改定位粒度等因素,对影像 A 和 B 采用 8×8 的格网划分,影像 C 采用 16×16 的格网划分,影像 D 则采用 25×25 的格网划分,共计 1 009 个格网单元。

3.1 鲁棒性测试与分析

感知哈希与密码学 Hash 函数的最大区别在于“鲁棒性”。本文以遥感影像在使用中经常遇到的“数据压缩”、“数字水印嵌入”以及“格式转换”为例来测试算法鲁棒性。其中,数据压缩分别采用无损压缩和有损压缩(90%的 JPEG 压缩),水印嵌入采用最低有效位(LSB)。

与常规图像感知哈希算法不同,本文算法采用了隐形格网划分将遥感影像划分为不同区域,因此,每个格网单元均可以视为单独的鲁棒性测试对象,所以,这里采用保持鲁棒性的格网单元百分比来描述鲁棒性,表 1 为测试结果(鲁棒性测试对象实际上为 1 009 个影像格网单元)。

表 1 鲁棒性测试与对比

Table 1 The comparison of robustness test

实验影像	无损压缩		JPEG 压缩		LSB 水印嵌入	
	本文算法	文献[4]算法	本文算法	文献[4]算法	本文算法	文献[4]算法
影像 A	100%	96.9%	95.3%	84.4%	100%	100%
影像 B	100%	89.1%	98.4%	86%	100%	100%
影像 C	100%	95.7%	97.6%	88.2%	100%	100%
影像 D	100%	95.2%	97.4%	87.2%	100%	100%

由表 1 可知,该算法可以对无损压缩和水印嵌入操作保持很好鲁棒性;相比于文献[4]的算法,该算法的鲁棒性有了较大改进。此外,密码学 Hash 函数对上述操作不能进行有效认证。需要说明的是,本文的研究对象是经过校正处理的遥感影像,所以,对于旋转、添加椒盐噪声等操作,这里不予鲁棒性测试。

3.2 篡改敏感性测试与分析

图像感知哈希一般针对图像全局计算哈希序列,而该算法则对影像进行格网划分,因此,为保障公平性,以图 3(a)所示的影像格网单元为例,将该算法与常规感知哈希算法(分别选择 DCT 变换、小波变换、SVD 分解)、文献[4]的算法进行对比。图 3(b)~3(d)分别为对该格网单元进行添加地物、删除地物、变换

地物等的篡改示例. 对比结果如表 2 所示. 其中,DCT 变换归一化 Hamming 距的阈值为 0.01,小波变换的阈值设为 0.01,SVD 分解的阈值为 0.002,该算法的阈值为 0.1.



图 3 局部篡改测试
Fig. 3 Tampering tests

表 2 篡改检测对比
Table 2 The comparison of tampering tests

测试算法	篡改 1	篡改 2	篡改 3
DCT 变换	识别	未识别	识别
小波变换	未识别	未识别	识别
SVD 分解	识别	未识别	识别
文献[4]的算法	识别	识别	识别
该算法	识别	识别	识别

由表 2 可知,该算法在鲁棒性得到提高的同时,可以有效检测遥感影像的局部篡改,具有与文献[4]的算法相似的篡改检测能力,满足篡改敏感性的需求.

3.3 其它

算法的安全性方面,该算法依托于对称加密算法的安全性. 该算法实验中,采用高级加密标准(advanced encryption standard,AES)算法,在密钥安全的前提下,该安全性具有足够保障.

4 结论

本文利用 PCNN 在边缘检测过程中能够抑制噪声的特点,提出了一种基于自适应 PCNN 与 PCA 的遥感影像感知哈希认证算法,该算法首先对遥感影像进行四边行格网划分,并将各格网单元标准化为固定大小;然后,根据格网单元的信息熵自适应地决定 PCNN 的时间衰减参数,通过 PCNN 提取格网单元的边缘特征,并对提取的特征进行序列化,构成特征矩阵;接下来,对特征矩阵进行基于 PCA 和信息熵的自适应摘要化,再进行安全化处理后,得到感知哈希序列. 实验表明,该算法在保持篡改敏感性的同时,对无损压缩和水印嵌入具有近乎 100%的鲁棒性,对有损压缩也具有较好的鲁棒性,相比于现有算法有了较大提高.

[参考文献]

[1] LEI J,HAN Z,VAZQUEZ-CASTRO M A,et al. Secure satellite communication systems design with individual secrecy rate constraints[J]. IEEE transactions on information forensics and security,2011,6(3):661-671.

[2] 牛夏牧,焦玉华. 感知哈希综述[J]. 电子学报,2008,36(7):1405-1411.

[3] 付剑晶,王珂,徐建军. 一种面向多波段数字遥感影像的版权保护方案[J]. 电子学报,2016,44(3):732-739.

[4] 丁凯孟,朱颖婷,朱长青,等. 基于 Gabor 滤波器组与 DWT 的遥感影像感知哈希认证算法[J]. 铁道学报,2016,38(7):70-76.

[5] WANG K,TANG J,WANG N,et al. Semantic boosting cross-modal hashing for efficient multimedia retrieval[J]. Information sciences,2016,330:199-210.

[6] ZOU F,CHEN Y,SONG J,et al. Compact image fingerprint via multiple Kernel hashing[J]. IEEE transactions on multimedia,2015,17(7):1006-1018.

(下转第 29 页)

第四类:中端产业的理论知识型.这类研究生的数学理论知识水平处于中上游,但是对数学的兴趣不高,且其导师的督导工作有待改进,这样的结果来源于其自律性很高且学习氛围很好.对于这一类型的研究生,学校应多开展数学实践方面的活动及提高数学素养方面的活动以培养数学学习兴趣,如开展讲座、数学趣味运动会等;除此之外,导学关系也是限制这类研究生数学学习能力提高的因素,使得导师与研究生之间多多交流发现问题,并对其难度较大的课题予以指导.

第五类:高端产业的其他知识型.这种类型的行业对数学的需求很高.针对这一类型的研究生,学校同样应多开展数学实践方面的活动及提高数学素养方面的讲座,培养兴趣,提高数学学习的氛围;其次导师的督导工作应加强,导师应针对性地为该类研究生规划课题,先易后难,逐步培养其数学素养,并鼓励其在实践中获取应用数学的乐趣.

[参考文献]

- [1] 周长城,任传波,高松,等.创新数学思维与研究生创新能力培养研究[J].高等工程教育研究,2008,S2.
- [2] 蔡锦锦.基于BP神经网络的高校课堂教学质量评价系统的研究与实现[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [3] 冯必波.BP神经网络在教学质量评价体系中的应用[J].计算机与数字工程,2010,38(4):97-99.
- [4] 郑永,陈艳.基于BP神经网络的高校教师教学质量评价模型[J].重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(1):85-90.
- [5] 冯岩松.SPSS 22.0 统计分析应用教程[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [6] 王文文,郭宁,王杨.硕士研究生导学关系现状及影响因素研究[J].研究生教育研究,2018(6):76-82.

[责任编辑:陆炳新]

(上接第22页)

- [7] SUN R,ZENG W. Secure and robust image hashing via compressive sensing[J]. Multimedia tools and applications,2014,70:1651-1665.
- [8] OUYANG J,COATRIENX G,SHU H. Robust hashing for image authentication using quaternion discrete Fourier transform and log-polar transform[J]. Digital signal processing,2015,41:98-109.
- [9] HAN M,YANG X,JIANG G E. An extreme learning machine based on cellular automata of edge detection for remote sensing images[J]. Neurocomputing,2016,198:27-34.
- [10] 周立国,冯学智,肖鹏峰,等.一种频域高分辨率遥感图像线状特征检测方法[J].测绘学报,2011,40(3):312-317.
- [11] GU J,PAN Y,WANG H. Research on the improvement of image edge detection algorithm based on artificial neural network[J]. Optik-international journal for light and electron optics,2015,126(21):2974-2978.
- [12] HELMY A K,EL-TAWHEEL G S. Image segmentation scheme based on SOM-PCNN in frequency domain[J]. Applied soft computing,2016,40:405-415.
- [13] YANG Z,DONG M,GUO Y,et al. A new method of micro-calcifications detection in digitized mammograms based on improved simplified PCNN[J]. Neurocomputing,2016,218:79-90.
- [14] ALA R. A new automatic parameter setting method of a simplified PCNN for image segmentation[J]. IEEE transactions on neural networks,2011,22(6):880-892.
- [15] LIU S,HE D,LIANG X. An improved hybrid model for automatic salient region detection[J]. IEEE signal processing letters,2012,19(4):207-210.
- [16] 邵晓鹏,钟宸,王杨,等.一种简化PCNN模型在彩色图像边缘检测上的应用[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2012,39(6):1-9.
- [17] PORTNOY I,MELENDEZ K,PINZON H,et al. An improved weighted recursive PCA algorithm for adaptive fault detection[J]. Control engineering practice,2016,50:69-83.
- [18] DELCHAMBRE L. Weighted principal component analysis;a weighted covariance eigendecomposition approach[J]. Monthly notices of the royal astronomical society,2014,446(4):3545-3555.

[责任编辑:陆炳新]