doi: 10.6046/gtzyyg.2020124

引用格式:张锐,尤淑撑,杜磊,等.基于改进超像素和标记分水岭的高分辨率遥感影像分割方法[J].国土资源遥感,2021,33 (1):86-95. (Zhang R, You S C, Du L, et al. High – resolution remote sensing image segmentation based on improved superpixel and marker watershed [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021,33(1):86-95.)

基于改进超像素和标记分水岭的 高分辨率遥感影像分割方法

张 锐¹, 尤淑撑¹, 杜 磊¹, 禄 競¹, 何 芸¹, 胡 勇² (1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京 100048; 2. 重庆市 规划和自然资源调查监测院,重庆 400120)

摘要:影像分割是高分辨率影像面向对象分析中的关键步骤,对信息提取精度起到至关重要的作用。为提高高分 辨率遥感影像面向对象算法分割性能,提出一种改进超像素和标记分水岭的分割方法,包括特征融合、超像素初分 割、控制标记符的标记分水岭再分割3个主要步骤。在超像素初分割阶段,利用高分辨率遥感影像纹理特征突出 的优势,结合颜色空间、空间位置信息以及相位一致性纹理特征等信息提出一种新的距离测度计算规则,按照符合 颗粒形状的圆形邻域进行搜索相似点,对影像进行超像素粗分割,并标记超像素斑块;计算超像素分割后每个斑块 的灰度值,超像素分割后的影像重建,利用形态学的扩展技术提取局部极小值控制分割区域的数量,对传统数学形 态学分水岭分割算法产生的过分割进行优化改进;对重建的影像进行高斯滤波,然后采用控制标记符分水岭算法 对重建后的影像进行再分割,得到多尺度综合分割结果。在实验部分,利用资源三号卫星影像和机载航空影像验 证本文提出方法,基于准确率和召回率定量评价分割精度,并将本文方法与其他分割方法的结果进行比较,证明本 文提出方法的分割有效性。

关键词: 高分辨率影像; 分水岭分割; 超像素; 资源三号

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1001-070X(2021)01-0086-10

0 引言

随着对地观测卫星技术的发展,高分辨率遥 感影像在地物目标提取、变化检测等方面发挥着 重要作用。影像分割是高分辨率遥感影像信息挖 掘和目标识别的基础,是实现从数据到信息转变 的重要环节。随着影像空间分辨率的提高,使得 地物轮廓和形状信息更加清晰,色彩差异明显^[1], 提高了地物识别的精度,但同时也增加了影像分 割的难度^[2]。传统的基于像元的分割方法如 mean shift 算法、分水岭算法等易受到影像椒盐噪声和 "同谱异物"、"同物异谱"等混合像元的影响,导 致影像分割的精度和效率较低。面向对象分析方 法的提出给影像分割和信息提取提供了新思路, 这种方法可以充分考虑影像光谱统计特征,形状、 纹理、上下文关系等一系列因素^[3-5],分析的最小 单元是由影像分割得到的同质对象块,不再是单 个像素。

分水岭分割^[6-9]作为一种有效的图像分割方 法,具有分割边界明显、连续且算法简单的优点, 在图像处理领域得到广泛应用。但该方法过渡依 赖于影像中地物的边界幅度效应,对于光谱差异 较小的地物,常规的分水岭算法由于图像上噪声 和图像局部不连续原因常常表现出过度分割,产 生伪边缘效果,导致分割不理想。超像素^[10]是指 具有相似纹理、颜色和亮度等特征的相邻像素经 过聚类形成的形状不完全规则的图像块,在一定 程度上,提高了影像处理效率,降低了高分辨率遥 感影像局部信息的冗余度,且能够充分利用影像 中的相位一致性(phase congruency,PC)^[11-12]幅度

收稿日期: 2020-04-23: 修订日期: 2020-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目"丘陵山区'冬水田'时序定量遥感识别模型与方法研究"(编号:41901386)、重庆市自然科学基金项目"冬水田定量遥感识别模型与方法研究"(编号:cstc2019jcyj-msxmX0548)和中国博士后基金(编号:2020M670609) 共同资助。

第一作者:张锐(1990-),男,博士后,主要从事城市遥感方面研究。Email: ruizh581@163.com。

通信作者:尤淑撑(1975-),男,研究员,主要从事自然资源遥感方面研究。Email: youusc@126.com。

信息,原理对影像中地物边缘梯度依赖较小,适合 高分辨率遥感影像复杂地物类型的识别。其中利 用相似纹理、颜色和亮度等特征的线性迭代聚类 (simple linear iterative clustering, SLIC)超像素分 割方法^[13],在图像分割和目标识别领域得到广泛 应用。

针对以上问题,本文提出一种基于超像素和标 记分水岭的高分辨率遥感影像分割方法。首先对高 分辨率影像进行灰度均衡化和高斯低通滤波,减少 影像噪声影响;再利用改进的 SLIC 超像素分割算 法对影像进行初分割,产生超像素对象块并进行标 记;然后计算每个超像素斑块的灰度值,完成影像 重建,并对重建后影像进行高斯滤波来去除相邻超 像素边界衔接效应影响;最后使用自动标记分水岭 算法完成高分辨率影像分割。 基于改进超像素和标记分水岭的分 割方法

1.1 基于控制标记符的分水岭分割算法

分水岭分割^[14-16]是根据地理学的分水岭概念,将 影像模拟成一幅高低起伏的地形图,图像中灰度变化 可描述成地形图的谷底、山脊和积水盆。该方法是基于 区域的影像分割方法,算法简单,运行快。Soille^[17]利用 数学形态学,对算法进行优化,提取局部极小值来自动控 制分割区域的数量,具体步骤如下:

1)提取形态学梯度图像,即

$$\boldsymbol{g} = (f \oplus b) - (f \ominus b)_{\circ} \quad (1)$$

根据图像 I(x,y) 的膨胀(dilation)和腐蚀(erosion) 算子可定义 ($f \oplus b$)表示形态学结构元素 b 对影像 进行膨胀运算,即

$$(f \oplus b)(x,y) = \max f(x+i,y+i) - b(i,j) | (x+i,j+y) \in D_f, (i,j) \in D_b \quad (2)$$

算.即

(*f* ⊖ *b*) 表示形态学结构元素 *b* 对影像进行腐蚀运

$$(f \ominus b)(x,y) = \min\{(x+i,y+i) - b(i,j) \mid (x+i,j+y) \in D_f, (i,j) \in D_b \quad (3)$$

2)梯度图像低通滤波。由于影像中地物的主要信息集中在图像的低频成分,直接对梯度图像进行处理不能有效获取低频信息,通过对图像进行低通滤波,增大噪声与图像信息的差异,从其低频成分中提取到与目标相关的极小值。

3)基于扩展局部极小值变换的控制标记提取。 分水岭分割中标记的获取至关重要,局部极小值变 换通过设定阈值参数 H,H 的取值影响分割图斑的 数目,消除深度小于 H 的局部极小值,一定程度上 减少过分割区域,过小或过大的 H 均不利于获得较 优的分割效果。

4)标记分水岭分割。得到标记图像后,将其二 值化,用提取到的地物标记对原始梯度图像进行修 改,滤去原图像中的所有局部极小值,局部极小值只 存在于二值标记图像中不为0的地方。在修改后的 梯度图像中应用标记分水岭分割,得到最终的分割 结果。

1.2 SLIC 超像素分割方法

在遥感影像智能解译和图像分割等方面,超像 素方法得到广泛应用。常用的超像素算法主要包括 熵率和斑块的方法,SLIC 是熵率方法中的一种典型 算法,是根据颜色和距离 2 种类型特征对影像进行 聚类^[18],主要包括 3 个关键步骤,初始化聚类中心、 对象相似性度量以及聚类中心的迭代更新,计算方 法简单,时效性高,生成的对象块大小均匀紧凑。

1)初始化聚类中心。首先通过将遥感影像从

RGB 颜色空间经过色彩变换操作,转到 Lab 颜色空间。将 Lab 颜色空间的颜色特征分量 l,a,b 和对象 块的中心坐标 x,y 共同作为分割的初始聚类中心,即 $C_k = [l_k, a_k, b_k, x_k, y_k]^T$ 。在对象块中设定种子 点,为防止种子点落在对象块边界位置,特采用 3 × 3 移动窗口,将种子点设置在对象块的梯度最小处,完成聚类中心的初始化。

2) 对象块的相似性度量。通过对 Lab 颜色空间特征向量之间的相似性和像素点 x, y 坐标之间的相似性进行聚类, 计算每个像素与初始化种子点之间的距离测度, 得到对象块之间的相似性度量。距离测度表示为:

$$D = \sqrt{\left(d_{\rm Lab}\right)^2 + \left(\frac{d_s}{s}\right)^2 / m^2} , \qquad (4)$$

式中:m表示权重,取值大小根据地物边缘与分割 边界的贴合程度决定;s为搜索步长;d_{Lab}和d_s分别 表示像素在颜色特征空间和坐标空间中的距离测 度。其表达式可以分解为:

$$d_{\text{Lab}} = \sqrt{(l_i - l_j)^2 + (a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2}, \quad (5)$$
$$d_s = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6)$$

3) 聚类中心迭代聚合。根据步骤 1) 确定初始 聚类中心后, SLIC 采用类簇所有像素点的平均值更 新聚类中心, 改进了 K - means 算法的搜索区域大 小, 聚类中心与像素之间采用 2s × 2s 邻域(图1), 提 高搜索效率。



1.3 改进超像素和标记分水岭的高分辨率影像分 割方法

边缘特征的提取是高分辨率遥感影像分割的关 键,从频率域的角度来看,影像的相位谱比幅度谱包 含更重要的信息^[19]。本文主要是通过加入 PC 特 征,提高超像素边缘检测的敏感性。对于空间域检 测,是利用影像的灰度和梯度等幅度信息,PC 是基 于一种特征感知模型的图像特征算法检测方法,与 人类视觉系统相符,具有亮度和平移不变性,对于地 物的高频信息较为敏感,具有检测弱边缘的优点。

PC 的基本原理是人类视觉感知的图像特征会

 $\Delta \phi(z)$

为了更好地在影像中提取地物边界,消除影像 灰度不均匀的影响,结合 PC 模型和光谱相似性测 度,本文提出了一种基于改进 SLIC 超像素与分水岭 的高分辨率影像地物分割方法(PCSLIC - MW)。主 要是在超像素分割阶段,使用 HSL 颜色分量,并引入 PC 测度,新的相似性测度 D 可以表示为:

$$D = e^{\left[\frac{Dist_{c}(j,i)}{p}\right]} + \frac{Dist_{xy}(j,i)}{s^{2}\omega^{2}} + \frac{Dist_{PC}(j,i)}{\mu}, \quad (10)$$

式中: ρ , ω 和 μ 分别为新的相似度测度中的权重系 数; Dist_e(j,i) 为颜色距离,即像素点与超像素种子 点间的颜色差异; $Dist_{xy}(i,i)$ 为像素点与超像素种 子点之间的空间距离; $Dist_{PC}(j,i)$ 为像素点与超像 素种子点间的 PC 差异。其表达式分别为:

$$Dist_{c}(j,i) = \sqrt{(H_{j} - H_{i})^{2} + (S_{j} - S_{i})^{2} + (L_{j} - L_{i})^{2}},$$
(11)

$$Dist_{xy}(j,i) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \qquad (12)$$

$$Dist_{PC}(j,i) = PC(j) - PC(i)$$
, (13)

式中: H,S,L 为颜色分量。在超像素分割计算过程 中, $Dist_{c}(j,i)$, $Dist_{xy}(j,i)$ 和 $Dist_{PC}(j,i)$ 均要归一

出现在图像谐波分量叠合最大的相位处,而特征的 类型由相位值决定。肖鹏峰等^[20]发现相位信息在 影像中地物的边缘特征处具有高度一致性,并利用 傅里叶重构函数对 PC 进行度量,即

$$PC(x) = \frac{\sum_{n} A_{n} \cos[\vartheta(x) - \overline{\vartheta}(x)]}{\sum_{n} A_{n}(x)} , \quad (7)$$

式中: $A_n(x)$ 表示 n 次谐波分量的幅度值: $\phi(x)$ 为 傅里叶成分的局部相位值: ø(x) 表示所有傅里叶 分量的加权平均局部相位角。式中的局部能量是相 位偏离的余弦函数,可能会因余弦函数的峰值不够 尖锐而导致定位不准确。后来 Kovesi 利用 Gabor 小 波的多尺度特征对算法进行改进,修正局部能量计 算式,引入噪声补偿T来抑制噪声干扰,并基于Gabor 函数将 PC 模型的维度扩展到二维,即

$$PC(x,y) = \frac{\sum_{0}^{\infty} \sum_{n}^{\infty} W_{0}(x,y) \|A_{n0}(x)\Delta \emptyset(x,y) - T\|}{\sum_{0}^{\infty} \sum_{n}^{\infty} A_{n0}(x) + \varepsilon},$$
(8)

式中: $W_0(x,y)$ 为在 O 点时有效的频谱值; ε 为常 数,通常设置为 0.000 1; $\Delta \phi(x, y)$ 为灵敏相位偏差 函数。其表达式为:

$$x,y) = \cos[\vartheta(x) - \vartheta(x)] - |\sin[\vartheta(x) - \bar{\vartheta}(x)]|_{\circ}$$
(9)

化到(0,1)之间,归一化的最大值为局部区域的最 大值。

综上所述,基于 SLIC 的超像素方法优化过程可 以归纳如下:

1)初始化。以步长 s 在以种子点为中心的 3 × 3 区域对原始影像进行初始化聚类中心:对每一个 像素 x 设置标签 l(i) = -1; 对每一个像素 x 设置 距离 $d(i) = \infty$ 。

2) 计算相似度。① RGB 颜色空间的图像转换 成 HSL 颜色空间, 计算 HSL 颜色特征: ② 计算种子 点与像素 x_i 的位置大小作为空间特征; ③ 对输入 的图像转换为灰度图像,使用 PC 算法计算图像的 PC 特征; 对每一个像素在聚类中心 i 的 2s × 2s 范 围内,计算像素间相似度距离 D_{\circ}

3)迭代更新聚类中心。针对每个聚类中心 i 与 其对应 $2s \times 2s$ 大小领域的每个像素 p_i , 计算 p_i 与 i之间的相似度,然后更新l(i)和初始相似度D(i), 完成聚类过程。

4)终止优化直到满足。距离最大,相似度最小。

本文核心算法步骤主要包括以下几点:

1)高分辨率遥感影像预处理。利用直方图均

衡化和高斯滤波对原始影像进行预处理。

2)超像素初分割。通过颜色、空间位置、PC距 离、纹理特征4个特征对影像进行超像素粗分割,并 对超像素斑块进行标记。

3) 对超像素分割后影像的重建。计算超像素 分割后每个斑块的灰度值, $Gray_{i,k} = \sqrt{(\bar{a} + \bar{b} + \bar{c})}$, \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} 分别为 HSL 颜色空间上的颜色分量均值, k 为超像素斑块编号, i 为斑块 k 内部的像素空间 位置。

4) 对重建的特征影像图进行高斯滤波,最后采用 控制标记符分水岭算法对重建后的特征影像进行再 分割,得到地物最终分割结果。具体流程见图 2。



- 2 实验与分析
- 2.1 实验结果
- 2.1.1 Worldview 2 多光谱影像分割实验
 - 本实验采用了 Worldview 2 多光谱影像(图 3)。





图 3 0.5 m 分辨率 Worldview 2 多光谱影像 Fig. 3 Worldview 2 multispectral image of 0.5 m resolution

该影像空间分辨率为0.5 m,影像大小为1000 像素 × 1 000 像素,有蓝光(450~510 nm)、绿光 (510~580 nm)、红光(655~690 nm)和近红外(780~ 920 nm)共4个波段。Worldview 2 多光谱影像选取 的研究区主要以梯田、林地和村庄为主。首先计算 不同空间尺度下超像素块的纹理特征、颜色特征以 及空间位置特征,并对特征进行融合处理,然后利用 本文所提改进超像素方法对影像进行初分割,利用 扩展局部极小值变换方法确定控制标记,进而利用 标记分水岭分割方法对影像进行再分割,根据变化 曲线得到最优分割尺度,完成基于 PCSLIC - MW 方 法的影像分割实验。图 4 为 PCSLIC - MW 方法分 割结果,图4(a)为超像素初分割的初始结果,图 4(b)为 PCSLIC - MW 分割结果,图4(c)和(d)分别 为耕地和居民点局部放大,从图中可以看出,梯田和 居民点的边界被很好地分割出来。与分形网络演化 算法(fractal net evolution approach, FNEA)^[21]不同 尺度局部结果对比如图5所示。



 (a) 超像素初分割
 (b) PCSLIC - MW 结果

 图 4 - 1
 PCSLIC - MW 方法分割结果

 Fig. 4 - 1
 Segmentation results of PCSLIC - MW method











(a) 本文方法

(b) 尺度 100



(d) 尺度 60

(e) 尺度 40

(f) 尺度 25



从图 5 中可以看出,当尺度为 100 或 80 时,产 生过分割,并随着尺度参数的增加,整个影像的过分 割仍比较严重,当尺度为60,40,25时,产生欠分割 现象,分割对象过于破碎。植被和农田的光谱异质 性较大,虽然也有了较好的合并,但仍然存在着过分 割现象,进一步说明了本文方法的优越性。

表1为Worldview 2多光谱影像利用不同分割 尺度的精度评价,从精确度和召回率2个指标可以 看出,本文所提方法的精确度和召回率均在0.8以 上,高于 FNEA 分割结果的精度。利用 FNEA 不同尺 度分割的结果显示,分割尺度过大或过小,精确度和 召回率都呈现降低趋势。

Worldview 2 多光谱影像分割实验精度评价 表 1 Accuracy evaluation of segmentation Tab. 1 experiment based on Worldview 2 image

- F -			
方法	精确度	召回率	
PCSLIC – MW	0.83	0.85	
FNEA(100)	0.72	0.79	
FNEA(80)	0.68	0.75	
FNEA(60)	0.75	0.80	
FNEA(40)	0.65	0.81	
FNEA(25)	0.64	0.76	

2.1.2 ZY3-02 多光谱影像分割实验

本实验使用的数据为 ZY3 - 02 多光谱影像, ZY3 卫星是我国首颗高精度民用立体测绘卫星, 影像数据为一种新型遥感影像数据源,具有高空 间分辨率、大动态范围和立体成像的特点,在建 筑物等信息提取方面具有较大优势。ZY3 - 02 多光谱影像参数如表 2 所示。

表 2 ZY3-02 多光谱影像参数 Tab. 2 Parameters of ZY3-02 multispectral image

平台	相机模式	波段	光谱范围/nm	空间分辨率/m
	全色正视	_	450 ~ 800	2.1
ZY3 - 02	多光谱正视	蓝光	450 ~ 520	
		绿光	520 ~ 590	5 0
		红光	630 ~ 690	3.8
		近红外	770 ~ 890	

ZY3-02多光谱影像包括蓝光、绿光、红光 和近红外4个波段,幅宽为52km。采用Flaash 模型对影像进行大气纠正,并利用二次多项式模 型对多光谱和全色影像分别进行几何纠正,最后 采用Gram-Schmidt方法对影像进行融合处理。 实验采用影像大小为2000像素×2000像素,空 间分辨率为2.1m,该区域主要包括房屋、道路、 耕地、水域等地物(图6),图7(a)为影像的分割 结果,建筑物和耕地分割结果的局部放大如图7 (b)和(c)所示,从分割结果可以看出,本文方法 较好地区分了房屋和耕地的边界,完整地保留了房 屋、耕地、道路以及水域的边界线,绝大部分地物被完 整地区分出来。以房屋为例,本文方法与不同尺度 FNEA的局部分割结果对比如图8所示。



图 6 空间分辨率 2.1 m 的 ZY3 - 02 多光谱影像 Fig. 6 ZY3 - 02 multispectral image of 2.1 m resolution



(a)本文方法分割结果
 图 7 -1 PCSLIC - MW 方法分割结果
 Fig. 7 -1 Segmentation results of PCSLIC - MW method











从图 8 中可以看出,当尺度为 100 或 80 时,存 在欠分割现象,房屋边界和周围裸地边界混淆,当尺 度设为 60,40 或 25 时,存在过分割现象,房屋边界 不完整,对象斑块破碎。分割精度评价如表 3 所示。

表 3 ZY3-02 多光谱影像分割实验精度评价 Tab. 3 Accuracy evaluation of segmentation

experiment based on ZY3 – 02 image			
方法	精确度	召回率	
PCSLIC - MW	0.86	0.90	
FNEA(100)	0.69	0.73	
FNEA(80)	0.70	0.74	
FNEA(60)	0.73	0.83	
FNEA(40)	0.68	0.76	
FNEA(25)	0.68	0.75	

从表3中可以看出,本文方法的精确度和召回 率分别为0.86和0.90,和其他分割尺度相比,获得 了较好的效果。

2.2 结果评价与分析

对本文所提方法进行分割效果评价,将本文方 法与传统均值飘移方法^[22](mean shift, MS)和 FNEA进行比较,如图9所示。从图9中可以看出, 本文方法能够较好地将建筑物与阴影、裸地区分开, 分割出较为清晰的边界,MS方法容易产生过分割, 建筑物边界没能很好的区分,FNEA分割方法中阴 影和房屋产生了混淆。从表4中的精确度和召回率 也可以看出,本文方法的精度高于 MS 以及 FNEA 分 割方法。



(a) 原始 ZY3-02 影像

(b) MS 分割方法



(c) FNEA 分割方法(尺度 50)

(d) 本文方法

图 9 分割方法比较 Fig. 9 Comparison of segmentation methods

表 4 分割方法比较精度评价 Tab. 4 Accuracy evaluation of different

segmentation methods

~	-8	
方法	精确度	召回率
PCSLIC – MW	0.90	0.93
MS 分割	0.72	0.79
FNEA(100)	0.65	0.80
FNEA(80)	0.68	0.76
FNEA(50)	0.63	0.79

为分析影像空间分辨率差异对分割精度造成的 影响,利用本文所提方法对 Worldview 2 融合影像 (0.5 m)、ZY3-02 融合影像(2.1 m)以及 ZY3-02 多光谱影像(5.8 m)分别进行分割实验,结果如表 5 所示。

表 5 影像分辨率差异对分割精度的影响 Tab. 5 Effect of image resolution difference

on segmentation accuracy				
影像	空间分辨率/m	精确度	召回率	
Worldview 2 融合影像	0.5	0.91	0.93	
ZY3-02融合影像	2.1	0.90	0.93	
ZY3-02多光谱影像	5.8	0.68	0.65	

通过精确度和召回率指标可以看出,当影像分 辨率由5.8 m提升到2.1 m时,分割精度具有显著 提升。当影像分辨率为0.5 m时,分割精度并未随 着影像空间分辨率的提高而持续提高,说明此时应 加入其他特征辅助分割,以改善分割精度。

3 结论与讨论

本文针对常规面向对象分割方法存在的缺陷, 提出一种改进超像素和标记分水岭的高分辨率卫星 遥感影像分割方法 PCSLIC – MW,首先利用超像素 方法对影像进行初分割,并结合 HSL 颜色空间、空 间位置信息以及相位一致性纹理特征等信息,对传 统的 SLIC 超像素分割算法进行改进,再结合改进的 标记分水岭算法进行再分割,提取地物的边界。通 过选取 Worldview 2 和 ZY3 – 02 典型样例影像进行 分割实验,说明本文提出方法的有效性和精度。

本文方法与 MS 和 FNEA 方法相比,能够避免 大量的欠分割导致的影像对象边界不清和过分割造 成的对象块较多,与大的单尺度分割相比,能够避免 大量的欠分割影像对象,与小的单尺度分割相比,能 够避免大量的过分割影像对象。

实验结果表明,针对不同卫星影像的最佳参数 选择可能存在差异,不同空间分辨率影像的分割精 度也会有所差异。对某些特殊目标和地物类型复杂 的分割问题,提高分割的泛化能力和分割效率是后 续的研究目标。

参考文献(References):

- [1] 刘 扬,付征叶,郑逢斌.高分辨率遥感影像目标分类与识别研究进展[J].地球信息科学学报,2015,17(9):1080-1091.
 Liu Y, Fu Z Y, Zheng F B. Review on high resolution remote sensing image classification and recognition[J]. Journal of Geo - Information Science, 2015,17(9):1080-1091.
- [2] 姚丙秀,黄亮,许艳松.一种结合超像素和图论的高空间分辨率遥感影像分割方法[J].国土资源遥感,2019,31(3):72 79. doi:10.6046/gtzyg.2019.03.10.

Yao B X, Huang L, Xu Y S. A high resolution remote sensing image segmentation method based on superpixel and graph theory [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31 (3):72 - 79. doi:10.6046/gtzyyg.2019.03.10.

[3] 明冬萍,邱玉芳,周文.遥感模式分类中的空间统计学应用——以面向对象的遥感影像农田提取为例[J].测绘学报,2016,45(7):825-833.

Ming D P, Qiu Y F, Zhou W. Applying spatial statistics into remote sensing pattern recognition: With case study of cropland extraction based on GeOBIA [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016,45(7):825 - 833.

[4] 陈春雷,武 刚. 面向对象的遥感影像最优分割尺度评价[J]. 遥感技术与应用,2011,26(1):96-102.
 Chen C L, Wu G. Evaluation of optimal segmentation scale with ob-ject - oriented method in remote sensing [J]. Remote Sensing

Ject – oriented method in remote sensing [J]. Remote Sensin Technology and Application, 2011, 26(1):96 - 102.

[5] 郭琳,裴志远,吴全,等.面向对象的土地利用/覆盖遥感分类方法与流程应用[J].农业工程学报,2010,26(7):194-198.

Guo L, Pei Z Y, Wu Q, et al. Application of method and process of object – oriented land use – cover classification using remote sensing images [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 194 – 198.

- [6] 闫鹏飞,明冬萍.尺度自适应的高分辨率遥感影像分水岭分割 方法[J].遥感技术与应用,2018,32(2):321-330.
 Yan PF, Ming DP. Segmentation of high spatial resolution remotely sensed data using watershed with self - adaptive parameterization [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018,32(2):
- 321-330.
 [7] 谢 總,王 辉,张雪锋. 图像阈值分割技术中的部分和算法综述[J]. 西安邮电学院学报,2011,16(3):1-5,13.
 Xie X, Wang H, Zhang X F. A survey of partial sums algorithms in image thresholding techniques[J]. Journal of Xi' an University of Posts and Telecommunications,2011,16(3):1-5,13.
- [8] 朱俊杰,杜小平,范湘涛,等.图像多尺度边缘检测及图像多尺 度分割研究[J].地理与地理信息科学,2013,29(2):45-48, 127.

Zhu J J,Du X P,Fan X T, et al. Multi – scale edge detection and multi – scale segmentation of imagery [J]. Geography and Geo – Information Science, 2013, 29(2):45–48, 127.

[9] 刘永学,李满春,毛 亮.基于边缘的多光谱遥感图像分割方法

[J]. 遥感学报,2006,10(3):350-356.

Liu Y X, Li M C, Mao L. An algorithm of multi – spectral remote sensing image segmentation based on edge information [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3); 350 - 356.

- [10] 宋熙煜,周利莉,李中国,等.图像分割中的超像素方法研究综述[J].中国图象图形学报,2015,20(5):599-608.
 Song X Y,Zhou L L,Li Z G, et al. Review on superpixel methods in image segmentation [J]. Journal of Image and Graphics,2015, 20(5):599-608.
- [11] 陈 敏,朱 庆,朱 军,等. 多光谱遥感影像亮度空间相位一致 性特征点检测[J]. 测绘学报,2016,45(2):178-185.
 Chen M,Zhu Q,Zhu J, et al. Interest point detection for multispectral remote sensing image using phase congruency in illumination space[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2016,45(2): 178-185.
- [12] 韦春桃,李彩露,杨先武,等. 基于相位一致性的遥感影像道路 特征检测方法[J]. 地理与地理信息科学,2011,27(4):62 -66.

Wei C T, Li C L, Yang X W, et al. Road feature detection based on phase congruency using remote sensing image [J]. Geography and Geo – Information Science ,2011,27(4):62 – 66.

[13] 赵鹏飞,周绍光,裔 阳,等.基于 SLIC 和主动学习的高光谱遥 感图像分类方法[J]. 计算机工程与应用,2017,53(3):183-187.

Zhao P F, Zhou S G, Yi Y, et al. Classification method of hyperspectral remote sensing image based on SLIC and active learning [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(3):183 – 187.

- [14] Tarabalka Y, Chanussot J, Benediktsson J A. Segmentation and classification of hyperspectral images using watershed transformation[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(7):2367-2379.
- [15] Wang M, Yuan S G, Pan J, et al. Seamline determination for high resolution orthoimage mosaicking using watershed segmentation [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2016, 82 (2):121-133.
- [16] Umesh Adiga P S, Chaudhuri B B. An efficient method based on watershed and rule – based merging for segmentation of 3 – D histo – pathological images [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(7):1449 – 1458.
- [17] Soille P. Morphological image analysis principle and application[M]. Berlin, Germany: Springer Verlag, 1999:123 140.
- [18] Achanta R, Shaji A, Simth K, et al. SLIC superpixels compared to state of the art superpixel methods[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2012, 34(11):2274 - 2282.
- [19] 袁永华,李 玉,赵雪梅.基于谱聚类的高分辨率全色遥感影像 分割[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7):1656-1664.
 Yuan Y H, Li Y, Zhao X M. High - resolution panchromatic remote sensing image segmentation based on spectral clustering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016,37(7):1656-1664.
- [20] 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. Xiao PF,Feng X Z,Zhao SH, et al. Segmentation of high - resolution remotely sensed imagery based on phase congruency[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2007,36(2):146-151.
- [21] 贾春阳,李卫华,李小春. 基于自适应权值 FNEA 算法的高分

辨率遥感图像分割[J]. 国土资源遥感,2013,25(4):22-25. doi:10.6046/gtzyyg.2013.04.04.

Jia C Y, Li W H, Li X C. High resolution remote sensing image segmentation based on weight adaptive fractal net evolution approach[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25 (4):22-25.doi:10.6046/gtzyyg.2013.04.04.

[22] 于 博,牛 铮,王 力,等.一种基于中性集和均值漂移的彩色

遥感图像非监督建筑物提取方法[J].光谱学与光谱分析, 2013,33(4):1071-1075.

Yu B, Niu Z, Wang L, et al. An unsupervised method of extracting constructions from color remote sensed image based on mean shift and neutrosophic set [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1071 - 1075.

High – resolution remote sensing image segmentation based on improved superpixel and marker watershed

ZHANG Rui¹, YOU Shucheng¹, DU Lei¹, LU Jing¹, HE Yun¹, HU Yong²

(1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China; 2. Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 400120, China)

Abstract: Image segmentation is a key step in object – oriented analysis of high resolution images and plays an important role in information extraction accuracy. In order to improve the segmentation performance of object – oriented algorithms for high – resolution remote sensing images, this paper proposes a segmentation method (PCSLIC – MW) to improve the superpixel and marker watershed, including feature fusion, superpixel initial segmentation, and control marker watershed segmentation. In the phase of superpixel segmentation, a new distance measure calculation rule is proposed, which combines color space, spatial position information and phase consistency texture feature. And then the gray value of each patch is calculated after superpixel segmentation, image reconstruction after segmentation, and morphological extension technology is used to extract local minimum (H – minima) so as to control the number of segmentation regions. The over – cutting produced by the traditional mathematical morphologic watershed segmentation algorithm is optimized and improved. The reconstructed image is conducted by Gaussian filter, and then the control marker watershed algorithm is used to re – segment the proposed method, the precision and recall rate are used to evaluate the segmentation accuracy, and the results are compared with those of other segmentation methods to prove the segmentation effectiveness of the proposed method. **Keywords**; high – resolution image; watershed; superpixel; ZY3 - 02

(责任编辑:陈理)