

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106293

# 地面树木的最优标记分水岭图像分割算法\*

刘 军<sup>1,2</sup> 张艳迪<sup>1</sup> 高宏伟<sup>1,2</sup> 于 洋<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学 自动化与电气工程学院 沈阳 110159; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所 沈阳 110015)

**摘要:** 为解决复杂地物背景下航拍图像树木检测出现的过分割和误分割问题,提出了一种基于最优标记的改进分水岭图像分割方法。该方法先对输入图像非线性灰度变换提高目标与背景的对比度,再根据目标的形状特征对前景和背景区域初步标记,用前景区域的形心代替传统分水岭算法中的距离变换,二次标记前景,最后使用分水岭算法得到分割图像。实验结果表明,该算法分割准确率平均值为92.5%,比现有图像分割方法抗噪性更强、准确率更高,同时改善了分水岭算法过分割问题。

**关键词:** 航拍图像;区域形心算法;最优标记;分水岭算法

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## A watershed segmentation algorithm based on an optimal marker forground tree

Liu Jun<sup>1,2</sup> Zhang Yandi<sup>1</sup> Gao Hongwei<sup>1,2</sup> Yu Yang<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to solve the over-segmentation and incorrect segmentation in tree detection of aerial image under complex terrain background, a watershed segmentation algorithm based on optimal marker was proposed. In this method, firstly, the contrast between the target and the background is improved by nonlinear gray transformation. Secondly, the foreground and background areas are initial marked according to the shape characteristics of the target, then the distance transformation in the traditional watershed algorithm is replaced by the centroid of the foreground area, and the foreground is marked again. Finally, the image is segmented by the watershed algorithm. The experimental results show that the average segmentation accuracy of this algorithm is 92.5%, which is more anti-noise and accurate than the existing image segmentation methods, and also solves the over-segmentation problem of the watershed algorithm.

**Keywords:** aerial images; regional centroid algorithm; optimal marker; watershed algorithm

## 0 引 言

随着无人机稳定性、续航能力的提升,无人机航拍图像广泛应用于海洋垃圾检测<sup>[1]</sup>、森林火灾预警<sup>[2]</sup>、原油漏油检测<sup>[3]</sup>、农田害虫防护、森林资源勘测等领域。无人机航拍比合成孔径雷达(SAR)获取高分辨率图像成本低,人为操作灵活性更高<sup>[4]</sup>。森林对于调节气候和保护生物的多样性有着非凡的意义。高纬度地带的森林,用来防风固沙,防止水土流失,减少土地荒漠化。用图像处理技术分割无人机航拍的森林图像,有助于制定合理的管理措施来保护森林系统。图像分割是对图像内容理解和分析的重要处理手段之

一。图像分割是将具有相似特征的像素划分为一类,提取出感兴趣的目标区域。图像分割方法主要分为两类:传统方法图像分割和基于深度学习的图像分割。基于深度学习的图像分割是通过标注的数据集来训练分割模型,实现图像的自动分割<sup>[5-6]</sup>。此方法克服了传统图像分割方法精度低、速度慢的缺点,但是训练神经网络需要大量人工的标注数据,增加了人力和时间成本。复杂地物背景下的航拍图像单个目标分辨率低,受复杂地形干扰较大,神经网络不能准确地学习到目标的特征。

传统图像分割是借助目标的几何形状、纹理、灰度等自然特征划分图像中不同目标区域。阈值分割是最常见的图

收稿日期:2021-04-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(61991413)、辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0251)项目资助

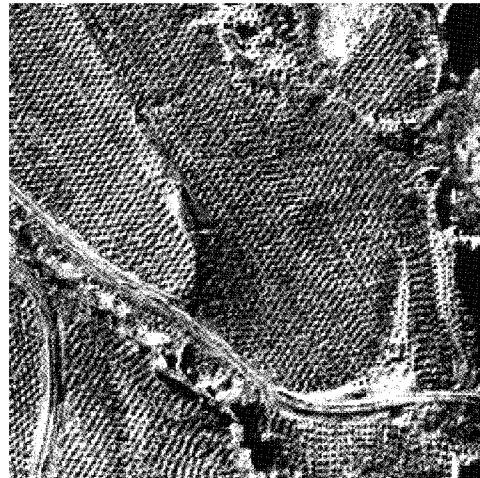
像分割算法<sup>[7-8]</sup>,它将图像划分成 0~255 个灰度级,根据设定的灰度阈值把图像分割为前景和背景,阈值分割适合背景单一,目标和背景像素灰度值差值大的图像。若图像存在灰度值、纹理突变或者受复杂地物干扰的情况,阈值分割结果并不理想。分水岭是基于形态学的分割算法,形态学的研究对象是二值图像,对于分割高分辨的航拍图像具有速度快、计算精度高等优点<sup>[9-10]</sup>。但当图像中存在大量噪声时,分水岭算法存在过分割现象。为解决分水岭算法的过分割问题,研究人员对该算法进行了改进。Luo 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于形态学重构及标记提取的分水岭分割算法,形态学重建能消除由纹理和噪声引起的局部极小值,为了减少过分割带来的影响,在分割前对感兴趣区域进行标记。文献[10]定义了无量纲参数  $a$ ,通过修改参数  $a$  来调整距离变换,解决了分割粘连物出现的过分割问题。Gamarra 等<sup>[11]</sup>提出了分水岭分离和合并的两步方法。首先是用传统的分水岭算法初次分割,又利用目标的形状特征识别出分割过度的区域,再进行合并。在过分割和欠分割之间权衡,得到最优分割方案。以上算法都是在标记分水岭和形态学重建基础上改进的,文献中的实验结果及各类评价指标也说明标记分水岭和形态学重建对分水岭分割结果影响非常大。准确地标记前景和背景是分水岭算法的最大难点,尽管提出很多方法,但是每种方法都只适用于特定的研究对象。在复杂地物背景下航拍得到山地环境绿化带树木的高分辨率图像并进行识别检测,比其他文献中处理的图像分辨率更高且受到地物环境干扰更大。

综上,本文提出一种地面树木的最优标记分水岭图像分割算法。高分辨航拍图像虽然提供了目标更多细节特征,但复杂地物几何特征和纹理特征也显现出来,容易产生误分割。为了减少误分割,根据目标的几何形状特征如面积、凹凸性、圆形成度等对前景背景初步标记,消除与前景灰度值相近的凹凸不平的地形造成的误分割。用前景区域的形心代替传统分水岭算法中的距离变换,对前景二次标记。从分割目标区域内部标记前景,避免了从区域边界标记前景受到噪声的影响。最后再分水岭分割,实验结果表明,该算法的分割正确率平均值为 92.5%,不仅高于传统分水岭分割算法的正确率,而且解决了复杂地物背景下分水岭的过分割现象。同时为评估改进算法对复杂地物背景下的小目标的分割效果,引入准确率、精确率、召回率和综合评价指数  $F1-Measure$  等综合评价指标。将改进方法与传统分水岭、前景区域的阈值分割进行比较,分析结果证明最优标记分水岭方法对模糊小目标的分割具有较高的准确率和鲁棒性。

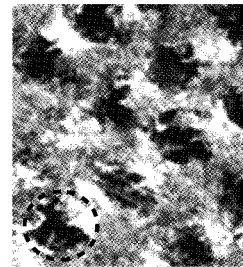
## 1 航拍图像获取与形态学图像处理

利用无人机对中国内蒙古自治区包头市石拐区周边山地绿化种植树木进行航拍并获取山地绿化树木高分辨率图像。图 1(a)是无人机拍摄的原始图像,图 1(b)中虚线圈标

记的区域是要识别的树木,树干非常细,不能直接提取树木本身的特征信息,只有通过计算树坑的数量来估算树木的数量。航拍图像中单个树坑的相对尺度小、颜色和纹理特征不明显<sup>[12]</sup>。人工可以通过先验知识标记树坑,但是用图像处理技术自动分割标记树坑的难度很大。



(a) 原始图



(b) 局部放大图

图 1 实验数据

航拍图像受复杂地势和光照不均匀影响,前景背景对比度低。图 2(a)是原始图像灰度值分布,从图中可以看出树坑与周围地面的灰度值非常接近,并且产生了许多噪声。图像中出现过多的“伪极小值”,会导致分水岭的过分割。为了增强对比度获得更好的分割效果,对原始图像进行灰度非线性变换,压缩低灰度区域的值,保留高灰度区域的值,变换结果如图 2(b)所示。最后使用中值滤波器对图像滤波,该滤波器主要用于滤除树坑周围的冗余噪声点。

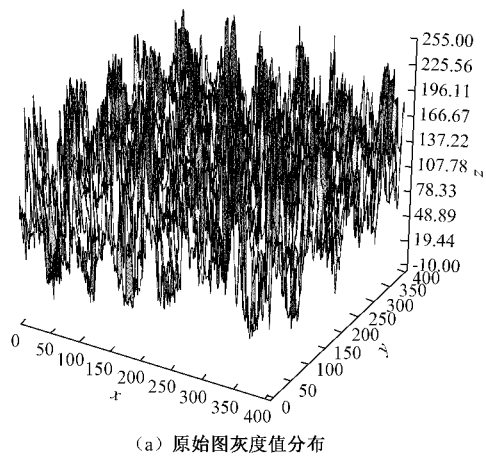
形态学运算是减小灰度值突变和地面噪声影响的一种有效的方法<sup>[11]</sup>,形态学运算包括腐蚀、膨胀、开运算和闭运算。腐蚀是通过特定的元素结构去除二值化后图中孤立的点和边缘,留下前景的核心部分,如式(1)所示。

$$D \ominus F = \{(x, y) \mid F_{xy} \subseteq D \neq \phi\} \quad (1)$$

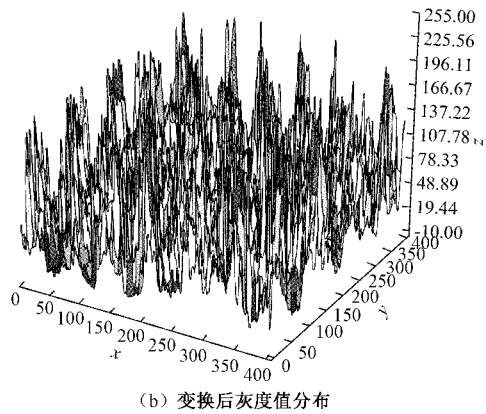
膨胀是对目标边缘进行扩展或者连接距离相近的目标,如式(2)所示。

$$D \oplus F = \{(x, y) \mid F_{xy} \cap D \neq \phi\} \quad (2)$$

其中,  $F$  是结构元素,由 1 和 0 构成不同的形状和尺寸,  $(x, y)$  是图像  $D$  上的像素点,  $F$  不断移动覆盖  $D(x, y)$



(a) 原始图灰度值分布



(b) 变换后灰度值分布  
图 2 非线性灰度变换

的过程中生成  $F_{xy}$ 。如果  $F_{xy}$  包含于  $D(x, y)$  中, 这些像素点  $(x, y)$  构成的集合就是腐蚀后的图像  $D \ominus F$ ; 如果  $F_{xy}$  与  $D(x, y)$  交集不为空, 记录所有满足此条件像素点  $(x, y)$  就是膨胀后的图像  $D \oplus F$ 。闭运算是先对图像先膨胀再腐蚀运算, 可以填充被过度分割的前景。开运算是先对图像先腐蚀再膨胀, 用来去除前景周围的孤立的噪声点和细化边缘。

## 2 传统分水岭算法

分水岭是基于拓扑理论的数学形态学的分割算法, 图像灰度化后, 将每个像素点的灰度值比作山的高度, 这些山会环绕成一个个山谷, 假设从每个谷底向山谷中注水, 随着水位上升, 为了防止各个山谷之间的水互相融合, 需要在海拔比较低即灰度值比较小的位置筑起围墙, 筑起的围墙就是分水岭算法的分割线<sup>[13-14]</sup>。

形态学重构和标记前景背景是改进分水岭算法过分割最有效的途径之一, 但在处理复杂地物背景下的航拍图像时, 简单形态学重构及标记的分割结果准确率低、鲁棒性差。分水岭算法是对单个像素点的运算, 仅通过像素灰度值来划分前景背景, 会产生误分割、过分割如图 3 所示, 图 3(a) 中同一个树坑由于出现灰度值发生突变, 被过度分

割。图 3(b) 中背景地形中灰度值分布与树坑相似, 被误分割为树坑。

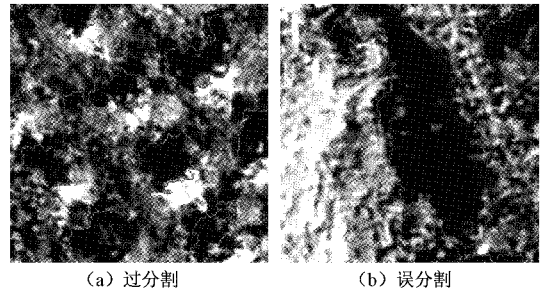
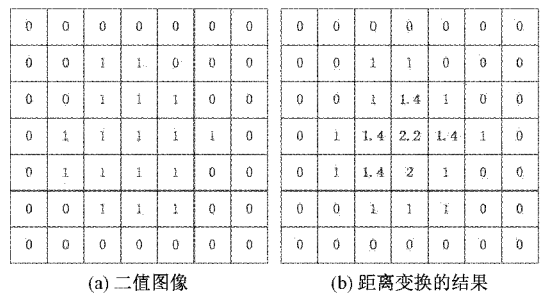


图 3 传统分水岭分割结果

分水岭算法分割图像的关键是前景能否被准确地标记, 前景标记的质量决定了分割结果<sup>[15]</sup>。分水岭算法由于对噪声非常敏感, 过分割现象比较严重, 在图 3(a) 中同一个树坑被分割成两部分。文献中解决过分割的方法有很多<sup>[16-17]</sup>, 应用最广泛方法是改进距离变换。距离变换, 又称标记函数, 是求二值化后其他像素到 0 像素的最短距离, 最终得出每个像素到最近 0 像素的距离的分布, 图 4 是基于距离变换原理。欧氏距离如式(3)所示。

$$D(x, y) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

图 4(a) 是输入图像的二值分布, 图 4(b) 经过欧氏距离变换得到的像素分布。距离变换用来在标记前景时, 对前景区域骨架化, 图 4(b) 中大于 1 的集合区域就是骨架化后的图像。其他文献也都是基于距离变换, 用不同的距离公式如街区距离、棋盘距离等对图像骨架化处理, 但距离变换算法并不适合树坑的分割。航拍图像中单个树坑分辨率低易发生灰度值突变且地面的纹理特征清晰, 产生的噪声较多, 无论哪种距离公式, 噪声会严重干扰距离变换后像素值。



(a) 二值图像 (b) 距离变换的结果

图 4 距离变换

## 3 最优标记改进分水岭算法

### 3.1 质心算法

由于算法设计目标不是精确分割树坑完整轮廓, 而是对每个树坑准确定位, 因此采用形态学运算获取并定位树坑区域。形态学开运算得到前景区域, 前景包含在内, 且前景区域大多为凸边形, 利用前景区域形状轮廓求它的形心

的位置。前景区域是连通域,不受灰度值突变的干扰。如图 5 所示,把前景区域轮廓看做是质量分布均匀的多边形,多边形的质量可以假想集中于  $O$  点,形心  $O$  所在的位置一定属于前景<sup>[18]</sup>。在质心  $O$  点进行形态学膨胀运算,得到的结果能够准确的标记前景的位置。

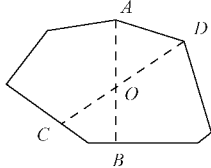


图 5 多边形的形心

计算多边形的形心,需要借助图像的矩<sup>[19-20]</sup>。图像矩的概念来自概率论中函数的矩,其本质是数学期望,数学期望  $E(x)$  的计算如式(4)所示,其中  $f(x)$  表示  $x$  的概率密度。

$$E(x) = \int x \cdot f(x) dx \quad (4)$$

把图像像素点的值看做是该点像素的概率密度,然后求解该点的期望得到图像的矩。 $M_{pq}$  是大小为  $M \times N$  图像  $V(i, j)$  的  $(p+q)$  阶中心几何矩。

$$M_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (5)$$

零阶矩定义如式(6)所示。

$$M_{00} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V(i, j) \quad (6)$$

$V(i, j)$  表示像素点  $(i, j)$  的值,此算法是在二值变换后的前景轮廓图像中求形心,故  $M_{00}$  表示白色区域像素值的和。

一阶矩定义如式(7)、(8)所示。

$$M_{10} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m i \cdot V(i, j) \quad (7)$$

$$M_{01} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m j \cdot V(i, j) \quad (8)$$

每个像素的坐标可以用  $i$  和  $j$  表示,  $M_{10}$  代表白色连通区域横坐标像素值和,  $M_{01}$  表示白色连通区域纵坐标像素值的和。

多边形形心坐标定义如式(9)所示。

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (9)$$

式中:  $x_c$  和  $y_c$  表示前景轮廓形心的横纵坐标。

在复杂的自然环境<sup>[21-23]</sup>中,目标与背景的灰度值差异较小,颜色特征不明显,树坑内部的灰度值易突变,出现局部极小值。这会导致两类问题的产生:1)相邻的树坑不能被分割;2)出现过分割。如图 6 所示为距离变换和形心算法对这两类问题的分割结果。图 6(a)是树坑前景区域的二值图像,图 6(b)中的白色区域是距离变换提取到的前景,它的变换原理如图 4 所示。从图中可见,对于灰度值差异小的相邻的树坑,因为距离变换没有将两个树坑的前景分开,分水岭算法把两个树坑划分割为一个。受到树坑周围和内部的噪声干扰,距离变换不能准确的标记前景,在图 6(c)中出现过分割。图 6(d)是前景区域的形心,为了提高分割的准确率,对形心做形态学膨胀运算,浅黑色圆点就是二次标记得到的前景,多边形的形心可以准确定位每一个树坑的位置。图 6(e)是形心算法的分水岭分割结果,形心算法能避免外界环境噪声和灰度值突变的干扰,利用几何形状特征,标记前景。

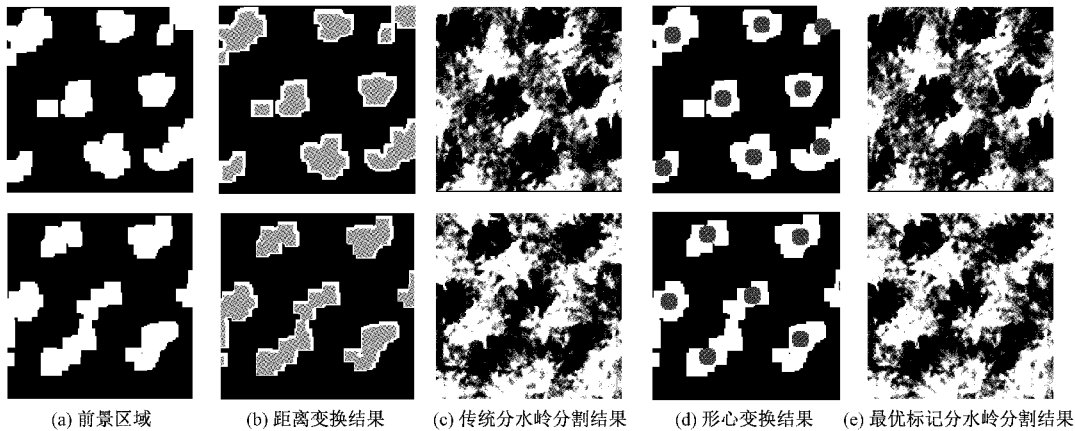


图 6 分水岭分割对比图

### 3.2 最优标记

受光照不均匀和地形的干扰,传统分水岭把凹凸不平的土堆也分割为树坑,原因是土堆与树坑有相似的灰度值分布,标记前景后景时错误的将土堆标记为前景。解决这类问题要利用树坑的形状特征:凹凸性、面积和圆形度,圆形度是树坑接近圆的程度。最优标记是对前景和背景进

行重新标记,把不符合标准的前景标记为背景。图 7 是前景后景的标记过程,图 7(a)是二值化后的图像,二值化只是根据设定的阈值将背景和前景初步分割。图 7(b)是形态学处理后的图像,通过形态学开运算得到前景区域。为了可视化,标记的过程用彩色标签展示,彩色标签是符合标准的前景区域,被标记为黑色标签的前景区域在面积、

凹凸性和圆度上与统计的树坑特性的平均值相差比较大,可以判定为地形干扰。图 7(c)是用形心算法精确定位树坑的位置。图 7(d)是得分水岭分割结果的分割线,分割线

与形心在位置和数量上一一对应。最优标记改善了复杂的地物环境对目标分割的影响,也证明准确的标记前景后景是改善分水岭算法的重要手段。

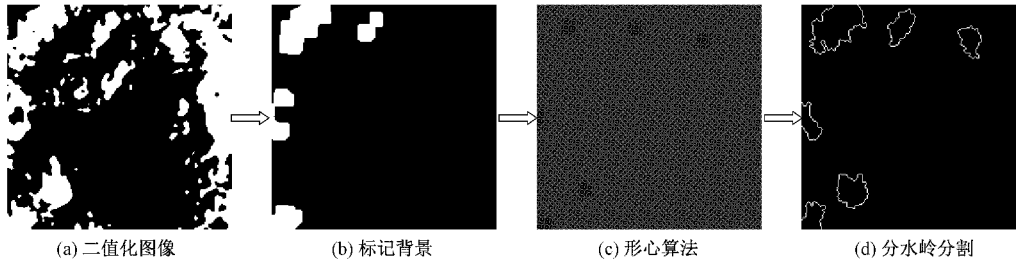


图 7 前景后景标记的过程

## 4 结果与分析

所有的实验数据均来自于中国北部内蒙古自治区包头市郊区的无人机航拍图。原始图像的大小为  $4\ 096 \times 4\ 096$ , 实验中输入的图像大小为  $2\ 048 \times 2\ 048$ 。由于图片尺寸较大,只展示了图像的部分结果,为了评估改进的分水岭分割算法,对此算法进行了定性和定量评价。

### 4.1 检测结果定性评价

图 8(a)是灰度化后的原图像,人工统计的树坑数量为 67 个。图 8(b)是基于距离变换的分水岭分割算法,大部分树坑被分割。由于背景灰度值与树坑十分接近,误分割和过分割现象非常严重。图 8(c)是基于形心变换的标记分水岭方法,从图中可以观察到树坑被准确定位分割,几乎没有发生过分割现象,而且分割结果受到地面噪声和凹凸不平的地形干扰影响较小。

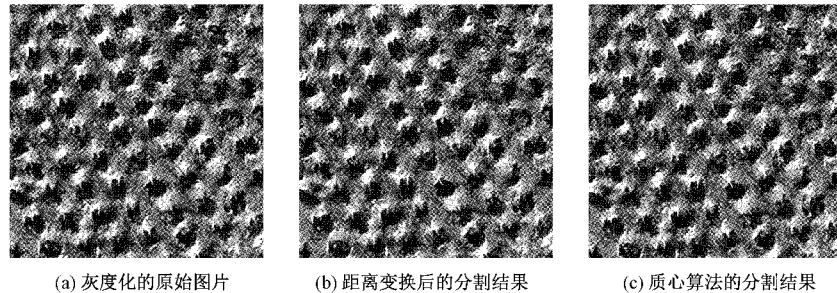


图 8 分割结果

为了验证提出方法的有效性,将形心算法与距离变换算法的结果做了比较,比较结果如表 1 所示。首先过分割问题被得到了极大地改善,由原来的 23.9%降低到 1.5%,证明了形心算法对于对比度低的目标前景的标记是合理且准确的。在传统的图像分割方法中,分水岭算法借助图像的灰度值、颜色特征以及纹理特征划分图像中目标的区域<sup>[24-27]</sup>。两种方法的未分割率都很低,说明分水岭对于复杂背景下的目标分割是非常适用的。基于距离变换分水岭得到树坑的数量为 83 个,受过分割的影响正确率只有 76.1%,利用约束条件对前景后景重新标记,基于形心算法分水岭算法最终得到的树坑数目是 67 个,准确率为 98.5%。受复杂地物环境和光照影响,树坑的数量不能完全等同于人工计数,但非常接近。不同于医学图像处理需要准确提取出目标的轮廓,本项目重点在于需要准确统计出树木的数量。因此提取前景时用形心算法代替经典的距离变换,然后用目标的几何特征对前景和后景图进行重新标记,最后应用分水岭算法分割。实验结果较为理想,

也证明基于标记分水岭分割算法对航拍图像中小目标<sup>[28-30]</sup>的分割是有效的。

表 1 分割结果统计

	距离变换算法	质心算法	人工统计
数量	83	67	67
过分割率/%	23.9	1.5	0
未分割率/%	1.2	4.5	0
正确率/%	76.1	98.5	100

### 4.2 分割结果定量评价

选择了 3 组具有代表性的航拍图像对改进的标记分水岭算法进行定量评价。为了展示出更多细节,只截取了输入图片的 1/8。原始图像如图 9(a)所示,第 1 行的图像中光照不足,树坑与周围地面对比度比较低,并且有土堆等干扰物;第 2 行的图像是在光照比较强的情况下拍摄的;第 3 行的图像有公路等地形干扰,图中树坑被杂草包围,颜色特征不明显;为了证明改进的标记分水岭方法能

在复杂的自然环境中准确的分割树坑,与前景区域的阈值分割、传统分水岭算法做了比较。图 9(b)是前景区域的阈值分割的结果,只对目标和背景做了初步分割,受噪声影响大。图 9(c)是传统标记分水岭分割的结果,树坑大多数被

分割,过分割和误分割现象非常严重,与阈值分割一样无法排除地形和地面噪声的干扰,分割结果依赖光照强度。图 9(d)为改进后的标记分水岭算法分割结果,效果比较理想,抗噪能力较强,改善了传统标记分水岭过分割的问题。

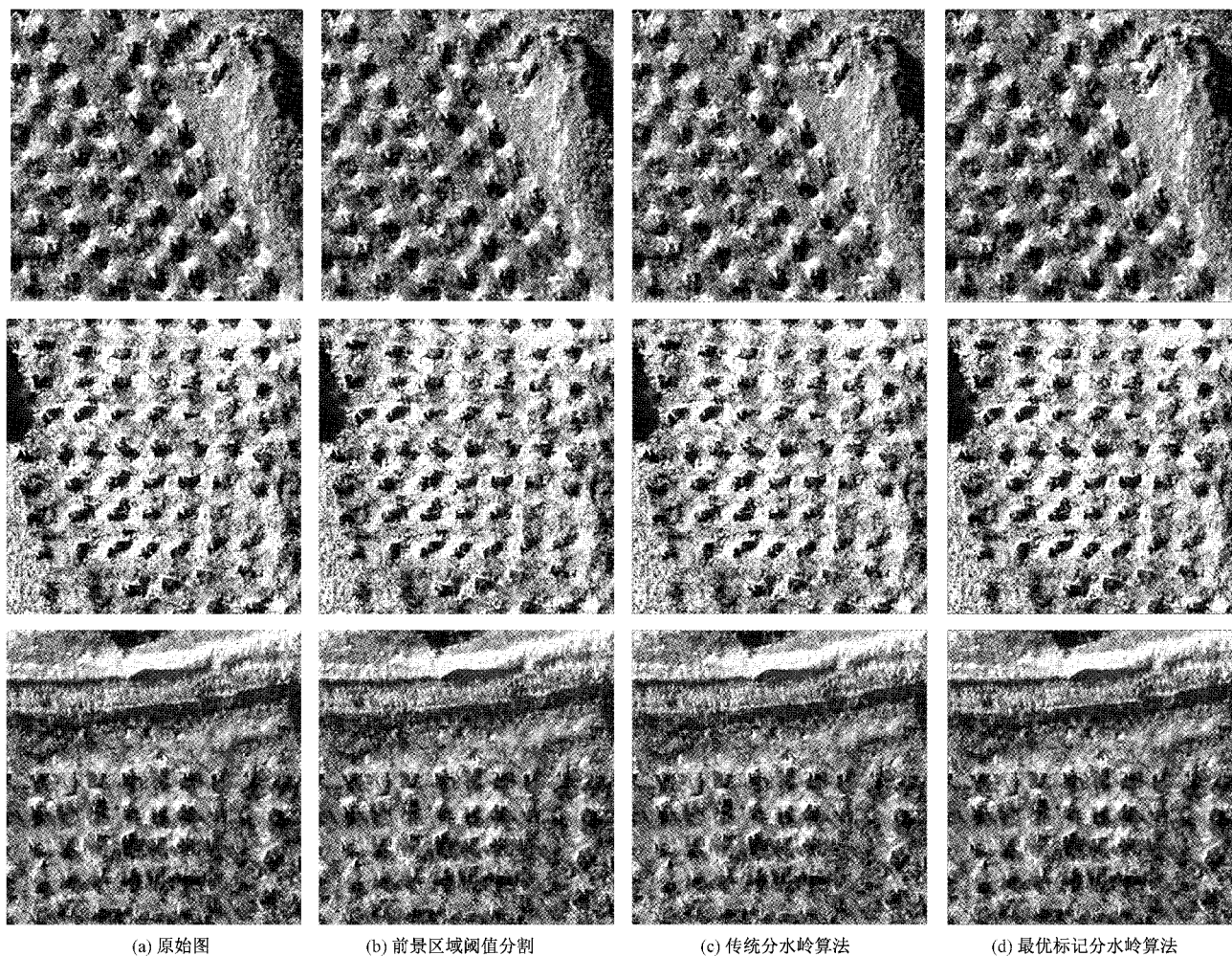


图 9 不同分割算法结果比较

此次实验结果使用准确率、精确率、召回率和综合评价指数  $F1-Measure$  (简称  $F1$  指数) 等评估图像分割模型性能的重要指标<sup>[31-32]</sup>。如表 2 所示为正负样本的混淆矩阵。把实验树坑分割结果的预测值与人工标记的树坑的真实值做比较,将分割结果划分为 4 类,  $TP$  表示分割结果与人工标记相同的树坑;  $FP$  表示分割算法分割出人工未标记的树坑;  $FN$  表示分割算法未能分割出人工标记的树坑;  $TN$  表示人工未记且分割算法也没有分割的树坑。

表 2 预测值和真实值混淆矩阵

预测值	真实值	
	1	0
1	$TP$	$FN$
0	$FP$	$TN$

准确率  $Accuracy$  如式(10)所示。

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (10)$$

式(10)表示的含义是分割算法正确的分割数树坑法的数量与人工标记真实值加上人工未标记却被分割算法分割出预测值的比值,  $Accuracy$  代表正确分割的数量与树坑真实数量的接近程度。

精确率  $Precision$  如式(11)所示。

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (11)$$

式(11)表示的含义是分割算法正确分割树坑数量与分割算法预测值的比值,  $Precision$  代表分割算法的准确率。

召回率  $Recall$  如式(12)所示。

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

式(12)表示的含义是分水岭算法正确分割出的数量与人工标记真实值的比值, *Recall* 代表人工标记的树坑中被分割算法正确分割的概率。

分割结果准确率高不能说明分割算法效果好, 准确率只代表树坑的分割的预测值接近人工标记的真实值, 预测值之中还包括过分割和误分割的树坑。所以需要同时满足分割结果的预测值中正确分割的树坑的数量接近人工标记的真实值, 即分割结果的精确率要高。但精确率与召回率之间是互相制约的关系, 需要用 *F1* 指数来权衡召回率与精确率, *F1* 指数的值越大代表分割算法的性能越好。

*F1* 指数定义为:

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

实验随机选取 100 张航拍图像, 对准确率, 精确率和召回率取了平均值结果如表 3 所示, 取每 10 张图像为一组计算了 10 组 *F1* 指数的结果如图 10 所示。从表 3 中可以看出, 最优标记改进分水岭算法比传统分水岭算法和前景区域阈值分割准确率分别高 18.2% 和 28.1%, 证明此算法对于航拍图像小目标的分割有较高准确率和精度。在图 10 中受复杂地势和光照强度的影响, *F1* 指数处于上下浮动繁荣状态, 但总体来说最优标记分水岭算法的 *F1* 指数最高, 前景区域阈值分割 *F1* 指数也高于传统分水岭算法, 可见传统分水岭算法易受环境噪声影响, 过分割现象严重。同时也证明文中提出的分割算法在复杂地物环境下抗噪性能强, 分割准确率高, 鲁棒性好。

表 3 不同算法分割结果统计 wt. %

算法	准确率	精确率	召回率
前景区域阈值分割	64.4	63.1	78.3
传统标记分水岭	74.3	71.2	63.1
改进标记改进分水岭	92.5	85.7	77.1

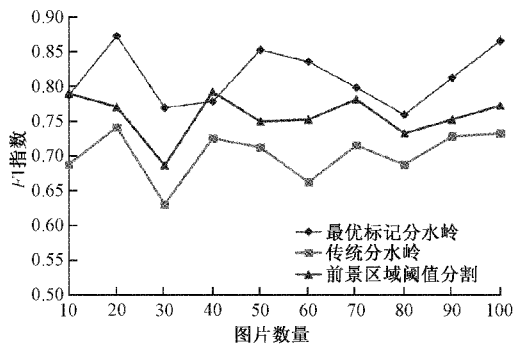


图 10 *F1* 指数统计结果

## 5 结 论

通过最优标记改进分水岭算法来分割航拍图像中的

树坑进而对地面数木进行计数。根据实验结果得出如下结论。

1) 分水岭算法的分割依赖于前景和背景标记, 正确标记是准确分割的关键。

2) 对于单个目标分辨率低, 颜色和纹理特征不明显的情形, 可以利用前景区域的形状特征来划分目标类别。

3) 采用前景区域轮廓的形心算法代替经典分水岭中的距离变换, 可以改善过分割和误分割现象。

4) 将改进后的分水岭算法应用于航拍图像地面小目标分割, 取得了良好的实验效果。为经典分水岭算法在图像分割领域的应用提供了一些新的方法和思路。

## 参考文献

- [1] FALLATI L, POLIDORI A, SALVATORE C, et al. Anthropogenic marine debris assessment with unmanned aerial vehicle imagery and deep learning: A case study along the beaches of the republic of maldives[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133581.
- [2] SUDHAKAR S, VIJAYAKUMAR V, KUMAR C S, et al. Unmanned aerial vehicle(UAV) based forest fire detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires [J]. *Computer Communications*, 2019, 149:1-16.
- [3] JIAO Z, JIA C G, CAI C Y. A new approach to oil spill detection that combines deep learning with unmanned aerial vehicles[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 139:1300-1311.
- [4] 宋伟, 王永波. 基于改进 AKAZE 算法的无人机影像匹配[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(8):96-102.
- [5] ABDELTAWAB H, KHALIFA F, TAHER F, et al. A deep learning-based approach for automatic segmentation and quantification of the left ventricle from cardiac cine MR images [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics: The Official Journal of the Computerized Medical Imaging Society*, 2020, 81:101717.
- [6] FRANCISCO J P-B, FRANCOIS S, JUAN-CARLOS P-C, et al. A deep learning system to obtain the optimal parameters for a threshold-based breast and dense tissue segmentation[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2020, 195:105668.
- [7] 何国生, 施露露, 邹爽爽, 等. 基于自适应阈值的间充质干细胞分割方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(6):18-23.
- [8] KOTTE S, RAJESH K P, KUMAR I S. Optimal multilevel thresholding selection for brain MRI image segmentation based on adaptive wind driven optimization[J]. *Measurement*, 2018, 130:340-361.
- [9] LUO W, ZHANG H, LIU X. Hyperspectral/

- multispectral reflectance imaging combining with watershed segmentation algorithm for detection of early bruises on apples with different peel colors[J]. *Food Analytical Methods*, 2019,12:1218-1228.
- [10] SUN Q, ZHENG J, LI C. Improved watershed analysis for segmenting contacting particles of coarse granular soils in volumetric images [J]. *Powder Technology*, 2019,356:295-303.
- [11] GAMARRA M, ZUREK E, ESCALANTE H J, et al. Split and merge watershed: A two-step method for cell segmentation in fluorescence microscopy images [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2019, 53:101575.
- [12] ZHOU J, VONG C M, LIU Q, et al. Scale adaptive image cropping for UAV object detection [J]. *Neurocomputing*, 2019, 366:305-313.
- [13] GONZALEZ A, PEREZ J C, MUNOZ, et al. Watershed image segmentation and cloud classification from multispectral MSG-SEVIRI imagery [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(1):135-142.
- [14] ROERDINK J B T M, MEIJSTER A. The watershed transform: Definitions, algorithms and parallelization strategies[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2000, 41(1-2): 187-228.
- [15] ZHANG H, TANG Z, XIE Y, et al. A watershed segmentation algorithm based on an optimal marker for bubble size measurement[J]. *Measurement*, 2019, 138: 182-193.
- [16] CHEN Q, YANG X, PETRIU E M. Watershed segmentation for binary images with different distance transforms[C]. *The 3rd IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications*, 2004:111-116.
- [17] XU L L, LU H X, ZHANG M. Automatic segmentation of clustered quantum dots based on improved watershed transformation[J]. *Digital signal processing*, 2014,34: 108-115.
- [18] HA J S, YOO K H. Approximating centroids for the maximum intersection of spherical polygons [J]. *Computer Aided Design*, 2005, 37(8):783-790.
- [19] KARAKASIS E G, AMANATIADIS A, GASTERATOS A, et al. Image moment invariants as local features for content based image retrieval using the Bag-of-Visual-Words model[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2015, 55:22-27.
- [20] YANG B, LI G X, LI H L, et al. Rotation and translation invariants of Gaussian-Hermite moments [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(9): 1283-1298.
- [21] 张艳,张明路,蒋志宏,等. 基于改进的 LIP 算法低照度图像增强算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,33(11): 147-156.
- [22] 杜永生,黄传波. 基于质量度量与颜色校正的多曝光图像融合算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,33(1): 90-98.
- [23] 冯冬艳,王海晖. 相关性约束下 SAR 图像动态重构的目标识别方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,33(9): 100-106.
- [24] 王瑞,姚爱琴,杨瑞,等. 基于小波变换模极大的多尺度图像边缘检测在烟雾图像中的应用[J]. *国外电子测量技术*, 2020,39(9):63-67.
- [25] 李晖晖,周康鹏,韩太初. 基于 CRcLU 和 FPN 改进的 SSD 舰船目标检测[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(4): 183-190.
- [26] 蓝金辉,王迪,申小盼. 卷积神经网络在视觉图像检测的研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2020,41(4):167-182.
- [27] 冯贺,李立,赵凯. 基于拉普拉斯分解耦合亮度调节的可见光与红外图像融合算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,34(10):91-97.
- [28] 颜正恕,王璟. 基于非下采样轮廓波变换耦合对比度特征的遥感图像融合算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,34(3):28-35.
- [29] 马世欣,刘春桐,王欣,等. 基于背景判别与邻域补偿的高光谱异常检测[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 239-245.
- [30] 陈彦彤,李雨阳,陈伟楠,等. 基于深度语义分割的遥感图像海面舰船检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1):233-240.
- [31] TAHA A A, HANBURY A. Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: Analysis, selection, and tool[J]. *BMC Medical Imaging*, 2015, 15, DOI: 10.1186/s12880-015-0068-x.
- [32] AKBAS E, AHUJA N. Low-level multiscale image segmentation and a benchmark for its evaluation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2020, 199:103026.

### 作者简介

刘军,工学博士,副教授,主要研究方向为智能传感器与检测技术、图像与信号处理、智能机器人控制技术。  
E-mail:lj-mail-sut@163.com