

基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究

丁为民^{1,2} 赵思琪^{1,2} 赵三琴^{1,2} 顾家冰^{1,2} 邱威^{1,2} 郭彬彬^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031)

摘要: 针对人工测量精度低、费时费力,而基于三维激光扫描技术、超声波技术等自动测量方法成本高、操作复杂的不足,提出了基于机器视觉的果树树冠体积测量方法,搭建了可移植性果树树冠体积自动测量平台。基于机器视觉实现待测树冠图像获取,通过图像处理算法获得树冠图像面积特征,并采用最小二乘法和五点参数标定法获得普适性树冠面积与体积相关关系模型,从而得到树冠体积,通过对梨树以及桂花树样本的试验,可以发现预测树冠体积平均误差分别为 13.73% 和 10.18%。对于不具备系列样本无法构建模型的树冠,采用单点测量法,根据树冠轮廓拟合椭球结构体,然后根据体积求算补偿公式,完成体积测量,测量误差在 10% 左右。表明树冠形态特征的图像提取算法可行有效,通过面积以及轮廓特征量均能很好地表达树冠体积特征。

关键词: 果树树冠; 机器视觉; 体积测量; 图像处理; 参数标定; 面积特征; 轮廓特征

中图分类号: TP391.4; S758 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0001-10

Measurement Methods of Fruit Tree Canopy Volume Based on Machine Vision

Ding Weimin^{1,2} Zhao Siqi^{1,2} Zhao Sanqin^{1,2} Gu Jiabing^{1,2} Qiu Wei^{1,2} Guo Binbin^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Engineering Laboratory of Modern Facility Agricultural Technology and Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: There were some problems of artificial and sensor measurement for tree canopy volume, such as inefficiency, low precision, high cost, complex operation. In order to solve those problems, a new measurement method based on machine vision was proposed. The previous research indicated that there was significant correlation between tree canopy area and canopy. Based on this, the new method was proposed. Firstly, tree canopy image was obtained by machine vision according to the set standards. Secondly, tree canopy area was extracted by using a series of image processing operations. Meanwhile, the least square method and the 5-point calibration method were used to obtain the model of tree canopy volume. Finally, the corresponding volume was got. Experimental result showed that the average prediction error of the model of pear tree and *Osmanthus fragrans* were 13.73% and 10.18%, respectively. In view of the conditions of tree canopy, the structure estimation method was used to fit ellipsoid structure according to the contour of tree canopy that without a series of samples. Then, the volume of tree canopy was got by the compensation formula. Experimental result showed that the average prediction error of the model of peach trees and *Osmanthus fragrans* was about 10%. Consequently, characteristics extraction method of fruit tree canopy images was effective and feasible. The tree canopy volume characteristics can be perfectly expressed by tree canopy area and contour.

Key words: fruit tree canopy; machine vision; volume measurement; image processing; parameter calibration; area characteristic; contour characteristic

引言

树冠是影响果树生产性能的重要器官,其生长状况直接影响着果实的产量和质量^[1-6]。而树冠体积是评价树型结构和测产的重要指标^[7-8]。该指标在果树育种、测产以及果树精细管理中具有极其重要的参考价值^[9-12]。

传统手工测量方法多使用皮尺、测高仪等测绘工具,获得冠幅、冠径、冠高等树冠因子,根据几何形状体积公式求得树冠体积。该方法操作简单,但测量精度较低,而且其测量稳定性易受人主观因素影响^[13]。随着三维激光扫描技术、超声波技术以及雷达技术的快速发展,已有一些将这些技术用于果树树冠体积测量的研究^[14-20]。上述研究很好地解决了人工测量精度低、精度稳定性差的问题,有效促进了果树树冠体积测量的自动化水平。但是这些研究都是通过激光扫描等测量技术获得树冠点云数据,然后根据切片法^[21-22]原理,在不同高度等间距建立切片面,根据不同切片面上的点云数据,求出每个切面冠层的投影面积并乘以间距得到冠层体积,然后将各个冠层体积累加得到树冠体积。这种测量模式为获得大量树冠三维点云数据,需要多位布点采集或者环绕扫描采集,使得操作更为复杂,而且大量的点云数据处理严重影响该模式的测量效率。对于树冠而言其树形和树叶密度不一,冠体内会有孔隙存在,采用切片和叠加求体的方法,默认了每个冠层

为密实体,从而会引起测量误差。为了克服上述测量方法的弊端,本文提出基于机器视觉的果树树冠体积测量方法。该方法通过获得一幅树冠图像,由图像处理算法获得树冠面积,然后根据树冠面积与体积相关模型,快速得到相应体积。用树冠图像二维数据代替三维点云数据处理,解决数据量过大、处理效率低的问题。通过构建树冠面积与体积相关关系模型以及树冠体积求算补偿模型,解决树冠体积求算中孔隙误加的问题。文献[23]中虽然通过机器视觉对农作物的几何特征测量做了研究,但是仅仅做了定量分析,缺乏对其内部规律以及模型普适性的探讨。本文采用文献[24]中所提出的五点参数标定模型的方法,对已有体积预测模型进行参数标定,以期提高模型的构建效率和普适性。

1 材料和方法

1.1 果树样本选取

本文所提测量方法的研究和平台的搭建,主要以梨树和桂花树作为研究对象。梨树样本采自于南京农业大学江浦实验农场(2015年9月20日);桂花树样本采自于南京农业大学工学院(2015年10月24日)。分别采样30棵和26棵,所样本基本反映了整个树种当前生长状况,避免了样本过度集中,由图1可以看出所选果树样本树冠面积呈现正态分布趋势,表明所采取的样本具有统计学意义。

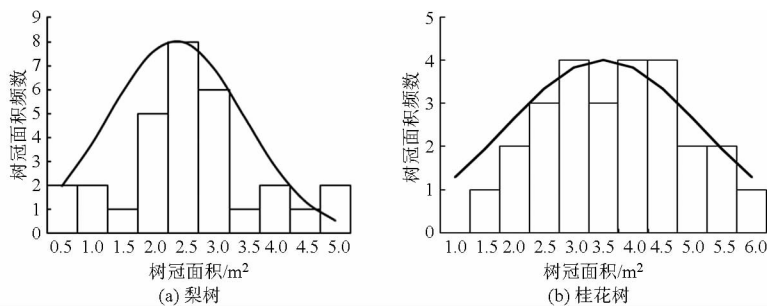


图1 果树样本树冠面积频数分布直方图

Fig. 1 Histogram distribution of canopy area from fruit tree samples

1.2 树冠图像获取

根据1.1节完成样本选取后,进行树冠图像的采集。用佳能EOS 350D(REBEL XT)型相机人工智能自动对焦模式进行图像采集,图像大小为3 456像素×2 304像素。在其拍照对侧离树1 m左右布置(5 m×5 m)无反光白色条绒布做背景(消除非目标物),采集时相机装于云腾VCT-880型三角架上,利用水平仪调节相机,使得镜头与树干垂直,所得图像要求包括完整的树冠外形,树冠以占据整个采集图像的1/2及以上为标准,同时用超声波测距

传感器测出相机测量点与树冠之间的垂直距离,采集图像时为减少阳光对图像质量的影响,选择阳光较弱时间段进行作业,光照度在20 000~50 000 lx;光照度在20 000 lx以下,相当于阴天环境,此时在相机闪光灯模式下完成采样。

1.3 技术原理图

本文所提树冠体积测量方法由3部分组成,包括图像获取模块、图像处理模块、模型构建模块。如图2所示,首先根据样本选择标准以及采样标准获取理想果树树冠,然后由图像处理算法对样本进行

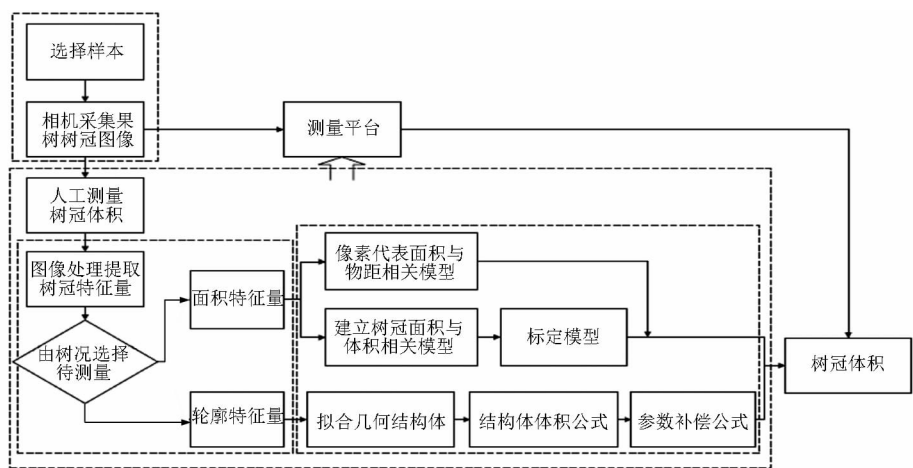


图 2 果树树冠体积测量原理图

Fig.2 Schematic chart of fruit tree canopy volume measurement

处理,提取特征量。在此根据测量需求,本文提出 2 种测量方案,基于面积特征量的多点测量法以及基于轮廓特征量的单点测量法。其中多点测量法通过建立普适性面积与体积相关关系模型完成测量。单点测量法,通过构建拟合结构体,以结构体的体积近似代替对应树冠体积,完成测量。将上述 3 个模块融合,构建以计算机或者手机为平台的自动测量设备,只需按照设定标准输入任意树冠图像,便可以迅速得到其对应树冠体积,操作简单,测量快速。

1.4 实验平台

本研究的实验计算机运行平台如图 3 所示,主机配置:系统选用 Thinkpad E420 笔记本主板,英特尔 Core i3 处理器,内存 2 GB,硬盘 320 GB,大容量锂电池供电,Windows 7 操作系统。测距模块:选用 LM-040-050-DAC 型超声波测距传感器,测量范围为 0.3~5 m,供 12~24 V 直流电压,用以测量目标树冠与镜头之间的距离。图像获取模块:佳能 EOS 350D (REBEL XT),800 万像素,自动对焦模式下进行图像采集,USB 2.0 标准接口输出,与计算机进行数据连接。水准仪用以调节镜头主光轴在水平面上。支撑架:云腾 VCT-880 三角调节架,用于支撑计算机和处理平台。运行环境:32 bit Windows 7 操作系统,OpenCV 2.4.10,VS 2010,QT 5.3.2。

基于安卓设备运行平台,运行配置:四核 1.6 GHz,存储器 4 GB,内存 512 MB,系统 Android 4.0 以上触屏智能机。测距模块同计算机平台。根据目标树冠尺寸,可以选择性的择取高度调节装置。运行环境:Android 4.0 操作系统,OpenCV 2.4.10,QT for Android 5.3.2。

2 树冠特征提取

为了高效准确提取树冠面积和轮廓特征,对图

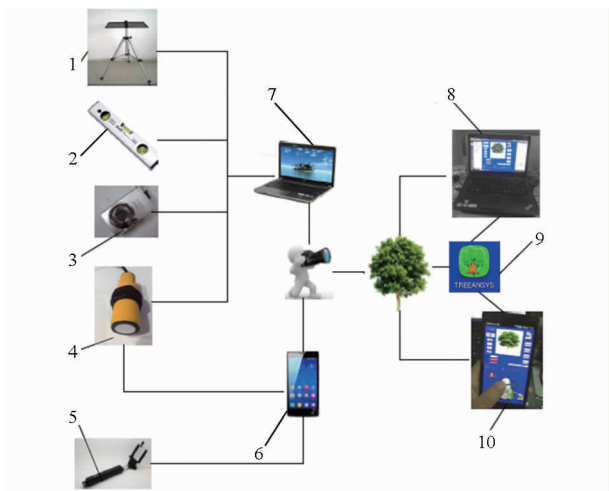


图 3 测量系统硬件需求图

Fig.3 Hardware requirements graph of measurement system

- 1. 水平调节支架 2. 水平仪 3. 照相机 4. 超声波传感器
- 5. 高度调节器 6. 触屏手机平台 7. 计算机 8. 计算机上处理软件运行
- 9. 所开发可移植处理软件 10. 手机平台处理软件运行

像特征提取算法进行探索和研究。图像算法处理过程包括:滤波、图像分割、灰度化、二值化、开运算、非目标物剔除、特征提取等一系列处理。本文采用 OpenCV 2.4.10、VS 2010 和 QT 5.3.2 作为编写和调试软件。

2.1 图像分割

图像分割是上述一系列图像处理过程中,最为关键的一个环节,其分割结果直接影响后期图像特征提取的准确性。图像分割是指根据灰度、颜色、纹理和形状等特征把图像划分成若干互补交迭的区域,并且在同一区域内特征呈现相似性,不同区域之间存在明显差异性。

在此根据所研究对象(果树树冠),对多种图像分割算法进行研究和比较,其中包括基于阈值、基于边缘、基于区域、基于图论、基于能量泛函的分割算法,最终选择基于图论的 GrabCut 分割算法。该算

法把图像分割问题与图的最小割问题相关联,通过非完全标记的方式,取代了传统分割算法的前景和背景灰度直方图模型,而对前景、背景颜色空间建立 RGB 三通道的高斯混合模型 (Gaussian mixture model, GMM),比灰度直方图模型获得更丰富的信息,且 RGB 颜色空间的算法不需要再进行颜色空间转换,提高了算法的运行效率和分割准确性。利用 K-means 算法初始化 GMM,分别计算节点到前景或者背景的距离以及相邻节点之间的距离,从而获得分割能量权重,对未知区域构造 s - t 网络图,接着用最大流-最小割算法对其进行切分。该算法通过迭代不断更新、修正 GMM 参数,从而完成分割能量最小化,实现图像分割。

输入一幅 $x_i (i = 1, 2, \cdots, N)$ 维数的图像 $\mathbf{x} = (x_1, \cdots, x_n, \cdots, x_N)$,每个像素点用一个具有 K 个高斯分量 (一般取 $K = 5$) 的全协方差 GMM (混合高斯模型) 来表示, $\mathbf{k} = \{k_1, \cdots, k_n, \cdots, k_N\}, k_n \in \{1, 2, \cdots, k\}$, 其高斯混合模型 (GMM) 为

$$D(\mathbf{X}) = \sum_{i=0}^K \pi_i g_i(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i) \left(\sum_{i=1}^k \pi_i = 1, 0 \leq \pi_i \leq 1 \right) \tag{1}$$

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^d |\boldsymbol{\Sigma}|}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \right) \tag{2}$$

式中 π ——每一个高斯分量的权重
 $\boldsymbol{\mu}$ ——每一个高斯分量的均值向量
 $\boldsymbol{\Sigma}$ ——每一个高斯分量的协方差矩阵

本分割算法 RGB 空间中,衡量两像素的相似性采用欧氏距离,聚类准则采用最小距离原则。其分割结果如图 4 所示。

2.2 面积特征提取

多点测量法的核心是找到树冠面积与体积之间

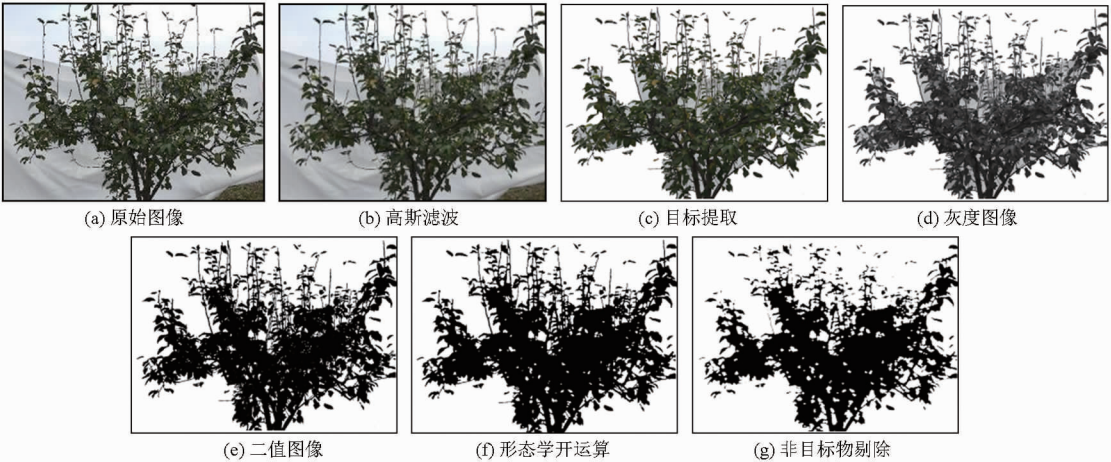


图 5 果树树冠图像面积特征提取

Fig. 5 Characteristics extraction from fruit tree canopy images



图 4 不同树冠图像分割结果

Fig. 4 Segmentation results of different tree canopy images

的变化规律,并构建相关关系模型,因而对面积特征的提取精度要求较高。如图 5 所示,为精确提取树冠面积特征,程序以 OpenCV 2.4.10 和 VS 2010 软件编写和调试,采用图像降噪处理、图像分割、图像灰度化、图像二值化、开运算、非目标物剔除等一系列图像处理过程。其中二值化阈值采用大津法 (Otsu) 自动获取,鉴于果树树叶拟合轮廓大都呈现椭圆类型,所以在开运算中结构元素选择椭圆结构 (MORPH_ELLIPSE),以方便非目标物体的剔除和防止目标物的误删。最后对图 5g 进行像素遍历,此时所得图像灰度值只有 0 和 1,目标图像灰度值为 0 是黑色,非目标物灰度值为 1 是白色;将灰度值为 0 的像素个数相加,最终得到目标树冠所包含的像素总量,进而得到其面积。

2.3 轮廓特征提取及结构体构建

宏观上看果树树冠的形状多种多样,从长势上可分为:稀疏型和密实性;从几何结构上可分为:球

型、柱体形、倒锥体、椭球形等。如图 6 所示,图中 x,y,z 为空间坐标系,其中 $2a,2b,2c$ 分别是椭球的长轴、中轴、短轴长度。本研究以椭球型几何结构来代替不同几何结构树冠,通过相关图像算法获得目标树冠外轮廓特征,然后由 CvBox2D 结构体通过拟合函数返回最接近轮廓的椭圆,得到长轴尺寸、短轴尺寸、以及椭圆率,根据椭圆率的大小选择合适公式,其中对于短半轴 c 和中半轴 b ,如图 7 所示,经过对 30 棵梨树、26 棵桂花树样本的实地测量,可以发现两者比值基本在 1 左右,有较强的 1:1 关系,因此在此研究中,默认短半轴 c 与中半轴 b 相等,其间的损失或额加,通过参数 k 进行补偿和修正。

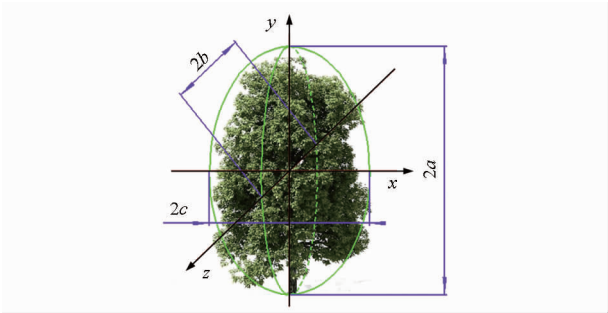


图 6 树冠拟合椭球体
Fig. 6 Crown fitted ellipsoid

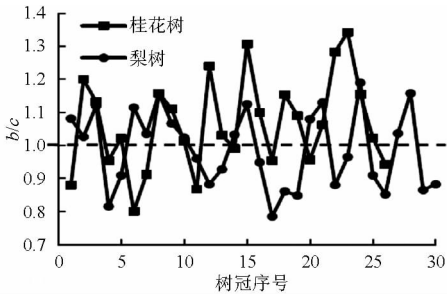


图 7 人工测量果树样本中半轴 b 与短半轴 c 的比值
Fig. 7 Ratio of b and c from artificial measured fruit tree canopy samples

根据这一测量思想,进行相关图像处理算法,处理结果如图 8 所示。

3 方法适用性研究

3.1 单位像素代表实际面积与测量距离相关关系

通过图像分析算法,所得到目标树冠面积以及几何特征量都是以像素量来表示,所以在计算实际尺寸时需要知道不同拍摄距离下每个像素所代表的实际面积。将试验中每个树冠对应的采样距离下所得到的像素所代表实际面积与采样距离制作散点图,可以发现像素所代表实际面积与采样距离之间具有明显的幂函数关系。因为存在这种幂函数关系,在以后测量时,随着距离的改变不再需要进行标定板的每次标定,由此笔者用黑色硬纸板 $200\text{ mm} \times$

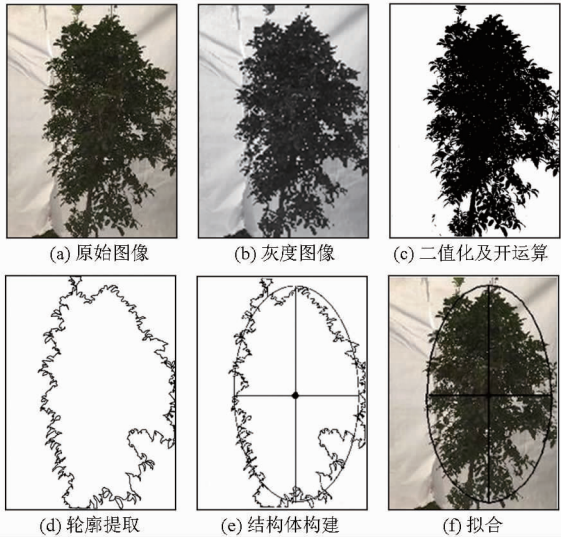


图 8 桂花树树冠图像几何特征提取
Fig. 8 Characteristics extraction from osmanthus tree canopy images

150 mm 作为标定物,在同样的相机自动对焦模式以及树冠样本所处环境下,距离硬纸板 600 mm 处进行第一次拍照,然后依次后退 100 mm 拍照 1 次,连续取样 37 张,经过 OpenCV 图像软件处理得到每个采样距离下硬纸板所包含像素量,从而计算出该距离 L 时像素所代表的实际面积 A ,如图 9 所示,用最小二乘法,完成模型构建。

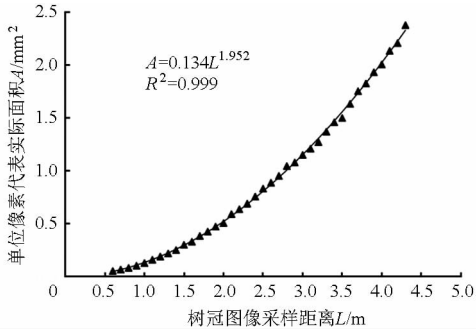


图 9 单位像素代表面积与测量距离之间相关关系
Fig. 9 Correlation between pixel area and measurement distance

3.2 2 种测量方法适用对象分析

不同测量方法都存在自己的适用范围,只有根据测量对象,分类建模,分类计算,选择合适的测量方法才能获得理想的测量精度。对于 1.3 节提出的 2 种体积测量方法,由表 1 可以看出,对于多点测量法,其核心思想是以面积求体积,即通过建立普适性的树冠垂直投影面面积与体积之间的相关模型,来完成体积测量。该方法最主要是树冠的面积体征,因此不受树冠密实度、树冠形状和树冠品种的影响。但是,此方法因为要建立面积与体积相关模型,所以需要系列性的果树样本,从而使得该方法不适用于单棵或者样本量较少的果树,因此提出了单点测量

法。单点测量法其核心思想是根据树冠轮廓拟合结构体,根据结构体方程计算对应体积。因为此方法,最终拟合为一个实体椭球,所以此方法会受树冠密实度和树冠形状的影响较大。对于密实性的树冠比较适用,对于疏散型的具有明显枝干骨架的树冠会产生较大的误差。

3.3 多点测量树冠面积与体积相关关系

由上文中所提及图像处理算法、人工椭球形体积测量方法以及相机像素与实际面积之间的关系模型对所采集的 30 棵梨树样本和 26 棵桂花树样本进行数据处理,基于最小二乘法完成树冠垂直投影面积 S 与树冠体积对数 $\ln V$ 间的模型构建。从图 10 中可以得知,2 种不同长势,不同品种的树冠,其 S 与 $\ln V$ 之间决定系数都在 0.90 以上,说明面积与

体积的对数之间具有明显的相关性,同时也表明 S 与 $\ln V$ 之间的这种线性关系规律在不同树种之间是成立的。但是,快速得到这一普适性预测体积的线性回归模型是问题的关键,即斜率和截距被快速确定。根据文献[24]所提出方法,引入五点参数校准模型,并根据线性关系对模型进行校正。采用该方法的重要一点在于,选择的 5 个样本必须均匀分布在整个样本规模内(以果树树冠中心部位冠幅直径 D 作为选择标准,首先选取该果园内 D 值最小的果树作为样本点 1,然后以 D 值依次增长 20% ~ 30% 取样,选取同一果园内 5 个相同品种的果树样本点)。比较图 10 和图 11 可以发现,2 种方法所建模型中参数值变化不大,而且五点标定模型其相关性更强。

表 1 不同测量方法适应范围

Tab.1 Range of different measurement methods

测量方法	所测特征量	适用范围	适用季节和生长期	代表果树
多点测量	面积	密实型及疏散型类旋转体,需要系统性样本量	一年四季,各生长期	柿子树,桂花树,橙子树,梨树,苹果树等
单点测量	拟合结构体尺寸	密实性类旋转体,枝干骨架结构不明显,单株样本	夏季及秋季前期,果树生长茂盛和开花结果期	桃树,柿子树,橙子树,桂花树,石楠树等

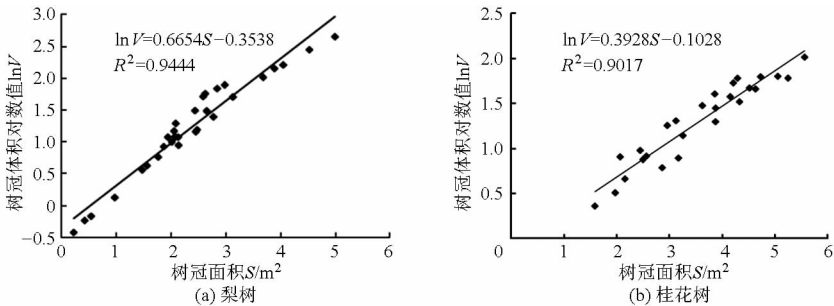


图 10 树冠体积对数与面积之间相关关系

Fig. 10 Relationships between logarithmic of tree canopy volume and area

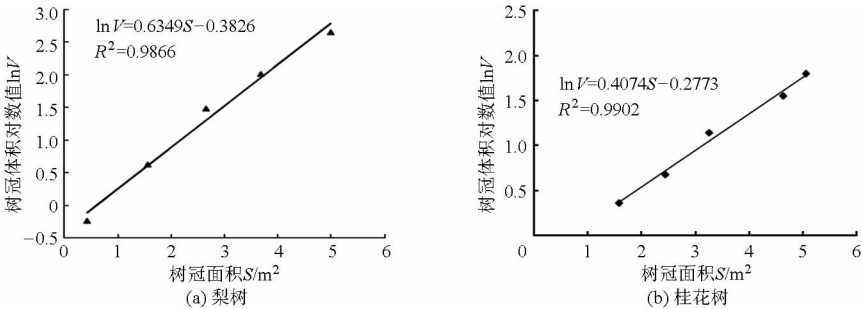


图 11 五点标定模型

Fig. 11 Five-point calibration models

3.4 单点测量法的参数补偿研究分析

单木特征提取测量法,其使用方法简单,适合不成体系的果树的体积测量,以单个样本作为一个基元模型,其测量结果不受其他样本的影响,相比多点测量法更加直接。但是由 3.2 节知,这种方法存在

特定的适用范围,面对疏散型多枝干骨架类的树冠,测量精度将受到很大影响,因此对其测量公式以及参数补偿方面进行分析。

椭球结构体体积基础公式

$$V = \frac{4\pi}{3}abc$$

(3)

式中 V ——树冠体积, m^3

由 2.2.2 节研究分析得,此测量方法中把拟合椭球的中半轴 b 和短半轴 c 相等处理,则式(3)变成

$$V = \frac{4\pi}{3}ac^2 \tag{4}$$

用式(4)对 26 组样本进行体积求算,其测量误差如图 12 所示,可以发现误差浮动很大,而且有一些样本误差超过 50%,显然用式(4)进行直接求算是科学的。

对上述问题,分析原因,基础式(3)中有 3 个参数 a 、 b 、 c ,误差来自这 3 个参数,由于果树是一个类旋转体,但是在此测量方法中默认为旋转体,即拟合椭圆中半轴 b 和短半轴 c 相等;对于长半轴 a ,由于人工测量长度与图像处理拟合长度之间的误差,两种误差通过乘积向测量值进行传递,从而导致测量值的额加或者误减,为消除对测量结果的影响,在此对式(4)增加参数 k 进行修正和补偿。求算式(4)变成

$$V = \frac{4\pi}{3}kac^2 \tag{5}$$

如图 13 所示,经过对 26 组树冠数据的研究和分析发现,当 $a/b + b/c$ 的值越接近 2.354 时(虚线对应主纵坐标轴数值),测量误差呈现减小的趋势。即各参数存在关系

$$\frac{a}{b} + \frac{b}{c} = 2.354 \tag{6}$$

由于本方法研究求算中默认 $b \approx c$,则式(6)转换为

$$\frac{a}{c} = 1.354 \tag{7}$$

则补偿参数 k 表示为

$$k = \begin{cases} 2.354 - \frac{a}{c} & \left(\frac{a}{c} > 1.354 \right) \\ \frac{a}{c} - 0.354 & \left(0 < \frac{a}{c} \leq 1.354 \right) \end{cases} \tag{8}$$

将式(8)代入式(5)可得参数补偿后体积计算公式为

$$V = \begin{cases} \frac{4\pi}{3} \left(2.354 - \frac{a}{c} \right) ac^2 & \left(\frac{a}{c} > 1.354 \right) \\ \frac{4\pi}{3} \left(\frac{a}{c} - 0.354 \right) ac^2 & \left(0 < \frac{a}{c} \leq 1.354 \right) \end{cases} \tag{9}$$

用式(9)重新计算 26 组样本树冠的体积,并将误差与式(4)所得结果进行对比,结果如图 14 所示,可以发现参数补偿后误差值有明显改善,波动性明显降低,表明了参数补偿的可行性和有效性。

同时从图 14 中发现,对于树冠组 22 号、23 号,

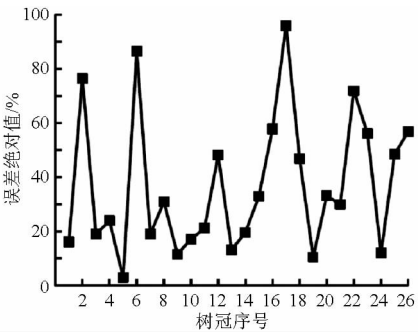


图 12 测量误差

Fig. 12 Measurement error

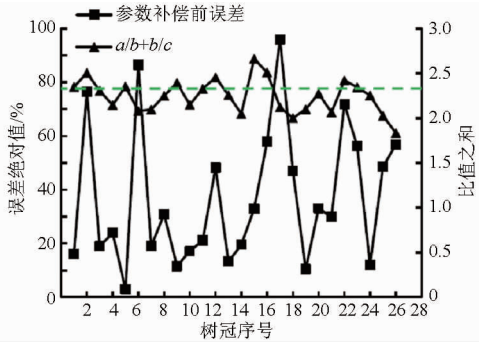


图 13 误差及 a/b 与 b/c 之和的分布图

Fig. 13 Distribution of error and $a/b + b/c$

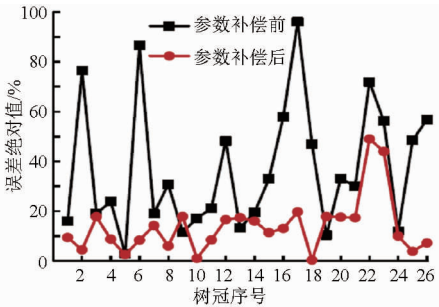


图 14 参数补偿前后误差对比

Fig. 14 Error comparison before and after parameters compensation

虽然误差有一定的改善,但是仍然大于一般水平。在此将以上 2 组树冠单独分析。如图 15 所示为 2 组树冠的原图和拟合几何图,从图中可以发现这两组树冠样本树冠外形都呈现一种倒锥体模型,树冠下部冠层庞大,而通过对梨树、苹果树、桂花树等多种果树的勘察可以发现一般树冠以中间冠层尺寸最大,所以 22 号与 23 号树冠不太符合常规的果树形态,以至于用同样的方法进行计算时出现较大的误差。

针对这种类型树冠,在运用图像处理的方法拟合出轮廓椭圆结构体后,再拟合出轮廓最小外接矩形,并得到其对应树冠高度的边长尺寸 g 以及其与拟合椭圆长轴 $2a$ 的比值 h 。即

$$h = \frac{g}{2a} \tag{10}$$



图 15 22 号和 23 号树冠拟合椭圆以及外接矩形
Fig. 15 Fitted ellipse and external rectangle of Nos. 22 and 23 tree canopy

则
$$V_1 = hV = \frac{g}{2a}V \quad (0 < h < 1) \tag{11}$$

将式(9)代入式(11)中即可得

$$V_1 = \begin{cases} \frac{2\pi}{3} \left(2.354 - \frac{a}{c} \right) gc^2 & \left(\frac{a}{c} > 1.354 \right) \\ \frac{2\pi}{3} \left(\frac{a}{c} - 0.354 \right) gc^2 & \left(0 < \frac{a}{c} \leq 1.354 \right) \end{cases} \tag{12}$$

式中 V_1 ——倒锥体型树冠体积
 g ——树冠高度

运用式(12)再次对 22 号与 23 号树冠进行体积计算并计算误差,然后重新绘制 26 组树冠的体积在参数补偿前后误差对比,如图 16 所示,可以发现 22 号和 23 号树冠误差明显减小,基本回归正常水平。

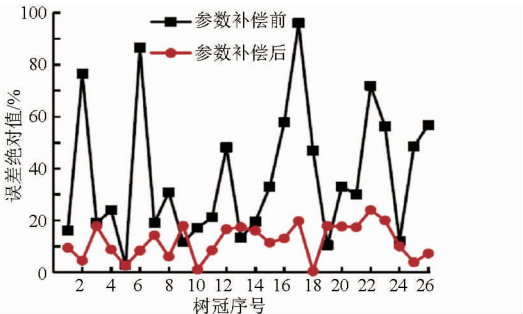


图 16 最终误差对比
Fig. 16 Comparison of final error

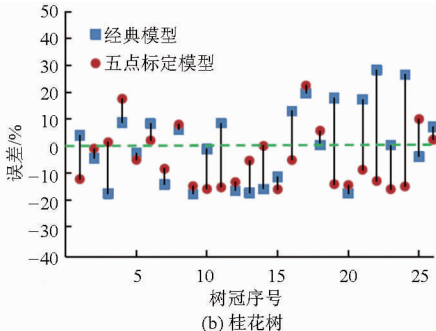
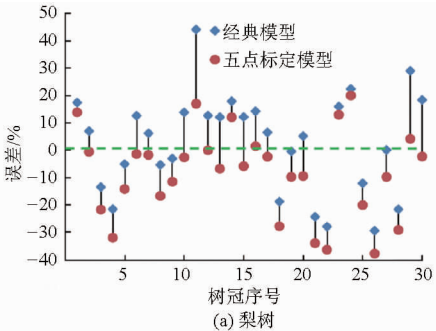


图 17 2 种模型误差比较
Fig. 17 Error comparison of two models

4 实验结果与分析

4.1 多点测量法精度分析

提出了 2 种建模的方法,分别是经典模型(通过大量样本所构建模型)和五点标定模型。为探讨 2 种模型的实用性,对 2 种模型的测量精度进行对比分析,测量精度公式为

$$E = \frac{|V_A - V_H|}{V_H} \times 100\% \tag{13}$$

式中 E ——模型测量精度, %
 V_A ——模型计算结果, m^3
 V_H ——手工测量结果, m^3

使用 2 种模型,对 30 组梨树树冠和 26 组桂花树树冠体积进行求算,并对其精度和效率进行对比分析,图 17 为 2 种模型误差比较,表 2 给出了 2 种体积预测模型在不同预测误差区间内的样本量占总样本的概率统计情况。

由图 17 可得,2 种模型所求算树冠体积,其误差的波动性基本一致,具有较高的吻合性,这是因为 2 种模型的核心规律一致,区别只是在模型的参数值上。而且从 2 种样本测量误差分布可以看出,对于类似桂花树这样密集型的树冠,2 种模型测量稳定性更强,这是由于密集型的树冠形状更为规则,其面积与体积之间的相关关系适用性更好,而且人工

方法测量体积中人为的主观因素降低,从而使得模型的精度更高一些,更稳定一些。

表 2 树冠体积预测模型误差统计
Tab.2 Model error statistics of tree canopy volume prediction

品种	模型预测误差	经典模型	五点标定模型
	区间/%	体积/%	体积/%
梨树	10.00	36.67	50.00
	20.00	73.33	73.33
	30.00	93.33	86.67
	40.00	100	100
	平均误差	14.59	13.73
桂花树	10.00	46.15	46.15
	20.00	92.31	96.15
	30.00	100	100
	平均误差	11.81	10.18

为验证 2 种模型的有效性,将经典模型计算体积与五点标定模型法求算的体积进行误差区间分布统计。表 2 给出了 2 种体积预测模型在不同预测误差区间内的样本量占总样本的概率统计情况。从表中可以看出,2 种模型对梨树样本和桂花树样本体积测量误差基本都在 30% 以内,用经典模型所计算梨树和桂花树样本平均误差分别为 14.59% 和 11.81%,而用五点标定模型所计算体积平均误差分别为 13.73% 和 10.18%,都限制在 15% 以内,说明了 2 种模型具有很好的测量效果和适应性。但是五点标定模型比经典法模型构建更迅速,而且表现出了更高的精度,说明提出将图像分析和五点标定模型集成进行树冠体积快速测量的可行性和有效性。此外,五点模型中的参数可以随着果树品种的不同、环境的改变、季节的更替等其他外界因素的变化做出相应调整,使用仪器参数标准方法来进行参数校准,得到普适模型,充分发挥了跨学科的优势互补性。

4.2 单点测量法精度分析

从 3.2 节中可知,此方法比较适合长势密集型树冠,而且不受系统样本量的影响。通过对 26 组桂花树冠的求算,表 3 给出了该方法体积测量的误差区间概率统计情况。

通过对比表 3 和表 2 可以得出单点测量法可行度很高,虽然误差方面略微高于多点测量法的 11.81%,但是此方法不需要系统的样本量去构建预测模型,而且是以单个样本为对象,其测量结果不受其他同品种样本的影响。该方法的提出,成功地弥补了多点测量法的缺陷,提高了果树树冠体积测量方法的适用性和灵活度。

表 3 单点测量法体积预测误差统计
Tab.3 Model error statistics of tree canopy volume prediction of single-point measurement method

品种	模型预测误差	长半轴	短半轴	体积/
	区间/%	a/%	c/%	%
桂花树	10.00	50.00	57.69	42.31
	20.00	80.77	84.62	84.62
	30.00	100	100	100
	平均误差	13.03	11.99	12.82

图 18 给出了 3 种不同品种、不同冠型、不同生长环境下的 3 组树冠以及其结构体构建。表 4 给出了上述 3 种类型树冠的测量误差,其测量误差均在 8% 以内。可以得知对这类密集型的树冠,单点测量法表现出了很好的适应性。

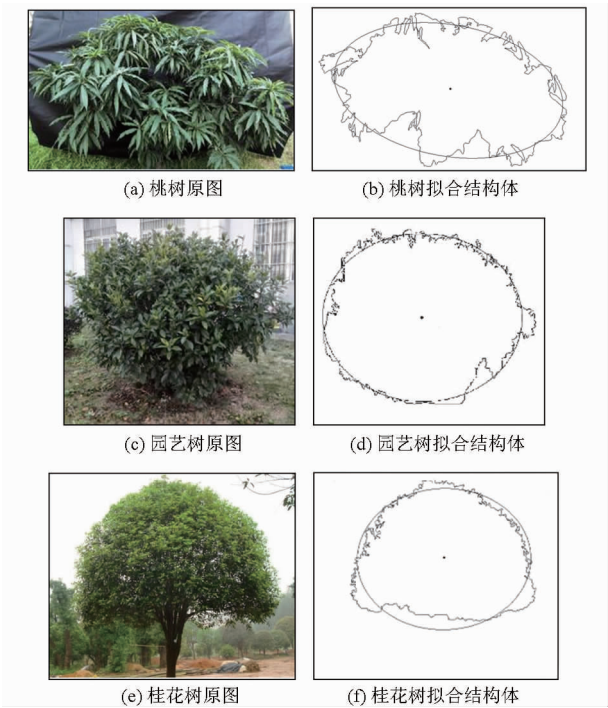


图 18 不同类型树冠结构体
Fig. 18 Structure of different types of tree canopy

表 4 不同类型树冠测量误差
Tab.4 Measurement error of different types of tree canopy

品种	人工测量体积/m ³	预测公式计算体积/m ³	误差/%
桃树	2.064	2.207	6.93
园艺树	1.661	1.757	5.78
桂花树	4.827	5.172	7.15

5 结论

- (1)提出了 2 种基于机器视觉的果树树冠体积测量方法:单点测量法和多点测量法,2 种方法测量误差均 15% 以内,精度可以达到 85% 以上。
- (2)多点测量法适用范围更为广泛,构建了树冠面积与树冠体积对数之间的线性相关关系模型,

决定系数均在 0.90 以上,通过对不同果树的测量发现,不同果树品种、不同气候和不同生长期中的差异主要体现在线性模型的斜率和截距上,表明树冠面积特征方法提取合适有效以及此线性关系规律具有普遍性。引入了参数标定的方法,构建了五点标定模型,可以根据不同的外界因素,快速对模型进行修

正,确保体积测量精度的稳定性。

(3)单点测量法更加适用于长势密集型树冠,通过拟合特征结构体,用结构体体积代替树冠体积。提出了参数补偿的方法,弥补了体积计算公式的额加或者误减。

参 考 文 献

- 1 朱雪荣.不同修剪程度对盛果期苹果树生长结果的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
- 2 刘娟.轮台白杏树冠微气候与生长发育和产量品质的关系[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- 3 何凤梨,王飞,魏钦平,等.桃树冠层相对光照分布与果实产量品质关系的研究[J].中国农业科学,2008,41(2):502-507.
HE Fengli, WANG Fei, WEI Qiping, et al. Relationship between distribution of relative light intensity in canopy and yield and quality of peach fruit[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 502-507. (in Chinese)
- 4 杨振伟,周延文,付友,等.富士苹果不同树冠微气候特征与果品质量关系的研究[J].应用生态学报,1998,9(5):533-537.
YANG Zhenwei, ZHOU Yanwen, FU You, et al. Relationship between microclimatic character of different crown types and fruit quality of Fuji apple[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(5): 533-537. (in Chinese)
- 5 高梅秀,刘沛镇,任建新.桃树不同树形的光照分布与果实产量及品质的关系[J].中国果树,1992(4):10-13.
GAO Meixiu, LIU Peizhen, REN Jianxin. Relationship between distribution of relative light intensity and yield and quality in different tree shape for peach[J]. China Fruits, 1992(4): 10-13. (in Chinese)
- 6 WINDMER A, KREBS C. Influence of planting density and tree form on yield and fruit quality of "Golden delicious" and "Royal Gala" apples[J]. Acta Horticulture, 2001, 557: 235-241.
- 7 余雪标,徐大平,龙腾,等.连栽桉树人工林生长特性和树冠结构特征[J].林业科学,2000,36(1):137-142.
YU Xuebiao, XU Daping, LONG Teng, et al. Studies on the growth characteristics and the crown structure of eucalyptus plantation with the different continuous-planting rotation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 137-142. (in Chinese)
- 8 阮班琅,刘建海,李雪薇,等.乔砧苹果郁闭园不同改造方法对冠层光照和叶片状况及产量品质的影响[J].中国农业科学,2011,44(18):3805-3811.
RUAN Banlu, LIU Jianhai, LI Xuwei, et al. Effects of different thinning systems on light penetration, leaf characteristics and fruit quality in canopy overcrowd 'Fuji' apple orchard with standard rootstocks[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(18): 3805-3811. (in Chinese)
- 9 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.
- 10 俞龙,赵祚喜,洪添胜.果树冠层参数实时监测系统[J].农业机械学报,2009,40(增刊):194-197.
YU Long, ZHAO Zuoxi, HONG Tiansheng. Real time measuring system for fruiter canopy parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 194-197. (in Chinese)
- 11 王万章,洪添胜,陆永超,等.基于超声波传感器和DGPS的果树冠径监测[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)
- 12 ZAMAN Q U, SCHUMANN A W, MILLER W M. Variable rate nitrogen application in florida citrus based on ultrasonically sensed tree size[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 21(3): 331-335.
- 13 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)
- 14 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 Nina, 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)
- 15 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)
- 16 何城,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)

- JIANG Guoquan, KE Xing, DU Shangfeng, et al. Crop row detection based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 1015–1020. (in Chinese)
- 15 张志斌, 罗锡文, 李庆, 等. 基于良序集和垄行结构的农机视觉导航参数提取算法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 122–126.
ZHANG Zhibin, LUO Xiwen, LI Qing, et al. New algorithm for machine vision navigation of farm machine based on well ordered set and crop row structure[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 122–126. (in Chinese)
- 16 石磊, 赵春霞, 杨静宇, 等. 一种基于粒子群的道路检测新算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(3): 384–388.
SHI Lei, ZHAO Chunxia, YANG Jingyu, et al. New approach to road detection based on particle swarm optimization [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2010, 25(3): 384–388. (in Chinese)
- 17 林国余, 陈旭, 张为公. 基于多信息融合优化的鲁棒性车道检测算法[J]. 东南大学学报, 2010, 40(4): 771–777.
LIN Guoyu, CHEN Xu, ZHANG Weigong. Robust lane detection algorithm based on multiple information fusion and optimizations [J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(4): 771–777. (in Chinese)
- 18 钟玉琢, 乔秉新, 李树清. 机器人视觉技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 77–78.
- 19 林伟明, 胡云堂. 基于 YUV 颜色模型的番茄收获机器人图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 176–180.
LIN Weiming, HU Yuntang. Image segmentation method based on YUV color space for tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 177–180. (in Chinese)
- 20 熊俊涛, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于机器视觉的自然环境中成熟荔枝识别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 162–166.
XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, CHEN Lijuan, et al. Recognition of mature litchi in natural environment based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 162–166. (in Chinese)
- 21 刘健庄. 基于二维直方图的图像模糊聚类分割方法[J]. 电子学报, 1992, 20(9): 40–45.
LIU Jianzhuang. A fuzzy clustering method for image segmentation based on two-dimensional histogram[J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(9): 40–45. (in Chinese)
- 22 彭红星, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于双次 Otsu 算法的野外荔枝多类色彩目标快速识别[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 61–70.
PENG Hongxing, ZOU Xiangjun, CHEN Lijuan, et al. Fast recognition of multiple color targets of litchi image in field environment based on double Otsu algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 61–70. (in Chinese)
- 23 KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, 4: 1942–1948.
- 24 GEORGE E M, JOAO Camargo Neto. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 282–293.
- ~~~~~

(上接第 10 页)

- 17 李松, 张建瓴, 可欣荣, 等. 果树三维外形轮廓的仿真与重建[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(1): 94–98.
LI Song, ZHANG Jianling, KE Xinrong, et al. Simulation and reestablishment of the fruit-tree's three-dimensional profile surface [J]. Journal of South China Agricultural University, 2009, 30(1): 94–98. (in Chinese)
- 18 TUMBO S D, SALYANI M, 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.
- 19 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): 130–136.
PANG Yong, LI Zengyuan, CHEN Erxue, et al. Lidar remote sensing technology and its application in forestry [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(3): 130–136. (in Chinese)
- 20 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实验[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)
- 21 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): 1514–1518.
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): 1514–1518. (in Chinese)
- 22 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): 1798–1802.
KE Yinglin, WANG Qing. Research on point cloud slicing technique in reverse engineering [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(8): 1798–1802. (in Chinese)
- 23 孙诚达, 邱伟, 丁为民, 等. 农作物几何特征测量系统设计与实验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 1–10.
SUN Chengda, QIU Wei, DING Weimin, et al. Design and experiment for crops geometrical feature measuring system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 1–10. (in Chinese)
- 24 ZHAO Sanqin, GU Jiabing, ZHAO Youyong, et al. A method for estimating spikelet number per panicle: integrating image analysis and a 5-point calibration model [J]. Scientific Reports, 2015, 5: Article number 16241.