

自适应形态学与多尺度结合的植被区域 遥感图像分割方法

李新娜, 王小鹏*, 魏统艺

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 为减小植被区域遥感图像分割误差, 解决植被区域中待分割目标因覆盖度和噪声等因素造成的过分割和欠分割问题, 提出了一种自适应形态学与多尺度结合的植被区域遥感图像分割方法。首先, 通过 general adaptive neighborhood (GAN) 结构元素构造膨胀和腐蚀运算, 推导出 GAN 形态学开、闭运算; 然后, 构造一种 GAN 形态学复合型滤波器, 填充植被覆盖度不足的孔洞, 减小噪声对图像的干扰; 最后, 通过多尺度分割算法, 对遥感图像植被区域进行分割。实验结果表明: 所提方法能够有效避免欠分割和过分割现象且能对遥感图像植被区域进行准确分割; 与传统多尺度分割和传统形态学与多尺度结合方法相比, 所提方法的分割误差较小。

关键词 图像分割; 遥感; 植被; 形态学滤波; 多尺度

中图分类号 TP79

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2428001

Multiscale and Adaptive Morphology for Remote Sensing Image Segmentation of Vegetation Areas

Li Xinna, Wang Xiaopeng*, Wei Tongyi

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract For reducing the segmentation error in remote sensing images of vegetation regions and for solving over-segmentation and under-segmentation of targets caused by various factors such as coverage and noise, an adaptive morphology combined with multiscale remote sensing image segmentation method for vegetation regions is proposed. First, general adaptive neighborhood (GAN) is used to construct dilation and corrosion operations, and GAN morphological opening and closing operations are derived. Then, a GAN morphological compound filter is constructed to fill the holes with insufficient vegetation coverage to reduce the interference of noise on the images. Finally, the remote sensing image of the vegetation region is segmented using the multiscale segmentation algorithm. The experimental results show that the proposed method can effectively avoid the phenomenon of under-segmentation and over-segmentation. Moreover, it can effectively segment the remote sensing images of vegetation areas with different coverage. Compared with the traditional multiscale segmentation method and traditional morphological and multiscale combined method, the proposed method has higher segmentation accuracy.

Key words image segmentation; remote sensing; vegetation; morphological filtering; multi-scale

1 引言

利用遥感图像对植被资源进行监测和信息提取对人类生存和发展具有重要意义^[1-2]。图像分割(或分类)是遥感图像进行下一步分析和信息提取的重要环节, 分割结果的好坏将影响后续图像分析的准确性, 但由于遥感图像中植被区域存在覆盖度差异和噪声等因

素影响, 容易出现过分割和欠分割问题。针对遥感图像的分割已经提出了许多方法^[3-6], 比如阈值分割、形态学分割、聚类分割及多尺度分割等, 其中多尺度分割是一类较有效的分割方法, 通过自上而下的分割方法逐级合并, 文献^[7-10]运用多尺度分割算法对图像进行了分割。形态学运算被广泛运用于图像分割中, 比如 Tuia 等^[11]利用 6 个基本形态运算(开和闭、重构开和

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-10-16; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61761027)、甘肃省科技计划(20YF8GA036)

通信作者: *wangxp1969@sina.com

闭、顶帽开和闭)对形态学滤波器进行改进,提出的方法结合了简单滤波器和重构滤波器所提供的最佳性能,但是由于使用了固定大小的菱形结构元素,不能适应图像中的所有结构。Awad^[12]提出了一种基于形态学处理的道路提取方法,该方法在分割结果基础上利用形态学处理噪声影响导致的道路不连续或误检问题。在图像分割中,经典形态学依赖固定结构元素,导致结构元素选择对整个分割结果影响较大。遥感图像容易受到噪声的干扰,导致分类精度低,代沁伶等^[13]为改善遥感图像分类结果中的“胡椒盐”现象,利用基于区域多尺度遥感影像分割和马尔可夫随机场的分类方法,避免了“胡椒盐”现象。Desclée等^[14]提出了一种基于统计对象的森林变化检测方法,该方法利用基于同质性定义的通用分割算法结合局部和全局优化技术,实现了图像分割,分割精度达90%以上,但只能选择一个分割尺度进行分析,容易导致对多边形过度分割并且不能够对大小和形状进行精确测量。Zhou等^[15]提出了一种基于全局空间信息的遥感图像自适应分割算法,实现了遥感图像分割,通过自适应解决了传统形态学结构元素大小、形状固定不变的问题。

综上,在获取遥感图像过程中受到环境和采集设

备等因素影响,得到的图像的背景信息复杂,容易受到噪声干扰,且遥感图像植被区域因覆盖度不足存在孔洞。如果直接利用多尺度分割方法对植被区域进行分割,可能存在过分割和欠分割问题,进而影响分割精度。为此,本文提出了一种利用自适应形态学与多尺度相结合的植被区域遥感图像分割方法对遥感图像植被区域进行分割。通过 general adaptive neighborhood (GAN) 结构元素来构造膨胀、腐蚀运算,进而衍生出 GAN 形态学复合滤波器;通过 GAN 形态学复合滤波后,在保持区域边界不变的同时填充植被覆盖度不足的孔洞,减小噪声对图像的干扰,确定最佳的分割尺度,对遥感图像进行分割。本研究可以为统计植被区域变化情况提供理论方法基础。

2 所提方法内容

2.1 所提方法流程

遥感图像中植被区域因自身覆盖度不同,且在获取图像时可能存在噪声干扰,影响对植被区域的分割精度。为了完整分割遥感图像中的植被区域,有效解决植被过分割和欠分割问题,采用 GAN 形态学复合滤波器与多尺度分割相结合的方法,分割流程如图 1 所示。

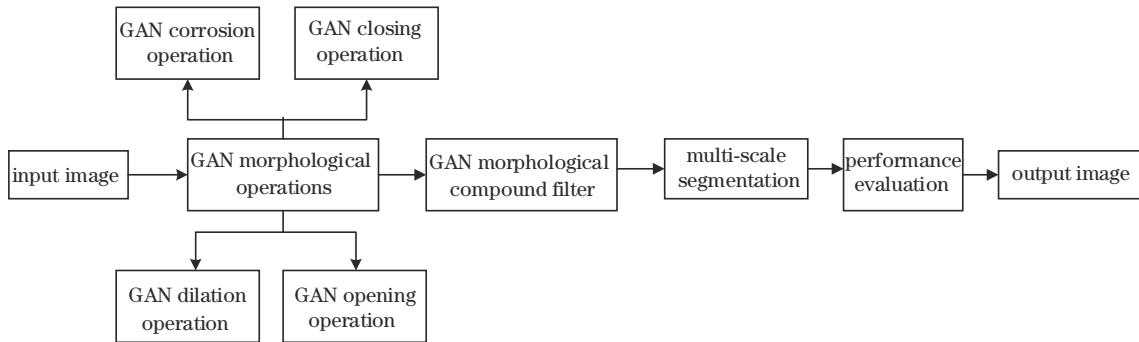


图 1 所提方法的基本流程

Fig. 1 Basic process of the proposed method

2.2 GAN 形态学复合滤波

含有植被的遥感图像因植被覆盖度不足导致植被区域存在孔洞或细小连接,容易造成植被区域出现过分割和欠分割现象。因此,利用 GAN 形态学^[16-20]复合滤波器在保持植被区域边界不变的情况下填充孔洞,减小噪声的干扰,使得图像平滑,达到更好的分割效果。传统形态学所用结构元素大小、形状固定不变,可能造成一些大的细节被删除,GAN 形态学利用其自适应结构元素优势,在一定程度上可以改善这一问题。

GAN 形态学的基本思想是利用自适应结构元素代替固定大小和形状的结构元素,其大小和形状是依据图像的局部目标而自适应调整的。GAN 形态学根据亮度和对比度同质性容忍差标准从自适应领域中选择结构元素。对于 GAN 形态学膨胀而言,取自适应结构元素中的像素最大值;而腐蚀与膨胀则相反,取最

小值。自适应形态学结构元素是根据被探测点的位置以及具体的输入图像自适应变化的,从待处理图像中随机选取两个点作为原始图像待处理的种子点,以亮度为相关的映射分析标准,当同质性容忍度 $m_0=20$ 时,种子点所对应自适应领域。

GAN 形态学膨胀和腐蚀的定义分别为

$$D_{m_0}^h(f) = \sup_{w \in N} f(w), \quad (1)$$

$$E_{m_0}^h(f) = \inf_{w \in N} f(w), \quad (2)$$

式中: N 表示 GAN 结构元素; w 代表像素点; f 为图像; h 为相关映射。开闭、闭开运算可由膨胀、腐蚀组合得到,定义分别为

$$O_{m_0}^h(f) = f \circ N = (f \ominus N) \oplus N, \quad (3)$$

$$C_{m_0}^h(f) = f \bullet N = (f \oplus N) \ominus N, \quad (4)$$

$$OC_{m_o}^h(f) = O_{m_o}^h \circ C_{m_o}^h(f), \quad (5)$$

$$CO_{m_o}^h(f) = C_{m_o}^h \circ O_{m_o}^h(f), \quad (6)$$

式中: \oplus 代表形态学膨胀运算; \ominus 代表形态学腐蚀运算; \circ 为形态学开运算; \cdot 为形态学闭运算。

通过 GAN 形态学膨胀、腐蚀、开和闭运算构造一种复合型滤波器。GAN 形态学膨胀和开运算组成的滤波器在消除较亮噪声的同时填充植被覆盖度不足的孔洞; GAN 形态学腐蚀和闭运算组成的滤波器在消除较暗噪声的同时平滑物体区域内部细节。因此, 将 GAN 形态学膨胀、开运算组成的滤波器和 GAN 形态学腐蚀、闭运算组成的滤波器组合在一起可以得到一种消除孔洞、去除小细节、保持大的区域边界不变的 GAN 复合型滤波器, 定义为

$$A = O_{m_o}^h(f) \oplus N + C_{m_o}^h(f) \ominus N. \quad (7)$$

2.3 多尺度分割

遥感图像经过 GAN 形态学复合滤波器后, 植被孔洞被填充, 植被区域内的小细节和噪声的干扰被消除, 在此基础上进行多尺度分割。对于多尺度图像分割, 采用异质性最小的区域合并算法, 该算法是一种自下而上的分割算法, 通过设置分割尺度、波段权重等参数对图像进行分割。多尺度分割中的主要参数包含分割尺度、波段权重和一致性准则。

1) 图像对象整体区域异质性指标的计算公式为

$$h = w_{\text{color}} * h_{\text{color}} + w_{\text{shape}} * h_{\text{shape}}, \quad (8)$$

式中: w_{color} 和 w_{shape} 分别表示光谱因子的权重值和形状因子的权重, 取值范围为 $[0, 1]$, 二者之和为 1; h_{color} 和 h_{shape} 分别表示光谱异质性因子和形状异质性因子。

2) 光谱异质性因子 h_{color} 的计算公式为

$$h_{\text{color}} = \sum_{i=1}^n w_i \sigma_i, \quad (9)$$

式中: n 表示参与图像分割的多光谱波段的总数量; w_i 表示第 i 波段的权重值; σ_i 表示图像第 i 波段灰度值的标准差。

3) 形状异质性因子 h_{shape} 的计算公式为

$$h_{\text{shape}} = w_{\text{smooth}} * h_{\text{smooth}} + w_{\text{comp}} * h_{\text{comp}}, \quad (10)$$

式中: w_{smooth} 和 w_{comp} 分别表示平滑度因子的权重值和紧致度因子的权重值, 取值范围为 $[0, 1]$, 二者之和为 1。

不同的分割尺度对不同类型地物分割的准确度不同, 为了保证植被区域分割完整的同时也能够完整分割其他地物, 需要一个最佳的分割尺度来保证对不同地物的完整分割。ESP2 工具^[21]通过计算不同分割尺度下图像对象同质性的局部方差(LV)的变化率值(ROC)来指示对象分割效果。当 LV 的变化率值达到最大即出现峰值时, 某点对应的分割尺度即为最佳分割尺度^[22-24]。因此, 为确定多尺度分割方法的最佳分割尺度, 借助 ESP2 工具确定图像的最佳分割尺度。

2.4 评价指标

为了定量分析分割性能, 采用分割误差、均方根误差、峰值信噪比和运行时间进行度量。以人工手绘分割结果为标准, 与所提方法分割出的区域面积进行比较, 通过计算面积差衡量分割误差 e , 定义为

$$e = \frac{|S - S_0|}{S_0} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: S 为分割后植被的面积, 单位为 km^2 ; S_0 为人工手绘植被的面积, 单位为 km^2 。

均方根误差(RMSE)是各数据偏离真实值的距离平方和的平均数的开方, 表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (x_j - y_j)^2}, \quad (12)$$

式中: M 是图像大小; x_j 和 y_j 分别是不含噪声及滤波处理后图像的像素值。

峰值信噪比(PSNR)是基于相应像素之间的误差的, 而该误差是基于敏感图像质量评价的误差, 表达式为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{I_{\text{max}}}{E_{\text{RMS}}} \right)^2, \quad (13)$$

式中: I_{max} 表示图像像素灰度的最大值。PSNR 的单位是 dB。PSNR 越大, RMSE 越小, 表明分割后细节损失越少, 噪声平滑效果越好。

3 仿真结果与分析

实验在 Intel 酷睿 I5-9400F CPU 64 位 Win10 的操作系统环境下进行。首先在 MATLAB2015b 软件中对遥感图像进行 GAN 形态学复合滤波, 然后在 eCognition 中对滤波后的遥感图像进行多尺度分割仿真实验。对一幅大小为 355×374 像素、空间分辨率为 20 m、波段数为 RGB 三波段的遥感图像进行 GAN 形态学滤波, 结果如图 2 所示。GAN 形态学膨胀开滤波结果如图 2(b) 所示, 在消除较亮噪声的同时填充植被覆盖度不足的孔洞; GAN 形态学腐蚀闭滤波结果如图 2(c) 所示, 在消除较暗噪声的同时平滑物体内部细节; GAN 形态学复合滤波结果如图 2(d) 所示, 保持植被区域边缘不变的情况下消除了噪声的干扰, 填充了植被覆盖度不足的孔洞。

不同尺度下的分割结果如图 3 所示。由图 3 可知: 当分割尺度越小时, 分割对象越细碎; 当分割尺度越大时, 分割对象越完整。分割尺度为 60 的分割结果如图 3(b) 所示, 其中道路和建筑物被完整分割, 但植被区域存在严重的过分割现象, 把同一块植被分割成多块细碎区域。分割尺度为 150 的分割结果如图 3(c) 所示, 植被区域出现欠分割现象, 把部分道路和建筑物分割为植被。因此, 为能较好分割植被区域的同时避免过分割和欠分割现象, 将 GAN 形态学复合滤波器和多尺度相结合对遥感图像进行分割。

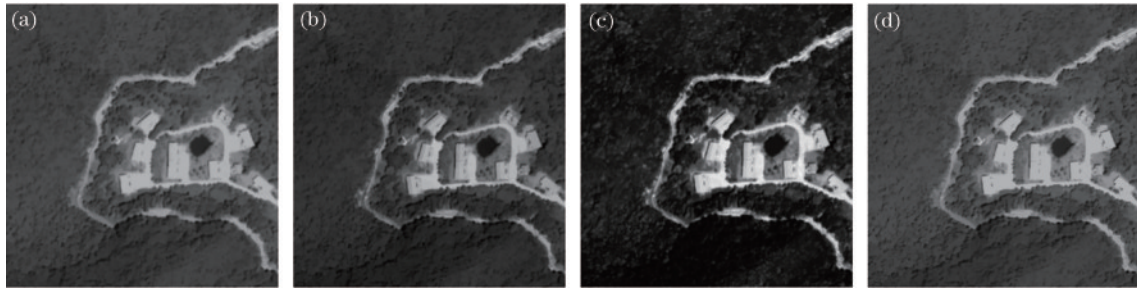


图2 GAN形态学滤波。(a)原始图像;(b)GAN形态学膨胀开滤波;(c)GAN形态学腐蚀闭滤波;(d)GAN形态学复合滤波
Fig. 2 GAN morphological filtering. (a) Original image; (b) GAN morphology dilate-open filtering; (c) GAN morphology erode-close filtering; (d) GAN morphology compound filtering

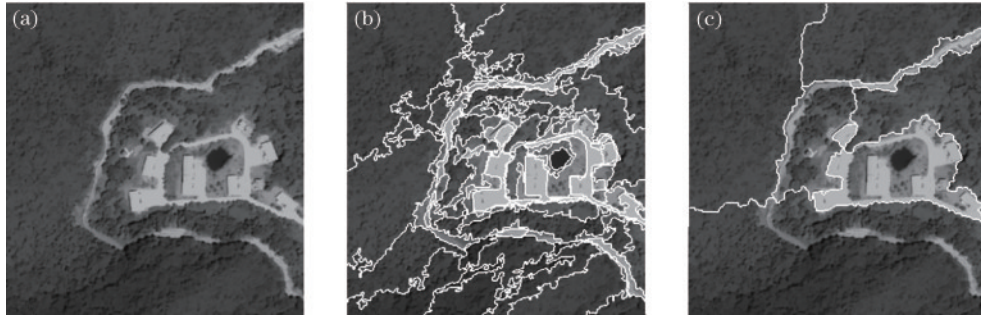


图3 不同尺度下的分割结果。(a)原始图像;(b)分割尺度为60;(c)分割尺度为150
Fig. 3 Results of segmentation at different scales. (a) Original image; (b) segmentation scale is 60; (c) segmentation scale is 150

为验证所提方法的分割效果,从Google earth上截取一幅遥感图像作为研究对象,研究区域主要的地物覆盖类型为植被,包含少量建筑物和道路。对滤波后的图像进行多尺度分割,设置多尺度分割实验参数:形状因子为0.1、紧致度因子为0.5、波段权重为(1, 1, 1)。对研究区域用不同方法进行分割,分割结果如图4所示,其中方法1为传统多尺度分割方法,方法2

为传统形态学复合滤波和多尺度形态学结合的方法。传统多尺度分割结果如图4(b)所示,道路和建筑物区域被分割出来,但植被区域存在严重过分割现象,将同一块植被区域分割为多个区域。传统形态学复合滤波与多尺度形态学结合的方法的分割结果如图4(c)所示,相对于多尺度分割,植被过分割问题有所改善,但删除了一些细节。通过目视解译可以看出所提方法的

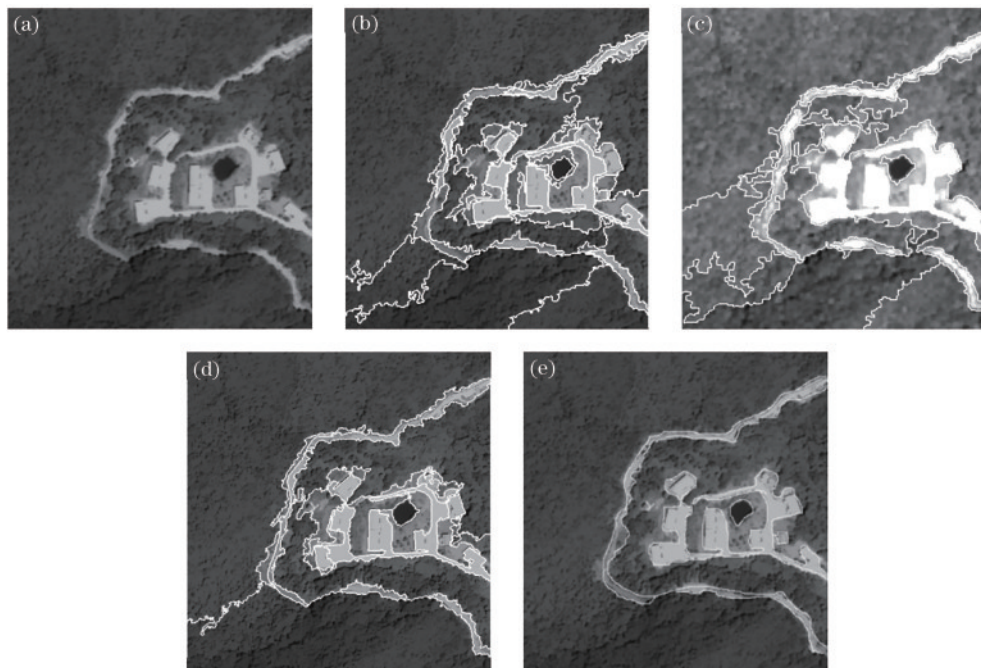


图4 不同方法的分割结果。(a)原始图像;(b)方法1;(c)方法2;(d)所提方法;(e)人工手绘图
Fig. 4 Segmentation results of different methods. (a) Original image; (b) method 1; (c) method 2; (d) proposed method; (e) manual drawing

分割结果[如图 4(d)所示]与人工手绘图分割结果[如图 4(e)所示]大体一致,在一定程度上解决了欠分割问题。

表 1 给出了在图 4 研究区不同方法的分割误差及相关指标。由表 1 可知,所提方法的性能指标优于方

法 1 和方法 2,所提方法的均方根误差为 38.441,峰值信噪比为 37.843 dB,分割误差为 3.189%。结果表明所提方法分割后的细节损失少,噪声平滑效果好,分割较完整,虽然运行时间相对较长,为 3.836 s,但分割误差低于其他两种方法。

表 1 不同方法的分割误差及指标对比

Table 1 Segmentation error and index comparison of different methods

Image size/pixel	Method	RMSE	PSNR /dB	Segmentation error /%	Operation time/ s
355×374	Method 1	56.560	30.119	29.875	1.797
	Method 2	44.403	34.959	18.386	3.088
	Proposed method	38.441	37.843	3.189	3.836

为验证所提方法的适用性,从大量实验中选取 4 幅不同复杂度的遥感图像作为代表图像,如图 5(a)所示。根据植被分布情况,选择了 1 幅植被稀疏的图像和 3 幅植被较茂密的图像,根据图像包含的地物类型由易到难依次排列图像。图像 1 包含植被和土地,其中植被比较稀疏;图像 2 包含水体、植被和道路;图像 3 包含植被、水体和少量的建筑物;图像 4 包含植被、

水体、道路和建筑物等。对 4 幅遥感图像分别采用方法 1、方法 2 和所提方法进行分割,并利用式(11)~(13)对 4 幅遥感图像进行性能评价,分割结果如图 5(b)~(d)所示。

由图 5 可知:方法 1 不能滤除噪声且对于植被区域存在严重的过分割现象;方法 2 丢失了一些细节,植被区域依然存在过分割现象;所提方法可以减小噪声的

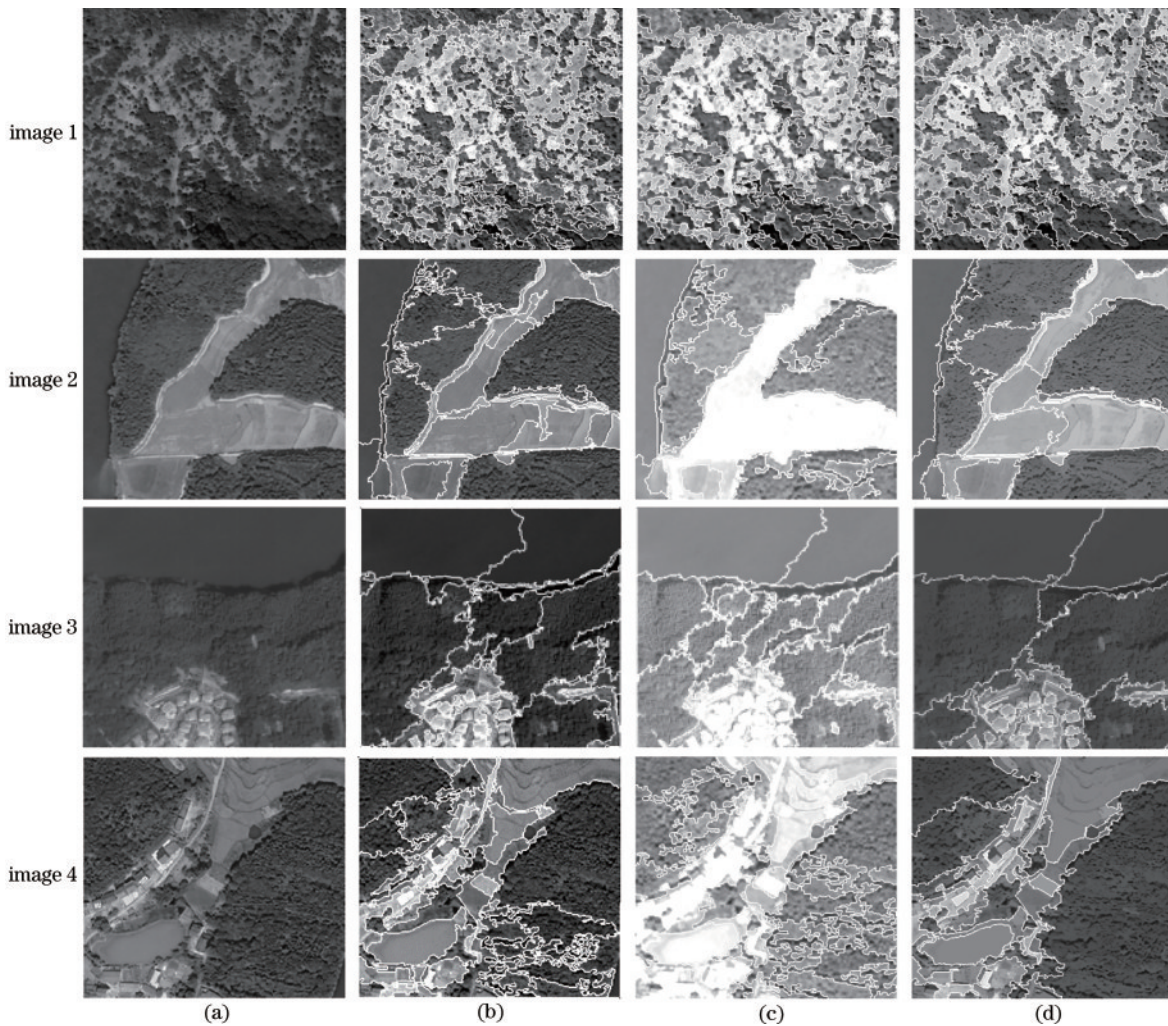


图 5 不同方法对不同复杂度图像的分割结果。(a)原始图像;(b)方法 1;(c)方法 2;(d)所提方法

Fig. 5 Segmentation results of different methods for images with different complexity. (a) Original image; (b) method 1; (c) method 2; (d) proposed method

干扰,对植被区域较完整分割的同时其他地物类型区域也被完整分割,分割误差低于方法 1 和方法 2。不同方法对 4 幅不同复杂度的遥感图像的具体分割误差及相关性能指标如表 2 所示。由表 2 可知:对于图像 1 植被比较稀疏的情况,所提方法效果并不明显;对于其余 3 幅植被区域比较密集的图像,所提方法的分割效果

相较于其余两种方法效果较明显。对于实验中植被区域较密集的情况,图像 3 由于阴影较严重,所提方法对其的分割误差最高,为 6.632%,其余的分割误差均小于 6.632%。实验结果表明,所提方法具有一定的适用性,适用于遥感图像中植被比较密集的区域且面积较大的情况。

表 2 不同方法对不同复杂度图像的分割误差及指标对比

Table 2 Segmentation error and index comparison of different methods for images with different complexity

Image No.	Image size /pixel	Method	RMSE	PSNR /dB	Segmentation error /%	Operation time /s
Image 1	299×277	Method 1	89.470	19.615	27.286	1.986
		Method 2	87.066	21.492	28.386	3.158
		Proposed method	86.534	21.492	22.163	3.936
Image 2	298×277	Method 1	52.383	31.653	18.285	1.628
		Method 2	46.147	34.959	19.942	2.935
		Proposed method	43.424	36.692	3.822	3.683
Image 3	163×152	Method 1	67.128	19.933	25.328	1.986
		Method 2	54.965	22.382	22.875	3.158
		Proposed method	50.703	26.693	6.632	3.936
Image 4	350×300	Method 1	70.987	20.809	25.826	1.882
		Method 2	68.844	25.575	18.785	3.328
		Proposed method	63.446	32.663	4.237	4.026

4 结 论

为了较完整地分割出遥感图像中的植被区域,有效避免欠分割和过分割现象,提出了一种具有 GAN 结构元素的形态学和多尺度分割相结合的分割方法。利用 GAN 结构元素构造膨胀、腐蚀运算,衍生出开、闭运算;通过 GAN 形态学的 4 种基本运算构造 GAN 形态学复合型滤波器,在保持研究区边界不变的情况下滤除噪声的同时填充植被覆盖度不足的孔洞;然后进行多尺度分割,实现对遥感图像的分割。选取不同复杂度的遥感图像,对所提方法、多尺度分割方法、传统形态学复合滤波结合多尺度的分割方法进行对比,实验结果表明,所提方法对于不同类型的植被区域分布可以有效避免过分割和欠分割现象,并且可以将遥感图像中植被区域较完整地分割出来,分割误差为 6.632%。

参 考 文 献

- [1] 吴楠,李增元,廖声熙,等.国内外林业遥感应用研究概况与展望[J].世界林业研究,2017,30(6):34-40.
Wu N, Li Z Y, Liao S X, et al. Current situation and prospect of research on application of remote sensing to forestry[J]. World Forestry Research, 2017, 30(6): 34-40.
- [2] 王传立,张晓芳,唐翊,等.基于多核极限学习机的遥感影像林地信息提取[J].中南林业科技大学学报,2018,38(9):20-25.

Wang C L, Zhang X F, Tang N, et al. Hyperspectral remote sensing images classification based on multi-kernel extreme learning machine[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(9): 20-25.

- [3] Wu Y H, Zhang X, Zheng H X, et al. Investigating changes in lake systems in the south-central Tibetan Plateau with multi-source remote sensing[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3): 337-347.
- [4] 戴媛,易本顺,肖进胜,等.基于改进旋转区域生成网络的遥感图像目标检测[J].光学学报,2020,40(1): 0111020.
Dai Y, Yi B S, Xiao J S, et al. Object detection of remote sensing image based on improved rotation region proposal network[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111020.
- [5] Wanto A, Rizki S D, Andini S, et al. Combination of Sobel+Prewitt edge detection method with Roberts+Canny on passion flower image identification[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1933(1): 012037.
- [6] Tian R, Sun G L, Liu X C, et al. Sobel edge detection based on weighted nuclear norm minimization image denoising[J]. Electronics, 2021, 10(6): 655-669.s
- [7] Karydas C G. Optimization of multi-scale segmentation of satellite imagery using fractal geometry[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(8): 2905-2933.
- [8] Jasiewicz J, Stepinski T, Niesterowicz J. Multi-scale segmentation algorithm for pattern-based partitioning of large categorical rasters[J]. Computers & Geosciences, 2018, 118: 122-130.

- [9] 王玉, 李玉, 赵泉华. 基于区域的多尺度全色遥感图像分割[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 535-541.
Wang Y, Li Y, Zhao Q H. Region-based multiscale segmentation of panchromatic remote sensing image[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 535-541.
- [10] Piralilou S T, Shahabi H, Jarhani B, et al. Landslide detection using multi-scale image segmentation and different machine learning models in the higher Himalayas [J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2575.
- [11] Tuia D, Pacifici F, Kanevski M, et al. Classification of very high spatial resolution imagery using mathematical morphology and support vector machines[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(11): 3866-3879.
- [12] Awad M M. A morphological model for extracting road networks from high-resolution satellite images[J]. Journal of Engineering, 2013, 2013: 243021.
- [13] 代沁伶, 罗斌, 郑晨, 等. 区域多尺度马尔可夫随机场的遥感影像分类[J]. 遥感学报, 2020, 24(3): 245-253.
Dai Q L, Luo B, Zheng C, et al. Regional multiscale Markov random field for remote sensing image classification[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(3): 245-253.
- [14] Desclée B, Bogaert P, Defourny P. Forest change detection by statistical object-based method[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1/2): 1-11.
- [15] Zhou Y N, Li J, Feng L, et al. Adaptive scale selection for multiscale segmentation of satellite images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(8): 3641-3651.
- [16] Debayle J, Pinoli J C. General adaptive neighborhood image processing: part I: introduction and theoretical aspects[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2006, 25(2): 245-266.
- [17] Debayle J, Presles B. Rigid image registration by general adaptive neighborhood matching[J]. Pattern Recognition, 2016, 55: 45-57.
- [18] Wang X, Wang G Q. Hyperspectral band selection based on adaptive neighborhood grouping and local structure correlation[J]. Journal of Sensors, 2021, 2021: 5530385.
- [19] Teng Y D, Zhang Y, Chen Y S, et al. Adaptive morphological filtering method for structural fusion restoration of hyperspectral images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(2): 655-667.
- [20] Makhlof Y, Daamouche A. Automatic generation of adaptive structuring elements for road identification in VHR images[J]. Expert Systems With Applications, 2019, 119: 342-349.
- [21] Drăguț L, Tiede D, Levick S R. ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(6): 859-871.
- [22] 刘金丽, 陈钊, 高金萍, 等. 高分影像树种分类的最优分割尺度确定方法[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 95-104.
Liu J L, Chen Z, Gao J P, et al. Research on the method of determining the optimal segmentation scale for tree species classification of high-resolution image[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(11): 95-104.
- [23] Ming D P, Li J, Wang J Y, et al. Scale parameter selection by spatial statistics for GeOBIA: using mean-shift based multi-scale segmentation as an example[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 106: 28-41.
- [24] Yang J, Li P J, He Y H. A multi-band approach to unsupervised scale parameter selection for multi-scale image segmentation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 94: 13-24.