

高空间分辨率遥感影像分割方法研究综述

刘建华 毛政元

(福州大学,空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,福建省空间信息工程研究中心,福州 350002)

摘要:遥感影像分割是指把一幅影像划分为互不重叠的一组区域的过程,它要求得到的每个区域的内部具有某种一致性或相似性,而任意两个相邻的区域则不具有此种相似性。遥感影像分割是面向对象的遥感影像数据挖掘与应用中的一项关键技术,对于影像目标信息自动化提取与智能识别尤为重要,在面向对象的遥感影像处理工程中具有重要意义。本文对常见的高空间分辨率遥感影像分割方法与应用策略进行了分析,比较了各种分割方法的应用范围、优缺点及目前存在的改进措施。建立了面向对象的遥感影像分割方法的分类体系,最后指出了面向对象的遥感影像分割方法目前所存在的问题及应用前景。

关键词:高空间分辨率遥感影像 影像分割方法 应用策略 进展

A Survey on High Spatial Resolution Remotely Sensed Imagery Segmentation Techniques and Application Strategy

Liu Jian hua Mao zheng yuan

(Fuzhou University, Spatial Information Research center, Fuzhou, 350002)

Abstract: Remotely sensed imagery segmentation is a process of dividing an image into different regions such that each region is, but the union of any two adjacent regions is not, homogeneous. It is one of key techniques in the object-oriented remotely sensed imagery data mining and its application, also quite essential in remote sensing image processing engineering. In this paper, we have a rough survey on different methods of high spatial resolution remotely sensed imagery segmentation, categorizing them into four groups according to the gray or color information they are exploiting. The disadvantage of current methods and the proper progress which can be attained in the near future are pointed out at the end of this essay.

Keywords: High Spatial Resolution Imagery, Segmentation methods, application strategy, advances and prospects

1 引言

高空间分辨率遥感影像(如 GeoEye、WorldView、QuickBird、IKONOS 等,本文简称高分影像)在诸多领域(地形图更新、地籍调查、城市规划、交通及道路设施、环境评价、精细农业、林业测量、军事目标识别和灾害评估等)得以广泛应用[1]。目前,影像信息提取自动化程度低是高分影像应用潜力得不到充分发挥的主要限制因素,是理论和应用研究中必须突破的瓶颈。

遥感影像分割是面向对象的遥感影像分析方法[2]的基础和关键,在遥感影像工程中处于影像处理与影像理解的中间环节,是面向对象的影像分析理论研究的突破口。按照一般的影像分割定义[3],分割出的影像对象区域需同时满足相似性和不连续性两个基本特性;其中相似性指该影像对象内的所有像元点都满足基于灰度、色彩、纹理等特征的某种相似性准则,不连续性是指影像对象的特征在区域边界处的不连续性。迄今为止,将计算机视觉领域的图像分割算法应用于图像分割过程中,已开展了较多的研究[4-7],并提出了大量的算法;但针对遥感影像尤其是高分影像的分割方法较少[8],仍不成熟。这是由于与其它类型图像的分割相比,高分影像分割难度更大,也更具挑战性。具体体现在高分影像其空间分辨率高、纹理信息丰富而光

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973)子课题“高空间分辨率遥感影像自适应数据挖掘方法研[2006CB708306]”,国家自然科学基金项目“基于场模型的自适应空间聚类方法研究[40871206]”。

作者简介: 刘建华,男,博士研究生,曾从事 GIS 与 RS 教学工作。目前主要研究方向为空间数据挖掘、遥感图像处理以及 GIS 与 RS 集成等。E-mail: sirc.liujh@yahoo.com.cn。

谱信息相对不足,影响分割的主要因素是数据量大、空间变异性高,再加上对高分影像的分析与理解需要从不同的尺度着手,因此分割的语义、尺度、效率、精度和可重复性是需要解决的问题,另外分割结果的客观评价也是尚未解决的问题之一。本文注重于高分影像分割方法体系和分割应用策略的研究现状总结,在此基础上提出目前遥感影像分割研究的热点及其发展趋势。

2 遥感影像分割方法与分析

据不完全统计,到目前为止至少发展了超过1000多种的分割方法[3]。遥感影像分割方法总的来说可分为自上而下的知识驱动和自下而上的数据驱动两大类。知识驱动型是指在分割时根据待分割对象的先验模型以及知识规则来指导分割过程。数据驱动型则根据高分影像数据自身的特征直接对图像数据进行分割,本文则属于后者范畴。

若根据待分割图像波段数的不同,分割方法可以分为灰度图像分割、彩色图像分割或多波段图像分割(遥感影像一般为此类,而灰度和彩色图像分割可认为是多波段图像分割的特例)。然而更多的学者则倾向于从分割方法的原理入手来分类图像分割方法[4-7]。例如,文献[4]将图像分割方法分为三类,即特征阈值或聚类,边缘检测和区域提取。文献[5]将图像分割方法分为阈值法,边缘检测法,统计学方法,结合区域与边界信息的方法。文献[6]将分割方法分为直方图阈值法,特征空间聚类法,边缘检测法,基于区域的方法,人工神经网络方法,基于模糊集理论的方法,物理方法以及上述方法的混合。文献[7]将分割方法分为并行边界或区域以及串行边界或区域四大类分割方法。在总结前人的研究成果之上,并考虑到遥感影像处理领域的特点,可将高分影像的分割方法分为基于像元的分割方法(阈值法,聚类法),基于边缘检测的分割方法,基于区域的分割方法和基于物理模型的分割方法,而结合特定数学理论和工具(如数学形态学、模糊数学、小波变换、人工神经网络等)的影像分割可认为是在这些分割方法上的进一步推广和发展。目前,对多波段遥感影像的分割基本上是灰度图分割方法在不同的色彩空间中的扩展应用,所以在总结灰度图像分割方法的基础上,再讨论对多波段遥感影像的分割方法。

2.1 基于像元的分割方法与分析

(1) 阈值法

阈值法[9]是图像分割算法中数量最多的一类。其基于这样的假设,图像是由具有不同灰度级的区域所组成的,图像直方图被一定数量的峰所分割,每一个峰对应了一组区域,两个相邻的峰之间存在着一个谷,它对应了一个阈值[6]。根据阈值选取本身的特点可将阈值算法分为基于各像素值的阈值、基于区域性质的阈值和基于坐标位置的阈值三类[3],见图1。

阈值法分割实现简单,不需要先验知识,算法容易设计且执行速度快;当目标区域的灰度值或其它特征相差很大时,它能有效地对图像进行分割。但当图像直方图中没有明显的峰或者谷底宽平时,或者图像中不存在明显灰度差异、灰度范围有较大重叠的时候,阈值分割就难以获得准确的结果[8]。在实际应用中由于阈值方法仅考虑了灰度属性值,忽略了像元的空间信息故而抗噪能力较差,对图像过渡区分割效果并不理想。阈值法在彩色图像分割中有一定的应用[10],在此需要扩展到多波段遥感影像中,但多维特征空间中该方法将更加复杂。

(2) 聚类法

利用特征空间聚类的方法进行图像分割可认为是对阈值分割概念的推广。如果将像元的特征视为模式,则图像分割可视为一聚类过程[11]。它将图像空间中的像元用其对应的特征空间点(模式)表示,通过将特征空间中的点聚集成团而形成单独的簇或类,再将它们映射回原图像空间以形成分割结果[3]。

该方法的好处是容易实现,利用非监督方式实现分类,并可用基于概率模型[27]的方法改良算法。

但获得关于簇的精确个数通常是极其困难的，并且同样是由于没有考虑像元的空间信息，容易产生分割区域不连通的情况。此外，由于聚类一般是全局算法，故调整类与区域的关系也比较复杂。目前，对彩色图像的聚类分割方法较多[6-7]，其中K-均值、模糊C-均值等是最常用的分类方法。但对于多波段高分影像而言，在多维特征空间进行有效的聚类分割仍将是一个难题。兼顾聚类方法的理论内涵和算法实现，可将聚类方法分为系统聚类法、分割聚类法和模糊聚类法三大类[12]，见图2。

2.2 基于边缘检测的分割方法与分析

基于边缘检测的方法主要利用像元特征在区域边界处的不连续性来分割图像，分为并行和串行两种方法[3],见图3。并行边缘检测的过程主要是，首先利用检测方法[13]确定所有的边缘点，再用一定的方法将边缘点组成目标边界。串行边缘检测的基本思想是，首先确定起始边缘点，再按一定的搜索策略顺序检测图像中的边缘点并将它们连接成轮廓，从而构成分割区域；其中连接策略一般有边缘点检测与连接交叉进行或先进行边缘点检测再连接两种情况。对于彩色图像的分割[14-16]，边界信息的含义要比灰度图像丰富很多[17]，例如具有相同色相但亮度差异悬殊的边界可以在图像中被检测出来[18]。显然，边界的亮度、色相和饱和度信息间的相关性很高，单独考虑并不能给图像分割带来良好的效果；如何将彩色分割方法扩展到多波段遥感图像的分割仍然具有一定的困难。

边缘检测方法符合人类的认知习惯，当图像各区域之间的对比明显时，该方法常能取得较好的效果。但抗噪能力较差，当边界较为模糊或者边界过多的时效果不佳，且生成一个封闭的边界也并非易事。在实际应用中基于边缘检测法的难点在于解决边缘检测时抗噪性和检测精度的矛盾[8]。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。为改善边缘检测法，学者们提出了多种改进方法[19]，但仍不能从根本上克服此矛盾。

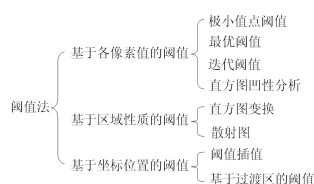


图1 阈值法

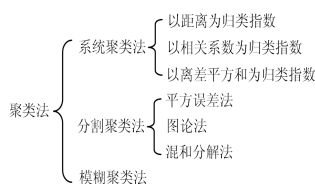


图2 聚类法

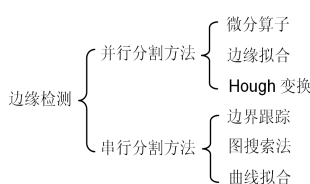


图3 基于边缘的方法

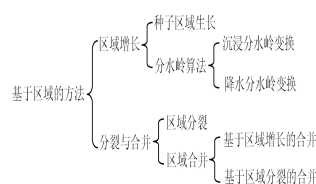


图4 基于区域的方法

Fig 1 thresholding methods

Fig 2 clustering methods

Fig 3 edge based methods

Fig 4 region based methods

2.3 基于区域的分割方法与分析

基于区域的方法主要利用区域内象素特征的相似性[20-21]来分割图像，该类方法主要包括区域增长和区域分裂与合并两种方法[22-26],见图4。区域增长方法从若干种子点或种子区域出发，按照一定的相似性准则，对邻域像元进行判别并连接，重复上述过程直至图像中的所有像元被归并到相应的区域中,而与区域增长相关的关键问题是种子点的选择和生长准则的确定。在区域分裂方法中，起始的种子区域就是整幅图像，如果种子区域同质性程度较差则被分裂为若干子区域，这些子区域成为新的种子区域，重复上述过程直至所有的子区域都是同质的。一般合并方法常常与区域增长或区域分裂方法结合起来应用[27-28]。

基于区域的方法具有抗噪能力强，得到的区域形状紧凑，无需事先声明类别数目，容易扩展到多波段等优点[6]。此外，区域增长法对复杂场景进行分割时很有用，在自然景物的分割方面亦显示较佳的性能。

基于区域的方法时空开销较大,在确定种子点和区域同质性标准时比较困难,需设法给予改进。

2.4 基于物理模型的分割方法与分析

从遥感成像过程来看,图像数据取决于地表特征、大气、光照以及成像设备等因素,描述这种关系的模型即称为图像的物理模型,分为物理光学和几何光学两种类型。物理光学模型利用波动方程描述光的入射与反射特性,具有严格的解析意义,但过于复杂而不便应用[29];几何光学模型采用反射与折射定律并进行了简化,是图像物理模型的主要应用形式,其中最著名的是 Shafer 提出的二分光反射模型[30]。

高分影像由于其细节信息表现能力突出,使得细小目标、地物的纹理和阴影、光斑等干扰因素的影响愈加突出,并且由于同类地物甚至同一地物的光谱响应变异随着空间分辨率的提高而增加,高分影像上“同物异谱”、“异物同谱”的现象非常普遍,给相关地物目标的分割带来了极大的难度。而基于物理模型的分割能够识别阴影、光斑和描述地物表面的朝向,并获得精确的分割边界[31],有望解决遥感影像中的“同物异谱”、“异物同谱”现象;但现有的基于物理模型的分割方法[32]都具有一定的约束条件,如光照条件要求高,成像物体表面的反射特性已知、易于建模等,相对于遥感影像其应用具有很大的挑战性。尽管如此,图像的物理模型改变了图像处理依赖于低层次特征和统计信号处理的局限性,而且能够在分割的同时得到关于分割场景的物理解释,是一个值得重视的研究方向[8]。

2.5 结合特定数学理论和技术的分割方法与分析

结合特定数学理论和技术的影像分割如数学形态学、模糊技术、小波变换、神经网络等,可认为是在前述分割方法上的进一步推广和发展。目前遥感影像分割尚无自身的理论基础,鉴于高分影像其特殊的影像特征,更需引入新的理论和方法来求得分割效果的改善。

数学形态学[33]是一种分析几何形状和结构的数学方法,由一组代数算子(腐蚀、膨胀、开、闭)组成。由于其具有完备的数学基础,以逐渐成为分析图像几何特征的有力工具,但该方法一般适用于单波段图像处理,在此需扩展到多波段遥感图像处理。

模糊技术[34]提供了一种有效解决图像分割中不确定性的新机制,主要包括模糊算子、模糊集、模糊逻辑、模糊测度等。其利用隶属度函数来判断每个像素的归属问题,避免了过早做出像素归属的判定,为下一级的处理保留更多的信息,以便得出更好的分割结果[35],但隶属度函数及成员的确定比较麻烦且算法复杂度相对较高[36]。对于高分影像的分割而言,模糊技术的引入有着广阔的应用前景。

小波变换[37]是一个新的数学分支,包括小波分解和小波重构。小波变换通过空间和频率的局域变换,以及伸缩和平移等运算对函数或信号进行多尺度的细化分析,最终达到高频处时间细分,低频处频率细分,从而为不同尺度上信号分解和表征提供了精确和统一的框架。利用小波变换进行遥感影像分割在提取图像纹理和边缘特征时有一定的应用[38-39];研究还发现[8],利用小波变换可在缩小图像尺寸的同时,较好地保持图像结构信息,故不失为一种良好的降低遥感影像分割计算代价的预处理方法。目前,在小波、Ridgelet 及 Curvelet 变换的基础上发展起来的 Contourlet 变换[49]是该领域研究的热点。

神经网络[40]广泛的应用于模式识别、图像处理等领域,主要包括 Hopfield 神经网络[41]、自组织神经网络[42]、反向传输神经网络[43]等方法;因其具有非线性以及并行和分布式存贮与处理能力而特别适合于解决聚类 and 分类等问题。神经网络方法的出发点是将图像分割问题转化为诸如能量最小化、分类等问题,

即先利用训练样本集对ANN进行训练,再用训练好的ANN去分割新的图像;另外,由于神经网络中存在大量的连接,因此容易引入空间信息[44]。其不足是初始化有可能影响分割结果、需要大量的训练样本集且训练时间过长[6];相对于高分影像而言,难以达到大数据量处理以及非监督分类的要求。

3 高空间分辨率遥感影像分割的应用策略

基于数据驱动型的高分影像的分割策略必须充分考虑到其数据本身的特点,以及上述各方法的适用范围以及应用领域的特色。一般而言,理想的高分影像分割方法应具有以下特征,能有效处理多波段数据及纹理区域、非监督自适应性、多尺度及相应于该尺度下有效的语义理解、分割精度高、速度较快等。就目前的研究现状而言,基于数据驱动型的高分影像分割主要有输出融合和多维统一两种策略。输出融合策略一般首先对原始高分影像进行预处理(如去噪、配准、融合等),经特征抽取得到每一波段的特征图像(如梯度图);对特征图采用一定的分割方法予以分割,再将各波段分割结果经匹配等处理后得到结果。该策略实质上仍是沿用了类似于灰度图的分割方法来对高分影像进行处理,分割时能充分利用各波段的亮度信息、细节特征表现充分[45],但波段间联系较少。其难点在于如何选取有效的匹配策略将各波段分割结果合并成最终统一的结果。多维统一策略对预处理后的高分影像进行转换,得到同质性(或异质性)测度图像,再采用某种分割方法予以分割,得到最终的分割结果。如何获得有效的测度图像以及实现对于有机联系的多波段数据在多尺度及相应于该尺度下有效的语义理解的分割是该策略的难点所在。由于高分影像的分割方法一般要能处理多波段数据,而波段数的增加将不可避免的增加算法和时间复杂度,故对于多维统一策略而言降维并借鉴彩色图像现有的分割方法(图 5[6])显得尤为可取。

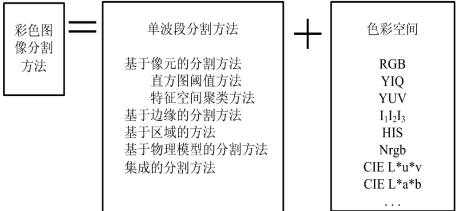


图 5 彩色图像分割方法

Fig 5 color image segmentation methods

4 结语

时至今日遥感影像分割依然是面向对象的图像分析与理解环节中的难点之一。本文对近年来国内外遥感影像分割研究进行了比较分析,得出目前遥感影像分割通常采用集成的分割方法。代表性的主要有基于区域和边界[46]、光谱和形状[47]以及光谱和纹理[48]信息的集成等。此外,基于区域的分割方法仍是遥感影像分割方法的主流,其中分水岭分割方法倍受学者们的重视,但这种方法也存在一定的局限,如分割参数人为设置的不当很容易产生过分割现象。同样商业化eCognition软件的多尺度分割算法[47]对于不同的影像分割任务,其分割参数规律的获取亦停留在实验阶段,分割效果也不是很理想。因此如何更多地从图像自身的性质出发来提高分割方法的自适应性和有效性,减少人工参与程度成为后续工作的重点。

新的数学理论、方法和先验知识的引入有助于图像分割研究问题的深入理解和有效解决。例如,基于多分辨率分析的小波方法,不但为遥感影像的纹理分析提供了便利,也是一种良好的降低遥感影像分割计算代价的预处理方法,为遥感影像的多尺度分割提供了可能;而在小波等方法基础上发展起来的 Contourlet 变换是目前该领域的研究热点。此外,模糊技术提供了一种有效解决图像分割中不确定性的新机制,尽管其计算复杂度比较高,但模糊技术有着其在处理不确定性方面十分优越的特性,将受到越来越多的关注。

最后需要指出的是,目前大多数分割方法是基于灰度图的,彩色图像的分割效果也不是十分理想[6];如何将现有的分割方法加以扩展来适应多光谱高分影像的分割是后续研究的重点。

参考文献

- 1 宫鹏, 黎夏, 徐冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些研究问题. 遥感学报, 2006, 10 (1): 1~5.
- 2 M. Baatz, A. Schäpe. Multiresolution Segmentation—an Optimization Approach for High Quality Multi-scale Image Segmentation. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.): Angewandte Geographische Information sverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag, Page(s):12~23.
- 3 章毓晋.图像分割[M].北京:科学出版社,2000.
- 4 K. S. Fu, J. K. Mui. A survey on image segmentation. Pattern Recognition, 1981, 13:3~16.
- 5 Wladyslaw Skarbek, Andreas Koschan.Colour Image Segmentation-A Survey.October, 1994.
- 6 H.D.Cheng, X.H.Jiang, Y. Sun. J. Wang. Color image segmentation: advances and prospects. Pattern Recognition, 2001, 34(12):2259~2281.
- 7 Yu-Jin Zhang. Advances in Image and Video Segmentation: An Overview of Image and Video Segmentation in the Last 40 Years.2006.
- 8 陈秋晓.高分辨率遥感影像分割方法研究[D].中国科学院研究生院博士学位论文.2004.
- 9 Mehmet Sezgin. Bulent Sankur. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1):146~165.
- 10 Bonsiepen L. Coy W .Stable segmentation using color information. In Computer Analysis of Images and Patterns, ed. R. Klette, Proc.of CAIP'91, Dresden, September 17~19, 1991, Page(s):77~84.
- 11 陈秋晓.改进的RPCCL聚类方法及在遥感影像分割中的应用.计算机工程与应用,2005,34:221-223.
- 12 毛政元,李霖.空间模式的测度及其应用[M].科学出版社,2004.
- 13 J.Canny, A computational approach to edge detection, IEEE Trans.Pattern Anal.Mach.Intell.PAMI 8, 1986, Page(s): 679~698.
- 14 Androustos, P.; Androustos, D.; Plataniotis, K.N.; Venetsanopoulos, A.N.; Color edge detectors: an overview and comparison. Electrical and Computer Engineering, 1997. IEEE 1997 Canadian Conference on Volume 2, 25~28, May 1997 Page(s):607~610.
- 15 Ruzon M.A., Tomasi C. Color edge detection with the compass operator. Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.Volume 2,1999,Page(s):.23~25.
- 16 Koschan A, Abidi M. Detection and classification of edges in color images. Signal Processing Magazine.IEEE Volume 22, Issue 1, 2005, Page(s):64~73.
- 17 Nevada. A color edge detector and its use in scene segmentation. IEEE Trans. System Man Cybernet.1977, SMC~7 (11): 820~826.
- 18 P.E.Trahanias, A.N. Venetsanopoulos. Vector order statistics operators as color edge detectors. IEEE Trans. Systems Man Cybernet.1996, Part B: Cybernetics, 26(1): 135~143.
- 19 Lian Yishao, Bu Jiajun, Chen Chun. A novel image segmentation algorithm based on convex polygon edge detection.TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference Volume B, 21~24, Vol.2 Nov.2004, Page(s):108~111.
- 20 H.D.Cheng, Y.Sun. A hierarchical approach to color image segmentation using homogeneity. IEEE Trans. Image Process.2001, in press.
- 21 G.M.ESPINDOLA, G.CAMARA, etc. Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14):3035~3040.
- 22 F. Meyer, S. Beucher. Morphology segmentation. J. Visual Comm. And Image Representation, 1990, 1(1):21~46.
- 23 L.Vincent, P.Soille. Watershed in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. IEEE Trans. Patt. Anal. And Mach.Int. 1991, 13(6):583~598.
- 24 P. De Smet, R. L. Pires. Implementation and analysis of an optimized rain falling watershed algorithm. Proc.SPIE, 2000, 3974:759~766.
- 25 Yu Yuan, Barner, K. Color Image Segmentation Using Watersheds and Joint Homogeneity-Edge Integrity Region Merging Criteria. Image .8~11 Oct.2006, Page(s):1117~1120.
- 26 R. Ohlander, K. Price, D.R. Reddy. Picture segmentation using a recursive region splitting method, Compute. Graphics Image Process, 1978, 8: 313~333.

- 27 Treméau, N. Borel. A region growing and merging algorithm to color segmentation. *Pattern Recognition*, 1997, 30(7):1191~1203.
- 28 陈秋晓, 陈述彭, 周成虎. 基于局域同质性梯度的遥感图像分割方法及其评价. *遥感学报*. 2006, 10 (3) : 357~365.
- 29 Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 611~634.
- 30 Shafer S A. Using Color to Separate Reflection Components. *Color Research and Application*, 1985, 10:210~218.
- 31 S.A.Shafer, T.Kanade. Using shadows in finding surface orientations. *Comput. Vision Graphics Image Process*. 1983, 22:145~176.
- 32 Lucchese L, Mitra S.K. Advances in color image segmentation. *Global Telecommunications Conference, 1999. GLOBECOM '99 Volume 4*:2038~2044.
- 33 Bosworth J.H. Acton S.T. Morphological image segmentation by local monotonicity. *Signals Systems and Computers, Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on 24~27 Oct. 1999, Volume 1*:53~57.
- 34 Caillol H., Hillion A., Pieczynski W. Fuzzy random fields and unsupervised image segmentation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on July 1993*, 31(4):801~810.
- 35 H.D.Cheng, J. Li. Fuzzy homogeneity and scale space approach to color image segmentation. *International Conference on Computer Vision, Pattern Recognition and Image Processing, Atlantic City, February 27-March 3, 2000*.
- 36 Borji A., Hamidi, M. CLPSO-based Fuzzy Color Image Segmentation. *North American Fuzzy Information Processing Society, 2007. NAFIPS '07. Annual Meeting of the 24~27 June 2007, Page(s)*:508~513.
- 37 崔锦泰[美]. 小波分析导论. 程正兴译. 西安交通大学出版社, 1995.
- 38 张晓东, 李德仁等. 小波分解在边缘检测中的应用. *武汉大学学报·信息科学版*, 2001, 26 (1) : 29~33.
- 39 Acharyya M., De R.K., Kundu M.K. Segmentation of remotely sensed images using wavelet features and their evaluation in soft computing framework. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12):2900~2905.
- 40 M. Egmont-Petersen, D. de Ridder, H. Handels. Image processing with neural networks—a review. *Pattern Recognition*, 2002, 35:2279~2301.
- 41 Uscumlic Marija, Reljin Irini, Dujkovic Dragi. Improvements in Image Segmentation by Applying Hopfield Neural Networks. *Neural Network Applications in Electrical Engineering, NEUREL 2006. 8th Seminar on 25~27 Sept. 2006, Page(s)*:37~40.
- 42 Y. S. Lo, S. C. Pei. Color image segmentation using local histogram and self-organization of Kohonen feature map, *International Conference on Image Processing, KOBE, Japan, October 24~28, 1999, Page(s)*:232~239.
- 43 Muhammed H.H. Unsupervised fuzzy clustering and image segmentation using weighted neural networks. *Image Analysis and Processing. Proceedings. 12th International Conference on 17~19 Sept. 2003, Page(s)*:308~313.
- 44 Huang C L. Parallel image segmentation using modified Hopfield model [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1993, 13(5): 345-353.
- 45 刘永学, 李满春. 基于边缘的多光谱遥感图像分割方法. *遥感学报*, 2006, 10 (3) :350~356.
- 46 X. Muñoz, J. Freixenet, X. Cufí, J. Martí. Strategies for image segmentation combining region and boundary information. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24:375~392.
- 47 eCognition User Guide, 2002, <http://www.definiens-imaging.com>.
- 48 Yining Deng, B.S. Manjunath. Unsupervised Segmentation of Color-Texture Regions in Images and Video. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, 2001, 23(8):800~810.
- 49 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2005, 14 (12): 2091-2106.