

基于 Android 手机的水稻剑叶角测量系统*

路文超¹ 赵 勇^{2,3} 罗 斌^{1,3} 潘大宇^{3,4} 王 成^{1,3}

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097;
3. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097; 4. 农业智能装备技术北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 为了快速、无损地测量水稻剑叶角, 设计了基于 Android 智能手机的便携式水稻剑叶角无损测量系统。采用智能手机后置摄像头获取水稻剑叶基部图像, 经过图像预处理、直线检测、K-means 聚类 and 向量方法等处理过程, 得到水稻剑叶角。基于 Android 编程技术对系统软件进行设计, 实现了在 Android 平台下利用 JNI 和 Android NDK 调用基于 OpenCV 库的剑叶角提取图像处理算法, 实现了新建试验、材料信息输入、摄像头获取剑叶基部图像、计算输出剑叶角及保存数据等界面操作流程。利用该测量系统在田间对 4 个品种的 80 株水稻进行剑叶角测量试验, 以验证系统性能。试验结果表明, 和人工用量角器测量结果相比, 该系统测量的平均绝对误差为 1.34°, 相对误差为 2.7%, 测量值和真实值相关系数为 0.997, 能有效测量剑叶角。

关键词: 水稻剑叶角 测量系统 Android 手机 图像处理 K-means 聚类

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0296-06

Measurement System of Rice Flag Leaf Angle
Based on Android Smart Phone

Lu Wenchao¹ Zhao Yong^{2,3} Luo Bin^{1,3} Pan Dayu^{3,4} Wang Cheng^{1,3}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

3. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China

4. Beijing Key Laboratory of Intelligent Equipment Technology for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to measure the rice flag leaf angle rapidly and nondestructively, a portable system for measuring rice flag leaf angle based on Android smart phone was developed. The rear camera of the smartphone was used for flag leaf images acquisition, and the flag leaf angle was obtained through image preprocessing, lines detection, K-means clustering and vector method. The interfaces and function modules of system software were designed by using the Android programming technology, which realized the extraction algorithm of rice flag leaf angle using JNI and Android NKD to call OpenCV database in the Android platform. It can complete the operational flows of new test establishing, material information inputting, flag leaf images obtaining, angle value outputting as well as interface saving. 80 plants of rices in four varieties were tested to verify the system performance. The test results demonstrated that, comparing with the measurement results of protractors, the average absolute error of this system was 1.34°, the relative error was 2.7%, and the correlation coefficient between the observed values and actual values was 0.997. It was indicated that the proposed system could effectively measure the rice flag leaf angles.

Key words: Rice flag leaf angle Measurement system Android phone Image processing K-means clustering

收稿日期: 2015-03-18 修回日期: 2015-05-06

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203026)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A503)和北京市自然科学基金资助项目(4142019)

作者简介: 路文超, 工程师, 主要从事生物仪器研究, E-mail: luwc@nercita.org.cn

通讯作者: 王成, 研究员, 主要从事生物仪器研究, E-mail: wangc@nercita.org.cn

引言

水稻剑叶是光合作用产物的主要形成源之一，直接决定水稻穗部的相关性状^[1-4]。水稻剑叶角是指水稻植株主茎和剑叶基部直挺部分之间的夹角，是影响水稻产量的重要因素^[5-6]。测量剑叶角是水稻理想株型育种过程中的一个重要环节。目前剑叶角的测量方法大多由人工用量角器测量，测量时需要将水稻主茎和剑叶的准确位置与量角器上的刻度仔细对准，在大批量测量时，这种方法费时费力、效率低下。因此，寻找一种快速、准确、无损的剑叶角测量方法是水稻育种专家亟待解决的问题之一。

近年来，Android 智能手机发展迅猛，应用广泛，并以其体积小、质量轻、携带方便、适于田间野外使用等特点在农业领域获得了应用^[7-11]。图像处理和识别技术是人工智能的一个重要领域，通过对复杂图像的处理和识别，可以从中提取出所需要的信息。随着智能手机性能的进一步提高，越来越多的图像处理与识别技术被应用于智能手机平台^[12-18]。本文针对水稻剑叶角的测量需求，以剑叶基部图像为研究对象，采用图像处理技术设计剑叶角提取算法，实现剑叶角的自动计算。同时，鉴于田间使用的便携性、无损测量等要求，在 Android 智能手机平台构建测量系统，利用 JNI 和 Android NDK 开发剑叶角测量应用程序，实现剑叶角的快速、无损测量。

1 系统实现

水稻剑叶角测量系统主要由智能手机、夹持单元、支架和背景板组成。其中，智能手机为 HTC T329d 型，其操作系统为 Android OS 4.0，硬件配置为 Snapdragon MSM8625 1 GHz CPU，768 MB RAM；夹持单元和支架用于固定智能手机；背景板为黑色磨砂亚克力板，用于获取具有简单背景的剑叶基部图像。田间应用时，首先将所测水稻植株的剑叶基部位置放在测量系统的背景板和智能手机之间，使背景板平行且紧贴在主茎和剑叶所形成的平面上，手动将周围的干扰叶片排除在摄像头视野之外，然后通过操作智能手机上的应用程序完成一次剑叶角的测量。系统结构如图 1 所示。

从图 1 可以看出，该系统的核心部分为 Android 应用程序的设计，本文的主要内容就是针对该应用程序进行设计，包括 2 部分：图像处理算法设计和软件系统设计。图像处理算法针对摄像头采集到的剑叶基部图像，设计图像处理检测算法自动获取剑叶角。软件系统主要实现在 Android 平台调用图像处理算法，并为用户提供简单、友好的人机交互界面。

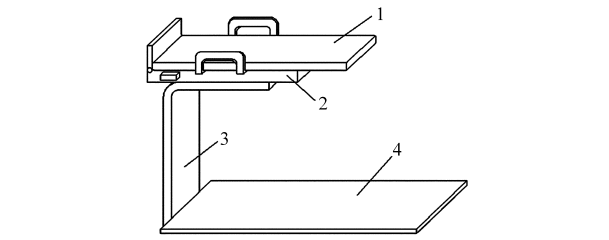


图 1 水稻剑叶角测量系统
Fig. 1 Measurement system of rice flag leaf angle
1. 智能手机 2. 夹持单元 3. 支架 4. 背景板

1.1 图像处理算法设计

剑叶角度提取图像处理算法主要包括 4 个步骤：①图像预处理。②直线检测。③K-means 聚类。④向量法计算角度。

1.1.1 图像预处理

系统获取的水稻剑叶基部彩色图像如图 2a 所示，图像分辨率为 640 像素 × 384 像素。由于田间采集过程中难免会受到周围环境及太阳光的干扰，因此，为了抑制噪声、改善图像质量，需要首先对获取的图像进行预处理，以满足后续算法的需要。

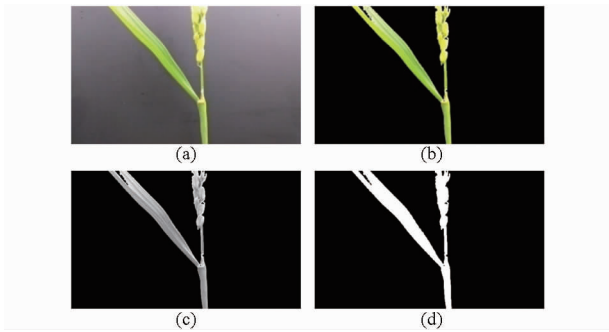


图 2 图像预处理
Fig. 2 Image pre-processing
(a) 原始图像 (b) 去除背景后的彩色图像
(c) 灰度图像 (d) 二值图像

本文图像预处理主要是图像分割，利用图像分割方法获取去除背景后的剑叶基部图像。由于本系统在采集原始图像过程中已经采用黑色背景板将剑叶与其他干扰物分离开来，因此大大方便了分割算法的设计。本文分割算法主要为颜色空间变换。经过 HSV、YUV、RGB 等多种颜色空间变换^[19-20]方法的尝试，最终选定将图 2a 所示的原始图像在 RGB 空间通过提取 B、G 颜色通道并作差的方法进行分割，该分割方法的优点是能较好地保留水稻剑叶、主茎及穗部纹理信息，同时能较好地去除图像上因环境因素带来的干扰。分割得到去除背景后的彩色图像如图 2b 所示。进一步地，获得灰度图像(图 2c)和二值图像(图 2d)。

1.1.2 直线检测

经过分析剑叶基部图像，检测沿主茎和剑叶方

向的 2 条直线之间的夹角,根据检测结果计算剑叶角。因此,首先需要分别沿着主茎和剑叶方向进行直线检测。在诸多直线检测方法中,Hough 变换因其算法稳定性高、抗噪性能强而成为最常用的算法之一^[21-22]。本文采用 Hough 变换算法进行直线检测。

Hough 变换是从二维空间到参数空间的一种映射,对于直线变换,这种映射表现为从二维空间上的某点到参数空间上的某条曲线的对应关系,由数学对偶性原理知二维空间上的点的共线性对应于参数空间上曲线的共点性,以此为依据来提取直线的相关参数^[23]。

如果对整幅图像进行 Hough 变换,会减慢 Hough 变换的计算速度,影响算法整体执行效率。为了提高算法执行速度,在 Hough 变换直线检测之前,需要先对图 2c 所示的灰度图像进行边缘检测,获得具有清晰纹理特征的边缘图像。边缘检测的算法很多,如 LOG 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Roberts 算子、Canny 算子等。在边缘检测中,LOG 算子常产生双边界,Sobel 算子又往往会形成不闭合区域等,而 Canny 算子是最优的阶梯型边缘检测算法^[24-25]。本文选用 Canny 算子实现边缘检测操作。得到的边缘图像如图 3a 所示。

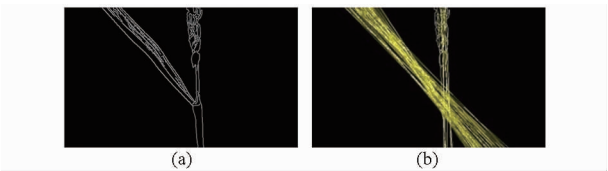


图 3 边缘检测和直线检测
Fig. 3 Edge detection and lines detection
(a) 边缘图像 (b) 检测出的直线

采用 Hough 变换对图 3a 所示的边缘图像进行直线检测,检测出的直线如图 3b 所示。由于算法需要对不同情况下的图像都要有较好的适应性,因此,为了保证计算角度的准确性,本文在检测直线的过程中通过设置参数来保证剑叶部位和主茎部位分别检测出多条直线。

1.1.3 K-means 聚类

如图 3b 所示,经过 Hough 变换直线检测得到多条沿水稻主茎方向和剑叶方向的直线,而在计算剑叶角度时,需要提取出最接近主茎和剑叶中心的 2 条直线的夹角来表征剑叶角。采用聚类分析方法在已经检测出多条直线的基础上获取中心直线。本文采用 K-means 聚类算法。

K-means 算法属于聚类方法中一种典型的划分方法,其基本思想是通过迭代把数据对象划分到不同的簇中,使簇内部对象之间的相似性很大,而簇之

间对象的相似性很小^[26-27]。

K-means 算法的具体过程如下:

- (1) 按一定原则选取 k 个对象作为初始的聚类中心。
- (2) 根据聚类中心值,将每个对象赋给最相似的簇。
- (3) 重新计算每个簇中对象的平均值,用此平均值作为新的聚类中心。
- (4) 重复执行步骤(2)、(3),直到聚类的中心不再发生变化为止。

由于需要检测剑叶和主茎部位 2 簇直线的中心直线,因此,本文中参数 k 设为 2。通过 K-means 算法将图 3b 中的 2 簇直线聚为 2 类,同时位于聚类中心的直线被检测出来。通过聚类得到的剑叶和主茎的 2 条中心直线如图 4a 所示,和图 4b 所示的理论上的剑叶角相比具有较好的一致性。



图 4 K-means 聚类检测中心直线
Fig. 4 Center lines detected by K-means clustering
(a) 2 条中心直线 (b) 剑叶角示意图

1.1.4 向量法计算角度

由于实际水稻植株的剑叶角存在锐角(直角)和钝角两种情况^[28],如图 5 所示,所以在计算角度的时候不能直接利用 2 条中心直线夹角来计算剑叶角。本文提出一种利用向量关系来计算剑叶角的方法。



图 5 不同角度方向的剑叶
Fig. 5 Rice flag leaves in different angle directions
(a) 锐角 (b) 钝角

首先,如图 6a 所示,命名沿水稻主茎方向的中心直线为 L_1 ,沿剑叶方向的中心直线为 L_2 ,根据 L_1 和 L_2 的参数空间坐标,可以求得 L_1 和 L_2 的直线方程。

$$L_1 \quad y = k_1(x - x_1) + y_1 \quad (1)$$
$$L_2 \quad y = k_2(x - x_2) + y_2 \quad (2)$$

式中 k_1, k_2 —— L_1 和 L_2 的斜率
 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ——从原点到 L_1 和 L_2 的垂线
与两直线的交点
利用 L_1 和 L_2 的直线方程可以求得两直线的交



图 6 向量方法计算角度示意图

Fig. 6 Calculation of flag leaf angle using vector method

(a) 直线及交点 (b) 向量的角度

点 $O(x_i, y_i)$ 。图像中稻穗一端都在交点 O 上方,根据式(1)可确定 L_1 上点 $M(x_m, y_m)$,有

$$y_m = y_i - m \tag{3}$$

$$x_m = (y_m - y_i)/k_1 + x_i \tag{4}$$

式中 m ——整数偏移量,取值范围[100,200]

由点 O 和点 M 可以确定从两中心直线交点指向主茎顶端的向量 V_1 ,如图 6b 所示。

$$V_1 = [x_m - x_i, y_m - y_i] \tag{5}$$

其次,以 L_1 为界线将图像分为左、右 2 个区域,通过统计 2 个区域灰度不为零的像素点个数 N_1 和 N_2 ,发现剑叶所在区域的非零像素点个数明显高于另一区域,并且当 $N_1 > N_2$ 时,判断剑叶位于主茎左边,否则,剑叶位于主茎的右边。于是可以确定 L_2 上点 $Q(x_q, y_q)$,其中

$$x_q = \begin{cases} x_i - q & (N_1 > N_2) \\ x_i + q & (\text{其他}) \end{cases} \tag{6}$$

$$y_q = k_2(x - x_2) + y_2 \tag{7}$$

式中 q ——整数偏移量,取值范围[200,300]

由点 O 和点 Q 可以确定从两中心直线交点指向剑叶顶端的向量 V_2 ,如图 6b 所示。

$$V_2 = [x_q - x_i, y_q - y_i] \tag{8}$$

最后,根据向量夹角计算公式,通过计算 V_1 和 V_2 的夹角获得剑叶角 α 为

$$\alpha = \arccos \frac{V_1 V_2}{|V_1| |V_2|} \tag{9}$$

1.2 软件系统设计

1.2.1 Android 平台调用图像处理算法

为了实现 Android 操作系统下对水稻剑叶角图像处理算法的调用,本文使用 OpenCV 库来实现上述图像处理算法。OpenCV (Open source computer vision library) 是一个基于开源发行的跨平台计算机视觉库,由英特尔公司发起并参与研发,可以在商业和研究领域免费使用。OpenCV 库由一系列高效的 C 函数和少量 C++ 类构成,实现了计算机视觉、图像处理和模式识别等方面的很多通用算法,可以运行在 Linux、Windows、Mac OS 和 Android 操作系统上。

由于 Android 应用程序是在 Eclipse IDE 集成开发环境上,以 Java 语言为编程语言进行开发,因

此在 Android 上使用 OpenCV 库时,需要利用 JNI (Java native interface) 编写相应的 OpenCV 代码并通过 Android NDK (Native development kit) 工具将其嵌入到 Android 应用程序中。其中,JNI 是一套双向的接口,允许 Java 与 OpenCV 代码间的互操作。利用 JNI 和 Android NDK 开发应用程序过程如图 7 所示。

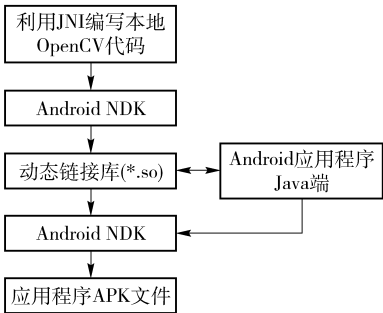


图 7 利用 Android NDK 和 JNI 开发应用程序过程

Fig. 7 APP development using Android NDK and JNI

本文中,首先利用 Android 应用程序框架编写相应的 Java 代码来实现系统应用程序界面和相关功能,然后通过 JNI 和 OpenCV 库提供的图像处理函数编写本地 C/C++ 代码,实现水稻剑叶角提取图像处理算法,并使用 Android NDK 将本地代码文件编译生成可由 Java 端调用的共享库(动态链接库),最后通过 Android SDK 生成完整的可发布的水稻剑叶角测量应用程序。

1.2.2 应用程序界面设计

本文按照水稻育种性状采集过程的一般记载方法,充分结合了 Android SDK 提供的 LinearLayout 类、RelativeLayout 类和 Absolute-Layout 类各自的优势,并采用其提供的多种更具人性化、操作简单的 Android 常用和高级控件,完成应用程序人机交互界面的设计。本文设计的界面的操作步骤为:新建试验、开始本次测量试验、输入试验对象材料信息、调用摄像头拍摄照片并识别、输出剑叶角、参数保存及查询等,系统部分界面如图 8 所示。

2 试验与结果分析

2.1 试验过程

为了验证系统性能,采用本系统在水稻试验基地对田间水稻植株的剑叶角进行测量。针对沈农 265、沈农 606、沈农 604 和沈农 9816 4 个品种水稻,每个品种在田间随机选定 20 个水稻植株的剑叶角进行测量。使用本系统测量每个植株一次之后,针对同一个植株的同一片剑叶,用量角器手工沿着水稻主茎和剑叶的中心线再测量一次,记录相应的测量值。

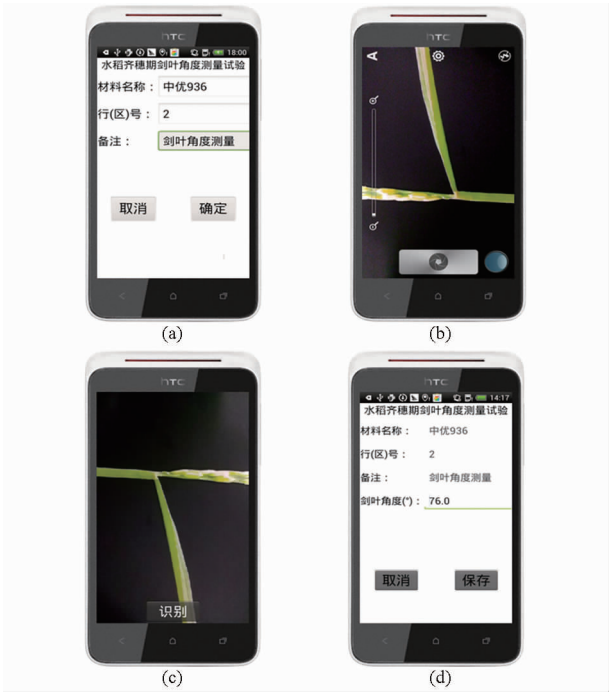


图8 系统界面图

Fig.8 System interfaces

(a) 输入材料信息 (b) 摄像头获取剑叶图像

(c) 图像识别 (d) 输出剑叶角

2.2 结果与分析

将采用本系统测量得到的角度(以下简称测量值)和用量角器测量得到的角度(以下简称真实值)进行数据对比,并运用 Excel 对测量值和真实值进行相关性分析,如图 9 所示。分析结果表明,和真实值相比,测量值的平均绝对误差为 1.34°,相对误差为 2.7%,测量值和真实值相关系数为 0.997。

通过图 9 观察到测量值和真实值较为吻合,但也存在一定的误差。这种误差产生的原因是:①真实值是用量角器测量的主茎中轴和剑叶叶柄中轴之间的角度,而采用图像处理算法中的 K-means 聚类分析之后获得的表征主茎和剑叶的直线和中轴线不一定重合,可能存在微小的偏差。②在田间测量

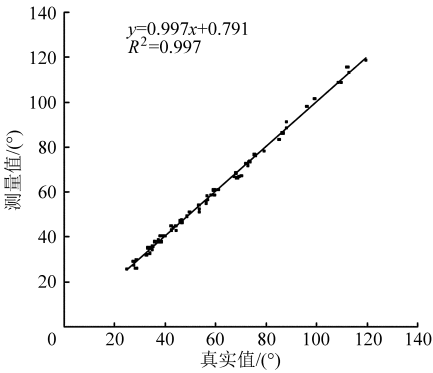


图9 测量值和真实值相关性

Fig.9 Correlation analysis between actual values and observed values

过程中如果剑叶部位没有避开太阳光的直射,导致曝光过度,对算法的预处理效果将产生一定的影响,致使所测角度存在偏差。因此,在使用本系统测量剑叶角的过程中,最好采用遮挡的方式避免太阳光对剑叶部位直接照射。

3 结论

(1) 提出了一种水稻剑叶角快速获取图像处理算法,并基于此算法设计了一套基于 Android 手机的水稻剑叶角测量系统。针对 4 个品种水稻的 80 个植株,采用人工测量的方法和采用本系统测量值进行角度结果对比,结果表明,本文提出的水稻剑叶角快速获取图像处理算法不仅适用于剑叶角为锐角(直角)的情况,也适用于为钝角的情况。

(2) 采用本系统测量的角度数据和人工测量的角度数据之间存在较小的误差,平均绝对误差为 1.34°,相对误差为 2.7%,测量值和真实值相关系数为 0.997。

(3) 在使用本系统测量水稻剑叶角时,应尽量避免太阳光对剑叶部位的直接照射,以免产生较大的测量误差。

参 考 文 献

- 李睿,赵妹丽,毛艇,等. 水稻剑叶形态性状 QTL 分析[J]. 作物杂志,2010(3):26-29.
Li Rui, Zhao Shuli, Mao Ting, et al. QTL analysis on flag leaf trait in rice[J]. Crops, 2010(3):26-29. (in Chinese)
- 罗赣丰,马雪梅,程建峰. 水稻剑叶角度与氮营养效率的关系[J]. 中国农学通报,2014,30(18):29-34.
Luo Ganfeng, Ma Xuemei, Cheng Jianfeng. The relationships between flag leaf angles of various rice germplasms and their nitrogen nutrition efficiencies[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(18):29-34. (in Chinese)
- 张克勤,戴伟民,樊叶杨,等. 水稻剑叶角度与主穗产量的遗传剖析[J]. 中国农学通报,2008,24(9):186-192.
Zhang Keqin, Dai Weimin, Fan Yeyang, et al. Genetic dissection of flag leave angle and main panicle yield traits in rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(9):186-192. (in Chinese)
- 李仕贵,何平,王玉平,等. 水稻剑叶性状的遗传分析和基因定位[J]. 作物学报,2000,26(3):261-265.
Li Shigui, He Ping, Wang Yuping, et al. Genetic analysis and gene mapping of the leaf traits in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26(3):261-265. (in Chinese)
- 董国军,藤本宽,滕胜,等. 水稻剑叶角度的 QTL 分析[J]. 中国水稻科学,2003,17(3):219-222.
Dong Guojun, Teng Benkuan, Teng Sheng, et al. QTL analysis of flag leaf angle in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(3):219-222. (in Chinese)

- 6 Yue Bing, Xue Weiya, Luo Lijun, et al. QTL analysis for flag leaf characteristics and their relationships with yield and yield traits in rice[J]. *Acta Genetica Sinica*, 2006, 33(9):824 – 832.
- 7 李健. 基于 Android 的病虫害推理诊断系统的设计研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(11):5148 – 5150.
Li Jian. Research on diagnosis system based on Android for inference for plant diseases and insect pests on crops[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(11):5148 – 5150. (in Chinese)
- 8 张卫丹, 滕桂法, 王春山. 基于 android 手机的枣树病虫害短信诊断平台的研究[J]. *科技通报*, 2013, 29(11):67 – 70.
Zhang Weidan, Teng Guifa, Wang Chunshan. Research of sms-platform system for diagnosis of jujube diseases and insect pest based on android mobile phone[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2013, 29(11):67 – 70. (in Chinese)
- 9 杨林楠, 郜鲁涛, 林尔升, 等. 基于 Android 系统手机的甜玉米病虫害智能诊断系统[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18):163 – 168.
Yang Linnan, Gao Lutao, Lin Ersheng, et al. Intelligent diagnose system of diseases and insect pests in sweet corn based on mobile terminal with Android system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18):163 – 168. (in Chinese)
- 10 尚明华, 秦磊磊, 王风云, 等. 基于 Android 智能手机的小麦生产风险信息采集系统[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):178 – 182.
Shang Minghua, Qin Leilei, Wang Fengyun, et al. Information collection system of wheat production risk based on Android smartphone[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5):178 – 182. (in Chinese)
- 11 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 基于物联网 Android 平台的水产养殖远程监控系统[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13):175 – 181.
Li Hui, Liu Xingqiao, Li Jing, et al. Aquiculture remote monitoring system based on IOT Android platform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13):175 – 181. (in Chinese)
- 12 Khairul M S, Ammar A, Nurul A I, et al. Real-time video processing using native programming on android platform[J]. 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, 2012:276 – 281.
- 13 He J, Roberson S, Fields B, et al. Fatigue detection using smartphones[J]. *Ergonomics*, 2013, 3(3):1 – 7.
- 14 龚爱平, 吴武豪, 袁正军, 等. 基于 Android 系统手机的叶面积测量方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9):203 – 208.
Gong Aiping, Wu Wuhao, Qiu Zhengjun, et al. Leaf area measurement using Android os mobile phone[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9):203 – 208. (in Chinese)
- 15 郭文川, 周超超, 韩文霆. 基于 Android 手机的植物叶片面积快速无损测量系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1):275 – 280.
Guo Wenchuan, Zhou Chaochao, Han Wenting. Rapid and non-destructive measurement system for plant leaf area based on Android mobile phone[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1):275 – 280. (in Chinese)
- 16 戴建国, 赖军臣. 基于图像规则与 Android 手机的棉花病虫害诊断系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1):35 – 44.
Dai Jianguo, Lai Junchen. Image-rule-based diagnostic expert system for cotton diseases and pests based on mobile terminal with Android system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1):35 – 44. (in Chinese)
- 17 陈利华, 董志学. 基于 Android 的裂缝宽度检测系统设计实现[J]. *计算机工程与设计*, 2013, 34(9):3195 – 3199.
Chen Lihua, Dong Zhixue. Design and implementation of crack width detection system based on Android[J]. *Computer Engineering and Design*, 2013, 34(9):3195 – 3199. (in Chinese)
- 18 李钰, 苏育挺. 基于 Android 平台的行人检测系统[J]. *电子测量技术*, 2012, 35(12):99 – 101.
Li Yu, Su Yuting. Pedestrian detection system based on Android platform[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, 35(12):99 – 101. (in Chinese)
- 19 Nicolas V, Ludovic M, Postaire J G. Color image segmentation by pixel classification in an adapted hybrid color space application to soccer image analysis[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2003, 90(2):190 – 216.
- 20 Suchitra K, Bodhe S K. Fusion of entropy-based color space selection and statistical color features for ripeness classification of guavas[J]. *Intelligent Computing, Networking, and Informatics*, 2014, 243:1125 – 1134.
- 21 Illingworth J, Kittler J. A survey of the hough transforms[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 44(1):87 – 107.
- 22 Brucker P, Drexel A, Möhring R, et al. Resource-constrained project scheduling: notation, classification, models, and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 112(1):3 – 41.
- 23 Fokkinga M M. The Hough transform[J]. *Journal of Functional Programming*, 2011, 21(2):129 – 133.
- 24 唐佳林, 王镇波, 张鑫鑫. 基于霍夫变换的直线检测技术[J]. *科技信息*, 2011(14):33 – 35.
Tang Jialin, Wang Zhenbo, Zhang Xinxin. Straight line detection based on Hough transform technology[J]. *Science & Technology Information*, 2011(14):33 – 35. (in Chinese)
- 25 Canny J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679 – 698.
- 26 杨占华, 杨燕. 一种基于 SOM 和 K-means 的文档聚类算法[J]. *计算机应用研究*, 2006(5):73 – 79.
Yang Zhanhua, Yang Yan. Document clustering method based on hybrid of SOM and K-means[J]. *Application Research of Computers*, 2006(5):73 – 79. (in Chinese)
- 27 Kanungo T, Mount D M, Netanyahu N S, et al. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7):881 – 892.
- 28 洪德林, 江建华, 胡文德, 等. 梗稻剑叶斜下伸资源的发现与大剑叶角度的遗传和 SSR 标记[J]. *杂交水稻*, 2010(增刊):285 – 293.
Hong Delin, Jiang Jianhua, Hu Wende, et al. Discovery of a germplasm with large flag leaf angle, inheritance of the trait and SSR markers for the allele in japonica rice[J]. *Hybrid Rice*, 2010(Supp.):285 – 293. (in Chinese)