

# 基于多特征的杂草逆向定位方法与试验\*

陈亚军<sup>1</sup> 赵博<sup>2</sup> 李树君<sup>2</sup> 刘磊<sup>2</sup> 苑严伟<sup>2</sup> 张延立<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学信息科学系, 西安 710048;

2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种基于多特征的杂草逆向定位方法。以田间作物作为研究对象, 将多目标杂草定位问题转换为单目标的作物定位问题。采用作物叶片 HU 不变矩与形状特征的识别准确定位出每一株作物, 然后基于颜色特征将作物区域以外的绿色植物均认定为杂草。设计了一款小型杂草定位装置, 并应用在宽幅喷药机上。田间试验结果表明, 在喷药机工作速度为 5 km/h 时, 该系统对于大豆田间杂草识别的准确率为 90% 以上, 较好地解决了杂草定位与精细喷洒农药问题。

**关键词:** 杂草 逆向定位 多特征 不变矩 形状特征

**中图分类号:** TP391.41; S451.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0257-06

## Weed Reverse Positioning Method and Experiment Based on Multi-feature

Chen Yajun<sup>1</sup> Zhao Bo<sup>2</sup> Li Shujun<sup>2</sup> Liu Lei<sup>2</sup> Yuan Yanwei<sup>2</sup> Zhang Yanli<sup>2</sup>

(1. Department of Information and Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System,

Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Field weed is the big enemy of agricultural production, and also is one of the key problems that blocked the crop growth in Chinese agriculture. Accurate positioning weeds and realizing the variable precision applying pesticide or herbicide are particularly important. To solve various field weeds positioning difficult problems, a multi-feature based weed reverse positioning method was proposed. By taking the field crops as the research object, the multi-objective weed positioning issue was transformed into single objective crop recognition problem. Firstly, seven moment invariants and eight shape feature parameters were extracted from many of the individual soybean crop leaves, and the mean value of moment invariants and shape features were taken as standard soybean leaf feature value. Secondly, after a series of image preprocessing such as image segmentation, regional feature match and connected component analysis, multi-feature recognition method with HU invariant moments and shape features of crops were utilized to accurately locate each crop plant. Finally, based on color feature, the green plants outside of the crops region were treated as weeds. Furthermore, a small weed positioning device was designed based on this method, which was applied to wide pesticide spraying machine. Field experiment results showed that weed recognition accuracy of this system for weed in soybean field was more than 90% when the spraying machine working speed was 5 km/h, hence weed positioning and pesticide accurate spraying problems could be well settled.

**Key words:** Weed Reverse positioning Multi-feature Invariant moments Shape feature

收稿日期: 2015-02-10 修回日期: 2015-04-13

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A503)、陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2014JM2-6111)和陕西省科技计划资助项目(2013k07-18)

作者简介: 陈亚军, 讲师, 主要从事图像分析、机器视觉和模式识别研究, E-mail: chenylj@xaut.edu.cn

通讯作者: 赵博, 研究员, 主要从事图像处理与机械设计研究, E-mail: zhaoboshi@126.com

## 引言

在诸多除草方式中,化学除草成为国内外的主要除草方式,但是,粗放的使用化学除草剂不仅浪费,还会造成环境危害<sup>[1-4]</sup>。因此,如何快速、准确地自动获取农田杂草信息,成为杂草精准控制技术面临的首要问题,也是制约变量对靶喷药的瓶颈<sup>[5-8]</sup>。尽管目前有关杂草识别的研究比较多,但由于田间杂草种类较多,准确定位并识别出每一种杂草仍然是非常困难的。

目前,国内外学者多以颜色特征、纹理特征和形状特征等单一特征进行杂草识别<sup>[9-12]</sup>,取得了一定成果。也有部分学者将上述特征进行相互融合<sup>[13-18]</sup>,即多特征的方法进行杂草识别。但这些研究除了利用颜色、纹理或形状特征之外,很多都利用了杂草的光谱特征,实验室环境中用高光谱仪或者红外相机采集图像是可行的,但由于设备昂贵,很难用于实际的农田杂草定位系统。文献[18]未用光谱特征,也得到了较高的杂草识别率,但实验环境是用数码相机拍摄的图片,没有讨论实际环境的应用效果。文献[19]基于作物行及株距等特征实现了杂草的定位,但在种植不规范的田间应用有难度。

此外,很多研究都是以不同杂草的特征作为杂草识别或定位的主要依据。但由于田间杂草种类较多,生长随机,特征不一,因此很难将所有杂草与作物准确分割定位。为了实现不同类型杂草的定位,实现变量对靶喷药,减少污染及除草剂的使用量,本文提出一种杂草逆向定位方法。采用颜色及作物叶片形状特征,同时结合 HU 不变矩特征<sup>[20-24]</sup>,将多目标杂草定位问题转换为单目标的作物定位问题。即以田间作物作为研究对象,采用多特征识别的方法准确定位每一株作物,然后基于颜色特征,将作物区域以外的绿色植物均认定为杂草,并基于此方法设计可安装于喷药机上的小型杂草定位系统。

## 1 逆向杂草定位思路及多特征选择

### 1.1 基本思路

提出一种杂草逆向定位方法,根据作物的 HU 不变矩特征以及作物形状特征等分析定位出田间作物,而后基于颜色特征,把作物区域以外的绿色植物均认定为杂草。将各种各样的杂草定位问题转换为较简单的单一作物定位问题,实现杂草的逆向定位,从而为精细施药提供依据。

### 1.2 作物特征提取

#### 1.2.1 HU 不变矩特征

Hu 在 1961 年提出不变矩的概念<sup>[22]</sup>,它是一种高度浓缩的图像特征,具有平移、旋转不变性,因此

被广泛用于模式识别、图像分类、目标识别和场景分析中。Hu 提出了  $p+q \leq 3$  的 7 个不变矩,具体定义可参见文献[22],经证明,这 7 个不变矩满足平移及旋转不变的条件,但不满足比例不变的条件。

由于这 7 个不变矩  $\phi_k (k=1,2,\dots,7)$  的变化范围很大,其数量级相差很大,为了便于图像识别,可以利用取对数的方法进行数据取值范围的压缩,同时考虑到不变矩有可能出现负值的情况,因此实际采用的不变矩为

$$I_k = \lg |\phi_k| \quad (k=1,2,\dots,7) \quad (1)$$

由于离散情况下的不变矩不满足比例不变的条件,而且在实际应用中还存在对比度的差别。为了推导出一般的不变矩,假设两幅在对比度、比例、位置和旋转上都有差别的图像  $f_1(x,y)$  和  $f_2(x',y')$ ,它们的内容完全是关于同一物体的,其相互关系可以表示为

$$\begin{cases} f_1(x',y') = mf_2(x,y) \\ \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $m$ ——对比度变化因子

$C$ ——比例变化因子  $\theta$ ——旋转角度

$a, b$ —— $x$  方向和  $y$  方向上的位移

使用文献[22]中不变矩公式,分别对  $f_1(x,y)$  与  $f_2(x',y')$  计算出 7 个度量值,并使用变换式(1),进行变换组合后,重新得出一组一般化的不变矩,具有比例、平移和旋转不变性。

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{\sqrt{I_2}}{I_1} & \beta_2 = \frac{I_3}{I_2 I_1} & \beta_3 = \frac{I_4}{I_3} \\ \beta_4 = \frac{\sqrt{I_5}}{I_4} & \beta_5 = \frac{I_6}{I_4 I_1} & \beta_6 = \frac{I_7}{I_5} \end{cases} \quad (3)$$

将  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$  作为作物图像的不变性特征,是用于作物定位的重要特征。

#### 1.2.2 叶片形状特征

为了提高杂草定位精度,在 HU 不变矩基础上引入叶片形状信息,包括 8 项相对值几何特征:纵横轴比、矩形度、面积凹凸比、周长凹凸比、球状性、圆形度、偏心率和形状参数。各形状特征参数具体如下:

(1) 纵横轴比为叶片最小包围盒的长宽比

$$R_a = L/W \quad (4)$$

式中  $L$ ——叶片最小包围盒长度

$W$ ——叶片最小包围盒宽度

(2) 矩形度为叶片面积与叶片最小包围盒面积的比值

$$R_b = A_1/A_b \quad (5)$$

式中  $A_1$ ——叶片面积

$A_b$ ——叶片最小包围盒面积

(3) 面积凹凸比为叶片面积与叶片凸包面积的

比值

$$R_c = A_i/A_c \quad (6)$$

式中  $A_c$ ——叶片凸包面积

所谓叶片凸包指的是叶片区域内的所有点都在其上或其内的一个最小凸多边形。

(4) 周长凹凸比为叶片周长与叶片凸包周长的比值

$$R_d = P_1/P_c \quad (7)$$

式中  $P_1$ ——叶片周长  $P_c$ ——叶片凸包周长

(5) 球状性为叶片面积与其凸包周长计算值

$$S = 4\pi A_1/P_c^2 \quad (8)$$

(6) 圆形度是叶片内切圆半径与叶片外切圆半径的比值

$$C = R_i/R_e \quad (9)$$

式中  $R_i$ ——叶片内切圆半径

$R_e$ ——叶片外切圆半径

其中,内切圆是在叶片区域里以叶片区域重心为圆心,圆心至叶片轮廓最小距离为半径的一个圆;外切圆是以叶片区域的重心为圆心,圆心至轮廓最大距离为半径的一个圆。

(7) 偏心率为叶片自身长轴与短轴的比值

$$E = X_1/X_s \quad (10)$$

式中  $X_1$ ——叶片自身长轴

$X_s$ ——叶片自身短轴

(8) 形状系数为叶片面积和周长的计算值

$$V = 4\pi A_1/P_1^2 \quad (11)$$

为进一步理解大豆叶片形状参数的意义,图 1

所示为几幅典型大豆叶片的图像。图 2 是单个大豆叶片的几个主要特征参数示意图。

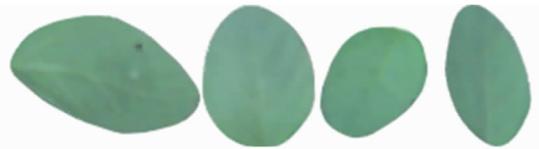


图 1 大豆叶片样例

Fig. 1 Samples of soybean leaves

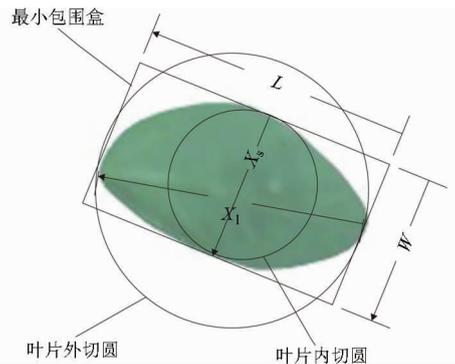


图 2 大豆叶片主要特征参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram for main feature parameters of soybean leaf

## 2 定位用特征参数及算法流程

### 2.1 叶片模板设计及特征参数

以田间的大豆叶片为研究对象,通过 Photoshop 软件在拍摄的大豆作物图像中提取出具有代表性的多幅单独叶片。叶片的平均形状特征值如表 1 所示,各自 HU 不变矩的特征值如表 2 所示。

表 1 大豆叶片形状特征提取结果

Tab. 1 Shape characteristics of soybean leaf

参数	纵横轴比	矩形度	面积凹凸比	周长凹凸比	球状性	圆形度	偏心率	形状系数
数值	2. 805	0. 621	0. 898	1. 123	0. 358	0. 204	2. 569	0. 506

表 2 大豆叶片不变矩特征提取结果

Tab. 2 Invariant moments of soybean leaf

大豆叶片 序号	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$
1	0. 896	0. 165	0. 613	0. 964	0. 824	1. 576
2	0. 850	0. 152	0. 635	0. 959	0. 782	1. 289
3	0. 825	0. 144	0. 664	0. 943	0. 749	1. 268
4	0. 808	0. 139	0. 688	0. 923	0. 722	1. 281
5	0. 802	0. 136	0. 694	0. 922	0. 716	1. 305
6	0. 791	0. 134	0. 710	0. 902	0. 692	1. 487
7	0. 786	0. 134	0. 713	0. 896	0. 683	1. 349
8	0. 781	0. 133	0. 719	0. 889	0. 674	1. 412
9	0. 777	0. 131	0. 727	0. 882	0. 666	1. 279
10	0. 773	0. 131	0. 733	0. 875	0. 658	1. 468

### 2.2 算法流程

(1) 在田间图像中提取出具有代表性的多幅单独叶片,利用式(3)计算该单独叶片的 6 个改进的

HU 不变矩特征值,并以其均值作为该田间作物的 HU 不变矩特征值预存,利用式(4)~(11)计算该单独叶片的 8 个形状特征值,并以形状特征平均值作为该田间作物的形状特征值预存。

(2) 对实时采集到的田间图像进行预处理,包括图像灰度化、二值化和去噪等操作。

(3) 对去噪后的图像采用 100 像素 × 100 像素分区域提取特征值,包括 6 个改进的 HU 不变矩值和 8 个形状特征值。

(4) 采用最临近分类器法进行匹配,将预存的该田间作物的 HU 不变矩值和该田间作物的形状特征值分别与步骤(3)计算的 100 像素 × 100 像素区域的 6 个改进的 HU 不变矩特征值和 8 个形状特征值进行特征匹配。

(5) 若匹配成功,对认定的作物区域进行标记,若匹配失败,则进行下一区域的计算。

(6) 遍历整个图像,重复步骤(3)至步骤(5)。

(7) 将定位得到的大豆叶片组成的连通区域认定为作物,并将所述作物区域以外的绿色植物均标记为杂草区域。

(8) 为增强显示效果,分别提取杂草与农作物的外部轮廓。

(9) 输出杂草定位结果。

具体杂草逆向定位算法流程如图3所示,各算法步骤的结果如图4所示。其中图4a是实际采集到的原始田间图像,图4b是基于超绿指标的灰度化结果,图4c是基于分水岭算法的叶片分割结果,图4d是对图4c进行数学形态学去噪结果,图4e是分区定位的结果,与标准叶片特征匹配成功的区域标记成叶片区域,图4f是基于连通域分析寻找到的大豆区域和基于颜色特征找到的杂草区域的结果。

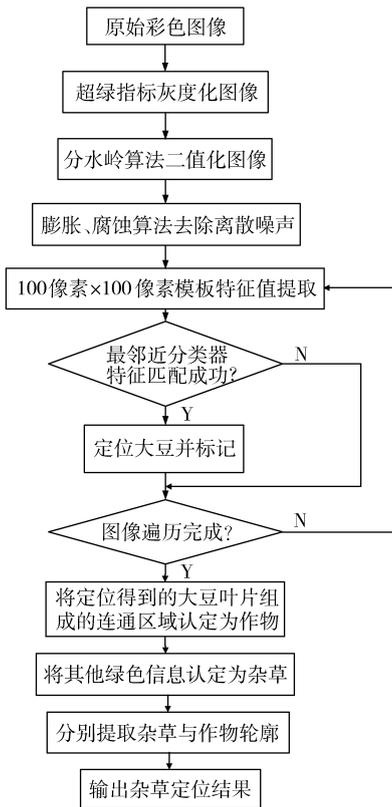


图3 杂草逆向定位方法流程图

Fig. 3 Flow chart of weed reverse positioning method

实际测试应用中,对采集到的田间图像均采用步骤(3)与步骤(4)分区计算其特征值并与标准大豆叶片特征值进行匹配。由于大豆属于簇生植物,因此只要能够准确识别出2~4片外围轮廓的叶片(识别出的叶片越多,定位的准确率越高,但耗时越长),然后再通过连通区域的分析即可准确定位出整株大豆。最后的试验结果也证实了该方法的有效性。

### 3 杂草定位及智能喷药装置

为了提高本杂草定位方法的实用性,设计了小

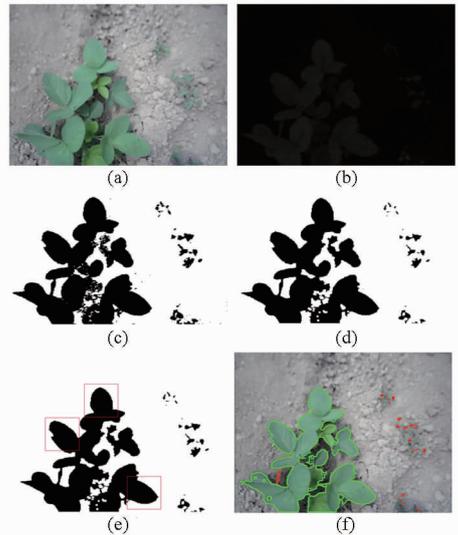


图4 逆向杂草定位各步骤结果

Fig. 4 Result of each step weed reverse positioning

(a) 原始图像 (b) 超绿指标 (c) 二值化  
(d) 膨胀腐蚀去噪 (e) 大豆叶片定位结果 (f) 最终定位结果

型杂草定位及智能喷药装置。主要由智能图像控制器(包括CPU、控制主板、摄像头、LED光源和外壳)、安装支架、喷头总成(包括电磁阀、喷头、辅助件)等组成。其中智能图像控制器装置包含有视频接口、RS232控制接口以及USB数据接口等。安装支架的高度可调,可用于田间图像识别范围的调节,喷头总成可接收根据智能控制器识别结果发出的指令,实现喷头的自动开闭,对靶喷药。所谓的对靶喷药是指喷头均匀分布,每个喷头负责一定的宽度区域,并由一个电磁阀来控制,只有当该喷头所在区域发现杂草时,根据杂草所在区域及杂草多少,来控制哪个喷头开启及其开启时间。所设计的杂草定位及智能对靶喷药的系统工作原理如图5所示。

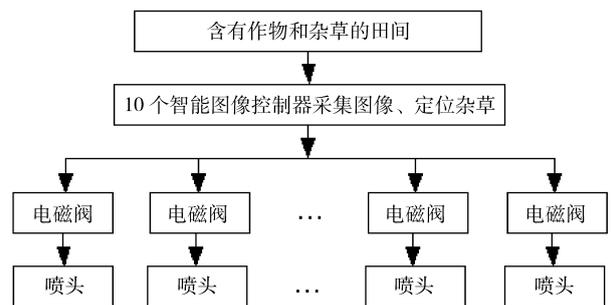


图5 杂草定位及智能喷药装置工作原理

Fig. 5 Working principle of weed positioning and intelligent spraying system

该装置结合配套软件可实现以下功能:能够检测小麦、玉米和大豆等主要作物的田间杂草;根据要求进行传统方式喷药与对靶喷药模式切换;具有杂草识别功能,实现精准对靶变量喷药;实现单个喷头的自动开闭控制;实现杂草识别视频的存储与回放,并绘制杂草分布图;用于田间信息采集等。

## 4 杂草逆向定位试验

为了进一步验证本文提出的杂草逆向定位方法的有效性,同时测试杂草逆向定位方法及装置的实际效果,将所开发的喷药装置在河北省固安县示范区大豆田间进行了大量的试验。本次试验将杂草定位装置安装在中机丰美系列喷药机上(喷幅为6 m)。如图6a所示,其中智能图像控制器10套,安装效果如图6b所示;安装支架10件;喷头总成10套。即在幅宽为6 m的喷药机上均匀布置了10个喷头,每个喷头区域安装一套图像控制器。因此,每套图像控制器识别宽度为0.6 m左右,控制1个

喷头。图6c为试验过程中某个图像控制器监控到的图像效果。

本次试验主要针对大豆田间杂草进行定位处理,部分定位结果如图7所示。经试验,在工作速度为5 km/h时,系统识别的准确率为90%,错误率为13%(错误率为未识别的杂草以及将其他错误信息认定为杂草的比率)。试验中发现,若大豆叶片无遮挡或者有轻微自身遮挡,则关键特征基本可以提取出来,匹配结果较好;若大豆叶片被形状差异较大的杂草遮挡,则会造成关键特征丢失,导致匹配结果较差;若大豆叶片被形状相似的杂草遮挡,则会造成误识别。

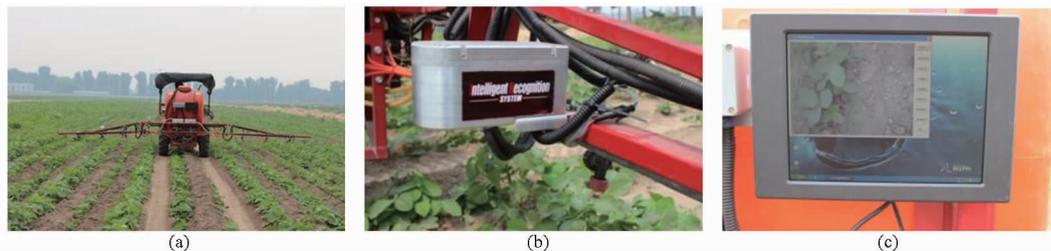


图6 田间试验

Fig.6 Field experiments

(a) 中机丰美系列喷药机 (b) 智能图像控制器安装效果 (c) 智能控制器采集到的图像

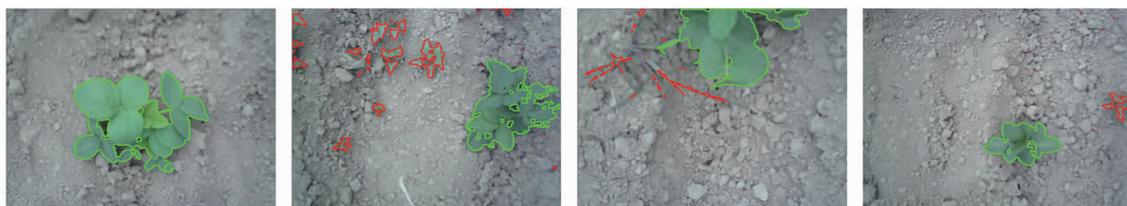


图7 杂草定位结果

Fig.7 Experimental results

## 5 结论

(1) 将杂草定位问题转换为田间作物定位,从而将多目标杂草定位问题转换为单目标的作物定位问题,大大提高了杂草定位的准确性与实用性。

(2) 提出了一种基于叶片HU不变矩、形状及颜色特征的多特征杂草逆向定位方法,使算法可以在实际环境中应用。

(3) 设计了一款小型杂草定位装置,该装置可应用于各种类型的喷药机上,提高了杂草定位系统的实用性与通用性。

(4) 该系统经过在大豆田间实际测试,识别各类杂草的准确率90%以上,错误率13%。识别错误率较大的主要原因是部分杂草与大豆重叠生长,导致难以准确定位。总体上,该方法较好地实现了各类杂草定位。

## 参 考 文 献

- 范德耀,姚青,杨保军,等. 田间杂草识别与除草技术智能化研究进展[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1823-1833.  
Fan Deyao, Yao Qing, Yang Baojun, et al. Progress in research on intelligentization of field weed recognition and weed control technology[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(9):1823-1833. (in Chinese)
- 毛文华,张银桥,王辉,等. 杂草信息实时获取技术与设备研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(1):190-195.  
Mao Wenhua, Zhang Yinqiao, Wang Hui, et al. Advance techniques and equipments for real-time weed detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):190-195. (in Chinese)
- Lo'pez-Grandos F. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real time approaches[J]. Weed Research, 2011,51(1):1-11.
- Bakker T, Asselt K, Bontsema J. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding[J]. Journal of Terramechanics,

- 2010, 47(2): 63-73.
- 5 张小龙, 谢正春, 张念生, 等. 豌豆苗期田间杂草识别与变量喷洒控制系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 220-225, 73.  
Zhang Xiaolong, Xie Zhengchun, Zhang Niansheng, et al. Weed recognition from pea seedling images and variable spraying control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 220-225, 73. (in Chinese)
- 6 尹东富, 陈树人, 裴文超, 等. 基于处方图的室内变量喷洒除草系统设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 131-135.  
Yin Dongfu, Chen Shuren, Pei Wenchao, et al. Design of map-based indoor variable weed spraying system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 131-135. (in Chinese)
- 7 尹建军, 沈宝国, 陈树人. 基于机器视觉的田间杂草定位技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 163-166.  
Yin Jianjun, Shen Baoguo, Chen Shuren. Positioning technology of field weed based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 163-166. (in Chinese)
- 8 何东健, 乔永亮, 李攀, 等. 基于 SVM-DS 多特征融合的杂草识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 182-187.  
He Dongjian, Qiao Yongliang, Li Pan, et al. Weed recognition based on SVM-DS multi-feature fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 182-187. (in Chinese)
- 9 白敬, 徐友, 魏新华, 等. 基于光谱特性分析的冬油菜苗期田间杂草识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 128-134.  
Bai Jing, Xu You, Wei Xinhua, et al. Weed identification from winter rape at seedling stage based on spectrum characteristics analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 128-134. (in Chinese)
- 10 毛文华, 王辉, 赵博, 等. 基于株心颜色的玉米田间杂草识别方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(13): 161-164.  
Mao Wenhua, Wang Hui, Zhao Bo, et al. Weed detection method based the centre color of corn seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(13): 161-164. (in Chinese)
- 11 Tellaeché A, Burgos Artizú X P, Pajares G, et al. A new vision based approach to differential spraying in precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2): 144-155.
- 12 Wu X W, Xu W Q, Song Y Y, et al. A detection method of weed in wheat field on machine vision[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 1998-2003
- 13 赵鹏, 韦兴竹. 基于多特征融合的田间杂草分类识别[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 275-281.  
Zhao Peng, Wei Xingzhu. Weed recognition in agricultural field using multiple feature fusions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 275-281. (in Chinese)
- 14 陈树人, 邹华东, 吴瑞梅, 等. 基于高光谱图像技术的稻田苗期杂草识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 253-257, 163.  
Chen Shuren, Zou Huadong, Wu Ruimei, et al. Identification for weedy rice at seeding stage based on hyper-spectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 253-257, 163. (in Chinese)
- 15 Singh K, Agrawal K N, Bora G C. Advanced techniques for weed and crop identification for site-specific weed management[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(1): 52-64.
- 16 赵川源, 何东健, 乔永亮. 基于多光谱图像和数据挖掘的多特征杂草识别方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 192-198.  
Zhao Chuanyuan, He Dongjian, Qiao Yongliang. Identification method of multi-feature weed based on multi-spectral images and data mining[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 192-198. (in Chinese)
- 17 唐晶磊, 何东健, 景旭, 等. 基于 SVM 的可见/近红外光的玉米和杂草的多类识别[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 97-103.  
Tang Jinglei, He Dongjian, Jing Xu, et al. Maize seedling/weed multiclass detection in visible/near infrared image based on SVM[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 97-103. (in Chinese)
- 18 李先锋, 朱伟兴, 纪滨, 等. 基于特征优化和 LS-SVM 的棉田杂草识别[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 168-172.  
Li Xianfeng, Zhu Weixing, Ji Bin, et al. Weed identification based on features optimization and LS-SVM in the cotton field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 168-172. (in Chinese)
- 19 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12-18.  
Hu Lian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12-18. (in Chinese)
- 20 Song Zhenghe, Zhao Bo, Zhu Zhongxiang, et al. Research on traffic number recognition based on neural network and invariant moments[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2007: 389-393.
- 21 Premaratne P, Premaratne M. Image matching using moment invariants[J]. Neurocomputing, 2014, 137: 65-70.
- 22 张伟, 何金国. Hu 不变矩的构造与推广[J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2449-2452.  
Zhang Wei, He Jinguo. Construction and generalization of Hu moment invariants[J]. Journal of Computer Application, 2010, 30(9): 2449-2452. (in Chinese)
- 23 高勇, 何刚, 张晓辉. 基于不变矩和禁忌搜索算法的图像识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 851-853.  
Gao Yong, He Gang, Zhang Xiaohui. Image recognition algorithm based on moment invariant and tabu search[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(4): 851-853. (in Chinese)
- 24 曾接贤, 付俊, 符祥. 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 592-602.  
Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang. Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(4): 592-602. (in Chinese)