

# 结合光谱和纹理的高分辨率遥感图像分水岭分割

张建廷<sup>1</sup> 张立民<sup>2</sup>

1 海军装备研究院,北京,102249  
2 海军航空工程学院,山东 烟台,264001

**摘 要:**针对遥感图像分割时仅利用光谱信息容易造成过分割和边缘定位不准的问题,提出一种结合光谱强度和纹理信息的遥感图像分水岭分割算法。首先分别提取图像的光谱梯度和纹理梯度,提出一种改进双边滤波模型,滤除图像中的噪声的周时,采用了一种局部的平滑尺度,能够有效消除纹理信息,借助于滤波算法,分别对原图像和 Gabor 纹理特征图像进行平滑处理,利用边缘检测算子得到光谱梯度和纹理梯度。最后利用形态学膨胀方法进行融合融合,使用分水岭变换对图像分割。用三幅高分辨率彩色遥感图像数据进行实验,并与 JSEG(Joint Systems Engineering Group)和分辨率分割方法进行比较,结果表明该方法具有较高的边界定位准确性,同时降低了过分割和欠分割现象。

**关键词:**遥感图像分割;双边滤波;Gabor 滤波;梯度;分水岭变换;形态学膨胀  
**中图法分类号:**P237 **文献标志码:**A

高分辨率遥感图像能够提供丰富的地面物体细节,但也增加了同质区域的内部光谱差异,并呈现出多样的纹理特性,再加上传感器在成像过程中会引入噪声,增加了遥感图像准确分割的难度。近年来,高分辨率遥感图像主要采用基于面向地理对象的图像分析(geographic object-oriented image analysis, GEOBIA)方法。首先将图像分割为互不重叠的区域,称为对象,对象边界的准确性决定了后续特征提取和分类的质量<sup>[1]</sup>。为了产生对象,需要借助于图像分割方法,当前在 GEOBIA 中多采用多分辨率分割(multi-resolution segmentation, MS)算法<sup>[2]</sup>,其本质是一种综合考虑对象形状和光谱信息的区域生长方法。这种方法的缺点是尺度相关,需要多种尺度参数综合择优<sup>[3]</sup>,并且分割过程没有考虑纹理因素,难以得到准确的对象边界描述。

图像分割的理想方法是模拟人类视觉系统(human vision system, HVS)对图像的解译过程,综合考虑各种视觉信息,如边缘、光谱强度、纹理和空间关系属性等,将图像分割为与现实物体相对应的不重叠子区域<sup>[4]</sup>。如何在算法层面更好地模拟 HVS 系统对图像信息的处理,是一个亟待研究的问题。为了改善高分辨率遥感图像分割

只考虑光谱信息的不足,当前的研究趋势是尝试将更多的视觉信息引入到分割过程,如加入边缘信息来改善区域合并效果<sup>[5]</sup>,利用边缘信息进行分水岭标记和分割<sup>[1]</sup>,在分割时考虑纹理信息<sup>[6]</sup>,提取纹理特征、融合光谱信息的混合特征表示和区域生长合并等,并加入极化、统计和几何特征增强分割抗噪性能<sup>[7]</sup>等。因为高分辨率的遥感图像中相邻物体间既有光谱强度差异产生的边界也有纹理边界,过多考虑纹理容易在光谱强度边界产生纹理边界效应<sup>[8]</sup>;而且图像中的噪声很容易造成过分割现象和边界定位不准,因此本文研究的主要目的是降低噪声对分割的影响,同时,模拟 HVS 系统的图像解译过程,利用算法分别提取光谱强度信息和纹理信息,在分水岭<sup>[9]</sup>变换方法的基础上实现对高分辨率遥感图像的分割。

分水岭变换方法的关键是获得准确的梯度图,为了在分割过程中加入光谱和纹理信息,本文分别提取遥感图像的光谱强度梯度和纹理梯度,然后将二者融合形成最终的梯度图像。为了得到光谱梯度信息,本文提出一种新的基于双边滤波的图像平滑算法,能够有效滤除图像的纹理和噪声信息,并在纹理特征图的处理中消除纹理泄露效应。本文的创新性在于通过一种新的滤波器技

术将遥感图像中的光谱强度和纹理信息分别提取出来,然后通过梯度提取技术和分水岭变换将两种信息融合到图像分割中,这样可以很好地模拟 HVS 对图像的解译过程。技术路线如图 1 所示。

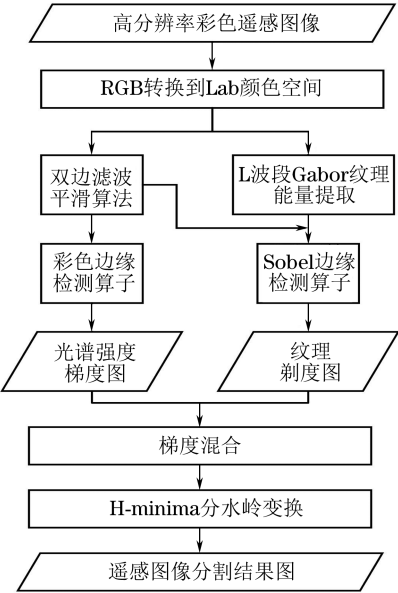


图 1 技术路线图

Fig.1 Flowchart of Proposed Method

1 改进双边滤波模型

边缘保持平滑算法能够在平滑去噪过程中保留图像中的主要边缘<sup>[10]</sup>,这类方法有非线性扩散、全变分流与双边滤波等种类。这三种方法的共同点是均假设图像本身是分段光滑的二维函数,前两种方法基于迭代求解离散偏微分方程,缺点是迭代停止条件难以确定,参数估计困难。而双边滤波方法不需要迭代,这里采用双边滤波方法进行图像的平滑。按照本文的设计需求,双边滤波器要求既能够去除噪声,也要平滑纹理区域。

1.1 图像平滑的统计模型

从统计分析的角度看,图像可以看作含有噪声的分段函数,而边缘作为异常值,图像平滑问题用稳健回归的方法<sup>[11]</sup>分析,目标是找到一幅图像  $I$ ,其误差能量函数  $E(I)$  最小:

$$\min_I E(I) = \min_I \sum_l \sum_{p \in \eta_s} \omega(p-s) \rho(I_p - I_s, \sigma)$$

(1)

式中,  $\eta_s$  是像素  $s$  的邻域;  $\omega(x)$  是空间距离权值函数;  $\sigma$  是平滑尺度参数;  $\rho(x)$  是误差函数。为求式(1)的解,采用牛顿梯度下降方法,可得到:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{\lambda}{\eta_s} \sum_{p \in \eta_s} \omega(p-s) \psi(I_p - I_s^t, \sigma)$$

(2)

式中,影响函数  $\psi(x) = \rho'(x)$ ;  $t$  表示离散迭代时间。式(2)与非线性扩散离散化<sup>[12]</sup>表示相同。梯度下降方法的缺陷是收敛速度慢。

为了在求解过程中得到超线性的收敛速度和稳定解,对式(2)求导数,并令导数为 0,进而得到极小值作为解,假设  $\psi(x) = g(x)x$ ,则可以得到:

$$I_s^{t+1} = \frac{\sum_{p \in \eta_s} \omega(p-s) g(I_p - I_s^t, \sigma) I_p}{\sum_{p \in \eta_s} \omega(p-s) g(I_p - I_s^t, \sigma)}$$

(3)

式(3)与双边滤波器有相同的表示形式,由式(2)和式(3)可知,非线性扩散与双边滤波方法有相同的统计基础。因此,一些在非线性扩散中的图像平滑改进方法同样可以被引入到双边滤波器方法中,如对平滑尺度参数的解释等。传统的双边滤波方法不适合自然图像中纹理和噪声信息的消除。这是由于其使用的影响函数  $\psi(x)$  为 Gauss 函数,不具备稳健性;同时单一的平滑尺度在纹理或噪声变化剧烈的地方失去作用,也即图像不同区域的局部梯度差异性需要在平滑过程中加以考虑。

1.2 滤波影响函数优化

影响函数  $\psi(x)$  测量邻域像素之间的差异并计算中心像素的强度值。传统上有 Lorentzian 函数、Gauss 函数、Tukey's biweight 函数和 Huber 函数 4 种影响函数。图 2 为 4 种影响函数的曲线图,经过归一化并设置尺度参数  $\sigma = 0.2$ 。

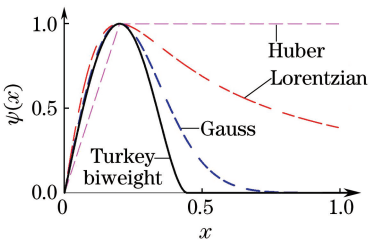


图 2 4 种影响函数曲线

Fig.2 Curves of Four Influence Funtions

在图 2 中, Huber、Lorenzian 和 Gauss 函数会在边缘位置持续平滑图像,而 Turkey's biweight 函数曲线有较快的下降率,并在差异值增加到一定值时停止平滑,有更好的边缘保持特性,相比其他三种函数更加“稳健”。这里采用 Tukey's biweight 函数代替原模型中的 Gauss 影响函数,其表达式为:

$$\psi(x) = \begin{cases} x[1 - (x/\sigma)^2]^2, & |x| < \sigma \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(4)

Tukey's biweight 函数对应的误差函数  $\rho$  是非凸函数,只能保证式的解为局部极小值,为求得全局最优解,引入渐进非凸优化(gradual non-convexity, GNC)<sup>[13]</sup>方法,可以将非凸优化问题转化为一系列的松弛函数求解问题。

为实现 GNC 方法,本文采用一种膨胀近似方法,引入一个控制参数序列  $\{\gamma^{(k)}, k=0, \dots, N\}$ ,使得当初始值  $\gamma^{(0)}$  足够大时,松弛后的  $\rho_\gamma(x, \sigma)$  为凸函数:

$$\rho_\gamma(x, \sigma) = \begin{cases} (1 - [1 - (x/\gamma\sigma)^2]^3)/3, & |x| < \gamma\sigma \\ 1/3, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

通过将式(3)中的高斯函数替换为新的  $g_\gamma(x, \sigma)$ ,可以得到新的双边滤波模型。 $g_\gamma(x, \sigma)$  表示为:

$$g_\gamma(x, \sigma) = \begin{cases} [1 - (x/\gamma\sigma)^2]^2, & |x| < \gamma\sigma \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

参数  $\gamma$  控制松弛速度从  $\gamma^{(0)}$  到 1,由于 GNC 在后期极小值求解过程对参数扰动更为敏感,因此  $\gamma$  序列在开始时应快速下降,但当接近 1 时,应当缩小步长。故此,提出式(7)和式(8)所示的指数序列方法。

$$\gamma^{(k)} = \gamma^{(0)} + \tau(k)(1 - \gamma^{(0)}), k=0, \dots, N \quad (7)$$

式中,

$$\tau(k) = \frac{(1 - e^{-k})e^N}{e^N - 1} \quad (8)$$

### 1.3 局部平滑尺度参数

平滑尺度参数  $\sigma$  是梯度阈值,该阈值用于区分噪声和边缘,文献[14]提出中位数绝对偏差(median absolute deviation, MAD)表示图像的全局平滑尺度  $\sigma_g$ ,若  $\nabla I = I_p - I_s$  为相邻像素灰度值的差,则  $\sigma_g$  表示为:

$$\sigma_g = 1.4826 \text{MAD}(\nabla I) = 1.4826 \text{median}_I \cdot (\|\nabla I - \text{median}_I(\|\nabla I\|)\|) \quad (9)$$

式中, MAD 为离差中位数算子; median 为中值算子;  $\text{median}_I$  表示在整幅图像区域进行中值计算。采用全局平滑尺度参数会忽略遥感图像中区域间的局部差异,尤其是在纹理与非纹理交界的边缘处。如图 3(a)中的水体与树林的交汇边界处,从图 3(b)中白线经过的像素强度图可以看出,边缘的梯度明显低于树林区域内部梯度变化。如果边缘梯度小于与其相邻的纹理区域内部梯度,边缘将被平滑,而纹理区域将会增强,因此需要局部的平滑尺度来避免这一问题。

MAD 表示尺度将边缘看作异常值进行识别。遥感图像中由于纹理的影响,不能简单将图像看作

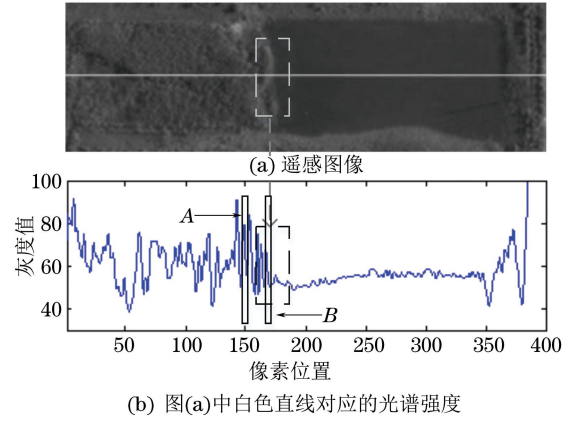


图 3 光谱强度在纹理与非纹理边界变化

Fig.3 Spectral Intensity Variation Across Texture and Intensity Regions

含有相同统计特性噪声的分段平滑函数;并且局部尺度应当能够反映像素邻域内大多数的梯度信息,以便于能够平滑纹理区域,并保持光谱强度边缘。为此,本文引入一个  $n \times n$  的窗,在窗口邻域使用梯度中值来表示尺度,由于处理的是彩色遥感图像,应当考虑不同波段图像之间的相互影响。同时计算 3 个波段的梯度信息并累加来表示位置  $(x, y)$  处的梯度。本文提出的局部尺度  $\sigma_l$  表示为:

$$\sigma_l^m(x, y) = \max(\sigma_g^m, \text{median}_{-\lfloor n/2 \rfloor \leq i, j \leq \lfloor n/2 \rfloor} (\sum_m \|\nabla I^m_{x+i, y+j}\|)) \quad (10)$$

式中,  $m=1, 2, 3$ , 代表图像的波段。在平滑过程中分别对图像的 3 个波段进行平滑,中值局部尺度与  $\sigma_g^m$  取最大值是为了保证非纹理区域的噪声也能够得到有效平滑。

## 2 梯度融合和分水岭分割

### 2.1 梯度信息提取

为了合理利用图像的光谱强度信息和纹理信息,需要从图像中将这两种信息分别提取出来。图像的光谱强度信息可以从双边滤波平滑后的图像中得到,然后使用彩色图像边缘检测算子<sup>[15]</sup>得到图像的梯度幅值。图像的纹理信息使用 Gabor 滤波器组在彩色变换后的 L 通道中获得。

Gabor 滤波器组是一种多通道滤波技术,能够提取图像中不同尺度和不同方向的纹理信息,从空间域来看, Gabor 函数是经过高斯调幅的正弦波。为了提取纹理能量信息,使用滤波器组的实部<sup>[16]</sup>,其冲激响应函数为:



$$h(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\exp\{-\frac{1}{2}[\frac{x_r^2}{\sigma_x^2}+\frac{y_r^2}{\sigma_y^2}]\}\cdot\cos(2\pi\frac{1}{\lambda}x_r)$$

(11)

由于人类视觉皮质细胞具有 1 倍频程的频率响应和  $\pi/6$  的角带宽<sup>[17]</sup>,高分辨率遥感图像的纹理和噪声通常集中在高频区域,因此本文使用滤波器组的前三个高频波长  $\lambda=\{2\sqrt{2},4\sqrt{2},8\sqrt{2}\}$ ,滤波器方向为  $\theta=\{0,\pi/6,\pi/3,\pi,\pi/2,5\pi/6\}$ 。为了提高运算效率,Gabor 滤波器组与图像的卷积在本文中通过空间域的近似来计算,设计滤波器的空间域宽度为  $6\sigma$ ,这样可以覆盖滤波函数 99.7% 的有效区域。Gabor 滤波器的直接输出结果不适合进行纹理梯度的提取,主要是因为这些纹理特征图像存在泄露效应<sup>[16]</sup>,会产生类似噪声和波纹的现象,不适合梯度提取。为此,使用本文提出的双边滤波方法依次对各个尺度和方向的 Gabor 纹理特征图像进行平滑,平滑处理后的纹理特征图相加得到最终的纹理能量图,之后利用 Sobel 算子获得纹理梯度图像。

2.2 梯度融合和分水岭分割

光谱强度梯度图能够准确定位物体的边缘。但是纹理作为一种空间结构特征,具有不确定性,难以准确表示物体的边缘。若简单将光谱强度梯度和纹理梯度相加,会导致多边缘效应。为避免这一问题,本文采用文献[18]中的形态学膨胀方法对纹理特征图像进行处理,然后与光谱强度梯度进行融合。形态学膨胀方法扩展了纹理梯度的范围,使得使用分水岭变换分割的过程中,如果强度梯度和纹理梯度同时存在,则分水线可以定位到光谱强度边缘;如果不存在强度梯度,则分水线会定位到膨胀前的纹理边缘处。假设光谱强度梯度图为 $G_i$ ,纹理梯度为 $G_t$ ,则得到最终的混合梯度  $G$  表示为:

$$G(x,y)=\frac{G_i(x,y)}{\text{median}(G_i)}+\frac{G_t(x,y)}{\text{median}(G_t)}$$

(12)

在得到混合梯度  $G$  后,可以使用分水岭变换的方法得到图像的分割结果。通常,使用分水岭方法会得到不需要的过分割效果,因为梯度图像中存在大量的区域极小值,尽管在混合梯度中这些极小值得到了很大的抑制,但仍然无法避免这种现象。本文采用 H-minima 标记分水岭变换<sup>[9]</sup>方法,进行图像的分割,通过设定阈值  $h$  来减少分水岭分割产生的冗余区域。

3 实验结果与分析

使用本文方法对多幅高分辨率彩色遥感图像

进行分割实验,均能取得较好的结果,现取 3 幅具有代表性的图像,验证本文算法的有效性,一幅图像用于验证本文的算法的中间过程和结果,另两幅图像用于算法比较。

3.1 本文方法的结果

本文选择的高分辨率彩色遥感图像数据为美国佛罗里达州坦帕湾区域的某一部分,分辨率为 0.32 m,尺寸为 800 像素  $\times$  600 像素。该图具有不透水层、植被和水体等地物。根据本文提出的方法,首先求出双边滤波的平滑尺度,得到的局部尺度如图 4(a)所示,3 个波段的全局尺度按式(9)计算为[7.78, 2.35, 3.67]。从图 4(a)中可以看出,本文的局部尺度计算方法在纹理区域尺度值较大,在光谱强度均匀区域尺度值小,这样能够有效降低纹理区域的梯度影响,平滑纹理区域。

对图像进行分水岭分割,统一采用极小值抑制阈值  $h=0.015$ ,双边滤波的空间滤波模板大小设为 9,而局部尺度统计窗口大小设为 15。对图像分别使用光谱强度梯度、纹理梯度以及混合梯度进行分割,从视觉定性角度和评价指数定量角度对结果进行分析。

图 4 为三种梯度的最终分割结果。图 4 (b) 为经过双边滤波平滑后得到的梯度图像,噪声和纹理得到有效抑制,得到光谱强度梯度。分割结果如图 4 (f)所示,图中非纹理区域如不透水层等的边界得到有效分割,边界定位准确;而在纹理区域,如树林、草地等,不能有效分割。图 4 (c)为经过形态学膨胀后的纹理梯度。图 4 (g)为在纹理梯度上实现的分水岭分割。从图 4(g)中可以看出,纹理边缘识别效果好,但是对建筑物、道路等非纹理区域边缘定位差。图 4 (d)为将光谱强度梯度和纹理梯度融合得到的混合梯度,利用该梯度图使用分水岭变换得到的分割结果结合了光谱强度梯度和纹理梯度的优点,对物体的边缘识别分割效果好,如图 4 (h)所示,明显优于只采用一种视觉信息的梯度分割方法。

表 1 比较了三种方法产生的对象数量,同时采用文献[3]提出的 GS(global scare)指数对分割结果进行评价。GS 指数反映了对象内部均质性和对象间异质性,该值越小,表明分割结果越好。从表1中可以看出,三种方法产生的对象数

表 1 三种梯度分割结果

Tab.1 Segmentation Results of the Three Gradients

	光谱梯度	纹理梯度	混合梯度
对象数量	476	543	560
GS 指数	0.852	0.731	0.671



量均在 500 左右。GS 指数表明混合梯度在分割结果上优于单一梯度信息,说明本文算法能将两

种视觉信息有效融合,能够准确定位纹理区域边界和光谱强度区域边界。

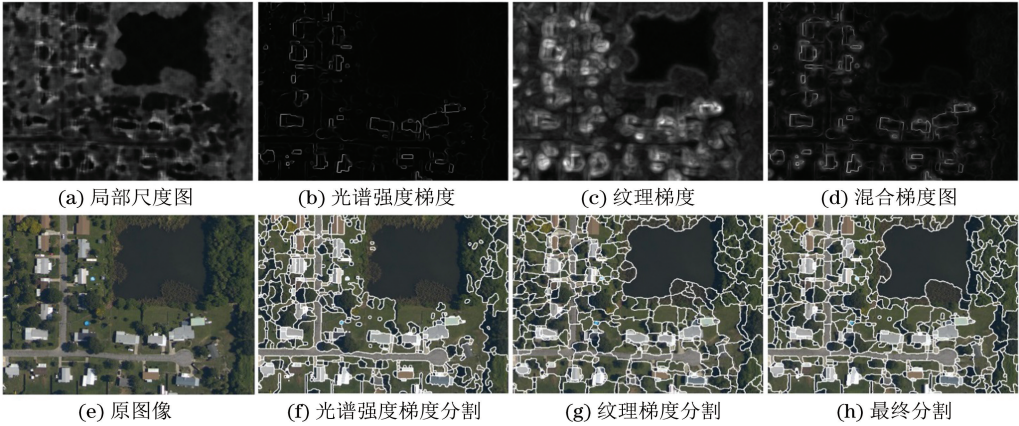


图 4 本文方法分割结果

Fig.4 Results of Proposed Segmentation Method

本文方法是对传统分水岭方法的改进,同样采用 H-minima 标记分水岭方法,直接从原图像中利用彩色梯度算子得到梯度图,进行分割,结果如图 5 所示。

方法使用最为普遍的遥感图像预分割方法,在 eCognition 软件及国内外遥感领域中广泛应用。下面将本文方法与这两种方法进行结果比较。

分别使用三种方法对两幅遥感图像进行分割,控制分割参数以产生相同数量的对象或区域,使用边界命中率(boundary recall, BR)<sup>[20]</sup>来衡量方法分割的边界定位准确性。参考数据采用基于人工分割的结果,BR 值越高,分割效果越好。使

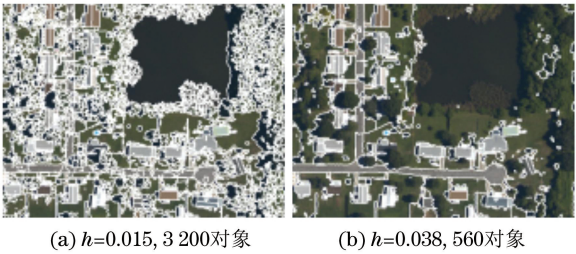


图 5 传统分水岭方法结果

Fig.5 Results of Traditional Watershed Transform

图 5 中可以看出,在设置相同  $h$  值时,图 5 (a)存在严重的过分割现象;而当控制对象个数与图 4 (h)相同时,图 5 (b)只能对图像光谱差异大的物体(人造建筑等)进行分割,对树木草地等纹理对象不能识别,说明传统分水岭方法在处理噪声和纹理区域方面效果差,而本文的方法可以取得较好的效果。

3.2 与传统方法的比较和分析

将本文方法与传统方法进行对比,使用的实验数据包括:①美国 San Diego 居民区,分辨率为 0.3 m,截取区域为 512 像素×512 像素,特点是光谱强度信息显著;②苏黎世的 Hoenggerberg 城区,分辨率0.07 m,截取的区域尺寸为 800 像素×600 像素,特点是分辨率高,纹理信息显著。JSEG 方法<sup>[19]</sup>是计算机视觉领域经典的彩色图像分割方法,多分辨率分割(multiresolution segmentation,MS)方法是当前面向对象的图像分析



图 6 三种方法在 SanDiego 居民区的分割结果

Fig.6 Segmentation Results of the Three Methods in Sandiego Residential Area

用文献[3]提出的 GS 指标对图像的过分割和欠分割进行评价,该指标值越低,说明过分割与欠分割效应越小,分割效果越好。

图 6 为三种方法分别生成 250 和 500 个分割区域(对象)的分割结果。从图 6 中可以看出,多分辨率方法容易在地物边缘处产生过分割;JSEG 方法在增加分割区域后也会在非纹理区域产生过分割现象;本文方法在分割区域增加时,会增加纹理区域的分割。从表 2 的评价指标可以看出,本文方法的边界命中率明显高于 MS 和 JSEG 方法,且过分割和欠分割效应在三种方法中最低。

表 2 SanDiego 居民区分割评价指标

Tab.2 Evaluation Index for Segmentation Results of the Sandiego Residential Aera

区域数	MS		JSEG		本文	
	BR	GS	BR	GS	BR	GS
250	0.837	0.803	0.744	0.785	0.852	0.762
500	0.923	0.834	0.816	0.821	0.941	0.809

图 7 中的遥感图像分辨率高,增加了地物的细节,使得地物更偏向于呈现纹理特性,从表 3 的评价指标可以看出,JSEG 方法的边界命中率较图 5 的结果提高,说明JSEG方法更适合分割彩色纹理图像。在改变分割对象数量时,MS 和 JSEG 方法的分割对象尺度改变,明显的地物如屋顶的烟囱等,会被更大尺度对象合并,说明方法

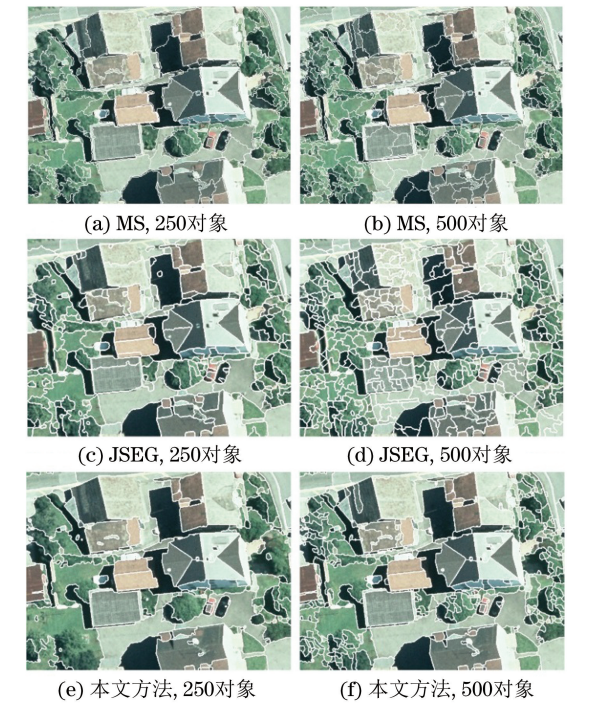


图 7 三种方法在 Hoenggerberg 城区的分割结果

Fig.7 Segmentation Results of the Three Methods in Hoenggerberg Urban Area

是尺度相关的;而本文方法在改变分割对象数时,能够保持这些地物不被合并,减少了尺度相关性,与 HVS 分析过程和结果更加相符合。

表 3 Hoenggerberg 城区分割评价指标

Tab.3 Evaluation Index for Segmentation Results of the Hoenggerberg Residential Aera

区域数	MS		JSEG		本文	
	BR	GS	BR	GS	BR	GS
250	0.876	0.963	0.883	0.816	0.879	0.757
500	0.930	0.978	0.932	0.911	0.951	0.846

4 结 语

本文提出了一种针对高分辨率彩色遥感图像的分割方法,综合利用高分辨率图像的光谱强度信息和纹理信息,与 HVS 系统分析图像的过程相近,减少了图像分割过程中的尺度依赖性,在增强边界定位准确性的同时,减少图像的过分割和欠分割效应。本文方法提出的改进双边滤波模型,能够针对高分辨率图像中的纹理和噪声进行有效平滑和处理。

虽然该方法能够提高遥感图像的分割效果,但仍然存在需要改进之处,例如算法的运算效率受到 Gabor 纹理提取的影响,如何提高纹理信息的提取效率,如何自动选取分水岭分割的区域数量,如何针对不同图像改变滤波的窗口尺寸等,都是需要继续研究和解决的问题。

参 考 文 献

[1] Li D, Zhang G, Wu Z, et al. An Edge Embedded Marker-based Watershed Algorithm for High Spatial Resolution Remote Sensing Image Segmentation [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2010, 19(10): 2 781-2 787

[2] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, et al. Multi-resolution, Object-oriented Fuzzy Analysis of Remote Sensing Data for GIS-ready Information [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 58(3-4): 239-258

[3] Johnson B, Xie Z. Unsupervised Image Segmentation Evaluation and Refinement Using a Multi-scale Approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(4): 473-483

[4] Beghdadi A, Larabi M C, Bouzerdoum A, et al. A Survey of Perceptual Image Processing Methods [J]. *Signal Processing: Image Communication*,



- 2013, 28(8): 811-831
- [5] Tan Yumin, Huai Jianzhu, Tang Zhongshi. An Object-oriented Remote Sensing Image Segmentation Approach Based on Edge Detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1 624-1 627 (谭玉敏, 槐建柱, 唐中实. 一种融合边缘信息的面向对象遥感图像分割方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1 624-1 627)
- [6] Ilea D E, Whelan P F. Image Segmentation Based on the Integration of Colour-texture Descriptors-A Review [J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(10): 2 479-2 501
- [7] Chen Qihao, Liu Xiuguo, Chen Qi. An Intergrated Multi-Feature Segmentation Method of Polarimetric SAR Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(12): 1 419-1 424 (陈启浩, 刘修国, 陈奇. 一种综合多特征的全极化 SAR 图像分割方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(12): 1 419-1 424)
- [8] Yin S J, Chen X L. Reducing Boundary Effects in Image Texture Segmentation Using Weighted Semi-variogram [C]. *GeoComputation*, Ireland, 2007
- [9] Soille P. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications* [M]. New York :Springer-verlag, 2003
- [10] Jain P, Tyagi V. A Survey of Edge-preserving Image Denoising Methods [J]. *Information Systems Frontiers*, 2014, 1-12
- [11] Rousseeuw P J, Leroy A M. *Robust Regression and Outlier Detection* [M]. England:Wiley, 1987
- [12] Tsotsios C, Petrou M. On the Choice of the Parameters for Anisotropic Diffusion in Image Processing [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(5): 1 369-1 381
- [13] Nikolova M. Markovian Reconstruction Using a GNC Approach [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 1999, 8(9): 1 204-1 220
- [14] Black M J, Sapiro G, Marimont D H, et al. Robust Anisotropic Diffusion [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 1998, 7(3): 421-432
- [15] Liu Y, Goto S, Ikenaga T. A Robust Algorithm for Text Detection in Color Images [C]. Eighth International Conference on Document Analysis and Recognition, Seoul, 2005
- [16] Clausi D A, Jernigan M. Designing Gabor Filters for Optimal Texture Separability [J]. *Pattern Recognition*, 2000, 33(11): 1 835-1 849
- [17] Nava R, Escalante-Ramírez B, Cristóbal G. A Comparison Study of Gabor and Log-Gabor Wavelets for Texture Segmentation [C]. International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. IEEE, Dubrovnik, 2011
- [18] Corcoran P, Winstanley A, Mooney P. Complementary Texture and Intensity Gradient Estimation and Fusion for Watershed Segmentation [J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, 22(6): 1 027-1 045
- [19] Deng Y, Manjunath B. Unsupervised Segmentation of Color-texture Regions in Images and Video [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2001, 23(8): 800-810
- [20] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-art Superpixel Methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2 274-2 282

## A Watershed Algorithm Combining Spectral and Texture Information for High Resolution Remote Sensing Image Segmentation

ZHANG Jianting<sup>1</sup> ZHANG Limin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Navy Armament Academy, Beijing 102249, China

<sup>2</sup> Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China

**Abstract:** High resolution remote sensing image segmentation methods that consider only the spectral information in the region growing process often lead to over segmentation and low boundary precision. To overcome that, a watershed transform algorithm which combines spectral information and texture information is proposed. At first, the spectral intensity gradient and the texture gradient have to be extracted from the input image. For that purpose, a new bilateral filtering model is introduced. This

(下转第 467 页)



A Method of Image Texture Texton Classification with Markov Random Field

ZHENG Zhaobao<sup>1</sup> PAN Li<sup>1</sup> ZHENG Hong<sup>2</sup>

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China  
2 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** In this article a new method based on MRF to classify image texture texton has been put forward . The constraint relationship between the center pixel feature value and the neighbor pixels feature value in MRF can reflect the features of image texture texton as well as different MRF parameters. Standard deviation based on the MRF parameter of the same category is the smallest. So we can use this property to classify image texture. By comparing the different experimental scheme and different classification method, we can come to the conclusion that the method of image texture element classification proposed in this paper has certain advantages, and it is a good method of image classification.

**Key words:** image texture texton; Markov random field;image texture classification

**First author:** ZHENG Zhaobao, professor, PhD supervisor, specializes in photogrammetry and remote sensing, image analysis and interpretation, and the application of evolutionary computation. E-mail: zhengzb@whu.edu.cn  
**Foundation support:** The Major State Basic Research Development Program of China (973 Program), No.2012CB719905.

.....

(上接第 455 页)

edge preserving algorithm can remove noise of images. Meanwhile, it can also remove texture from images by using a local smoothing scale parameter. By adapting this filtering algorithm on the original image and the Gabor texture feature images, the spectral information and texture information are extracted separately. Then with edge detection algorithm, the spectral intensity gradient and texture gradient are obtained. Finally a gradient fusion strategy by morphological dilation and watershed transform are performed in succession. Experiments are carried out on three high resolution color remote sensing images. Compared with JSEG and multi-resolution segmentation methods, the proposed method has a higher boundary precision and can reduce the over segmentation and under segmentation effects.

**Key words:** remote sensing image segmentation; bilateral filtering; Gabor filter; gradient; watershed transform; morphological dilation

**First author:** ZHANG Jianting, PhD, specializes in the theories of remote sensing image analysis and system simulation technology. E-mail: changjianting@hotmail.com  
**Corresponding author:** ZHANG Limin, PhD, professor. E-mail: iamzlm@163.com  
**Foundation support:** The Taishan Scholar Special Foundation, No. ts201511020.