

基于点云体素化的单木叶面积指数地基遥感反演

邓洋波^{1,2},余坤勇^{1,2},俞欣妍^{1,2},项佳^{1,2},张佳奇^{1,2},刘健^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学 林学院,福建 福州 350002;2.3S 技术与资源环境优化利用福建省高校重点实验室,福建 福州 350002;
3. 三明学院,福建 三明 365000)

摘要:以黑松、马尾松、荔枝、相思树为对象,采用地基激光雷达获取点云数据,基于点云体素化理论,分割叶片点云,建立“叶片—体素”的投影关系,研究体素化理论中尺度因子与点云密度对叶面积指数(LAI)反演精度的影响,实现单木LAI的高精度获取。结果表明,样木反演的LAI随着尺度因子的增大而增大,最优尺度区间为1.2~1.3,样木LAI最优反演精度范围为93.3%~99.9%,决定系数R²为0.9893,反演结果与实测LAI具有较高相关性;在最优尺度区间下,样木LAI反演精度随着点云密度的降低而减小,最大精度为98.63%,最小精度为84.14%,点云密度对单木LAI反演精度影响不大。

关键词:叶面积指数;地基激光雷达;体素化;点云密度

中图分类号:S758.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)03-0191-07

Estimation of Individual Tree Leaf Area Index of Terrestrial Remote Sensing Inversion Based on Point Cloud Voxelization

DENG Yang-bo^{1,2}, YU Kun-yong^{1,2}, YU Xin-yan^{1,2}, XIANG Jia^{1,2}, ZHANG Jia-qi^{1,2}, LIU Jian^{1,2,3*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. Fujian Provincial College Key Laboratory of 3S Technology and Optimization & Utilization of Environment and Resources, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Sanming University, Sanming, Fujian 365000, China)

Abstract:Terrestrial laser scanning was used to obtain point cloud of *Pinus thunbergii*, *P. massoniana*, *Litchi chinensis* and *Acacia confusa*, and blade point cloud segmentation to establish a “blade-voxel” projection relationship. The influences of the scale factor and point cloud density on LAI inversion accuracy were examined by using point cloud voxel voxelization, to simulate LAI of individual tree precisely. The results showed that the LAI inversion of sample wood increased with the increase of scale factor, where the optimal scale ranged from 1.2 to 1.3. The optimal LAI inversion accuracy of three tree species ranged from 93.3% to 99.9% and determination coefficient (R^2) was 0.9893, which exhibited relatively high correlation of LAI inversion results and the measured. Based on the optimal scale range, LAI inversion accuracy of sample wood decreased with the loss of the point cloud density, in which maximum precision was 98.63%, the minimum accuracy was 84.14%, and point cloud density did not affect LAI simulation of individual tree.

Key words:leaf area index; terrestrial laser scanning; voxelization; point cloud density

叶面积指数(leaf area index, LAI)是对叶片进行定量描述的常用参数,包括有效叶面积指数和真

实叶面积指数,是估算植被冠层与外界环境发生相互作用的一个重要指标^[1],常用的叶面积指数测量

收稿日期:2016-10-18 修回日期:2017-01-10

基金项目:福建省高校产学研合作项目(2015N5010);国家林业局林业科技成果国家级推广项目([2015]13号)。

作者简介:邓洋波,男,在读硕士,研究方向:林业3S技术应用。E-mail:317735600@qq.com

*通信作者:刘健,男,博士,教授,研究方向:林业3S技术应用。E-mail:fjliujian@126.com

方法包括地面测量和遥感估测^[2],传统的地面测量采用人工采集叶片样本的方法,劳动强度大,适用范围有限;遥感估测虽然能够大面积反演叶面积指数,在时间和空间上具有优势^[3],但只能获取林木冠层顶端的光谱信息,对中、下层部分冠层结构信息获取的局限性导致 LAI 反演精度受到影响。激光雷达技术作为一种主动遥感技术,通过发射具有一定穿透力的激光脉冲作用于植被,获得植被冠层水平分布信息和垂直分布信息^[4],能够快速的记录植被表面的三维点云数据和森林的三维结构数据^[5],弥补了光学遥感监测技术的局限,广泛应用于森林覆盖度和 LAI 等水平结构参数的反演等^[6-8]。目前国内学者在利用激光雷达获取叶面积方面进行了一定的研究^[9-12]。但地理投影算法结合丛生系数反演 LAI 的过程中,由于多次的坐标系及投影转换,会造成的反演误差,多位学者进行了相应地研究^[13-15],并取得一定的成果,如何将点云体素化理论应用于林木 LAI 监测,对于解决冠层点云间的重叠效应与遮蔽效应具有重要意义。本研究以荔枝、黑松及马尾松作为研究对象,基于地基三维激光扫描仪获取的单木冠层点云数据,耦合点云体素化与叶倾角投影关系,探讨提出单木叶面积指数的获取方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及对象选择

研究区位于福州市仓山区(26°05' N, 119°32' E),属亚热带海洋性季风气候,辖闽江入海口处整个南台岛,总面积 142 km²,年平均降水量 900~2 100 mm,年平均气温 16~20°C,年相对湿度约 77%,主导风向为东北风,夏季以偏南风为主^[16]。反演对象选取 14 株福州市仓山区典型植被荔枝(*Litchi chinensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、黑松(*Pinus thunbergii*)和相思树(*Acacia confusa*),其中 5 株作为试验数据,9 株作为验证数据。

1.2 野外测量数据

1.2.1 点云数据获取 采用 Stonex X300 激光扫描仪(意大利 Stonex Srl 公司)获取样木的点云数据,为避免光线强度、天气因素对测量误差产生的影响,选择在天气晴朗 12:00 对每株样木进行 3 个不同角度的扫描(图 1),将仪器拍摄角度设为 220°,扫描模式设为快速,扫描区域水平视场以测站与测站之间有部分重叠为准,以满足任意 2 站之间能够找到多个同名点,垂直视场角为-25°到 65°。扫描分辨精度<6 mm。

1.2.2 叶面积指数的测定 选择 LAI-2200 型冠层分析仪(美国 Li-COR 公司)进行单木 LAI 的测

量,设置为“1 上 4 下”的采样方式^[17],测量树冠上、下 5 个角度的透射光线,获取叶面积指数、平均叶倾角等树冠结构参数。由于单株活立木的 LAI 测定与样地的 LAI 测定有着本质的区别,一方面考虑到不同方位上的 LAI 测定,另一方面,要考虑到仪器特性产生的 DISTS 矢量差异,在测量中,选取 90°的遮盖帽,从 4 个不同方向测量 1 棵树的 LAI(图 2),通过 4 次重复测定,获取单木冠层叶面积指数。

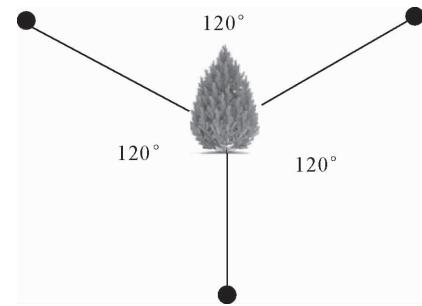


图 1 单木数据采集测站点分布

Fig. 1 The diagram of instrument stations location of individual tree

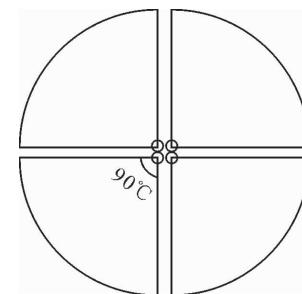


图 2 测量方位

Fig. 2 The diagram of measurement orientation

1.3 单木冠层 LAI 反演

1.3.1 点云数据体素化及稀释 采用坐标匹配法对三维激光点云数据进行拼接,将扫描图中的控制点组成 1 个闭合环^[18]。通过目视解译,结合视角切换,去除非测定干扰物,选择出各样木冠层点云数据,计算得到体素值^[19]:

$$L = \alpha / (X_{\max} - X_{\min})(Y_{\max} - Y_{\min}) / N \quad (1)$$

式中,L 为体素值,α 为尺度因子,取值在 1.0~1.5 之间,X_{max} 为整体冠层横坐标最大值,X_{min} 为整体冠层横坐标最小值,Y_{max} 为整体冠层纵坐标最大值,Y_{min} 为整体冠层纵坐标最小值,N 为冠层整体点云数量。

为减少冠层间相互遮挡及微小形变带来的误差,解决等厚度分层造成的不同层点云数据量差异较大的现象,采用“等厚度—再分层”的方法,以 0.5 m 作为间隔尺度进行等厚度分层^[20],之后对点云数据量大的层数进行再分层,平衡每层点云数据量。同时将整体冠层进行二维投影,根据冠层轮廓进行

提取,获得单木冠层的投影面积 S 。

结合 Visual Basic6.0 编程,根据体素内激光点云的存在状况对单个体素进行赋值,如果激光点个数 ≥ 1 ,代表激光束被拦截,将体素赋为 1,否则赋为 0。在获取叶片真实叶面积过程中,设置不同的体素值会得到不同的叶面积,需求取最优体素值,确保所求真实叶面积指数的准确性,避免由于体素过小,降低算法整体运算速率,或体素过大导致的叶片边缘处面积的高估。

为比较不同点云数量对单木 LAI 反演的影响,采用随机稀释法对冠层的点云数据进行稀释^[21],以保证在较低点云密度的情况下,整体冠层点云均匀存在,最大限度的降低人为因素的干扰。

1.3.2 单木叶面积指数获取 通过对点云数据的体素化处理,各体素内叶片的叶倾角投影呈现正弦、余弦分布状态(图 3),当 $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 时,叶片平面与体素底面呈余弦关系;当 $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,叶片平面与体素底面呈正弦关系,应用苏伟^[22]等的方法获取单木冠层叶面积。由于黑松、马尾松的叶片呈束状、针状的特殊性,选取各层部分叶片叶倾角的平均值作为该层的平均叶倾角,根据样本的叶倾角(式 2)及各层叶面积得到单木 LAI (式 3):

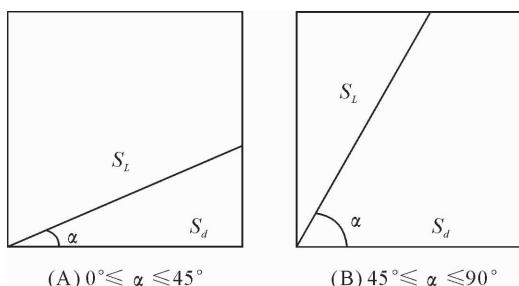


图 3 叶片投影数学关系

Fig. 3 Mathematical relationship of leaf blade projection

$$S_{Li} = \begin{cases} L^2 / \cos \alpha & (0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ) \\ L^2 / \sin \alpha & (45^\circ < \alpha \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

$$LAI = \sum_{i=1}^n S_{Li} / S \quad (3)$$

式中, S_{Li} 代表不同层叶面积、 S 代表冠层整体投影面积、 L 为体素值, α 为平均叶倾角。

2 结果与分析

2.1 尺度因子对单木 LAI 反演的影响分析

以获取的原始点云数据量作为 N 值,0.1 作为间隔尺度,根据式 1 计算 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 与 1.5 等 5 个不同尺度因子 α 下各样木的体素值。黑松体素值为 1.33、1.46、1.59、1.72、1.86 cm 与 1.99 cm,马尾松的体素值分别为 2.39、2.63、2.87、3.11、3.35 cm 与 3.59 cm。与黑松、马尾松相比,荔枝叶树的叶片形态的不同,构成冠层结构的三维点云数

据量也存在差异,荔枝 A 的冠层点云数为 140 000 个,荔枝 B 与荔枝 C 的点云数也有 70 000 多个,整体点云分布茂密、广阔,当尺度因子为 1.0 时,荔枝 A、荔枝 B、荔枝 C 的体素值分别为 2.34、3.35 cm 与 3.36 cm,尺度因子为 1.5 时,3 株样木的体素值分别为 3.51、5.03 cm 与 5.04 cm。

单木的叶面积指数随体素的增大而增大(表 1)。不同体素反演的 LAI 不同,对黑松而言, LAI 精度最高时为 99.06%,此时 $\alpha=1.2$,误差最大时 $\alpha=1.5$,估测精度为 78.64%,马尾松相估测精度最高为 98.85%, $\alpha=1.3$,误差最大时 $\alpha=1.5$,估测精度为 79.63%,3 株荔枝树的最优尺度因子分别是 1.5、1.3 与 1.2,估测精度分别为 99.06%、99.95% 与 99.89%;整体反演精度呈现出“波峰”状态(图 4),当尺度因子 α 取值为 1.2~1.3 时, LAI 反演精度最高。黑松、马尾松、荔枝树的平均估测精度为 88.47%、90.14%、82.31%、90.11% 与 86.46%,在尺度范围内,荔枝 A 的叶面积指数反演结果比实测的 LAI 偏小,误差较大。

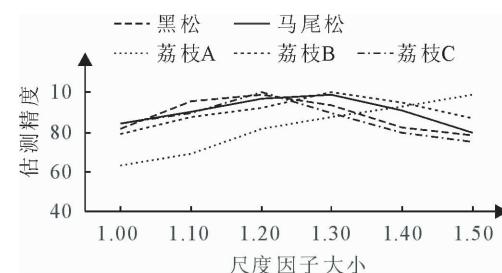


图 4 试验样本 LAI 估测

Fig. 4 The estimation of LAI of testing samples

2.2 点云密度对单木 LAI 反演的影响分析

为观察不同点云密度在体素化估测叶面积指数过程中的影响,选择最优尺度因子,应用随机点云稀释法对单木冠层点云分别进行 1、0.5、0.25 倍与 0.125 倍稀释,得到 4 种不同点云密度(图 5),可见点云随机稀释法获取的不同点云密度,对冠层整体结构形态影响较小。

对 4 种不同点云密度情况下 LAI 反演的优劣进行比较(表 3、表 4),黑松、马尾松的 LAI 反演精度随着稀释倍数的减少而减少。当点云不稀释时,黑松与马尾松的估测精度分别为 99.056%、98.765%。在稀释倍数为 1、0.5 与 0.25 稀释精度都 $> 90\%$ 、当稀释倍数为 0.125 时,稀释精度 $< 85\%$,说明当点云密度稀释不到 0.125 倍时,体素转换法完全能够满足黑松、马尾松 LAI 反演精度的需求,在稀释倍数未达到 0.125 倍时, LAI 的反演精度仍达 $> 90\%$ 。对于荔枝而言,荔枝 A 的 LAI 估测精度最大为 99.067%,稀释倍数为 1,荔枝 B 最大

精度在稀释 0.5 倍时,为 99.68%,荔枝 C 最大精度在稀释 0.5 倍时,为 99.737%,而最小值都在稀释

0.25 倍时,估测精度分别为 55.166%、92.808%、88.82%。

表 1 黑松与马尾松的单木叶面积指数

Table 1 Leaf area index of individual tree of *P. thunbergii* and *P. massoniana*

尺度因子 α	黑松			马尾松		
	体素值/cm	LAI	估测精度/%	体素值/cm	LAI	估测精度/%
1.0	1.33	1.388	81.89	2.39	0.733	84.35
1.1	1.46	1.615	95.28	2.63	0.787	90.56
1.2	1.59	1.711	99.06	2.87	0.839	96.55
1.3	1.72	1.808	93.33	3.11	0.879	98.85
1.4	1.86	1.990	82.60	3.35	0.948	90.91
1.5	1.99	2.057	78.64	3.59	1.046	79.63
实测	—	1.695	—	—	0.869	—

表 2 荔枝单木叶面积指数

Table 2 Leaf area index of individual tree of *L. chinensis*

尺度因子 α	荔枝 A			荔枝 B			荔枝 C		
	体素值/cm	LAI	估测精度/%	体素值/cm	LAI	相对误差/%	体素值/cm	LAI	估测精度/%
1.0	2.34	1.413	63.08	3.35	1.727	78.86	3.40	2.406	84.42
1.1	2.57	1.555	69.42	3.69	1.919	87.63	3.74	2.558	89.75
1.2	2.81	1.826	81.52	4.03	2.016	92.05	4.08	2.847	99.89
1.3	3.04	1.960	87.50	4.36	2.189	99.95	4.42	3.136	89.96
1.4	3.27	2.089	93.26	4.70	2.298	95.07	4.76	3.432	79.58
1.5	3.51	2.219	99.06	5.03	2.473	87.08	5.10	3.559	75.12
实测	—	2.240	—	—	2.190	—	—	2.850	—

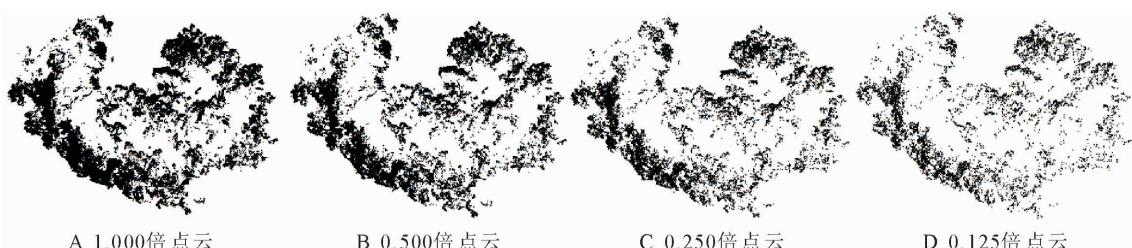


图 5 4 种不同密度点云(荔枝俯视)

Fig. 5 Point cloud of four different point densities (vertical view of *L. chinensis*)

表 3 黑松、马尾松不同点云密度 LAI 反演

Table 3 The LAI inversion of different point densities of *P. thunbergii* and *P. massoniana*

稀释倍数	黑松			马尾松		
	LAI	绝对误差	估测精度/%	LAI	绝对误差	估测精度/%
1.000	1.711	0.016	99.06	0.879	0.010 7	98.77
0.500	1.737	0.042	97.52	0.927	0.058 4	93.28
0.250	1.846	0.151	91.09	0.931	0.062 6	92.80
0.125	1.992	0.297	82.48	1.101	0.232 7	73.20
实测	1.695	—	—	0.869	—	—

表 4 荔枝不同点云密度 LAI 反演

Table 4 The LAI inversion of different point densities of *L. chinensis*

稀释倍数	荔枝 A			荔枝 B			荔枝 C		
	LAI	绝对误差	估测精度/%	LAI	绝对误差	估测精度/%	LAI	绝对误差	估测精度/%
1.000	2.219	0.021 0	99.07	2.110	0.080 0	96.35	2.847	0.080 0	99.90
0.500	1.704	0.536 0	76.09	2.197	0.007 0	99.68	2.857	0.007 0	99.74
0.250	1.236	1.004 0	55.17	2.348	0.157 5	92.81	3.209	0.157 5	88.82
0.125	1.825	0.415 0	81.48	2.200	0.010 0	99.54	2.733	0.010 0	95.72
实测	2.240	—	—	2.190	—	—	2.850	—	—

2.3 单木 LAI 的反演

选择尺度因子为 1.25 的原始点云数据进行 LAI 反演。根据式 2、式 3 计算得到 14 株样本的估测 LAI(表 5), 对比使用 LAI-2200 实测的 LAI 数据可以看出, 在最优体素值, 最优点云密度下样本的估测 LAI 比实测 LAI 大, 但部分样本的 LAI 都小于实测的 LAI, 荔枝 A、荔枝 B、荔枝 C、相思树 A、

相思树 E 的估测 LAI 比实测 LAI 分别小 0.021、0.01、0.003、0.08 与 0.04(表 6)。

对估测 LAI 与实测 LAI 进行相关分析(图 6), 决定系数 $R^2=0.989\ 3$, 斜率为 0.976 2, 表明通过三维激光扫描技术反演的 LAI 与 LAI-2200 获取的 LAI 是显著相关的, 耦合点云体素化与三维激光扫描技术反演单木 LAI 是可行的。

表 5 黑松、马尾松与荔枝单木 LAI 反演精度

Table 5 LAI inversion accuracy of individual tree of *P. thunbergii*, *P. massoniana* and *L. chinensis*

类别	黑松	马尾松	荔枝 A	荔枝 B	荔枝 C	荔枝 D	荔枝 E
估测 LAI	1.711	0.879	2.219	2.189	2.847	2.36	1.83
实测 LAI	1.695	0.869	2.240	2.190	2.850	2.34	1.72
相对精度/%	95.30	98.77	99.07	99.94	99.90	99.15	93.60

表 6 相思树单木 LAI 反演精度

Table 6 LAI inversion accuracy of individual tree of *A. confusa*

类别	相思树 A	相思树 B	相思树 C	相思树 D	相思树 E	相思树 F	相思树 G
估测 LAI	1.12	2.32	2.40	2.55	2.37	2.19	2.07
实测 LAI	1.20	2.18	2.34	2.52	2.41	2.18	2.04
相对精度/%	93.33	93.58	97.44	98.81	98.34	99.54	98.53

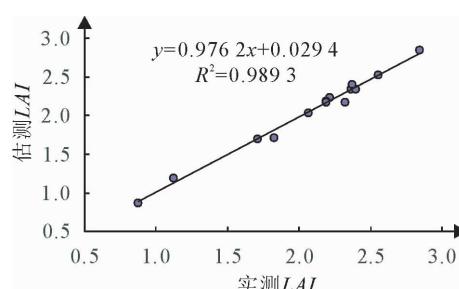


图 6 估测 LAI 与实测 LAI 相关性

Fig. 6 The correlation of LAI estimated and LAI measured

3 结论与讨论

福州市典型树种荔枝、黑松、马尾松和相思树作为研究对象, 以地基三维激光扫描仪获取的直接点云数据作为数据源, 基于点云体素化理论以及叶倾角投影关系, 实现单木 LAI 的高精度获取, 避免了使用投影算法、丛生系数、凸包算法等多次计算产生的误差。反演的 LAI 与尺度因子呈正相关的关系, 单木的叶面积指数随体素的增大而增大, 这是由于冠层点云分割在不同的体素叶片单元内, 将有叶片点云穿过的体素视为完整的叶片单元, 而实质上穿过叶片单元的点云数据远小于叶片单元, 这会造成对真实叶面积的高估, 叶片体素单元的 L 越大, 计算结果也越大, 这与苏伟^[22]等的研究结果相同。对比不同样本的反演结果随体素变化的趋势, 不同体素值估测误差呈现“波峰”的形态, 在中值部分的误差最低, 两侧误差最高, 但在荔枝 A 中存在着 LAI

反演误差随体素的增大而不断减少的情况, 与苏伟^[22]等的研究结果不同, 原因可能是荔枝 A 冠层叶片分布密集, 叶片宽大, 存在的严重的聚集效应和重叠效应, 在点云数据获取过程中丢失部分冠层顶端的点云, 使 LAI 反演结果偏小, 反演精度尚未达到最优, 在冠层点云数据完整的黑松、马尾松、荔枝 B 和荔枝 C 中不存在此情况, 同样说明样本冠层点云丢失对点云体素化反演 LAI 会产生影响。

对于冠层叶片分布稀疏, 叶片呈针状的黑松、马尾松而言, 在尺度因子分别为 1.2、1.3 时, 反演的 LAI 结果最适合, 精度达到了 99.06%、98.85%; 3 株荔枝树的 LAI 反演最优体素值分别为 3.5 cm、4.4 cm 与 4 cm, 估测精度分别为 99.06%、99.95% 与 99.89%, 荔枝 A 的 LAI 估测精度最差, 这可能由于荔枝 A 的冠层叶片茂密, 叶片间的重叠效应与聚集效应更为明显, 点云数据量大, 导致在三维激光扫描过程中, 冠层顶端存在着部分点云的丢失情况, 对荔枝 A 的 LAI 反演结果造成误差, 荔枝 B 和荔枝 C 没有出现点云丢失情况, 平均反演精度都在 90% 以上, 说明冠层点云数量对冠层 LAI 反演影响较小。

针对体素化反演 LAI 的过程中, 单木冠层点云密度是否对反演结果产生影响, 将原始点云数据, 稀释 1.000、0.500、0.250 倍与 0.125 倍进行研究, 结果表明, 不同点云密度对 LAI 的反演结果影响较小, 在黑松、马尾松中, LAI 的反演精度随着稀释倍数的增加而减少, 但在 0.250、0.500 倍与 1.000 倍

时,精度仍>90%,说明点云密度并不会对黑松、马尾松的LAI的反演产生影响^[23]。在荔枝树中,叶片宽大、具有强烈的聚集效应和重叠效应,导致点云数据丢失,使LAI反演结果的偏小,在不同密度的反演中,尤为明显,荔枝A的最小估测精度只有55.17%,但在冠层点云数据完整的荔枝B中无此情况,说明解决地基激光雷达扫描过程中点云数据的丢失情况,对LAI反演具有重要意义。

对14株反演样木进行相关性分析,决定系数 $R^2=0.989\ 3$,斜率为0.976 2,反演结果与实测LAI具有较高相关性,反演结果可以满足需求,与王洪蜀^[15]等研究结果具有良好的一致性,在最优体素值,最优点云密度下样木的估测LAI比实测LAI大,与苏伟^[22]等的研究结果一致,但部分样木的LAI都小于实测的LAI,主要考虑到阔叶树与针叶树存在的叶片形态,以及冠层聚集度的差异,地基三维激光扫描仪对于针叶树能够获取更为均匀完整,质量更优的点云数据。产生误差的主要原因是点云数据获取过程中样木冠层叶片密度以及冠层轮廓表面的不均匀性,造成的冠层顶部点云数据缺失,影响LAI反演精度。

本研究着重于对方法的探讨,在相关细节上仍然存在一些不足,提出的单木叶面积指数反演方法适用于荔枝、黑松、马尾松,但该方法在其他树种上的适用性有待进一步研究;研究采用0.5 m的分层方式^[11,20],其精度能够达到测量需求,可进一步研究分层间隔(0.1 m、0.2 m等)LAI反演精度的关系。

参考文献:

- [1] 谭一波,赵仲辉.叶面积指数的主要测定方法[J].林业调查规划,2008,33(3):45-48.
- [2] TAN Y B,ZHAO Z H. The main methods for determining leaf area index[J]. Forest Inventory & Planning,2008,33(3):45-48. (in Chinese)
- [3] 刘婷.基于PROSAIL模型和多源数据关键生育期LAI反演方法研究[D].北京:中国农业大学2015.
- [4] 王明常,牛雪峰,陈圣波,等.基于DART模型的PROBA/CHRIS数据叶面积指数反演[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,03:1033-1039.
- [5] WANG M C,NIU X F,CHEN S B,*et al*. DART model-based inversion of leaf area index from PROBA/CHRIS data[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2013,43(3):1033-1039. (in Chinese).
- [6] 焦义涛,邢艳秋,霍达,等.基于机载LiDAR点云估测林分的平均树高[J].西北林学院学报,2015,30(3):170-174.
- [7] JIAO Y T,XING Y Q,HUO D,*et al*. Study on mean canopy height estimation from airborne LiDAR point cloud data[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(3):170-174. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] HESE S,LUCHT W,SCHMULLIUS C,*et al*. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance the earth observation mission carbon-3D[J]. Remote Sensing of Environment,2005,94(1):94-104.
- [11] 李旺,牛铮,高帅,等.机载激光雷达数据分析与反演青海云杉林结构信息[J].遥感学报,2013,17(6):1612-1626.
- [12] LI W,NIU Z,GAO S,*et al*. Analyzing and retrieving structural information of *Picea crassifolia* based on airborne light detection and ranging data[J]. Journal of Remote Sensing,2013,17(6):1612-1626. (in Chinese)
- [13] 周梦维,柳钦火,刘强,等.机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演[J].农业工程学报,2011,27(4):207-213.
- [14] ZHOU M W,LIU Q H,LIU Q,*et al*. Inversion of leaf area index based on small-footprint waveform airborne LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(4):207-213. (in Chinese)
- [15] ROBERTS S D,DEAN T J,EVANS D L,*et al*. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions[J]. Forest Ecology & Management,2005,213(8):54-70.
- [16] 刘鲁霞,庞勇,李增元,等.用地基激光雷达提取单木结构参数—以白皮松为例[J].遥感学报,2014,18(2):365-377.
- [17] LIU L X,PANG Y,LI Z Y,*et al*. Retrieving structural parameters of individual tree through terrestrial laser scanning data[J]. Journal of Remote Sensing,2014,18(2):365-377. (in Chinese)
- [18] 高纪青,云挺,薛联凤.基于投影算法和活动轮廓模型的真实叶面积指数计算[J].西北林学院学报,2014,29(6):149-156.
- [19] GAO J Q,YUN T,XUE L F.Calculation of actual LAI based on projection algorithm and active contour model[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(6):149-156. (in Chinese)
- [20] 高纪青,云挺,薛联凤.基于鱼眼摄像和地面激光雷达的真实叶面积指数计算[J].南京师大学报:自然科学版,2014,37(4):137-144.
- [21] GAO J,YUN T,XUE L F. The calculation of actual LAI based on terrestrial laser scanning data and fish eye camera [J]. Journal of Nanjing Normal University,2014,37(4):137-144. (in Chinese)
- [22] HOSOI F,OMASA K. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable LiDAR imaging. [J]. Journal of Experimental Botany,2007,58(12):3463-3473.
- [23] HOSOI F,OMASA K. Voxel-based 3D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning LiDAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 44 (12): 3610-3618. (in Chinese)
- [24] 王洪蜀,李世华,郭加伟,等.地基激光雷达的玉兰林冠层叶面积密度反演[J].遥感学报,2016,20(4):570-578.

- Wang H S, Li S H, Guo J W, et al. Retrieval of the leaf area density of Magnolia woody canopy with terrestrial Laser-scanning data [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(4): 570-578. (in Chinese)
- [16] 仓山区统计局. 仓山统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 163-252.
- [17] 陈景玲, 王静, 王谦, 等. 植物冠层分析仪测定荆条孤立冠层叶面积指数和透光率的分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 373-379.
- CHEN J L, WANG J, WANG Q, et al. LAI and light transmittance measurement of isolated *Vitex* shrub using LAI-2200 PCA[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 373-379. (in Chinese)
- [18] 王洪蜀. 基于地基激光雷达数据的单木与阔叶林叶面积密度反演[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [19] LESA P, WAYNE T. Algorithm for finding all k nearest neighbors[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34: 167-172.
- [20] 吕娅, 万程辉. 三维激光扫描地形点云的分层去噪方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(5): 501-504.
- LV Y, WAN C H. A denoising method by Layering for Terrain point cloud from 3D laser scanner[J]. Journal of Geomatics Science & Technology, 2014, 31(5): 501-504. (in Chinese)
- [21] 尤号田, 邢艳秋, 王铮, 等. 点云密度对激光雷达估计森林样方平均树高的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 15(2): 173-188.
- YOU H T, XING Y Q, WANG Z, et al. Effects of LiDAR point density on tree height estimation in plots level[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 15(2): 173-188. (in Chinese)
- [22] 苏伟, 郭皓, 赵冬玲, 等. 基于地基激光雷达的玉米真实叶面积提取方法研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 345-353.
- SU W, GUO H, ZHAO D L, et al. Estimation of actual leaf area of maize based on terrestrial laser scanning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 345-353. (in Chinese)
- [23] 尤号田, 邢艳秋, 王铮, 等. 利用 LiDAR 离散点云估测针叶林叶面积指数[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 41-47.
- YOU H T, XING Y Q, WANG Z, et al. Estimation of the leaf area index of coniferous forests using LiDAR discrete point cloud[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 41-47. (in Chinese)

(上接第 164 页)

- [5] GARDES M, BRUNS T D. Community structure of ectomycorrhizal fungi in a *Pinus muricata* forest: above- and below-ground views[J]. Canadian Journal of Botany, 1996, 74(10): 1572-1583.
- [6] SMITH E, VEENMAN C, BAAR J. Molecular analysis of ectomycorrhizal basidiomycete communities in a *Pinus sylvestris* L. stand reveals long-term increased diversity after removal of litter and humus layers [J]. Fems Microbiology Ecology, 2003, 45(1): 49-57.
- [7] HORTON T R, BRUNS T D. The molecular revolution in ectomycorrhizal ecology: peeking into the black-box [J]. Molecular Ecology, 2001, 10(8): 1855-1871.
- [8] AGERER R. Characterization of ectomycorrhiza[M]//NORRIS J R, READ D A, VARMA A K. Techniques for the study of mycorrhiza. Methods Microbiol. San Diego, USA: Academic, 1991. 25-73
- [9] 宋彦君, 季志平, 吕平会, 等. 镇安板栗外生菌根真菌多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 188-194.
- SONG Y J, JI Z P, LYU P H, et al. Community structure of ectomycorrhizal fungi associated with *Castanea mollissima* in Zhen'an County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 188-194. (in Chinese)
- [10] AGERER R, DAIELSON R M, EGLI S, et al. Descriptions of ectomycorrhizae. methods in microbiology//NORRIS J R, READ D A, VARMA A K. Techniques for the study of mycorrhiza. Newyork, USA: Academic Press, 1996, 5: 23-183
- [11] AGERER R. Colour atlas of ectomycorrhizae: 1st—13th deliv-
- ery[M]. Schwäbisch Gmünd: Einhorn-Verlag, 2006.
- [12] HAUG I, PRITSCH K. Ectomycorrhizal types of spruce(*Picea abies* CL. karst.) in the blank forest. a microscopical atlas [M]. Tubingen, Germany: Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1992, 71-89.
- [13] 樊永军, 闫伟, 王黎元. 贺兰山地区青海云杉外生菌根形态类型及分子鉴定研究[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 108-113.
- FAN Y J, YAN W, WANG L Y. Study on morphological type and molecular identification of ectomycorrhizae on *Picea crassifolia* at Helan Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(6): 108-113. (in Chinese)
- [14] 杨韧, 张好强, 唐明. 陕北地区油松根际真菌资源初步调查及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 203-210.
- YANG R, ZHANG H Q, TANG M. A survey of root fungal resources of *Pinus tabulaeformis* and its relationship with soil physicochemical properties in northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 203-210. (in Chinese)
- [15] 王海燕, 张如力, 刘秀生, 等. 甘肃大型真菌新记录[J]. 西北植物学报, 2010, 30(6): 1279-1287.
- WANG H Y, ZHANG R L, LIU X S, et al. Newly recorded macrofungi in Gansu Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 30(6): 1279-1287. (in Chinese)
- [16] 刘世好, 卢立, 但新球. 高望界自然保护区冬季大型真菌资源考察初报[J]. 湖南林业科技, 2006, 33(4): 24-26.