

基于车载二维激光扫描的树冠体积在线测量

李秋洁 郑加强 周宏平 张浩 束义平 徐波

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 采用车载二维激光扫描仪获取树木单侧点云数据,坐标变换后通过设置感兴趣区域检测树木,利用垂直分布特性识别树干,得到树冠中心距离。考虑树冠连续/不连续2种情况进行树木分割,将树冠外缘距离与对应树干距离相减算出树冠厚度。将树冠体积离散化为长方体,利用树冠厚度、相邻测量点垂直方向距离、车辆速度、扫描周期等参数进行计算。采用FIFO缓冲区保存在线数据,新采集的一帧数据写入缓冲区末尾,同时从缓冲区开头读出处理好的数据帧输出,实现树冠体积的在线测量。实验结果证明,树冠连续/不连续场景下,方法均能准确检测分割树冠、识别树干,实现树冠体积的在线测量。

关键词: 树冠体积; 车载二维激光扫描; 在线测量; 树干识别; 树冠分割

中图分类号: S768 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0309-06

Online Measurement of Tree Canopy Volume Using Vehicle-borne 2-D Laser Scanning

Li Qiujie Zheng Jiaqiang Zhou Hongping Zhang Hao Shu Yiping Xu Bo

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: An online measurement method of tree canopy volume using vehicle-borne 2-D laser scanning was proposed. Firstly, the point cloud data of trees was obtained by using a vehicle-borne 2-D laser scanner. After coordinate transformation, trees within the region of interest were detected. Then trunks were recognized by using their vertical distribution characteristic and trunk distances were obtained. In the case of canopy continuity, tree segmentation was performed by finding minimum data frame between trunks. Crown thicknesses were computed by subtracting the crown outer edge distances from the corresponding trunk distance. Finally, tree canopy was discretized into small boxes and its volume was computed by using crown thickness, distance between adjacent measuring points in the vertical direction, vehicle speed and scanning circle. To meet the demand for online measurement, data was saved in FIFO buffer which included all information required for the calculation of tree canopy volume. New data frame was written to the end of the buffer and the processed data frame was read from the beginning of the buffer. The experimental results showed that in the continuous and discontinuous canopy scenarios, trees and trunks were detected effectively and tree canopy volume was measured online accurately. In the experiment, the average processing time per frame was 2.0 ms and the maximum processing time was 15.6 ms, which was less than laser scanning period (25 ms) and met the needs of real-time processing.

Key words: tree canopy volume; vehicle-borne 2-D laser scanning; online measurement; trunk recognition; tree canopy segment

引言

树冠是树木进行光合作用、呼吸、蒸发等生理过

程的场所,树冠体积的有效测定为森林资源调查、森林生态环境效益评价、林业精准管理提供有用信息,对现代林业发展具有重要意义^[1]。

收稿日期: 2016-09-08 修回日期: 2016-09-30

基金项目: 林业局948项目(2015-4-56)、江苏省人社厅博士后科研计划项目(KY201503551)和江苏省产学研联合创新资金——前瞻性联合研究项目(BY2014006-02)

作者简介: 李秋洁(1983—),女,讲师,主要从事林木信息提取研究,E-mail: liqiujie_1@163.com

激光扫描技术测量精度高、测量距离远,扫描范围大,为树冠体积测量提供了有效手段。目前,基于地面激光扫描的树冠体积测量方法主要有2种:

①固定激光扫描^[2-5]。设立多个地面三维激光扫描站点获取单木多角度点云数据,筛选出表面点云后将树冠模拟为圆锥、圆台等规则几何体或不规则台体的叠加,用配准融合后的点云数据计算树冠体积。

②车载激光扫描^[6-12]。采用车载二维/三维激光扫描技术获取多棵树木点云数据,计算树冠体积。吴宾等^[6-7]采用车载三维激光扫描获取树木单侧信息,将空间离散化为体素表示,自下而上进行树木分割后统计体素总体积,将其作为树冠体积。POLO等^[8]采用车载二维激光扫描仪获取果树株行两侧点云数据,数据配准后计算连续树冠体积。现有基于地面激光扫描的树冠体积测量方法大多离线处理全部点云数据,数据量大,计算耗时。车载二维激光扫描可实时获取道路两侧树木信息,目前已成功用于树冠体积在线测量,为精准施药提供喷雾处方图^[13-17]。然而,其采用的测量方法较为简单,冠层中心位置为固定值或用冠层顶部距离近似^[18],前者仅适用于树木直线栽培情况,后者准确性较差。此外,没有针对树冠连续/不连续情况区分处理。上述缺陷限制了该技术的推广应用。为此,本文提出一种基于车载二维激光扫描仪的连续/不连续树冠体积在线测量方法,对采集得到的数据帧实时检测分割树木、识别树干、获取冠层中心位置,在线测量树冠体积。

1 树冠体积测量方法

树冠体积测量原理如图1所示。 x 轴为载运车辆移动方向, y 轴为测量方向, z 轴垂直地面向上。每隔周期 Δt ,二维激光扫描仪完成一次扫描,获取一帧数据,扫描平面与 yz 平面平行。利用帧内相邻测量点 P_i, P_{i+1} ,将单侧树冠体积离散化为小长方体计算,即

$$V = D_d D_s v \Delta t \quad (1)$$

其中 $D_d = D_c - D_o$ 。
式中 V ——单侧树冠帧体积

D_o —— P_i 与 P_{i+1} y 方向平均树冠外缘距离

D_c ——树冠中心 y 方向距离

D_s —— P_i 与 P_{i+1} z 方向距离

v ——车辆速度

D_d —— P_i 与 P_{i+1} 的平均单侧冠层厚度

将单帧体积累加得到树冠单侧总体积。另一侧树冠体积可用同样方法测量或用已测体积近似。

具体测量流程如图2所示。首先二维激光扫描

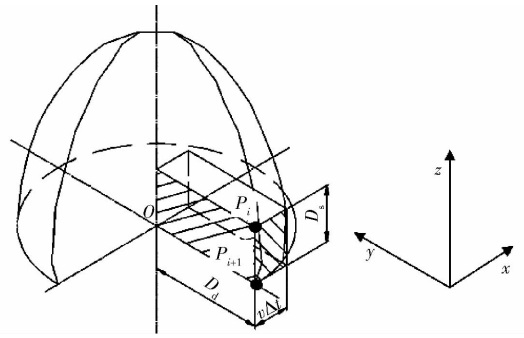


图1 树冠体积测量原理

Fig. 1 Principle of tree canopy volume measurement

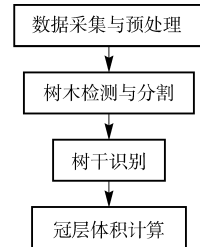


图2 树冠体积测量流程

Fig. 2 Flow chart of tree canopy volume online measurement

仪采集一帧数据,坐标变换后进行树木检测与分割、树干识别,利用树干距离计算单木冠层厚度,最后计算树冠体积。

1.1 数据采集与预处理

采用二维激光扫描仪获取 yz 平面数据帧 $\{(\rho_i, \theta_i)\}_{i=1}^N$, N 为扫描点数, ρ_i, θ_i 分别为传感器到第 i 个扫描点的测量距离和扫描角度,如图3所示。

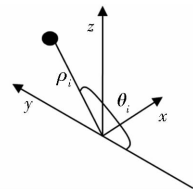


图3 激光数据坐标系

Fig. 3 Coordinate system of laser data

将各点数据由极坐标系变换到直角坐标系 yz 下

$$\begin{cases} y_i = -\rho_i \cos\theta_i \\ z_i = \rho_i \sin\theta_i \end{cases} \quad (2)$$

1.2 树木检测与分割

判断数据帧是否存在感兴趣区域内的树木,感兴趣区域即预先设置的树木在 y, z 方向上的范围 $[y_{\min}, y_{\max}]$ 和 $[z_{\min}, z_{\max}]$ 。 y_{\min} 根据树冠外缘到传感器的最小距离设定, y_{\max} 根据树干到传感器的最大距离设定, z_{\min} 根据树干底部到传感器的垂直距离设定, z_{\max} 根据树冠顶部到传感器的垂直距离设定。

树木检测结果采用变量`tree_flag`记录。若感兴趣区域内有测量点,认为当前帧存在树木,令`tree_flag = 1`;否则,认为不存在树木,令`tree_flag = 0`。

标记`tree_flag`上升沿和下降沿,作为树木开始

位置和结束位置。对于树冠连续情况,无法通过 tree_flag 变化分割树木,此时将 2 棵树干间树冠扫描点最少处作为树冠分割点,如图 4 所示。

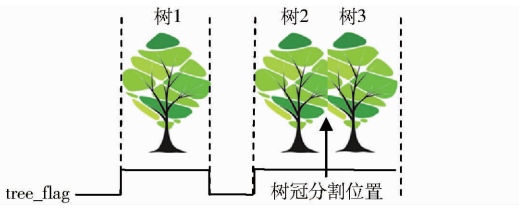


图 4 树木检测与分割原理

Fig. 4 Principle of tree detection and segmentation

1.3 树干识别

现有技术采用圆柱拟合树干或圆拟合树干截面识别树干^[19-20],本文利用树干垂直连续分布特性,识别树干并获取树干距离。需设置的参数有:树干感兴趣区域 $[y_{stem_min}, y_{stem_max}]$ 和 $[z_{stem_min}, z_{stem_max}]$ 、树干线段 z 方向最小长度 l 及 y 方向连续阈值 T 。具体方法如下:

(1) 树干线段检测。对当前帧数据进行长度不小于 l 、连续阈值为 T 的线段检测。线段检测结果保存在 line_flag 中,初始化为 0。判断树干感兴趣区域内扫描点与上一扫描点的 y 轴坐标差值是否在连续阈值内,即

$$|y_i - y_{i-1}| \leq T \quad (3)$$

若不等式成立,认为该扫描点与上一扫描点连续,继续下一个扫描点的判断;否则,认为线段结束,对其 z 方向长度进行阈值判断,若

$$|z_{start} - z_{end}| \geq l \quad (4)$$

令 line_flag = 1; 否则,将下一扫描点作为起始点,继续线段查找。

(2) 树干起始、结束位置检测。将 line_flag 上升沿和下降沿作为树干起始位置和结束位置,记录线段 y 轴坐标均值 D_{c_start} 和 D_{c_end} ,如图 5 所示。计算树干距离

$$D_c = (D_{c_start} + D_{c_end}) / 2 \quad (5)$$

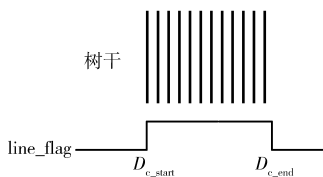


图 5 树干检测原理

Fig. 5 Principle of trunk detection

树干检测结果采用变量 trunk_flag 记录,初始化为 0。若检测到树干,令 trunk_flag = 1,并记录树干位置;否则,令 trunk_flag = 0。

1.4 树冠体积计算

将树冠外缘距离与树干距离进行比较,得到冠层单侧厚度

$$D_d(i) = \max(D_c - y_i, 0) \quad (6)$$

计算树冠在 yz 平面上的单侧截面积

$$S_{yz}(j) = \sum_i \frac{1}{2} (D_d(i) + D_d(i+1)) D_s(i) \quad (7)$$

式中 j ——帧编号

$D_s(i)$ —— z 方向 2 次测量点之间的距离

则树冠帧体积为

$$V(j) = 2S_{yz}(j) v \Delta t \quad (8)$$

对树冠开始位置至结束位置的帧体积求和,得到树冠总体积。

2 树冠体积在线测量方法

为实现树冠体积在线测量,需建立先进先出(First in first out, FIFO)数据缓冲区,保存最近采集的 n 帧点云数据,新到帧写入缓冲区末尾,同时从缓冲区开头读取一帧数据计算树冠体积。系统延时为 $n\Delta t$,设置合适的 n 保证 $nv\Delta t$ 包含树冠体积计算所需全部信息。

已知冠层单侧厚度,便可计算树冠体积。为兼容树冠连续/不连续 2 种情况,冠层厚度计算策略如下:

(1) 检测到树干,此时分 2 种情况处理:若冠层不连续,则用当前树干距离计算树冠开始位置到当前位置的冠层厚度;若冠层连续,分别用前棵树干和当前树干距离计算树冠分割点前后的冠层厚度。

(2) 检测到树木结束位置。用当前树干距离计算树干位置到当前位置的冠层厚度。

树冠不连续时,可通过树木检测标记 tree_flag 判断树冠结束时刻。树冠连续时,通过识别 2 棵树干间树木扫描点最少帧作为树冠分割点。

具体实现时,用 5 个位置变量记录关键帧序号,如表 1 所示。其中,tree_start_pos 和 tree_end_pos 保存树木开始位置和结束位置,可通过检测 tree_flag 上升沿和下降沿获得;tree_segment_pos 保存树冠连续时的分割位置,trunk_pos 和 trunk_pos_previous 分别保存当前树干位置和上棵树干位置。所有位置变量初值为 n ,新一帧到来时,值减 1。可通过比较树木开始位置和上棵树干位置前后顺序识别树冠连续情况:tree_start_pos 小于 trunk_pos_previous 时,树冠连续;否则,树冠不连续。

表 1 位置变量

Tab. 1 Position variables

变量	含义
tree_start_pos	树木开始位置
tree_end_pos	树木结束位置
tree_segment_pos	树冠分割位置
trunk_pos	当前树干位置
trunk_pos_previous	上棵树干位置

对图4所示场景的在线测量流程如图6所示。 $tree_start_pos$ 保存树1开始位置, T_1 时刻检测到树1树干,得到树1树干距离,保存其位置至 $trunk_pos$,计算 $tree_start_pos$ 到当前位置的树1树冠厚度和体积; T_2 时刻检测到树1结束,记录 $tree_end_pos$,计算 $trunk_pos$ 至当前位置的树冠厚度和体积,树1体积计算结束; T_3 时刻检测到树2树干,得到树2树干距离,令 $trunk_pos_previous$ 为树1树干距离,同时保存当前位置至 $trunk_pos$,此时 $tree_start_pos$ 保存树2开始位置,计算其到当前位置的树2树冠厚度和体积; T_4 时刻检测到树3树干,令 $trunk_pos_previous$ 为树2树干位置,保存当前位置至 $trunk_pos$ 。此时 $tree_start_pos$ 记录树2开始位置,其值小于 $trunk_pos_previous$ 保存的树2树干位置,代表树2树3冠层连续。 $trunk_pos$ 至 $tree_segment_pos$ 部分树冠厚度用树2树干计算, $tree_segment_pos$ 至当前位置用树3树干计算; T_5 时刻检测到树3结束,记录 $tree_end_pos$,计算 $trunk_pos$ 至当前位置的树冠厚度和体积,树3体积计算结束。

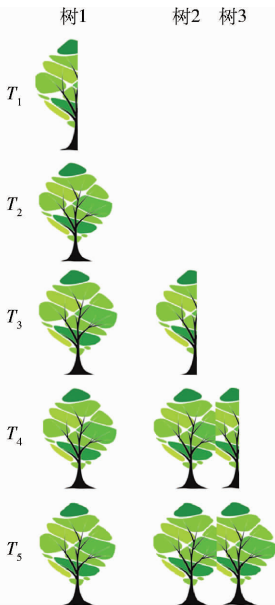


图6 树木体积在线测量原理

Fig. 6 Principle of on-line measurement of tree canopy volume

3 实验

实验采用日本 Hokuyo 公司生产的二维激光扫描仪 UTM - 30LX,扫描范围 270° 。角度分辨率 0.25° ,扫描周期 25 ms。载运车辆速度 3.2 km/h。

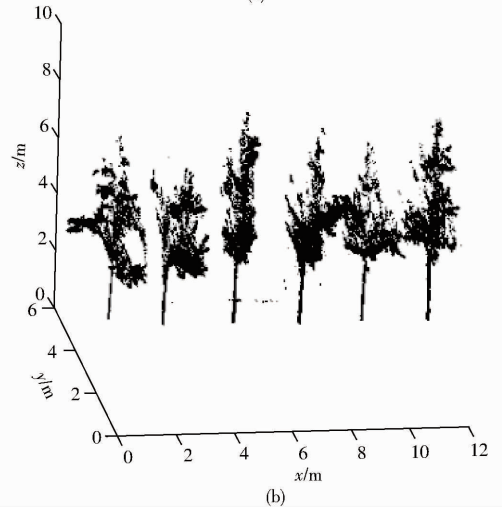
实验程序采用 Matlab 7.0 开发,计算机配置如下: i5 - 4590 处理器,主频 3.30 GHz,内存 8 GB。平均每帧处理时间为 2.0 ms,最大处理时间为 15.6 ms,小于激光扫描仪每帧扫描周期 25 ms,满足实时处理需求。

3.1 树冠不连续场景

测量场景如图7a所示,包含6棵树冠不连续、树干距离不同的银杏树。设置树木感兴趣区域参数 $y_{min} = 0\text{ m}$, $y_{max} = 5.5\text{ m}$, $z_{min} = 0.5\text{ m}$, $z_{max} = 9\text{ m}$,则感兴趣区域内车载二维激光扫描仪获取点云数据如图7b所示。



(a)



(b)

图7 不连续树冠场景

Fig. 7 Scene of discontinuous tree canopy

将点云投影到 xz 平面显示树木检测结果,如图8所示,树木所在数据帧均被检出。经由树干识别,得到6棵树干与传感器的距离分别为 4.71、4.45、4.44、4.33、4.42、4.37 m。

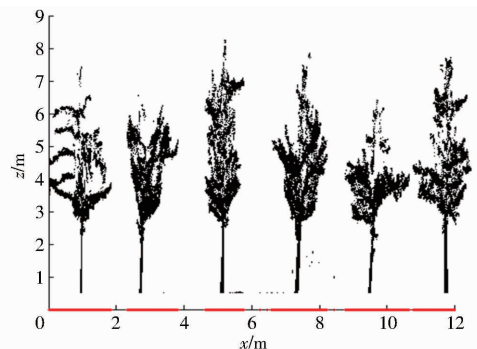


图8 树木检测结果

Fig. 8 Result of tree detection

将树冠外缘距离与树干距离进行比较,得到冠层单侧厚度, yz 平面6棵树的叠加投影如图9所示。

图10给出了不连续树冠体积测量的离散化表示。小长方体 x, z 方向分辨率分别为 0.3 m、0.5 m,小长方体 y 方向长度即树冠体积,其中,体积为0的小长方体未绘制。

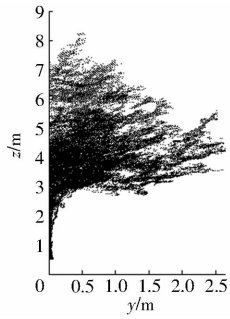


图 9 冠层厚度

Fig. 9 Canopy thickness

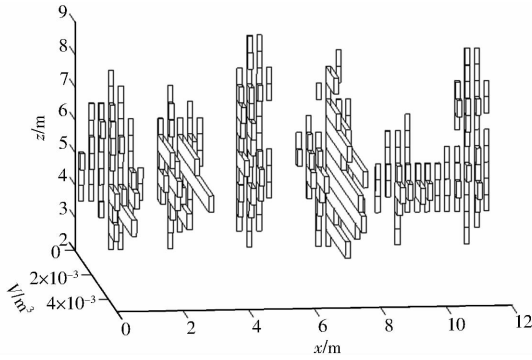


图 10 不连续树冠体积测量结果

Fig. 10 Result of discontinuous tree canopy volume measurement

3.2 树冠连续场景

测量场景如图 11a 所示,包含 5 棵树冠连续、树干距离不同的银杏树。设置树木感兴趣区域参数 $y_{\min} = 4 \text{ m}$, $y_{\max} = 10.5 \text{ m}$, $z_{\min} = 0.5 \text{ m}$, $z_{\max} = 12 \text{ m}$, 感兴趣区域内车载二维激光扫描仪获取点云数据如图 11b 所示。经由树干识别,得到 5 棵树干与传感器的距离分别为 8.88、8.80、8.79、8.74、8.75 m。

树冠连续时,通过识别 2 棵树干间树木扫描点最少帧作为树冠分割点, xz 平面的树冠分割结果如图 12 所示。

最终得到的树冠体积离散化显示如图 13 所示。小长方体 x 、 z 方向分辨率分别为 0.3 m、1.0 m,小长方体 y 方向长度即树冠体积,其中,体积为 0 的小长方体未绘制。

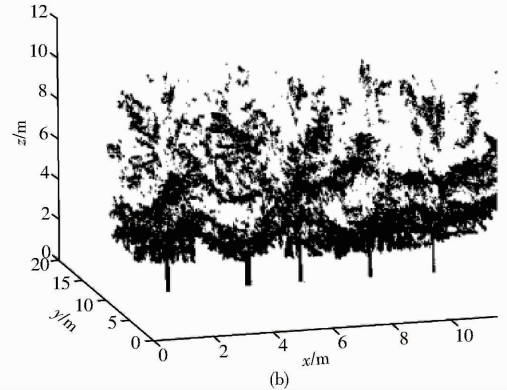
4 结论

(1) 采用车载二维激光扫描技术获取树木单侧点云数据,坐标变换后通过设置感兴趣区域检测树木,利用垂直分布特性识别树干,得到树冠中心距离,从而准确测量树冠体积。

(2) 以 FIFO 缓冲区保存采集数据,以帧为处理单位检测分割树木、识别树干,针对树冠连续/不连续情况分别设计冠层厚度计算策略,实时在线输出



(a)



(b)

图 11 连续树冠场景

Fig. 11 Scene of continuous tree canopy

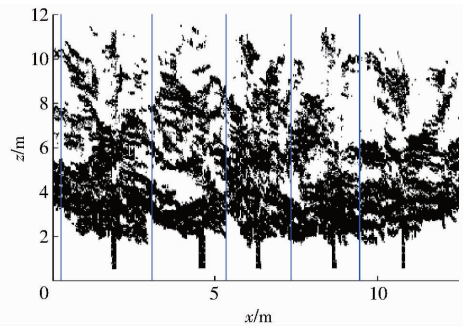


图 12 树冠分割结果

Fig. 12 Result of tree canopy segment

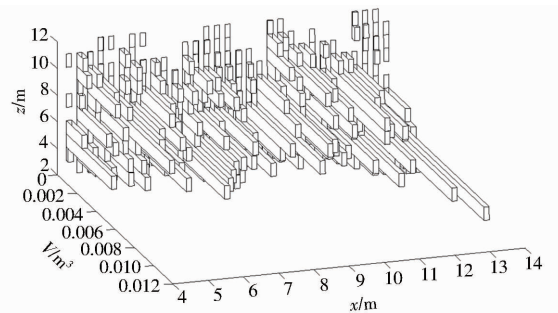


图 13 连续树冠体积测量结果

Fig. 13 Result of continuous tree canopy volume measurement

树冠体积测量结果。

(3) 实验结果表明,提出的方法能同时处理树冠连续/不连续情况下的树木检测与分割,准确识别树干计算冠层厚度,在线测量树冠体积。

参 考 文 献

- 1 ROSELL J R, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 124 – 141.
- 2 谢鸿宇, 赵耀龙, 杨木壮, 等. 基于地面 Lidar 的树冠体积和表面积测量方法研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(4): 1 – 6, 13.
XIE Hongyu, ZHAO Yaolong, YANG Muzhuang, et al. Measurement and calculation methods of volume and surface area of tree crown based on terrestrial 3D laser scanning system [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(4): 1 – 6, 13. (in Chinese)
- 3 冯仲科, 罗旭, 马钦彦, 等. 基于三维激光扫描成像系统的树冠生物量研究[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(增刊2): 52 – 56.
FENG Zhongke, LUO Xu, MA Qinyan, et al. An estimation of tree canopy biomass based on 3D laser scanning imaging system [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(Supp.2): 52 – 56. (in Chinese)
- 4 王佳, 杨慧乔, 冯仲科. 基于三维激光扫描的树木三维绿量测定[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 229 – 233.
WANG Jia, YANG Huiqiao, FENG Zhongke. Tridimensional green biomass measurement for trees using 3-D laser scanning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 229 – 233. (in Chinese)
- 5 樊仲谋, 冯仲科, 郑君, 等. 基于立方体格网法的树冠体积计算与预估模型建立[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 320 – 327.
FAN Zhongmou, FENG Zhongke, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation and prediction model establishment using cubic lattice method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 320 – 327. (in Chinese)
- 6 吴宾, 余柏漠, 岳文辉, 等. 一种基于车载激光扫描点云数据的单株行道树信息提取方法[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2013(2): 38 – 49.
WU Bin, YU Bailang, YUE Wenhui, et al. Method for identifying individual street trees from the cloud data of the vehicle-borne laser scanning points [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2013(2): 38 – 49. (in Chinese)
- 7 虞思逸, 吴宾, 谈文琦, 等. 利用车载激光扫描的城市森林三维绿量估算[J]. *测绘科学*, 2015, 40(9): 82 – 87.
YU Siyi, WU Bin, TAN Wenqi, et al. Estimation of 3D urban forest green volume using VLS data and high-resolution remote sensing images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(9): 82 – 87. (in Chinese)
- 8 POLO J R R, SANZ R, LLORENS J, et al. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: a comparison with conventional destructive measurements [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(2): 128 – 134.
- 9 ROSELL J R, LLORENS J, SANZ R, et al. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1505 – 1515.
- 10 SANZ R, ROSELL J R, LLORENS J, et al. Relationship between tree row LIDAR-volume and leaf area density for fruit orchards and vineyards obtained with a LIDAR 3D dynamic measurement system [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171 – 172(3): 153 – 162.
- 11 LLORENS J, GIL E, LLOP J, et al. Georeferenced LiDAR 3D vine plantation map generation [J]. *Sensors*, 2011, 11(6): 6237 – 6256.
- 12 俞龙, 黄健, 赵祚喜, 等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 224 – 228.
YU Long, HUANG Jian, ZHAO Zuoxi, et al. Laser measurement and experiment of hilly fruit tree canopy volume [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 224 – 228. (in Chinese)
- 13 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 59 – 72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 59 – 72. (in Chinese)
- 14 李瀚哲, 翟长远, 张波, 等. 果园喷雾靶标探测技术现状分析[J]. *农机化研究*, 2016(2): 1 – 5.
LI Hanzhe, ZHAI Changyuan, ZHANG Bo, et al. Status analysis of orchard spray target detection technology [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016(2): 1 – 5. (in Chinese)
- 15 LEEA W S, ALCHANATISB V, YANGC C, et al. Sensing technologies for precision specialty crop production [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74: 2 – 33.
- 16 LIU H, ZHU H, SHEN Y, et al. Development of digital flow control sytrunk for multi-channel variable-rate sprayers [J]. *Transactions of the ASABE*, 2014, 57(1): 273 – 281.
- 17 CHEN Y, OZKAN H E, ZHU H, et al. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer [J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(6): 1263 – 1272.
- 18 CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(3): 773 – 781.
- 19 MENDEZ V, ROSELL J R, SANZ R, et al. Deciduous tree reconstruction algorithm based on cylinder fitting from mobile terrestrial laser scanned point clouds [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 124: 78 – 88.
- 20 黄洪宇, 陈崇成, 邹杰, 等. 基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模综述[J]. *林业科学*, 2013, 49(4): 123 – 130.
HUANG Hongyu, CHEN Chongcheng, ZOU Jie, et al. Tree geometrical 3D modeling from terrestrial laser scanned point clouds: a review [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(4): 123 – 130. (in Chinese)