

# 基于形态学梯度重构的高分辨率遥感影像分割方法

蒋 圣, 汪 闽, 张星月

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

[摘要] 基于形态学梯度重构提出一种用于高分辨率遥感影像的分割方法. 针对遥感图像的特点构建多形状结构元素, 然后使用该结构元素对图像提取形态学梯度并进行开闭重构; 根据人的视觉特征, 对梯度的高对比度区域进行还原, 用于保证较高的局部对比度; 最后使用浸没式分水岭变换获得分割结果. 对 IKONOS 影像进行分割实验, 结果表明了该方法的有效性.

[关键词] 形态学梯度, 开闭重构, 分水岭变换, 高分辨率遥感影像

[中图分类号] TP751 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2008)04-0129-05

## Segmentation of High-resolution Remote Sensing Image Based on Morphological Gradient Reconstruction

Jiang Sheng Wang Min Zhang Xinyue

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210046, China)

**Abstract** A method of segmentation of high-resolution remote sensing image based on morphological gradient reconstruction is proposed. In this algorithm, the multi-shape structure elements are constructed according to the characteristics of remote sensing image. Then morphological gradient image is obtained by utilizing multi-shape structure elements. Opening and closing operations of reconstruction are employed to gradient image. According to the characteristic of human vision, regions with high contrast are recovered for saving the high local contrast information of the gradient image. At last, we get the final results by immersion simulation watershed transform. Experiments have been implemented to IKONOS images and the results show good performance of this segmentation method in quality.

**Key words** morphological gradient, opening and closing operation of reconstruction, watershed transform, high-resolution remote sensing image

随着 KONOS、QuickBird 等高分辨率遥感卫星的相继发射, 遥感影像的空间分辨率得到了极大的提升, 地物的形状结构和纹理信息变得十分丰富. 面向对象遥感影像分析方法应运而生, 而图像分割则是该方法的首要环节.

图像分割是把图像空间划分成有意义区域的过程<sup>[1]</sup>. 一般图像分割都是基于像素亮度值的两个基本特性: 不连续性和相似性. 前者如边缘检测、边缘生长等, 后者如阈值分割、分裂合并、区域增长等<sup>[2]</sup>. 基于梯度的分水岭变换相对于其它分割方法有着突出的优点: 对弱边缘敏感, 可以得到连通且密闭的边界, 适合高分辨率遥感影像的分割.

典型的分水岭变换是基于浸没模拟 (immersion simulation), 其 FIFO 的快速算法由 Vincent 和 Soille 提出<sup>[3]</sup>. Meyer 和 Beucher 则广泛地将分水岭变换应用于很多其它领域<sup>[4]</sup>. 分水岭变换一般是在梯度幅度图上进行的, 具对弱边缘敏感的特点, 也为其带来了过分割这一缺陷. 目前研究中, 解决分水岭变换的过分割现象主要有两类方法: 一类属于后处理, 针对分水岭变换后的结果, 根据某种准则, 进行区域合并. 另一类属于预处理, 对需要分割的图像进行平滑、图像亮度值量化等. 文献 [5] 提出了使用微分形态学断面进行遥感影像分割, 在得到丰富细节的同时也造成了过分割; 文献 [6] 使用连续开闭重构进行滤波, 使用逐渐

收稿日期: 2008-03-12

基金项目: 国家“863”课题 (2007AA12Z224, 2006AA12Z146)、南京师范大学引进人才启动基金 (2006105XGQ0035) 资助项目.

通讯联系人: 汪 闽, 博士, 副教授. 研究方向: 遥感信息提取、空间数据挖掘. E-mail: sysj0918@126.com

增大的结构元素反复开闭重构,在获得改进效果的同时需要付出额外的计算代价.

本文针对高分辨率遥感影像的特点,选取合适的多形状结构元素进行组合,提取了针对性的形态学梯度,保证了后续分割的准确;使用开闭重构滤波进行梯度平滑,保留了图像主体轮廓;根据人眼特点,把与周围有高对比度的梯度区域进行恢复,叠合到开闭重构滤波后的梯度图像中,最后使用分水岭变换对该梯度进行分割,得到结果;分割实验结果显示了该方法的有效性.

# 1 实验方法

## 1.1 使用多形状结构元素提取形态学梯度

数学形态学的基本思想是用具有一定形态的结构去度量和提取图像中的对应形状,针对图像的一系列形态学操作<sup>[7]</sup>,定义如下:

(1) 图像  $f$  被结构元素  $b$  的形态学腐蚀:

$$(f \ominus b)(x, y) = \min\{f(x + i, y + j) - b(i, j) \mid (x + i, y + j) \in D_f, (i, j) \in D_b\}.$$

(2) 图像  $f$  被结构元素  $b$  的形态学膨胀:

$$(f \oplus b)(x, y) = \max\{f(x + i, y + j) + b(i, j) \mid (x + i, y + j) \in D_f, (i, j) \in D_b\}.$$

(3) 图像  $f$  被结构元素  $b$  的形态学开运算:

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b.$$

(4) 图像  $f$  被结构元素  $b$  的形态学闭运算:

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b.$$

(5) 使用结构元素  $b$  对图像  $f$  提取腐蚀膨胀型梯度  $g$

$$g = (f \oplus b) - (f \ominus b).$$

其中,  $f(x, y)$  表示图像  $f$  在坐标  $(x, y)$  处的亮度值,  $b(x, y)$  表示结构元素在坐标  $(x, y)$  处的值,  $D_f$  和  $D_b$  分别表示图像  $f$  和结构元素  $b$  的空间坐标范围. 腐蚀和膨胀的公式实现类似于空间卷积的处理, 腐蚀类似于最小值滤波, 膨胀则类似于最大值滤波. 基于膨胀和腐蚀组合的开运算则可用于填平图像中小于结构元素尺度的谷, 闭运算可用于削平图像中小于结构元素尺度的峰. 腐蚀膨胀型梯度可以使得正负脉冲噪音都得到抑制.

结构元素的形状和大小是形态学操作的关键所在. 不同形态和大小的结构元素将具有不同的特点. 高分辨率遥感影像具有很高的空间分辨率, 地物的形状结构和纹理信息十分丰富. 根据以上特点, 要求选取相应结构元素. 本文设计多结构元素如图 1 所示.

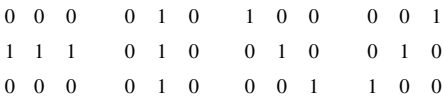


图 1 多形状结构元素  
Fig. 1 Multi-shape structure elements

图 1 中分别使用以上 4 个形态结构元素对图像提取腐蚀膨胀型梯度  $g_i$ , 再将所得梯度进行累加, 得到梯度.

以上 4 个结构元素, 采用了空间线状结构元素, 并针对  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  方向的梯度进行有针对性的提取, 适用于高分辨率遥感影像的图像特点. 能够提供更为规整的梯度形状. 使用  $3 \times 3$  窗口大小范围, 则避免了过多带入椒盐噪音和随机噪音.

图 2a 为关于厂房的原图, 图 2b 是根据  $3 \times 3$  正方形结构元素所提取的梯度图. 正方形结构是对称结构元素, 可以兼顾各个方向的边缘, 但同时削弱了图像边缘对于某一特定方向的敏感性; 图 2c 是使用了  $5 \times 5$  窗口大小的 8 方向的线状结构元素:  $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $112.5^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $157.5^\circ$ , 结果显示, 梯度幅度值在 8 方向上经多次叠加后明显加强. 然而, 这却会导致梯度定位不准, 造成梯度偏移. 而  $5 \times 5$  窗口大小的 4 方向的线状结构元素则又会对非直线型边缘定位不准. 图 2d 显示的是图 1 所述的四结构元素组合梯度的结果图, 主要轮廓清晰、平直, 更符合高分辨率图像的处理要求.

## 1.2 开闭重构滤波

不同图像分析问题都是在一个特定的空间尺度下进行的<sup>[8]</sup>, 所需分割图斑的尺寸也需要随之改变. 多分辨率分割的目的就是按照某种需要, 分割出相应大小的区域. 所以需要设置一个尺度参数, 可以用于控制图像斑块的平均尺寸.

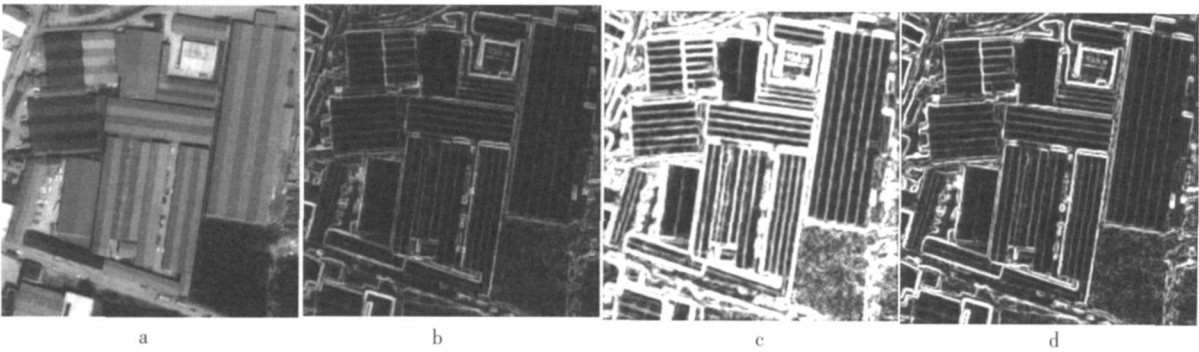


图 2 不同结构元素所提取的梯度图

Fig.2 Gradient images from different structure elements

分水岭变换一般都是在梯度图上完成的. 然而本文 1. 1 节中所提取的形态学梯度还不能直接应用于分水岭变换, 原因是分水岭变换对于所有弱边缘都非常敏感, 即便微小的梯度也能被划分, 直接分割将导致大量无意义区域的产生. 利用开闭重构, 可以有效去除图像噪声, 保留主体. 同时, 通过控制结构元素空间尺寸的大小, 得到不同分辨率的梯度, 用于不同问题分析的需要.

梯度重构是涉及到两幅图像和一个结构元素的形态学变换. 一幅是标记图 (marker), 用来作为变换的起点; 另一幅是掩模 (mask), 用于约束变换过程. 设  $g$  为掩模图像,  $m$  为标记图像, 则从  $m$  重构  $g$  记为  $R_g(m)$ , 其迭代过程为:

- (1) 将  $h_1$  初始化为标记图像  $m$ , 并使  $k = 1$ .
- (2)  $h_{k+1} = (h_k \odot B) \cap g$ , 如果  $h_{k+1} = h_k$  则结束, 输出  $h_k$ ;
- (3) 使  $k = k + 1$  返回第 (2) 步.

针对梯度的开闭重构, 根据改变结构元素空间尺寸可以获得不同平滑程度的梯度, 其步骤如下:

- (1) 读取初始形态学梯度  $g$  并设定形态元素结构  $b$  大小.
- (2) 使用  $b$  结构元素, 对梯度图  $g$  进行开运算, 得到  $g_{op}$ .
- (3) 使用  $b$  结构元素, 以梯度  $g$  为掩模, 以  $g_{op}$  为标记进行重构, 得到开重构梯度  $g_{op\_reco}$ .
- (4) 使用  $b$  结构元素, 对开重构梯度  $g_{op\_reco}$  进行闭运算, 得到  $g_{cl}$ .
- (5) 使用  $b$  结构元素, 以梯度  $g_{op\_reco}$  为掩模, 以  $g_{cl}$  为标记进行重构, 得到开闭重构梯度  $g_{resulb}$  输出该梯度.

传统的开闭运算只能去除图像中的部分高值和低值, 开闭重构则可以完全去除小于结构元素尺度的高值和低值, 或者完全保留这些细节, 因而可以获得形状不发生畸变的平滑图像. 而结构元素尺度对梯度的平滑效果有很大影响, 尺度越小, 平滑程度越低, 对细节的保留越多; 尺度越大, 平滑程度越高, 对细节的保留越少. 本文使用  $6 \times 6$  的正方形结构元素.

1. 3 还原高对比度梯度

评判分割技术好坏的一种方式是用肉眼观察. 而局部对比度是肉眼判断的最重要标志. 但是, 如本文 1. 2 节所述, 由于开闭重构具有对尺度小于结构元素的梯度的完全去除功能, 使得梯度幅值的对比度在局部并非最优. 如图 3 所示, a 区虽然与邻接区域的对比度较高, 但由于尺度小于结构元素尺寸而仍然被完全去除, 而根据人眼要求, a 区是应该得到保留的. 因此在分割前, 有必要恢复具有一定大小, 且梯度幅值差较高的梯度区域.



图 3 梯度图  
Fig.3 Gradient image



图 4 开闭重构后的图  
Fig.4 Image processed by opening and closing operation  
of reconstruction

在此, 本文使用  $h$  极小值变换, 用于还原高对比度梯度:

- (1) 读取梯度图  $g$ , 设定高度阈值  $h$ ;

(2) 对梯度图  $g$  整体减去  $h$ . 如果像素值为负, 则设该点像素值为 0 得到梯度图  $g_1$ ;

(3) 以  $5 \times 5$  的正方形为结构元素, 以  $g_1$  为标记,  $g$  为掩模进行梯度重构, 得到了只保留梯度幅值差高于  $h$  值的梯度图.

在此, 使用  $5 \times 5$  的正方形为结构元素, 是为了避免还原区域面积过小的梯度. 所得到的梯度图平滑了相邻梯度差较小的区域, 而对相邻梯度差较大的区域, 则完整保留. 至此, 已经提取出经过开闭重构的梯度图  $g_1$  和高对比度区域的梯度图  $g_2$ , 对两幅梯度图分别进行归一化后相加  $g = g_1 + g_2$ , 得到最终用于分水岭变换的梯度图  $g$ .

### 1.4 分水岭变换

典型的水分水岭变换是基于地形淹没模拟的思想而实现的<sup>[9-10]</sup>. 将图像看成是地形表面, 图像中每一个极小值代表了一个集水盆地, 设想在每一个局部极小值处开一个小孔, 将地形表面沉浸在水中. 于是, 水开始填充所有的集水盆地, 即那些极小值位于水平面下的集水盆地. 在进一步沉浸时, 如果两个集水盆地将要交汇, 就在要交汇处建起高达最高表面高程的堤坝, 此处堤坝就是分开盆地的分水岭线. 重复上述过程直到整个图像浸入水中, 分割即告完成, 而分水岭所围合的盆地就是分割单元.

## 2 实验结果分析

本文使用的实验数据为南京城区的 KONOS 影像. KONOS 影像有蓝、绿、红和近红外 4 个多光谱波段, 空间分辨率为 4m; 另有全色波段, 空间分辨率为 1m; 本文选取后者.

为了考察本文方法的分割性能, 在 KONOS 图像上裁切复杂地图像来进行实验, 图像大小为  $372 \times 321$ , 图中存在的地物有直线型和弧线型立交桥, 用来考察算法的线状地物的分割性能; 右部是纹理丰富的区域, 有停车场和体育中心, 右下方则是植被丰富的区域.

在 2 幅结果图中, 都是使用  $6 \times 6$  的正方形结构元素进行开闭重构滤波. 图 5 采用了  $3 \times 3$  的正方形结构元素提取形态学梯度, 获得了对各个方向都兼顾的梯度, 然后进行开闭重构滤波, 最后进行分水岭变换. 从分割后的结果图来看, 分割边缘不够光滑平直, 特别在道路的提取上可以看出. 另外, 图右边的分割区域内部也不够均一; 图 6 是采用本文方法得到的结果. 其分割边缘较之图 5 更为光滑, 道路区域的内部也分割得更为均一. 对于图像右下角的植被区域, 分割边缘更加准确和完整. 又由于还原了高对比度区域, 可以明显看到, 在没有引入噪音的情况下, 图右上方具有较高对比度的地物轮廓被完整的保存了下来, 体育中心的屋顶也分割的更好. 在保证分割尺度较大的情况下, 得到了更为符合人眼要求的分割结果.

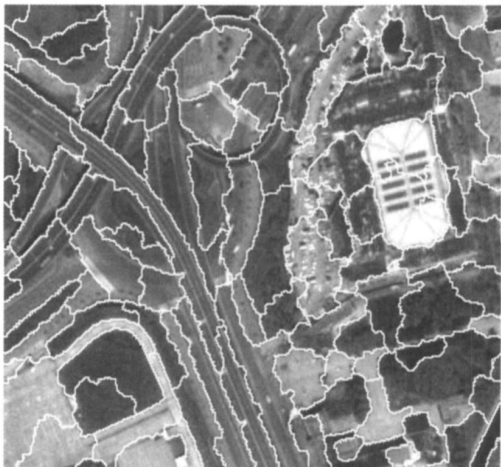


图 5 使用正方形结构元素的结果图

Fig.5 Result image by utilizing square of reconstruction structure element



图 6 使用本文方法的结果图

Fig.6 Result image by method of this paper

## 3 结论与讨论

本文基于形态学方法, 对高分辨率遥感影像进行了分割实验, 得到了以下结论:

(1) 针对高分辨率遥感影像的特点,使用多形状结构元素组合所提取的梯度比单结构元素更适合高分辨率遥感影像.

(2) 使用具有一定空间尺度的结构元素进行开闭重构滤波,有效去除噪音的同时,完整保留主体轮廓.对平滑后的梯度进行分水岭分割,可以得到令人满意的分割结果.

(3) 针对人眼特点,在梯度图上还原具有较高对比度的梯度,提高了局部对比度,使分割结果更加符合人眼要求.

在本算法中,对于块状地物仍有一部分错分.在下一步的工作中,应该针对形态学梯度的内部均一性做出改进;结构元素的尺度和对比度的高度阈值的设定,是根据经验和实验得到的最佳效果而确定的,并没有达到真正意义上的分割自动化,在将来的工作中,希望能够通过区域内部一致性和邻域异质性来进行自动判断,最终达到完全自动化.

#### [参考文献]

- [1] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [2] 肖鹏峰, 冯学智, 赵书河, 等. 基于相位一致的高分辨率遥感图像分割方法[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 146-151.
- [3] Vincent L, Soille P. Watershed in digital spaces an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Trans Patt Anal and Mach Int, 1991, 13(6): 583-598.
- [4] Meyer F, Beucher S. Morphology segmentation[J]. Visual Comm and Image Representation, 1990 1(1): 21-46.
- [5] 纪松, 张一鸣, 龚辉. 一种基于数学形态学的遥感影像分割方法[J]. 测绘工程, 2007, 16(4): 33-40.
- [6] 赵于前, 柳建新, 刘剑. 基于形态学重构运算的医学图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 238-240.
- [7] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] Fukunaga K, Hostetler L D. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition[J]. IEEE Trans Info Theory, 1975, 21: 32-40.
- [9] 陈波, 张海静, 陈亮. 标记分水岭算法及区域合并的遥感图像分割[J]. 国土资源遥感, 2007(2): 35-38.
- [10] 高丽, 杨树元, 李海强. 一种基于标记的分水岭图像分割新算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 1 025-1 030.

[责任编辑: 孙德泉]