

## 基于地基激光雷达数据的单木结构参数提取研究<sup>①</sup>

倪文俭<sup>②</sup>\* \*\* 过志峰<sup>③</sup>\* 孙国清<sup>\*\*\*</sup> 黄华兵<sup>\*</sup>

( \* 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

( \*\* 中国科学院研究生院 北京 100049)

( \*\*\* Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD 20742 USA)

**摘 要** 针对利用地基激光雷达数据提取单木结构参数的问题,提出了一套较为复杂林分条件下的地基激光雷达数据获取方案与单木结构参数提取方法。首先利用八邻点距离检验法对点云数据中的多次散射点进行滤除,进而通过对现有的变尺度地面点识别方法进行改进,实现了对研究区内的地面点云的快速识别。通过对地基激光雷达数据的分析,提出了一种基于树干点云垂直连续分布特征的树干识别方法,在此基础上提取了单木位置、胸径和树高,最后将所提取的结构参数与林业测量数据进行了对比,结果具有较好的一致性。

**关键词** 地基激光雷达, 景深数据, 单木结构参数, 点云

## 0 引 言

进行森林资源调查、管理与规划时需要测量一些可以描述树木几何形状的参数。传统调查手段无法实现大范围覆盖,调查往往是基于几个样地的测量,通过统计的方法来推断大范围的森林植被生长状况<sup>[1]</sup>。随着遥感技术的发展,研究人员开始研究基于机载激光雷达数据的大范围森林调查<sup>[2]</sup>。机载激光雷达的优势在于可以快速获取大范围的数据,但其精度和可信度取决于从点云数据中提取参数时所采用模型的一些假设。通常情况下,它获取的是林分的平均参数,而不是单木参数<sup>[1]</sup>。

近几年研究人员开始探索基于地基激光雷达数据的森林结构参数提取方法<sup>[1-13]</sup>。地基激光雷达的出现为我们提供了一种非破坏性的高分辨率冠层三维测量手段,可以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,并为重建三维真实结构森林场景提供了可能。Simonsen<sup>[13]</sup>尝试使用二维 Hough 变换从点云中探测树干及胸高断面面积。Aschoff<sup>[12]</sup>将这种方法用于获取不同高度处树干的直径。Gorte<sup>[11]</sup>将点云数据投影到三维体素空间,通过三维形态学操作和连接性分析,得到树干三维拓

扑结构骨架。目前这些研究发展的算法都存在一定的局限性,它们大都以阔叶落叶树为研究对象,这些树受到小树枝、树叶等的影响较小,树干点云具有较好的近似圆弧状分布,便于树干参数的提取<sup>[7,8]</sup>;另外一些研究主要针对单木结构的重建,所用算法没有考虑单木之间的遮挡<sup>[3,4]</sup>。本文以中国北方针叶林为研究对象,提出了一套较为复杂林分条件下的地基激光雷达数据获取方案与单木结构参数提取方法,并简要分析了基于地基激光雷达数据重建三维森林场景的问题和潜力。

## 1 研究区与数据获取方案

本文的研究区位于甘肃省张掖市(107°48'E, 38°32'N),海拔高度约 2800m,林区主要树种为青海云杉(*Picea crassifolia*)。为了便于分析多源遥感数据与森林参数之间的关系,在研究区内选择了一块大小为 100m × 100m 的样地,对样地内所有胸径大于 5cm 的单木进行了编号,使用全站仪、胸径尺和超声波测高器测量了每木的位置、胸径和树高。样地内胸径 5cm 以上的树木约有 1400 株。图 1 为研究区的航空影像,图钉符标出了样地的范围。

① 863 计划(2006AA12Z114)和 973 计划(2007CB714404)资助项目。

② 男,1982 年生,博士生;研究方向:多源遥感数据的森林参数反演;E-mail: niwenjian@irsa.ac.cn

③ 通讯作者, E-mail: zhifeng\_guo@hotmail.com

(收稿日期:2008-10-21)

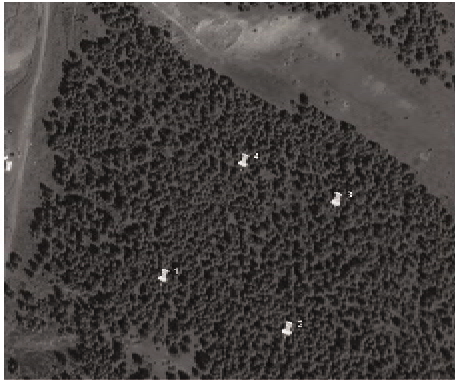


图 1 研究区的航空影像图

本研究所采用的地基激光雷达为 Riegl LMS-Z360i。如图 2 所示,垂直放置时,其垂直视场角为  $90^\circ$ ,一次扫描的最大视场角为  $90^\circ \times 360^\circ$ 。为了扩大视场范围,仪器可以绕水平轴倾斜,倾斜范围为  $(-90^\circ \text{至 } 90^\circ)$ 。仪器每隔大约  $15^\circ$  左右设定了一个倾斜位置,使用随机软件 RiSCAN PRO,可以对这些位置做标定,得到能够将倾斜状态下采集的数据转换到垂直状态的变换矩阵。因此,通过 7 次扫描(倾斜角分别为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ),可以实现数据的全空间覆盖和数据自动配准。但当仪器处于倾斜姿态时,树木与仪器之间的相对关系不利于数据的分析。本研究在同一位置获取了四景数据,其中一景是仪器处于垂直放置状态,另外三景仪器处于水平放置(倾斜角为  $90^\circ$ )状态,同时为了保证数据的全空间覆盖,仪器指向间隔为  $60^\circ$ 。数据采集的分辨率在方位向和天顶方向都为  $0.15^\circ$ 。图 3 给出了野外数据采集时,仪器处于垂直和水平状态时的情况。图 4 给出了同一站内获取四景数据时,仪器的相对位置。考虑到四景数据配准的需要,实验使用数显坡度测量了仪器沿 X 轴与 Y 轴的坡度,当仪器处于水平放置状态时,使用罗盘测量了 Z 轴的指向角。

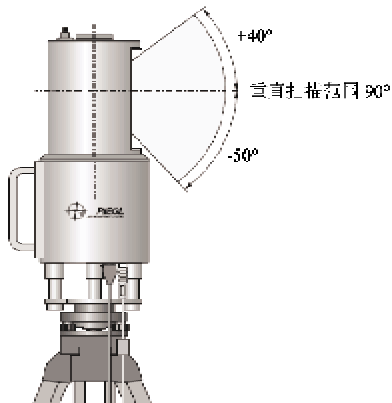


图 2 地基激光雷达的视场范围



(a) 垂直状态



(b) 水平状态

图 3 野外采集数据时,仪器的不同姿态

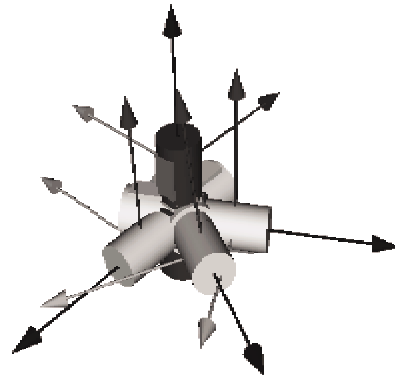


图 4 同一站内四景数据获取时,仪器的相对位置

## 2 数据的预处理

在提取单木结构参数之前,需要对所获取的数据进行预处理,主要包括多次散射点的去除,地面点的提取,单木的识别以及数据的配准等。

### 2.1 多次散射点的去除

数据获取时,需要设定方位向与天顶向的采样间隔(即像素大小,或称为分辨率)。理想情况下,每个像素只有一个回波点。但在复杂森林环境下,多次散射使某些像素包含多个回波点。表 1 给出了包含不同回波点数的像素个数及其所占的百分比。其中 86.05% 的像素含有一个点,多于一个点的像素占 6.28%。没有回波点的像素数占 7.67%。图 5 给

出了在由方位角和天顶角所构成的二维平面内,每一个分辨率单元所包含的点数。从中可以发现树干的右侧往往会存在没有点的像素,左侧往往会存在包含多于一个点的像素。多于或少于一个点的像素是由于多次散射产生的。由于地基激光雷达的扫描顺序为从右到左,当激光打在树干右侧时,多数激光点被反射到与仪器扫描前进方向相反的半球空间内,而无法被接收到。当激光打在树干左侧时,多数激光点被反射到与仪器前进方向相同的半球空间内,有可能与直接的后向散射点都被仪器接收到。同样的情况也发生在冠层。

表 1 包含不同点数的像素个数及所占百分比分布

| 点数 | 像素数     | 百分比(%)  |
|----|---------|---------|
| 0  | 109802  | 7.673   |
| 1  | 1231329 | 86.0462 |
| 2  | 86579   | 6.0502  |
| 3  | 3173    | 0.2217  |
| 4  | 114     | 0.008   |
| 5  | 11      | 0.0008  |
| 6  | 1       | 0.0001  |
| 合计 | 1431009 | 100     |

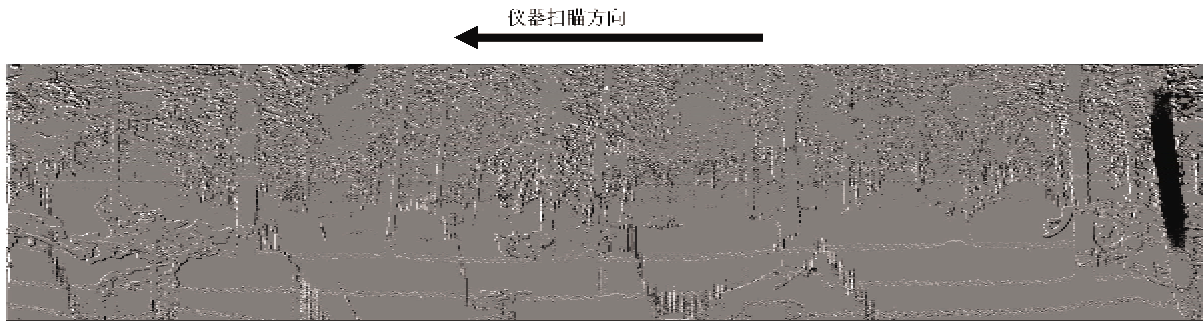


图 5 每个像素包含的点数图

这些多次散射点并不是直接由目标反射的点,它们在三维空间中的位置并不一定有目标存在,因此这些点为噪声点,需要加以滤除,本研究采用的方法如下:

设  $n_{ij}$  为像素  $(i, j)$  所包含的点数,  $s_{ij}$  为该点到扫描仪坐标原点的距离。搜索其八邻像素,计算其中只有一个点的相邻点到扫描仪坐标原点的距离平均值  $d_{\text{mean}}$ , 计算公式如下:

$$d_{\text{mean}} = \frac{1}{8} \left( \sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 s_{i-p, j-q} - s_{i, j} \right) \quad (1)$$

保留与  $d_{\text{mean}}$  最近的点为该像素所包含的点。表 2 和图 6 给出了处理结果,可以看出多次散射点得到有效的去除。

表 2 去除多次散射点后,分别包含 1 个和 0 个点数的像素个数及所占百分比分布

| 点数 | 像素数     | 百分比(%) |
|----|---------|--------|
| 0  | 109802  | 7.673  |
| 1  | 1321207 | 92.327 |
| 合计 | 1431009 | 100    |

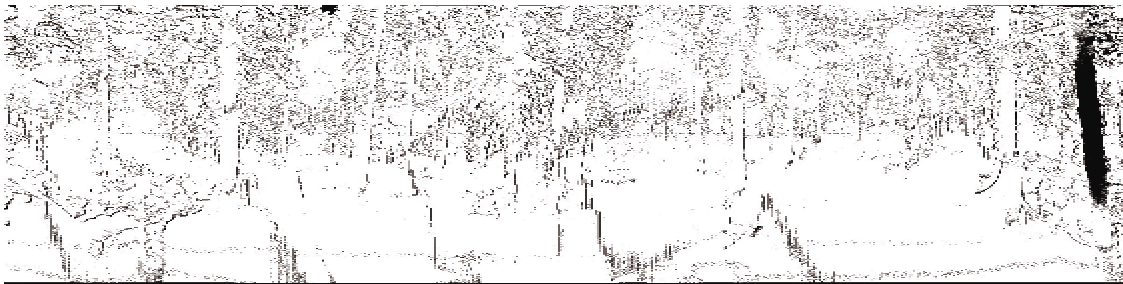


图 6 去除多次散射点后每个像素包含的点数图

## 2.2 地面点的提取

地面点的提取是森林参数提取的重要步骤。文

献[14]提出了一种通过变尺度提取地面点的方法。该方法从大到小使用不同的网格将点云在水平面内

栅格化,即首先计算每个网格内的最低点,用这些最低点构建初始地面三角网,使用相应的阈值截取到三角网的距离落在该阈值范围内的点,然后对这些点使用更小的网格进行处理。这种方法可以有效地避免来自树冠的点被划入地表的情况,但是构建三角网并做插值的耗时较长,计算效率低。本文对这种方法加以改进以缩短计算时间,具体的计算方法如下:

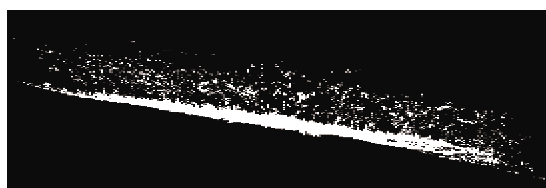
(1)使用比较大的格网将点云数据在水平方向上网格化;

(2)搜索每个网格内的最低点;

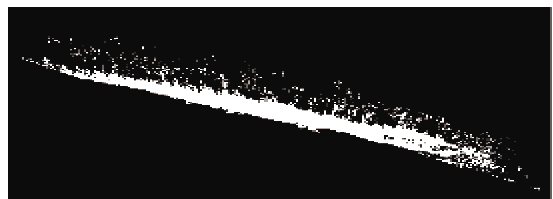
(3)计算网格内每个非最低点与最低点  $Z$  坐标的差别,如果差值落在给定的阈值内,则记录该点,以备下一次循环使用,否则放弃该点;

(4)对于上一步得到的点云,换用一个更小的网格和相应的阈值,重复(1) - (3),直到所有的网格大小都使用结束。

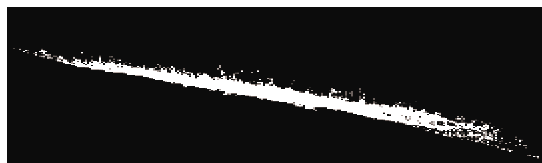
本文所采用的网格大小为 4m, 2m, 1m, 0.5m, 0.25m, 相应的阈值分别为 3m, 1.5m, 0.7m, 0.35m, 0.2m。图 7(a) - (e)给出了使用不同的格网大小和阈值计算结果的前视图。图 7(f)为最终结果的斜视图。可以看出,该算法较好地提取出了地面点。



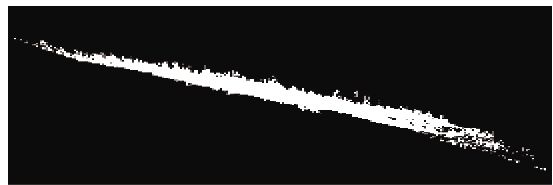
(a) 网格:4m, 阈值:3m



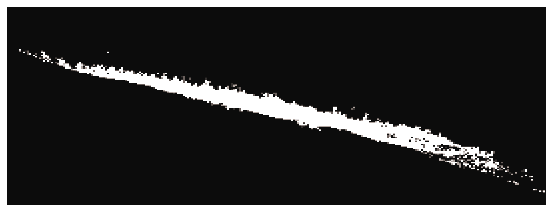
(b) 网格:2m, 阈值:1.5m



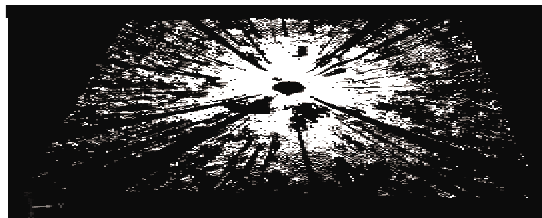
(c) 网格:1m, 阈值:0.7m



(d) 网格:0.5m, 阈值:0.35m



(e) 网格:0.25m, 阈值:0.2m



(f) 斜视图

(a)-(e)为不同尺度的处理结果的前视图,(f)为最终结果的斜视图

图 7 使用不同的网格大小和阈值的计算结果

### 2.3 单木的识别

单木的识别是单木参数提取的基础。Maas<sup>[1]</sup>和 Aschoff<sup>[12]</sup>提出了两种不同的树干识别方法,这两种方法适用的前提是树干点云在水平方向上成圆弧状分布,对于距离扫描仪比较远的单木,由于采样频率较低,很难保证满足该条件。与这些方法不同,本文采用一种基于树干点云垂直连续分布特征的单木识别方法。该方法按给定的体元大小将三维空间划分为三维格网,每个网格记录落入该网格内的点数。通过检测点云在垂直方向上的连续分布来识别树干。具体算法如下:

(1) 根据上一步得到的地面点点云截取地面以上 0.3m 到 1.0m 范围内的点云;

(2) 根据点云的三维坐标分布范围,将三维空间按 0.1m 的体元划分为三维格网;

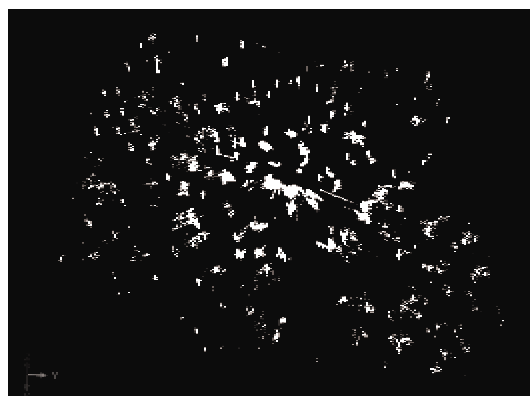
(3) 遍历点云文件,记录落入每个体元内的点数;

(4) 遍历三维格网,如果在垂直方向上,连续有一定数目的体元含有点,则认为这些点为树干点;

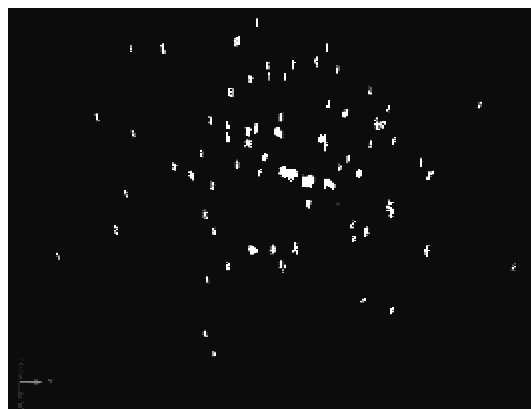
(5) 完成遍历后,通过聚类的方法计算每一组点坐标的平均值。这些点即为探测到的树干的位置。

图 8 给出了滤波的结果。可以看出这种方法可以比较好地识别树干点云,特别是离地基激光雷达

比较远的单木。



(a) 0.3m 到 1.0m 范围内的点云的斜视图



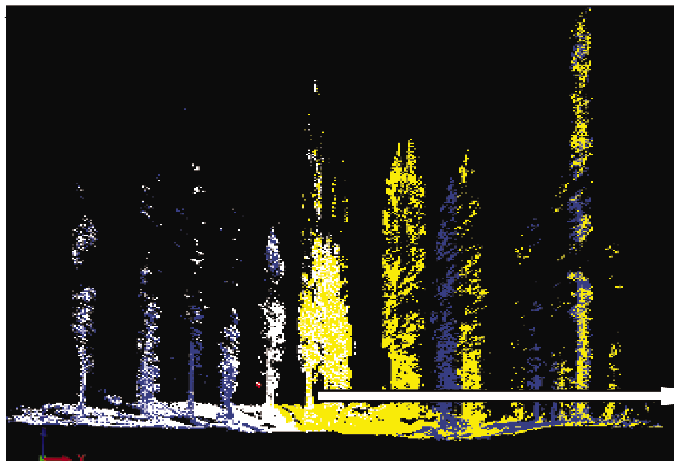
(b) 经过垂直滤波后的结果的斜视图

图 8 垂直滤波的结果

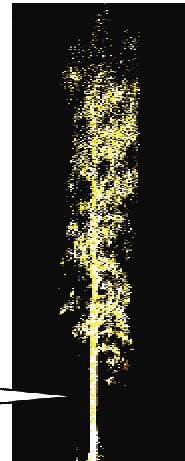
## 2.4 数据的配准

在本研究中为实现全空间覆盖,在每个扫描站内均获取 4 景扫描数据,因此需要对这些 4 景数据进行配准以构成一个完整空间。地基激光雷达数据配准的最关键步骤是搜索同名点。森林不像建筑物或

机械部件那样具有明显的特征点,本文发现对于本研究所采用的数据,可以利用两景数据中单木到扫描仪的距离近似相等这一规则识别同名树干,进而做点云的配准。图 9 给出了站内数据配准的效果图。



(a) 原始配准效果 (不同颜色表示地基激光雷达在不同姿态下获取的数据)



(b) 单木配准的效果

图 9 站内数据配准的效果图

## 3 单木参数的提取

### 3.1 单木位置的提取

通过 2.3 的处理,我们得到了地表以上 0.3m 到 1.0m 范围内来自于树干的点云,并使用如下方法计算得到单木的坐标  $(x, y)$ :

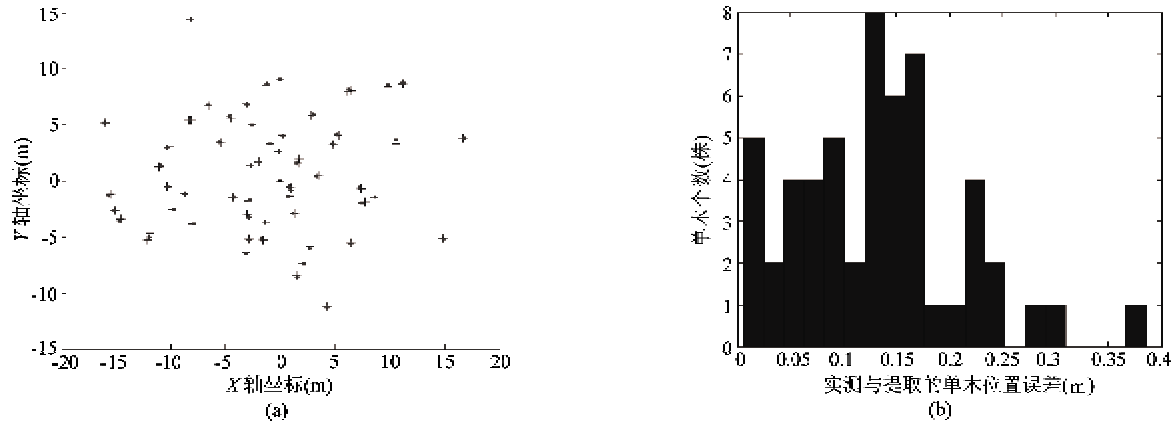
$$x = \frac{1}{n} \sum x_i, \quad y = \frac{1}{n} \sum y_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

其中  $(x_i, y_i)$  满足  $d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < 0.5, i, j = 1, \dots, n, \text{ 且 } i \neq j$ 。

图 10(a)给出了全站仪测量的单木位置和从地基激光雷达数据中提取的单木位置空间分布。图 10(b)给出了每木全站仪测量的位置与提取位置

之间距离的直方图分布。两者最大误差为 0.38m, 最小误差为 0.006m, 误差平均值为 0.132m。需要说明的是, 这种误差不仅仅是由参数提取方法引起的, 还与全站仪本身的测量过程有关。基于地基激光雷

达数据所提取的树干的位置是可见树干表面的中心点, 这些点并不一定恰好是全站仪测量位置时棱镜所放置的位置, 最坏的情况是它们恰好位于同一棵树的相对两侧。



(a) 单木的平面分布(圆点表示从地基激光雷达数据中提取出的单木位置, 十字号表示由全站仪测得的单木的位置, (0,0)处的星号表示地基激光雷达所在的位置, 图中的标号为地基激光雷达数据中提取的树干的编号) (b) 全站仪测量的单木位置与提取的单木位置之间距离的概率分布图

图 10 基于地基激光雷达数据提取的单木位置信息

### 3.2 树高的提取

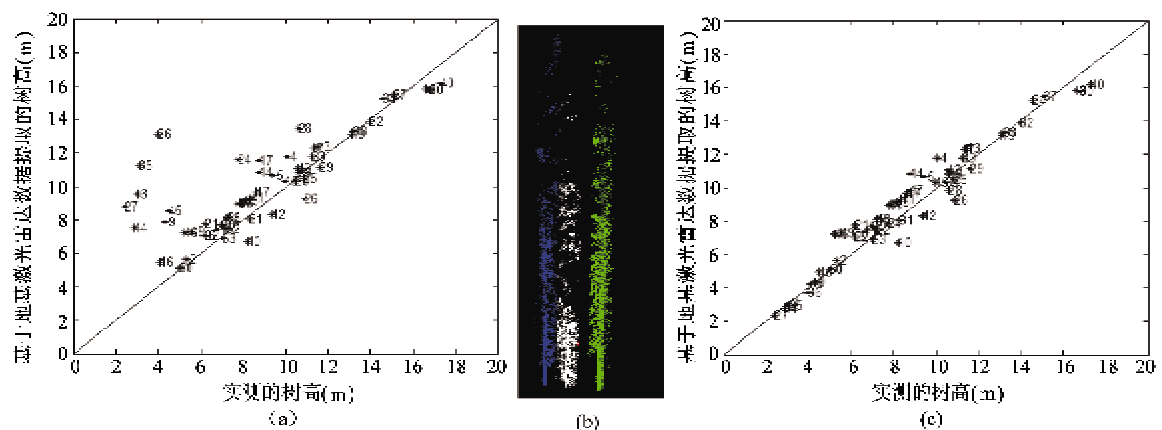
利用单木的位置信息, 截取水平方向上距中心点 0.5m 范围内的点云。每棵树的最高点和最低点高度差值被视作单木高度。

$$H = \max(z) - \min(z)$$

其中  $z = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ ,  $n$  为点个数

图 11(a) 给出了提取的结果。可以看出 3, 9, 27, 35, 36, 44, 45 号木明显被高估, 10, 30, 40 号木被

低估。通过分析点云数据发现, 被高估的这些单木的上方有来自于其它树冠的点, 如图 11(b) 所示; 而被低估的这些单木距离地基激光雷达相对较远, 其顶端被前面的单木所遮挡。经过手动对点云加以修正后, 结果如图 11(c) 所示, 误差均值为 0.7m, 标准差为 0.56m。通过上述分析可以看出, 这种提取树高的算法适合于比较稀疏的林分。



(a) 基于地基激光雷达数据提取的单木高度与超声波测量结果的对比(横轴为超声波测高仪测量的结果, 纵轴为提取的树高) (b) 被低估的单木的点云 (c) 经过手动修正后的地基激光雷达数据提取的单木高度与超声波测量结果的对比

图 11 单木高度提取结果

### 3.3 胸径的提取

根据前面提取的地面点,截取从距地表最低点处 1.28m 到 1.33m 范围内的点构成厚度为 5cm 的点云层。考虑到树干近似为圆形,这些点近似满足  $(x-a)^2+(y-b)^2=r^2$ , 其中  $(x, y)$  为点的二维坐标,  $(a, b)$  为圆的位置,  $r$  为圆的半径。通过对点云做圆回归,即可得到圆的位置和半径。图 12 给出了 13 号木的点云分布及拟合情况。这种方法的前提是点云有比较好的圆弧分布。由于树枝树干遮挡的影响,很多单木无法在胸高范围内得到比较好的圆弧分布。只有离扫描仪比较近,没有遮挡的单木才有可能获取其胸径。表 3 给出了成功提取的胸径的结果。

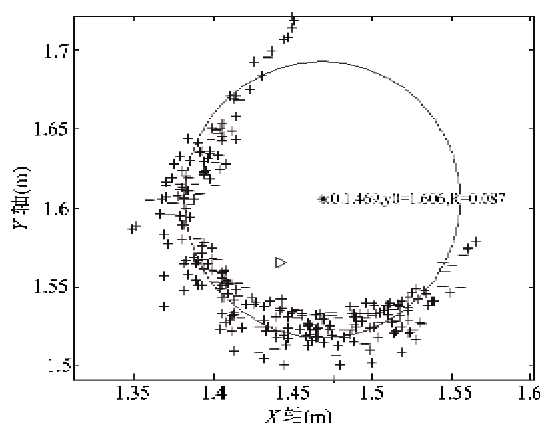


图 12 13 号点的点云分布与回归得到的圆形

表 3 基于地基激光雷达提取的单木胸径

| 编号 | 测量值(cm) | 提取值(cm) | 差值(cm) |
|----|---------|---------|--------|
| 1  | 9.4     | 8.6     | -0.8   |
| 13 | 18.7    | 17.4    | -1.3   |
| 32 | 19.5    | 17.4    | -2.1   |
| 42 | 20.9    | 19.2    | -1.7   |
| 46 | 6.5     | 5.6     | -0.9   |
| 53 | 11.2    | 11.4    | 0.2    |

## 4 结论

本文首先提出了针对森林参数提取的地基激光雷达数据采集方案与处理过程,主要包括多次散射点去除、地面点提取、单木识别以及站内数据配准,在此基础上提取了单木结构参数(位置、树高、胸径),并与实测数据做了对比分析,取得较好的结果。通过研究发现使用地基激光雷达可以实现对单木位置的自动化提取,但是胸径的自动提取算法目前还

无法实现,其瓶颈在于缺少较好的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,鲜见有算法能检测圆弧的存在性。树高的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,这也是影响树高提取精度的关键问题。此外,点云的分类始终是激光雷达数据处理中的一个难题。目前的研究已经可以提取出地面点和树干点,但主要的问题是树枝与树叶点云的区分。本研究采用的地基激光雷达工作波段为  $0.9\mu\text{m}$ ,位于近红外波段,该波段对目标的含水量较为敏感,而树叶的含水量高于树枝,从理论上讲可以用于树枝树叶的区分,但由于本次实验获取的数据没有定标,得到的只是回波强度,而回波强度不仅受反射率的影响,还受大气消光、发射器稳定性等因素的影响,大大降低了回波强度的可用性。所有这些问题都是今后要进一步研究的内容。

### 参考文献

- [1] Maas H G, Bientz A, Scheller S, et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(5): 1579-1593
- [2] Schardt M, Ziegler M, Wimmer A, et al. Assessment of forest parameters by means of laser scanning. In: *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium 2002, Graz, Austria, 2002*. 34 (part 3A). 302-309
- [3] Cheng Z L, Zhang X P, Chen B Q. Simple reconstruction of tree branches from a single range image. *Journal of Computer Science and Technology*, 2007, 22(6): 846-858
- [4] Zhu C, Zhang X, Hu B, et al. Reconstruction of Tree Crown Shape from Scanned Data. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, 5093: 745-756
- [5] Pfeifer N, Gorte B, Winterhalder D. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. In: *Proceedings of the ISPRS Commission II Symposium 2004, Istanbul, Turkey, 2004*. 35(B5). 114-119
- [6] Hopkinson C, Chasmer L, Young-Pow C, et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(3): 573-583
- [7] Henning J G, Radtke P J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, 2006, 52(1): 67-80
- [8] Henning J G, Radtke P J. Ground-based Laser Imaging for Assessing Three Dimensional Forest Canopy Structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, 72(12): 1349-1358
- [9] Henning J G, Radtke P J. Multiview range-image registration

- for forested scenes using explicitly-matched tie points estimated from natural surfaces. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(1): 68-83
- [10] Goshtasby A. Three-dimensional model construction from multiview range images: survey with new results. *Pattern Recognition*, 1998, 31(11): 1705-1714
- [11] Gorte B, Pfeifer N. Structuring laser-scanned trees using 3d mathematical morphology. In: Proceedings of the ISPRS Commission II Symposium 2004. Istanbul, Turkey, 2004. 35 (B5). 929-933
- [12] Aschoff T, Spiecker H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. In: Proceedings of the ISPRS Commission VII Symposium 2004, Freiburg, Germany, 2004. 36(PART 8/W2). 66-70
- [13] Simonse M, Aschoff T, Spiecker H, et al. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. In: Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. Umeå, Sweden, 2003. 251-257
- [14] 黄华兵. 激光雷达森林结构参数提取—山东徂徕山林场低密度航空激光雷达及地面激光雷达数据应用:[博士学位论文]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2002. 114-115

## Research on extraction of tree structure parameters from terrestrial laser scanner data

Ni Wenjian<sup>\* \*\*</sup>, Guo Zhifeng<sup>\*</sup>, Sun Guoqing<sup>\*\*\*</sup>, Huang Huabing<sup>\*\*</sup>

(<sup>\*</sup> State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remotes Sensing Applications,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(<sup>\*\*</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(<sup>\*\*\*</sup> Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD20742 USA)

### Abstract

This study mainly addresses the problem of tree structure parameter extraction from terrestrial laser scanner data. This paper gives a detailed description of the study and presents a new scheme for acquisition of terrestrial laser scanner data of a medium dense forest, as well as a new method for extraction of the tree structure parameters of the forest from its terrestrial scanner data. The method first filters the multiple scattering points effectively through checking the eight-neighbour's distance to scanner, and then improves the multi-scale method for ground points recognition to extract the ground points in the research area quickly. Based on the analysis of the point-cloud, the vertical continuity of trunks points are used to identify tree trunks. Finally, tree structure parameters, such as tree position, diameter at breast height (DBH) and tree height, are extracted. Compared with the forest inventory data, the parameters extracted with the new method show a good consistency.

**Key words:** terrestrial lidar, range images, tree structure parameters, point cloud