

结合相位一致和分水岭变换的高分辨率 遥感影像分割方法

陈 洋^{1,2}, 范荣双², 王竞雪¹, 吴增林¹

¹ 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;

² 中国测绘科学研究院, 北京 100830

摘要 针对噪声导致高分辨遥感影像分割存在过分割或者欠分割的问题, 提出结合相位一致和分水岭变换的高分辨率影像分割方法。该方法首先采用基于光谱相似性的相位一致的模型方法来获得边缘响应幅度, 再采用自动标记分水岭算法对影像进行分割; 基于相邻分割对象的空间位置、形状、面积等特征多重约束, 提出相邻分割对象合并代价函数模型, 对分割结果进行优化并获取最终分割结果。选择典型地区实验影像进行分割实验, 通过目视评价和监督评价, 并与典型分割方法进行比较, 验证所提分割方法的有效性。

关键词 遥感; 高分辨率遥感影像; 相位一致性; 分水岭变换; 影像分割

中图分类号 P23 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.092803

Segmentation of High-Resolution Remote Sensing Image Combining Phase Consistency with Watershed Transformation

Chen Yang^{1,2}, Fan Rongshuang², Wang Jingxue¹, Wu Zenglin¹

¹ *Institute of Surveying and Geographic Science, Liaoning Technology University, Fuxin, Liaoning 123000, China;*

² *Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China*

Abstract In consideration of the problem of over-segmentation or under-segmentation in high-resolution remote sensing image segmentation that the noise leads to, a high-resolution image segmentation method with phase consistency and watershed transformation is proposed. Firstly, the phase-consistent model method with spectral similarity is adopted to obtain the edge response amplitude, and then the automatic marker watershed algorithm is adopted to segment the image. Based on the multiple restrictions for the features, such as spatial position, shape and area of adjacent segmentation objects, adjacent segmentation object merging cost function model is proposed to optimize the segmentation result and obtain the final segmentation result. Experimental images of the typical area are selected for the segmentation experiment. The effectiveness of the proposed method is verified by visual evaluation, supervision evaluation and comparison with the typical segmentation methods.

Key words remote sensing; high resolution remote sensing image; phase consistency; watershed transformation; image segmentation

OCIS codes 280.4750; 000.6800; 100.3008; 100.2960

收稿日期: 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(41101452)、高等学校博士学科点专项科研基金(20112121120003)、辽宁省教育厅科研项目(LJYL010)

作者简介: 陈 洋(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感影像分割、地物信息智能提取等方面的研究。

E-mail: 874153187@qq.com

导师简介: 范荣双(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事遥感与地理信息技术应用等方面的研究。

E-mail: 13621051775@163.com

1 引言

伴随着 WordView、IKONOS 等高分辨率遥感卫星的出现,高分辨率遥感影像已成为重要的地理空间信息主要来源之一^[1]。然而基于像元分类的传统算法难以从高空间分辨率遥感数据中提取所需的信息,使得面向对象的高分辨率遥感影像处理方法得到不断发展^[2]。影像分割是高分辨率遥感影像信息提取和面向对象分类的关键一步^[3]。

近年来,许多国内外学者将分水岭算法引入遥感影像分割领域,并且在高光谱影像、多光谱影像和高分辨率影像的分割取得较好的结果^[4-5]。肖鹏峰等^[6]提出基于相位一致的高分辨率遥感图像分割方法,虽然该分割方法对边缘信息具有很好的检测效果,但在高分辨率遥感影像中地物类型复杂,也会产生噪声和伪边缘,导致分割结果存在过分割和欠分割现象。王珂等^[7]提出结合光谱相似性与相位一致模型的高分辨率遥感图像分割方法,虽然该分割方法结合高分辨影像光谱信息,但是没有利用高分辨率纹理、空间等特征,导致分割结果存在过分割现象。遥感图像分割方法分水岭算法依赖于图像边缘响应幅度,当相邻不同地物的光谱差异较小时,会导致分水岭算法分割的结果与地物真实边界差异较大^[8-10]。

针对目前的问题,本文提出结合相位一致和分水岭变换的高分辨率影像分割方法。首先采用基于光谱相似性的相位一致的模型方法来获得边缘响应幅度,其目的是减少由相位一致模型边缘检测产生的噪声和伪边缘,再采用自动标记分水岭算法对影像进行分割。鉴于高分辨率遥感影像地物关系复杂,会使得分割结果相邻区域可能属于同一类,因此对分割结果进行优化是非常有必要的。本文结合两个相邻空间区域位置、形状、光谱等特征多重约束,提出区域合并代价函数,来优化分割结果。最后采用目视评价和定量评价对分割结果进行评价。

2 影像分割方法

2.1 基于光谱相似性的相位一致性模型

相位一致的边缘检测算法是在假设各种边缘特征类型包括马赫带出现在傅里叶谐波分量叠合最大的相位处的基础上提出,Morrone 等^[11]发现相位信息在图像边缘特征处具有高度的一致性,并将相位一致定义为局部能量函数与幅度和的比值,可以表示为

$$V_{PC}(x) = \frac{|E(x)|}{\sum_n A_n(x)} = \text{Max}_{\varphi(x) \in [0, 2\pi]} \left\{ \frac{\sum_n A_n(x) \cos[\varphi_n(x) - \bar{\varphi}_n(x)]}{\sum_n A_n(x)} \right\}, \quad (1)$$

式中 $A_n(x)$ 表示第 n 个傅里叶谐波的幅度, $E(x)$ 为局部能量, $\varphi(x)$ 表示该傅里叶分量在 x 点处的局部相位, $\bar{\varphi}_n(x)$ 表示所有的傅里叶分量以幅度加权的平均局部相位。(1)式中 $V_{PC}(x)$ 取值在 0 到 1 之间,当 $V_{PC}(x) = 1$ 时,所有傅里叶分量都表现一致的相位。

因为图像是二维信号,在实际应用中往往采用 Log Gbor 模型,其特点是在对数尺度中的传递函数为高斯函数的滤波器,从而能更真实地反映自然图像的频率。因此本文采用基于 Log Gbor 的二维相位一致模型^[12],其表达式为

$$V_{PC}(x, y) = \frac{\sum_o \sum_n (x, y) \{A_{no}(x, y) [\Delta\varphi_{no}(x, y) - T]\}}{\sum_o \sum_n A_n(x, y) + \epsilon}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi_{no} = \cos[\varphi_n(x) - \bar{\varphi}_n(x)] - \sin[\varphi_n(x) - \bar{\varphi}_n(x)]$; 下标 o 指滤波器方向, n 表示滤波器尺度; T 为噪声估计,其作用是抑制噪声; ϵ 为常量,为了避免分母为零。

因为相位一致原理边缘检测对边缘梯度依赖较小,所以对地物边缘具有很好的检测效果,但在高分辨率遥感影像中地物类型复杂,该方法也会产生较多噪声和伪边缘,应用高分辨率影像的光谱特征优化来优化边缘检测结果是很有必要的。本文通过计算每个像元与相邻像元的光谱相似来优化边缘检测结果。因为兰氏距离对奇异值不敏感,可以很好地抑制噪声影响,在此基础上提出通过计算每个像元与相邻像元的兰氏距离之和建立光谱相似模型。

定义长度为 m 的两个光谱曲线分别为 X 和 Y , 则有 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ 和

$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\}$ 。两个光谱曲线的兰氏距离定义为

$$L_D(X, Y) = \sum_{i=1}^m \frac{|x_i - y_i|}{x_i + y_i} \quad (3)$$

设图像空间某点 Q , 坐标为 (x, y) , 根据(3)式定义影像光谱相似模型为

$$M_{\text{ISSM}} = \sum_{x', y' \in \delta} L_D [Q(x, y), Q'(x', y')] \quad (4)$$

式中 δ 为点 Q 领域; Q' 为 δ' 内任意某点, 坐标为 (x', y') 。

应用影像光谱相似的相位一致模型, 可以定义为

$$V'_{\text{PC}}(x, y) = V_{\text{PC}}(x, y) M_{\text{ISSM}}(x, y) \quad (5)$$

式中 $V'_{\text{PC}}(x, y)$ 是点 (x, y) 的相位一致值。

2.2 分水岭变换

分水岭变换是建立在自拓朴理论的数学形态学思想的基础上, 将输入影像理解是测地学上的拓朴地形, 将影像中所有像元的灰度值表示成相应点的海拔高度, 所有局部极小值及其影响区域视作集水盆, 而集水盆的边界称为分水岭^[13]。分水岭变换是一种能直接生成区域对象的图像分割方法, 它因具有边缘定位准确、运算简单及易于并行处理等优点而被图像处理领域广泛关注^[14]。

2.3 多重约束区域合并模型

由于高分辨率遥感影像地物关系复杂, 大量存在着影像过渡分割的现象, 因此对分割结果进行优化是非常有必要的。本文结合两个相邻空间区域位置、形状、面积等特征多重约束, 提出区域合并代价函数。定义 X 和 Y 为相邻区域, 区域合并代价函数为

$$f = \frac{L_X L_Y S_X S_Y}{L_{XY}^2 (S_X + S_Y)} + L_D(X, Y) \quad (6)$$

式中 S_X 、 S_Y 分别是区域 X 、 Y 的面积; L_X 、 L_Y 和 L_{XY} 分别是区域 X 、 Y 的周长以及公共边界边长; $L_D(X, Y)$ 是 X 和 Y 光谱曲线的兰氏距离。当区域 X 和 Y 公共边界边长在两者周长中均占有较大比重, 并且各自面积和光谱曲线的兰氏距离较小时, 合并代价就会最小, 将两者合并更为合理。

多重约束区域合并主要步骤为: 1) 通过建立区域邻接图并获取相邻区域对, 提取相邻区域周长、面积以及公共边界的边长, 并计算相邻区域光谱曲线的兰氏距离; 2) 计算所有相邻区域间合并代价, 选取区域间最小合并代价; 3) 对满足上述条件相邻区域进行合并, 最后更新分割结果。

2.4 分割结果评价

在影像分割研究中, 影像分割结果评价是不可缺少的环节。按照有无参考对象, 可以将遥感影像分割评价方法主要分为两大类, 分别是非监督评价和监督评价^[15]。非监督评价是人们事先选取某种评价指标及其阈值, 再计算影像分割结果对应的评价指标值, 通过比较二者之间的差别, 来评价影像分割结果质量^[16], 这种评价方法人为主观性较强。监督评价是通过分割对象与参考对象之间的差异来评价影像分割质量^[17]。为了客观并且较为全面地评价影像分割结果, 本文采用目视评价和监督评价相结合的评价方法。

目视评价是一种直观观察的评价方法, 采用目视评价可以快速得出影像分割结果中是否存在过分割和欠分割的现象。所提的监督评价是通过计算分割对象和人工绘制参考对象之间的差异性来评价分割结果质量, 采用的监督评价指标有 Kappa 系数、总误差指数、平均形状差异指数、平均面积差异指数^[18], 其中 Kappa 系数是表示分割结果与真实分割结果的相似程度; 总误差指数是通过计算参考对象与其相交面积最大的分割对象的差异比率^[19]。为验证所提分割方法的可行性, 与文献[6]和文献[7]中的分割算法进行对比, 并分别评价三种算法的性能。

3 实验结果与分析

3.1 实验

实验选取 2015 年 8 月哈尔滨市松北区部分街区 WordView-2 影像实验, 空间分辨率为 0.5 m, 实验影像大小 400 pixel × 400 pixel, 并将原始影像添加高斯噪声, 添加后影像信噪比为 30.52 dB。由于所提的监督评

价是通过计算分割对象和手工绘制参考对象之间的差异性来评价分割方法的可行性,因此需要人工绘制参考对象。结合研究区域实际地物情况,共绘制 50 个参考对象,参考对象基本均匀分布在影像上,如图 1(a)所示。实验在 OpenCV3.0 平台里实现,首先通过多次反复实验,得出 Log Gbor 滤波器尺度值为 6 时,边缘检测结果最佳。图 1(b)是所提方法的检测结果,图 1(c)是文献[6]方法的检测结果。

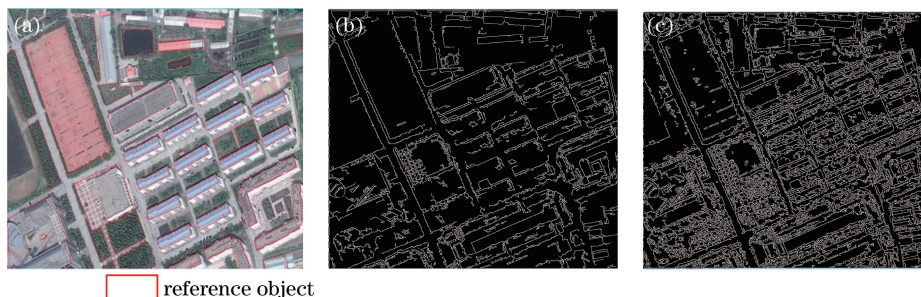


图 1 实验数据和不同方法边缘检测结果。(a)真实边界影像;(b)所提方法的检测结果;(c)文献[6]方法的检测结果
Fig. 1 Experimental data and edge detection results with different methods. (a) True border image;
(b) detection result with the proposed method; (c) detection result with the method in Ref. [6]

从图 1(c)和(a)可以得出,高分辨率影像地物关系复杂,导致文献[6]检测结果产生较多伪边缘,并且真实边缘不突出。从图 1(b)可以得出所提方法的检测结果与文献[6]检测的结果相比,地物真实边缘更突出。

将所提方法的检测结果进行自动标记分水岭变换,获取分割结果,并采用所提出的多重约束区域合并模型,分割结果进行区域合并优化处理;将优化后分割结果叠加到原始影像,结果如图 2(a)所示。为说明所提分割方法具有抗噪性,对没有添加高斯噪声的影像采用所提分割方法进行分割,图 2(a)是添加噪声后所提方法的分割结果,图 2(b)是没有添加噪声所提方法的分割结果,图 2(c)是文献[6]分割方法的分割结果,图 2(d)为文献[7]分割方法的分割结果。



图 2 不同分割方法的结果。(a)添加噪声影像所提方法的分割结果;(b)没有添加噪声影像所提方法的分割结果;
(c)文献[6]方法的分割结果;(d)文献[7]方法的分割结果

Fig. 2 Results of different segmentation methods. (a) Segmentation result with noise images using the proposed method; (b) segmentation result without noise images using the proposed method; (c) segmentation result using the method in Ref. [6]; (d) segmentation result using the method in Ref. [7]

3.2 分割结果评价

从图 2(a)中可以看出,在光谱差异较小的地物如足球场、建筑物屋顶等地物,所提的分割方法可以获得较为准确的分割结果。从图 2(a)和(b)中可以得出,添加高斯噪声和没有添加高斯噪声的影像采用所提分割方法,得到分割结果相似,说明所提分割算法对噪声有一定稳健性。从图 2(d)和(c)可以得出,文献[6]分割方法,对内部光谱特征变化较大的地物如足球场、草地、水体等区域分割零碎,过分割严重;文献[7]方法的分割方法,对内部光谱特征变化较大的地物如足球场、草地、水体等区域可以分割完整地物。综上,可以看出所提分割方法的分割结果与真实地物边缘具有较高吻合性,而且基本没有草地和房屋混淆的欠分割现象。所提分割方法略显不足的就是对于面积较小的水体和草地存在欠分割。通过目视解译评价,可以直观地分析所提分割方法在高分辨影像分割具有可行性,同时也说明传统分水岭分割方法存在不足。

通过统计计算,得出所提的监督评价指标 Kappa 系数、总误差指数(E)、平均形状差异指数(AD_area)、平均面积差异指数(AD_shape),计算结果如表 1 所示。

表1 不同方法分割结果的评价指标

Table 1 Evaluation index of segmentation results with different methods

Evaluation index	Proposed method	Ref.[6] method	Ref. [7] method
Kappa /%	93.21	89.51	90.21
E	9.563	16.813	12.362
AD_area	3.9754	-10.4586	3.8076
AD_shape	15.3245	23.5214	15.1631

从表1可以得出,文献[6]分割方法 Kappa 系数较低,而总误差指数、平均形状差异指数、平均面积差异指数均较高。所提方法比文献[7]分割方法评价指标略好,只是平均面积差异指数略高,说明所提分割方法存在较少过分割;所提分割方法与其他两种分割方法相比较,Kappa 系数是最高的,说明所提方法分割精度是最高的。

4 结 论

本文提出结合相位一致和分水岭变换的高分辨率影像分割方法。该方法综合利用基于相位一致边缘检测优点以及结合遥感影像光谱信息,并采用分水岭变换对影像进行分割。本文还结合两个相邻分割对象的位置、形状、面积等特征多重约束,对分割结果进行优化处理。结果表明,所提分割方法优于文献[6]分割方法;与文献[7]分割方法比较,所提分割方法获取的分割结果更为合理。所提分割方法还存在一些有待完善的地方,比如在分割结果优化上,只考虑光谱、面积、位置特征,没有充分挖掘高分辨率影像特征,如纹理特征。进一步将考虑结合影像纹理特征和其他辅助数据来提高地物分割精度。

参 考 文 献

- [1] Liu Dawei, Han Ling, Han Xiaoyong. High spatial resolution remote sensing image classification based on deep learning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0428001.
刘大伟, 韩玲, 韩晓勇. 基于深度学习的高分辨率遥感影像分类研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0428001.
- [2] Wang Jianing. Hyperspectral image classification based on joint sparse representation and morphological feature extraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 082801.
王佳宁. 基于联合稀疏表示与形态特征提取的高光谱图像分类[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 082801.
- [3] Baatz M, Schape A. Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks[C]. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing*, 1999.
- [4] Wu Yiquan, Tao Feixiang. Multispectral and panchromatic image fusion based on improved projected gradient NMF in NSST domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0410005.
吴一全, 陶飞翔. 改进投影梯度 NMF 的 NSST 域多光谱与全色图像融合[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0410005.
- [5] Angulo J, Velasco-Forero S, Chanussot J. Multiscale stochastic watershed for unsupervised hyperspectral image segmentation[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009: 93-96.
- [6] Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, Zhao Shuhe, *et al.* Segmentation of high-resolution remotely sensed imagery based on phase congruency[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 32-37.
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): 32-37.
- [7] Wang Ke, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* Segmentation of high-resolution remotely sensed imagery combining spectral similarity with phase congruency[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(1): 73-79.
王珂, 顾行发, 余涛, 等. 结合光谱相似性与相位一致模型的高分辨率遥感图像分割方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(1): 73-79.
- [8] Liu Jing, Li Peijun. A high resolution image segmentation method by combined structural and spectral characteristics [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(5): 466-473.
刘婧, 李培军. 结合结构和光谱特征的高分辨率影像分割方法[J]. *测绘学报*, 2014, 43(5): 466-473.
- [9] Chen Jie, Deng Min, Xiao Pengfeng, *et al.* Multi-scale watershed segmentation of high-resolution multi-spectral remote sensing image using wavelet transform[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(5): 908-926.
陈杰, 邓敏, 肖鹏峰, 等. 利用小波变换的高分辨率多光谱遥感图像多尺度分水岭分割[J]. *遥感学报*, 2011, 15

- (5): 908-926.
- [10] Liu Chun, Hong Liang, Chen Jie, et al. Fusion of pixel-based and multi-scale region-based features for the classification of high-resolution remote sensing image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(2): 228-239.
刘纯, 洪亮, 陈杰, 等. 融合像素-多尺度区域特征的高分辨率遥感影像分类算法[J]. *遥感学报*, 2015, 19(2): 228-239.
- [11] Morrone M C, Owens R. Feature detection from local energy[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 6(5): 303-313.
- [12] Kovess P. Image features from phase congruency[J]. *Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3): 1-26.
- [13] Luo Ling, Xie Mei, Chen Shan. Watershed segmentation based on multi-scale morphological filtering[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(2): 168-173.
罗玲, 解梅, 陈杉. 基于多尺度形态滤波的分水岭图像分割方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(2): 168-173.
- [14] Xu Tianzhi, Zhang Guicang, Jia Yuan. Color image segmentation based on morphology gradients and watershed algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(11): 200-203.
徐天芝, 张贵仓, 贾园. 基于形态学梯度的分水岭彩色图像分割[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(11): 200-203.
- [15] Ji Xiaole. Research on object-oriented evaluation method of remote sensing image classification accuracy[M]. Beijing: Beijing Normal University, 2012.
纪晓乐. 面向对象的遥感影像分类精度评价方法研究[M]. 北京: 北京师范大学, 2012.
- [16] Du Fenglan, Tian Qingjiu, Xia Xueqi, et al. Object-oriented image classification analysis and evaluation[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(1): 20-23.
杜凤兰, 田庆久, 夏学齐, 等. 面向对象的地物分类法分析与评价[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(1): 20-23.
- [17] Liu Y, Bian L, Meng Y H, et al. Discrepancy measures for selecting optimal combination of parameter values in object-based image analysis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 68(2): 144-156.
- [18] Tong H, Maxwell T, Zhang Y, et al. A supervised and fuzzy-based approach to determine optimal multi-resolution image segmentation parameters[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, 78(10): 1029-1044.
- [19] Zhang Y J. A survey on evaluation methods of image segmentation[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1996, 9(8): 1335-1346.