

利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠

刘清旺 李增元 陈尔学 庞勇 武红敢

(中国林业科学研究院资源信息研究所)

摘要:机载激光雷达是一种主动遥感技术。在林业应用方面,高采样密度激光雷达能够获取单株木三维结构特征,采用不同的数据处理方法,可以得到不同精度的单株木参数。该文利用高采样密度的机载激光雷达数据(离散回波,平均激光点间隔0.52 m、平均光斑直径0.3 m),研究了单株木的树高提取技术和树冠边界识别算法,针对单株木的树冠特征,提出了一种双正切角树冠识别算法;最后,使用重庆铁山坪林场的9个外业样地数据,对单株木树高和冠幅,以及样地平均树高和平均冠幅进行了验证。结果表明,单株木树高和冠幅的 R^2 分别为0.34和0.03,样地平均树高和平均冠幅的 R^2 分别为0.97和0.71,样地尺度的相关性明显高于单株木尺度的相关性。

关键词:激光雷达;激光应用;单株木;树高;树冠;双正切角树冠识别算法

中图分类号:S758.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)06-0083-07

LIU Qing-wang; LI Zeng-yuan; CHEN Er-xue; PANG Yong; WU Hong-gan · **Extracting height and crown of individual tree using airborne LIDAR data.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(6) 83-89 [Ch, 14 ref.] Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

Airborne LIDAR is an active remote sensing technique. The 3D (three-dimensional) structural characteristics of individual tree can be observed with high sampling density LIDAR in forests, and produce changeable accuracy of individual tree parameters based on the different approaches of data processing using airborne LIDAR. This study analyzes the extraction of algorithms from individual tree height and crown diameters and develops a double-tangent crown recognition algorithm according to individual tree features using high sampling density airborne LIDAR data (discrete-return, average laser pulse sampling space is 0.52 m, average footprint diameter is 0.3 m). Accompanying the nine field plots of data from the Tieshanping Forest Farm in Chongqing City, southwestern China, this study validates the extraction results of tree height and crown diameters at individual tree and plot levels. The results showed that R^2 of height and crown diameters for individual tree was 0.34 and 0.03, respectively. R^2 of average height and crown diameter for sample plots was 0.97 and 0.71, respectively. This correlation at the plot level is obviously higher than that of any given individual tree level.

Key words LIDAR; laser applications; individual tree; tree height; tree crown; double-tangent tree crown recognition algorithm

近年来,激光雷达(Light Detection and Ranging, LIDAR)技术的迅速发展,为基础测绘、城市三维建模和林业应用提供了一种新的技术手段^[1-3]。机载LIDAR以飞机为搭载平台,在不同飞行高度可以获取不同采样密度的LIDAR数据,因而可以提供不同

详细程度的森林结构信息。低采样密度的LIDAR数据不能提供足够的单株木信息,仅可以测量地块尺度的森林结构参数,如平均树高和郁闭度等;高采样密度的LIDAR数据则可以测量单木尺度的森林结构参数,如单株木的树高和树冠等。由单木尺度

收稿日期:2008-02-01

<http://www.bjfujournal.cn>, <http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714404)、“863”国家高技术发展计划项目(2006AA12Z101)、“948”国家林业局引进项目(2004-4-64)。

第一作者:刘清旺,博士生,助理研究员。主要研究方向:遥感技术应用。电话:010-62888848 Email: liuqw@caf.ac.cn 地址:100091 北京颐和园后中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任作者:李增元,研究员,博士生导师。主要研究方向:环境遥感、信息共享、数字林业。电话:010-62889164 Email: lizy@caf.ac.cn 地址:同上。
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

的信息可以方便地得到地块尺度的信息,因此,利用 LIDAR 数据研究单木尺度的森林结构参数提取将会成为林业遥感的一个热点问题。

对于高采样密度的 LIDAR 数据,在单株木上一般有几个至几十个以上的激光脉冲回波,就可以建立单株木的冠层结构模型,提取树高和树冠等特征参数。Brandtberg 等^[4]使用小光斑、高采样密度 LIDAR 数据探测和分析了北美东部落叶林的已落叶单株木的树冠,平均采样密度约为每平方米 12 个回波点;Clark 等^[5]利用小光斑 LIDAR 系统估计热带雨林景观的林下地形高程和树高,平均采样密度为每平方米 9 个回波点;Maltamo 等^[6]基于激光扫描高度计和树尺寸分布期望函数估计材积量和立木度,平均采样密度约为每平方米 10 个回波点;St-Onge 等^[7]利用立体摄影测量和 LIDAR 组合来测量单株木树高,平均采样密度约为每平方米 0.1 个回波点;Koukoulas 等^[8]使用 LIDAR 和多光谱遥感数据对阔叶落叶林的单株树位置、高度和树种进行制图,激光脉冲回波点的采样间隔约为 2 m;Suarez 等^[9]使用机载 LIDAR 和航空摄影估计森林的单株木树高,平均采样密度约为每平方米 3~4 个回波点;Koch 等^[10]利用机载激光数据探测了温带阔叶和混交林单株木的树冠,激光脉冲的平均采样密度是每平方米 5~10 个回波点。目前已有的研究表明,单株木的树高估计值往往被低估,其原因可能是由于激光脉冲不能准确地击在单株木的最高点上;另外,不少树冠分割算法较适合于针叶林和开放阔叶林,对于完全郁闭的阔叶林则出现多个树冠合并在一起的现象。

本文的研究目的是评价高采样密度 LIDAR 在我国西南地区针叶林的可用性,具体包括:①研究单株木树高的提取技术;②探索一种能够处理高郁闭度条件下的树冠分割算法;③将 LIDAR 提取的单株木参数与地面测量数据进行比较分析。

1 研究区域与试验数据

1.1 研究区域

研究区位于重庆市江北区铁山坪林场,其地理坐标为 29°38'N,106°41'E,地理位置如图 1 所示。铁山坪属华蓥山脉东部山系,地势自西南向东北方向逐渐攀升,海拔高度一般在 160~550 m 之间,西坡坡度 30°~50°、东坡坡度 20°~50°。铁山坪林区属亚热带湿润气候,林区现有森林面积 1 200 hm²,以马尾松(*Pinus massoniana*)天然次生林为主,在 2007 年时,平均林龄为 49 年;混生树种主要有杉木(*Cuningham lanceolata*)、木荷(*Sapium sebiferum*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)等^[11]

1.2 样地数据获取

铁山坪林场的野外数据采集为 2006 年 11 月 13—18 日。研究区内共选择 20 个圆形样地,样地半径为 8 或 10 m(样地位置如图 1 所示)。选择被测单株木的标准是该树冠的大部分没有被其他树冠遮挡。采用围尺测量 1.3 m 高度处的胸径,手持激光测高仪测量全树高、枝下高,皮卷尺测量最大和最小树冠直径。测量单株木位置的方法一般有两种:通过 GPS 定位树冠中心^[5];使用罗盘和测距仪(或皮尺),测量每株树在样地中的极坐标^[12],处理后通过可视化检查手工配准到 CHM。本次外业利用差分 GPS 对样地中的每株树进行定位。样地中心点的位置如图 1 所示,图中坐标采用 WGS84 坐标系,UTM 投影北半球 6 度分带的第 48 带。

1.3 LIDAR 数据获取与预处理

LIDAR 数据获取时间是 2006 年 9 月 24 日。采用的仪器是加拿大 Optech 公司生产的 ALTM3100 LIDAR 系统。其波长为 1 064 nm,4 个回波;采用线性扫描方式、扫描角度为 20°,激光发散角 0.3 mrad,扫描频率 44 Hz;飞行地速 160~190 km/h,相对航高 800 m;扫描重叠率为 40%,得到的平均激光点间隔 0.52 m,平均点密度 3.7 个/m²,光斑大小 0.30 m;共获取了 9 个条带的数据,其中东西向 2 个条带,南北向 7 个条带。获取范围示意图见图 1。LIDAR 数据 GPS 差分结果的水平位置精度为 0.4 m,垂直位置精度为 0.15 m。另外,还同步获取了空间分辨率为 0.2 m 的 CCD 影像 1 000 幅,总覆盖面积约为 2.5 km × 2.5 km。

LIDAR 数据保存成 LAS 格式,投影方式为 UTM,参考椭球为 WGS84,每个激光点包含了平面位置坐标值、高度值、强度值、类别值、回波类型等信息。一般 LIDAR 数据生产者会对 LIDAR 数据进行粗分类,将 LIDAR 数据分成地面点和非地面点两类,常用的分类软件是 Tarroslid (Version 007, Tarroslid Ltd.)等。由地面点可以内插生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),由非地面点可以生成数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)。DSM 表达的对象可以是森林、建筑物等。在森林地区,由 DSM 减去 DEM,可以得到冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM)。CHM 表达了林木高度和冠层的空间分布状态。本文选择了 100 m × 100 m 的 LIDAR 数据子区域进行处理,子区域中心为样地中心。以一个样地为例,LIDAR 数据的处理结果见图 2,从左到右依次为由 LIDAR 数据生成的 DEM、DSM 和二者的差值 CHM,CHM 空间分辨率为 0.5 m。

2 研究方法

2.1 单株木树高提取

在 CHM 图像上(图 2(c))由暗到亮表示高度由小到大。从图 2(c)可以看出,树冠顶部比树冠的其他区域要亮一些,树冠之间的间隙区域最暗。因此,假设树冠顶部高于树冠的其他区域,通过计算局部最大值,可以得到树冠的顶点。其关键是确定局部最大值的滤波窗口大小。最简单的算法是使用 3×3 窗口进行局部最大值滤波,提取中心像元为最大值的点,但是由于噪声等因素的影响,会出现一些伪树冠顶点。改进算法一是指定最小树冠半径,由此确定局部最大值的滤波窗口大小,可以去除掉一些伪树冠顶点^[13];二是根据树冠上点的高度,确定局部最大值的滤波窗口大小^[14],其优点是适合于树高与冠幅相关性好的林木,缺点是可能会滤掉某些树冠顶点;三是指定树冠顶点之间的最小距离,如果两个树顶之间的距离小于该阈值,则合并对应的树冠^[10]。单株木树高提取的另一类算法是首先对 CHM 进行分割,识别出树冠区域,然后确定树冠区域内的局部最大值,得到树冠顶点的位置和高度等信息,因此,分割结果的优劣决定了树冠顶点的提取精度^[4]。本文采用的方法是首先根据当地的林分条件,指定最小树高阈值,并指定最小树冠半径,搜索局部最大值,然后通过 2.2 所述树冠识别算法,确定单株木的树冠边界,滤除掉树冠半径小于指定阈值的伪树冠顶点,得到最终的树冠顶点。单株木树高提取流程见图 3。

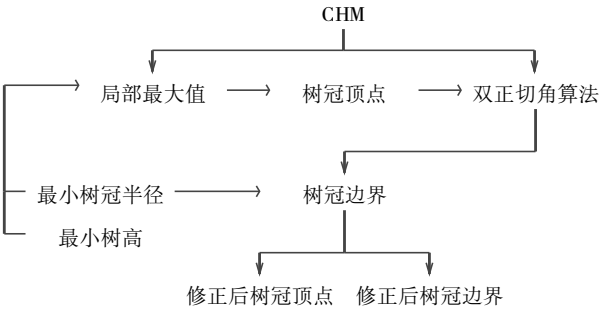


图 3 单株木树高提取流程图

FIGURE 3 Flow chart of extracting individual tree height

2.2 单株木树冠识别

目前,利用 LIDAR 数据进行单株木树冠识别的文献还比较少。主要研究方法包括:①Brandtberg 等^[4]采用尺度空间方法(scale space)提取单株木树冠的团块(blobs),其存在的问题是在最优尺度上明显的一些团块,在粗尺度上与其他团块合并在了一起;②Suarez 等^[9]使用 eCognition 对航空相片和 CHM 进行分割来提取树冠多边形;③Koch 等^[10]使用

“Pouring”算法识别树冠,从局部最大值开始扩展区域,如果存在较小或相等的像元值就继续,虽然得到了与实际接近的树冠形状,但还存在许多明显的“错误”分割。

本文提出了一种新的树冠识别算法。该算法通过计算树冠顶点与树冠上点之间的两个正切角来判断树冠边缘,这里称之为双正切角树冠识别算法。如图 4 所示, A 为树冠顶点, B 为树冠上点, C 为树冠边缘点, A' 、 B' 、 C' 分别为 A 、 B 、 C 在地面上的投影, AA' 为树高, $A'C'$ 为树冠半径, α 为 A 点对 B' 点的张角, β 为 B 点对 A' 点的张角。假设由树冠顶点 A 到树冠边缘点 C , 树冠上点 B 的张角 β 逐渐变大, 当张角 β 小于指定阈值 T 时, 则认为到达树冠边缘 C 。对于针叶树冠, 当 B 接近于 C 时, β 变化较快, 但是对于阔叶树冠, 当 B 接近于 C 时, β 变化缓慢, 因此考虑加入树冠顶点 A 的张角 α 。由树冠顶点 A 到树冠边缘点 C , α 也逐渐变大且变化速率恒定, 则 $\alpha + \beta$ 保证了更准确地逼近指定阈值 T 。为了计算方便, 用 α 和 β 的正切角 $\tan \alpha$ 和 $\tan \beta$ 代替二者, 实际的运算结果差别很小, 计算公式为:

$$\tan \alpha + \tan \beta = A'B'/AA' + A'B'/BB' < T$$

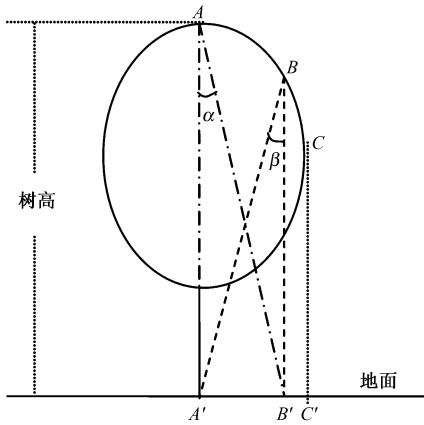


图 4 双正切角树冠识别算法示意图

FIGURE 4 Sketch of double-tangent tree crown recognition algorithm

3 结果与分析

3.1 外业测量的单株木 GPS 位置数据与树冠识别结果的相互关系

将外业测量的单株木 GPS 位置数据与双正切角算法识别的树冠边界结果相比较发现, 外业 GPS 点并不与识别树冠多边形一一对应。以样地 1 为例(图 5), 左图为外业测量的单株木 GPS 位置数据与树冠识别结果对比图, 右图为局部放大图。图 5 中绿点和绿多边形表示树冠识别结果, 红点表示外业测量的单株木 GPS 位置数据, 背景图为 CHM。从图 5 中可以看出, 一个识别树冠多边形可能包含 0 个、

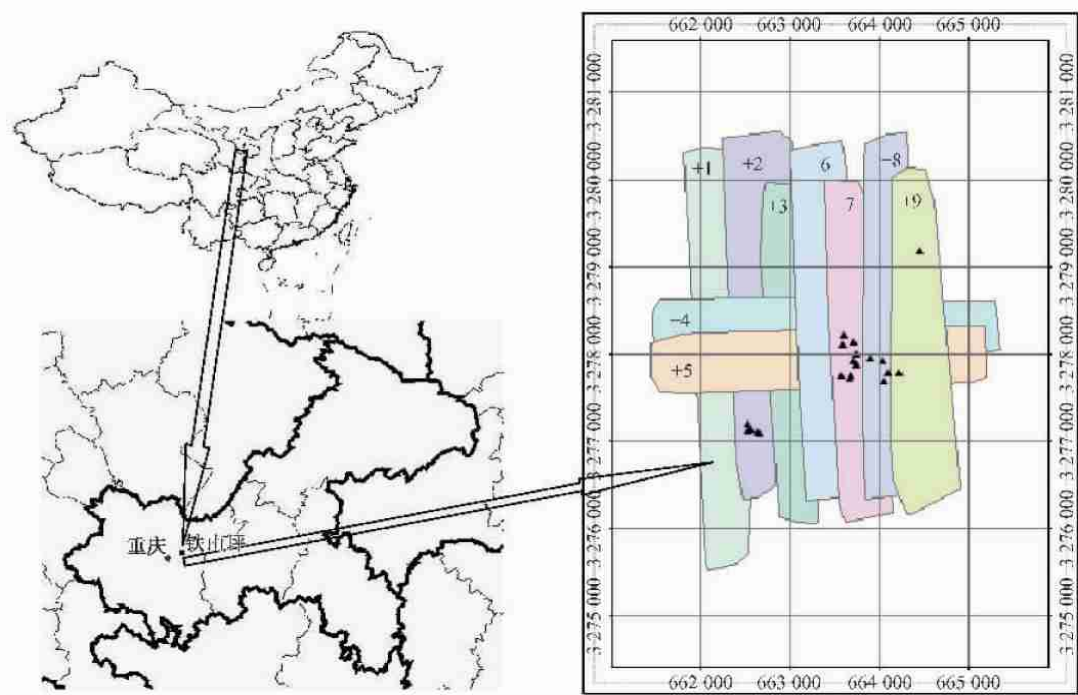


图 1 重庆市江北区铁山坪林场样地位置与航带示意图

FIGURE 1 Sketch of plot position and flight bands at Tieshanping Forest Farm in Chongqing City, southwestern China

注: 图中▲为样地中心点位置

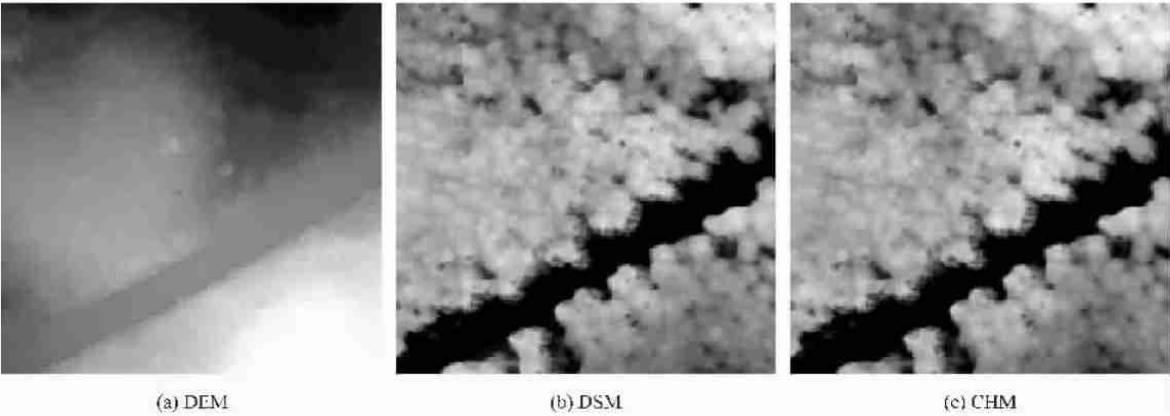


图 2 DEM、DSM 和 CHM 灰度图

FIGURE 2 Grey maps of DEM, DSM AND CHM

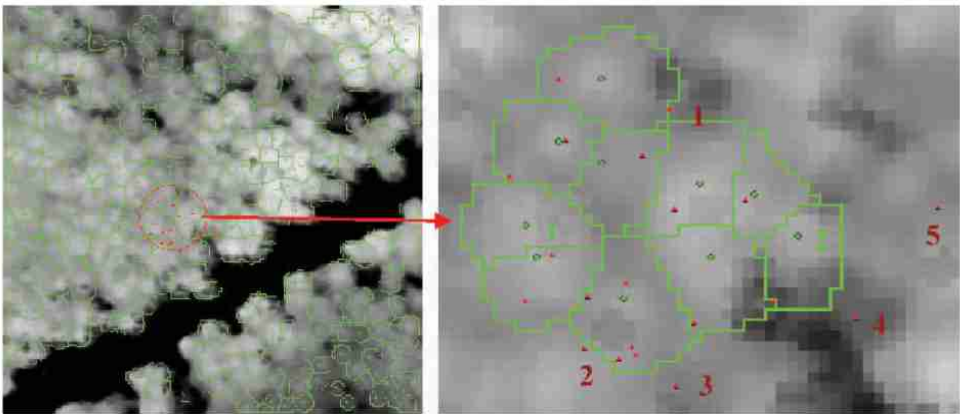


图 5 外业测量的单株木 GPS 位置数据与树冠识别结果对比

FIGURE 5 Comparison of individual tree location data obtained by GPS and crown recognition results

1 个或多个外业 GPS 点, 并存在未被任何识别树冠多边形所包含的外业 GPS 点, 如识别树冠多边形 1 和 2 未包含任何外业 GPS 点, 外业 GPS 点 1、2、3、4、5 未被任何识别树冠多边形所包含。

外业测量的 20 个样地中共有 12 个样地获取了单株木的 GPS 位置数据, 其中 3 个样地没有固定样地半径, 包括一个条形样地(lidar⁰⁵)、一个离散孤立

木样地 (lidar⁰⁹) 和一个成行种植的人工林样地 (lidar²⁰)。去除这 3 个样地后, 剩余 9 个样地的外业 GPS 位置和识别树冠多边形的相互关系见表 1。其中, 未包含外业 GPS 点的识别树冠多边形占全部多边形的 28%, 说明由于存在偏冠现象, 单株木的位置匹配存在很大误差。

表 1 外业 GPS 点和识别树冠多边形的相互关系						
TABLE 1 Relationship between field GPS points and recognized crown polygons						
样地编号	树冠多边形数	包含 GPS 点的树冠多边形数	未包含 GPS 点的树冠多边形数	GPS 点数	被包含在树冠多边形内的 GPS 点数	未被包含在树冠多边形内的 GPS 点数
lidar01	10	8	2	20	15	5
lidar02	15	11	4	28	18	10
lidar03	12	8	4	18	11	7
lidar04	16	10	6	22	17	5
lidar06	10	8	2	17	10	7
lidar07	13	10	3	21	12	9
lidar08	13	9	4	14	10	4
lidar10	13	11	2	16	14	2
lidar11	14	9	5	19	14	5
合计	116	84	32	175	121	54
百分比/%	100	72	28	100	69	31

3.2 单株木树冠识别结果的精度分析

由于一个识别树冠多边形内可能存在多个外业 GPS 点, 本文假设识别树冠多边形内具有最大树高的外业 GPS 点代表了该识别树冠多边形的外业测量树高。外业测量的单株木 GPS 数据与树冠识别

结果相匹配后, 共得到了 84 株单株木, 其中 83 株马尾松, 1 株杉木。使用 Minitab (Version 15.1, Minitab Inc.) 软件进行统计分析, 外业测量树高与识别树高、外业测量冠幅与识别冠幅的线性回归方程见表 2, 相应差值的基本统计量见表 3。

表 2 外业测量树高、冠幅与识别树高、冠幅的线性回归方程列表			
TABLE 2 Lists of linear regressive equations between field measurements and recognized values of tree height and crown diameter			
线性回归方程	标准差/m	R ²	说明
y ₁ =0.874x ₁ +3.01	2.31	0.34	x ₁ 为识别树高, y ₁ 为外业测量树高
y ₂ =0.209x ₂ +2.90	1.00	0.03	x ₂ 为识别冠幅, y ₂ 为外业测量冠幅

从表 2 可以看出, 外业测量的单株木树高和树冠与识别得到的单株木树高和树冠之间的相关性很差。造成这种现象的原因可能包括以下 4 个方面: ①外业测量单株木中心点坐标时存在误差, 造成外业测量的树冠顶点与识别算法得到的树冠顶点的位置匹配不准确。其原因包括两个方面: 一是林下 GPS 的定位精度明显降低; 二是单株木的测量位置引起的误差。研究区的不少单株木存在着偏冠现象, 外业测量时未测量树冠中心点的位置, 而实际匹

配时是根据树冠中心点进行匹配的, 这样就会造成很大的匹配误差。②由于单株木存在偏冠现象, 造成了几个树冠聚在一起, 单个树冠之间的界限不明显, 树冠识别算法可能将这几个树冠看作一个进行处理, 造成冠幅尺寸存在很大误差。③LIDAR 数据处理算法存在误差, 如生成 DEM、DSM 时存在误差, 识别树高和树冠边界时存在误差。④LIDAR 数据采集时存在误差, 如飞行误差、数据预处理误差、采样密度引起的误差等。

表 3 外业测量树高、冠幅与识别树高、冠幅差值的基本统计量								
TABLE 3 Basic statistics of differences between field measurements and recognized values of tree height and crown diameter								
变量	株数	平均值	标准差	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值
D ₁	84	1.02	2.31	-5.60	-0.34	1.30	2.59	6.68
D ₂	84	-1.40	1.18	-4.31	-2.23	-1.40	-0.56	1.25

注: D₁ 为外业测量树高与识别树高差值的基本统计量, D₂ 为外业测量冠幅与识别冠幅差值的基本统计量。

从表 3 可以看出, 外业测量树高与识别树高差值的平均值为正值, 说明外业测量树高偏高于识别树高。外业测量冠幅与识别冠幅差值的平均值为负值, 说明外业测量冠幅偏低于识别冠幅。

3.3 树冠识别结果的样地尺度精度分析

由外业测量的单株木数据和单株木树冠识别结果,统计汇总得到样地尺度的外业测量平均树高与

识别平均树高、外业测量平均冠幅与识别平均冠幅、外业株数与识别株数。3 种树冠参数的线性回归方程见表 4;3 种参数差值的基本统计量见表 5。

表 4 外业测量平均树高、冠幅、株数与识别平均树高、冠幅、株数的线性回归方程列表

TABLE 4 Linear regressive equations between field average measurements and recognized ones of tree height, crown diameter and tree number

线性回归方程	标准差/m	R ²	说明
$y_3=1.17x_3-2.15$	0.32	0.97	x_3 为识别平均树高, y_3 为外业测量平均树高
$y_4=0.743x_4+0.114$	0.22	0.71	x_4 为识别平均冠幅, y_4 为外业测量平均冠幅
$y_5=0.97x_5+7.39$	3.98	0.23	x_5 为识别株数, y_5 为外业测量株数

从表 4 可以看出,外业测量平均树高与识别平均树高的相关性非常好,说明可以通过 LIDAR 数据获取精度很高的林分平均高。外业测量平均冠幅与识别平均冠幅的相关性也较好,能够反映林分树冠

的分布情况。外业测量株数与识别株数的相关性很差,说明树冠识别算法受林分树冠的聚集程度影响很大。

从表 5 中可以看出,外业测量平均树高偏高于

表 5 外业测量平均树高、冠幅、株数与识别平均树高、冠幅、株数差值的基本统计量

TABLE 5 Basic statistics of differences between field average measurements and recognized ones of tree height, crown diameter and tree number

变量	样地个数	平均值	标准差	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值
D_3	9	0.61	0.39	-0.04	0.33	0.72	0.85	1.28
D_4	9	-1.26	0.24	-1.53	-1.45	-1.34	-1.08	-0.82
D_5	9	7.00	3.64	1.00	4.00	7.00	9.50	13.00

注: D_3 表示外业测量平均树高与识别平均树高差值的基本统计量, D_4 表示外业测量平均冠幅与识别平均冠幅差值的基本统计量, D_5 表示外业株数与识别株数差值的基本统计量。

识别平均树高 0.6 m 以上,外业测量平均树冠直径偏小于识别树冠直径 1 m 以上,外业株数偏多于识别株数 7 株以上。

4 结论与讨论

通过分析发现,由 LIDAR 数据提取的单株木树高平均低于外业测量的单株木树高 1.02 m ($R^2=0.34$),相应地,每个样地平均树高均值偏低 0.61 m ($R^2=0.97$),样地树高平均值的相关性明显高于单株木树高的相关性;LIDAR 数据提取的单株木冠幅平均偏大于外业测量的单株木冠幅 1.4 m ($R^2=0.03$),相应地,每个样地平均冠幅均值偏大 1.26 m ($R^2=0.71$),样地冠幅平均值的相关性显著,而单株木冠幅的相关性特别差;LIDAR 提取的样地株数比外业测量的样地株数平均少 7 株 ($R^2=0.23$)。LIDAR 数据提取单株木的精度受多种因素的影响,其中激光点采样密度(3.7 个/ m^2)是一个关键因子,进一步提高激光点采样密度可能会提高单株木的识别精度。

LIDAR 数据处理方法对单株木的识别精度影响也很大。DEM 的生成算法会影响单株木的树高,DSM 的平滑程度会影响单株木的株数,树冠分割参数的选择会影响单株木的冠幅。进一步研究数据处理过程中中间结果的影响,选择合理的数据处理方法可能会进一步提高单株木的识别精度。

样地外业测量方案对于验证单株木的识别精度也很关键。准确地对树冠顶点进行定位,可以减少与识别算法得到的树冠顶点之间的匹配误差。另

外,将聚在一起的树冠划分为树冠组,测量树冠组的参数,可能会接近 LIDAR 数据识别的树冠结果。针对不同的林分条件,制定适宜的外业测量方案,可能会进一步提高验证精度。

另外,本文仅利用了 LIDAR 数据的地面回波点和表面回波点,未利用中间回波点的信息,这部分信息可以用来描述树冠的内部结构特征,如树冠体积、树冠叶面积体密度等,下一步需要在这方面做进一步的研究。本文也未使用同步获取的高空间分辨率 CCD 影像,综合利用 LIDAR 和 CCD 影像反演森林结构参数也需要做进一步研究。

总之,高采样密度 LIDAR 数据能够用来提取单株木结构信息,为森林资源调查提供一种获取数据的新方法,使遥感技术得到更为广泛的应用。

参 考 文 献

[1] 庞勇,李增元,陈尔学,等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学,2005,41(3):129-136.
PANG Y, LI Z Y, CHEN E X, et al. Lidar remote sensing technology and its application in forestry [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3):129-136.

[2] 庞勇,赵峰,李增元,等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报,2008,12(1):152-158.
PANG Y, ZHAO F, LI Z Y, et al. Forest height inversion using airborne lidar technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1):152-158.

[3] 黄麟,张晓丽. 三维成像激光雷达遥感技术在林业中的应用[J]. 世界林业研究,2006,19(4):11-17.
HUANG L, ZHANG X L. Applications of lidar and 3D remote sensing in forestry [J]. *World Forestry Research*, 2006, 19(4):11-17.

[4] BRANDTBERG T, WARNER T A, LANDENBERGER R E, *et al.* Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85, 290-303.

[5] CLARK M L, CLARK D B, ROBERTS D A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91, 68-89.

[6] MALTAMO M, EERIKAINEN K, PITKANEN J, *et al.* Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90, 319-330.

[7] ST-ONGE B, JUMELET J, COBELLO M, *et al.* Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar[J]. *Can J For Res*, 2004, 34, 2 122-2 130.

[8] KOUKOULAS S, BLACKBURN G A. Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne LIDAR and multi-spectral remotely sensed data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(3), 431-455.

[9] SUAREZ J C, ONTIVEROS C, SMITH S, *et al.* Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry[J]. *Computers & Geosciences*, 2005, 31, 253-262.

[10] KOCH B, HEYDER U, WEINACKER H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(4), 357-363.

[11] 张治军, 王彦辉, 袁玉欣, 等. 马尾松天然次生林生物量的结构与分布[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(5), 37-43.
ZHANG Z J, WANG Y H, YUAN Y X, *et al.* Study on the biomass structure and distribution of natural secondary forest of *Pinus massoniana*[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(5), 37-43.

[12] HOLLAUS M, WAGNER W, EBERHOFER C, *et al.* Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 60, 323-338.

[13] MCCOMBS J W, ROBERTS S D, EVANS D L. Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation [J]. *Forest Science*, 2003, 49(3), 457-466.

[14] POPESCU S C, WYNNE R H, NELSON R F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 37, 71-95.

(责任编辑 冯秀兰)

欢迎订阅 2009 年《木材工业》杂志

刊号:ISSN 1001-8654 CN 11-2726/S 邮发代号:2-311

中国林科院木材工业研究所主办,1987 年创刊,国内外公开发行。以“面向社会,服务行业”为宗旨,以报道木材工业领域的前沿科学研究、行业发展方针与政策、先进实用生产技术为主要内容。被《中文核心期刊》《中国科技核心期刊》《中国科技期刊精品数据库》《CAB Abstracts》收录;《中国期刊网》《中文科技期刊数据库》《万方数据数字化期刊群》全文收录。与国内外的科研、企业、媒体有广泛的交流与合作,是我国木材领域集研究开发与生产管理、行业信息为一体的领先行业科技期刊。

报道领域:人造板制造;木质重组与木基复合材料制造;木材保护与理化性能改良;木结构房屋及结构板材的应用;表面装饰加工、胶粘剂及涂料的制造与应用;家具生产;机械设计制造、自控技术;节能降耗。

目标读者:木材加工领域中,从事研究开发、专业教学、质量监控、生产与管理、设计与制造、咨询与贸易、市场营销等工作的人员。

双月刊,大 16 开 56 页,彩页 40~48 页。每期 10 元,全年平寄 60 元,挂号邮寄 85 元。全国各地邮电局(所)均可订阅,本刊编辑部常年受理订购。

联系方式:100091 北京市颐和园后中国林科院木材所 29 信箱《木材工业》编辑部
电话/传真:010-62889419, 010-62889416
Email: cwimag@caf.ac.cn
Http://www.cwijournal.com(网上订阅和订单下载)