



引用格式:张卫正,刘晓燕,王国飞,等. 基于车载 LiDAR 的行道树胸径和株距测量[J]. 轻工学报,2017,32(3):78-84.

中图分类号:TN959.4;S758.4 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.013

文章编号:2096-1553(2017)03-0078-07

# 基于车载 LiDAR 的行道树胸径和株距测量

## Measurement of DBH and row spacing of street trees based on mobile LiDAR

张卫正<sup>1</sup>, 刘晓燕<sup>2</sup>, 王国飞<sup>3</sup>, 张焕龙<sup>4</sup>, 张伟伟<sup>1</sup>, 陈启强<sup>1</sup>,  
董寿银<sup>5</sup>

ZHANG Wei-zheng<sup>1</sup>, LIU Xiao-yan<sup>2</sup>, WANG Guo-fei<sup>3</sup>, ZHANG Huan-long<sup>4</sup>,  
ZHANG Wei-wei<sup>1</sup>, CHEN Qi-qiang<sup>1</sup>, DONG Shou-yin<sup>5</sup>

1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 中国船舶重工集团公司 第七一三研究所, 河南 郑州 450000;
3. 星际空间(天津)科技发展有限公司 航测事业部, 天津 300384;
4. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;
5. 浙江省第二测绘院 航测与遥感三分院, 浙江 杭州 310012

1. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Seventh Thirteen Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450000, China;
3. Department of Aerial Division, Tianjin StarGIS Engineering Co., Ltd., Tianjin 300384, China;
4. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
5. Third Branch of Aerial Survey and Remote Sensing, The Second Surveying and Mapping Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China

### 关键词:

车载 LiDAR; 行道树; 胸径; 株距; 测量与计量

### Key words:

mobile LiDAR;  
street trees;  
diameter at breast  
height (DBH);  
row spacing;  
measurement and  
metrology

**摘要:**采用车载 LiDAR 获取点云,根据分层投影算法结合地物特征等先验知识实现各单株行道树点云的提取,通过最小二乘法拟合圆,运用 Matlab 编程测量行道树胸径和株距.实验结果表明,该方法与人工测量两种测量方法测得的行道树胸径和相邻行道树的间距的均方根误差分别为 0.008 7 m 和 0.010 3 m,相关系数分别为 0.968 2 和 0.999 6.该方法精度高、测量范围大,可为检测行道树分布和生长状态提供优质数据.

收稿日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61403349,61503173);郑州轻工业学院博士科研基金项目(JSJ20170017);郑州轻工业学院2017年大学生科技活动项目

作者简介:张卫正(1982—),男,河南省滑县人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为生物信息采集处理与农业信息化.

**Abstract:** Points cloud of street trees were obtained by vehicle LiDAR. The existing hierarchical projection algorithm was combined with heuristic knowledge of object characteristics to achieve the points cloud extraction of each tree. Fitting circle by least squares, the diameter at breast height (DBH) and row spacing of street trees were measured by Matlab programming. The experimental results showed that the root mean square (RMS) error of DBH and row spacing of LiDAR-based measurement and manual measurement were 0.008 7 m and 0.010 3 m, the correlation coefficients were 0.968 2 and 0.999 6. The proposed method had high precision and wide measuring range and provided quality data for the detection of distribution and growth state of street trees.

## 0 引言

行道树等道路绿化植被具有释氧固碳、蒸腾吸热、消声滞尘和杀菌防污等作用<sup>[1]</sup>,除了用于观赏,还能减少地表水分蒸发,抑制盐碱的上移,防止土壤盐渍化,对环境、土壤和气候因子具有良好的调节作用<sup>[2]</sup>. 城市道路绿化规定中,对行道树的苗木胸径要求是:快长树不得小于 5 cm,慢长树不宜小于 8 cm;最小种植株距应为 4 m<sup>[3]</sup>. 行道树等道路植被信息的获取与监测技术越来越受到国内外政府部门和相关行业的重视,研究行道树胸径和株距等生长分布情况,有助于市政管理部门及时、准确地掌握信息,为植被生长监测和管理提供依据<sup>[4-8]</sup>.

地面光探测与测量 LiDAR (light detection and ranging) 在单株树木的信息提取和参数测量方面具有优势,但对于大范围的行道树信息的采集,则需要布设非常多的站点,其数据融合与处理复杂繁琐,难以在短期内完成,人工成本高<sup>[9-11]</sup>. 此外,图像只能获取树木的二维色彩信息,超声波传感器采样率较低<sup>[12-13]</sup>. 车载 LiDAR 具有主动性强、不受光照和阴影影响、地物间隙穿透能力良好等优点,对植被空间结构探测能力强,可用于快速获取大范围树木的三维结构信息,是应用于检测行道树等植被分布的新技术,对于测绘数据采集方式、效率、数据丰富度和后期数据处理等,在方法和手段上有质的飞跃<sup>[14-17]</sup>.

鉴于此,本文拟在车载 LiDAR 技术基础

上,采用现有的分层投影结合地物特征等先验知识提取行道树点云,利用最小二乘法拟合各单株行道树胸径范围内的点云,从而得到单株行道树的胸径和相邻行道树株距的准确数据,以期为城市行道树的生长研究和监测提供依据.

## 1 研究区域与实验系统

天津市地处东经 116°43' ~ 118°04', 北纬 38°34' ~ 40°15', 市区中心位于东经 117°10', 北纬 39°10'. 主要地貌为平原及洼地,北部有低山丘陵,海拔自北向南呈下降趋势. 数据采集于中心城区大学城的市政道路 (117°07' E, 39°05' N). 研究区域临近渤海湾,属暖温带半湿润季风性海洋气候:四季分明,春季多风,干旱少雨;夏季炎热,雨水集中;秋季气爽,冷暖适中;冬季寒冷,干燥少雪. 研究的行道树树种是国槐,广泛种植在北方的公园和道路两侧,该树种根系发达,抗风耐旱,尤其适宜城市土壤板结等不良环境条件,对 SO<sub>2</sub> 和烟尘等污染物的抗污性较强. 幼龄时生长较快,以后中速生长,寿命很长.

该研究采用加拿大 Optech 公司的 Lynx V100 车载激光雷达系统,该系统使用人眼安全激光,配备有两台具有 360° 视场的激光扫描仪、两台光学相机、POS 定位定向系统,其工作模式是在车辆行进中对周边 360° 视场进行环绕扫描测量,最大限度地减少扫描漏洞. 车载平台为三菱汽车 (Outlander EX 城市型 SUV),该车利用电子控制多模式 4WD 驱动技术,以保证

强大的动力性能和良好的运行效果,系统和平台如图 1 所示.



图 1 Lynx V100 车载激光雷达系统  
Fig.1 Lynx V100 mobile LiDAR system

为确保在风力较小的良好天气采集数据,减小由行人、车辆产生的遮挡和由风引起行道树晃动所产生的误差,外业数据采集需遵循如下原则:

- 1) GNSS 基准站采样频率不低于 1 Hz, 基站需完整覆盖移动测量设备作业时间段.
- 2) 正式作业开始、结束前,为了保证定位精度,移动测量车需要静态观测 5 ~ 10 min; 作业过程中应注意行车方式和行车速度,争取最大范围地覆盖目标地物.
- 3) 若作业期间 GPS 失锁时间过长,则需要 在信号正常区域重新静态初始化 5 min,同时设备操作人员需标记该地段,供内业数据处理<sup>[18]</sup>.

经过数据采集路线规划,于 2016 年 5 月 23 日上午在市中心大学城选择行人、车辆较少的时段和路段开始数据采集,搭载平台的汽车车速保持在 50 km/h 以内,以保证汽车行驶稳定与安全.

## 2 研究方法

### 2.1 研究区域点云预处理

通过车载 LiDAR 采集点云数据,并进行预处理:

- 1) 结合地面 GNSS 基站采集的卫星数据,对移动平台采集的原始数据进行解算;
- 2) 为实现工程化管理,可对解算后的点云

数据进行分幅处理;

- 3) 对原始解算输出后的点云数据或分幅处理后的点云数据进行坐标转换.

为了提高点云精度,需要在道路路面上布设一定数量的控制点,结合外业测量控制点,对预处理后的点云进行精度改正,得到的路段点云如图 2 所示.从图 2 可以看出,目标区域包含行道树、建筑、道路、电力线等点云,行道树位于道路两侧,平行排列.

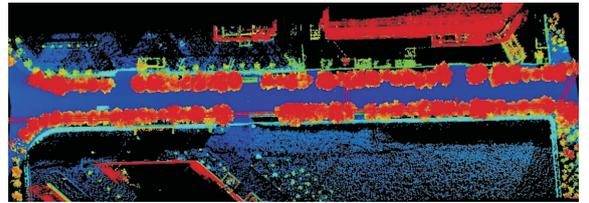


图 2 部分路段点云  
Fig.2 Points cloud of city road section

### 2.2 地面和行道树点云提取

要测量行道树的胸径和株距,需要从车载 LiDAR 所采集的复杂地物点云中提取行道树点云.步骤为:

- 1) 根据车辆行驶轨迹和道路中心线,向两侧扩充适当的距离,删除该距离外的点云以减小计算量.
- 2) 分离地面点.依据给定尺寸设定正方形网格,从每个网格中提取高程最低的点作为地面种子点,添加到不规则三角网(TIN)上,建立初始地面模型.通常网格应大于点云数据中最大参照物(行道树).遍历 TIN,计算包含在三角网内各个三角形中的点与其平面的距离  $d$ ,若  $d$  小于设定的阈值,则规定该点为地面点,加入到地面点集合.重复此步骤,直到满足条件的地面点都加入到三角网中,完成迭代<sup>[19]</sup>.

3) 行道树点云的提取.在已有研究<sup>[20-22]</sup>的基础上,本文采用分层投影法结合地物特征等的先验知识进行行道树点云的提取分割.

单株行道树的点云如图 3a) 所示,行道树

底部有可能是低矮灌木或垃圾桶等,高度低于 1 m. 图 3b) 为树冠冠层点云,它精确地反映了树冠的形态. 图 3c) 为树干点云,从中可以进行胸径测量. 胸径又称干径,指乔木主干离地表面胸高 1.3 m 处的直径,断面畸形时,测取最大值和最小值的平均值.

根据提取的行道树点云,本文截取 1.0 ~ 2.8 m 的树干部分,如图 4 所示.

### 2.3 胸径和株距测量

为了测量胸径和株距,需要提取行道树的胸径处点云. 截取 1.2 ~ 1.4 m 间的行道树胸径区间点云,进行二维平面投影(图 5 中绿色点为点云,红色圆为拟合圆). 单株行道树胸径计算采用最小二乘法拟合圆形作为胸径的范围. 最小二乘法又称最小平方方法,是一种通过误差平方和最小化寻找数据最佳函数匹配的数学优化方法. 利用该方法可以简便地求得未知的数据,并使之与实际数据之间误差的平方和最小,可用于圆形等形状的曲线拟合<sup>[23]</sup>. 拟合公式为

$$r^2 = (x - A)^2 + (y - B)^2$$

展开后得到  $r^2 = x^2 - 2Ax + A^2 + y^2 -$

$2By + B^2$ , 令  $a = -2A, b = -2B, c = A^2 + B^2 - r^2$ , 可得圆曲线方程的另一个形式,即

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0$$

只要求出参数  $a, b, c$  就可以求得行道树的半径  $r$  和圆心  $(A, B)$ , 其中  $r = 0.5 \times (a^2 + b^2 - 4c)^{0.5}, A = -0.5a, B = -0.5b$ .

单株行道树胸径点云中的点  $(X_i, Y_i)$  到圆心的距离

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2$$

点到圆心距离的平方与圆半径平方的差为  $\delta_i = d_i^2 - r^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 - r^2 =$

$$X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c$$

令  $Q(a, b, c)$  为  $\delta_i$  的平方和, 即

$$Q(a, b, c) = \sum \delta_i^2 =$$

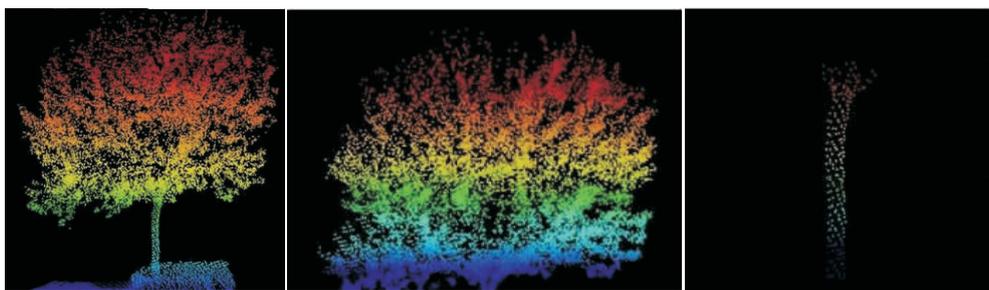
$$\sum (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2$$

采用 Matlab 计算参数  $a, b, c$ , 使得  $Q(a, b, c)$  值最小.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 行道树点云提取分析

根据图 5 采用最小二乘法拟合计算行道树



a) 整株点云

b) 冠层点云

c) 树干点云

图 3 单株行道树点云

Fig. 3 Points cloud of individual street tree



图 4 行道树树干点云

Fig. 4 Points cloud of street trees trunks

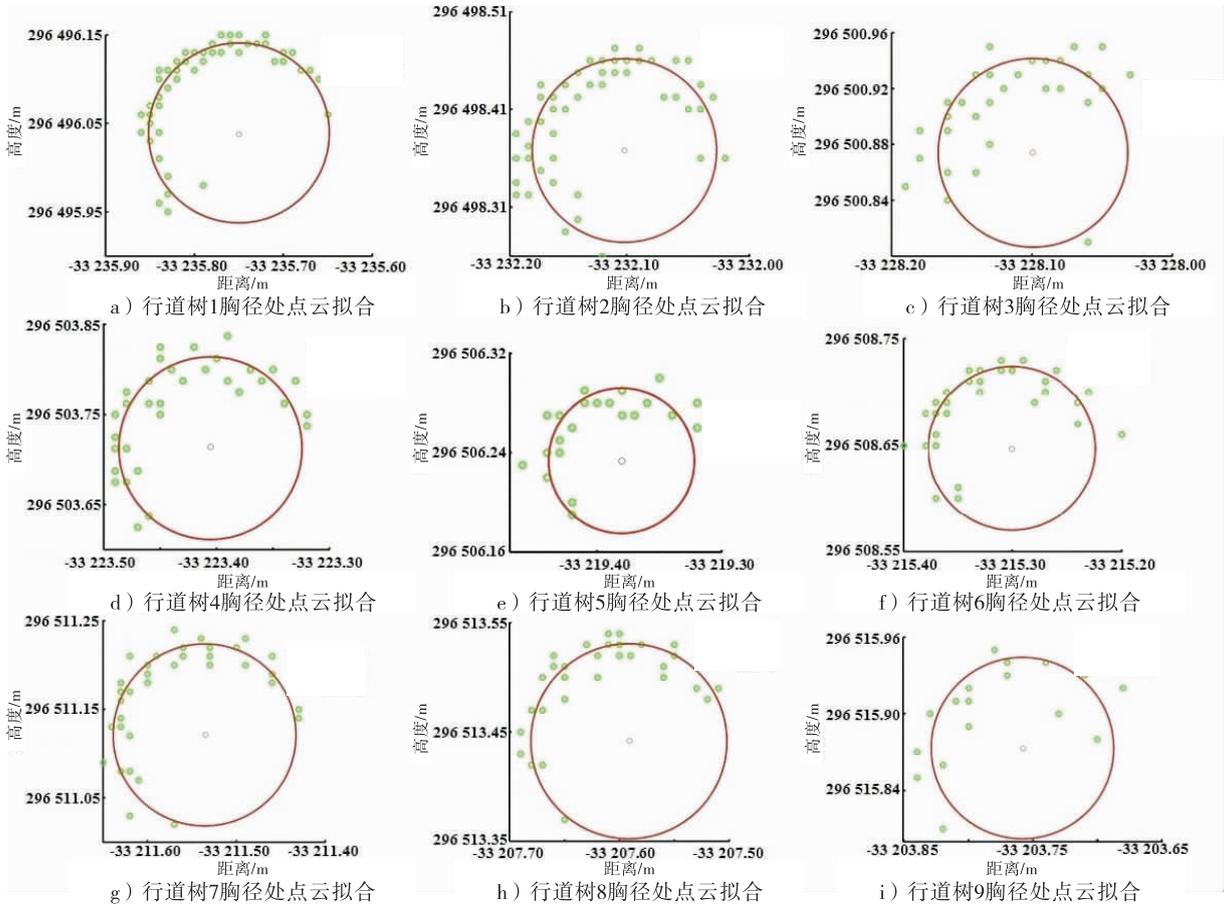


图5 行道树胸径区间点云

Fig. 5 Points cloud of DBH interval

的直径  $R_1$  和圆心. 根据行道树胸径处的圆心计算得到相邻行道树间距  $S_1$ , 如表 1 所示.

市政园林部门对行道树的要求是树体大小尽可能整齐划一, 避免因高低错落、粗细各异而

表 1 车载 LiDAR 和人工测量行道树胸径和株距

Table 1 Measurement results of DBH and row spacing of street trees by mobile LiDAR method and manual method

序号	$R_1/m$	$R_2/m$	$S_1/m$	$S_2/m$
1	0.188 0	0.196 1	—	—
2	0.149 7	0.158 2	4.321 6	4.310 7
3	0.135 1	0.129 5	4.723 4	4.734 8
4	0.162 0	0.152 3	5.473 8	5.482 2
5	0.115 4	0.107 6	4.759 5	4.746 7
6	0.152 9	0.144 7	4.742 2	4.748 9
7	0.205 7	0.200 3	4.504 8	4.512 1
8	0.178 0	0.165 4	4.576 4	4.590 2
9	0.142 1	0.131 9	4.539 4	4.548 6

影响美观, 同时带来管理上的不便. 从表 1 可以看出, 行道树的胸径大小不一, 胸径处的半径也在一定程度上反映了树木生长速度、体量大小和生长形态. 相邻行道树间距在 4.321 6 ~ 4.759 5 m 范围内变化, 这反映了种植时未能严格按照间距标准种植, 或之后有人为挪动等.

行道树点云的准确提取是进行胸径和株距测量的基础, 采用分层投影法结合地物特征等的先验知识进行行道树点云的提取分割, 在计算胸径时, 由于最小二乘法拟合圆是对胸径附近 1.2 ~ 1.4 m 间的所有点云在水平面投影拟合, 算法计算了点集中的每个点, 如果具有极值或是相对偏离胸径较远的非行道树胸径点云在拟合的胸径点集中, 就会产生较大的误差, 本文在采用最小二乘法拟合圆时, 排除了  $x$  轴和  $y$

轴的 4 个极值,以减小计算误差.

### 3.2 本文方法与人工测量方法比较

将本文基于车载 LiDAR 点云的激光测量方法与传统的人工测量方法进行比较.现场用卷尺沿着树干在距离地面 1.3 m 的高度测量行道树的胸径(周长除以  $\pi$ )为  $R_2$ ,在平行于行道树胸径中心的位置测量相邻行道树的株距为  $S_2$ ,结果见表 1.

由表 1 可知,车载 LiDAR 测量与人工测量的行道树胸径的平均绝对误差为 0.008 5 m,均方根误差为 0.008 7 m,相关系数  $R$  为 0.968 2;车载 LiDAR 测量与人工测量的相邻行道树间距的平均绝对误差为 0.010 1 m,均方根误差为 0.010 3 m,相关系数  $R$  为 0.999 6,可以满足要求.

## 4 结语

本文采用车载 LiDAR 获取点云,根据行道树的特点,在现有的分层投影结合地物特征等先验知识的基础上,运用 Matlab 编程实现对车载 LiDAR 数据中行道树点云的提取,并采用最小二乘法拟合圆,计算得到单株行道树的胸径和相邻行道树的株距,从而实现了大范围的行道树胸径和株距的快速测量.车载 LiDAR 测量与人工测量的行道树胸径和相邻行道树间距的均方根误差分别为 0.008 7 m 和 0.010 3 m,相关系数  $R$  分别为 0.968 2 和 0.999 6,可以满足要求,为检测行道树分布和生长状态提供了优质数据源.车载 LiDAR 具有精度高、测量范围大等优点,具有广阔的应用前景,将其引入到市政园林、林业等领域有助于政府等相关部门进行高效合理的科学管理和决策.

林木在不同季节的树冠形态和树叶茂密程度不同,这对采集的车载 LiDAR 数据有直接影响,在一定程度上对提取行道树点云方法的适应性提出了挑战.本文实验数据的采集是在植

被生长旺盛的时间段,若在冬季或对树叶稀少的树种,更有利于树干点云的处理和胸径的计算,但可能会对从地物点云中分离行道树点云产生影响,需要通过大量的实践来验证提取效果.此外,工程施工和其他人为破坏也可能对最终结果产生影响,需要在后续研究中进行探讨.

### 参考文献:

- [1] 史晓丽.北京市行道树固碳释氧滞尘效益的初步研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [2] 商洪池,洪金祥.浅析盐碱地的治理及其园林绿化的方法[J].园林科技,2003(2):24.
- [3] 胡长龙.城市道路绿化[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [4] 滨谊.城市道路景观规划设计[M].南京:东南大学出版社,2002.
- [5] CHEN Q, GONG P, BALDOCCHI D, et al. Estimating basal area and stem volume for individual trees from LiDAR data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(12):1355.
- [6] SRINIVASAN S, POPESCU S C, ERIKSSON M, et al. Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2):1877.
- [7] 吴宾,余柏菡,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.
- [8] 毛杰,张西童,吴珍珍,等.基于三维激光扫描技术的景观石重建技术[J].黑龙江工程学院学报,2016,30(2):12.
- [9] 徐伟恒,冯仲科,苏志芳,等.一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J].光谱学与光谱分析,2014, 34(2):465.
- [10] BÉLAND M, WIDLOWSKI J L, FOURNIER R

- A, et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9):1252.
- [11] BALSARI P, DORUCHOWSKI G, MARUCCO P, et al. A system for adjusting the spray application to the target characteristics[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2008(10):1128.
- [12] 张富贵,洪添胜,肖磊,等. 果树冠幅的检测机理研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4):25.
- [13] 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.
- [14] 李永强,杨莎莎,李框宇,等. 车载激光扫描数据中杆状地物提取[J]. *测绘科学*, 2015, 40(8):42.
- [15] CHEEIN F A A, GUIVANT J, SANZ R, et al. Real-time approaches for characterization of fully and partially scanned canopies in groves [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015(118):361.
- [16] ROSELL P J R, SANZ C R, LLORENS C 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.
- [17] LIN Y. LiDAR: An important tool for next-generation phenotyping technology of high potential for plant phenomics [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015(119):61.
- [18] 田春来,邓世军,王国飞,等. 一种基于点云的道路信息自动提取方法:201410047529. 9 [P]. 2014-02-11.
- [19] 管海燕,邓非,张剑清,等. 面向对象的航空影像与 LiDAR 数据融合分类[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(7):830.
- [20] 陈昌鸣,向煜,龙川. 基于车载激光雷达的行道树提取研究[J]. *北京测绘*, 2015(1):18.
- [21] 杨莎莎,李永强,李框宇,等. 基于车载 LiDAR 数据的单株树提取[J]. *测绘工程*, 2014, 23(8):23.
- [22] 冯义从,岑敏仪,张同刚. 基于知识的车载 LiDAR 地物自动分类[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(5):122.
- [23] 贾小勇,徐传胜,白欣. 最小二乘法的创立及其思想方法[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(3):507.

## 本刊数字网络传播声明

本刊已许可万方数据资源系统、维普网、博看网、超星、中国科技论文在线、中教数据库、91阅读网等,以及中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文.其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付.作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明.