

基于数学形态学的 IKONOS 多光谱 图像分割方法研究

徐春燕^{1,2}, 冯学智¹, 赵书河¹, 肖鹏峰¹

(1 南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210093)

2 中国石油集团西部管道有限责任公司 新疆输油分公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要: 利用数学形态学方法, 研究与探讨了 IKONOS 多光谱图像的分割技术, 提出一种结合图像边缘特征和纹理特征的混合分割新算法。在高分辨率多光谱遥感图像 K-L 变换的基础上, 采用多尺度多方向形态学梯度算子提取边缘特征, 应用数学形态学滤波及局部方差统计特征对图像对象进行标记, 最后采用强制最小过程, 进行标记控制的分水岭分割。研究结果表明, 提出的分割算法优于仅利用边缘特征的分水岭分割算法, 同时, 该算法能较好地解决分割过程中存在的过分割与欠分割问题, 是一种适合高分辨率多光谱遥感图像的分割算法。

关键词: 图像分割; 数学形态学; 标记控制的分水岭分割; 高分辨率多光谱遥感图像

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

1 引 言

高空间分辨率遥感图像的出现对遥感信息提取与特征识别技术提出了新的更高要求。与中低空间分辨率图像相比, 高分辨率多光谱遥感图像的信息更为丰富, 不仅包含地物的光谱信息, 而且地物的结构、纹理、形状等细节信息清晰可见。充分利用高分辨率遥感图像的优越性, 提高分类精度与特征提取可靠性具有重要意义^[1]。但是, 遥感图像空间分辨率的提高, 却降低了基于像元的分类方法的精度^[2], 面向对象的特征识别与信息提取技术更适合高分辨率遥感图像的分析。

图像分割是实现图像对象信息提取的重要环节, 通过图像分割生成图像对象, 进一步的图像分析与理解才能展开。至今, 人们提出上千种图像分割算法。由于遥感图像自身的多光谱、多尺度特性以及图像中地物在尺寸、形状、光谱上的异质性, 适用于医学图像、灰度图像等的分割算法并不能直接用于遥感图像分析^[2]。高分辨率遥感图像的分割算法成为遥感科学领域的研究热点和难点之一。

在图像分割所借助的众多理论方法中, 数学形态学以严格的数学理论和几何学为基础, 着重

研究图像的几何结构及相互关系, 能通过数学形态学变换, 将复杂目标分割成一系列互不相交的简单子集。因此, 数学形态学适用于复杂图像的分析与描述。近年来, 数学形态学开始被用于高分辨率遥感图像分割^[3-6]。值得注意的是, 遥感图像的分割结果不仅容易产生过分割问题, 还存在欠分割问题。而且, 由于多光谱图像具有较高的数据冗余, 降低了图像特征提取的稳定性。鉴于以上考虑, 本文以 K-L 变换为基础, 从多光谱图像数据降维、信息归并与分离、运算效率提高等角度出发, 借助数学形态学方法, 探讨高分辨率多光谱遥感图像的分割问题。

2 实验数据及数据预处理

2.1 实验数据

IKONOS 卫星数据含有 4 个多光谱波段 (表 1), 成像幅宽为 11km × 11km, 所有波段都具有 11bit 的动态范围。本文所使用的 IKONOS 图像是 2000 年 5 月获取的南京市影像, 图像质量良好, 无云覆盖。该影像覆盖南京市, 主要地类有水体、厂房、居民楼、林地、草地和道路等。

收稿日期: 2007-10-08 修订日期: 2008-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40501047), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (编号: 20050284009)。

作者简介: 徐春燕 (1972—), 女, 博士生, 主要研究方向为遥感数字图像处理, 已发表论文 3 篇。

表 1 KONOS图像多光谱波段信息

Table 1 Information of KONOS multispectral data

波段类型	空间分辨率 /m	波段名称	波段范围 /μm	波段宽度 /μm
多光谱波段	4 0	蓝	0 45—0 53	0 08
		绿	0 52—0 61	0 09
		红	0 64—0 72	0 08
		近红	0 77—0 88	0 11

2.2 数据预处理

遥感图像波段间的相关性较强, 存在大量的数据冗余。K-L变换 (Kahunen-Loeve Transform) 是统计特征基础上的多维正交线性变换, 并且在最小均方误差意义下实现数据由高维向低维的

映射, 能够完全去除原数据中的相关性^[7]。K-L变换的另一个特点是能对多波段图像信息进行归并与分离^[8]。因此, 为了提取利于图像分割的有用信息, 降低图像维数, 压缩数据量, 提高图像处理效率, 对 KONOS图像做 K-L变换, 结果见表 2。

表 2 KONOS数据 K-L变换结果

Table 2 Results of K-L transform on KONOS data

主成分	特征向量				特征值	贡献率 /%	累积贡献率 /%
	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4			
PC1	0 298	0 489	0 587	0 572	13268 27	73 57	73 57
PC2	- 0 246	- 0 326	- 0 403	0 819	4450 27	24 67	98 24
PC3	- 0 707	- 0 308	0 636	- 0 022	249 64	1 38	99 62
PC4	0 593	- 0 748	0 297	0 026	68 02	0 38	100 00

由表 2可知, PC1是多波段图像信息的归纳与综合, 集中反映了多光谱数据的大部分信息, 以可见光波段信息为主; PC2突出反映了近红外与可

见光波段的波谱信息差异, 以近红外波谱信息为主。从 PC1和 PC2中截取 200 × 200的子图像 (图 1)。

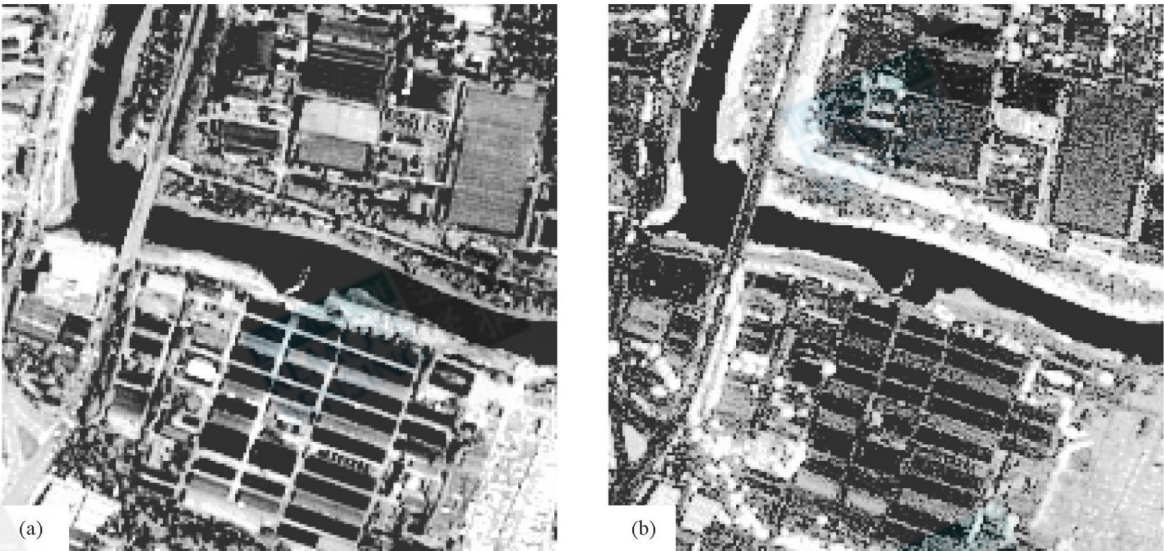


图 1 K-L变换后获得的 (a) PC1和 (b) PC2图像
Fig. 1 Samples of (a) PC1 and (b) PC2 obtained by using the K-L transform

3 数学形态学图像分割

3.1 方法概述

数学形态学是建立在严格的数学理论基础上的科学,它以集合论为语言,对图像对象的几何结构和形状进行描述。数学形态学的基本思想是利用一定形态和尺寸的结构元素 (structure element SE) 探测图像,提取或抑制图像目标的特定结构,从而达到图像分析与识别的目的^[9]。经过几十年的发展,数学形态学在工业检测、医学图像处理、目标检测、机器视觉等诸多领域得到了广泛的应用和长足的发展,它同时还涉及与计算机图像处理有关的图像分割、图像分析、特征提取和图像编码等各个领域。在更为广阔的图像处理领域,数学形态学作为既定的图像分析技术几乎应用于自然科学与工程科学有关的空间数据处理中^[10]。数学形态学的分支较多,其中,灰度形态学在遥感图像滤波、图像分割、纹理分析及粒度分析等方面有着广泛的应用。

在图像分割过程中,为了既保证不丢失地物边缘信息,又能获得完整的区域分割结果,需要同时考虑图像边缘特征与区域特征。因此,提出一种基于数学形态学方法的混合分割新算法,即,在 K-L 变换的基础上,从主成分图像中分别提取边缘梯度特征以及图像对象内部的局部方差纹理特征,通过形态学强制最小技术,利用图像对象标记修改边缘梯度图像,完成标记控制的分水岭分割。

3.2 梯度信息的提取

基于数学形态学的边缘特征提取优于基于微分算子的边缘提取算法,它不像微分算子对噪声那样敏感,提取的边缘也比较圆滑^[11]。许多数学形态学边缘检测算子通过计算图像中局部小区域的差分来工作,常用的数学形态学梯度算子如下:

$$G(f) = (A \oplus B) - (A \ominus B) \quad (1)$$

式中,符号 $\oplus$ 和 $\ominus$ 分别表示膨胀与腐蚀运算, B 为结构元素 SE。

式 (1) 是单一尺度的形态学梯度算子。由于 SE 是数学形态学运算的核心,其形状和大小直接影响形态学运算的输出结果。采用小的 SE,能检测到比较精细的边缘,但对噪声比较敏感;采用大的 SE,能消除图像中的噪声,但最终生成的边缘比较粗^[6]。在图像边缘检测过程中,采用不同尺寸 SE,

可以充分考虑图像对象的多尺度特性;采用不同方向 SE,便于保留图像对象边缘的方向性信息;因此,本文采用这两种 SE,从 PC1 中提取边缘梯度特征。

首先,利用平坦的不同尺寸的 SE 提取图像的多尺度形态学梯度^[12]:

$$MSG(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [((PC1 \oplus B_i) - (PC1 \ominus B_i)) \ominus B_{i-1}] \quad (2)$$

式中, B_i ($0 \leq i \leq n$) 表示大小为 $(2i+1) \times (2i+1)$ 的一组结构元素, n 是尺度。

然后,考虑到遥感图像对象边缘在不同方向上的异质性,采用一组由 5×5 像素构成的 8 个方向的平坦结构元素进行多方向边缘检测,多方向梯度算子的形式如下:

$$MDG(f) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 [((PC1 \oplus B_i) - (PC1 \ominus B_i)) \ominus B_i] \quad (3)$$

最后,将多尺度梯度和多方向梯度的加权和作为结果梯度图像 $Final_Grad$ 。研究发现,在提取结果梯度图像的过程中,不论是对多尺度梯度和多方向梯度取极大值,还是在多方向梯度计算中取极大值,图像分割的结果会出现比较严重的过分割现象。主要原因在于取极大值会使结果梯度图像中产生更多的局部伪极小值,从而导致严重的过分割问题。

3.3 图像对象的标记

由于图像中的噪声、地物表面细微的变化,都会导致过分割。通常采用 2 种策略消除过分割问题:一是在图像预处理阶段,通过消除图像中的噪声和无关边缘,防止过分割的发生,如标记^[13]、滤波^[14]、轮廓动力学^[15]等方法;另一种是在图像后处理过程中,采用一定的合并准则,合并初始分割产生的过分割区域^[16-17]。其中,标记是一种控制过分割的有效方法,其目的是通过数学形态学图像简化方法获取图像中对应每个对象 (objects) 的内部同质区域。

较完整的图像对象内部标记定义^[18]为: (1) 被更高“海拔”点包围起来的区域; (2) 区域中的点组成连通分量; (3) 所有属于这个连通分量的点具有相同的灰度级值。在分割时,通过限制允许的局部极小值的范围,获取有效的分割结果。一般情况下,可以通过图像特征检测手段获取图像的标记,这些特征可以是图像的局部极值、平坦的区域和纹理一致的区域等^[19]。因此,可以将标记看作图像对象内部的局部同质极小值区域。在标记提取过程中,先通过数学形

态学滤波, 估计图像对象间的差异^[20], 获取对象内部的同质区域; 再从对象间差异图像提取局部方差统计特征, 通过设定阈值, 标记图像对象。

数学形态学滤波是一种非线性滤波。由于数学形态学运算对 SE 的尺寸和形状敏感, 必须选择合适的 SE。为了能有效地提取图像对象内部的标记, 同时消除图像噪声, 分别采用两种 SE 进行滤波。一种是大小为 3×3 的方形 SE, 另一种是一组 20 个方向的长度为 5 的线性 SE, 由此产生 4 种滤波器: $\gamma_{3 \times 3}$, $\phi_{3 \times 3}$, γ_5 和 ϕ_5 。开操作 $\gamma_{3 \times 3}$ 用于消除面积小于 3×3 像元的亮细节, 而闭操作 $\phi_{3 \times 3}$ 用于消除面积小于 3×3 像元的暗细节; 相应的, 开操作 γ_5 用于消除长度小于 5 个像元的亮细节, 闭操作 ϕ_5 用于消除长度小于 5 个像元的暗细节。因此, 估计对象间差异图像 B 的算法如下:

$$B = (PC \vee \phi_{3 \times 3} \gamma_{3 \times 3} \phi_5 \gamma_5 (PC)) \wedge \gamma_{3 \times 3} \phi_{3 \times 3} \gamma_5 \phi_5 (PC) \quad (4)$$

式中, $\vee$ 和 $\wedge$ 分别表示逐像元地取最大值和取最小值操作。

经过数学形态学滤波后, 对象内部的变异更小, 接近同质区域, 而对象间的亮度差异更大。为了有效标记每个图像对象, 需要进一步提取对象内部的极小值区域。将对象内部变异极小的区域作为对象的标记。采用一个 3×3 的滑动窗计算对象内部的局部变异信息, 获得局部方差统计特征图像 I_{LVAR} 。再采用数学形态学扩展最小变换, 将变异小于阈值 th 的相邻像素集合确定为标记, 具体算法为:

$$\text{Marker} = \text{ME}(I_{\text{LVAR}}, th) \quad (5)$$

3.4 标记控制的分水岭分割

测地形态学是数学形态学的一个分支。分水岭变换 (watershed transform) 将测地理论的集合运算推广到灰度图像处理领域^[21], 基本思想是将图像看作是一种测地学上的地形表面, 图像中每个像元的亮度值表示该点的海拔高度, 每个局部极小值及其影响的区域称为集水盆地。假设在每个区域最小值处打一个洞, 并且让水以均匀的速率从洞中涌出, 由低到高淹没整个地形。当处于不同集水盆地的水将要聚合在一起时, 修建大坝阻止聚合。这些大坝就是分水岭变换要提取的区域边界线, 集水盆地则是我们想要识别的对象^[18]。

在一般的分水岭分割过程中, 受图像噪声和量化误差的影响, 图像中会存在大量的伪极小值, 它们在图像中产生相应的伪集水盆地, 因此, 伪局部

极小值将和那些真正的局部极小值一起被作为一个独立的区域通过分水岭算法分割出来, 最终造成过分割问题^[22]。标记控制的分水岭是一种典型的混合分割算法, 它将基于边缘的梯度提取和种子区域生长算法有机地结合在一起, 不仅能较好地控制过分割与欠分割, 而且还能获得连续的单像素宽度的边缘, 因而在图像分割领域得到了广泛应用。

在获得梯度图像并对图像对象进行标记之后, 数学形态学强制最小过程被用来修改结果梯度图像 (Final Grad), 将提取的标记 (Marker) 强制作为梯度图像的局部极小值, 而屏蔽梯度图像中的局部极小值。修改后的梯度图像中, 只有对应标记不为零的地方有局部极小值。修改后的梯度图像用 Grad_c 表示, 有:

$$\text{Grad}_c = \text{MMN}(\text{Final Grad Marker}) \quad (6)$$

最后, 对修改后梯度图像执行分水岭变换, 获得最终的图像分割结果 WS 用 WST 代替分水岭变换, 则有:

$$WS = WST(\text{Grad}_c) \quad (7)$$

4 结果分析

利用数学形态学方法, 从 PC1 中提取边缘梯度, 分别从 PC1 和 PC2 提取图像对象标记, 进行图像分割实验, 结果发现采用 PC1 提取的标记分割图像时, 能获得更为理想的分割结果, 见图 2(c)。可以看出, 标记控制的分水岭分割较好地解决了过分割与欠分割问题。在分割过程中, 阈值 th 是唯一需要调整的参数, 进一步分析阈值 th 对图像分割效果的影响。研究发现, 当阈值 $th = 2.5$ 时, 区域数为 2161 个, 分割出的区域与图像对象的边界具有良好的对应关系, 如厂房、河流、道路和桥等地物的边界比较完整, 分割效果较好; 若 th 设置得太小, 过分割问题较严重, 欠分割尚不突出, 分割出的区域较破碎, 且数目较多; 当 th 逐渐增大时, 过分割问题明显好转, 但欠分割问题更为严重, 区域数明显减少。分割区域数随 th 的变化如图 3。因此, 在遥感图像的分割研究中, 不仅应注意解决过分割, 还应该尽可能避免欠分割。一个理想的遥感图像分割策略, 应该很好地兼顾过分割与欠分割问题, 并在这二者间寻找到一个最佳平衡点, 获得有意义的分割。此外, 直接应用结果梯度图像进行分水岭分割, 结果如图 2(d)。仅采用结果梯度图像进行分割, 过分割问题非常严重, 获得的区域数达 9594 个之多, 分割出的区域极为破碎。

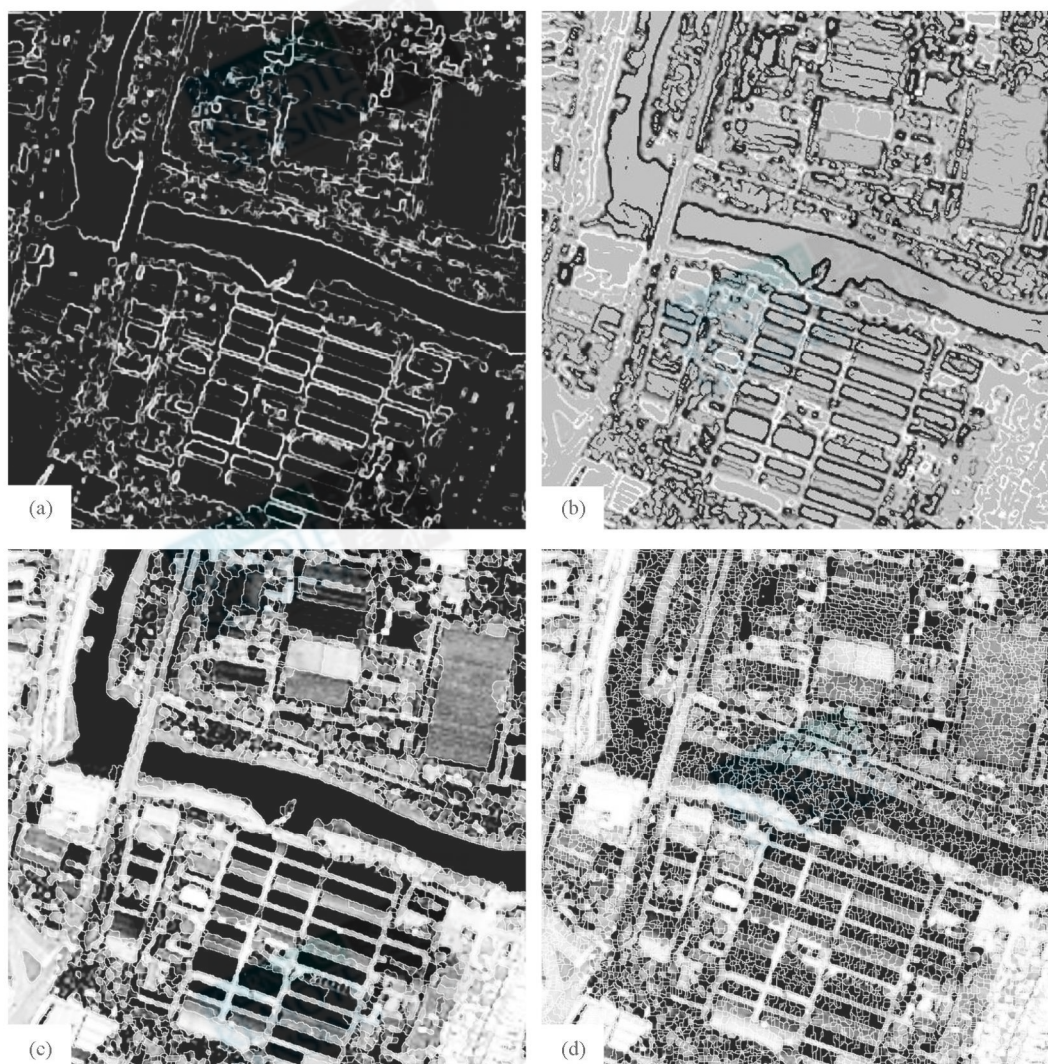


图 2 KONOS 图像分割结果

(a) 结果梯度图像; (b) 图像对象的标记; (c) 标记控制的分水岭分割结果 ($th=2.5$);

(d) 仅采用结果梯度图像的分水岭分割结果

Fig. 2 Segmentation results of KONOS data

(a) final gradient image; (b) markers of image objects

(c) segmentation result of the marker controlled watershed ($th=2.5$);

(d) segmentation result of the final gradient based watershed

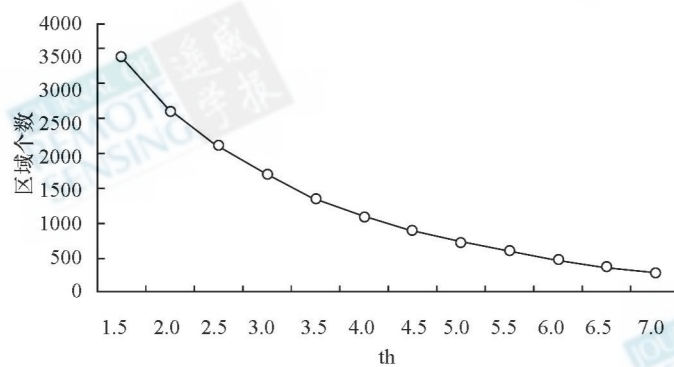


图 3 阈值 (th) 对标记控制的分水岭分割区域数的影响

Fig. 3 Influence of the threshold (th) on the number of regions segmented by using the marker controlled watershed

5 结论与讨论

本文在 K-L 变换基础上, 从图像数据降维、信息归并与分离、去相关等的角度出发, 利用数学形态学滤波及标记控制的分水岭分割算法, 研究和探讨了高分辨率多光谱图像的分割问题。研究结果表明:

(1) 结合了图像边缘特征和纹理特征的标记控制分水岭分割方法, 与仅利用图像边缘特征的分水岭分割算法相比, 更适合 KONOS 多光谱图像的分割。而且, 该方法能有效地克服过分割与欠分割问题, 并在过分割与欠分割之间获得较好折中。

(2) 利用数学形态学多尺度多方向梯度算子提取图像边缘特征, 充分考虑图像对象的多尺度特性和对象边缘的方向特性, 最大程度地保留了图像对象的边缘信息。同时, 将图像局部方差统计特征作为纹理信息引入图像对象的标记过程, 方法简单有效。

(3) 采用 K-L 变换不仅能有效地降低多光谱数据的维数, 达到去相关、归并与分离信息的目的, 而且对主成分图像进行分割, 用比原图像少的信息就能获得满意的分割效果, 运算效率也得到明显提高。

本文提出的分割算法主要考虑了高分辨率多光谱遥感图像的光谱信息和纹理信息, 将引入其他图像信息进一步改进分割算法并评价图像分割结果, 将是下一步的研究内容。

参考文献 (References)

- [1] Gong P, Li X, Xu B. Interpretation Theory and Application Method Development for Information Extraction from High Resolution Remotely Sensed Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 1—5 [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 [J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 1—5]
- [2] Schiewe J, Tufte L, Ehlers M. Potential and Problems of Multiscale Segmentation Methods in Remote Sensing [J]. *GIS-Zeitschrift für Geoinformations Systeme*, 2001, 6(1): 34—39
- [3] Pesaresi M, Benediktsson J A. A New Approach for the Morphological Segmentation of High-resolution Satellite Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(2): 309—320
- [4] Tateyama T, Nakao Z. Segmentation of High Resolution Satellite Images by Direction and Morphological Filters [A]. *IEEE Proceedings of the Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems* [C]. 2004
- [5] Chen Q X, Chen S P, Zhou C H. Segmentation Approach for Remote Sensing Images Based on Local Homogeneity Gradient and Its Evaluation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3): 357—365 [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 [J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 357—365]
- [6] Li P J, Xiao X B. Evaluation of Multiscale Morphological Segmentation of Multispectral Imagery for Land Cover Classification [A]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C]. 2004, 4: 2676—2679
- [7] Xu B X, Bai X B, Fu X Y. Mathematical Transform and Estimation Method in Signal Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 [徐伯勋, 白旭滨, 傅孝毅. 信号处理中的数学变换和估计方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004]
- [8] Zhang X C, Huang Z C, Zhao Y H. Remote Sensing Digital Image Processing [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997 [章孝灿, 黄智才, 赵元洪. 遥感数字图像处理 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997]
- [9] Cui Y. Image Processing and Analyzing Mathematical Morphological Methods and Applications [M]. Beijing: Science Publishing House, 2000 [崔屹. 图像处理与分析: 数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000]
- [10] Soille P. Morphological Operators [J]. *Handbook of Computer Vision and Applications*, 1999, 2(21): 627—682
- [11] Ruan Q Q. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2001 [阮秋琦. 数字图像处理学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001]
- [12] Wang D. A Multiscale Gradient Algorithm for Image Segmentation Using Watershed [J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(12): 2043—2052
- [13] Meyer F, Beucher S. Morphological Segmentation [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1990, 1(1): 21—46
- [14] Jackway P. Gradient Watershed in Morphological Scale-space [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(6): 913—921
- [15] Najman L, Schmitt M. Geodesic Saliency of Watershed Contours and Hierarchical Segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(12): 1163—1173
- [16] Haris K, Efstratiadis S N, Maglaveras N, Katsaggelos A K. Hybrid Image Segmentation Using Watershed and Fast Region Merging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(12): 1684—1699
- [17] Bleau A, Leon L J. Watershed-based Segmentation and Region Merging [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 77(3): 317—370
- [18] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. 2003 [冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理第二版 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003]
- [19] Soille P. Morphological Image Analysis Principles and Applications [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1999
- [20] Evans C, Jones R, Svalbe I et al. Segmenting Multispectral Landsat TM Image Into Field Units [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(5): 1054—1064
- [21] Vincent L, Soille P. Watershed in Digital Space: An Efficient

- Algorithm Based on Immersion Simulations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13** (6): 583—598
- [22] Gao L, Yang S Y, Xia J *et al*. A New Marker-based Watershed Algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34** (11): 2018—2023 [高丽, 杨树元, 夏杰等. 基于标记的 watershed 图像分割新算法 [J]. 电子学报, 2006, **34** (11): 2018—2023]

Mathematical Morphological Segmentation of KONOS Multispectral Data

XU Chun-yan^{1,2}, FENG Xue-zhi¹, ZHAO Shu-he¹, XIAO Peng-feng¹

(¹ Department of Geographical Information Sciences, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China;

² Xinjiang Oil Transportation Division, China Petroleum West Pipeline Co., Ltd, Xinjiang Urumqi 830063, China)

Abstract Image segmentation has been an important research area in image analysis and interpretation. An ideal segmentation strategy of remotely sensed data should consider problems of over-segmentation and under-segmentation simultaneously and find a good tradeoff between them. In this paper, image segmentation for KONOS multispectral data is investigated by using techniques of mathematical morphology, and a novel hybrid segmentation algorithm is proposed by combining both edge and texture features of images. Based on the K-L transform of multispectral data, edge features are detected by morphological multiscale and multidirection gradient algorithms, and image objects are marked through morphological filtering and local variance features extracting. Finally, the marker controlled watershed algorithm is implemented. The results indicate that the performance of the proposed algorithm is superior to the gradient based watershed segmentation. Moreover, this approach is more suitable for high resolution remotely sensed data to overcome over-segmentation and under-segmentation problems effectively.

Key words image segmentation; mathematical morphology; marker controlled watershed segmentation; high resolution multispectral remotely sensed data