

文章编号: 1001-1498(2008)增刊-0014-06

点云密度对机载激光雷达林分高度反演的影响^{*}

庞 勇, 李增元, 谭炳香, 刘清旺, 赵 峰, 周淑芳

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘 要:以山东省泰安市徂徕山林场和重庆铁山坪林场为试验区, 分别于 2005 年 5 月和 2006 年 9 月获取了低密度和高密度的 LIDAR 点云数据, 分别进行了林分平均高的反演试验。通过两个试验区的对比, 分析了不同点云密度对机载 LIDAR 数据反演林分参数的影响。结果表明: 对于两种密度的点云数据, 使用分位数法都可以很好地进行林分平均高的估计, 高密度点云的反演结果略好一些, 但二者结果差异不大; 高密度的点云可以进行更小尺度的林分高估计和单木树高的估计, 从而可以减少甚至避免对实地树高测量的依赖。

关键词: LIDAR; 点云密度; 林分平均高

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

The Effects of Airborne LIDAR Point Density on Forest Height Estimation

PANG Yong LI Zeng-yuan TAN Bing-xiang LIU Qing-wang ZHAO Feng ZHOU Shu-fang

(Research Institute of Forest Resource Information Techniques CAF Beijing 100091, China)

Abstract: This paper takes Culaishan Forest Farm, Shandong Province and Tieshanping Forest Farm, Chongqing as test sites. The airborne discrete return LIDAR data were collected in May of 2005 and September of 2006 separately. The forest height was estimated for both test sites. Through the comparison of the two sites, the effects of airborne LIDAR point density on forest height estimation were analyzed. The results demonstrated that it was feasible to use low and high point density airborne LIDAR data to estimate forest height. Quartiles could give good tree height estimation in the low LIDAR point density case. The accuracies from high density LIDAR data showed only a little better than low density data. The high density data could be used to estimate finer scale forest height even individual tree height, which is helpful to minimize necessity of the number field plots.

Key words: LIDAR; point density; stand mean height

激光雷达 LIDAR (Light detection and ranging) 是近年来国际上发展十分迅速的主动遥感技术, 在森林参数的定量测量和反演上取得了成功的应用。激光雷达具有与被动光学遥感不同的成像机理, 给林业遥感带来了重大突破, 对植被空间结构和地形的探测能力很强, 特别是对森林高度的探测能力, 具有

明显的优势。近 20 年来, 研究者发展提出了许多用激光雷达数据反演林木参数的算法^[1-4], 极大推进了激光雷达在林业上的应用。小脚印的激光雷达系统已经成功地用于大范围的森林资源清查中^[5], 星载大脚印激光雷达已经在轨运行并成功地进行了全球的数据获取^[6]。

收稿日期: 2007-12-09

基金项目: 国家 863 课题 (2007AA12Z173)、国家自然科学基金课题 (40601070)、国家 973 课题 (2007CB714404)、国家林业局 948 项目 (2004-4-64)

作者简介: 庞勇 (1976—), 安徽省太和人, 博士, 助理研究员, 主要从事合成孔径雷达和激光雷达对地观测机理和森林参数定量反演等方面的研究. Email: caf_pang@gmail.com

^{*} 本文作者感谢山东省泰安市徂徕山林场和重庆市铁山坪林场在外业调查中给予的大力支持和协作

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Lefsky等^[7]对多种先进的遥感数据进行了比较研究,包括多时相的 Landsat TM 数据、高空间分辨率的机载多光谱 ADAR数据、机载高光谱 AVIRIS数据和机载激光雷达 SLICER数据,结果表明:激光雷达数据反演出的树木结构参数精度最高,并指出,尽管当时激光雷达只有采样数据,但与其它影像数据结合使用将大大提高林业遥感的精度,将来随着星载激光雷达系统的实施,必能取得更广泛的应用。正是由于 LIDAR 技术用于林业的巨大潜力,尤其是森林资源调查、监测等要求高精度的定量参数的领域,近 10年来以欧美为首的工业发达国家开展了大量的研究,从硬件研发、数据处理和行业应用等方面取得了很大的进展。北欧(挪威、瑞典、芬兰)、西欧(德国、英国)等国已经较大范围的使用^[5-8];美国在多处成功试验的基础上,已经利用该技术对阿拉斯加、波多黎各等地区大面积森林进行调查;加拿大在 British Columbia 等省正在开展大范围森林资源调查应用。

目前机载 LIDAR 数据获取的成本还比较高,其中点云的密度对数据获取的效率和成本影响很大。本文以山东省泰安市徂徕山林场和重庆铁山坪林场为试验区,分别于 2005 年 5 月和 2006 年 9 月获取了低密度和高密度的 LIDAR 点云数据,分别进行了林分平均高的反演试验。通过 2 个试验区的对比,分析了不同点云密度对机载 LIDAR 数据反演林分参数的影响。

1 试验区概况与数据获取

1.1 试验区概况

研究试验区选在山东省泰安市徂徕山林场和重庆市江北区铁山坪林场。徂徕山林场位于鲁中泰沂山区,117°16′~117°20′E,36°02′~36°07′N。徂徕山位于泰沂山脉南侧,孤立于平原,主脉东西走向,主峰海拔 1 028 m。徂徕山区属暖温带大陆性气候,年降水量约 718 mm,多集中在夏秋之间。徂徕山林场现有森林多为人工林,少数为天然次生林和第 2 代萌芽更新的刺槐林;树种以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、黑松(*Pinus thunbergii*)为主,其次为侧柏(*Platycladus orientalis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、黑杨类、桤类等。据 2000 年 4 月进行的徂徕山林场森林经理调查,林场纯林多,混交林少,林龄集中。林分大多数为中龄林、近熟林、成熟林,

约占林分总面积的 70.5%,其中中龄林、近熟林以刺槐和部分松类为主,成熟林以松类为主,占林分面积的 32.7%。

铁山坪林场位于重庆市江北区(29°38′N、106°41′E),铁山坪属华蓥山脉东部山系,地势起伏平缓,两侧山坡陡峭、切割剧烈,西坡坡度 30°~50°,东坡坡度 20°~50°。境内山地丘陵平行相间,地貌受地质构造及岩性影响,背斜呈山,向斜成谷。铁山坪林场地势自西南向东北方向逐渐攀升,海拔 160.5~583.3 m。铁山坪林区属中亚热带气候,现有森林面积 1 200 hm²,以马尾松(*Pinus massoniana*)纯林为主,零星分布着人工栽种的香樟(*Cinnamomum camphora*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等树种,竹类主要以毛竹(*Phyllostachys pubescens*)为主。马尾松多数是在 1958 年至 1962 年遭受破坏后重新形成的次生林,林龄为 42~51 a,林木平均年龄为 46 a。

1.2 激光雷达数据

在 2 个试验区分别获取了高低密度的点云数据,其中徂徕山林场采用的激光雷达数据是由 RIEGL LMS-Q280i 获取的低密度离散回波数据,2005 年 5 月 13 日获取数据,采用首回波记录模式,平均激光点间隔约 1.6 m,激光束发散度为 0.5 mrad,激光扫描角正负 30°,激光扫描重叠程度为 22%。飞行平台为“运-5”飞机,飞机飞行地速 180 km·h⁻¹,相对航高 800 m,绝对航高 1 600 m。

铁山坪林场采用的激光雷达数据是由 ALTM-3 100 型激光器获取的高密度离散回波数据,飞行时间 2006 年 9 月 24 日。航线南北向 7 条,为确保有一部分高密度的点云,飞机十字交叉飞行了东西向 2 条航线。激光器具具有 4 次回波,所用波长 1 064 nm,重复频率 44 kHz,激光发散角 0.3 mrad,光斑大小 30 cm,平均激光点间隔 0.52 m,采用线性扫描方式,扫描角度为正负 20°,扫描重叠率为 40%。

为了方便与 DGPS 定位的外业数据相结合,激光点云数据的坐标投影系统是 UTM,单位是 m。如图 1 所示是铁山坪试验区内一块激光点云数据高程信息的三维渲染图,高程值随深色至浅色递增。从图 1 中可以看出,每个树冠对应着多个激光回波点,反映了树冠从顶部到边缘的高度变化。图 1 的左下方有 2 个黑色的空洞,对应着林场的 2 个蓄水池。由于水体对近红外的高吸收率、低反射率的特性,几

乎没有激光回波点。

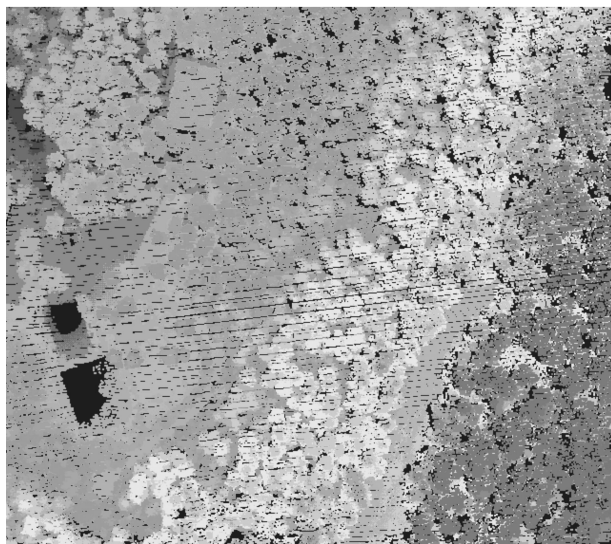


图 1 高密度激光点云数据高程渲染图 (高程值随深色至浅色递增)

此外,在飞行时还同步获取了数码影像数据,地面分辨率大小为 25 cm,航向重叠度 40%,旁向重叠度 30%。

1.3 地面调查与测量

LDAR 数据经过处理后,根据实际获取点云的密度情况,在 2006 年 4 月 12 日至 17 日期间对徂徕山进行了地面调查,2006 年 11 月 13 日至 18 日对重庆市江北区铁山坪林场的野外数据进行了采集。调查主要包括样地内每株树木的胸径、树高、冠幅,并对样地中心和单株树利用 Trimble GPS 系统 (4 600 型基站和 Geo XT 流动站) 进行差分定位。样地形状以圆形为主,矩形为辅。样地的选择主要考虑树种、树龄、郁闭度等因素,徂徕山试验区内共选择样地 33 块,铁山坪林场共选择样地 26 块 (由于部分样地的 GPS 数据无法差分,本文只用其中可以差分的 12 块)。

林分平均高采用断面积加权法计算,计算公式如下:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^k h_i g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \quad (1)$$

式 (1) 中: h_i 为第 i 株林木的树高; g_i 为第 i 株林木的胸高断面积; k 为林分株数。

2 LDAR 估测树高基本原理与方法设计

2.1 LDAR 估测树高基本原理

激光雷达以脉冲激光作为技术手段,以激光束扫描的工作方式测量从传感器到地面上激光照射点

的距离,即通过测量地面采样点激光回波脉冲相对于发射激光主波之间的时间延迟得到传感器到地面采样点之间的距离。其测距基本原理可表示为^[8]:

$$R = (c \cdot t) / 2 \quad (2)$$

式 (2) 中: R 是传感器到目标物体的距离; c 是光速; t 是激光脉冲从激光器到被测目标的往返传输时间。

LDAR 的回波信号是从能量超过某一给定噪声阈值开始以一定的时间间隔进行记录的,离散回波的 LDAR 系统仅记录超过某一阈值的几个回波或一个回波。因此,对小光斑离散回波的 LDAR 系统而言,树高是来自树顶的回波与来自地面回波高程的差。由于小光斑激光雷达的光斑尺寸小于林木冠幅,小光斑离散回波的激光雷达仅能对树冠的一部分进行感应。因此,小光斑激光雷达数据是对林分的一个高密度采样数据集,表现为高密度的林分激光点云,往往每株树有几十个到几百个激光回波点,从这些点云中可以估算每株树的参数。对于点云密度较低的情形,由于单个树冠的激光点太少而无法准确刻画树冠的表面变化,甚至“错过”树顶,无法针对单木进行参数估计,这时需要对一个样地或林分内的点云进行统计处理,通常采用不同高度处的分位数建立与林分平均高的关系^[4-5]。

2.2 LDAR 估测树高的方法设计

为了比较不同密度的点云进行林分高度反演的差异,需要先分别进行林分高度反演,然后进行比较分析,具体流程图如图 2 所示。

2.2.1 LDAR 点云滤波 为了进行树高反演,首先需要将地面点与地物点分离,即对不同密度的激光雷达点云进行滤波处理。本文采用基于不规则三角网 (TIN) 的过滤方法^[9], TIN 算法是一个从粗放到精细的过程,等效于三角网逐步加密的过程。算法首先在粗放的尺度寻找“地表点”,并根据这些“地表点”建立粗尺度的 TIN 网络表面;随后逐一判断其余的三维点与 TIN 表面的垂直距离及角度,当距离与角度小于阈值,就将该点纳入并重构新的 TIN 表面,否则就将该点删除。如此往复,逐步纳入新的“地表点”,直至所有点判断完成。

2.2.2 点云高度归一化 对点云滤波得到的地面点进行插值即可得到 DTM,将地物点的高程减去 DTM 的高程即可消除地形起伏变化对 DSM 中地物高程及形状的干扰,以获取相对准确的地物形态和高度信息 (图 3)。

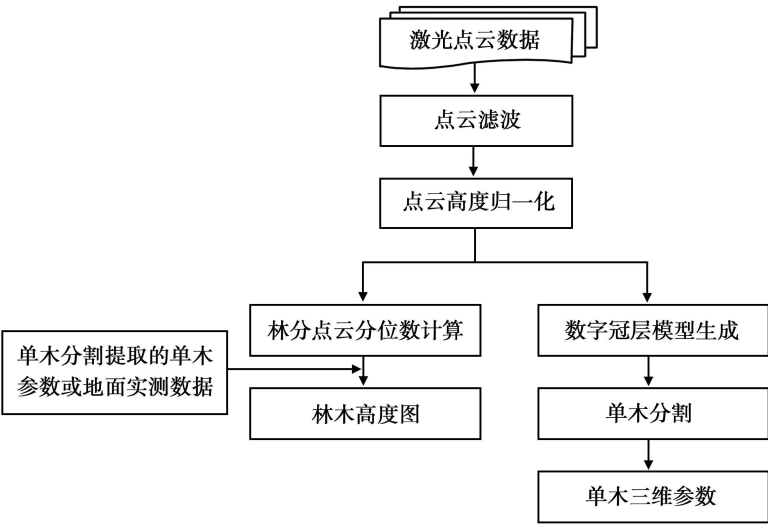


图 2 LiDAR 估测树高的技术流程

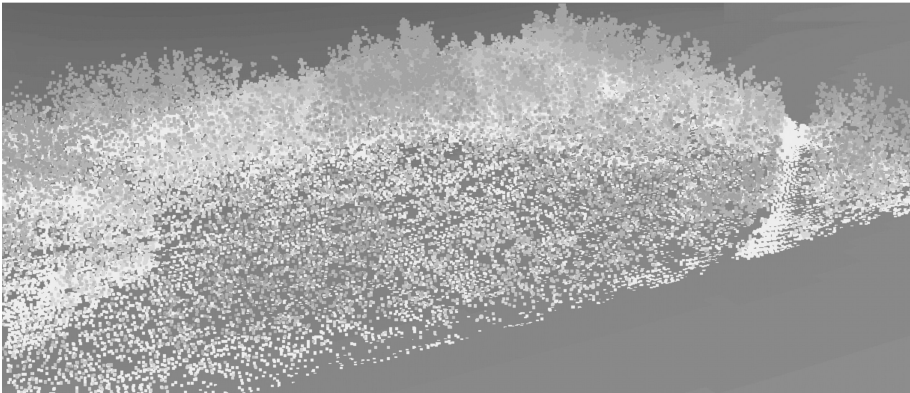


图 3 植被高度渲染的高度归一化 LiDAR 点云数据

2.2.3 林分点云分位数计算和林分高度反演 利用高度归一化点云计算高度分位数,利用地面实测的数据或单木分割提取的单木参数建立分位数与林分平均高关系,对林分平均高进行反演。一般为了降低来自林下灌草的激光点的影响,在计算分位数时往往设定一定的高度阈值(如 1.3 m),即仅考虑归一化高度较大的点云子集。如果点云密度足够大(一般来说点云间距小于 1 m),则可以利用高度归一化点云插值得到数字冠层模型(CHM),然后进行单木分割,提取单木参数,从而可以降低对地面实测工作的依赖。

3 不同密度的 LiDAR 点云林分平均高反演

利用“2.2”中描述的技术路线,经过对山东徂徕山和重庆铁山坪 2 个研究区不同密度水平的 LiDAR 点云数据的处理,根据 DGPS 测量的外业样地中心位置,从分类后的点云数据中抽取半径 8 m 的样地植被点云数据,分别计算它们的上四分位数

(H₇₅)的高度值,然后与地面实测的样地树高建立统计关系模型。山东试验区利用实测 33 块样地中的 23 块作为训练样本,10 块作为检验样本,进行树高反演和精度评价;重庆试验区的 12 块实测样地全部用作模型训练样本。

图 4(a)所示为山东试验区全部样地实测树高与 H₇₅的散点图,相关系数为 0.87;23 块作为训练样本的样地实测树高与 H₇₅的相关系数为 0.85。图 4(b)所示为重庆试验区全部 12 块样地实测树高与 H₇₅的散点图,相关系数为 0.89。在 2 个试验区建立的树高反演模型如下:

山东徂徕山试验区: $H=0.88H_{75}+1.959$ (3)

重庆铁山坪试验区: $H=1.127H_{75}-0.787$ (4)

从图 4 和方程 (3)、(4) 可看出,上四分位处的高度与实测的林分平均高紧密相关,斜率很大且接近于 1,常数项很小。2 个试验区的模型回归系数存在一些差异,这可能与树种的差异和林分垂直结构不同有关。徂徕山林场的森林类型主要是人工林,林下植被较少,

植被激光点主要来自上层的树冠;而铁山坪林场主要是次生林,林下植被较多,林分垂直结构的连续性好于山东试验区,虽然植被激光点主要来自上层的树冠,但也有相当一部分来自树冠层以下的植被;因此,模型中山东试验区的斜率小于重庆试验区。

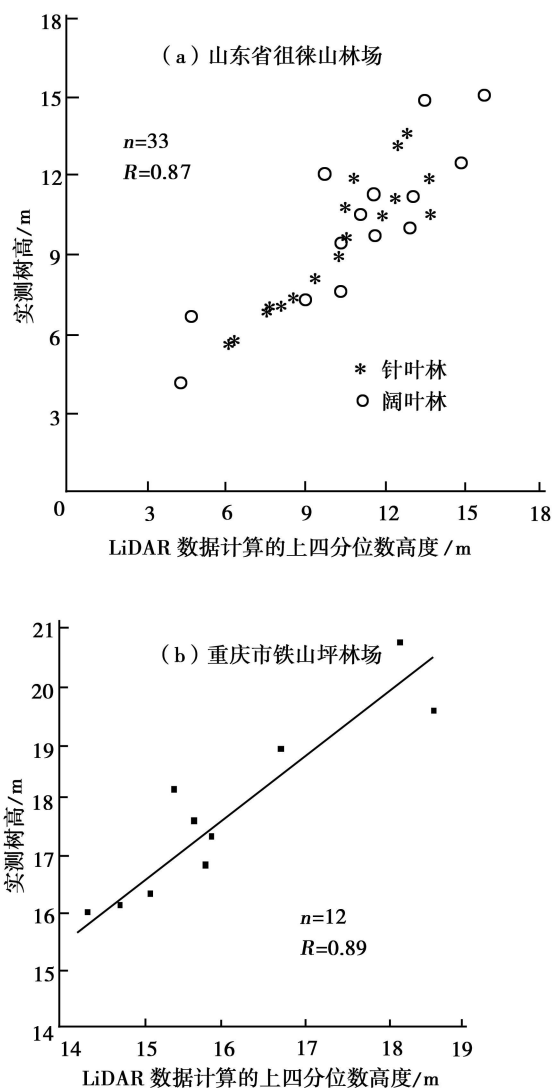


图 4 2个试验区样地的实测树高与上四分位数处高度的散点图

式(3)是徂徕山试验区 23块作为训练样本建立的回归方程,使用该方程对另外 10块检验样本进行树高反演,全部 10块检验样本的总体平均精度为 90.59%,阔叶树(共 4块)的精度都高于 92%,阔叶树的平均精度为 92.6%,针叶树(共 6块)的精度都高于 87%,针叶树的平均精度为 89.86%,其中阔叶树的精度高于针叶树的精度^[1]。

4 高密度的 LiDAR 点云单木树高的估计

对于高密度的点云数据,每个树冠都对应着多

个激光回波点,较好地反映了树冠外表面的高度变化,因此可以得到反映冠层高度变化树冠模型(CHM)。利用高程归一化后的植被点云数据通过插值运算即可得到 CHM,进而利用 CHM 进行树冠顶点的探测和树冠边界的跟踪^[8-10]。重庆试验区的单木树冠分割显示(图 5),底图为分辨率为 0.5 m 的 CHM,灰色边界为矢量化的树冠边界。可以看出较好地检测到了树冠顶点,冠幅分割结果也较为合理,但也有一些树冠由于树顶不明显或分散度较大而出现多个顶点的情况,从而导致过分割;也有一些聚集很近且高度接近的树被分割到了一起,导致漏分。对这些情况需要做进一步的研究。

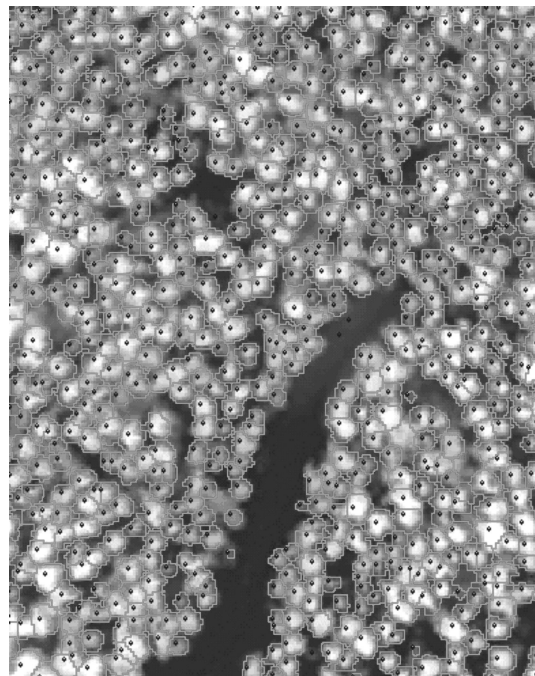


图 5 基于高密度点云数据生成 CHM 的单木树冠分割叠加显示图

从分割后的 CHM 上可以提取每株树的高度^[10],从而与 H_{75} 建立关系。这样可以减少对地面工作的需求和依赖。

5 结论

经过在山东徂徕山林场和重庆铁山坪林场的机载激光雷达树高反演试验,这一技术对树高估计是完全可行的。山东试验区的精度高于 87%,总体平均精度为 90.59%,其中阔叶树的精度高于针叶树的精度,这主要由于阔叶树的反射率更高,冠形垂直结构上升得更快,在 LiDAR 点云采样中碰到树顶或顶层树冠的概率更大一些。

对于 2个试验区 2种密度的点云数据,使用分

位数法都可以很好地进行林分平均高的估计,二者差异结果不显著。林分垂直结构和树种差异可能导致反演方程中系数的变化。

高密度的点云还可以进行更小尺度的单木树高的估计和树冠分割,从而可以减少甚至避免对实地树高测量的依赖。

参考文献:

- [1] 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
- [2] Drake J B, Dubayah R O, Clark D B, et al. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LIDAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2—3): 305—319
- [3] Holmgren J, Nilsson M, Nilsson H. Simulating the effects of LIDAR scanning angle for estimation of mean tree height and canopy closure [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2003, 29(5): 623—632
- [4] Lin K, Paul T, Ian M, et al. Estimating aboveground biomass using LIDAR remote sensing [C]. Remote Sensing for Agriculture Ecosystems and Hydrology IV Conference, 2002, September 23—27, Agia Pelagia, Crete, Greece
- [5] Næsset E. Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2004, 19(2): 164—179
- [6] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L21S01
- [7] Lefsky M A, Cohen W B, Spies T A. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory monitoring and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(1): 78—87
- [8] Barbara K, Ursula H, Holger W. Detection of Individual Tree Crowns in Airborne LIDAR Data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(4): 357—364
- [9] Axelsson P. Ground estimation of laser data using adaptive TIN-models [C]. Proceedings of OEEPE workshop on airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models, 2001: 185—208
- [10] 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,待发表