doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.038

丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验*

俞　龙　黄　健　赵祚喜　张　霖　孙道宗

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 树冠体积是农药变量喷施、肥料精准施用和果产预估等果园精细管理的重要因素。为了克服丘陵山地果园地面不平整和果树种植不规整等因素对果树冠层体积激光测量方法的影响,搭建了果树冠层体积激光测量平台,基于 AHRS 和 DGPS 实现定位定姿,通过空间坐标转换直接求取果树冠层激光扫描点在大地坐标系下的三维数据;并采用切片技术提取冠层点云的面、线信息,以累加方式计算果树冠层体积。测得的大地坐标系下的丘陵山地荔枝树冠层激光点云能较真实地反映果树冠层的形状特征;以 3 棵人工修剪的圆柱形绿篱树为靶标,冠层体积激光测量与人工测量相对误差约为 5%。试验结果表明,依据果树冠层点云测量冠层体积具有较高的准确性和可靠性。

关键词: 丘陵山地　果树冠层　激光传感器　体积测量　姿态航向参考系统

中图分类号: S232.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2013)08-0224-05

Laser Measurement and Experiment of Hilly Fruit Tree Canopy Volume

Yu Long　Huang Jian　Zhao Zuoxi　Zhang Lin　Sun Daozong

(*Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Fruit tree canopy volume is an important factor for precision management in fruit orchards such as pesticide variable spraying, precision fertilizing and yield estimation. In order to overcome the problems of uneven hilly environment and irregular planting on fruit tree canopy volume, a platform for measuring fruit tree canopy volume by laser was set up. Based on AHRS and DGPS sensors, 3-D data of laser scanned point of fruit tree canopy in geodetic coordinate system was deduced through spatial coordinates transforming. The area and line information of point cloud of fruit tree canopy were extracted by using slicing technology, and the canopy volume was calculated with an accumulation method. The test showed that the shape of fruit tree canopy could be represented by the canopy point cloud of litchi fruit tree in the geodetic coordinate system. Taking three artificial pruning cylindrical hedgerow trees as experimental object, the relative measuring errors between artificial measurement and laser measurement was about 5%.

Key words: Hilly　Fruit tree canopy　Laser sensor　Volume measurement　AHRS

引言

果树冠层体积是农药变量喷施、肥料精准施用和果产预估等果园精细作业与管理的重要因素[1~8]。我国南方荔枝、柑橘等果园地貌多为不平整的丘陵山地,果树种植行列排列不规整,果树冠层体积测量作业环境复杂,作业中必然会有拖拉机车体姿态和航向的变化[9~10]。为了克服车体姿态变化对丘陵山地果园果树冠层体积测量的影响,俞龙等[11~12]搭建了基于姿态航向系统的果树冠层体积

收稿日期: 2012-06-26　修回日期: 2012-09-11

*国家自然科学基金资助项目(1175081)、农业部"948"重点资助项目(2011-G32)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(0114404110003、20124404120005)

作者简介: 俞龙,副教授,主要从事嵌入式系统应用技术研究,E-mail: yulong@scau.edu.cn

通讯作者: 赵祚喜,教授,博士生导师,主要从事机械与车辆自动控制系统研究,E-mail: zhao_zuoxi@hotmail.com

超声波传感器阵列测量平台，通过重构果树冠层轮廓测量冠层体积。但受超声波传感器探测范围和回波信号起伏的影响，冠层测量点被极大地展宽，引起了一定的体积测量误差[8]。与超声波传感器波束相比，激光传感器的激光束细小，测量精度高，可以获得更准确和详细的冠层信息。

本文在传统的果树冠层体积激光测量方法基础上，搭建适合测量丘陵山地果树冠层体积的试验平台，推算并获取大地坐标系下的丘陵山地果树冠层激光扫描点云数据，并依据果树冠层点云数据准确测量果树冠层体积。

1　材料与方法

1.1　测量平台

在一台小型拖拉机上构建由激光传感器、姿态航向参考系统（Attitude heading reference system，AHRS）、RTK－DGPS 接收机和微机控制与存储单元等构成的基于 CAN 总线的果树冠层位置测量系统。在拖拉机尾部垂直焊接一方型铝材桅杆，用以固定传感器和各器件，如图 1 所示。果树冠层的激光扫描数据、车体姿态角和车体的三维空间位置信息通过 CAN 总线传输到微机控制与存储单元，并按采集时间顺序组合成数据帧，以 FAT32 文件格式存储于海量存储器中。

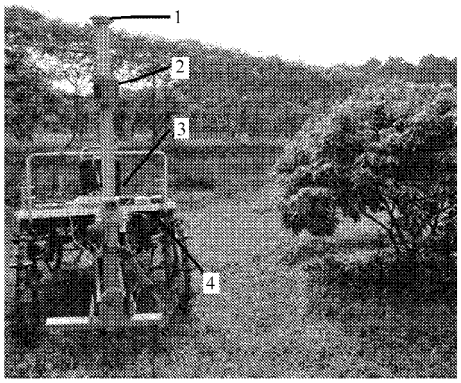

图 1　系统安装实物图

Fig. 1　Picture of system

1. GPS 天线　2. 二维激光传感器　3. 姿态航向参考系统　4. GPS 接收机

激光传感器采用 SICK 公司的 LMS200 型二维激光扫描器[13]，最大扫描角度为 180°，步进角度为 1°，在设定最大测量距离为 8 m 的情况下测距精度为 5 mm。为了能够对果树靶标垂直扫描，传感器翻转 90° 安装于桅杆上，距离地面高度 1.8 m。Crossbow 公司的 AHRS500GA－227 型[14]姿态航向参考系统安装在桅杆的中部，测量拖拉机车体的航向角、横滚角和俯仰角，航向角精度 ±2°，横滚角和俯仰角精度 ±2.5°。Trimble 公司的 RTK－DGPS 接收机[15]天线安装在桅杆的顶部，距离地面高度 2.4 m，对拖拉机车体进行空间定位。RTK－DGPS 输出频率高达 100 Hz，动态测量水平定位精度为 ±5 mm，垂直定位精度可达 ±10 mm。

1.2　冠层激光探测点大地坐标系下位置的测定

采用三步坐标转换推导激光扫描器探测点在大地坐标系下的数据，车辆姿态测量与空间坐标转换在机器人自动导航领域的使用较为普遍[16~17]。坐标转换过程中使用了大地坐标系 $O_1x_1y_1z_1$、车体坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 和传感器坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 3 个空间直角坐标系[11~12,18]，如图 2 所示。传感器坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 原点 O_3 在传感器中心，z_3 轴为激光束 180° 扫描位置，即垂直车体向下，y_3 轴为激光束 90° 扫描位置，即指向车体的右边，x_3 轴按照右手定则确定，指向车体前进方向。设 Q 点为激光扫描器在果树冠层轮廓上的扫描点，它在 3 个坐标系下的位置分别表示为 $\boldsymbol{Q}^{(1)}=[x_{Q1}\quad y_{Q1}\quad z_{Q1}]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{Q}^{(2)}=[x_{Q2}\quad y_{Q2}\quad z_{Q2}]^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{Q}^{(3)}=[x_{Q3}\quad y_{Q3}\quad z_{Q3}]^{\mathrm{T}}$，坐标系及坐标点符号标记参照文献[18]。

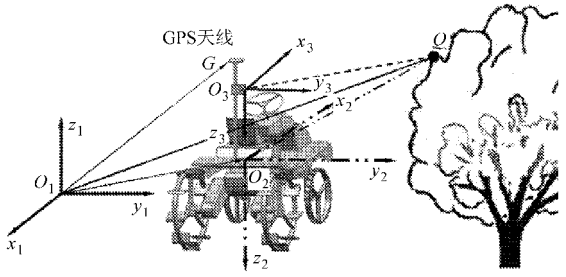

图 2　坐标系定义示意图

Fig. 2　Definition of coordinate systems

第 1 步，根据激光扫描器安装朝向，实现激光扫描器极坐标数据到传感器坐标系下的转换。激光扫描器输出的原始数据是激光依次扫描的角度 θ 和相应测量距离 d，对应的极坐标参数为 $[d,\theta]$。根据传感器坐标系定义，Q 点在传感器坐标系下的坐标位置 $\boldsymbol{Q}^{(3)}$ 为

$$\begin{bmatrix} x_{Q3} \\ y_{Q3} \\ z_{Q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d\sin\theta \\ -d\cos\theta \end{bmatrix} \tag{1}$$

第 2 步，根据激光扫描器安装方位，求出激光扫描器探测点在车体坐标系的坐标位置。Q 点在车体坐标系里的坐标位置 $\boldsymbol{Q}^{(2)}$ 为

$$\boldsymbol{Q}^{(2)}=\boldsymbol{O}_3^{(2)}+\boldsymbol{R}_3^{(2)}\boldsymbol{Q}^{(3)} \tag{2}$$

式中　$\boldsymbol{O}_3^{(2)}$——传感器坐标系原点在车体坐标系内的坐标

$\boldsymbol{R}_3^{(2)}$——激光传感器坐标系到车体坐标系转换的旋转矩阵

激光扫描器与姿态航向参考系统安装在同一桅杆上,并且激光传感器坐标系三轴方向与车体坐标系三轴方向定义一致,故坐标旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_3^{(2)}$ 为 3×3 单位矩阵。

第 3 步,根据 DGPS 天线和姿态航向参考系统在车体上的安装位置和方位,求出激光扫描器探测点在大地坐标系的坐标位置。Q 点在大地坐标系的坐标 $\boldsymbol{Q}^{(1)}$ 计算式为

$$\boldsymbol{Q}^{(1)} = \boldsymbol{G}^{(1)} + \boldsymbol{R}_2^{(1)}(\boldsymbol{Q}^{(2)} - \boldsymbol{G}^{(2)}) \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{R}_2^{(1)}$——车体坐标系到大地坐标系转换的旋转矩阵

$\boldsymbol{G}^{(1)}$——DGPS 天线在大地坐标系中的坐标

$\boldsymbol{G}^{(2)}$——DGPS 天线在车体坐标系中的坐标

由式(2)、(3),得到

$$\boldsymbol{Q}^{(1)} = \boldsymbol{G}^{(1)} + \boldsymbol{R}_2^{(1)}(\boldsymbol{R}_3^{(2)}\boldsymbol{Q}^{(3)} + \boldsymbol{O}_3^{(2)} - \boldsymbol{G}^{(2)}) \tag{4}$$

也即

$$\begin{bmatrix} x_{Q1} \\ y_{Q1} \\ z_{Q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{G1} \\ y_{G1} \\ z_{G1} \end{bmatrix} + \boldsymbol{R}_2^{(1)} \left(\boldsymbol{R}_3^{(2)} \begin{bmatrix} 0 \\ d\sin\theta \\ -d\cos\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{O2} \\ y_{O2} \\ z_{O2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{G2} \\ y_{G2} \\ z_{G2} \end{bmatrix} \right) \tag{5}$$

式(4)、(5)中,θ、d 为激光扫描器的数据所得,$\boldsymbol{O}_3^{(2)}$、$\boldsymbol{G}^{(2)}$ 由车体几何关系测量可得,$\boldsymbol{G}^{(1)}$ 由 GPS 数据所得。

1.3 基于激光点云数据的冠层体积测量

果树树冠没有一个稳定的树体外形,激光束可能通过这些空隙穿透树冠的树叶或被树枝反射,树冠的点云数据既包括了树冠的最外层能描述树冠空间的表面点数据,同时也包含了树冠内部的很多点数据。Jiang 等[6]提出一种“peak-link”算法删除每一激光垂直扫描断面的树冠内部点云数据,研究中假设各扫描截面点云是有序排列的。在果园果树冠层点云数据获取时,随着车辆行进,激光传感器对果树冠层点进行扫描,由于车辆在行驶中姿态变化,体现在点云数据中就是按时间顺序得到的部分点云在空间上是散乱分布的[19]。熊妮娜等[20~21]将树冠近似为多个圆台体,人工测出树冠横截面 8 个方向冠幅的平均值作为一个圆台体横截面的平均直径。

为了自动获取果树冠层点云数据面信息与线信息,本文采用切片方法将原始的无序数据点集转换为具有层列结构的有序组织形式[22~23]。在不同高度上等间距地建立切片面,并将切片面之间的点云坐标数据投影到切片面上。求取每一切片平面上点云的外包络,计算每层的投影面积,再乘以间距并累加得到果树冠层体积。

为了提高点云切片的质量,须选取合理的切片厚度。本文采用一种基于点云的估测密度来定义厚度的方法[24]。该方法首先对点云密度进行估测,并将这一预测值作为初始切片面间距,再将其乘以一定的系数,作为实际的切片面间距。

1.4 试验方法

果树冠层激光点云测量试验时,选用丘陵山地荔枝树作为靶标,如图 3 所示。荔枝园地位于华南农业大学果园实习基地(2 309°6′N,11 321°2′E)。荔枝园地为斜坡地,坡度约为 15°。荔枝树行间距 6 m,株间距 5 m,各荔枝树冠层之间无交叉。试验时,拖拉机绕行荔枝树一圈,拖拉机行走速度保持在 0.5 m/s 左右,系统采样速率为 2 帧/s。为了便于与果树拍摄图片对比分析,在果树一边侧垂直竖立一个直径为 5 cm 的圆形 PVC 管作为测杆标记[25]。

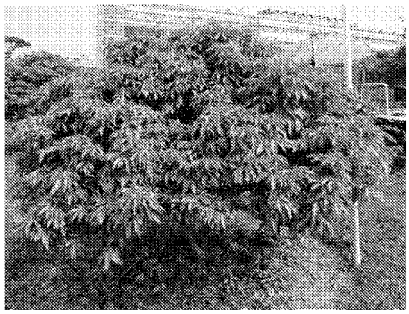

图 3 荔枝树靶标

Fig. 3 Litchi fruit tree target

冠层体积测量试验时,为减少果树冠层体积人工测量误差,选用人工修剪的外形轮廓规整的 3 棵圆柱形绿篱树为靶标,如图 4 所示。3 棵绿篱树并行排列,高约 2 m,宽度约为 1.2 m。人工测量时,将树冠裙部到树冠顶部近似等分成 5 份,人工测量不同高度上行向和株向果树冠层的直径。将每一果树横切面近似为椭圆,按照圆台体体积公式求每一等份的体积,并通过累加获得果树冠层体积[7~9]。激光点云方法测量时,拖拉机沿着 3 棵绿篱树绕行一周,行进速度保持在 0.5 m/s 左右。

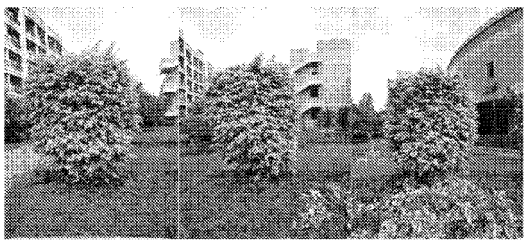

图 4 3 颗绿篱树靶标

Fig. 4 Three hedgerow tree targets

2 试验结果与分析

2.1 荔枝树冠层激光点云测量试验

由于果园地面坡度约为 15°,故测量时拖拉机车体的横滚角、俯仰角变化最大可达 30°的偏差,试

验时拖拉机采用绕行靶标行走方式，航向角变化范围约为360°。图5a 和5b 分别为经车体横滚与俯仰角校正前、后荔枝树冠层激光点云云图。依据 PVC 管的方位调整图中荔枝树激光点云云图至视角相近的位置。从点云云图的外围轮廓形状和标杆位置等细节可以看出，校正后的果树冠层点云能较真实地反映果树冠层轮廓的形状特征。

图 5　果树点云校正前、后对比图

Fig. 5　Comparison of fruit tree point cloud before and after correction

(a) 校正前　(b) 校正后

图 6 为不同高度采用切片方法分割的果树激光点云数据示意图。图 7 为图 6 中某一高度截面的俯视图，并采用 Matlab 软件中凸包函数“convhull”获得该截面上点云的外包络。

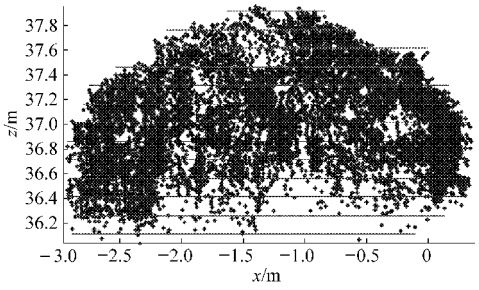

图 6　采用切片法点云示意图

Fig. 6　Point cloud when using slicing method

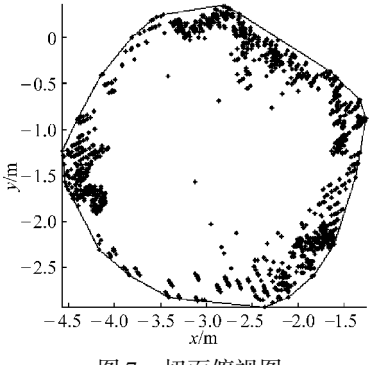

图 7　切面俯视图

Fig. 7　Top view of section

2.2　绿篱树冠层体积测量试验

图 8 为测得的大地坐标系下的绿篱树(图 4)激光点云云图。由于系统采样速率高，树冠点云密度较大，可以反映出绿篱树冠层高度和凹凸形状等几何特征。

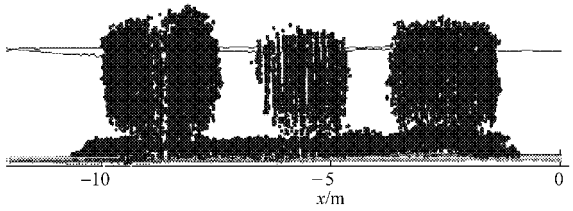

图 8　3 棵绿篱树激光点云

Fig. 8　Laser point cloud of three hedgerow target trees

表 1 为 3 棵绿篱树冠层体积的人工与 3 次激光点云方法测量结果。与人工测量相比，3 棵绿篱树 3 次激光点云方法测量的冠层体积最大相对偏差分别为 5.1%、4.9%、4.9%，可见绿篱树冠层体积激光测量结果与人工测量结果基本相一致。3 棵靶标的 3 次激光点云重复测量结果相差最大值分别为 0.34、0.21、0.41 m^3，对应的最大体积相对变动分别为 3.6%、3.4%、4.7%，3 棵绿篱树冠层体积的激光重复测量结果变动较小。

表 1　绿篱树冠层体积人工方法与 3 次激光点云方法测量结果

Tab. 1　Measurement results of artificial and laser point cloud of hedgerow tree volume　m^3

靶标	人工方法	激光点云		
		第 1 次	第 2 次	第 3 次
1	9.6	9.45	9.32	9.11
2	6.3	6.20	5.99	6.03
3	8.7	8.68	8.27	8.34

3　结论

(1)搭建了基于 AHRS 和 RTK－DGPS 的果树冠层体积激光测量平台，通过空间坐标转换直接求取果树冠层激光扫描点在大地坐标系下的三维数据，克服了丘陵山地果园地面不平整和果树种植不规整等因素对果树冠层体积激光测量方法的影响。

(2)经姿态航向系统校正后，丘陵山地荔枝树冠层激光点云云图能较真实地反映果树冠层的形状与轮廓特征。

(3)3 棵人工修剪的绿篱树冠层体积激光测量与人工测量结果表明，依据激光测量平台获取的大地坐标系下的树冠点云数据，采用切片技术以累加方式计算的树冠体积具有较高的准确性和可靠性。

参　考　文　献

1　Zaman Q U, Schumann A W, Miller W M. Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sensed tree size[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(3):331～335.

2 Zaman Q U, Schumann A W, Hostler H K. Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1):39 ~ 44.

3 Gil E, Escola A, Rosell J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors[J]. Crop Protection, 2007,26(8):1 287 ~ 1 297.

4 Schumann A W, Zaman Q U. Software development for real-time mapping of ultrasonic tree canopy size [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 47(1):25 ~ 40.

5 Tumbo S D, Salyani M, Whitney J D. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(3):367 ~ 372.

6 Wei Jiantao, Masoud S. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics[C]// 2004 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 041168, 2004.

7 Joan R, Ricardo S, Lorens J. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-estructive 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.

8 Lorens J, Gil E, Lop J, et al. Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: advances to improve pesticide application methods[J]. Sensors, 2011, 11(2): 2 177 ~ 2 194.

9 Lee Kyeong-Hwan, Ehsani Reza. A laser-scanning system for quantification of tree-geometric characteristics[C]// 2008 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 083980, 2008.

10 Zaman Q U, Schumann A W, Hostler H K. Quantifying sources of error in ultrasonic measurements of citrus orchards[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(4):449 ~ 453.

11 俞龙,洪添胜,赵祚喜,等. 基于超声波的果树冠层三维重构与体积测量[J]. 农业工程学报,2010,26(11):204 ~ 208.
Yu Long, Hong Tiansheng, Zhao Zuoxi, et al. 3D-reconstruction and volume measurement of fruit tree canopy based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 204 ~ 208. (in Chinese)

12 张霖,赵祚喜,俞龙,等. 超声波果树冠层测量定位算法与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(9):192 ~ 197.
Zhang Lin, Zhao Zuoxi, Yu Long, et al. Positioning algorithm for ultrasonic scanning of fruit tree canopy and its tests[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 192 ~ 197. (in Chinese)

13 SICK. Telegrams for configuring and operating the LMS2xx laser measurement systems[EB/OL]. [2003 - 04 - 04]. http://www.sick.com/us/en/home/service/software/Documents/TLLMS2xxD_8007953_04042003.pdf.

14 Crossbow Companies. AHRS500GA installation manual[EB/OL]. 2009. http://www.xbow.com/Support/Support pdf files/AFIRS500GA Installation Manual.pdf.

15 Trimble Companies. 5700 GPS Datasheet[EB/OL]. 2008. http://www.trimble.com/5700 ds.asp.

16 籍颖,刘兆祥,刘刚,等. 基于 Kalman 滤波农用车辆导航定位方法[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):13 ~ 17.
Ji Ying, Liu Zhaoxiang, Liu Gang, et al. Positions research of vehicle navigation system based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):13 ~ 17. (in Chinese)

17 冯雷. 基于 GPS 和传感技术的农用车辆自动导航系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2004:50 ~ 51.

18 Jay A Farrell. Aided navigation: GPS with high rate sensors[M]. NewYork: McGraw-Hill Companies, 2008: 35 ~ 50.

19 杨长强,叶泽田,卢秀山,等. 车载激光电云数据的栅格化处理[J]. 测绘科学, 2009,5(34):23 ~ 25.
Yang Changqiang, Ye Zetian, Lu Xiushan, et al. Transforming vehicle-borne laser point cloud to grid point cloud[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009,5(34):23 ~ 25. (in Chinese)

20 熊妮娜,王佳,罗旭,等. 一种基于三维激光扫描系统测量树冠体积方法的研究——以油松为例[J]. 北京林业大学学报,2007,29(增刊2):61 ~ 65.
Xiong Ni'na, Wang Jia, Luo Xu, et al. Measuring tree crown volume based on three dimension laser scanning and mapping system—taking *Pinus tabulaeformis* as a case[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007,29(Supp.2): 61 ~ 65. (in Chinese)

21 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)

22 孙永伟,孙殿柱,朱昌志,等. 散乱点云切片数据快速获取与优化[J]. 哈尔滨工程大学学报,2010,31(11):1 514 ~ 1 518.
Sun Yongwei, Sun Dianzhu, Zhu Changzhi, et al. An acquisition and optimization algorithm for slicing data of scattered points[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010,31(11):1 514 ~ 1 518. (in Chinese)

23 柯映林,王青. 反求工程中的点云切片算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005,17(8):1 798 ~ 1 802.
Ke Yinglin, Wang Qing. Research on point cloud slicing technique in reverse engineering[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005,17(8):1 798 ~ 1 802. (in Chinese)

24 刘云峰,柯映林. 反求工程中的混合切片技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003,15(6):741 ~ 745.
Liu Yunfeng, Ke Yinglin. Hybrid slicing technology in reverse engineering[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2003,15(6):741 ~ 745. (in Chinese)

25 王剑,周国民. 基于激光扫描仪的树干三维重建方法研究[J]. 微计算机信息, 2009,25(24):228 ~ 230.
Wang Jian, Zhou Guomin. 3D reconstruction of tree stems based on laser scanning of standing[J]. Microcomputer Information, 2009,25(24):228 ~ 230. (in Chinese)