

# 地基激光雷达在森林参数反演中的应用\*

李丹<sup>1,2</sup> 庞勇<sup>1</sup> 岳彩荣<sup>2</sup>

(1 中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091;2 西南林业大学林学院,昆明 650224)

**摘要:**近年来地基激光雷达(TLS)得到了快速发展,它能够快速地获取高精度、高密度的3D点云数据,可以应用到工程设计、林业、农业、矿产、交通、城市规划和遗产记录等领域。在森林参数的定量测量应用上,利用TLS测量森林参数如树高、胸径、密度和蓄积量等,不仅节省人力,还提高了工作效率,现在已经成为一种快速获取树木几何参数的有效方法。文中主要介绍地基激光雷达遥感的工作原理、数据处理过程和方法、在林业中的应用现状、利用TLS数据反演森林参数(位置、胸径、树高、蓄积量、树干和郁闭度等)的方法和研究进展,同时对地基激光雷达在林业中的应用前景进行了分析和展望。

**关键词:**地基激光雷达,点云,森林参数,遥感,测量

中图分类号:S758.5,S771.8

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2012)06-0034-06

## A Review of TLS Application in Forest Parameters Retrieving

Li Dan<sup>1,2</sup> Pang Yong<sup>1</sup> Yue Cairong<sup>2</sup>

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

2 College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** In recent years, terrestrial laser scanning (TLS) has been rapidly developed. It can quickly obtain high-precision and high-density 3D point clouds, and can be applied in the fields of engineering, forestry, agriculture, mining, transportation, urban planning and heritage records. Using the TLS to measure forest parameters (tree height, DBH, tree density and volume, etc) for quantitative survey not only saves manpower, but also improves work efficiency, which has been a fast and effective way to obtain geometric parameters of trees now. This paper introduced the working principle of TLS, the process and methods of data processing, the application status in forestry sector, the methods of retrieving forest parameters (positions, DBH, tree height, volume, stem, canopy cover, etc), reviewed the research progress using TLS, and made analysis and prospect in future TLS application in forestry sector.

**Key words:** terrestrial laser scanning (TLS), point cloud, forest parameter, remote sensing, survey

## 0 引言

激光扫描是一种主动遥感技术,它能够直接测量激光扫描仪与反射目标之间的距离,得到高精度的3D点云<sup>[1]</sup>。应用在地面平台上的激光雷达被称之为地基激光雷达(Terrestrial Laser Scanning, TLS)。随着遥感技术的快速发展,地基激光雷达应用广泛,特

别是在工程设计、林业、农业、矿产、交通、城市规划、灾害监测和遗产记录等领域<sup>[2-4]</sup>。在人类很难进入的高山和自然灾害频繁发生的危险环境地区,它能够充分有效地发挥其扫描测量作用。在植被结构量化描述方面,激光雷达技术更是一种非常有价值的工具<sup>[5]</sup>。从2000年阿姆斯特丹和2004年伊斯坦布尔

\* 收稿日期:2012-03-08

基金项目:林业公益性行业科研专项(200704019);国家863计划(2009AA12Z142);国家自然科学基金课题(41071272)

作者简介:李丹,硕士研究生,主要研究方向:LiDAR在林业上的应用,电话:010-62889804, E-mail: lidan985@yahoo.com.cn,联系地址:100091北京市海淀区颐和园后中国林科院资源信息研究所

责任作者:庞勇,博士,副研究员,主要从事合成孔径雷达和激光雷达对地观测机理和森林定量反演等方面的研究,电话:010-62889804, E-mail: pangy@caf.ac.cn,联系地址:100091北京市海淀区颐和园后中国林科院资源信息研究所

的 ISPRS 会议开始,对地基激光雷达的研究就显著增加。TLS 可以提供从单株树到一个研究区水平的高精确性的空间数据,是一种非破坏性的高分辨率冠层三维测量手段,可弥补现有观测手段的不足,实现单木几何结构参数的自动获取,为重建三维真实结构森林场景提供了可能。目前,国外已经有很多相关的研究,特别是在单木参数如位置、树干、胸径和树高等的提取算法研究方面<sup>[6-10]</sup>,国内在森林参数提取和反演方面的相关研究也已经开始<sup>[11-14]</sup>。现在大部分提取算法的前提条件都是分离出地面点,森林内部结构的复杂程度将影响着算法的有效性,能否提出一种适用于不同复杂程度森林的算法是一个急需解决的问题,也是地基激光雷达能否在森林调查中普及的关键因素。

传统的森林调查技术都是基于小块研究样地,不得不依赖于统计归纳技术,机载激光雷达(ALS)能够获取全研究区的数据,但是受限于单木参数(如位置、胸径等)的确定。结合 TLS 与自动数据处理工具,可以消除传统调查技术效率低和 ALS 获取单木参数精度低的缺陷。采用 TLS 获取森林参数与其他地面测量方法有很多相似之处,也具有很大的优势,如不受天气等外界因素的影响、测量范围容易控制等。因此,其测量结果可以作为一种地面验证数据。

## 1 TLS 系统的特点及应用领域

地基激光雷达是一种集成了多种高新技术的新型测绘仪器,主要包括激光测距系统和激光扫描系统,同时还集成 CCD 数字摄影和仪器内部校正等系统。其工作原理是,根据激光发射和接收的时间差计算出被测点与扫描仪的距离,再根据水平向和垂直向的步进角距值,实时计算出被测点的三维坐标,并将其送入存储设备予以记录储存,经过相应软件的简单处理,即可提供被测对象的三维几何模型。

### 1.1 扫描技术的特点

1)扫描速度快。地面激光扫描仪能在短时间内获取大量空间目标的三维数据。目前脉冲式扫描速度已经达到 30 万点/s,相位式扫描速度已经达到 97.6 万点/s。

2)数据信息丰富。获取的数据包含物体表面精细信息,每个点均带有三维坐标信息和激光反射强度值,可以有效地解决形状复杂物体的建模问题,内置 CCD 数码相机可以获取高分辨率的彩色纹理数据。

3)高精度和高点位密度。地面激光扫描仪的测距精度和模型表面的精度都达到了 2 mm,扫描点间隔达到了 1.2 mm。

4)主动非接触式工作。地面激光雷达是主动式探测系统,可以全天候工作,不需要接触被测物体,属于所见即所得的非接触式测量。

5)扫描对象完整。

### 1.2 应用领域

TLS 小型便捷、精确高效、安全稳定、可操作性强,可以详细准确地提供三维立体影像和定量分析,目前广泛应用于城市三维模型的快速建立、古建筑测量、遗产与文物保护、逆向工程应用、复杂建筑物施工、地质研究、建筑物形变监测及农作物生长监测等领域。近几年,国内外研究学者相继开展了地基激光雷达在林业上的应用研究,从地基激光雷达点云数据中成功提取了各种森林参数,如位置、树高、胸径、材积、郁闭度、树干和叶面积指数等。这将推动地基激光雷达在林业上得到更广泛的应用。

### 1.3 国际上主要的 TLS 产品

目前,国际上主要的地基激光雷达品牌包括 Riegl, Leica, Trimble, Optech, Maptek, Faro 和 Z + F。Riegl 的开发侧重于系列化产品的研制,不同的典型测量距离均有相应的产品,并且每种产品的应用领域都不完全相同。Leica 的地基激光雷达产品,包括基于脉冲法飞行时间原理的 Scanstation C10/Scanstation 2 和 HDS4400 以及基于相位法原理的 HDS6100,都使用了 3R 安全等级的激光。Trimble 的地基激光雷达产品中,VX 空间测站和 GX3D 扫描仪都是基于脉冲法飞行时间原理,FX 基于相位法原理,CX 则是脉冲法飞行时间与相位法 2 种原理的有机结合。Optech 的地基激光雷达产品都是基于脉冲法飞行时间原理,其产品的主要参数区别较小。Maptek 的 I-Site 4400LR 产品是基于脉冲法原理,测量范围以中距离为主,采用 3R 安全等级的激光。Faro 与 Z + F 厂商开发的地基激光雷达产品都是基于相位法原理,测量范围以近距离为主,采用距离分辨率与距离精度进行精度评价<sup>[15]</sup>。

## 2 TLS 反演森林参数的研究现状

地基激光雷达作为一种新型工具被广泛应用于地面森林调查工作中,与传统林业调查相比,不仅节省了人力,还提高了工作效率。近几年,研究者提出

了许多用地基激光雷达数据反演森林参数的算法,极大地推进了地基激光雷达在林业上的应用。

## 2.1 数据预处理

地基激光雷达数据采集能够按照单站和多站扫描2种模式进行。在处理上,单站扫描数据比多站扫描数据更加自动化。因为激光扫描仪的视场有限,为了获取一个目标的完整描绘信息,从几个位置来收集数据是非常必要的。这些数据需要转换到一个坐标系中,以使参考体系一致,即点云配准。比较常用的配准方法有迭代最近点(ICP)<sup>[16]</sup>和多视图距离影像整合<sup>[17]</sup>。Henning和Radtke<sup>[18]</sup>提出一种在森林环境中对地基激光雷达数据配准的方法,采用来自自然表面的明确匹配连接点的估计对森林场景进行多视角距离范围影像配准,通过使用从地面和树干提取的控制点,产生了16 mm的平均配准误差。Bae和Lichti<sup>[19]</sup>提出一种对迭代最近点(ICP)修改的方法,通过使用曲率、表面法向量和标准变量角等参数,利用随机抽样和几何图元方法,提高了估计转换参数的精度,可高达5倍。Bucksch和Lindenbergh<sup>[20]</sup>提出一种在八叉树图形中的压缩合并程序算法(CAMPINO)来提取点云的骨骼结构,允许对点云的分割。李展等<sup>[21]</sup>发展了一种完全利用树干特征来自动配准多站扫描数据的方法。该方法既不需要安放人工反射物,也不需要测量扫描仪的方向。

在点云分割上,Biosca和Lerma<sup>[22]</sup>描述了一种使用模糊聚类的自动分割方法。该方法是集中于平面的分割。他们论证了在噪声、极端值和边缘点比较多的场景里使用该方法可以获得高质量的分割。

## 2.2 反演的森林参数及主要算法

### 2.2.1 单木位置、胸径和树高

Aschoff等<sup>[23]</sup>和Simonse等<sup>[24]</sup>首先分离出地面点生成DEM,然后采用二维Hough变换方法提取树干点云,进而提取单木位置、胸径和基地不同高度处树干的直径。Bienert等<sup>[25]</sup>分别采用点聚类搜寻法和点密度矢量分析法对单木进行识别,经过研究得出,采用点密度矢量分析法识别单木的精度为97.4%,远高于点聚类搜寻法25%的精度;以树中心坐标( $X$ ,  $Y$ )为中心位置,给定半径 $R$ ,利用中心位置和半径 $R$ 建立一个垂直圆柱体,通过计算圆柱体内点云的最高点与最低点之间的高度差异提取树高;结合DEM,在距离地面模型点上1.3 m高度处裁切厚度为 $d$ 的薄

片,通过圆或者椭圆拟合来确定胸径。Kiraly和Brolly<sup>[26]</sup>采用统计聚类法结合圆拟合识别单木,根据树干的形状采用月牙法来提取单木的位置和胸径。Brolly和Kiraly<sup>[27]</sup>采用八邻点距离检验法过滤点云,基于树干点云的垂直连续分布特征来识别单木。Maas等<sup>[28]</sup>通过在树的( $X$ ,  $Y$ )位置安放一个垂直圆柱来提取树干和周围地形数据点,从DTM中提取树的半径和地形坡度,通过对地面上1.3 m高度处厚度为 $d$ 的薄片拟合圆并且优化,重复测定树木位置和胸径,得到树干轮廓。Gorte和Pfeifer<sup>[29]</sup>首先把点云覆盖区域划分成多个大小一致的三维体元空间,把点云投影到划分后的三维体元空间中,然后采用形态学方法和连接性分析得到树干的三维拓扑结构骨架,再利用3D结构元素和连接分析通过形态学操作提取树干和主要树枝。

倪文俭等<sup>[30]</sup>首先从地基激光雷达数据中提取树干位置地面点,截取距地表最低点1.28~1.33 m、厚5 cm的水平薄片,通过对水平薄片点云做圆回归,提取单木的位置和胸径。黄华兵<sup>[31]</sup>采用的方法是先提取DEM,再通过树干点云的垂直连续分布特征来进行树干识别,最后结合圆拟合方法求得胸径。该方法按给定的体元大小将三维空间划分为三维格网,记录落入每个网格内的点数,通过检测点云在垂直方向上的连续分布来识别树干。鲍云飞<sup>[32]</sup>提出的单木识别算法是在激光扫描方位角的缺失角内寻找可能包括树干的激光点云,然后在提取的激光点云范围内根据点云垂直密度来搜寻树干点云。该单木识别算法的核心是找到包含树干点云的激光雷达点云范围,其主要考虑地基激光雷达扫描森林树木的特点,比较容易实现,而且可以省略生成DTM的步骤。

### 2.2.2 郁闭度、叶面积指数和冠层方向间隙率

地基激光雷达在森林树冠结构上具有高分辨率和空间测量详细的优点,可以对树冠表面进行非破坏性和3D的测量调查,能够以良好的尺度和高分辨率来提供各种各样的树冠特征。

Korhonen等<sup>[33]</sup>利用树冠回波、DTM和典型森林参数等,采用机载激光雷达、地基激光雷达和实际观测相结合的方法进行郁闭度研究。机载数据主要是提取出地面1.3 m高度以上所有扫描数据的首回波和单回波百分比,地基激光雷达数据主要是创建地理参考影像。Jason等<sup>[34]</sup>使用镜像和点云在线搜索步骤进行树冠投影面积的估测,首先完成一个单扫描点

云的镜像, 接下来计算点云的 2D Delaunay 三角网, 然后搜寻三角网区域的外部轮廓, 设置过滤阈值, 树冠投影面积就可以从外部三角形轮廓计算得出。Jupp 等<sup>[35]</sup>利用 EVI (Echidnar Validation Instrument) 提取了间隙率, 并有效地将树叶与树木其他成份区分开, 通过拟合一个简单的线性参数冠层模型获得了叶面积指数 (LAI), 最终分析了叶面积指数随着高度的分布。Lovell 等<sup>[36]</sup>从地基激光扫描数据中提取了冠层剖面, 然后利用该剖面模拟 LAI。郑光<sup>[37]</sup>基于几何投影来估测 LAI, 采用“点云分层”方法量化描述冠层的 3D 结构和 LAI。Danson 等<sup>[38]</sup>用地基激光雷达测量了冠层方向间隙率, 并建立了一个地基激光扫描仪模型来获取整个半球空间的冠层间隙率, 与地面测量的半球像片结果很接近。Takeda 等<sup>[39]</sup>用地基激光雷达测得间隙率, 并基于间隙率原理获得了植被面积指数 (PAI) 和植被面积密度 (PAD)。Legner 等<sup>[40]</sup>以叶面积指数和植被面积密度为基础, 利用 Lambert-Beer 方程式计算冠幅透明度, 采用非线性回归建立异速生长关系。Molder 和 Fleck<sup>[41]</sup>则结合机载、地基激光雷达和 LAI-2000 提取 LAI。

### 2.2.3 生物量和蓄积量

Dassot 等<sup>[42]</sup>从地基扫描数据中拟合树干和树枝折线, 然后进行 3D 重建, 利用平锥头圆锥公式估计材积, 通过转换计算得到生物量。Kiralý 等<sup>[43]</sup>从地基扫描数据中提取研究区的 DTM, 基于 free form polynomials (FFP) 方法的追踪算法和 crescent moon (CM) 方法, 采取圆柱和圆拟合等方法来提取研究区内的单木蓄积量。Gatzliolis 和 Popescu<sup>[44]</sup>结合最小距离法与线性回归法计算材积, 利用 R 和 TIFFs 软件通过建立生长方程, 对材积进行估算。Lefsky 等<sup>[45]</sup>通过对一个三维体元内的点云进行转换、识别和合并, 采用单木参数和树皮厚度作为基础参数, 提取蓄积量。

### 2.2.4 其他森林参数

Kretschmer 等<sup>[46]</sup>利用 TLS 与 CT 扫描相结合, 采用曲率和树皮特征等参数对木材性能进行评价。Cote 等<sup>[47]</sup>结合机载与地基激光雷达, 从 3D 点云中分离出树叶和单木, 使用 L-Architect 参数产生树干和树枝结构, 再采用优化算法 MCS 填充树冠上的叶子, 进行结构特征的提取。Krooks 等<sup>[48]</sup>基于线性回归估测和 TLS 测量结果, 根据采样点个数和比率进行了落叶检测。Klemmt 等<sup>[49]</sup>基于圆拟合、B 样条曲线、R 和聚类算法进行圆柱建模, 提取树枝和倾斜度及长度

等参数。Mathilde 等<sup>[50]</sup>先进行距离纠正, 然后再采用线性回归, 使用 LAI、反射强度和入射角等参数提取叶片强度特征。

## 3 结语

### 3.1 存在的不足

国内外地基激光雷达在林业上的应用大都以稀疏平坦、内部结构简单、胸径大于 5 cm 的针叶落叶树为研究对象。这些单木受到树枝、树叶等的影响较小, 树干点云具有较好的近似圆弧状分布, 便于单木参数的提取。在有一定地形起伏、树木非常密集林分的研究中, 单木参数的提取精度较低。针对单木结构重建的研究, 所用算法对单木之间的遮挡考虑比较少<sup>[13-14]</sup>。实际上由于森林内部复杂程度的不确定性, 单木之间都存在着不同程度的遮挡。目前, 使用地基激光雷达可以实现对单木位置的自动化提取, 胸径的自动提取算法依赖于圆弧存在性检测算法, 现有的圆弧探测算法都是在已知圆弧存在的情况下计算其位置和半径, 如何在圆弧存在情况下减少单木的过检和漏检误差是一个有待解决的问题。树高自动化提取算法的瓶颈在于如何判断点与单木的归属关系, 这是影响树高提取精度的关键问题, 同时由于地基扫描不能完全获取树木上层信息, 对于密集林分单木树高的提取精度较低。点云的分类始终是激光雷达数据处理中的一个难题, 同时风也是影响点云质量的一个重要因素。目前对森林参数提取的大部分算法的前提都是分离出地面点, 森林内部结构的复杂程度是影响森林参数提取精度的关键因素之一, 能否提出一种适用于不同内部复杂程度森林的算法是一个急需解决的问题。

### 3.2 展望

地基激光雷达具有效率高、全覆盖、真三维测量等优良的技术特性, 有着良好的应用前景, 数据采集不受天气等外界因素的影响, 测量范围容易控制。因此它的测量结果也可以作为一种地面验证数据, 使用地基激光雷达提取森林参数目前已成为全球的一个研究热点。尽管地基激光雷达在森林参数提取上取得了不错的成绩, 但是由于其对树木上层点云的获取能力较低, 还需要与机载激光雷达、人工测量等结合起来进行更高精度的分析。与被动光学遥感相比, 激光雷达数据在时空分布上不具有优势, 也不能够提供反演森林生物物理参数所需的光谱信息, 而被动光学遥

感可以弥补这一不足。因此将地基、机载激光雷达和被动光学遥感结合有利于提高森林资源的监测能力,为森林生态研究提供科学依据。

近2年国外学者采用车载激光雷达进行了单木生物量<sup>[51]</sup>、绿叶状态树冠属性<sup>[52]</sup>和森林落叶的监测<sup>[48]</sup>。作为地基激光雷达的另外一种工作模式,车载激光雷达具有更灵活的移动性,同时也具有很高的采样密度。目前结合车载激光雷达和 TLS 采样进行了单木生物量的获取,如何减少叶子复杂分布和倾斜对生物量估测的影响以及对生物量估测自动方法的实现也是未来需要继续研究的方向。

### 参 考 文 献

- [1] Heritage G L, Large A R G. Laser scanning for the environmental sciences[M]. Chichester: Blackwell Publishing Ltd,2009:6-7.
- [2] Henning J G, Radtke P J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning Lidar[J]. Forest Science,2006,52(1):67-80.
- [3] Hoffmeister D, Curdt C, Tilly N, et al. 3D terrestrial laser scanning for field crop modeling[C]. Workshop on Remote Sensing Methods for Change Detection and Process Modeling, Cologne, Germany,2010.
- [4] Prokop A. Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements[J]. Cold Regions Science and Technology,2008,54(3):155-163.
- [5] Balduzzi M A F, Zande vander D, Stuckens J, et al. The properties of terrestrial laser system intensity for measuring leaf geometries: a case study with conference pear trees (*Pyrus communis*) [J]. Sensors, 2011,11(2):1657-1681.
- [6] Hopkinson C, Chasmer L, Young-Pow C, et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning Lidar [J]. Canadian Journal of Forest Research,2004,34(3):573-583.
- [7] Parker G G, Harding D J, Berger M L. A portable Lidar system for rapid determination of forest canopy structure[J]. Journal of Application Ecologic,2004,41(4):755-767.
- [8] Pfeifer N, Winterhalder D. Modeling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2004,XXXVI-8(W2):76-81.
- [9] Watt P, Donoghue D. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning[J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(7):1437-1446.
- [10] Liang X, Litkey P, Hyyppa J, et al. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2012,50(2):661-670.
- [11] Huang H, Li Z, Gong P, et al. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning Lidar [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2011,77(3):219-227.
- [12] 罗旭,冯仲科,邓向瑞,等. 三维激光扫描成像系统在森林计测中的应用[J]. 北京林业大学学报,2007,29(增刊2):82-87.
- [13] Cheng Z L, Zhang X P, Chen B Q. Simple reconstruction of tree branches from a single range image[J]. Journal of Computer Science and Technology,2007,22(6):846-858.
- [14] Zhu C, Zhang X, Hu B, et al. Reconstruction of tree crown shape from scanned data [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Technologies for E-Learning and Digital Entertainment, Nanjing, China, June 25-27,2008.
- [15] 贺岩. 地面激光雷达指标参数与应用分析[C]. 第一届全国激光雷达对地观测高级学术研讨会,北京,2010.
- [16] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(2):239-256.
- [17] Chen Y, Medioni G. G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992,10(3):145-155.
- [18] Henning J G, Radtke P J. Multi-view range-image registration for forested scenes using explicitly-matched tie points estimated from natural surfaces [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2008,63(1):68-83.
- [19] Bae K H, Lichti D D. A method for automated registration of unorganised point clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2008,63(1):36-54.
- [20] Bucksch A, Lindenbergh R. CAMPINO - a skeletonization method for point cloud processing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2008,63(1):115-127.
- [21] Li Z, Huang H B, Gong P. Automatic registration of multi-scan terrestrial Lidar data of forests with stem features [C]// Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.
- [22] Biosca J M, Lerma J L. Unsupervised robust planar segmentation of terrestrial laser scanner point clouds based on fuzzy clustering methods [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2008,63(1):84-98.
- [23] Aschoff T, Thies M, Spiecker H. Describing forest stands using terrestrial laser scanning [C]// Proceedings of Commission V, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey,2004, Part B5.
- [24] Simonse M, Aschoff T, Spiecker H, et al. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning [C]// Proceeding of the Scand Laser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, Umea, Sweden,2003.
- [25] Bienert A, Scheller S, Keane E, et al. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters [C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, XXXVI, Part5.
- [26] Kiraly G, Brolly G. Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve [C]. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007,2007,XXXVI,Part3/W52.
- [27] Brolly G, Kiraly G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning [J]. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica,2009,5:119-130.
- [28] Maas H G, Bienert A, Scheller S, et al. Automatic forest inventory

- parameter determination from terrestrial laser scanner Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(5): 1579 – 1593.
- [29] Gorte B, Pfeifer N. Structuring laser – scanned trees using 3D mathematical morphology[C]// *Proceedings of Commission V, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004, Part B5: 929 – 933.*
- [30] 倪文俭, 过志峰, 孙国清, 等. 基于地基激光雷达数据的单木结构参数提取研究[J]. *高技术通讯*, 2010, 20(2): 191 – 198.
- [31] 黄华兵. 激光雷达森林结构参数提取[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2008.
- [32] 鲍云飞. 基于多源遥感数据的森林参数提取方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2009.
- [33] Korhonen L, Kaartinen H, Kukko A, et al. Estimating vertical canopy cover with terrestrial and airborne laser scanning[C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [34] Jason G, Henning J G, Philip J R. Ground – based laser imaging for assessing three – dimensional forest canopy structure [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, 72(12): 1349 – 1358.
- [35] Jupp D L B, Culvenor D S, Lovell J L, et al. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground – based laser called “Echidna?” [J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(2): 171 – 181.
- [36] Lovell J, Jupp D L B, Culvenor D, et al. Using airborne and ground – based ranging Lidar to measure canopy structure in Australian forests [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(5): 607 – 622.
- [37] Zhang G. Retrieval of leaf area index and tree crown parameters using terrestrial laser scanning[D]. Washington, USA: School of Forest Resource, University of Washington, 2011.
- [38] Danson F M, Hetherington D, Morsdorf F, et al. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 157 – 160.
- [39] Takeda T, Oguma H, Sano T, et al. Estimating the plant area density of a Japanese larch plantation using a ground – based laser scanner [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(3): 428 – 438.
- [40] Legner N, Fleck S, Seidel D, et al. Crown transparency assessment based on terrestrial Lidar [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [41] Molder I, Fleck S. Above the canopy, beneath the trees – LAI determination based on full waveform ALS, high resolution TLS, and litter trap data [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [42] Dassot M, Barbacci A, Colin A. Tree architecture and biomass assessment from terrestrial Lidar measurements [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [43] Kiraly G, Brolly G. Volume calculations of single trees based on terrestrial laser scanning [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [44] Gatzolis D, Popescu S. Evaluation of terrestrial Lidar technology for the development of local tree volume equations [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [45] Lefsky M, McHale M. Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2(1): 023521.
- [46] Kretschmer U, Winking A, Bruchert F, et al. An approach to combine two novel sensing – techniques for quality assessment of single trees and logs of branch diameters obtained by terrestrial laser scan data [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [47] Cote J F, Fournier R A, Luther J E. Forest structure characterization of balsam fir stands with terrestrial Lidar and fine – scale architectural modeling [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [48] Krooks A, Hyyppä J, Lyytikäinen S, et al. Monitoring forest defoliation with terrestrial laser scanning [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [49] Klemmt H J, Seifert T. Assessment of branchiness in a *Pinus pinaster* plantation by terrestrial laser scanner data as a link between exterior and interior wood properties [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [50] Mathilde A F, Balduzzi, Dimitry Van, et al. The intensity return behavior of a high resolution terrestrial 3D laser scanner for foliage structure measurement in pear orchards [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, University of Freiburg, Germany, 2010.*
- [51] Lin Y, Jaakkola A, Hyyppä J, et al. From TLS to VLS: biomass estimation at individual tree level [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(8): 1864 – 1879.
- [52] Lin Y, Hyyppä J, Jaakkola A. Combining mobile and static terrestrial laser scanners to investigate individual crown attributes during foliation [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011, 37(4): 1 – 17.