

基于迭代 H-minima 改进分水岭算法的高分辨率遥感影像单木树冠提取

滕文秀^{1,2}, 温小荣^{1,2*}, 王妮^{3,4}, 施慧慧³

¹南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037;

²南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

³滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000;

⁴安徽省地理信息智能感知与服务工程实验室, 安徽 滁州 239000

摘要 从高分辨率遥感影像中提取单木树冠信息能够有效提高森林资源的调查与管理水平;针对现有单木树冠提取方法对郁闭度较高的阔叶林提取精度低的问题,提出一种基于迭代 H-minima 改进分水岭算法的高分辨率遥感影像单木树冠提取方法;首先利用形态学开操作对图像进行平滑处理,采用 Sobel 算子提取梯度图像,并利用均值滤波进行去噪处理;然后利用一组 h 值在梯度图像上迭代识别树冠标记,利用虚假标记检测方法过滤无效标记;最后引入对称原则来限制分水岭算法的淹没过程,避免树冠标记过生长与无标记树冠合并;以高分辨率遥感影像作为数据源,同时采用传统的标记控制分水岭算法和所算法提取单木树冠,从单木位置和树冠轮廓两个方面,以及样地和单木两个尺度上对单木树冠提取的精度进行评价。结果表明:所提算法提取树冠的 F 测度为 92.71%,比标记控制分水岭算法提高了 31.99%;所提算法能够有效抑制过分割、减少欠分割,从而提高单木树冠的提取精度。

关键词 遥感;单木树冠提取;H-minima 变换;高分辨率遥感影像;分水岭算法

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122802

Individual Tree Crown Extraction in High Resolution Remote Sensing Image Based on Iterative H-minima Improved Watershed Algorithm

Teng Wenxiu^{1,2}, Wen Xiaorong^{1,2*}, Wang Ni^{3,4}, Shi Huihui³

¹ College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

² Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

³ School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China;

⁴ Anhui Engineering Laboratory of Geographical Information Intelligent Sensor and Service, Chuzhou, Anhui 239000, China

Abstract Extracting individual tree crowns in high resolution remote sensing image can improve forest inventory and management. To solve the problem that the existing individual tree crown extraction method has low accuracy in broad-leaved forest with high tree crown density, we propose an iterative H-minima watershed method for individual tree crown extraction in high resolution remote sensing images. Firstly, the morphological open operation is used to smooth the image, the Sobel operator is used to extract the gradient image, and the mean filter is used to denoise. Secondly, a set of h values are iteratively used to identify tree crown markers on gradient images, and the invalid markers are filtered by using the false marker detection method. Finally, the symmetry principle is introduced to restrict the flooding process of watershed algorithm, thus avoid the overgrowth of tree crown and combination of unmarked tree crowns. The high resolution remote sensing image is used as the data source, and the traditional

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-06-12; 录用日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(41601455)、安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2016A531)、国家重点研发计划(2016YFC0502704)

* E-mail: njw9872e@163.com

marker-controlled watershed algorithm and the proposed algorithm in this paper are used to extract the single tree crown. The quality of the individual tree crown extraction is evaluated according to the single tree position and crown contours, and from both samples and individual tree scales. The results show that the F measurement of the tree crown obtained by the proposed algorithm in this paper is 92.71%, which is 31.99% higher than that of the marker-controlled watershed algorithm. This proposed algorithm can effectively suppress the over-segmentation, reduce the under-segmentation, and improve the extraction precision of the individual tree crown.

Key words remote sensing; individual tree crown extraction; H-minima transform; high resolution remote sensing image; watershed algorithm

OCIS codes 280.4750; 100.2960; 100.2000

1 引言

树冠是树木光合作用的主要场所,是树木乃至森林的重要组成部分。单木树冠提取有助于监测树木长势、估算树木生物量与小班蓄积量、预防树木病虫害^[1]。更重要的是,单木树冠提取是树种分类的第1步,对树种分类精度具有重要影响^[2-6]。高空间分辨率遥感影像以及信息提取方法的发展^[7-10]为单木树冠提取提供了一种低成本、高效率的方法。近些年,关于单木树冠提取方法的研究越来越多。陈崇成等^[11]利用局部最大值法探测树冠位置,并将探测到的树冠位置作为种子点,然后使用区域生长算法提取单木树冠;郭昱杉^[12]等通过形态学开闭重建滤波对图像进行平滑处理,去除噪声后使用标记控制分水岭方法提取单木树冠;Yang等^[13]使用多光谱分水岭分割方法进行多尺度分割,然后根据多尺度拟合确定出适合每个树冠的优化参数来拟合单木树冠;Ayrey等^[14]采用一种分层叠加方法来提取单木树冠。上述研究中的单木树冠提取方法对于针叶林和郁闭度较低的阔叶林树冠的提取效果较好,但在郁闭度较高的阔叶林中,阔叶树树冠内部的亮度变化不均匀,树冠大小不同,树冠之间连接、重叠,以及树冠形状不规则等,均会导致单个树冠内、树冠聚集处或相连重叠区域出现树冠过分割、合并等问题。

正确提取单木树冠轮廓的关键是采取有效的方法过滤虚假标记,并保留正确的标记,使提取的标记与实际单木树冠一一对应,然后采用区域合并或基于标记控制分水岭等方法实现单木树冠的有效分割。H-minim变换^[15-18]能有效抑制虚假标记。H-minim变换中 h 值的选择至关重要,若 h 值过小,就不能有效抑制虚假树冠标记,导致过分割问题;若 h 值过大,部分正确的树冠种子就会被抑制,导致欠分割问题。Jung等^[19]利用一个迭代算法确定了整幅图像的最优 h 值。郁闭度较高的阔叶林中单木树冠大小不同,树冠之间连接、重叠,因此没有一个最优的 h 值能够准确识别阔叶林中所有的树冠标

记。为了有效抑制单木树冠提取的过分割并减少欠分割,提高提取精度,本文针对郁闭度较高的阔叶林的特点,提出了一种迭代H-minima改进分水岭算法。首先基于形态学理论减小原始图像中树冠内部的强度差异,采用Sobel算子提取梯度图像,并利用均值滤波进行去噪处理;然后利用一组 h 值在梯度图像上迭代识别树冠标记,在每次迭代中,利用特定的 h 值计算候选标记,并在满足大小要求的条件下选择候选标记,通过不同 h 值之间的相互合作来抑制噪声,从而识别不同大小且连接、重叠的树冠标记;最后基于树冠的形状特征改进分水岭算法,通过对称生长原则标记生长树冠,避免有标记树冠因过生长而与无标记树冠合并。

2 研究方法

在郁闭度较高的阔叶林中,由于阔叶树的树冠内部亮度变化不均匀,树冠大小不同,树冠之间连接、重叠,树冠形状不规则,因此采用传统的分水岭分割算法从梯度图像中提取种子点时,单个树冠内、树冠聚集处或者连接、重叠区域可能会产生多个虚假种子点,导致分水岭分割算法产生严重的过分割现象。采用标记控制分水岭算法虽然能避免过分割,但是在树冠聚集重叠区域标记识别不准确,在避免过分割的同时又引入了欠分割问题,单木树冠提取精度低。针对以上问题,本课题组提出一种迭代H-minima改进分水岭算法,并采用该算法对郁闭度较高的阔叶林区进行单木树冠提取。该算法有3个关键步骤:1)首先对图像进行预处理,基于形态学开操作对灰度图像进行平滑处理,采用Sobel算子计算梯度图像,并利用均值滤波器对梯度图像进行去噪处理,基于最大类间方差法计算灰度图像的二值图像;2)利用一组 h 值在梯度图像上迭代识别树冠标记,采用虚假标记检测过滤无效标记;3)基于对称生长原则,在二值图像的前景像素上标记生长树冠。

2.1 图像预处理

为了减小树冠内部亮度变化不均匀以及图像噪

声对树冠标记提取的影响,在提取树冠标记前对图像进行预处理。阔叶树的树冠比较大,树冠内部亮度变化不均匀,提取树冠标记时,在树冠内部易产生多个虚假标记。针对以上问题,基于形态学理论来减小原始图像中树冠内部的强度差异,利用形态学开操作对灰度图像进行平滑处理,即

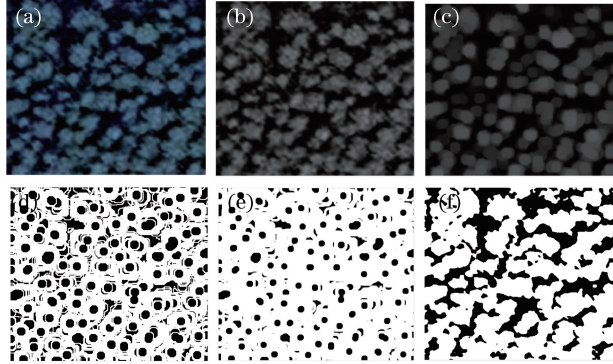


图1 图像预处理过程。(a)原始图像;(b)灰度图像;(c)形态学开操作后的图像;(d)梯度图像;(e)均值滤波去噪后的图像;(f)二值图像

Fig. 1 Process of image preprocessing. (a) Original image; (b) gray image; (c) image after morphological open operation; (d) gradient image; (e) image after mean filter denoising; (f) binary image

本课题组利用一组 h 值在梯度图像中迭代识别树冠标记,因此利用梯度算子计算图像梯度幅度。常用的梯度算子有 Prewitt 算子、Roberts 算子和 Sobel 算子等,其中 Sobel 算子的效果较好,因此这里采用 Sobel 算子计算梯度图像,即

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (2)$$

式中: mag 为计算图像各像素点梯度值的操作; G_x 和 G_y 分别为沿 x 方向和 y 方向的梯度图像。采用 Sobel 算子在水平和垂直方向上对灰度图像进行滤波,求取模值,得到梯度图像 G_{map} ,结果如图 1(d)所示。梯度图像中含有大量噪声,这会对单木树冠标记提取有很大影响,因此这里采用均值滤波器来抑制梯度图像中的噪声,以降低图像噪声对树冠标记提取的影响,即

$$\hat{y}(n) = \frac{1}{M} \sum_{i=n-1}^{n+1} y_i, \quad (3)$$

式中: n 为测量次数, $n=1, 2, \dots, N$; $\hat{y}(n)$ 为经均值滤波后的测量值; y_i 为滤波中心点; M 为均值滤波窗口的大小。为了减少程序输入参数的数量, M 选择为 $d_{\text{size}}/2$ 。均值滤波去噪结果如图 1(e)所示。

采用迭代 h 值提取树冠标记会产生无效标记。为了过滤树冠外的虚假标记,在提取树冠标记过程中,利用二值图像来过滤不在树冠中的无效标记。基于最大类间方差法(OTSU 算法)^[20] 计算最佳分

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B, \quad (1)$$

式中: \circ 为形态学开操作; \ominus 为形态学腐蚀操作; \oplus 为形态学膨胀操作; A 为输入图像; B 为结构元素,根据树冠的形状特征, B 选为圆盘,半径 $d_{\text{size}}=10$ 。原始图像、灰度图像和开操作后的图像分别如图 1(a)、图 1(b)和图 1(c)所示。

割阈值,进而计算二值图像。为使二值图像能包含大部分树冠区域,避免过滤有效标记,采用最佳分割阈值的 1/2,即

$$k = \frac{1}{2} \alpha_k, \quad (4)$$

式中: k 为本研究采用的最优阈值; α_k 为采用 OTSU 算法提取的最优阈值。最后对灰度图像进行二值化处理,结果如图 1(f)所示。

2.2 单木树冠标记提取

Soille^[15-16] 的研究表明,物体的内部一般比较平坦,在梯度图像对应极小值处的深度通常比噪声对应的极小值深度更大,因此提出了一种基于形态学的 H-minima 变换,其原理是消除深度小于给定 h 值的局部极小值。该方法能够有效抑制虚假标记。首先对梯度图像 ∇I 进行基于形态学的 H-minima 变换(HMIN),然后与给定的 h 值比较,过滤深度小于 h 值的局部极小值,得到标记图像 ∇I^{mask} ,即

$$\nabla I^{\text{mask}} = \text{HMIN}(\nabla I | h). \quad (5)$$

在传统的 H-minima 变换中,参数 h 值的选取存在矛盾:较小的 h 值能够很好地识别内部含有大量噪声的树冠标记,但会对内部含有大量噪声的树冠产生多个标记,从而导致过分割;较大的 h 值能够处理过分割问题,但会漏掉标记,从而导致欠分割。图 2 所示为选取不同 h 值时的标记提取结果。在图 2(a)所示的 $h=1$ 时识别的树冠标记中,红色

方框位置出现了噪声标记,该噪声标记在 $h=2$ 时得到了有效抑制,如图 2(b)所示,但在抑制噪声的同时,在图 2(a)所示的蓝色方框处出现了标记丢失

的问题,说明在郁闭度较高的阔叶林中,没有一个最优的 h 值能同时正确地提取大小不同且连接、重叠的树冠标记。

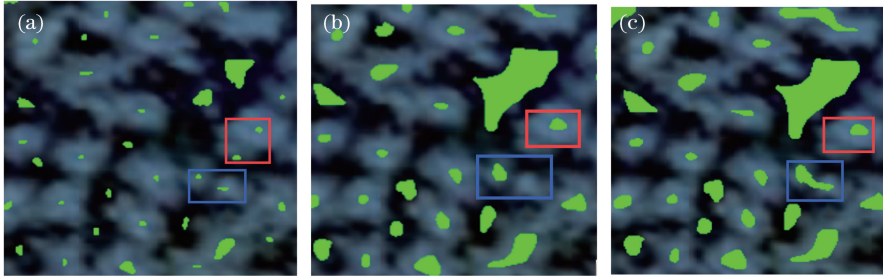


图 2 不同 h 值的标记提取结果。(a) $h=1$; (b) $h=2$; (c) $h=3$

Fig. 2 Marker extraction results with different h values. (a) $h=1$; (b) $h=2$; (c) $h=3$

针对上述问题,本课题组提出一种迭代 H-minima 的标记提取方法,利用不同的 h 值在梯度图像上迭代识别树冠标记,小的 h 值识别较小的树冠标记,大的 h 值识别较大的树冠标记,不同 h 值之间的相互合作能够有效抑制噪声,并采用虚假标记检测、过滤迭代中产生的无效标记,从而准确识别大小不同且连接、重叠的树冠标记。迭代从 $h=1$ 开始,每次 h 值加 1,直到没有新的标记产生。在每次迭代中,利用 H-minima 变换抑制 G_{map} 上的噪声,并将区域最小值作为候选标记。利用不同 h 值迭代识别树冠标记过程中会产生大量的无效标记,虚假标记的检测与过滤对正确提取树冠、有效抑制过分割、减少欠分割至关重要。本课题组基于无效标记的特点,考虑标记面积、标记位置,以及重叠标记问题,设计了一种虚假标记检测方法,采用该方法检测并过滤无效标记,以提高树冠标记提取的正确率。所提无效标记检测方法分为 3 个步骤:1) 考虑无效标记的面积特征。当 h 值较小时,会识别大量树冠

标记,其中包含了很多虚假标记,而大部分虚假树冠标记的面积都很小,为了避免将噪声区域也识别成标记,并控制过分割,利用面积阈值 t_{area} 过滤面积过小的候选标记。实验发现,当 $t_{\text{area}}=17$ 时,能过滤大部分无效树冠标记。2) 考虑标记位置的特征。无效标记一定在树冠区域外,如图 2 所示,其中部分标记不在树冠位置,为了避免出现树冠区域外的无效标记,利用二值图像过滤树冠区域外的无效标记,在计算二值图像时采用最佳分割阈值的 $1/2$,以确保二值图像能够包含大部分树冠区域,避免过滤有效标记。3) 考虑重叠标记问题。采用迭代 h 值的方式获取树冠标记,连续的 h 值会产生重叠的标记,或者没有重叠但彼此非常接近的标记,如图 3 所示。其中图 3(b)所示为 $h=1$ 时识别的树冠标记,图 3(c)所示为 $h=2$ 时计算出的候选树冠标记,两幅图中红色方框标识的标记是两个连续 h 值产生的部分重叠标记,如果将类似重叠标记添加到标记集合中,就会导致严重的过分割问题。

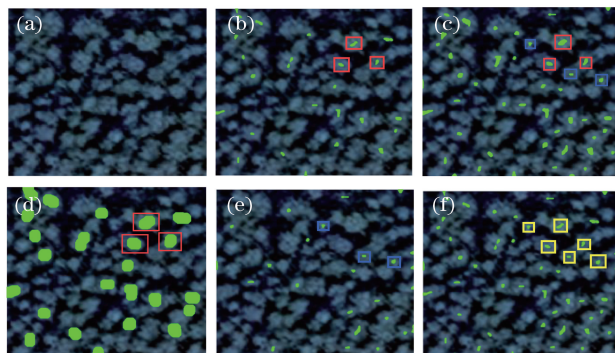


图 3 重叠标记检测过程。(a)原始图像;(b) $h=1$ 时识别的树冠标记;

(c) $h=2$ 时识别的树冠标记;(d)膨胀标记结果;(e)过滤后的结果;(f)标记的结果

Fig. 3 Process of overlap markers detection. (a) Original image; (b) tree crown markers when h is 1; (c) tree crown markers when h is 2; (d) image with marker dilation; (e) filtered image; (f) marked image

为了避免将重叠的或者彼此非常接近的标记添加到标记集中而产生过分割问题,对候选标记进行重叠检测,并过滤重叠标记。首先对标记集中的所有标记进行膨胀,即

$$A \oplus B = \bigcup \{A + b \mid b \in B\}, \quad (6)$$

式中:为了减少程序输入参数的数量,仍采用与图像预处理中开运算相同的圆盘结构元素,半径仍为 d_{size} ,膨胀标记结果如图 3(d)所示。然后过滤在膨

胀标记内部的候选标记,图 3(b)和图 3(c)中的红色方框标识了第 1 次迭代和第 2 次迭代产生的部分重复树冠标记,过滤结果如图 3(e)所示,其中红色方框标识的重叠标记被过滤,只留下非重叠的蓝色标记。最后将候选标记添加到标记集中,结果如图 3(f)所示。图 4 所示为采用迭代 h 值获取图 3(a)所示高分辨率遥感影像单木树冠标记的完整过程图像。

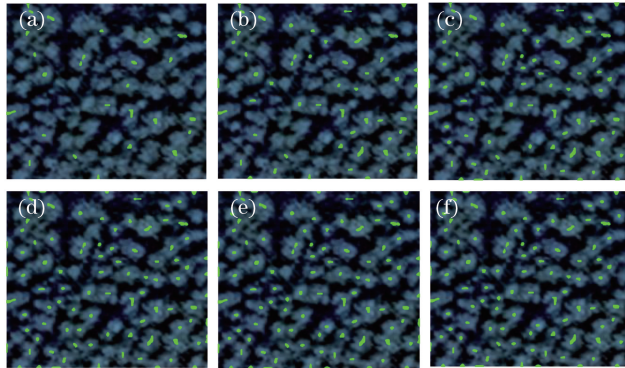


图 4 采用不同 h 值获取的标记识别图像。(a) $h=1$; (b) $h=2$; (c) $h=3$; (d) $h=4$; (e) $h=5$; (f) $h=6$

Fig. 4 Images obtained with different h values. (a) $h=1$; (b) $h=2$; (c) $h=3$; (d) $h=4$; (e) $h=5$; (f) $h=6$

2.3 单木树冠提取

Vincent 等^[21]在 1991 年提出了一种基于浸没模型的分水岭算法(该算法的思想源于地形学),利用该算法模拟了地貌的浸水过程。该算法将梯度幅值图像看成是地形,幅值大的区域代表高山,幅值小的区域代表山谷,下雨时水会在较低的区域形成汇水盆地,汇水盆地的最低点代表一个极小值,在极小值处打洞并向洞中注水,不同汇水盆地的水位不断上升,在汇水盆地的交界处修建大坝来阻止水流向其他汇水盆地,这里大坝的边界就是分水线。在传统的分水岭分割算法中,淹没过程在所有的前景像

素上进行,直到遇到另一个标记才停止,但是当标记不能识别所有相邻的树冠时,有标记的树冠就会淹没在无标记的树冠像素中,导致合并成一个积水盆地。图 5(a)中有两个树冠,但是只识别出了 1 个树冠标记,如图 5(b)所示。传统的分水岭算法会在这个树冠标记上执行淹没过程,把未识别的树冠、标记的树冠也合并进来,产生树冠合并的问题,如图 5(c)所示,当利用合并的树冠信息提取单木光谱特征进行树种分类时,不同树冠合并的问题就会导致单木的光谱特征中混入其他树冠的光谱特征,从而影响树种的分类精度。

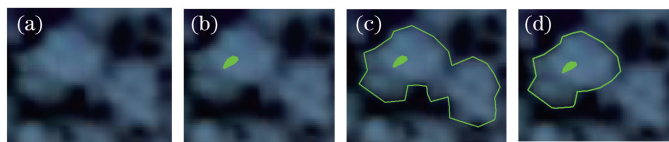


图 5 树冠提取。(a)原始图像;(b)识别的标记;(c)传统算法;(d)所提算法

Fig. 5 Tree crown extraction. (a) Original image; (b) detection marker; (c) traditional algorithm;

(d) proposed algorithm in this paper

为了控制洪水淹没到一个未能识别标记树冠的像素,本研究基于树冠的形状特征,引入对称原则来限制分水岭的淹没过程,如图 6 所示,其中 α 为圆弧的角度。在前景像素 P 上生长一个像素 M 时,首先检查圆弧上的所有像素,只有当圆弧上没有像素属于背景或已被其他标记合并时,才在前景像素 P

上生长像素 M 。由于阔叶树树冠并不是一个规则的圆,因此采用圆弧作为搜索条件,使提取树冠更接近真实树冠的形状。实验发现,对于阔叶林树冠,圆弧的起始和结束角为分别 -15° 和 $+15^\circ$ 时,提取效果最佳。采用对称原则限制分水岭淹没过程进行树冠提取,结果如图 7 所示。

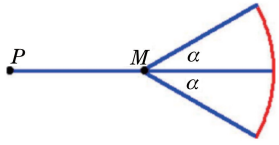


图 6 对称生长原则

Fig. 6 Symmetric growth principle

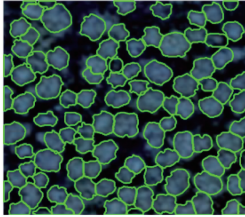


图 7 标记生长结果

Fig. 7 Result of markers growth

3 结果与分析

为了验证本课题组提出的单木树冠提取方法的有效性,以安徽省滁州皇甫山地区的高分辨率遥感影像作为数据源,采用 2017 年 2 月 Quick Bird 卫星遥感影像数据(像素分辨率为 0.12 m),在影像中选取两块郁闭度较高的阔叶林样地进行实验,实验图像大小为 400 pixel \times 400 pixel,利用实地调查与目视解译相结合的方式勾绘树冠轮廓,并将其作为参考数据,采用所提迭代 H-minima 改进分水岭算法提取单木树冠,从单木位置和树冠轮廓两方面,以及

样地和单木两个尺度上对单木树冠的提取精度进行评价,并与传统的标记控制分水岭算法的提取精度进行对比。实验环境为 Intel Core(TM) i5, 2.60 GHz, 8 GB 内存, 64 位 Windows 7 操作系统, MATLAB R2015a 软件。

3.1 实验结果

单木树冠提取结果如图 8 所示,其中图 8(a)和图 8(e)所示为两块阔叶林样地的原始影像,图 8(b)和图 8(f)所示为树冠轮廓参考图像,图 8(c)和图 8(g)所示为采用传统的标记控制分水岭算法对两块实验图像进行单木树冠提取的结果,图 8(d)和图 8(h)所示为采用所提 H-minima 改进分水岭算法对两块实验图像进行单木树冠提取的结果。可以直观地看出,所提算法的单木树冠提取效果优于传统标记控制分水岭算法的提取效果。由于树冠内部亮度变化不均匀,树冠大小不同,树冠之间出现连接、重叠,树冠形状不规则,因此采用传统的标记控制分水岭算法提取单木树冠时会出现严重的欠分割现象,在树冠聚集、连接、重叠的地方,多个树冠合并成 1 个树冠,并存在树冠丢失和错分问题。与传统的标记控制分水岭算法相比,所提算法的欠分割问题明显减少,提取了大部分大小不同,连接、重叠的单木树冠。为了定量分析所提算法的有效性,以下将从单木位置和树冠轮廓两方面,以及样地和单木两个尺度上对单木树冠的提取精度进行评价。

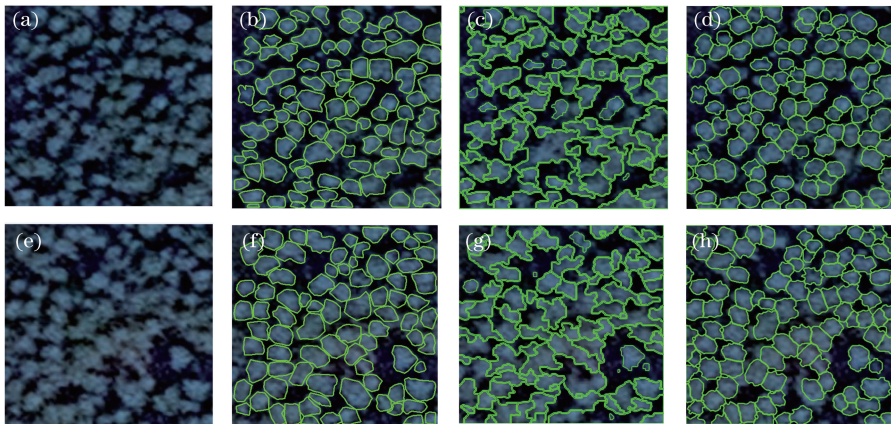


图 8 单木树冠提取结果。(a)样地 1 的遥感影像;(b)样地 1 的参考树冠;(c)标记控制分水岭分割算法对样地 1 的提取结果;(d)所提算法对样地 1 的提取结果;(e)样地 2 的遥感影像;(f)样地 2 的参考树冠;(g)标记控制分水岭分割算法对样地 2 的提取结果;(h)所提算法对样地 2 的提取结果

Fig. 8 Individual tree crown extraction. (a) Remote sensing image of sample 1; (b) reference tree crown of sample 1; (c) extraction of sample 1 with marker-controlled watershed segmentation algorithm; (d) extraction of sample 1 with proposed algorithm in this paper; (e) remote sensing image of sample 2; (f) reference tree crown of sample 2; (g) extraction of sample 2 with marker-controlled watershed segmentation algorithm; (h) extraction of sample 2 with proposed algorithm in this paper

3.2 提取精度评价

3.2.1 单木位置精度评价

分别从样地和单木两个尺度上来评价单木位置的提取精度。对于样地尺度的单木位置提取精度,利用树冠探测率 D_p 表示^[11],即

$$D_p = \frac{N_d}{N_r} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: N_d 为正确探测到的单木棵数; N_r 为参考单木棵数。对于单木尺度的单木位置评价,利用 1:1 对应关系的单木颗数 $N_{1:1}$ (当探测到的单木位置位于参考单木位置 1 m 缓冲区内,且仅探测到 1 颗树木时,称为 1:1 对应关系的单木),以及基于 $N_{1:1}$ 的用户精度 U_a 和生产者精度 P_a 表示^[11],即

$$P_a = \frac{N_{1:1}}{N_r} \times 100\%, \quad (8)$$

表 1 单木位置精度评价

Table 1 Accuracy assessment of individual tree position

Sample	Algorithm	Detection number	Reference number	Correct number	Detection rate /%	Producer's accuracy /%	User's accuracy /%
Sample 1	Marker-controlled watershed algorithm	84	92	71	91.30	77.17	84.52
	Proposed algorithm in this paper	93	92	86	101.09	93.48	92.47
Sample 2	Marker-controlled watershed algorithm	71	83	57	85.54	68.67	80.28
	Proposed algorithm in this paper	84	83	81	101.20	97.59	96.43

3.2.2 树冠轮廓精度评价

对于树冠轮廓精度评价,同样从样地和单木两个尺度上进行评价。对于样地尺度的轮廓评价,采用树冠面积的相对误差 R_e 表示,

$$R_e = \frac{S_d - S_r}{S_r} \times 100\%, \quad (10)$$

式中: S_d 为提取树冠的总面积; S_r 为参考树冠总面积。

对于单木尺度的轮廓评价,采用全面、综合的树冠轮廓评价标准 F 测度。将树冠提取结果分为匹配、接近匹配、过分割、错分割、合并和丢失 6 类,其中:匹配表示参考树冠和提取树冠的重叠面积各达到二者的 50% 以上;接近匹配表示参考树冠和分割树冠的重叠面积达到其中之一的 50% 以上;过分割表示 1 个参考树冠被提取成多个树冠;错分割表示提取树冠在参考树冠中不存在;合并表示将多个参考树冠提取成 1 个树冠;丢失表示提取树冠中无参考图像中对应的树冠。只有匹配和接近匹配才认为是正确提取。树冠提取的精确率 A_d 、树冠提取的召

$$U_a = \frac{N_{1:1}}{N_d} \times 100\%. \quad (9)$$

表 1 所示为传统标记控制分水岭算法和所提算法对图 8(a)和图 8(e)所示两块样地树冠提取结果的单木位置精度评价。由表 1 可知:在样地尺度上,标记控制分水岭算法和所提算法的平均树冠探测率分别为 88.42% 和 101.15%,标记控制分水岭算法在树冠聚集且连接、重叠处,将多个树冠合并成 1 个树冠,因此树冠探测率低,而所提算法正确提取了大部分树冠,树冠探测率很高,具有更好的单木树冠探测性能;在单木尺度上,标记控制分水岭算法的平均生产者精度和平均用户精度分别为 72.92% 和 82.40%,所提算法的平均生产者精度和平均用户精度分别为 95.54% 和 94.45%,说明所提算法的单木位置探测精度更高。

回率 A_r 、 F 测度的表达式分别为

$$A_d = \frac{N_c}{N_a} \times 100\%, \quad (11)$$

$$A_r = \frac{N_c}{N_r} \times 100\%, \quad (12)$$

$$F = \frac{2A_r A_d}{A_r + A_d} \times 100\%, \quad (13)$$

式中: N_a 为提取树冠个数; N_c 为正确提取树冠个数。

表 2 所示为传统标记控制分水岭算法和所提算法对图 8(a)和图 8(e)所示两块样地树冠提取结果的树冠轮廓精度评价。由表 2 可知:在样地尺度上,所提算法和标记控制分水岭算法的平均面积相对误差分别为 14.86% 和 3.73%,与传统的标记控制分水岭算法相比,所提算法的平均面积相对误差降低了 11.13%;在单木尺度上,所提算法的平均精确率、平均召回率和平均 F 测度分别为 92.185%、93.24% 和 92.71%,与传统的标记控制分水岭方算相比分别

表2 树冠轮廓精度评价
Table 2 Accuracy assessment of tree crown contour

Sample	Algorithm	Detection number	Reference number	Correct number	Relative error / %	Accuracy rate / %	Recall rate / %	F measurement / %
Sample 1	Marker-controlled watershed algorithm	84	92	52	16.51	61.90	56.52	59.09
	Proposed algorithm in this paper	93	92	84	4.41	90.32	91.30	90.81
Sample 2	Marker-controlled watershed algorithm	71	83	48	13.21	67.61	57.83	62.34
	Proposed algorithm in this paper	84	83	79	3.05	94.05	95.18	94.61

提高了 27.415%、36.06% 和 31.99%，表明所提算法的单木树冠提取精度更高。

4 结 论

针对现有单木树冠提取方法对郁闭度较高的阔叶林提取精度低的问题，本课题组提出了一种基于迭代 H-minima 改进分水岭的高分辨率遥感影像单木树冠提取算法。该算法首先基于形态学理论减小原始图像中树冠内部的强度差异，采用 Sobel 算子提取梯度图像，利用均值滤波进行去噪处理，以降低噪声对树冠标记提取的影响；然后利用一组 h 值在梯度图像中进行迭代识别树冠标记，通过不同 h 值的相互合作来抑制噪声，并设计虚假标记检测方法过滤无效标记，提取大小不同且连接、重叠的树冠标记；最后基于树冠的形状特征引入对称原则来限制分水岭淹没过程，避免树冠标记过生长与无标记树冠合并，实现了单木树冠的准确提取。采用所提算法提取单木树冠的 F 测度为 92.71%，比传统标记控制分水岭算法提高了 31.99%，说明所提算法是一种有效的单木树冠提取方法。

参 考 文 献

- [1] Qin X L, Li Z Y, Yi H R. Extraction method of tree crown using high-resolution satellite image [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(2): 228-232.
覃先林, 李增元, 易浩若. 高空间分辨率卫星遥感影像树冠信息提取方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 228-232.
- [2] Zhou T, Popescu S C, Lawing A M, *et al.* Bayesian and classical machine learning methods: a comparison for tree species classification with LiDAR waveform signatures [J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 39.
- [3] Shen X, Cao L. Tree-species classification in subtropical forests using airborne hyperspectral and LiDAR data [J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1180.
- [4] Zhang Z Y, Kazakova A, Moskal L, *et al.* Object-based tree species classification in urban ecosystems using LiDAR and hyperspectral data [J]. Forests, 2016, 7(6): 122.
- [5] Dian Y Y, Pang Y, Dong Y F, *et al.* Urban tree species mapping using airborne LiDAR and hyperspectral data [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2016, 44(4): 595-603.
- [6] Deng S Q, Katoh M, Yu X W, *et al.* Comparison of tree species classifications at the individual tree level by combining ALS data and RGB images using different algorithms [J]. Remote Sensing, 2016, 8(12): 1034.
- [7] Chen Y, Fan R S, Wang J X, *et al.* Segmentation of high-resolution remote sensing image combining phase consistency with watershed transformation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 092803.
陈洋, 范荣双, 王竞雪, 等. 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 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 092803.
- [8] Yan Q, Li H, Jing L H, *et al.* Automatic extraction algorithm of seismic landslide information based on after-calamity high-resolution remote sensing image [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 112801.
闫琦, 李慧, 荆林海, 等. 灾后高分辨率遥感影像的地震型滑坡信息自动提取算法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 112801.
- [9] Gao X J, Zheng X D, Liu Z X, *et al.* Automatic building extraction from high resolution visible images based on shifted shadow analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0428002.

- 高贤君, 郑学东, 刘子潇, 等. 基于偏移阴影分析的高分辨率可见光影像建筑物自动提取[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0428002.
- [10] Wang L G, Liu G Y, Mei T C, *et al.* A segmentation algorithm for high-resolution remote sensing texture based on spectral and texture information weighting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3010-3017.
- 王雷光, 刘国英, 梅天灿, 等. 一种光谱与纹理特征加权的高分辨率遥感纹理分割算法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3010-3017.
- [11] Chen C C, Li X, Huang H Y. 3D segmentation of individual tree canopy in forest nursery based on drone image-matching point cloud[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 149-155, 206.
- 陈崇成, 李旭, 黄洪宇. 基于无人机影像匹配点云的苗圃单木冠层三维分割[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 149-155, 206.
- [12] Guo Y S, Liu Q S, Liu G H, *et al.* Individual tree crown extraction of high resolution image based on marker-controlled watershed segmentation method [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(9): 1259-1266.
- 郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于标记控制分水岭分割方法的高分辨率遥感影像单木树冠提取[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(9): 1259-1266.
- [13] Yang J, He Y H, Caspersen J P, *et al.* Delineating individual tree crowns in an uneven-aged, mixed broadleaf forest using multispectral watershed segmentation and multiscale fitting[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(4): 1390-1401.
- [14] Ayrey E, Fraver S, Kershaw J A, *et al.* Layer stacking: a novel algorithm for individual forest tree segmentation from LiDAR point clouds[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017, 43(1): 16-27.
- [15] Soille P. *Morphological image analysis: principles and applications*[M]. 2nd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- [16] Soille P. *Morphological image analysis applied to crop field mapping*[J]. *Image and Vision Computing*, 2000, 18(13): 1025-1032.
- [17] Qi X, Xing F Y, Foran D J, *et al.* Robust segmentation of overlapping cells in histopathology specimens using parallel seed detection and repulsive level set [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2012, 59(3): 754-765.
- [18] Xu H M, Lu C, Mandal M. An efficient technique for nuclei segmentation based on ellipse descriptor analysis and improved seed detection algorithm [J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2014, 18(5): 1729-1741.
- [19] Jung C, Kim C. Segmenting clustered nuclei using H-minima transform-based marker extraction and contour parameterization [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 57(10): 2600-2604.
- [20] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [21] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598.