

# 基于机载激光雷达数据识别单株木的新方法

唐菲菲<sup>1,2</sup>, 阮志敏<sup>3</sup>, 刘 星<sup>1,2</sup>, 张亚利<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室  
(重庆大学), 重庆 400045; 3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘要:**在林业应用中,机载激光雷达技术较被动式遥感技术有着独特优势。以从机载激光雷达数据中分离单株木,提取单株木树高和树冠大小信息为目的,融合有标记约束的分水岭分割和流域跟踪分割两种图像分割方法,提出一种新的单株木识别思路。以美国某地区实地采集激光雷达数据为例验证本文提出方法,实验结果表明该方法通过增加边缘检测范围的约束条件,能够有效避免过分分割现象,并通过使用约束条件,减少在其检测范围内的目标数量,从而避免不必要的检测干扰,较传统方法能快速准确地识别单株木。

**关键词:**机载激光雷达;单株木;树高;树冠;图像分割;标记

**中图分类号:**P 225.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)02-0196-06

## 1 引言

在林区应用中,机载激光雷达这一主动式遥感技术与现有的被动式遥感技术相比,几乎可以不受外界测量环境的影响,能够直接、快速获取大面积、高精度的植被三维信息。从机载激光雷达数据中提取单株木的植被信息主要涉及数据滤波和图像分割两大关键技术,首先利用数据滤波技术分离地面激光脚点和植被激光脚点,然后利用图像分割技术分离单株木,最后从分离后的单株木中提取相应的植被信息。本文重点讨论用于分离单株木和提取植被信息的图像分割方法。

从激光雷达数据中提取植被信息是近年来国内外林业遥感的研究热点。国内学者刘清旺等<sup>[1]</sup>提出一种双正角树冠识别算法;国外学者常利用图像分割方法进行单株木识别,常用方法有以下几种:经典分水岭分割方法<sup>[2-3]</sup>、标记约束分水岭分割<sup>[4]</sup>、等级分水岭分割<sup>[5]</sup>、区域生长法<sup>[6-7]</sup>以及流域跟踪分割法<sup>[8-9]</sup>。其中,流域跟踪算法容易实现,但是难以找到一个合适的比例尺度进行分割,特别是在植被密集区域难以实现单株木的识别;而标记约束的分水岭分割方法给出检测的起始点和停止检测条件,但是对于检测范围存在不确定性,加大了分割结果受到干扰的可能性,成为影响植被密集地区分割结果

的重要因素之一。通过综合分析标记约束的分水岭和流域跟踪两种方法的特点,本文提出一种标记约束的局部流域跟踪分割算法,较以往方法,该方法能够快速准确地完成植被密集区域的单株木识别。

## 2 基于机载激光雷达数据识别单株木

基于机载激光雷达数据识别单株木的过程分以下几步:

(1) 通过数据滤波从原始激光点云数据中分离植被激光脚点和地面激光脚点。

(2) 以地面激光脚点为基础生成数字地面模型DTM,并以植被激光脚点中的树冠点为基础生成数字冠层模型DCM。

(3) 利用DCM和DTM相减得到树高模型DTHM。

(4) 应用局部最大值搜索算法从DTHM中探测单株木位置并获取树高。

(5) 应用本文方法,结合探测得到的单株木位置进行单株木识别并获取树高和树冠大小信息。

本文使用基于多回波信息的继承式多分辨率体素滤波方法<sup>[10]</sup>对植被和地面进行分离,然后利用插值分别生成DTM和DCM,并将二者相减得到DTHM,接着应用大小固定的圆形窗口对DTHM进行局部最大值搜索,探测得到单株木的位置。由

于篇幅有限,上述步骤不做详述。下面详细介绍本文提出的标记约束的局部流域跟踪分割算法识别单株木、获取树冠大小的过程。

2.1 标记约束的局部流域跟踪分割算法基本思想

如前所述,分水岭分割或是其改进方法以及流域跟踪分割方法在检测树冠边缘时均给出了开始检测的起始点和停止检测的条件,如分水岭分割方法是以局部最小值(浸水模拟)或局部最大值(泄洪模拟)为起始点,而流域跟踪分割方法是以局部最大值为起点。但是对于这两类分割方法来说,只要没有满足停止检测的条件,被检测的对象可以是整幅图像内的任何像素,这样无疑增加了检测范围的不确定性,在植被密集的森林地区,这一不足会成为影响分割结果的重要因素之一。因此,本文通过对上述两种方法的融合和改进,提出一种标记约束的局部流域跟踪分割方法,该方法中不仅存在检测的起始点和停止检测条件,另外还添加了对检测范围的约束条件。

这种标记约束的局部流域跟踪分割方法中所指的“标记”即利用局部最大值搜索探测得到的单株木的位置信息,“约束”即在“标记”的基础上确定一个圆形搜索范围作为检测区域,圆形搜索范围的确定是该方法的关键。确定这一搜索范围时,以 DTHM 为基础,从搜索得到的某一个局部最大值,即某一单株木的位置作为圆心,寻找与其距离最近的单株木,以这两个植被冠顶的距离为半径形成一个圆形搜索范围。确定了这样一个圆形搜索范围,可以减小边缘检测时搜索范围的不确定性,从而减小植被密集地区单株木分离的难度和不必要的噪声干扰。

2.2 标记约束的局部流域跟踪分割算法的具体步骤

图 1 为标记约束的局部流域跟踪分割算法流程图,具体步骤如下:

(1) 确定检测范围

以某个局部最大值为检测的起始点  $p_0$ , 搜索与该点距离最近的另一个局部最大值  $p_i$ , 以  $p_0$  为圆心,  $p_0$  和  $p_i$  的距离  $\text{dis}(p_0, p_i)$  为半径确定一个圆形搜索范围, 位于该搜索范围内的点被设定为被检测对象, 即为满足以下条件的激光脚点:

$\{p_i, p_j \in \text{DTHM} \mid \text{dis}(p_j - p_0) \leq \text{dis}(p_i - p_0)\}$  (1)

这样设定检测范围可以有效地减少检测区域内的检测对象数量, 通常情况下, 该范围内只包含 1~2 株单株木。图 2 为按照上述方法确定的圆形搜索范围的部分实例结果, 为便于观察, 将三维 DTHM 转换为二维灰度图作为底图, 红色标记点为利用局部

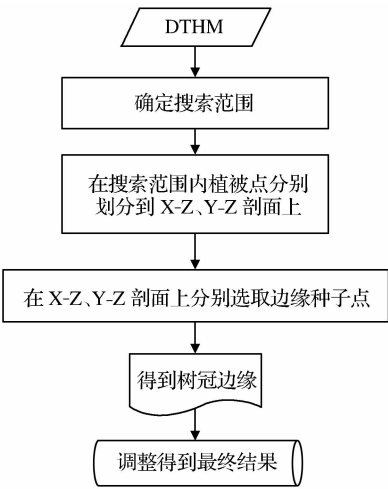
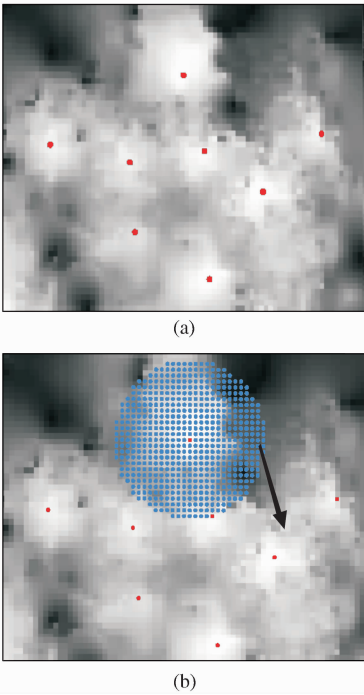


图 1 标记约束的局部流域跟踪分割算法流程图  
Fig. 1 Flow chart of marker controlled local valley-following segmentation

最大值搜索得到的单株木的位置, 图 2(b) 中蓝色标记点为所确定的某一单株木的圆形搜索范围:



图中红色点为局部最大值搜索结果, (b) 图中蓝色点确定的圆形搜索范围为 (a) 图中分离某一单株木时确定的圆形搜索范围

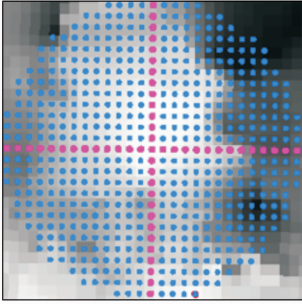
图 2 确定圆形搜索范围实例

Fig. 2 Example of fixing circle searching extent

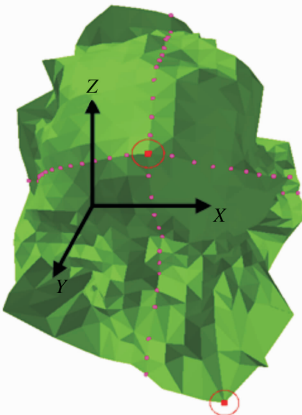
(2) 做 DTHM 剖面

标记约束的局部流域跟踪分割算法中的边缘种子点的搜索是从 DTHM 的 X 方向和 Y 方向同时进行搜索。在选取种子点之前, 把第一步中确定的搜索范围从 DTHM 上分别分解到 X-Z 和 Y-Z 两个方

向上,为下一步中边缘种子点的选取做准备。图 3 为图 2 中的圆形搜索范围分解到  $X$  方向和  $Y$  方向后的结果。



(a) 圆形搜索范围的二维分解结果



(b) 在 DTHM 上对应的三维分解结果

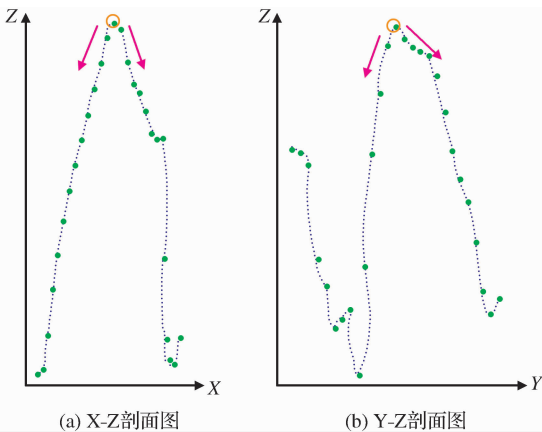
红色点表示  $X$  方向和  $Y$  方向的某一分解结果示例

图 3 圆形搜索范围被分解后的结果

Fig. 3 Circle searching result was disassembled

### (3) 边缘种子点选取

边缘种子点的选取过程利用了流域跟踪分割方法中模拟水滴从高处滑落下来的思想(见图 4),从



虚线为树冠高程值走势,黄色空心圆标注为树冠顶部,箭头标明水滴滑落方向

图 4 分解结果所对应的二维剖面图

Fig. 4 Profiles of corresponding disassembled result in fig. 3

DTHM 中的第  $k$  棵树提取出相对应的  $X$  方向和  $Y$  方向的剖面  $X-Z$  和  $Y-Z$ ,以每条剖面的顶端为水滴滑落的起始点,使水滴分别从剖面的左侧和右侧滑落,直到到达“谷底”停住。依次对剖面进行处理,最后得到的所有剖面的“谷底”集合即为所求边缘,其模型关系式如下:

$$\text{Seg} = \text{LVFM}(\text{LM}, h) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Edge}_k &= \bigcup_{p=1}^m \text{Edgeseed}_{X-Z} + \bigcup_{q=1}^n \text{Edgeseed}_{Y-Z} \\ &= \bigcup_{p=1}^m (\text{Edgeseed}_{(X-Z)(\text{left}+\text{right})}) + \\ &\quad \bigcup_{q=1}^n (\text{Edgeseed}_{(Y-Z)(\text{left}+\text{right})}) \end{aligned} \quad (3)$$

式 2 表述了检测树冠边缘的核心思想,Seg 为边缘检测过程,LVFM 为标记约束的局部流域跟踪分割算法(Marker controlled Local Valley Following, LVFM),LM 为局部最大值标记,  $h$  为高程值。式 2 表明标记约束的局部流域跟踪分割算法实际上与两个量有关,一个是局部最大值的搜索结果,即单株木的位置,这个用来确定搜索范围大小,而高程值  $h$  用来判断树冠高程值的变化趋势是否满足树冠边缘的检测条件。式 3 为树冠边缘检测的分解表达式,  $\text{Edge}_k$  为第  $k$  棵树的边缘,  $i, j$  表示剖面的编号,假设对于第  $k$  棵树分别有  $m$  条和  $n$  条  $X-Z$  和  $Y-Z$  剖面,那么第  $k$  棵树探测到的边缘即为分别在  $X-Z$  和  $Y-Z$  剖面上的左侧和右侧检测到的最低点的集合。

以某单株木为例,具体的检测过程如下:

(1) 取出  $X-Z$  剖面上的第  $p$  个点以及第  $(p+1)$  和第  $(p-1)$  点,比较 3 点的高程值,若  $H_{p-1} > H_p$  且  $H_{p+1} > H_p$ ,则点  $p$  为“谷底”,停止检测,否则顺序比较下一点。

(2) 合并检测结果,得到  $X-Z$  剖面上的边缘点集合。

(3) 同样方法检测  $Y-Z$  剖面。

(4) 将所有边缘点集合合并到同一集合中,得到第  $k$  棵树的边缘。

遍历 DTHM 中的单株木,计算树冠大小。单株木的树冠的面积,为边缘内所有像素的面积和,如式(4):

$$\text{Area}_i = \sum_{j=1}^n (\text{pixle}_j)^2 \quad (4)$$

其中:  $\text{Area}_i$  为第  $i$  棵树的树冠面积,  $\text{pixle}_j$  为第  $j$  个像素大小,  $j$  为像素计数,  $n$  为单株木内包含的像素总数。

单株木的树冠直径通过检测得到的单株木边缘的任意两个互相垂直方向上的轴长的平均和计算

得到:

$$\text{dia}_i = (\text{dia}_{ix} + \text{dia}_{iy})/2 \tag{5}$$

其中: $\text{dia}_i$  为计算得到的单株木的树冠直径, $\text{dia}_{ix}$  和  $\text{dia}_{iy}$  分别为任意两个相互垂直方向上的树冠的直径。

3 实验结果及对比分析

3.1 实例数据实验结果

实验数据为位于美国华盛顿洲西部的一片以针叶林为主的森林区域的一部分,树龄从幼林到 70 年

成熟林不等。采集机载 LiDAR 数据的设备为 Top-Eye 激光扫描系统,激光脚点密度为每平方米 2.6 个点,每条数据记录中包含激光脉冲编号,回波编号,三维坐标值 X、Y、Z 以及强度信息,最多记录 4 次多回波。对该实例数据应用本文中的方法,其局部最大值搜索结果和单株木分离结果见图 5 和 6,单株木信息提取结果见表 1。

3.2 实验结果对比分析

由于缺乏实地数据,我们将实验结果与Juha

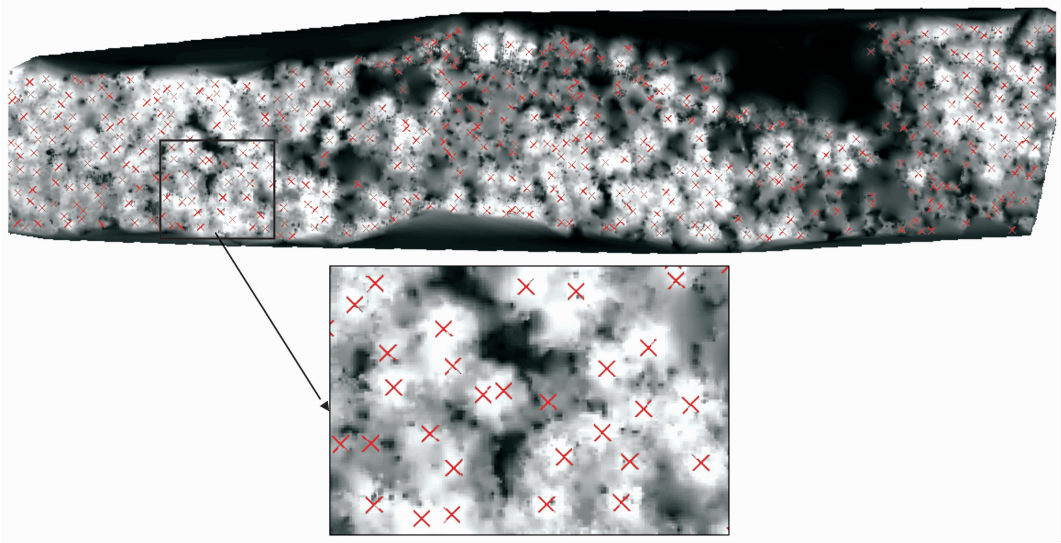


图 5 局部最大值搜索结果  
Fig. 5 Upper one is local maximum searching result

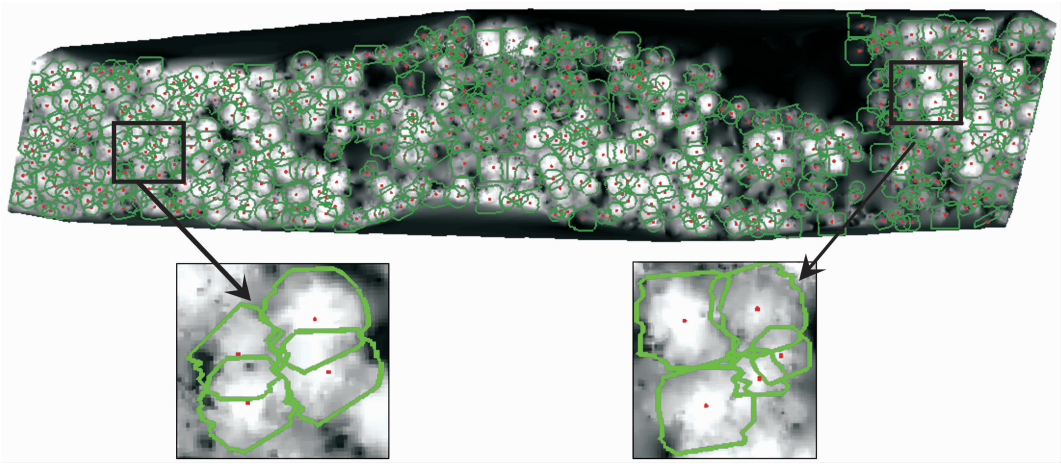


图 6 单株木分离结果  
Fig. 6 Upper one is individual tree isolation result

表 1 单株木信息提取结果

Table 1 Extraction result of individual trees

单株木数量	树高/m			树冠直径/m			树冠面积/m <sup>2</sup>		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
515	16.06	52.45	40.42	1.7	6.88	3.63	2.1	36.5	11.95



表 2 分水岭分割方法单株木信息提取结果

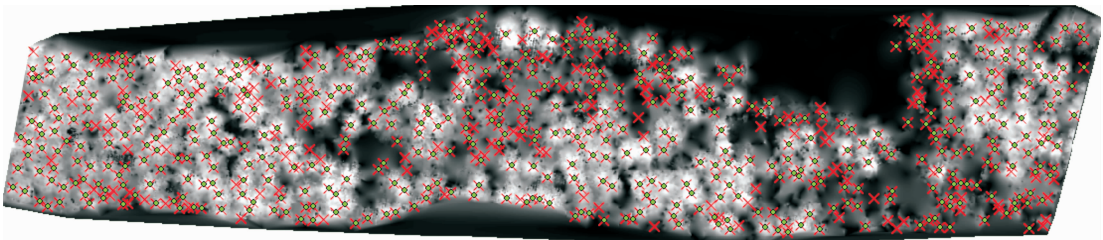
Table 2 Extraction result of individual trees by watershed segmentation

单株木数量	树高/m			树冠直径/m			树冠面积/m <sup>2</sup>		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
531	15.22	51.98	40.07	0.49	5.98	3.04	0.19	28.07	7.25

Hyyppä 等<sup>[2]</sup>的单株木分离方法的处理结果进行对比。Juha Hyyppä 首先利用低通滤波对 DTHM 进行噪声处理,然后经过局部最大值搜索获得单株木位置和树高,最后利用分水岭分割方法分离单株木。

图 7 为应用本文方法和 Juha Hyyppä 方法得到的单株木位置对比图,由于二者都是采用了局部最大值搜索的方法探测单株木的位置,因此探测到的单株木位置和单株木数量相差很小,其吻合度为 97%。但是在单株木分离过程中,二者的效果相差

较大。本文方法因为以局部最大值,即单株木的位置作为基础,设定了有效的搜索范围,将搜索树冠边缘的范围基本控制在前景范围内,且将检测范围内的单株木的数量控制在最多两株,从而能够较为快速、准确地定位被测目标边缘,有效避免过分割现象(单株木探测结果见图 6);而如图 8 中所示,Juha Hyyppä 方法由于在单株木分离过程中,对探测范围没有加以约束,因此容易出现过分割现象,使得单株木边缘的探测工作难度加大。综上,本文提出的标



绿色点为本文方法探测结果,红色叉为 Juha Hyyppä (2000)方法探测结果

图 7 单株木位置探测结果对比图

Fig. 7 Comparison graph for individual tree location detection

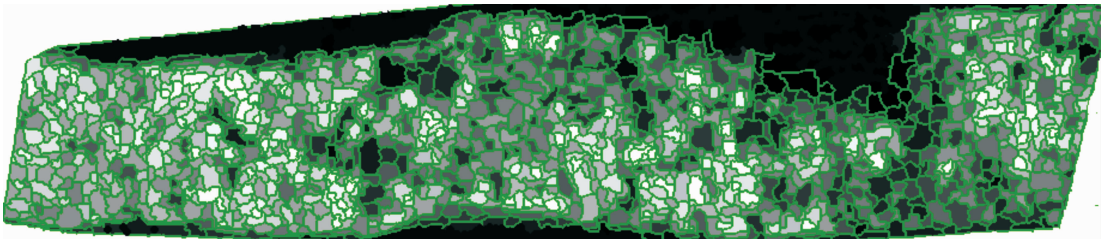


图 8 分水岭分割方法单株木分离结果

Fig. 8 Individual tree isolation result by watershed segmentation

记约束的局部流域跟踪分割方法可以对植被郁闭度较大的森林地区完成有效的单株木识别和信息提取工作,减少了以往方法的过分割现象。

4 结 语

本文融合分水岭分割中的标记约束思想和流域跟踪分割方法中的模拟水滴滑落的边缘检测思想,提出一种新的从机载激光雷达数据中识别单株木方法。该方法通过在标记局部最大值的基础上增加边缘检测范围这一约束条件的方式,设定了较以往方法更加有效的搜索范围,将边缘检测的范围

控制在前景范围内,且有效控制了检测范围内检测目标的数量。从与以往应用较多的分水岭分割方法的结果对比中发现,增加检测范围的约束条件能够减少检测时可能受到的不必要的干扰,从而有效避免了过分割现象,并能快速准确地定位被测目标边缘。

在本文方法中存在两个关键因素,分别是作为标记的局部最大值搜索结果和确定边缘检测范围的大小。本文的局部最大值搜索过程中仅使用了固定大小的圆形窗口完成局部最大值搜索工作,在今后的研究工作中,在获取到实地参考数据的情况下,可

根据树高与树冠大小的关系模型,采用可变大小的圆形窗口得到更加精确的局部最大值搜索结果,并为更好地确定检测范围服务。同时,在以后的研究工作中需要搜集与激光雷达数据相对应的实地参考数据加以对比,做出更加精确的定量分析,对论文方法做出更加详细的评价和改进。

#### 参考文献(References):

- [1] Liu Qingwang, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Extracting Height and Crown of Individual Tree Using Airborne LiDAR Data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6): 83-89. [刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83-89.]
- [2] Juha H, Hannu H, George P. Automatic Derivation of Features Related to Forest Stand Attributes Using Laser Scanner [C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33: 421-428.
- [3] Kim H, Haas C T, Rauch A F. 3D Image Segmentation of Aggregates from Laser Profiling[J]. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18: 254-263.
- [4] Chen Q, Baldocchi D, Gong P, *et al.* Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint LiDAR Data. Photogrammetric[J]. Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(8): 923-932.
- [5] Zhao K, Popsu S. Hierarchical Watershed Segmentation of Canopy Height Model for Multi-scale Forest Inventory[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 36, part 3/W52: 436-441.
- [6] Juha H, Kelle O, Lehtikainen M, *et al.* A Segmentation-based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanner[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(5): 969-975.
- [7] Tiede D. A Full GIS-based Workflow for Tree Identification and Delineation Using Laser Scanning. The International Archives of Photogrammetry[J]. Remote Sensing and Spatial Information Science, 2005, 36: 9-14.
- [8] Friedlaender H, Koch B. First Experiments in the Application of Laser Scanner Data for the Assessment of Vertical and Horizontal Forest Structures[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33, part B7. Amsterdam.
- [9] Leckie D, Gougeon F, Hill D, *et al.* Combined High-density LiDAR and Multispectral Imagery for Individual Tree Crown Analysis[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2003, 29(5): 633-649.
- [10] Tang Feifei, Liu Jingnan, Zhang Xiaohong, *et al.* A Voxel-based Filtering Algorithm for DTM Data Extraction in Forest Areas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1): 55-59. [唐菲菲, 刘经南, 张小红, 等. 基于体素的森林地区机载 LiDAR 数据 DTM 提取[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 55-59.]

## A New Method of Individual Tree Recognition based on Airborne LiDAR Data

TANG Fei-fei<sup>1,2</sup>, RUAN Zhi-min<sup>3</sup>, LIU Xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-li<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** In forestry applications, Airborne LiDAR has its unique superiorities compared to passive remote sensing. In this paper, a new individual tree recognition method was proposed to isolate individual tree and extract tree height, also the area of the tree crown, this method is the fusion of marker-controlled watershed segmentation and valley-following segmentation. Finally, a real LiDAR dataset was test, experiment results show that this method can perform edge detection effectively compared to methods before because detection constraint was added into it. The detection constraint can avoid over-segmentation to some extent, and reduce the detection objects, which can avoid unnecessary detection noise.

**Key words:** Airborne LiDAR; Individual tree; Tree height; Tree crown; Image segmentation; Markers