

基于自适应全局阈值融合标记的遥感图像建筑群分割*

李丽 柴文婷 梅树立

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对分割遥感图像建筑群时,标记不完全所产生的过分割和欠分割并存问题,提出一种基于自适应全局阈值融合标记的图像分割算法。该算法根据建筑群的分布和纹理特点,利用小波变换提取图像梯度,通过形态学重构对梯度图像进行滤波;采用局部极小值法提取背景标记,并应用自适应全局阈值法提取建筑群标记。采用逻辑运算进行标记融合,用融合后的标记修改加权像素的 Sobel 梯度图实现精准分割。实验结果表明,该算法能够弥补形态学滤波梯度图的局部极值标记不足问题,抑制了建筑群的过分割和欠分割,准确地将建筑群从背景中提取出来,分割正确率达到 90.7%。

关键词: 遥感图像 建筑群 图像分割 形态学 融合标记 自适应全局阈值
中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2013) 07-0222-07

Segmentation of Remote Sensing Images Based on Adaptive Global Threshold and Fused Markers

Li Li Chai Wenting Mei Shuli

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the method of adaptive global threshold and markers fusion, an algorithm was proposed in order to solve the problems of over-segmentation and the under-segmentation caused by incomplete marking, which might occur concurrently during the segmentation of remote sensing building images. First, the algorithm was used in wavelet transform to generate image gradient according to the distribution and texture characteristics of buildings, and the generated gradient image was filtered through morphological reconstruction. Then, the background markers were extracted by local minimum and the building makers by adaptive global threshold. After both markers were fused, they were used to modify the weighted pixel Sobel gradient image for accurate image segmentation. The experimental results demonstrated that the algorithm could make up for a lack of the local extreme marker, and significantly inhibited both over-segmentation and the under-segmentation. As a result, the segmentation accuracy reached to 90.7% .

Key words: Remote sensing images Buildings Image segmentation Morphological reconstruction
Fused marker Adaptive global threshold

引言

遥感图像分割是地物分类和识别的基础。运用图像分割技术对地物进行划分,从而获取地物信息,并利用这些信息进行地形统计、分类和识别,是土地

资源配置、环境监测、地理信息更新的重要手段。建筑物是一类重要的基础地理信息,在地理规划、农业经济活动中占有举足轻重的地位,建筑物通常成群出现,其周围多是农田、山脉、湖泊等纹理平坦的目标,二者在遥感图像中形成明显的差异。然而,建筑

收稿日期: 2013-03-30 修回日期: 2013-04-15
* 国家自然科学基金资助项目(41171337)和现代农业产业技术体系建设专项基金资助项目(nycyt-x-30)
作者简介: 李丽,教授,博士,主要从事计算机图形图像处理技术研究,E-mail:lilio@263.net

群无统一区域边缘、内部纹理梯度大且呈类周期性，因此如何对建筑群进行自动提取和描述是地物分类和识别的基础。

基于标记的图像分割是一种区域分割算法，这类算法经过多年研究，得到了不断改进和发展，在农业上应用广泛^[1~4]，其改进多是集中在分割前的预处理^[5~8]和分割后的区域合并^[9~10]方面。将这类方法应用到遥感图像分割时，对于山脉、厂房、农田、湖泊等内部纹理梯度变化小且区域边缘明显的目标物，具有较好的分割效果，但应用到建筑群的分割时，不能完全提取标记，导致过分割和欠分割并存。这种情况既无法采用预处理去提高标记的精确度，也无法采用区域合并解决。

分割区域是以标记为基准位置形成的，标记的不精确直接影响分割结果，改善标记提取方法已成为实现准确分割的关键。对此，许多学者试图根据图像的特征，探索采用新的标记提取方法解决上述问题^[11~13]。本文在分析建筑群图像的灰度特征后，在局部极值标记的基础上，采用自适应全局阈值法进行融合标记改善标记的提取方法，准确地将建筑群从背景图像中提取出来，解决由标记引起的过分割和欠分割问题。

1 基于标记的图像分割算法及问题分析

目前基于标记的分割算法的一般步骤是：梯度图像的获取，梯度图像滤波，获取局部极小值标记，强制最小梯度图像的标记位置，获取修正后的梯度图像的分水岭脊线实现分割。以图 1 所示遥感图像为分析对象，分析建筑群提取过程及存在的问题。



图 1 含建筑群的遥感图像

Fig. 1 Remote sensing image with buildings

1.1 形态学重构滤波

1.1.1 机理

重构滤波是一种涉及到 2 幅图像（标记图像和掩模图像）和 1 个结构元素的形态学变换。

设 g 是掩模图像， I 是标记图像， b 是结构元素，重构分为膨胀重构 $R_I^{\oplus}(g)$ 和腐蚀重构 $R_I^{\ominus}(g)$ ，重构的迭代过程为^[14]：

(1) h_1 初始化为标记图像 I 。

(2) 创建结构元素 b 。

(3) 重复。若是膨胀重构，执行

$$h_{k+1} = (h_k \oplus b) \cap g \tag{1}$$

式中 $\oplus$ ——膨胀操作 $\cap$ ——逻辑“与”运算

若是腐蚀重构，执行

$$h_{k+1} = (h_k \ominus b) \cup g \tag{2}$$

式中 $\ominus$ ——腐蚀操作

$\cup$ ——逻辑“或”运算

直到 $h_{k+1} = h_k$ 。

对灰度图像 $F(x,y)$ 进行重构开闭操作

$$R_o(F) = R_F^{\oplus}(F \ominus b) \tag{3}$$

$$R_c(F) = R_F^{\ominus}(F \oplus b) \tag{4}$$

与一般的形态学开闭不同，由重构做开运算， $(h_k \oplus b) \cap (F \ominus b)$ 的“ $\cap$ ”迭代操作能准确恢复腐蚀后的形状，保持图像的精度。同理，由重构做闭运算， $(h_k \ominus b) \cap (F \oplus b)$ 的“ $\cup$ ”迭代操作能准确还原膨胀后的图像^[15]。

1.1.2 滤波后图像的灰度分析

梯度图经过形态学重构滤波前后的结果及对应的灰度直方图如图 2 所示。

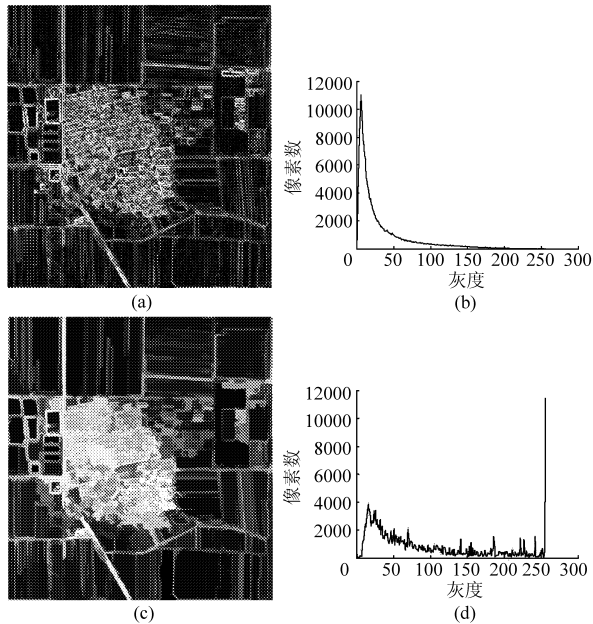


图 2 形态学滤波前后的灰度对比

Fig. 2 Comparison of gray before and after morphology

(a) 梯度图 (b) 梯度的灰度直方图

(c) 形态学滤波梯度图 (d) 梯度滤波后的灰度直方图

从图 2a 中可以看出，建筑群在梯度图像中呈现为密集交错的高灰度边缘，由对应的灰度直方图（图 2b）可知，图像的灰度集中在 0~50，整个图像偏暗，灰度较高的边缘在图像中所占的比例并不高，曲线呈单一峰。

由图 2c 可知，经过形态学重构滤波后，图像的

整体灰度提高,对比度增强,建筑群内部暗噪声得以消除,形成了若干个连通的边缘域,与背景差异显著。如对应的灰度直方图(图2d)所示,低灰度对应平滑的背景区域,灰度集中在0~100,灰度范围宽且分布均衡;高灰度对应边缘,由于暗噪声的消除,与滤波前相比所占比例大幅提升,灰度集中在250左右,灰度范围窄。曲线整体呈双峰,两峰峰值差异显著。经过统计多幅类似图像的直方图,证实这样的分布很普遍,对于这类图像,更适合采用自适应全局阈值法提取建筑群^[16]。

1.2 局部极小值标记在分割中存在的问题

1.2.1 存在问题成因

标记是一个连通分量,局部极小值标记是基于四连通的。图3为遥感图像中背景目标和建筑群目标的局部极小值标记形成原理图,图3a代表灰度均匀统一的背景目标区域,区域中任意像素A均能与任意像素B形成统一的四连通域,因此能够形成整块的局部极值域,从而这类目标物能够得到整体分割。图3b代表建筑群目标,这类目标区域分散,各个小目标形成的标记彼此孤立,像素A和像素B无法形成较为统一的四连通极值域,且某些孤立的区域会当作噪声处理掉,容易造成标记的遗漏。

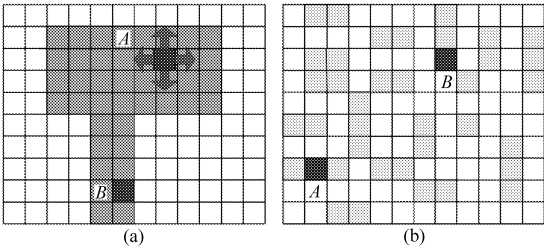


图3 局部极值标记分析

Fig.3 Analysis of local extreme markers

(a) 背景图像 (b) 建筑群图像

1.2.2 由不良标记产生的不良分割

由以上分析可知,在含建筑群的遥感图像中,背景目标能够形成四连通域并作为整块标记出来,但建筑群的标记不理想,如图4a所示。

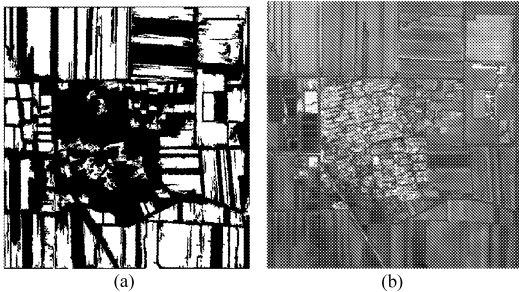


图4 不良标记及分割结果

Fig.4 Inadvisable markers and segmentation results

(a) 不良标记 (b) 不良分割结果

对应分割结果如图4b所示,建筑群内部形成的标记互相孤立,且多处位置没有标记到,根据分水岭脊线形成原理可知,不连贯的标记会在建筑群内部形成多个分散的集水盆地,从而导致过分割;而没有标记到的位置会并入相邻农田形成的集水盆地中,造成欠分割。因为农田不止一块,从而整个建筑群会被拆散成几部分。因此必须改善标记的提取方法。

2 改进算法

2.1 小波多尺度平滑梯度的获取

梯度图灰度跃变剧烈,且局部极值易求,很适合用于标记的提取。小波变换梯度图具有平滑和多尺度性,易于控制和调节。

对一幅初始图像 $f(x,y)$ 进行小波变换求解梯度图时,变换的2个分量等价于图像 $f(x,y)$ 被平滑函数 $\theta(x,y)$ 平滑后的梯度矢量的2个分量,即^[17~18]

$$\begin{bmatrix} W_s^x f(S, x, y) \\ W_s^y f(S, x, y) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_s)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_s)(x, y) \end{bmatrix} =$$
$$S \nabla (f * \theta_s)(x, y) \tag{5}$$

式中 ∇ ——梯度算子 $*$ ——卷积运算
 S ——尺度

梯度矢量 $\nabla(f * \theta_s)(x,y)$ 的模正比于

$$\nabla f(S, x, y) =$$
$$\sqrt{|W^x f(S, x, y)|^2 + |W^y f(S, x, y)|^2} \tag{6}$$

对图1求解小波梯度图 ∇f 的结果如图5所示。



图5 小波变换梯度图

Fig.5 Grad image by wavelet transform

相对于微分算子,小波变换中的 $\theta(x,y)$ 对图像的 $X-Y$ 分量进行的卷积运算起到了平滑滤波的作用,能够减少噪声的影响,尺度参数 S 具有可控性,能灵活调整平滑的程度。

2.2 小波梯度的形态学重构滤波

用多尺度小波分解得到的梯度图 ∇f 依然存在着不同程度的细节和噪声,如果直接对 ∇f 进行分水

岭变换会导致过分割。为此,本研究采用形态学重构对 ∇f 进行滤波,即运用结构元素 S_{e1} 先进行形态学的重构开运算,再进行重构闭运算

$$\nabla f_c = R_{\nabla f}^{\oplus}((R_{\nabla f}^{\ominus}(\nabla f \ominus S_{e1})) \oplus S_{e1}) \quad (7)$$

重构滤波后的结果 ∇f_c 如图 6 所示。

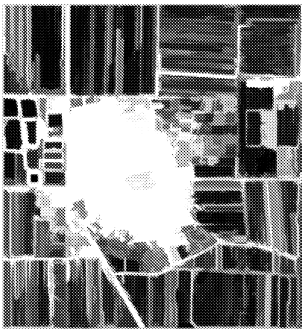


图 6 形态学滤波后的梯度幅值图

Fig. 6 Grad image by morphology

2.3 生成消除伪极小值的背景标记

局部极小值法能够获取完好的背景标记,在获取标记前,为进一步消除伪极小值,防止产生虚假轮廓,本文采用 H-minima^[19] 压制图像深度小于 H 的浅水盆地,然后提取二值化的极小值作为背景标记。

对 f 进行 H-minima 变换定义为

$$H(f) = R_l^{\oplus}(f + H) \quad (8)$$

图像 ∇f_c 经过 H-minima 变换后,消除了深度不满足要求的局部极小值。获取二值化的背景标记 M_l 过程为

$$M_l = R_{\min}(H(\nabla f_c)) \quad (9)$$

式中 $R_{\min}$ ——获取局部极小值算子

如图 7 所示,经过 H-minima 处理后,深度小于 H 的极小值区域被填平,形成了均匀统一的灰度区域。

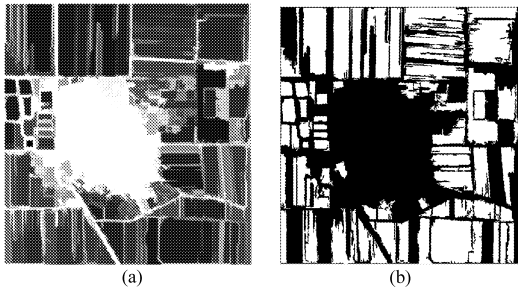


图 7 背景标记的生成

Fig. 7 Generation of background markers

(a) H-minima 处理结果 (b) 背景标记

2.4 生成基于自适应全局阈值的建筑群标记

形态学重构滤波后,图像的对比度增强,整体灰度提升,建筑群与背景差异显著,可以采用自适应全局阈值法提取标记。

2.4.1 自适应全局阈值机理

OTSU^[20] 法即大津法,是公认的自适应全局阈

值法中最优的两相图像分割方法。它是根据图像灰度特征,将图像划分为目标区 c_0 和背景区 c_1 两种类型。两组间的类差为

$$\sigma_k^2 = \omega_0(u_0 - u)^2 + \omega_1(u_1 - u)^2 \quad (10)$$

式中 σ_k ——阈值为 k 时的类间方差

u_0 ——目标区灰度均值

u_1 ——背景区灰度均值

ω_0 ——目标区灰度概率

ω_1 ——背景区灰度概率

用目标和背景之间的方差 σ_k 来衡量其差距,方差越大,差别越大。因此 $k^* = \arg \max \sigma_k^2$ 时为最优阈值。

运用 OTSU 法获取初始的二值化的建筑群标记的过程为

$$M_{\text{OTSU}}(x, y) = \begin{cases} 1 & (\nabla f_c(x, y) > k_{\nabla f_c}^*) \\ 0 & (\nabla f_c(x, y) \leq k_{\nabla f_c}^*) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $k_{\nabla f_c}^*$ ——OTSU 最优阈值

分割结果如图 8a 所示。

2.4.2 基于 OTSU 的建筑群标记提取

为使 M_{OTSU} 能作为标记应用到分水岭算法上,采用形态学方法对分割结果进行处理。构造结构元素 S_{e2} 、 S_{e3} 执行形态学运算,得到理想的建筑群标记 $M_{\parallel}$

$$M_{\parallel} = (M_{\text{OTSU}} \oplus S_{e2}) \ominus S_{e3} \quad (12)$$

式(12)中,膨胀是为了消除孔洞,腐蚀的作用是消除其他小目标的影响,避免因膨胀造成的标记合并,生成的建筑群标记如图 8b 所示。

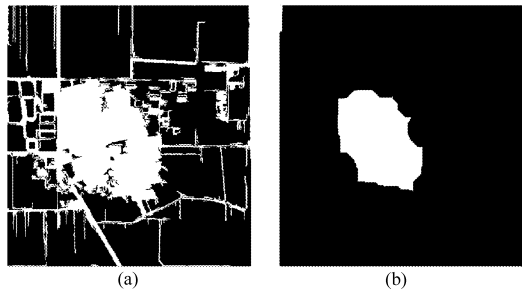


图 8 建筑群标记的生成

Fig. 8 Generation of building markers

(a) 全局阈值法分割结果 (b) 建筑群标记

2.5 标记融合及精准分割实现

经过处理后的 M_l 和 $M_{\parallel}$ 彼此孤立不相交,可以采用逻辑“或”运算进行标记融合,如图 9a 所示,生成的最终标记 M 为

$$M = M_l \cup M_{\parallel} \quad (13)$$

由于小波梯度图受平滑函数的影响有轮廓偏移的现象,为了确保精度,在进行最终的边缘提取时,本文采用 Sobel 梯度图,因为 Sobel 算子对像素位置的影响做了加权,可以降低边缘模糊程度,使分割更

精准。用强制极小值标定法强制标定 Sobel 梯度图,使其只在标记位置极小,从而屏蔽掉原有图像中的极小值,最后在强制标定后的图像上获取分水岭脊线,得到分割结果

$$f_w = W(P_{\min}(\nabla f_{\text{sobel}} \cup M))$$

(14)

式中 ∇f_{sobel} ——Sobel 梯度图
 $P_{\min}$ ——强制最小标定操作算子
 W ——分水岭操作算子

分水岭脊线叠加到原图的分割效果见图 9。

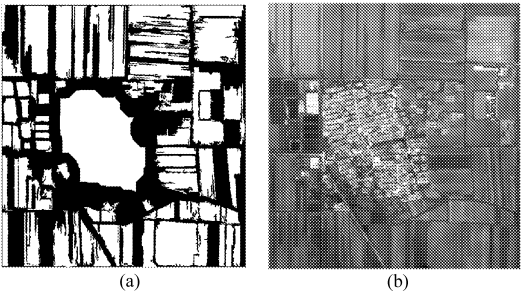


图 9 基于标记融合的分割效果图

Fig. 9 Segmentation image based on fused markers

(a) 融合后的标记 (b) 分割效果图

从图 9 中可以看出,融合后的标记独立完整,能够抑制建筑群的过分割和欠分割,改进效果显著。

2.6 改进的算法流程

以遥感图像中建筑群的提取为目的,提出一种基于自适应全局阈值融合标记的图像分割算法。首先用小波变换和形态学重构滤波对图像进行预处理,先采用局部极小值法获取背景标记,再用自适应全局阈值法提取建筑群标记,最后将两种标记融合实现精准分割。能够得到理想的分割结果。算法流程如图 10 所示。

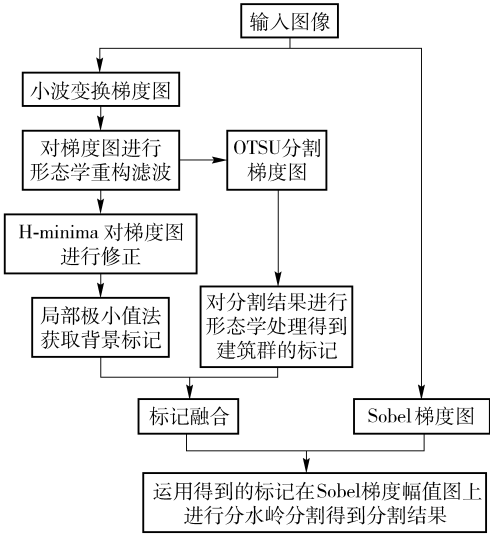


图 10 改进算法流程图

Fig. 10 Flowchart of improved algorithm

3 实验结果与分析

为了验证改进算法的有效性,选取了同一地区不同位置的 2 幅彩色遥感图像和 1 幅 SPOT5 遥感图像进行分割实验,图像中均含有建筑群。分割结果如图 11 所示。

图 11a 为选取的原始实验图像;图 11b 分别对应仅采用局部极小值提取标记的分割结果。如前所述,建筑群出现了大面积的过分割和欠分割现象;图 11c 为采用本文算法进行融合标记后的分割结果,如图所示,建筑群的分割效果显著提升,而背景目标的分割效果几乎不受干扰。实验的参数设置见表 1,其中结构元素 S_{e1} 、 S_{e2} 、 S_{e3} 的类型均为“disk”。

表 1 参数设置

Tab. 1 Parameter settings

图像	尺寸/像素	S	S_{e1}	H	S_{e2}	S_{e3}
图 11a 上	389 × 353	2	3	40	4	30
图 11a 中	426 × 402	2	3	46	6	25
图 11a 下	264 × 248	2	4	35	5	24

为了验证建筑群提取的有效性,选取了 12 幅不同类型的建筑群图像进行测试,测试中选用的结构元素的类型为“disk”,小波变换尺度为 2。正确分割像素数指手工提取建筑群与本文算法提取建筑群的相同像素的个数,正确分割率为正确分割像素数除以手工分割像素数,统计实验结果如表 2 所示,平均正确分割率达 90.7%。

表 2 建筑群提取的实验数据

Tab. 2 Experimental data of building extraction

编号	手工提取 建筑群的 像素数	本文算法 提取建筑群的 像素数	正确分割 像素数	分割正 确率/%
1	64 960	62 830	60 788	93. 6
2	49 600	44 442	43 945	88. 6
3	35 733	32 951	32 290	90. 4
4	10 759	9 010	8 879	82. 5
5	201 295	198 976	190 619	94. 7
6	169 042	160 007	158 997	94. 0
7	84 308	83 386	80 123	95. 0
8	29 848	26 202	25 723	86. 2
9	61 123	57 998	57 949	94. 8
10	17 119	14 903	14 402	84. 1
11	41 188	36 676	36 516	88. 7
12	81 169	78 593	77 500	95. 4

4 结束语

遥感图像中的建筑群纹理复杂,轮廓特征不明显,给整体提取带来了困难,影响地形划分和分类识别的进行。本文提出了一种自适应全局阈值融合标

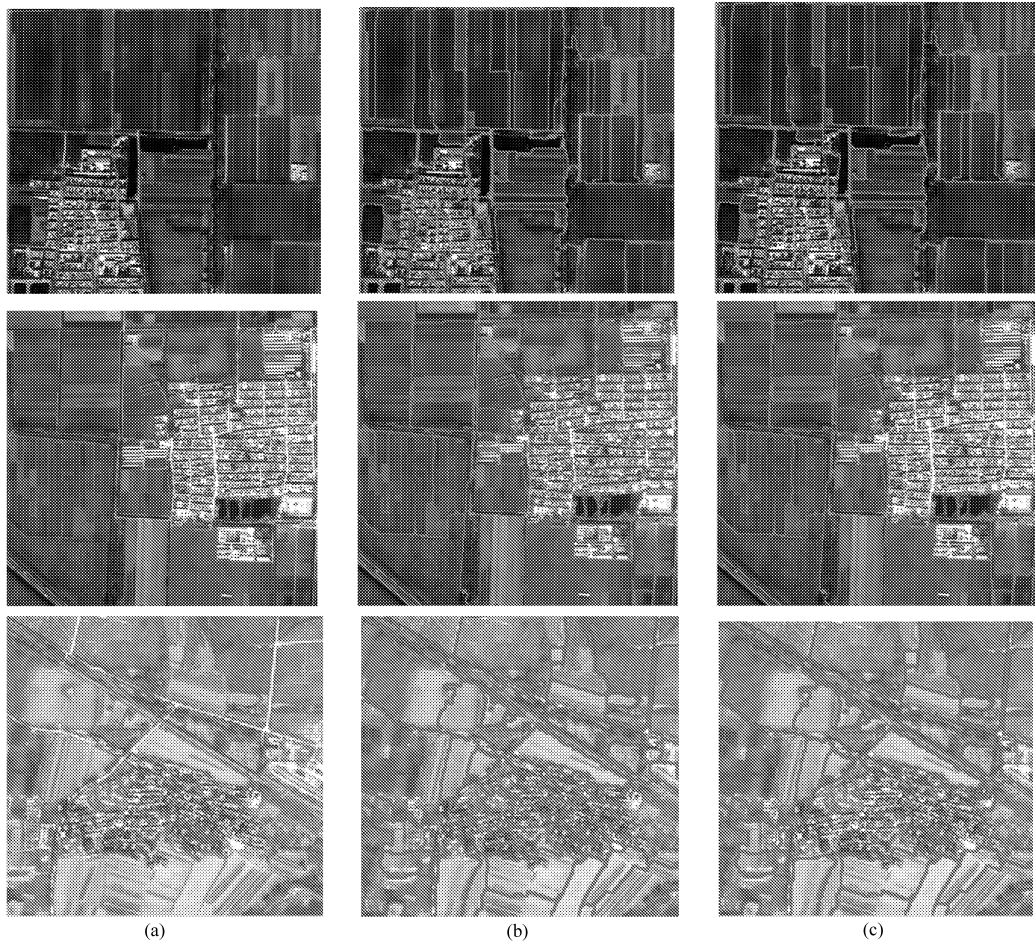


图 11 融合标记前后的建筑群分割效果对比

Fig. 11 Comparison of buildings segmentation before and after fused markers

(a) 两类目标物并存的遥感影像 (b) 融合标记前的分割结果 (c) 融合标记后的分割结果

记的图像分割算法,目的是解决遥感图像中建筑群的整体提取问题。分析研究了形态学滤波对梯度图像灰度曲线的影响,指出了局部极值标记法存在的问题,用四连通标记形成的过程并分析不良标记产生的原因。结合了小波变换、形态学,并采用自适应

全局阈值对标记进行融合,选用加权像素的 Sobel 梯度进行最终分割,能够解决遥感图像中建筑群的过分割和欠分割问题。通过对 12 幅不同类型的建筑群测试,平均正确分割率达 90.7%,达到了预期的目标。

参 考 文 献

1 邱白晶,王天波,李娟娟,等. 黄瓜蚜虫的图像识别与计数方法[J]. 农业机械学报,2010,41(8):151~155.
Qiu Baijing, Wang Tianbo, Li Juanjuan, et al. Image recognition and counting for glasshouse *Aphis gossypii*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 151~155. (in Chinese)

2 苗玉彬,王浙明,刘秦,等. 水果轮廓特征提取的 Zernike 矩分水岭分割方法[J]. 农业工程学报,2013,29(1):158~163.
Miao Yubin, Wang Zheming, Liu Qin, et al. Application of Zernike-moment-based watershed segmentation on fruit features extraction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 158~163. (in Chinese)

3 伍学千,廖宜涛,樊玉霞,等. 基于 KFCM 和改进分水岭算法的猪肉背最长肌分割技术[J]. 农业机械学报,2010,41(1): 172~176.
Wu Xueqian, Liao Yitao, Fan Yuxia, et al. Segmentation of pork longissimus dorsi based on KFCM clustering and improved watershed algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 172~176. (in Chinese)

4 张艳诚,毛罕平,胡波,等. 作物病害图像中重叠病斑分离算法[J]. 农业机械学报,2008,39(2): 112~115.
Zhang Yancheng, Mao Hanping, Hu Bo, et al. Separate algorithm for overlapping spots in crop disease image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 112~115. (in Chinese)

5 Xu Lulu, Lu Huaxiang. Automatic morphological measurement of the quantum dots based on marker-controlled watershed algorithm [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2013, 12(1): 51~56.

6 Yaakov T, Amir A. Automatic segmentation of moving objects in video sequences: a region labeling approach [J]. IEEE

Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12 (7): 597 ~ 612.

7 高丽,杨树元,李海强,等. 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 ~ 1 032.
Gao Li, Yang Shuyuan, Li Haiqiang, et al. New unsupervised image segmentation via marker-based watershed[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(6): 1 025 ~ 1 032. (in Chinese)

8 张桂梅,周明明,马珂,等. 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2012,17(5):641 ~ 647.
Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke, et al. Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(5): 641 ~ 647. (in Chinese)

9 任守纲,马超,谢忠红,等. 基于分水岭和梯度的蝴蝶兰图像分割方法[J]. 农业工程学报,2012,28(9):125 ~ 129.
Ren Shougang, Ma Chao, Xie Zhonghong, et al. Image segmentation algorithm for Phalaenopsis amabilis based on watershed algorithm and gradient[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 125 ~ 129. (in Chinese)

10 余旺盛,侯志强,宋建军,等. 基于标记分水岭和区域合并的彩色图像分割[J]. 电子学报, 2011,39(5):1 007 ~ 1 012.
Yu Wangsheng, Hou Zhiqiang, Song Jianjun,et al. Color image segmentation based on marked-watershed and region-merger[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5):1 007 ~ 1 012. (in Chinese)

11 Shan Guihua, Liu Jun, Tian Dong, et al. Marching cube based marker-controlled watershed segmentation for cryoEM density map [C]//Engineering & Science (DCABES), 2012 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business,2012:379 ~ 382.

12 Han Xianwei, Fu Yili , Zhang Haifeng. A fast two-step marker-controlled watershed image segmentation method[C] // 2012 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2012:1 375 ~ 1 380.

13 Allili Madjid, Bentabet Layachi, Chen Yan. A novel topology based watershed segmentation[C] // 2012 11th International Conference on Information Science Signal Processing and Their Applications (ISSPA),2012:824 ~ 829.

14 冈萨雷斯. 数字图像处理(MATLAB 版)[M]. 阮秋琦,等,译. 北京:电子工业出版社,2005:273 ~ 284,315.

15 张汗灵. MATLAB 在图像处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008:301 ~ 341.

16 谷口庆治. 数字图像处理——基础篇[M]. 北京:科学出版社,2002.

17 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2011:309 ~ 314.

18 Mallat S. A theory for multire solution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1989,11(7):674 ~ 693.

19 Soille P. Morphological image analysis principles and applications[M]. Berlin, Germany:Springer-Verlag,1999.

20 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1):62 ~ 66.

21 许文宁,梅树立,王鹏新,等. 改进 CV 模型在高分辨率遥感影像分割中的应用[J]. 农业机械学报,2011,42(3):180 ~ 183.
Xu Wenning, Mei Shuli, Wang Pengxin, et al. Improved Chan – Vese model and its application on high resolution remote sensing image segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):180 ~ 183. (in Chinese)