

图像分割的新理论和新方法

许新征^{1,2}, 丁世飞^{1,2}, 史忠植², 贾伟宽¹

(1. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 江苏徐州 221119;

2. 中国科学院计算技术研究所智能信息处理重点实验室, 北京 100190)

摘要: 图像分割是计算机视觉研究中的一个经典难题, 已成为图像理解领域关注的一个热点. 本文对近年来图像分割方法的研究现状与新进展进行了归纳总结. 首先, 简单介绍了图像分割的传统方法, 包括基于区域的、基于边缘的和两者结合的图像分割方法. 然后, 分别从数学形态学、模糊集、神经网络、支持向量机、免疫算法、图论和粒度计算等方面对图像分割方法进行了重点讨论, 并对应用每一种理论的最新研究进展作了评述. 最后, 对图像分割方法的发展趋势进行了展望.

关键词: 图像分割; 粒度; 免疫算法; 图论; 神经网络; 支持向量机

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 2A-076-07

New Theories and Methods of Image Segmentation

XU Xin-zheng¹, DING Shi-fei^{1,2}, SHI Zhong-zhi², JIA Wei-kuan¹

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221119, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Image segmentation is a classic problem in computer vision, and become a hot topic in the field of image understanding. The research actuality and new progress in image segmentation in recent years are summarized in this paper. Firstly, the traditional methods of image segmentation are introduced summarily. Then, the specific theory for image segmentation, including morphology, fuzzy sets and neural network, support vector machine, immune algorithm, graph theory and granular computing, are presented emphatically. Furthermore, several new representative papers with the application of each theory are analyzed and discussed. Finally, the development trend of image segmentation method is discussed.

Key words: image segmentation; granular; immune algorithm; graph theory; neural network; support vector machine

1 引言

在计算机视觉理论中, 图像分割、特征提取与目标识别构成了由低层到高层的三大任务. 目标识别与特征提取都以图像分割作为基础, 图像分割结果的好坏将直接影响到后续的特征提取与目标识别^[1].

图像分割是将图像中有意义的特征或区域提取出来的过程. 这些特征可以是图像的原始特征, 如像素的灰度值、物体轮廓、颜色、反射特征和纹理等, 也可以是空间频谱等, 如直方图特征. 图像分割的目的是把图像划分成若干互不相交的区域, 使各区域具有一致性, 而相邻区域间的属性特征有明显的差别. 图像分割的应用非常广泛, 几乎出现在有关图像处理的所有领域, 并涉

及各种类型.

图像分割作为前沿学科充满了挑战, 吸引了众多学者从事这一领域研究. 本文在查阅国内外大量参考文献的基础上, 将图像分割方法分为传统的和结合特定理论的方法, 主要介绍了与特定理论结合的图像分割方法. 本文结构安排如下: 第1节简单介绍了三种传统的图像分割方法; 第2节重点阐述7个与特定理论结合的图像分割方法; 第3节对图像分割方法的发展趋势进行了讨论; 第4节对本文进行了总结, 并展望了下一步的研究方向.

2 传统图像分割方法

传统的图像分割方法包括基于区域的、基于边缘的和两者结合的图像分割方法.

2.1 基于区域的图像分割方法

基于区域的分割方法是以直接寻找区域为基础的分割技术,具体算法有区域生长和区域分离与合并算法.基于区域提取方法有两种基本形式:一种是区域生长,从单个像素出发,逐步合并以形成所需要的分割区域;另一种是从全局出发,逐步切割至所需的分割区域.在实际中使用的通常是这两种基本形式的结合.该类算法对某些复杂物体定义的复杂场景的分割或者对某些自然景物的分割等类似先验知识不足的图像分割,效果较理想.

2.2 基于边缘的图像分割方法

基于边缘检测的分割方法试图通过检测不同区域的边缘来解决问题,通常不同的区域之间的边缘上灰度值的变化往往比较大,这是边缘检测方法得以实现的主要假设之一.它的基本思想是先检测图像中的边缘点,再按一定策略连接成轮廓,从而构成分割区域.其难点在于边缘检测时抗噪性和检测精度的矛盾,若提高检测精度则噪声产生的伪边缘会导致不合理的轮廓;若提高抗噪性则会产生轮廓漏检和位置偏差.

2.3 边缘与区域相结合的图像分割方法

边缘检测能够获得灰度值的局部变化强度,而区域分割能够检测特征的相似性与均匀性.边缘与区域相结合分割的主要思想是结合二者的优点,通过边缘点的限制,避免区域的过分割;同时,通过区域分割补充漏检的边缘,使轮廓更加完整^[2].

3 结合特定理论的图像分割方法

近年来,随着各学科许多新理论和新方法的提出,人们也提出了许多结合一些特定理论、方法和工具的图像分割技术.由于图像分割技术至今尚无通用的自身理论,所以每当有新的数学工具或方法提出来,人们就尝试着将其用于图像分割,因而提出了不少特殊的算法^[1].

3.1 基于数学形态学的图像分割方法

数学形态学是由法国数学家 Mathem G. 和 Serra J. 于 1964 年创立并在此后多年里得到不断丰富和完善.1982 年 Serra J. 的专著^[3,4]的问世标志着数学形态学开始在图像处理、模式识别和计算机视觉等领域得到长足的发展.数学形态学以图像的形态特征为研究对象,用具有一定形态的结构元素描述图像中元素与元素、部分与部分之间的关系,以达到对图像分析和识别的目的.数学形态学用于图像分割,既可以与基于边缘的方法结合,也可以和基于区域的方法结合.数学形态学用于基于区域的图像分割最典型的例子就是分水岭(Watershed)方法^[1].经典分水岭方法主要由两个步骤组成:“排序”和“淹没”.在“排序”步骤中,主要完成图像

灰度级的频率分布计算,根据计算结果对灰度级进行排序,然后将图像中的每一个像素分配到与灰度相对应的存储阵列中去;在“淹没”过程中,使用“先进先出(First In First Out)”的队列计算地理影响区域,通过递归运算实现积水盆地的不断膨胀,最终完成图像的分割.

2007 年,Victor O. R. 等^[5]提出了一种改进的分水岭算法.该算法通过模拟下雨过程,以像素代替雨滴,来计算灰度数字图像的分水岭变换.它尽可能减少了在分水岭变换中最耗时的邻域操作,以及在原始图像上执行的扫描次数.该算法仅用了 4 个简化的队列和一个简单的与输入图像规模一致的输出矩阵,来存储中间计算结果.实验结果表明,针对不同规模各类数字图像,该算法较同类其他算法可以减少大约 31% 的运行时间;在保证算法运行效率相同的前提下,该算法无论是在执行时间还是占用内存空间方面,都比其它算法有效.

2008 年,Parvati K. 等^[6]提出了一种使用灰度形态学和控制标记符的分水岭变换算法,用来对彩色图像、灰度医学图像和航空图像等进行分割.该算法基于灰度形态学理论,分水岭通过区域增长来完成,并利用前景标记符来避免过度分割.具有前景标记符的分水岭分割算法可以分割包含严重噪声的实时图像,优于标准的分水岭分割算法.该算法的完成基于标记符和简单形态学理论,分水岭容易规则化.同时,算法比较灵活,方便进一步的参数调整.该算法只能对灰度图像分割或提取感兴趣的部分,但是可以结合先进理论,如小波变换等,来提高算法在处理高分辨率图像时的执行效果.

3.2 基于模糊理论的图像分割方法

模糊集与系统理论是近年来在工程技术领域中十分活跃的数学分支之一,可以有效地解决模式识别中不同层次的由于信息不全面、不准确、含糊、矛盾等造成的内在不确定性问题,已经成为图像分割的重要数学工具.应用模糊技术进行图像分割的指导思想和出发点是:图像分割的结果应该是定义在像素空间上的模糊子集,而不是分明子集.这是因为,在许多情况下,特别是采用 3×3 或 5×5 尺寸的窗口时,同质性的特征在区域边界处可能没有急剧的变化,很难确定一个像素是否应该隶属于一个区域.此时,对于每一个像素、每一个区域,都指派一个像素隶属于区域的隶属度值,当用隶属程度考虑区域的性质时,就会获得区域性质的更精确的估计^[7,8].应用模糊技术进行图像分割的基本步骤是,将图像及其相关特征表示成相应的模糊集或模糊概念;经过模糊技术的处理,获得图像的模糊分割;反模糊化后得到图像的分割结果.

2008 年, Masooleh 等^[9]提出一种的改进模糊算法,使用粒子群优化方法来优化模糊系统,并用于彩色图

像分类和分割,具有最少的规则和最小的错误识别率.在该方法中,群中的每一个粒子都被编码成一个模糊规则集,适应度函数则由分类正确率的高低和规则的多少共同决定.在进化阶段,每个粒子不断调整各自的适应值.最后,适应值最高的粒子对应的规则集被选择作为用于图像分割的模糊规则集.该模糊集由 HSL 颜色空间中的 H、S 和 L 三个元素来定义,并以此来建立模仿人类感知颜色能力的模糊模型.该算法用于机器人视觉时表现出良好的特性,机器人在参数只需设定一次的情况下,能适应外界环境的变化.在机器人世界杯大赛上的实验表明该算法对噪音和光线变化有较强的鲁棒性.

同年,王彦春等^[10]提出一种基于图像模糊熵邻域非一致性的过渡区直接提取算法.该算法利用过渡区和目标区/背景区性质上的差异,能够有效地消除椒盐噪声和高斯噪声对过渡区提取的影响,对同时存在椒盐噪声和高斯噪声的过渡区的提取是非常有效的.该算法摆脱了对灰度剪切值的依赖,从而使过渡区能够很好地分布在目标周围.理论分析和实验结果表明,该算法能够有效地提取含有混合噪声图像中的过渡区,从而得到正确的分割阈值和良好的图像分割质量.

3.3 基于神经网络的图像分割方法

20 世纪 80 年代后期,受到人工智能发展的影响,出现了基于神经网络的图像分割技术.利用神经网络进行图像分割,其基本思想是用训练样本集对神经网络进行训练以确定节点间的连接权值,再用训练好的神经网络对新输入的图像数据进行分割.由于神经网络具有可并行计算、自学习等和便于硬件实现等特性,所以它比传统方法有更大的潜力,其理论及应用探讨引起了学术界学者的重视,并提出了基于各种神经网络模型的图像分割方法.根据相应类型的图像,可以选用 Hopfield 神经网络^[11]、BP 神经网络^[12]、振子神经网络^[13]、细胞神经网络^[14]、概率自适应神经网络^[15]、自组织神经网络^[16]、脉冲耦合神经网络^[17]、径向基神经网络和 Kohonen 神经网络等.其中,基于脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)的图像分割方法成为近年来的关注热点.

2007 年, Zhang 等^[18]结合人类视觉系统(Human Visual System, HVS)对图像信息含量区域敏感度不同这一特性,以神经元接近点火程度的一致性描述图像空间邻域所含的信息量,对通常的 PCNN 进行了改进,提出了一种基于改进 PCNN 的图像自适应分割算法.该算法根据像素及其周边区域的信息量大小发放不同值的脉冲,从而自适应地将图像分为多个不同等级的高低信息区域,较好地仿真了人类视觉系统特性.最后对用这种方法进行图像分割的结果进行基于信息量的图像压

缩,在压缩比和重建图像主观视觉感知质量上均达到了良好的性能,表明了算法的可行性和有效性都优于传统的 PCNN.

2008 年, Berg H. 等^[19]提出了一种脉冲耦合神经元的自动设计方法.首先将 PCNN 的神经元作为 ADATE (Automatic Design of Algorithms through Evolution)系统的递归函数,然后使用 ADATE 自动演变产生更好的神经元并用于图像分割.该方法适用于多数图像处理方法和神经计算方法的自动改进,也可以面向特定问题改进或裁剪原有的工具.

3.4 基于支持向量机的图像分割方法

近年来,建立在统计学习理论的 VC 维理论和结构风险最小化原理基础上的支持向量机(Support Vector Machine, SVM)方法^[20]表现出很多优于已有方法的性能,基于支持向量机的图像分割方法引起研究人员的注意和研究兴趣.支持向量机方法已经被看作是对传统学习方法的一个好的替代,特别在小样本、高维非线性情况下,具有较好的泛化性能^[21].应用 SVM 分割图像时,由于输入向量通过非线性映射映射到高维特征空间的分布结构由核函数决定,同时,最优超平面与最近的训练样本之间的最大距离和最小分类误差通过惩罚因子 C 进行折衷,因此,核函数设计与惩罚因子 C 的选择将直接影响到图像分割效果^[22].目前常用的核函数有:线性核、多项式核以及高斯径向核等.

2007 年,魏鸿磊^[23]等提出了一种采用支持向量机分类的指纹图像分割方法.该方法将指纹图像分块,并根据图像块的对比度特征进行初分割,以去除灰度变化较小的白背景块,对剩下的图像块提取方向偏差和频率偏差,并根据对比度、方向偏差和频率偏差三个特征分割出特征明显的前景块和背景块,采用支持向量机将经前两次分割不能判决的图像块分为前景和前景两类,采用形态学方法进行后处理以减少分割错误.

2008 年, Liu 等^[24]提出了一种使用支持向量机的多尺度 SAR 图像分割方法.该方法集成了多尺度技术、混合模型和支持向量机等方法.首先,采用多尺度自回归模型提取 SAR 图像中的多尺度特征;然后,将该特征作为支持向量机输入,并对支持向量机进行训练;最后将训练后的支持向量机应用于图像分割.该模型充分利用了 SAR 图像中多尺度序列方面的统计信息和支持向量机的分类能力.实验结果表明,该方法用于图像分割时,具有较好地计算能

3.5 基于图论的图像分割方法

基于图论的图像分割技术是近年来国际上图像分割领域的一个新的研究热点.该方法将图像映射为带权无向图,把像素视作节点,利用最小剪切准则得到图

像的最佳分割.该方法本质上将图像分割问题转化为最优化问题,是一种点对聚类方法,对数据聚类也具有很好的应用前景.目前,基于图论的图像分割方法的研究主要集中在以下几个方面:(1)最优剪切准则的设计;(2)谱方法用于分割;(3)快速算法的设计等^[25].基于图论的图像分割方法的基本原理如下:令 $G = (V, E)$ 表示一个无向图,其中节点 $v_i \in V$ 表示图像像素,边 $(v_i, v_j) \in E$ 连接节点 v_i 和 v_j .每条边有一个相应的非负权重 $w(v_i, v_j)$,表示相邻节点 v_i 和 v_j 的不相似度.在图像分割中,边的权重表示两个像素间的不相似性度量,如灰度、颜色、运动、位置或其它局部分布的差别.

2003年,Pavan等^[26]提出一种新的用于图像分割的图论聚类理论框架.该方法源自聚类直觉观念与节点显性集之间的类比关系.节点显性集将最大完全子图推广到边缘带权图中建立了显性集与标准单形(standard simplex)的二次极值之间的关系,使得算法可以使用连续最优技术并用于局部交互计算单元的并行网络,显示出某些生物学优势.

2006年,Bilodeau G. A.等^[27]提出一种基于多段图的图像分割方法.在该方法中,首先选择递归最短生成树的有效参数,完成对图像进行初始的粗分割;然后,根据灰度级相似、区域大小和普通边长度等特征,使用多段图按照类似的方法对已经分割出的区域进一步合并成更有意义的结构或物体.通过对胸腔图像的分割实验表明,该方法可以从多种复杂的胸腔图像中将空腔从其它组织中分割出来.相对于采用单一标准的基于图的分割方法,该方法在空间相关性、边缘准确性和感兴趣区域分割等方面具有较好地效果.

2008年,刘丙涛等^[28]提出一种新的基于图论的 SAR 图像分割方法,证明了算法具有最优解,分析了算法的复杂度,验证了算法具有实时性.该算法通过构造多尺度结构快速找到收缩图以及初始图的子图集合,然后对其分别应用 Gomory-Hu 算法得到对应的等价树,最后根据规则得到初始图的等价树,按照割值由小到大依次去边后,可得到对原图的最优划分,映射回图像则可得分割结果.同年,冯林等人^[29]提出了一种融合分水岭变换和图论的图像分割方法.利用图像的局部灰度信息进行分水岭变换后,将图像分割成多个小区域,再结合各小区域的灰度和空间信息从全局角度用 Normalized Cut 方法在区域之间进行分割,产生最终的分割结果.实验结果表明,该方法可以消除分水岭变换后所产生的过分割现象,是一种有效的图像自动分割方法.

3.6 基于免疫算法的图像分割方法

人工免疫系统^[30](Artificial Immune System, AIS)是模仿自然免疫系统功能的一种智能方法,它实现一种受生物免疫系统启发,通过学习外界物质的自然防御

机理的学习技术,提供噪声忍耐、无教师学习、自组织、记忆等进化学习机理,结合了分类器、神经网络和机器推理等系统的一些优点,因此具有提供新颖的解决问题的潜力.

2006年,丛琳等^[31]在图像阈值分割方法基础上,将免疫克隆选择优化算法应用到图像分割中,提出了一种新的图像分割算法.该算法根据适应度函数的大小,不断更新种群克隆的规模,来求得最优的图像分割阈值,达到了较好的图像分割效果.在仿真实验中,将遗传算法和免疫克隆选择算法分别独立运行 10 次,对 10 次得到的阈值以及均值、方差进行了比较,并将函数评价次数作为算法复杂度的评价指标.该算法不仅能够对图像进行准确的分割,而且在同样的种群规模下能够以较少的迭代代数和较低的函数评价次数得到最优阈值.

2007年,薄华等人^[32]基于 SAR 图像中不同类别的区域呈现不同的灰度信息,且区域间同类像素的相邻概率大于异类像素的相邻概率这一特点,应用空间矩阵的概念和免疫算法,提出了一种结合灰度信息和空间信息的分割算法.该方法不需要对图像模型进行假设,也不需要先验知识.该算法将 SAR 图像的空间矩阵特征作为免疫算法中的疫苗,用免疫算法搜索分割结果,并收敛到最优.

2008年,Huang等^[33]提出一种用于非监督图像分割的核聚类人工免疫网络,该网络的设计受启发于人工免疫网络和支持向量域描述的思想.在该网络中,借鉴大脑皮层的长期记忆模式,提出了新的免疫抗体邻域和自适应学习系数的概念.从核聚类人工免疫网络算法执行开始,通过抗体将图像特征集划分为子集,并使用 Mercer 核将每一个子集映射到高维特征空间.此时,每一个免疫抗体邻域由一个支持向量超球面来表示.在不需要给定聚类数目的情况下,局部的支持向量超球面通过最小生成树算法结合产生全局的聚类结果.通过对人工合成数据集和 SAR 图像数据集的仿真实验,并和传统的聚类算法比较(FCM 和 RABNET),表明该网络可以减少异常数据的影响,是运行效果和执行时间之间一种很好的折中.

3.7 基于粒度计算理论的图像分割方法

粒度计算^[34](Granular Computing, GrC)是信息处理的一种新的概念和计算范式,覆盖了所有有关粒度的理论、方法、技术和工具的研究,主要用于处理不精确的、模糊的、不完整的及海量的信息,业已成为人工智能、软计算和控制科学等领域的研究热点之一^[35].它的理论基础主要有:Zadeh 提出的词计算理论^[35]、Pawlak 提出的粗糙集理论^[36]和我国学者张玲和张钊提出的商

空间理论^[37].

根据粒度计算理论,图像分割就是图像由粗粒度空间转变成细粒度空间的过程.在对复杂图像进行分割时,经常采用分层方法,先对图像进行粗分割,再向更高层次分析,即粒度由粗到细,逐步细化.图像粗分割后,可以得到图像的一些重要区域特征,如可以获得原图像中区域的个数、区域中心的位置等信息.然后,在细粒度空间上进一步对图像局部进行细化.

2002年,Pal S.K.等^[38]提出了一种多光谱图像分割方法.该方法集成了基于粗糙集理论的知识提取方法,EM算法和最小生成树聚类方法等.其中,EM算法提供了数据的统计模型,处理数据的关联措施和不确定性表示;粗糙集理论有助于快速收敛和避免局部极小,从而提高了EM算法的性能;最小生成树完成非凸聚类.

2005年,刘仁金等^[39]从商空间粒度理论角度分析图像分割概念,研究已有的图像分割方法,提出了图像分割的商空间粒度原理.用商空间的三元组 $(X, f, \tau) \Leftrightarrow ([X], [f], [\tau])$ 来描述图像分割过程,阐述基于商空间粒度计算理论的图像分割原理及基于粒度分层、合成及其综合技术下图像分割的方法,并提出了基于粒度合成原理的复杂纹理图像的分割算法.该算法通过分别提取多纹理图像中纹理区域的方向性及粗细度特征,形成图像的不同粒度,然后根据粒度合成原则,对所形成的粒度进行合成,从而实现对纹理图像的分割,实验表明该算法对复杂纹理图像分割是有效的.

2007年,张向荣等^[40]将商空间粒度计算引入SAR图像的分类中,结合SAR图像特性,提出了一种基于粒度合成理论的SAR图像分类方法.该方法首先利用具有良好推广能力的支撑矢量机基于不同纹理特征获得SAR图像的不同分类结果,并认为这些分类结果构成不同的商空间,再根据粒度合成理论将这些商空间组织起来得到SAR图像的最终分类结果.实验结果验证了这种方法的有效性和正确性以及商空间的粒度计算在SAR图像分析中的应用潜力.

2008年,史忠植等^[41]提出了面向相容粒度空间模型的图像分割方法.相容粒度空间模型的基本思想来源于模拟人在特定任务下对资源进行粒度化生成粒度空间从而辅助问题求解的能力.该模型是基于相容关系构建的粒度计算模型,它由四个部分组成:对象集系统,相容关系系统,转换函数和嵌套覆盖系统,主要特点在于对粒的定义以及通过粒度空间的层次嵌套结构进行问题求解的方法^[42].将该模型应用于图像分割时,需要先构建一个嵌套相容覆盖系统,用来定义了不同层次的粒和基于对象系统和相容关系系统的粒度化过程.

除了上述提到的结合特定的理论工具的图像分割技术之外,一些研究者还将分形几何、动态规划、组合

优化、Markov随机场、小波分析理论、遗传算法和偏微分方程等应用于图像分割,并进行了初步探讨.应当指出,上节讨论的传统图像分割方法和本节讨论的方法是从不同的角度对分割方法进行描述,两者紧密相关,而且传统方法都可以和某个理论结合.总之,这些将特定的理论工具与基本的分割方法相结合而形成的图像分割技术,丰富了图像分割的方法,也说明了跨学科交叉应用的重要意义.

4 图像分割技术的发展趋势

随着神经网络、模糊集理论、统计学理论、形态学理论、免疫算法理论、图论以及粒度计算理论等在图像分割中的广泛应用,图像分割技术呈现出以下的发展趋势:

(1) 进一步提高算法的性能

现有的多数图像分割算法只能针对某一类图像或者已经进行初步分类的图像库,其效率不高,也不具有通用性.为此,可以通过多种特征的融合(原始灰度特征、梯度特征、几何空间特征、变换特征和统计特征等)和多种分割方法的结合两个方面来提高现有算法的效率和通用性.

(2) 新理论与新方法的研究

新的分割方法的研究主要以自动、精确、快速、自适应和鲁棒性等几个方向作为研究目标.随着图像分割研究不断深入,图像分割方法将向更快速、更精确的方向发展,图像分割方法的研究需要与新理论、新工具和新技术结合起来才能有所突破和创新.

(3) 面向专门领域的应用

目前,随着图像分割在医学、遥感、电子商务、专利检索和建筑设计等领域得到了广泛应用,人们不断寻找新的理论和方法来提高图像分割的效果.随着不同学科研究人员对图像分割的日益关注,新的理论和方法会不断应用到更多领域中去.

5 结论与展望

当前,图像分割已成为图像理解领域关注的一个热点.未来的发展需要研究者借鉴数学、统计学、神经学、认知心理学、计算机科学等领域的成果及其综合运用,不断引入新的理论和方法.过去几年,研究人员不断将相关领域出现的新理论和新方法应用到图像分割中,虽然取得了一定的效果,但仍未出现一种令人满意的高效的通用的方法.其主要原因是人类对视觉系统还没有充分的认识,已有的模型只是从功能上来模拟,而不是从结构上来实现.作者下一步的研究方向是进一步研究视觉认知的原理,结合智能科学的最新理论,对图像分割作更深一步的研究.

参考文献:

- [1] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 王爱民, 沈兰荪. 图像分割研究综述[J]. 测控技术, 2000, 19(5): 1-5.
- [3] Serra J. Mathematical Morphology[M]. London, UK: Academic Press, 1982.
- [4] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. London, UK: Academic Press, 1982.
- [5] Victor O R, Juan I G L, Nicolas S L, Pedro G V. An improved watershed algorithm based on efficient computation of shortest paths[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(3): 1078-1090.
- [6] Parvati K, Prakasa Rao B S, Mariya D M. Image segmentation using gray-scale morphology and marker-controlled watershed transformation[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2008, 1-8.
- [7] Basir Otman, Zhu Hongwei, Karray Fakhri. Fuzzy Based Image Segmentation[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [8] Bezdek James C, Keller James, Krisnapuram Raghu, et al. Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] Masooleh M G, Moosavi SAS. An improved fuzzy algorithm for image segmentation[J]. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, 28(4), 400-404.
- [10] 王彦春, 梁德群, 王演. 基于图像模糊熵邻域非一致性的过渡区提取与分割[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2245-2249.
Wang Yan-chun, Liang De-qun, Wang Yan. Transition region extraction and segmentation based on image fuzzy entropy neighborhood unhomogeneity[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2245-2249. (in Chinese)
- [11] Rout S, Srivastava S, Majumdar J. Multi-modal image segmentation using a modified Hopfield neural network[J]. Pattern Recognition, 1998, 31(6), 743-750.
- [12] Dekruger D, Hunt B R. Image processing and neural networks for recognition of cartographic area feature[J]. Pattern Recognition, 1994, 27(4), 461-483.
- [13] Wang D L, Terman D. Image segmentation based on oscillatory correlation[J]. Neural Computation, 1997, 9: 805-836.
- [14] Vilarino D L, Brea V M, Cabello D. Discrete Time CNN for Image segmentation by active contours[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19(8): 721-734.
- [15] Wang Y, Adai T, Kung S Y. Quantification and segmentation of brain tissues from MR images a probabilistic neural networks approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(8): 1-12.
- [16] Goktepe M, Yaiabik N, Atalay V. Unsupervised segmentation of gray level Markov model textures with hierarchical self organizing map[A]. Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition[C]. USA: Institute of Electric and Electronic Engineer, 1996. 90-94.
- [17] Kuntimad G, Ranganath H S. Perfect image segmentation using pulse coupled neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 591-598.
- [18] ZHANG Junying, FAN Xiuju, DONG Jiyang, SHI Meihon. Image segmentation based on modified pulse-coupled neural networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 16(1): 119-122.
- [19] H. Berg, R. Olsson, T. Lindblad et al. Automatic design of pulse coupled neurons for image segmentation[J]. Neuro-computing, 2008, 71(6): 1980-1993.
- [20] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [21] O. Chapelle, P. Haffner and V. N. Vapnik. Support vector machines for histogram-based image classification [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(5): 1055-1064.
- [22] 徐海祥, 喻莉, 朱光喜, 张翔, 田金文. 基于支持向量机的磁共振脑组织图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(10): 1275-1280.
- [23] 魏鸿磊, 欧宗瑛, 张建新. 采用支持向量机的指纹图像分割[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 2362-2365.
- [24] Liu Ting, Wen Xian-bin, Quan Jin-juan, et al. Multiscale SAR image segmentation using support vector machines[A]. Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing[C]. USA: IEEE, 2008. 706-709.
- [25] 闫成新, 桑农, 张天序. 基于图论的图像分割研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(5): 11-14.
- [26] Pavan M, Pelillo M. A new graph-theoretic approach to clustering and segmentation[A]. Proc IEEE Conf Computer Vision and Pattern Recognition[C]: USA: IEEE, 2003. 145-152.
- [27] Bilodeau G A, et al. Computerized medical imaging and graphics[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2006, 30(7): 437-446.
- [28] 刘丙涛, 田铮, 李小斌, 周强锋. 基于图论 Gomory-Hu 算法的 SAR 图像多尺度分割[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 1002-1007.
- [29] 冯林, 孙焘, 吴振宇, 管慧娟. 基于分水岭变换和图论的图像分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 649-653.
- [30] 焦李成, 杜海峰. 人工免疫系统进展与展望[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1540-1548.
- [31] 丛琳, 沙宇恒, 焦李成. 基于免疫克隆选择算法的图像分割[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1169-1173.
- [32] 薄华, 马缚龙, 焦李成. 基于免疫算法的 SAR 图像分割方法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 375-378.
- [33] Wenlong Huang, Licheng Jiao. Artificial immune kernel clus-

tering network for unsupervised image segmentation [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(4): 455 - 461.

- [34] Yao Y Y. Granular computing: basic issues and possible solutions [M]. Atlantic: Association for Intelligent Machinery Press, 2000.
- [35] Zadeh L A. Fuzzy logic = computing with words [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, 4(2): 103 - 111.
- [36] Pawlak. Rough sets [J]. Computer and Information Science, 1982, 11: 341 - 356.
- [37] 张铃, 张钊. 模糊商空间理论: 模糊粒度计算方法 [J]. 软件学报, 2003, 14 (4): 770 - 776.
- [38] Pal S. K., Mitra P. Multispectral image segmentation using the rough-set-initialized EM algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2495 - 2501.
- [39] 刘仁金, 黄贤武. 图像分割的商空间粒度原理 [J]. 计算机学报, 2005, 28(10): 1680 - 1685.
- [40] 张向荣, 谭山, 焦李成. 基于商空间粒度计算的 SAR 图像分类 [J]. 计算机学报, 2007, 30(3): 483 - 490.
- [41] Zhongzhi Shi, Zheng Zheng, Zuqiang Meng. Image segmentation-oriented tolerance granular space model [A]. IEEE International Conference on Granular Computing, 2008, 8: 566 - 571.
- [42] 郑征. 相容粒度空间模型及其应用研究 [D]. 北京: 计算技术研究所, 2006.

作者简介:



许新征 男, 1980 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为图像检索、智能计算和机器学习等。



丁世飞 男, 1963 生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为模式识别、机器学习和数据挖掘等。



史志植 男, 1941 年生, 研究员, 博士生导师, IEEE 高级会员, CCF 高级会员, 主要研究方向为人工智能、机器学习、神经计算和认知科学等。