

文章编号: 1001-1498(2010)02-0151-06

基于低密度机载 LiDAR 和 CCD 数据的 林分平均高提取

范风云, 陈尔学*, 刘清旺, 庞勇, 李世明, 赵峰

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 本文基于低密度的机载激光雷达 (LiDAR) 数据生成林区树冠高度模型 (CHM), 结合高分辨率 CCD 数码相机影像勾绘林分多边形, 由改进的树冠识别算法提取林分平均树高。结果表明: 全部有效数据林分总体精度达 74.86%, 刺槐精度达 75.62%, 油松精度达 74.74%, 结果受点云密度影响, 使得阔叶树种的精度稍高于针叶树种, 因此, 低密度激光雷达数据结合高分辨率 CCD 可以快速、准确地提取林分平均高。

关键词: 低密度; LiDAR; CCD; 林分平均高

中图分类号: S758.5

文献标识码: A

Forest Mean Height Extraction Based on the Low-density Airborne LiDAR and CCD Data

FAN Fengyun, CHEN Erxue, LIU Qingwang, PANG Yong, LI Shiming, ZHAO Feng

(Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The study generated forest canopy height model (CHM) using the low-density airborne Light Detection and Ranging (LiDAR), it sketched the stand polygons combined with the high-resolution Charge Coupled Device (CCD) digital camera image and extracted the stand mean height by the improved recognition algorithm. The results showed that the overall accuracy of the total valid data was 74.86%, The accuracy was 75.62% for Robinia pseudoacacia and 74.74% for Pinus tabulaeformis. The precision of broad-leaved was slightly higher than that of the conifer species owing to the influence of the point cloud density. Therefore low-density LiDAR with high resolution CCD data can quickly and accurately extract the stand mean height.

Key words: low-density; LiDAR; CCD; forest mean height

目前, 国内外利用激光雷达 (LiDAR) 数据在林业上开展了大量研究。国外小脚印激光雷达系统已经成功的应用于大范围的森林资源清查, 其中高密度激光点云已得到大量实践应用^[1], 尤其在估测单木树高、胸径、冠幅、枝下高、生物量、林分平均高、林分平均蓄积量、林分生物量、郁闭度、林层、林分密度等方面有了较大的进步^[2-5]。而对于低

密度激光雷达数据应用较少, Thomas 等^[6]使用高低不同密度 (每平方米 4 个点和 0.035 个点) 激光点云对比结果分析, 高低采样密度差异性不显著, 但是地形复杂的山区低密度激光点云数据应用仍需要进一步研究探讨。利用激光雷达数据和高分辨率 CCD 进行林分尺度的森林参数获取方面, 国外亦有研究, Popescu 等^[7]使用小光斑激光雷达数据和多光谱影

收稿日期: 2009-09-02

基金项目: 中央级公益性科研院所专项基金项目“森林结构参数遥感综合定量反演方法研究”(RIFRITZJ200703)

作者简介: 范风云 (1981—), 女, 山东菏泽人, 硕士生, 研究方向: 合成孔径雷达技术应用。E-mail: fanfy@caf.ac.cn

* 通讯作者: 陈尔学 (1968—), 男, 山东菏泽人, 研究员, 硕士生导师, 雷达首席专家, 主要从事合成孔径成像雷达数据处理技术及其在森林资源调查中的应用。

像估测森林蓄积量和生物量,结果显示,使用融合数据能够较好的提高针叶林的生物量和蓄积量的估计,在特定情况下也可提高阔叶林样地的估计。国内,赵峰、庞勇等^[8-9]首次利用低密度激光雷达数据和数码相机影像融合反演林木参数,以植被激光点云不同高度处的分位数作为统计变量,建立林分平均高的关系,进行林分平均高反演。庞勇、周淑芳等^[10]以重庆市铁山坪林场为研究区,以高密度机载小光斑激光雷达数据及与其同步获取的高分辨率数码影像为数据源,进行了高精度的单木水平方向信息及树高信息的提取。张彦林等^[11]用 BP 神经网络分析法,得出激光雷达测量树高与实测树高、材积的拟合函数方程,验证了激光雷达测量树高与实测树高、材积之间存在紧密的相关关系。杨伯钢、冯仲科等^[12-13]利用机载激光雷达数据在北京昌平试验区进行了外业实测树高的比较和相关性分析。

本试验根据 2005 年低密度机载激光雷达数据,研究在地形复杂的山区结合高分辨率 CCD 勾绘林分多边形,提取林分平均高。本文研究的主要目的是利用低密度机载激光点云获取徂徕山林场树冠高度模型(Canopy Height Model CHM),基于勾绘多边形提取整个林区林分平均树高,对结果进行分析评价,为大面积林分平均高制图提供理论依据;提出低密度机载激光点云大范围制图的不足,为以后根据不同的试验目的获取高质量的数据提供现实依据。

1 试验区和数据获取

1.1 试验区概况

研究区域位于山东省泰安国家森林公园徂徕山林场,地理坐标为 $117^{\circ}16' \sim 117^{\circ}20' E$, $36^{\circ}02' \sim 36^{\circ}07' N$ 。林场经营总面积 $8\,491\text{ hm}^2$,包括 10 个不同的分区管理,其中,林业用地面积 $7\,164.4\text{ hm}^2$ (不含苗圃地 8.6 hm^2),占全场总面积的 84.4% ,非林业用地面积 $1\,318\text{ hm}^2$,占全场总面积的 15.5% 。森林主脉东西走向,主峰太平顶海拔 $1\,027\text{ m}$,南坡较陡,北坡较缓。林场山地坡度大致可分为五级: $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 山坡占 5% ; $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 山坡占 37% ; $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 山坡占 40% ; $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 山坡占 15% ; 46° 以上山坡占 3% 。全场林业用地根据地势可划分为 3 类:山区海拔 700 m 以上的林业用地面积 $1\,602.8\text{ hm}^2$, 700 m 以下林业用地面积 $5\,033.9\text{ hm}^2$,平原河滩林业用地面积 527.7 hm^2 ,分别占林业用地面积的 22.4% 、 70.3% 和 7.3% 。

优势树种为刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、黑松(*Pinus thunbergii* Parl.),其次有侧柏(*Platycladus orientalis*(L.) Franco)、落叶松(*Larix gmelinii*(Rupr.) Rupr.)、杨树(*Populus* spp.)等,其中,以刺槐、油松为主。林分属经营林分,以纯林居多,极少为混交林。林分 70.5% 为中龄林、近熟林、成熟林。

1.2 遥感数据的获取

2005 年 5 月 13 日获取了覆盖徂徕山林场的机载 LIDAR 数据,激光点平均间隔约 1.6 m (即点云密度平均约每平方米 0.39 个点)。采用的仪器是激光扫描仪 RIEGL LMS-Q280 i 系统,首次回波纪录模式,激光发散度 0.5 mrad ,激光扫描角正负 30° ,飞行地速 $180\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,相对航高 800 m ,绝对飞行高 $1\,600\text{ m}$,扫描重叠率为 22% 。获取的激光雷达点云数据,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。同期获取的数码航空摄影测量高分辨率 CCD 数据,影像地面分辨率大小为 0.5 m ,如图 1。

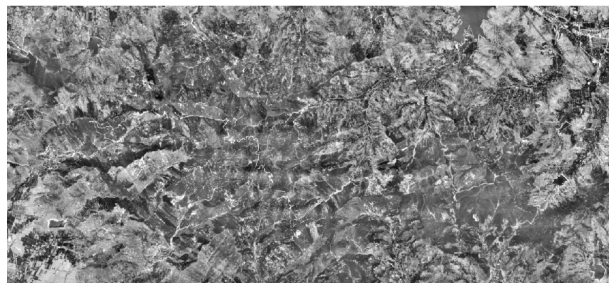


图 1 研究区机载高分辨率真彩色数码相机影像

1.3 地面观测数据的获取

为了进一步研究低密度机载激光雷达数据在山区大范围反演林分平均高情况,与 2008 年 5 月 29—6 月 12 日对整个徂徕山区进行外业调查,使用罗盘仪设计 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的方形样地,样地的选择主要考虑坡度(小于 25°)、树种(纯林)、树龄(中龄林为主)、郁闭度(>0.6)等因素,利用手持 GPS 对样地中心点进行定位,调查样地内每株树木的树高、胸径、冠幅、枝下高等因子,样地的叶面积指数、郁闭度、海拔、林下土壤厚度等辅助分析因子,其中使用手枪式测高器(CGQ-1 型)测量树高和枝下高,对于较矮的林木使用花杆测量枝下高,使用围尺测量胸径,皮尺测量树冠两个方向的冠幅。在树高测量中,用卷尺量取被测树到仪器的距离,一般为 15 m 或 20 m ,并以此线作为基线,右手握住仪器,右眼靠近并

对准观测孔,在垂直方向上移动仪器,通过观测孔与准星尖端瞄准被测树顶,稍等 2~3 s 指针停止摆动后,扣动扳机,读取指针在高度盘相应基线上的数值,即为树高。使用围尺测量 1.3 m 树高处的直径,即为胸径。以高空间分辨率 CCD 为基准,基于软件 GeoMedia 4.2 勾绘不同林分类型多边形,进行矢量化,根据林分大小,每个林分调查 1~4 块样地,整个林场共调查 171 块样地,分布在林场的每个区,包括刺槐 (75)、油松 (69)、麻栎 (*Quercus acutissima* Carr.) (5)、落叶松 (3)、赤松 (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) (2)、黑松 (2)、板栗 (*Castanea mollissima* Blume) (1)、杨树 (1)、混交树种 (13) 等树种。在数据分析时,林分平均高利用断面面积加权法进行计算,以优势树种刺槐、油松为主,利用有效林分多边形 97 个,其中有 32 个刺槐林分多边形和 41 块油松林分多边形,其它林分多边形 24 个。

2 数据预处理

基于 TerraSolid 软件平台,对 LDAR 点云数据进行分类,将 LDAR 激光点分成地面点和非地面点两类。利用不规则三角网法 (Triangulated Irregular Network TIN) 由地面点内插生成数字高程模型 (Digital Elevation Model DEM),由非地面点内插生成数字表面模型 (Digital Surface Model DSM),DSM 表达的对象可以是森林、建筑物、较大石块等。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,由于一些激光点可能来自林冠下层的灌丛植被或者来自林冠上层的物体的反射,存在一些伪冠层信息,对林分高的提取造成一定影像,因此,本文对小于 1.5 m、大于 35 m 的点进行掩膜剔除,生成整个林区冠层高度模型。总的技术路线如图 2 所示。

2.1 激光雷达点云数据文件导入、分块

运行 MicroStation V8 新建一个设计文件,选择种子文件。通过 MicroStation 的实用工具加载 TerraScan 模块,从 TerraScan 主窗口的 File 中读入激光点云,一次读取所有的点云文件,然后,利用 TerraScan General 工具组的 Define class 工具,定义类别值,依次添加 Overlap、Noise、Temporary 3 个类别,并保存到文件中。当单个激光点云文件的数据量很大时,需要进行分块处理。分块的目的:一是将大数据量文

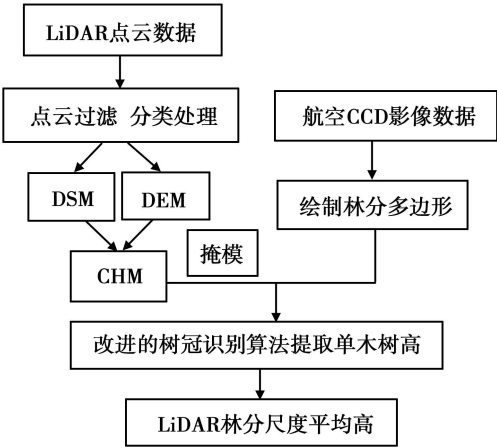


图 2 技术路线图

件分为小数据量文件,以便进行处理,提高效率;二是将不同的地形特征区域划分为不同的块,根据有林区与无林区分块处理,以便选取合适的参数进行处理,减少手工编辑量,获取精度较高的 DEM,为获取高质量的 CHM 做准备。本文将全部激光点云数据分为 17 块进行处理。

2.2 分离地面点

赵峰^[5]曾研究了徕卡山激光雷达数据特点,提出了点云分类的基本策略和针对不同地物的滤波算法,认为, Tin Filter 算法能够较好的提取植被回波点,但任何一种自动滤波算法均不能完全达到分离地面点的要求,为获取精度更高的 DEM,分类后必须进行必不可少的人工编译。因此,分离地面点时参数的选取显得非常重要。

在 LDAR 数据 DEM 制作过程中,通过 Max building size 参数控制最初点的选择,利用选择的最低点建立最初的模型,最初模型的大多数三角形都低于地面,有一些三角形的顶点与地面接触,通过迭代方法添加一些新点到模型中,每个新添加的点使得模型更接近于地面。迭代参数决定了距离三角形平面近的点能够被模型接受。设置一般可以根据影像下建筑物的长度进行设定,开始时选择一些局部最小值点,并且,确保这些点落在地面上,如果 Max building size 为 20.0 m,程序假设在 20 m×20 m 的区域内,至少有一个点落在了地面上,并且认为最低点为地面点。本研究中,利用不同的参数进行试验,选择合适的建筑物大小参数。

Iteration angle 是点、点在三角形平面投影和最近的三角形顶点之间的最大角度,习惯设定为 88°或 89°,本研究设置为 88°; Iteration angle 为判断地面点

位数据的迭代角度,其中山地一般在 6° 左右,平地稍小为 1° 或 2° 左右,本研究区在山区,设置为 6° ; Iteration distance 为迭代垂距,参数确保迭代时不会向上跳跃太大,这有助于将低矮建筑物阻挡在模型之外^[14]。一般山地为 1.6 或者更大,平地为 1.4 或更小,本研究设置为 1.6 。

对于徕卡山机载低密度激光雷达数据的试验发现,当 Max building size 为 15 m 时,可以去除大部分植被,保留了一些极低矮的灌木,同时很好地保留了

微地形特征;但是,对于山区平原的房屋,不能被去除,特别是山脚附近的房屋去除效果较差,如图 3(a)。当 Max building size 为 25 m 时,由于激光点云密度较稀疏,会出现在一定范围内无激光点情况,不能很好的反映地形信息,如图 3(c); 当 Max building size 为 20 m 时,如图 3(b),可以相对较好地去除植被,同时去除了更多的微地形特征;能够去除山区平原的几乎全部房屋,减少了手工编辑量,有利于减少手工编辑量生成精度更高的 DEM。

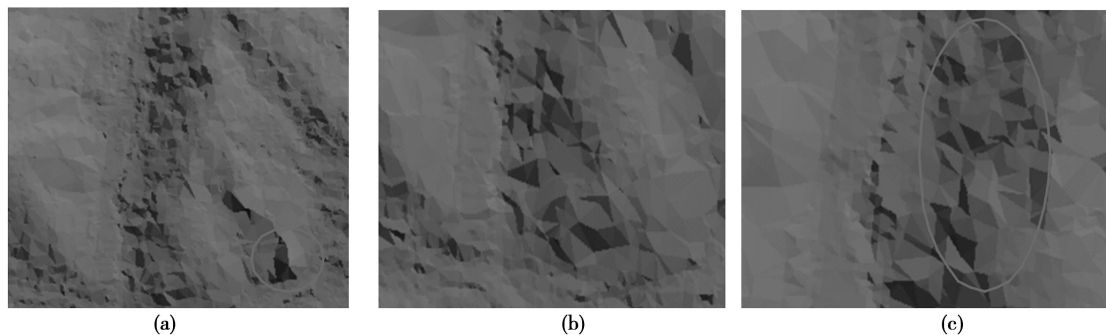


图 3 最大建筑物大小参数选取结果对照

2.3 建立地面模型手工编辑地面点

参数的合适选取可以较好的分离地面点,但任何参数使用必定有些错分的点,因此,可以通过 TerraScan 的 ModelIT 工具组,创建一个可编辑的地面模型,手工编辑地面点,以纠正错分的点,生成精度较高的 DEM。

2.4 树冠顶点识别

利用低密度机载 LiDAR 数据提取 CHM 时,DEM 和 DSM 起重要作用,在激光雷达点云数据专

用软件 Terrasolid 支持下,利用所有点生成 DSM 和分离出的所有地面点生成 DEM,二者之差得到 CHM,掩膜掉伪冠层,然后进行单木树冠识别。假定树冠顶点高于树冠的其他位置,在 CHM 中使用局部最大值搜索窗口搜索潜在的树冠顶点。当树冠大小比较均一时,可以使用固定大小的搜索窗口,根据林分条件确定窗口大小,以减少识别误差,进而计算能够识别出的单株树^[15]。如图 4 是 CCD,如图 5 是 CHM 与 CCD 叠加。

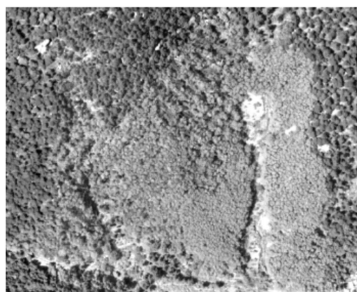


图 4 CCD

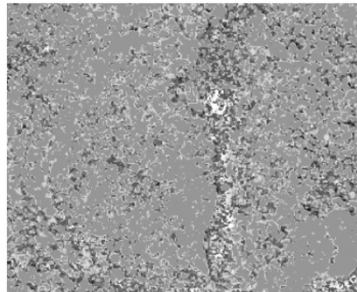


图 5 CCD 和 CHM 叠加



图 6 林分单木识别

2.5 林分平均高提取

基于勾绘林分多边形和树冠顶点识别情况计算林分平均高,如图 6,计算多边形内的平均值,即为估测林分平均高,然后与实测林分平均高回归,对结

果进行线性回归分析。

图 6 中点代表利用激光雷达数据基于 CHM 局部最大值算法提取的树冠顶点,即为单木树高信息,多边形代表基于 CCD 勾绘林分多边形。

3 结果分析与讨论

3.1 外业测量与估测数据对比分析

在 CHM 提取树高顶点时, 利用改进的算法指定最小树冠半径, 确定局部最大值的滤波窗口大小, 搜索最小树冠半径, 滤掉树冠半径小于指定阈值的伪树冠顶点^[15], 得到最终的树冠顶点, 提取单木树高, 利用激光雷达数据识别出的单木树高, 计算多边形内的算术平均高, 即为林分平均高。外业测量平均高与 LIDAR 数据计算样地平均高进行线性回归及结果精度分析如表 1。

全部林分实测树高与激光雷达估测林分平均高决定系数 R^2 为 0.505, 刺槐林分实测树高与激光雷达估测林分平均高 R^2 为 0.660, 油松林分实测树高与激光雷达估测林分平均高 R^2 为 0.373。决定系数的差异可能与树种的差异和林分的垂直结构不同有关。外业测量的林分平均高与激光雷达测量树高相关性刺槐比油松高, 主要原因可能是徂徕山机载激光雷达数据每平方米 0.39 个激光点, 在点云密度较低的情况下, 导致点云图像上找到的树木“顶点”与实际树木顶点不一致, 阔叶树种相对针叶树种激光点云密度稍大。而且, 激光雷达测量树高与林分坡度、坡向、郁闭度有一定的关系。因航带是东西方向, 其他条件相同, 坡度沿飞行线方向估测树高相对南北方向估测树高偏高, 在海拔较低坡度较大的林分, 激光点返回的能量较少, 提取 CHM 质量就较差。

3.2 林分平均高结果精度评价

精度计算公式:
$$\text{精度} = 1 - (|\text{实测树高} - \text{估测树高}|) / \text{实测树高}$$

表 1 实测林分平均高与估测林分平均高回归及精度分析

林分	R	R^2	平均精度 /%	回归方程
所有林分	0.710	0.505	74.86	$DBH_H = 3.324 + 0.875LIDAR_H$
刺槐林分	0.812	0.660	75.62	$DBH_H = 4.409 + 0.777LIDAR_H$
油松林分	0.610	0.373	74.74	$DBH_H = 2.994 + 0.921LIDAR_H$

注: DBH_H 为平均高, LIDAR_H 为激光雷达估测林分平均高。

由表 1 知: 全部 97 块林分多边形提取林分平均高总体平均精度为 74.86%, 纯林阔叶树刺槐平均精度 75.62%, 针叶树油松平均精度 74.74%, 刺槐总体精度稍高于油松。刺槐树种的估测精度稍高于油松的精度, 主要原因可能是刺槐属阔叶树, 冠形一般呈椭圆形, 而油松属针叶树种, 冠形一般呈圆锥形, 因此, 刺槐树种的反射率更高, 冠形垂直结构上

升的更快, 在激光雷达点云采样中碰到树冠层的概率更大。

4 结论

经过对徂徕山低密度机载激光雷达数据基于 TerraSolid 处理软件平台进行处理, 结合同期获取的高分辨率 CCD 反演整个林区林分平均高, 结果表明:

(1) 机载激光点云采样密度直接影响 CHM 的质量, TerraSolid 处理软件提取地面点的参数选取直接影响 CHM 结果。试验过程中, 建筑物大小参数选取经过多次试验对比后最终确定, 而且手工编辑需要较多时间。因此, 进一步提高采样密度可能会提高单木识别的质量, 机载激光雷达遥感影像处理软件分离地面点的算法有待进一步提高。

(2) 利用改进的算法指定最小树冠半径, 确定局部最大值的滤波窗口大小, 搜索最小树冠半径, 滤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, 提取单木树高, 关键是确定局部最大值滤波窗口大小。

(3) 利用低密度机载激光雷达结合 CCD 影像反演林分平均高是确实可行的, 且总体精度达 75% 以上, 阔叶树刺槐的精度高于针叶树油松的精度。

机载激光雷达点云密度对数据的处理及结果都有一定的影像, 今后期望能够开发使用于机载航空遥感数据后处理的地面点提取算法、软件, 提高处理效率和准确度。而且, 数据质量是数据处理结果优劣的重要因素, 因此, 为了得到高质量的结果, 需要有高质量的数据。

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

[2] Popescu S C, Wynne R H, Nelson R F, et al. 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

[3] Holmgren J, Nilsson M, Olsson H, et al. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning[J]. Forest Science, 2003, 49(3): 419-428

[4] 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

[5] Clark M L, Clark D B, Roberts D A, et al. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest

- est landscape[J]. Remote Sensing of Environment 2004, 91: 68—89
- [6] Thomas V, Treitz P. Mapping stand-level forest biophysical variables for a mixedwood boreal forest using lidar: an examination of scanning density[J]. Can J For Res 2006 36: 34—47
- [7] Stonge 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: 2122—2130
- [8] 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
- [9] 赵 峰. 机载激光雷达数据和数据相机影像林木参数提取研究[D]. 北京: 中国林科院资源信息研究所, 2007
- [10] 庞 勇, 李增元, 谭炳香, 等. 点云密度对机载激光雷达林分高度反演的影像[J]. 林业科学研究, 2008, 21(增刊): 17—18
- [11] 张彦林, 冯仲科, 杨伯钢, 等. LIDAR 技术在林业调查中的应用研究[J]. 林业资源管理, 2007(6): 73—77
- [12] 冯仲科, 杨伯钢, 罗 旭, 等. 应用 LIDAR 技术预测林分蓄积量[J]. 北京林业大学学报, 2007(增刊 2): 45—51
- [13] 杨伯钢, 冯仲科, 罗 旭, 等. LIDAR 技术在树高测量上的应用与精度分析[J]. 北京林业大学学报, 2007(增刊 2): 78—81
- [14] 贾玉明, 雷 鸣, 侯红松. LIDAR 机载激光雷达数据制作 DEM 原理分析[J]. 大众科技, 2007(8): 79—80
- [15] 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—90