

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.002

基于图像处理与支持向量机的树上苹果早期估产研究*

程 洪^{1,2} Lutz Damerow³ Michael Blanke³ 孙宇瑞¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001; 3. 波恩大学农业工程学院, 波恩 53115)

摘要: 为了实现果树挂果期的精准管理, 针对树上苹果早期估产问题, 以“Gala”苹果为研究对象, 开展了对定果后的果树进行产量估测的研究, 提出了一种图像处理结合支持向量机的树上苹果早期估产方法。首先在苹果园内获取定果后的果树树冠图像, 此时的树上苹果颜色为绿色(本文称此时期为果树青果期); 采用分析图像各颜色分量值分布图法, 确定在 YCbCr 颜色空间中, 以 $C_b \leq 100$ 与 $C_r \geq 120$ 作为分割树冠图像中苹果的条件; 从果树树冠图像中提取果实个数、果实面积、果实树叶比、受遮挡果实个数比例及受遮挡果实面积比例; 以上述 5 个特征参数作为输入, 实际产量为输出, 利用支持向量机方法建立树上苹果早期估产模型。本文利用训练集(含 50 个样本)训练模型, 预测产量与实际产量的决定系数 R^2 达到了 0.724 2, 均方根误差 RMSE 为 1.71 kg, 平均绝对百分比误差 MAPE 为 9%, 平均预测误差 MFE 为 0.21。利用测试集(含 15 个样本)测试模型, 得到 RMSE 为 2.45 kg, MAPE 为 13%。结果表明该模型不仅具有较好的预测精度与无偏性, 且具有较好的鲁棒性, 所采用的树上苹果早期估产方法可行。

关键词: 苹果 早期估产 图像处理 支持向量机

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0009-06

Early Yield Estimation of ‘Gala’ Apple Trees Using Image Processing Combined with Support Vector Machine

Cheng Hong^{1,2} Lutz Damerow³ Michael Blanke³ Sun Yurui¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China
3. Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract: Early fruit-yield forecasting plays an important role in productive and sustainable management of apple orchards. This paper presents a method combining image processing with support vector machine (SVM) technology to build a prediction model for early season apple tree yield estimation. Sixty ‘Gala’ apple trees were randomly selected for study. Initially, tree canopy images were captured in natural light just after June drop when the fruit color was green. Apples in the canopy image were identified with the condition $C_b \leq 100$ and $C_r \geq 120$ obtained by analyzing the distribution map of color component values in YCbCr color space, in which Y was the luminance component, C_b and C_r were the blue-difference and red-difference chroma components. By the same method, the condition $C_r \leq 125$ was used to segment foliage from canopy image with fruit removed. Five characteristics were extracted from the canopy image: fruit total area, total number of fruit, proportion of fruit total area to foliage area, proportion of total fruit area shaded by leaves to total fruit area, and proportion of total fruit numbers shaded by leaves to total fruit number. Finally, the SVM method was employed to build a yield estimation model with these five

收稿日期: 2014-05-11 修回日期: 2014-06-11

* 国家自然科学基金资助项目(31371537)、保定市科学研究与发展计划资助项目(14ZN029)和河北省科技计划资助项目(13227431)

作者简介: 程洪, 博士生, 河北农业大学讲师, 主要从事机器视觉相关技术研究, E-mail: chenghong@cau.edu.cn

通讯作者: 孙宇瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事农业自动化研究, E-mail: pal@cau.edu.cn

characteristics as input parameters and the actual yield as output. A randomized sample set containing 50 trees was used to train the model, yielding a coefficient of determination (R^2) of 0.724 2, a root mean square error (RMSE) of 1.71 kg, a mean absolute percentage error (MAPE) of 9% and an average prediction error (MFE) of 0.21. Using 15 independent samples, the model was validated, yielding a RMSE of 2.45 kg and a MAPE of 13%. The proposed model showed significant potential for early apple yield prediction of individual trees with potential application to other fruit crops.

Key words: Apple Early yield estimation Image processing Support vector machine

引言

精细农业以节约投入、增加产出、提高投入物利用率、减少环境污染为目的,快速、准确地采集各种农田信息,有效地检测农业对象是实施精细农业的重要基础。这种“精细”的技术思想已经开始渗透到果园管理中。同一果园内,土壤、植物的特性并不均一,而是随着时间、空间变化的。若根据粗放的产量估测制定管理方式,不利于提高资源的利用率。因此需要根据果树的差异制定管理方案,真正提高果树种植的效率。在具体实施过程中,单株果树早期估产是实现果树挂果期精准管理的前提^[1-3]。

通过拍摄早期果树树冠的数字图像来估测果树产量的方法具有非接触性、成本低、操作简单等特点,因此,国内外学者利用此法进行了芒果^[4]、柑橘^[5]、猕猴桃^[6]、苹果^[7-9]等果园内单株果树产量估测的研究。在苹果树产量估测方面的许多研究结果表明,采用图像处理技术获取的苹果个数与人工计数获取的苹果个数之间有很高的线性相关关系^[10-16],也有许多学者建立了树上苹果接近成熟期时的单株果树估产模型。2012年,Crtomir等^[17]以从几个不同时期的果树数字图像中获取的苹果个数为输入,建立了苹果成熟期或接近成熟期单株果树实际产量估测的神经网络模型。钱建平等^[18]通过普通数码相机获取成熟期苹果图像,利用图像处理方法识别出果实图斑构建成熟期单株果树产量估测线性模型。对于单株果树产量的早期估测研究,周嵘^[19]进行了尝试,但是由于早期树上果实小,许多果实受到树叶遮挡影响,甚至有果实掩映在树叶之后,即使用肉眼观察也不容易发现,所以仅依靠树冠图像中的果实个数与大小信息,建立起的线性估测模型预测效果不佳。

为了实现基于果树数字图像的单株苹果树的早期估产,本文在前期研究的基础上,开展在果树青果期估测其产量的研究,根据此时期果树树冠特点采用相应的图像处理算法,深入分析树冠图像中与产量有关的信息,借助支持向量机方法,尝试建立树上苹果早期估产模型。

1 试验设计与图像采集

本研究中用到的样本图像均摄于德国波恩大学Kein Altendorf农场的苹果园,其中果树南北成行,苹果品种为“Gala”,树形为细长纺锤形,每棵树最高产量不超过50 kg,挂果数一般不超过170个。在果树青果期(约在收获前3个月)采集单株果树树冠图像。采集图像时使用Cannonce PowerShot SX110 IS型数码相机,为了避免强光,在多云的条件下,获取果树西面图像(西面较东面日照时间长)。拍摄角度为距离果树1.4 m。距地高度1.2 m、并且垂直于果树种植方向。拍摄过程中将一块长2 m、高1.5 m的白色幕布用竹竿支撑置于当前拍摄的果树后方,以避免后方果树以及其他噪声对当前拍摄图像造成干扰和混淆。同时在每棵果树上悬挂2个同样大小(直径3.5 cm,与此时期的果实大小近似)、分别为红色和白色的圆形小球。在苹果收获时,将每棵树上苹果全部摘下后,通过称量获得单株果树的产量。数据处理所涉及的程序均在Matlab 2011b环境下完成。为了提高效率,处理前将图像尺寸统一调整为512像素×683像素。本文所用样本信息如表1所示。根据训练集样本,若果树实际产量高于19.1 kg即为高产,低于12.7 kg即为低产,处于两者之间为中产。训练集样本中高产数9个,中产数35个,低产数6个。测试集中高产数4个,中产数8个,低产数3个。

表 1 样本信息
Tab.1 Samples information

样本集	样本数	果树产量/kg	样本组成/%		
			高产	中产	低产
训练集	50	15.9 ± 3.2	18	70	12
测试集	15	16.0 ± 3.8	27	53	20

2 基于图像的果树树冠特征参数提取

2.1 果树青果期树冠图像中与产量相关的特征参数分析

本文中树冠图像中识别出的果实的总面积、果

实总个数均与果树的实际产量密切相关^[17-18]。此外,针对果树青果期,果实受树叶遮挡影响大的问题,对能够从树冠图像提取出的与果实遮挡有关的信息进行了反复试验研究,得出了另外 3 个与早期产量估测有关的参数:树冠图像中果实总面积与树叶面积的比,简称果实树叶比;受遮挡果实(若果实面积小于参照小球面积的 1/2,此果实被认定为受到遮挡)的个数占果实总个数的比例,简称受遮挡果实个数比例;受遮挡果实的总面积占所有果实总面积的比,简称受遮挡果实面积比例。

2.2 果实与树叶区域识别

采用数码相机获取的图像为 RGB 格式。本课题组的前期研究也是在 RGB 颜色空间中展开,但此空间中只有代表颜色的红色、绿色和蓝色,采用前期算法^[15]对于早期又小又青的苹果识别已不能满足试验要求。经过对多种颜色空间的对比研究,选择在 YCbCr 颜色空间中完成果实与树叶的识别工作。YCbCr 颜色空间不是一种绝对的色彩空间,可以把色彩中的亮度信息分离出来,其中 Y 是指亮度分量, C_b 指蓝色分量色差(蓝色减去亮度),而 C_r 指红色分量色差(红色减去亮度),3 个分量取值均在 0 到 255 之间。果实区域与树叶区域识别流程如图 1 所示。

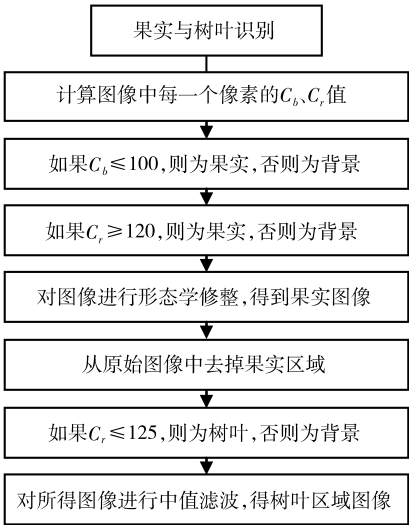


图 1 果实及树叶区域识别流程图

Fig.1 Flowchart of identification of fruits and leaves

(1) 获取图像中每个像素的 C_b 、 C_r 值^[20],获得原始图像的 C_b 值分布图。图 2a 的 C_b 值分布如图 2b 所示。

$$C_b = -0.148R - 0.291G + 0.439B + 128 \quad (1)$$

$$C_r = 0.439R - 0.368G - 0.071B + 128 \quad (2)$$

(2) 通过对图像 C_b 值分布图的分析可知,属于果实区域像素的 C_b 值与图像中天空、幕布及

绝大多数绿叶区域像素的 C_b 值有明显不同,经多次试验确定采用 $C_b \leq 100$ 对图像进行初步分割。根据分割条件对图 2a 分割后的效果如图 3a 所示。

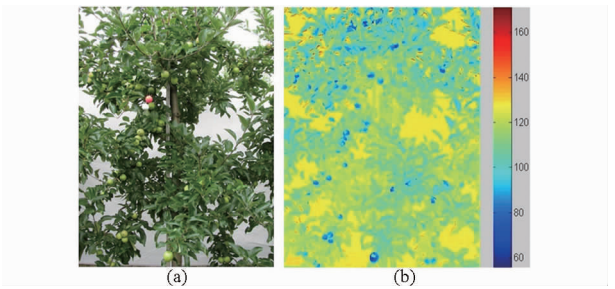


图 2 原始图像及其 C_b 值分布图

Fig.2 Original image and its C_b values' map

(a) 原始图 (b) C_b 分布图

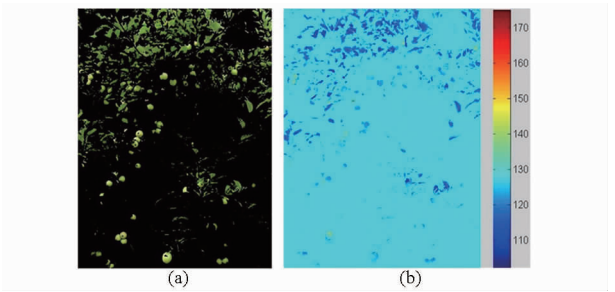


图 3 初分割后图像及其 C_r 值分布图

Fig.3 Image after first step and its C_r values' map

(a) 初分割后图 (b) C_r 分布图

(3) 经过步骤(2)的处理,图像中除果实外,可能还有部分与果实颜色类似的树叶。通过对图像的 C_r 值分布图分析,采用 $C_r \geq 120$ 去除余留的树叶。图 3a 的 C_r 值分布如图 3b 所示。图 3a 经此步骤处理后的效果如图 4a 所示。

(4) 图像中除果实外还有细长的不连续叶梗、孤立的小洞、小的孤立物等,采用半径为 1 的圆盘形结构元素,对图像进行开闭运算。图 4a 经形态学处理后得到果实图像,如图 4b 所示。

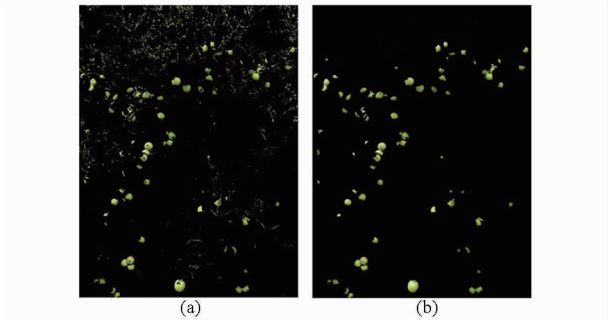


图 4 二次分割后图像与果实图像

Fig.4 Results of image after second segmentation

(a) 二次分割后图像 (b) 果实图像

(5) 要在原始图像中获取树叶图像,需要消除果实、枝条、背景等干扰因素。在此步骤中要在原始

图像中去除果实,即减去步骤(4)中得到的果实图像。图 2a 去除果实后的图像(简称去果图像)如图 5a 所示。

(6)分析去果图像的 R 、 G 、 B 、 Y 、 C_b 、 C_r 6 个分量,发现图像 C_r 值分布图中树叶与枝干、背景差异较大。图 5a 的 C_r 值分布如图 5b 所示。经试验,采用 $C_r \leq 125$ 消除枝干与背景的干扰。

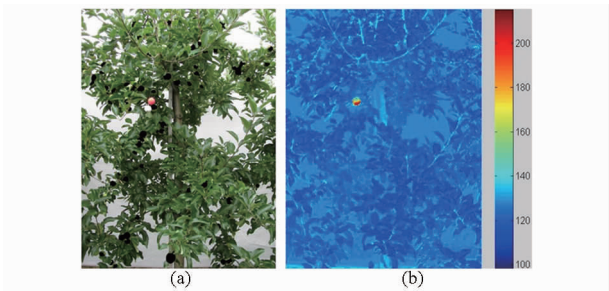


图 5 去果后图像及其 C_r 值分布图

Fig. 5 Image without fruits and its C_r values' map

(a) 去果后图像 (b) C_r 分布图

(7)采用中值滤波法去除孤立点噪声。从图 2a 中获取的树叶图像如图 6 所示。



图 6 树叶图像

Fig. 6 Foliage's image

在原始图像中,去除果实及树叶区域后,图像中余留了枝条、背景和圆形参照小球等,采用 Hough 变换圆检测算法,检测出参照小球。

2.3 特征参数提取

本文称果实图像中的每一个封闭区域为一个果实区域。在青果期的果实图像中含有若干个果实区域,一般一个果实区域代表着 1 个苹果,但是也有少数果实区域中含 2 个以上苹果。鉴于此时期的果实大小与参照小球相似,在统计果实个数时,采取了如下方式:若果实区域面积大于参照小球面积,判定此区域中含有 2 个果实,若果实区域面积大于 2 个参照小球面积,判定此区域中含有 3 个果实。本文所用参数及其统计方法,见表 2。

表 2 参数描述

Tab. 2 Description of parameters

参数	描述
F_N	果实总个数
F_A	果实图像中所有非 0 像素数
L_A	树叶图像中所有非 0 像素数
I_A	整个树冠图像所包含的像素数
F_{SA}	所有受遮挡果实的总像素数
F_{SN}	所有受遮挡果实的总数
P_{FL}	F_A/L_A
P_{AA}	F_{SA}/F_A
P_{NN}	F_{SN}/F_N
P_A	F_A/I_A

以果实区域比例 P_A 、果实个数 F_N 、果实树叶比 P_{FZ} 、受遮挡果实面积比例 P_{AA} 及受遮挡果实个数比例 P_{NN} 5 个特征参数为输入,实际产量为输出建立树上苹果早期估产模型。考虑到每棵树最高产量不超过 50 kg,挂果一般不超过 170 个,本文采用 F_N 除以 170、实际产量除以 50 的方法,将这 2 个参数的值变换到 0 到 1 之间。

3 建立基于支持向量机的估产模型

支持向量机(Support vector machine,SVM)在解决小样本、非线性及高维模式识别中表现出许多特有的优势^[21]。因此,本文采用 SVM 算法利用训练集中 50 个样本建立单株果树早期估产模型。为了进一步验证 P_{FL} 、 P_{AA} 、 P_{NN} 的有效性,分别建立 2 参数模型(P_{A1} 、 F_N)、3 参数模型(P_A 、 F_N 、 P_{FL})、4 参数模型(P_A 、 F_N 、 P_{FL} 、 P_{AA})和 5 参数模型。

3.1 模型训练参数选取

本文要解决的是回归问题,故 SVM 类型选择 epsilon-support vector regression。SVM 的关键在于核函数,核函数的形式及相关参数的确定决定了分类器类型和复杂程度。目前最常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基 RBF 核函数及 S 形核函数 4 种。其中线性核函数是径向基核函数的一个特例^[22];多项式核函数需要确定的参数比径向基核函数多,建模的复杂度较高;在参数确定的情况下,S 形核函数的性能与径向基核函数类似^[23],所以本研究中选择了 RBF 核函数。应用 RBF 核函数时,惩罚因子 C 和核参数 γ 是需要确定的 2 个重要参数。本文采用网格搜索法^[24]确定 C 及 γ 值, C 与 γ 的搜索范围均设为 2^t , t 为 $-10 \sim 10$,搜索步长设为 1,得到用于 4 个模型训练的 C 及 γ 值分别为: (16, 0.125)、(64, 0.031 25)、(16, 0.125)、(32, 0.062 5)。4 个模型的均方误差 MSE 依次为 0.001 60、0.001 55、0.001 32、0.001 17,故确定 5 参

数模型作为单株果树早期估产模型。

3.2 模型评价指标

采用以下指标评价估产模型的性能。预测值与实际值间的决定系数 R^2 , 越大表明 2 个量间的相关性越好; 均方根误差 RMSE (Root mean square error), 越小说明模型的估测精度越高, 但无法衡量无偏性; 平均绝对百分比误差 MAPE (Mean absolute percentage error), 能够反映预测值偏离实际值的程度, 其值越小, 说明预测值与原始值差别越小, 也即预测效果越好; 平均预测误差 MFE (Mean forecast error), 能很好地衡量预测模型的无偏性, 其值越接近零, 模型的无偏性越好。各指标计算式为

$$d_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ie})^2}$$
 (3)

$$d_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - y_{ie}}{y_i} \right| \times 100\%$$
 (4)

$$d_{MFE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ie})$$
 (5)

式中 y_i ——样本实际产量
 y_{ie} ——样本预测产量
 N ——样本个数 d_{RMSE} ——均方根误差
 d_{MAPE} ——平均绝对百分比误差
 d_{MFE} ——平均预测误差

4 试验结果与分析

4.1 估产模型性能分析

利用训练集样本采用 SVM 算法构建的果园早期估产模型的性能如图 7 所示。预测产量与实际产量的决定系数 R^2 达到了 0.724 2, 均方根误差 RMSE 为 1.71 kg, 平均绝对百分比误差 MAPE 为 9%, 平均预测误差 MFE 为 0.21。以上结果表明, 本文建立的果园早期估产模型都具有良好的预测精度和无偏性能。模型对于训练集中高产样本的预测精度 RMSE 为 2.79 kg, MAPE 为 11%; 对于中产样本,

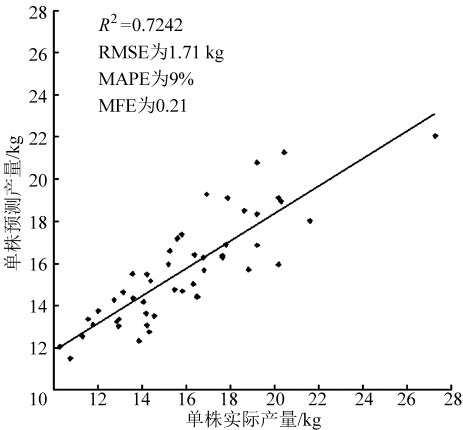


图 7 估产模型性能分析

Fig. 7 Performance of yield estimation model

RMSE 为 1.35 kg, MAPE 为 8%; 对于低产样本 RMSE 为 1.47 kg, MAPE 为 13%。可见此模型对于高、中、低产样本的预测精度按照 RMSE 排序, 由高到低依次为: 中产、低产、高产; 按照 MAPE 排序依次为: 中产、高产、低产。可见模型对于中产样本产量的预测精度最高。

4.2 测试模型

利用测试集样本对本文建立的果园早期估产模型进行测试, 结果如图 8 所示。RMSE 为 2.45 kg, MAPE 为 13%, 说明本文建立的树上苹果估产模型有较好的鲁棒性能。对于测试集中的高产样本, RMSE 为 3.45 kg, MAPE 为 14%; 中产样本 RMSE 为 2.10 kg, MAPE 为 12%; 低产样本 RMSE 为 1.54 kg, MAPE 为 15%。通过测试结果可知模型对于高、中、低产样本的预测精度基本稳定。

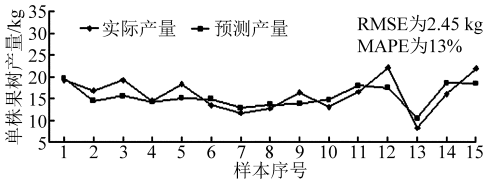


图 8 模型测试结果分析

Fig. 8 Test results of yield estimation model

4.3 不同模型预测结果比较

利用训练集样本建立起 BP 神经网络估产模型, 并采用公式法^[16]建立起线性估产模型。通过测试集对这 2 个模型进行测试, 测试结果如表 3 所示。结果显示, 仅利用果实信息建立的线性估产模型测试效果最差。将树叶遮挡信息考虑在内的树上苹果早期估产模型的测试效果较好, 且在本研究中采用支持向量机建立的估产模型的测试效果要优于用 BP 神经网络建立的估产模型。

表 3 其他估产模型测试效果

Tab. 3 Results of other yield estimation models

参数	BP 神经网络模型	线性估产模型
RMSE/kg	2.64	4.63
MAPE/%	14	31

5 结论

(1) 采用分析图像各颜色分量值分布图法, 确定了在 YCbCr 空间中分割青果期树上苹果的条件 $C_b \leq 100$ 与 $C_r \geq 120$, 实现了对早期树上苹果的识别。

(2) 提出了用受遮挡果实个数比例与受遮挡果实面积比例 2 个特征参数来刻画果实被遮挡的情况。

(3) 提出了将从果树树冠图像中提取的果实个

数、果实面积、果实树叶比、受遮挡果实个数比例及受遮挡果实面积比例 5 个特征参数作为输入,实际产量为输出,利用支持向量机方法建立树上苹果早期估产模型。利用此模型对测试集样本进行估产,得到 RMSE 与 MAPE 分别为 2.45 kg、13%,优于 BP 神经网络模型的 2.64 kg、14%,以及线性估产模型

的 4.63 kg、31%。

(4) 研究中采用的果树树冠图像是在多云条件下取自树冠的向阳面,不同光照情况下果实分割阈值的动态变化情况以及如何利用果树树冠双侧图像来建立估产模型以提高预测精度,还需要深入研究。此外,果实个数统计方法还有待进一步提升。

参 考 文 献

- 1 罗锡文,张泰岭,洪添胜. “精细农业”技术体系及其应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 103 – 106.
Luo Xiwen, Zhang Tailing, Hong Tiansheng. Technical system and application of precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 103 – 106. (in Chinese)
- 2 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1 – 8.
Wang Maohua. The development of precision agriculture and innovation of engineering technology[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1 – 8. (in Chinese)
- 3 黑龙江省佳木斯农业学校, 江苏省苏州农业学校. 果树栽培学总论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- 4 Payne A B, Walsh K B, Subedi P P, et al. Estimation of mango crop yield using image analysis—segmentation method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 91: 57 – 64.
- 5 张亚静, 邓烈, 李民赞, 等. 基于图像处理的柑橘测产方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 97 – 99.
Zhang Yajing, Deng Lie, Li Minzan, et al. Estimation of citrus yield based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 97 – 99. (in Chinese)
- 6 Wijethunga P, Samarasinghe S, Kulasiri D, et al. Digital image analysis based automated kiwifruit counting technique[C]//Image and Vision Computing New Zealand, IVCNZ 2008. 23rd International Conference, 2008: 1 – 6.
- 7 Welte H F. Forecasting harvest fruit size during the growing season[J]. Acta Horticulturæ, 1990, 276: 275 – 282.
- 8 Elfving D C, Schechter I. Fruit count, fruit weight, and yield relationships in delicious apple-trees on 9 rootstocks[J]. Hortscience, 1993, 28(8): 793 – 795.
- 9 Linker R, Cohen O, Naor A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81: 45 – 57.
- 10 Stajanko D, Lakota M. Using image processing and analysis techniques for counting apple fruits in the orchard[J]. Horticultural Science(Prague), 2001, 28(3): 95 – 99.
- 11 Stajanko D, Rakun J, Blanke M. Modeling apple fruit yield using image analysis for fruit colour, shape and texture[J]. European Journal of Horticultural Science, 2009, 74(6): 260 – 267.
- 12 Aggelopoulou A D, Bochtis D, Fountas S, et al. Yield prediction in apple orchards based on image processing[J]. Precision Agriculture, 2011, 12(3): 448 – 456.
- 13 Blanke M M. Prediction of apple yields in Europe—present and new approaches in research[C]//Smith L. Proceedings of 106th Annual Meeting Washington State Horticultural Association, 2011: 68 – 75.
- 14 Kelman E, Linker R. Vision-based localisation of mature apples in trees images using convexity[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 174 – 185.
- 15 Zhou R, Damerow L, Sun Y, et al. Using colour features of cv. ‘Gala’ apple fruits in an orchard in image processing to predict yield[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(5): 568 – 580.
- 16 Papageorgiou E I, Aggelopoulou K D, Gemtos T A, et al. Yield prediction in apples using fuzzy cognitive map learning approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 91: 19 – 29.
- 17 Crtomir R, Cvelbar U, Tojnko S, et al. Application of neural networks and image visualization for early predicted of apple yield[J]. Erwerbs-Obstbau, 2012, 54(2): 69 – 76.
- 18 钱建平, 李明, 杨信廷, 等. 基于双侧图像识别的单株苹果树产量估测模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 132 – 138.
Qian Jianping, Li Ming, Yang Xinting, et al. Yield estimation model of single tree of Fuji apples based on bilateral image identification[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 132 – 138. (in Chinese)
- 19 周嵘. 基于数字图像处理的苹果园估产方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
- 20 Wachs J P, Sturm H J, Burks F, et al. Low and high-level visual feature-based apple detection from multi-modal images[J]. Precision Agriculture, 2010, 11(6): 717 – 735.
- 21 刘伟, 王建平, 刘长虹, 等. 基于粒子群寻优的支持向量机番茄红素含量预测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 143 – 147, 155.
Liu Wei, Wang Jianping, Liu Changhong, et al. Lycopene content prediction based on support vector machine with particle swarm optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 143 – 147, 155. (in Chinese)

vision[J]. Computer Engineering,2004,30(22):115 – 116,171. (in Chinese)

14 周俊,赵高阳,刘锐,等. 基于粒子滤波的苹果采摘机器人目标姿态估算[J]. 农业机械学报,2011,42(3):161 – 165.
Zhou Jun,Zhao Gaoyang,Liu Rui,et al. Apple attitude estimation based on particle filter for harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3):161 – 165. (in Chinese)

15 谢忠红,徐莹,姬长英,等. 基于机器视觉的苹果生长姿态估算识别多方法融合[J]. 农业机械学报,2011,42(11):155 – 157,153.
Xie Zhonghong,Xu Ying,Ji Changying,et al. Estimation method of apple growing attitude based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(11):155 – 157, 153. (in Chinese)

16 董坦坦. 成熟番茄的图像识别及其位姿的获取研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
Dong Tantan. Image recognition and posture detection of ripe tomato based on machine vision[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)

17 姬伟,陶云,赵德安,等. 基于 CLAHE 的苹果树树枝迭代阈值分割方法研究[J]. 农业机械学报,2014,45(4):69 – 75.
Ji Wei,Tao Yun,Zhao Dean,et al. Iterative threshold segmentation of apple branch images based on CLAHE[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(4):69 – 75. (in Chinese)

18 王辉,毛文华,刘刚,等. 基于视觉组合的苹果作业机器人识别与定位[J]. 农业机械学报,2012,43(12):165 – 170.
Wang Hui,Mao Wenhua,Liu Gang,et al. Identification and location system of multi-operation apple robot based on vision combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(12):165 – 170. (in Chinese)

19 Font D, Pallejà T, Tresanchez M, et al. Counting red grapes in vineyards by detecting specular spherical reflection peaks in RGB images obtained at night with artificial illumination[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,108:105 – 111.

20 Payne A, Walsh K, Subedi P, et al. Estimating mango crop yield using image analysis using fruit at ‘stone hardening’ stage and night time imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,100:160 – 167.

21 代彩红,于家琳. 光源相关色温计算方法的讨论[J]. 计量学报,2000,21(3):183 – 188.
Dai Caihong,Yu Jialin. Discussion on the calculating methods for color temperature of the source[J]. Acata Metrologica Sinica, 2000,21(3):183 – 188. (in Chinese)

22 李志杰,李倩倩. 光源的显色性理论[J]. 光源与照明,2008(2):12 – 15.

23 张铮,倪红霞,苑春苗,等. 精通 Matlab 数字图像处理与识别[M]. 北京:人民邮电出版社,2013.

~~~~~

(上接第 14 页)

22 Keerthi S S, Lin C J. Asymptotic behaviors of support vector machines with Gaussian kernel[J]. Neural Computation, 2003, 15(7): 1667 – 1689.

23 Lin K M, Lin C J. A study on reduced support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14(6): 1449 – 1459.

24 王兴玲,李占斌. 基于网格搜索的支持向量机核函数参数的确定[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2005,35(5): 859 – 862.  
Wang Xingling, Li Zhanbin. Identifying the parameters of the kernel function in support vector machines based on the grid-search method[J]. Periodical of Ocean Univerdity of China, 2005,35(5):859 – 862. (in Chinese)

25 刘涛,孙成明,王力坚,等. 基于图像处理技术的大田麦穗计数[J]. 农业机械学报,2014,45(2):282 – 290.  
Liu Tao, Sun Chengming, Wang Lijian, et al. In-field wheatear counting based on image processing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):282 – 290. (in Chinese)

26 王海青,姬长英,顾宝兴,等. 基于机器视觉和支持向量机的温室黄瓜识别[J]. 农业机械学报, 2012,43(3):163 – 167.  
Wang Haiqing, Ji Changying, Gu Baoxing, et al. In-greenhouse cucumber recognition based on machine vision and least squares support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3):163 – 167. (in Chinese)

27 张建华,冀荣华,袁雪,等. 基于径向基支持向量机的棉花虫害识别[J]. 农业机械学报,2011,42(8):178 – 183.  
Zhang Jianhua, Ji Ronghua, Yuan Xue, et al. Recognition of pest damage for cotton leaf based on RBF – SVM algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8):178 – 183. (in Chinese)