doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.007

## 基于 M - K 聚类法的果树上下冠层体积比测算

祁力钧 程一帆 程浈浈 杨知伦 吴亚垒 葛鲁振 (中国农业大学工学院,北京100083)

摘要:果树冠层体积是决定果园施药量的重要指标。针对机载 LiDAR 探测技术(ALS)在冠层体积测量中存在下 冠层信息缺失的问题,提出运用图像处理的方法对果树上下冠层体积比进行测量。该方法运用结合马氏距离和 K-means算法的 M-K 聚类法对图像目标区域进行分割,通过旋转积分法求得上下冠层的像素体积之比。为解决该 方法对单侧冠层图像处理存在误差(25.3%)较大的问题,对果树不同侧面的多幅图像进行测算,并对结果进行算 术平均以提升方法的准确性与稳定性。运用所述方法对果园内 23 棵苹果树、20 棵樱桃树进行实验,并将结果与人 工测量结果进行对比分析,结果表明,该方法与人工法的测量结果间具有较好的一致性,两种果树的决定系数分别 为0.775 和0.832,能够用于果树冠层体积比的测量。

关键词:果树冠层;体积比;图像处理;马氏距离;K-means算法 中图分类号:TP751;S4 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2018)05-0057-08

### Estimation of Upper and Lower Canopy Volume Ratio of Fruit Trees Based on M – K Clustering

QI Lijun CHENG Yifan CHENG Zhenzhen YANG Zhilun WU Yalei GE Luzhen (College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract**: The volume of tree canopy provides theoretical basis for the orchard spray, and the application of airborne laser scanning is widely used in canopy volume measurement, but there is a problem of lack of canopy information. To solve this problem and improve the accuracy of tree canopy volume measurement, a method based on image processing to measure the tree upper and lower canopy volume ratio was proposed. A new M – K clustering method combining Mahalanobis distance and K-means algorithm was created to split the image target area and find the ratio of the volume of pixels in the upper and lower canopy by rotation integration method. The further research reduced the error (nearly 25.3%) measurement of unilateral canopy image processing on this basis. According to the estimation results of multiple images of different sides of the fruit tree by arithmetic mean method, M – K clustering method was modified, which became more accurate and stable. Totally 23 apple trees and 20 cherry trees were experimented in the orchard, and the results were compared with the artificial measurement results, which showed that the M – K clustering method was in good agreement with artificial measurement results with  $R_{apple}^2$  of 0.775 and  $R_{cherry}^2$  of 0.832. It can be used for the measurement of canopy volume ratio. **Key words**: fruit canopy; volume ratio; image processing; Mahalanobis distance; K-means algorithm

#### 0 引言

果树冠层体积是决定施用农药量的重要指标, 在果园精细化作业中具有十分重要的地位<sup>[1-3]</sup>。随 着科技的发展,基于高新传感器的测量技术成为冠 层信息的主要获取手段<sup>[4-8]</sup>。 近年来,由于无人机自身所具有的不受空间限制、自由度高与经济成本低等优点,借助机载 LiDAR 回传数据,根据 ABA(区域分析法)和 ITC 分析法 (单株分析法)<sup>[9]</sup>对树木冠层进行测量成为农林测 绘领域的研究热点。对于 ITC 法而言,由于无人机 的独特视角导致来自机载 LiDAR 较大比例的激光

收稿日期: 2017-10-19 修回日期: 2017-11-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701400、2016YFD0200708)

作者简介:祁力钧(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农机装备与计算机测控研究, E-mail: qilijun@ cau. edu. cn

脉冲被拦截在冠层的顶部,而中部和下部的反馈较 少<sup>[10]</sup>,单纯依靠机载 LiDAR 回传数据进行冠层测 算忽视了林木下冠层体积,致使结果不精确<sup>[11]</sup>。针 对上述问题 WEZYK<sup>[12]</sup>提出了将地面激光扫描 (TLS)回传数据和机载激光扫描(ALS)点云转换为 同一个坐标系的方法,并对林木特征参数进行半自 动提取;MURGOITIO 等<sup>[13]</sup>尝试将 ALS 和 TLS 传感 器的回传数据整合一起,用于可视化树冠被遮挡部 分,其结果表明 TLS 对 ALS 数据进行补充可显著完 善森林结构模型;LOVELL 等<sup>[14]</sup>将地基激光扫描仪 与无人机机载系统的测量数据相结合,以减轻树木 上冠层的遮挡对体积测量结果产生的影响。然而, 用 TLS 的方法来获取果树下冠层体积,成本很高、 耗时较长且需多点位布控的复杂测量方式不适于果 园种植紧密、行列间空隙较少的特殊情况。

为解决上述问题,本文参照 LEFSKY 等<sup>[15]</sup>的冠 层分割思想,拟将果树分为上下 2 个冠层,在地面采 集果园果树侧视图图像后运用基于 M-K 聚类法的 图像处理技术对冠层进行提取,并在图中定位最大 遮挡面<sup>[16]</sup>,以此为基准实现果树上下冠层的分割; 针对密闭型和疏散型两类果树,分别运用散点积分 与旋转积分的方法,从而得到果树上下冠层的体积 比。将此参数引入到机载 LiDAR 系统中,对冠层信 息缺失的部分进行体积预测,以实现多传感器信息 融合。

#### 1 系统和材料

#### 1.1 检测系统组成

本实验检测系统由硬件与软件两部分组成,其 中硬件由微型单反相机、云台、三脚架、计算机等组 成,如图 1 所示。相机为 2 430 万有效像素的 Sony α7 微型单反相机,搭载 15 ~ 75 mm 变焦镜头,计算 机选用 Accer aspire V5, Intel core i5 处理器, Windows 10 操作系统。软件为基于 Matlab 语言的 自编程序。



图 1 预需求的现件组成 Fig. 1 Hardware composition of inspection system

#### 1.2 果树图像获取

分别于 2017 年 5 月 5 日 10:00 在北京市中农 富通现代示范果园选择 20 棵自然纺锤形樱桃树和 2017 年 9 月 20 日 10:00 在山东省果树研究所示范 果园选择23棵高纺锤形苹果树进行实验。

在自然曝光的环境中,运用 Sony α7 微型单反 相机的 AUTO 模式进行图像采集,采集时相机装载 在百诺 IT15 云台上。

#### 2 冠层体积比的测算

为求得果树冠层上下体积比,通过图像处理法 提取冠层图像相关信息,并根据提取的数据进行体 积比计算,最后为增加结果的准确性与鲁棒性提出 修正方案。

#### 2.1 果树图像分割

图像分割是根据一定特征将图像中目标区域与 背景区域进行分离、提取的技术过程。对目标物分 割的最终效果将会直接影响到后续的图像边缘提取 与最大遮挡面的定位。果树冠层相对于背景区域具 有明显的颜色差异,根据该特点,提出运用 M - K 聚 类法进行图像分割。

#### 2.1.1 马氏距离

马氏距离是由 MAHALANOBIS 于 1936 年提出 的一种基于变量间相关性的距离度量。相对于欧氏 距离,马氏距离的优势是考虑了数据之间的相关性, 且在进行距离计算时具有尺度无关性,它是计算 2 个未知样本集相似程度的一种有效方法<sup>[17]</sup>。

本文运用 LI 等<sup>[18]</sup>的方法,计算所采集果树冠 层图像中每一像素点与经人工分割的标准果树图像 之间的马氏距离,并将输出矩阵 *M*<sub>Di</sub>作为二者相似 度的判定标准。其计算公式为

$$\boldsymbol{M}_{Di} = \sqrt{(\boldsymbol{x}_i - \overline{\boldsymbol{x}}) \boldsymbol{C}_x^{-1} (\boldsymbol{x}_i - \overline{\boldsymbol{x}})^{\mathrm{T}}}$$
(1)

(2)

其中  $C_x = \frac{1}{n} (X - \overline{X})^{\mathrm{T}} (X - \overline{X})$ 

式中 x<sub>i</sub>——采集图像中某一像素点包含的颜色信 息向量

**x**——均值向量

n——图像的总像素数

X——图像所包含的颜色特征矩阵

X——颜色特征均值矩阵

图 2 为经上述公式计算后生成 *M*<sub>D1</sub>矩阵的三维显示图,其中 Z 轴为马氏距离,*X*、Y 轴为像素点所在行、列值,顶部平面图像为马氏距离越大,该点对应亮度越高,距离越小亮度越低。由图 2 可知,图像中部灰色凹陷区域与果树标准图像相似度较高,马氏距离较小,为果树树冠主体,其余部分为地面、天空等非目标区域,与果树标准图像相似度较低,马氏距离较大。

#### 2.1.2 色度空间的变换

由于园内光照环境复杂,导致所得冠层图像通

其



Fig. 2 Three-dimensional display of  $M_{Di}$  matrix

常存在亮度不均匀的现象。在进行图像处理时,目标区域的亮度差异成为干扰因子,影响了分割的准确性。为排除亮度对图像分割的影响,本文将果树图像由 RGB 色彩空间转换为 Lab 色彩空间,转换公式为

$$\begin{bmatrix} X\\ Y\\ Z \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \gamma\left(\frac{r}{255}\right)\\ \gamma\left(\frac{g}{255}\right)\\ \gamma\left(\frac{b}{255}\right) \end{bmatrix}$$
(3)  
$$\oplus \gamma(x) = \begin{cases} \left(\frac{x+0.055}{1.055}\right)^{2.4} & (x > 0.0405) \end{cases}$$
(4)

$$\left|\frac{x}{12.92}\right| \quad (x \le 0.0405)$$

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} 0.\ 433\ 953 & 0.\ 376\ 219 & 0.\ 189\ 828 \\ 0.\ 212\ 671 & 0.\ 715\ 160 & 0.\ 072\ 169 \\ 0.\ 017\ 758 & 0.\ 109\ 477 & 0.\ 872\ 765 \end{bmatrix}$$
(5)

$$\begin{aligned} L &= 116 f\left(\frac{Y}{100}\right) - 16\\ a &= 500 \left(f\left(\frac{X}{95.047}\right) - f\left(\frac{Y}{100}\right)\right) \end{aligned} \tag{6}$$

$$b = 200 \left( f\left(\frac{Y}{100}\right) - f\left(\frac{Z}{108.83}\right) \right)$$

其中 
$$f(t) = \begin{cases} \sqrt{t} & (t > 0.008\ 856) \\ 7.787t & (t \le 0.008\ 856) \end{cases}$$
 (7)

式中 r、g、b——图像红、绿、蓝通道灰度

L、a、b——转换后的色彩空间三通道灰度 在 Lab 色彩空间中 L 表示亮度, a 表示从绿色到红 色的色彩范围, b 表示从蓝色至黄色的色彩范 围<sup>[19]</sup>,该色彩空间将图像颜色因子与亮度因子进行 分离,能够有效解决图像光照不均匀的问题,从而保 留图像原本的色彩信息。

#### 2.1.3 M-K聚类法

常用的聚类算法有 K-means 法、模糊 c 均值法、 meanshift 法和 gmm 法等,其中 K-means 聚类算法运 算速度快、结果准确。它的基本思想是:首先从数据 对象中随机选择 k 个对象作为初始聚类中心,然后 将剩余的每个对象根据与这些聚类中心的距离,分 别赋予与其距离最近的聚类。再重新计算每个新聚 类的聚类中心,不断重复,直到聚类中心不再变 化<sup>[20]</sup>。然而对于现代果园内环境复杂、干扰因素众 多等特殊情况,K-means 聚类法存在错分漏分现象 严重、聚类数 k 难以确定的缺陷。

针对上述问题,本文提出结合马氏距离和 K-means 算法的 M - K聚类法,并运用该算法对果 树冠层图像进行分割。首先将前文所得马氏距离  $M_{0:}$ 矩阵与 Lab 色度空间中的  $a \downarrow b$  矩阵进行归一化 处理(归一到 0 ~ 255),将此 3 类特征数据结合成新 的三维矩阵,以新的 MAB 矩阵替代原有的 RGB 矩 阵进行 K-means 聚类。MAB 图像中 M 代表该像素 点与目标图像整体的相似程度, $A \downarrow B$  包含原有的图 像色彩信息。新的三维矩阵排除了干扰因子亮度 L的影响,引入了相似度 M 作为聚类特征,在未损失 图像原本的颜色信息 $A \downarrow B$  的前提下,使得聚类分割 的准确度得以提高。如图 3 所示,对同一幅果树图 像分别进行基于 K-menas 聚类及基于 M - K 算法的 冠层分割,从结果来看,运用 M - K 法进行分割,冠 层完整度较高,错分现象不明显。

由于背景区域(地面、天空)与果树冠层有一定 的差异(图 4b),M往往较大,而目标区域与干扰区 域(杂草、其他品种果树)可通过颜色信息A、B进行 区分(图 4c),故在进行 M – K 聚类时,统一将聚类 数设置为 k = 3,将图像分为目标区域、背景区域和



图 3 K-means 法与 M-K 法分割效果对比

Fig. 3 Comparisons of K-means and M - K segmentation effects



Fig. 4 Space scatter plots of Mahalay distance

干扰区域3部分,从而解决 K-means 算法无法确定 初始聚类数的问题。

2.1.4 图像形态学处理及边缘轮廓提取

对果树图像进行 M-K 聚类后,取 M 最小的聚 类中心所在类为目标类,进行二值化。由于树冠中 存在空隙,分割所得二值图像存在孔洞现象,且仍有 少数干扰物未能完全去除。因此运用形态学孔洞 填充和开闭运算进行处理,以达到消除孔洞与残留 干扰物的效果,结果如图 5c 所示。

传统的边缘提取算法有 Roberts 算法、Sobel 算 法和 Canny 算法<sup>[21]</sup>,其中以 Canny 算法的检测效果 最为优良。对经过形态学处理的二值图像进行基于 Canny 算法的边缘提取,获得果树冠层边缘轮廓,如 图 5d 所示。



(a) 果树原图



Fig. 5 Extractions of canopy edge contours of fruit trees

#### 2.2 体积比计算

2.2.1 冠层最大遮挡面的定位与图像切割

进行上下冠层体积比的计算时,首先需要确定 其最大遮挡面在树冠中所处的位置。在果树图像处 理中,一般认为图中最大横向像素距离为果树最大 冠幅<sup>[22]</sup>,从而近似认为其所在位置即为最大遮挡面 所处位置。然而,现实中果树枝叶不齐,某些较长的 侧枝外伸,破坏了树木的轮廓走势,因而简单的将最 大冠幅等同于最大遮挡面容易使测量结果产生较大 的偏差。

为解决上述问题,本文首先对冠层图像进行遍 历,寻找出果树的顶点,过此顶点将图像竖直切割成 两份:然后对左右两部分果树的边缘轮廓进行基于 最小二乘法的多项式曲线拟合,如图 6a 所示,并根 据留一交叉验证法进行循环检验,自动选取最佳拟 合函数,输出拟合曲线方程,分别解出两曲线极大值 所在的位置,定为果树遮挡面,再次进行图像切割, 将左右两图切成左上、左下、右上、右下4份,如 图 6b 所示。



最大遮挡面的定位与图像切割 图 6 Fig. 6 Positioning of the largest occlusion surface and cutting of image

以较为平滑的拟合曲线代替果树不规则的轮廓 线,排除了过长侧枝的干扰,提高了冠层最大遮挡面 定位与分割的稳定性。

2.2.2 上下冠层体积比

对于边缘疏散形果树,由于树叶稀疏,分支明 显,中空面积较大,运用散点积分的方法求体积易产 生误差,所以采用树冠轮廓拟合曲线旋转体积代替 原果树体积,具体方法如下:首先运用骨架化法对果 树冠层进行迭代骨架化运算,对经过骨架化的图像 进行八连通邻域检测,得出树枝的端点,对所得端点



(a) 疏散型果树图



进行曲线拟合,如图7所示。再对曲线进行旋转积 分。其计算公式为

$$V_g = \int_1^t \pi x^2 \mathrm{d}f(x) \tag{8}$$

式中 f(x) — 所得拟合曲线 x — 拟合曲线横坐标值,像素 l — 图像的列像素数 V<sub>a</sub> — 果树的像素体积



(d) 曲线拟合

 (b) 迭代骨架化处理
 (c) 果树尖端点

 图 7 疏散型果树的曲线拟合

Fig. 7 Curve fitting of evacuation fruit trees

对于边缘轮廓规则的密闭型果树,直接运用散 点积分法求果树各部分冠层的像素体积,其计算公 式为

$$V_g = \sum_{1}^{l} \pi r^2 \tag{9}$$

式中 r----树冠边缘轮廓与分割中心的距离,像素

最后,根据求得的各部分像素体积进行上下冠 层体积比 P 的计算,公式为

$$P = \frac{V_{11} + V_{12}}{V_{21} + V_{22}} \tag{10}$$

式中 V<sub>11</sub> — 左上部果树的像素体积 V<sub>12</sub> — 右上部果树的像素体积

V21——左下部果树的像素体积

V22——右下部果树的像素体积

#### 2.3 修正方案

为提升测量结果的精确性与鲁棒性,选择在室 内对两棵特征参数已知的果树(樱桃树、苹果树)模 型进行探究实验,确定对测量产生影响的外界因素 (图像拍摄距离、高度和方向),并针对产生的影响 提出相应的修正方案。

2.3.1 影响因素

实验于实验室内进行,实验对象为一棵苹果树 模型与一棵樱桃树模型。将相机架设在三角架上, 利用水平仪进行校正,使相机镜头主光轴与地面保 持平行。如图 8 所示,4 次实验中,分别控制相机对 地高度为 180、150、120、90 cm;镜头与树干之间的距 离为 260、310、360、410 cm;每次实验拍摄 2 个方向, 拍摄方向依次为 0°、45°、90°、135°、180°、225°、 270°、315°(以正东方向为 0°)。



以拍摄距离和高度为变量,对两棵模型树的补 偿体积系数进行测量,结果如表1所示。对结果分 别进行方差分析,如表2所示。经F检验得出,在

#### 表1 补偿体积系数测量结果

# Tab.1 Measurement result of compensation volume coefficient

拍摄	拍摄高	度(苹	果树模型	型)/cm	拍摄高	度(樱	姚树模	型)/cm
距离/cm	180	150	120	90	180	150	120	90
410	1.078	1.009	0. 983	1.105	0.984	0.984	0.971	0.986
360	0.958	0.864	1.002	0.909	1.008	0.983	0.973	1.117
310	0.884	0.990	1.012	1.132	1.055	1.016	1.024	0.944
260	1.039	1.012	0.980	0.894	0.914	1.017	0.932	0.965

表 2 方差分析

Tab. 2 Variance analysis result

因素	苹果树			樱桃树			
	均方和	F比	显著性	均方和	F比	显著性	
拍摄距离	0.008 55	1.1	0. 397 6	0.003 28	1.22	0.3565	
拍摄高度	0.000 85	0.1	0.9525	0.00064	0.24	0.8673	

置信度为95%的前提下,改变拍摄距离、拍摄高度 对实验结果的影响不明显。

以拍摄方向为变量进行实验,结果如图9所示, 对所得结果进行方差分析,发现置信度为90%的情况下拍摄方向对测量结果产生显著影响。



#### 2.3.2 修正方案

在改变拍摄方向的实验中,误差如图9所示,樱 桃树所得补偿体积系数与人工测量的最大误差为 22.2%,苹果树与人工测量值的最大误差为 25.3%,可见最大偏差均在20%以上,结果不够精 确。原因是式(8)、(9)中将修形后的果树当作规则 的旋转体进行体积计算,然而在实际情况中,由于各 种偶然因素的影响,果树很难满足理想条件,当各部 分生长差异过大时,单侧果树图像不足以反映整棵 果树的形体特征。为了使测量结果足够精确,需采 集多幅不同方向的果树图像,以确保获取足够全面 的果树信息。

分别对苹果树与樱桃树不同侧面的体积测量值进行取平均,所得结果与人工测量值误差较小(苹果树 10.7%,樱桃树 3.9%),因此在采集冠层图像

时应根据实际情况采集2幅及以上不同方向的果树 图像,以平均值作为最终结果,达到降低测量误差的 目的。

#### 3 实验结果与分析

选取 20 棵樱桃树、23 棵苹果树作为研究对象。 对每棵果树分别采集东北侧和西北侧的果树图像进 行上下冠层体积比计算。在确定冠层最大遮挡平面 后,参考 WHEATON 等<sup>[23]</sup>、王佳等<sup>[24]</sup>提出的计算方 法,运用卷尺、标杆和手持激光测距仪测量果树冠层 各截面所在高度与半径(将各截面近似为圆形),运 用圆台累加法对果树上下冠层的真实体积进行人工 测算,以人工测量所得上下冠层体积比作为标准值, 与本文所述方法进行对比分析。

分别将两棵果树的东北侧、西北侧摄影测量值 与人工测量值进行线性相关分析,如表 3 所示,得出 的决定系数 R<sup>2</sup> 最低为 0.661,最高为 0.818,可见运 用单幅果树图像测算上下冠层体积比其结果与人工 测量值具有一致性,但不同树种、不同侧面的测量值 与人工测量值的线性相关性有较大偏差(23.7%), 方法稳定性较差。对两棵果树东北侧与西北侧的测 量值进行算术平均后与人工测量值进行相关分析, 结果显示相对于未进行平均之前二者的相关关系具 有显著增强,其决定系数分别为 0.775 和 0.832;再 进行显著性 t 检验,P 值为 0.389 8、0.613 9,均大于 0.05,可见本文方法测量值与人工测量值未见显著 差异,且 2 次回归的决定系数差异缩小(7.4%),说 明经修正后稳定性增强。

表 3 果树冠层体积的人工测量值与图像处理值

Tab. 3	Artificial	measurements	and	image	processing	values o	of canopy	volum
--------	------------	--------------	-----	-------	------------	----------	-----------	-------

测量方法	棵数	最大值/%	最小值/%	均值/%	决定系数	均方根误差/%
苹果树人工测量值	23	2.731	1.068	1.53		
樱桃树人工测量值	20	4.396	0.811	1.74		
苹果树摄影测量值(东北侧)	23	2.471	0.945	1.58	0.661	0. 234
苹果树摄影测量值(西北侧)	23	2.387	0.757	1.56	0.704	0.261
樱桃树摄影测量值(东北侧)	20	4.034	0.732	1.85	0.773	0. 420
樱桃树摄影测量值(西北侧)	20	2.835	0.800	1.69	0.818	0. 258

对比图 10a 和图 10b,可见图 10a 中与回归线偏 差较大的奇异点分布较为均匀且数量多,而图 10b 中奇异点多出现于上下冠层体积比较大的区间且数 量较少。这主要是由于秋天的苹果树普遍叶密度较 小且树形不够规整,在进行图像处理时存在孔隙过 大、枝干明显等问题,难以形成闭合的树冠,导致处 理结果存在一定的偏差;而春天的樱桃树枝叶茂密, 但幼龄果树未完全发育成型,其下冠层所占体积比 例低,上下冠层的界限不够明显,难以寻找合适的最 大遮挡面,从而导致测量产生偏差。

#### 4 结论

(1) 在冠层分割中, 对于任意图像 M - K 算法 均将聚类值确定为 3, 且引入了 *M*<sub>Di</sub>矩阵作为图像特 征值, 相对于单一的 K-means 分割法, M - K 算法解 决了聚类数 *k* 无法确定的缺陷, 提高了分割的准 确性。

(2)实验结果表明,改变拍摄方向会对测量结



图 10 线性回归

Fig. 10 Linear regressions

果产生显著影响。对原方案经过修正后,误差由最高的 25.3% 降至 10.7%。以 23 棵苹果树、20 棵樱桃树为实验对象,对本文方法测量值与人工测量值

进行线性分析和显著性检验,结果表明二者之间有 较强的线性相关关系(R<sup>2</sup>为0.775、0.832)和较小 的差异(P为0.3898、0.6139)。

- 参考文献
- 王万章,洪添胜,李捷,等. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报,2004,20(6):98-101.
   WANG Wanzhang, HONG Tiansheng, LI Jie, et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies [J].
   Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 98-101. (in Chinese)
- 2 GIL E, ESCOLAÀ A, ROSELL J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors[J]. Crop Protection, 2007, 26(8):1287-1297.
- 3 吴亚垒,祁力钧,张亚,等. 基于驻波率原理的农药雾滴沉积量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(15):64-71. WU Yalei, QI Lijun, ZHANG Ya, et al. Design and experiment of pesticide droplet deposition detection system based on principle of standing wave ratio[J]. Transactions of the CSAE,2017, 33(15): 64-71. (in Chinese)
- 4 丁为民,赵思琪,赵三琴,等.基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(6):1-10,20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20160601&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/ j.issn.1000-1298.2016.06.001. DINC Weimin ZHAO Sigi ZHAO Sangin\_ et al Massurement methods of fruit tree eeners volume based on methion vicin [1/

DING Weimin, ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, et al. Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):1-10, 20. (in Chinese)

- 5 何诚,冯仲科,袁进军,等.基于数字高程模型的树木三维体积测量[J].农业工程学报,2012,28(8):195-199. HE Cheng,FENG Zhongke,YUAN Jinjun, et al. Three-dimensional volume measurement of trees based on digital elevation model [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(8):195-199.(in Chinese)
- 6 刘峰,龚健雅.基于机载激光雷达技术的茂密林地单株木识别[J].农业机械学报,2011,42(7):200-203,209. LIU Feng,GONG Jianya. Individual trees recognition in dense forest based on airborne LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(7): 200-203,209. (in Chinese)
- 7 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.
- 8 王万章,洪添胜,陆永超,等.基于超声波优越感器和 DGPS 的果树冠径检测[J].农业工程学报,2006,22(8):158-161. WANG Wanzhang, HONG Tiansheng, LU Yongchao, et al. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(8):158-161. (in Chinese)
- 9 BREIDENBACH J, NÆSSET E, LIEN V, et al. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(4):911-924.
- 10 CHASMER L, HOPKINSON C, TREITZ P. Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne and ground-based lidar data for red pine and mixed deciduous forest plots [J]. International Archives Photogramm Remote Sens Spat Information: Science, 2004, 36(8): W2.
- 11 HILKER T, LEEUWEN M V, COOPS N C, et al. Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand [J]. Trees-Structure and Function, 2010, 24(5):819-832.
- 12 WEZYK P. The integration of the terrestrial and airborne laser scanning technologies in the semi-automated process of retrieving selected trees and forest stand parameters [J]. Ambiência, 2012, 8 (Especial):67 - 80.
- 13 MURGOITIO J, SHRESTHA R, GLENN N, et al. Airborne LiDAR and terrestrial laser scanning derived vegetation obstruction factors for visibility models[J]. Transactions in GIS, 2014, 18(1):147 - 160.

- 14 LOVELL J L, JUPP D L B, CULVENOR D S, et al. Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian Forests[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2003, 29(5):607-622.
- 15 LEFSKY M A, COHEN W B, ACKER S A, et al. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(3):339-361.
- 16 JENNINGS S B, BROWN N D, SHEIL D. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures [J]. Forestry, 1999,72(1):59-74.
- 17 骆志高,李旭东,赵俊丽,等.利用马氏距离判别法准确实现对裂纹的识别[J].振动与冲击,2013,32(21):186-188. LUO Zhigao,LI Xudong,ZHAO Junli, et al. Crack identification with mahalanobis distance discrimination method[J]. Journal of Vibration and Shock,2013, 32(21):186-188. (in Chinese)
- 18 LI N, GRIFT T E, YUAN T, et al. Image processing for crop/weed discrimination in fields with high weed pressure [C] // 2016 ASABE Annual International Meeting, ASABE Papers 162460475,2016.
- 19 GANESAN P, RAJINI V, RAJKUMAR R I. Segmentation and edge detection of color images using CIELAB color space and edge detectors [C] //2010 International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies, 2010: 393 - 397.
- 20 李飞,薛彬,黄亚楼.初始中心优化的 K-means 聚类算法[J]. 计算机科学, 2002, 29(7):94-96.
   LI Fei,XUE Bin,HUANG Yalou. K-means clustering algorithm with refined center[J]. Computer Science, 2002, 29(7):94-96.
   (in Chinese)
- 21 CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,8(6):679-698.
- 22 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):25-29. ZHANG Fugui, HONG Tiansheng, XIAO Lei, et al. Detection mechanism for fruiter crown diameter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):25-29. (in Chinese)
- 23 WHEATON T A, TUMBO S D, WHITNEY J D, et al. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(3):367 - 372.
- 24 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/OL].农业机械学报,2013,44(8):229-233.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20130839&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/j. issn. 1000-1298.2013.08.039.

WANG Jia, YANG Huiqiao, FENG Zhongke. Tridimensional green biomass measurement for trees using 3D laser scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):229 - 233. (in Chinese)