

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.036

杂草信息实时获取技术与设备研究进展*

毛文华 张银桥 王辉 赵博 张小超

(中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

摘要: 杂草信息的实时获取技术是田间杂草精准控制研究的首要问题,杂草实时获取设备是制约精准除草作业实现的瓶颈。综述了基于光谱、图像和光谱成像技术的杂草实时获取技术与设备的国内外研究现状,以促进精准杂草管理技术在我国的应用和发展。基于光谱的杂草信息获取方法较适用于实时防除作物出苗前的杂草,国外已有 WeedSeeker、Weed-IT 等杂草传感器。基于图像的杂草信息获取方法较适用于识别行间杂草,国外已有 Autopilot、Cam Pilot、Robocrop 等视觉导航产品和 Robocrop InRow 机械除草机防除行间杂草。基于光谱成像的杂草信息获取方法较适用于识别行内杂草,中、澳正联合研发微光子植物判别和杂草控制传感器。需要继续深入研究在复杂的开放式非结构的农田环境中,快速、准确地实时获取农田杂草信息技术。

关键词: 精准农业 杂草识别 实时获取

中图分类号: YP391.41; S451.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0190-06

Advance Techniques and Equipments for Real-time Weed Detection

Mao Wenhua Zhang Yinqiao Wang Hui Zhao Bo Zhang Xiaochao

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

Abstract: Real-time infield weed detection is the most important technique of the precision infield weeds control. The real-time weed detection equipment is a key of the site specific weed management. Currently research is being carried out relating to weed sensor based on the spectroscopic, imaging and spectral imaging techniques. Theses advance technologies and equipments were reviewed for application them in China. The weed detection technique based on spectroscopic is suitable for classifying weeds from soil background without crop seedlings, such as the WeedSeeker and Weed-IT. The weed detection technique based on imaging is appropriate for discriminating inter-row weeds, including the Robocrop InRow mechanical weed control machine and the vision navigation product of the Autopilot, Cam Pilot and Robocrop, etc. The weed detection technique based on spectral imaging is more appropriate for distinguishing intra-row weeds, and a joint research on microphotonic plant discrimination and weed control sensor has been done by China and Australia. It is still a continuous project that how to detect infield weeds in real-time and specific under the complex and open field environment.

Key words: Precision farming Weed detection Real-time acquiring

引言

精准农业是 21 世纪农业发展的一个重要方向,将推动粗放型传统农业向精细型现代农业转变。精准农业的核心是针对农作物的生长环境及生长状况

在空间和时间分布上存在的差异,实施精确的变量管理措施,实现低投入、高效率、可持续的农业生产。田间信息是实施精准农业的第一个环节,是实践精准农业的前提条件。农田杂草是农业生产的大敌,也是困扰农作物生长的基本问题之一。因此,如何

收稿日期:2012-07-18 修回日期:2012-08-10

* 国家自然科学基金资助项目(31272056)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101902、2012AA10A503)

作者简介:毛文华,研究员,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: mwh-924@163.com

通讯作者:张小超,研究员,博士生导师,主要从事农业机械智能化装备技术研究,E-mail: zxc@caams.org.cn

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所面临的首要问题,也是制约其实现的瓶颈。

根据田间杂草获取作业和除草作业的顺序,田间杂草信息获取方法可分为预先获取和实时获取两种。预先获取的主要途径是多时相遥感监测,由于作物和杂草的光谱特性差异不显著,高分辨率卫星影像成本高、获取周期较长,作物和杂草的覆盖度影响监测精度,因此,遥感较适用于在作物没有出土的前期杂草管理中,监测危害密度大、大面积发生的田间杂草。实时获取主要有基于光谱、图像和光谱成像 3 种途径,在严重影响作物的苗期杂草控制中,具有适时、快速等优点,成为国内外田间杂草信息获取的主攻方向^[1-4]。本文主要分析利用光谱、图像和光谱成像技术的田间杂草实时获取方法及设备的国内外研究进展,并在此基础上提出田间杂草信息实时获取技术的研究发展方向。

1 基于光谱的杂草信息获取技术

基于光谱的田间杂草信息获取技术是运用一定波段内作物、杂草和土壤背景的反射率差异进行杂草识别,其算法比较简单,且光学传感器反应迅速、结构简单、成本低,在实时性和经济性方面具有一定优势,是一种有潜力的可行方法^[5-6]。

目前的研究主要是利用台式或便携式光谱仪采集作物和杂草的光谱数据,在实验室内采用化学计量和模式识别方法进行数据处理和分析,筛选有效区分作物和杂草的特征波长带^[7-11]。研究大都集中在室内或者人工光照条件下,无论样本准备还是测量条件都比较理想,影响因素较少;而实际田间环境复杂,光照、水分、土壤、病虫害等多种因素都会影响植物光谱特性。因此,在实际田间环境下,只利用几个较窄的特征波长带识别较多植物种类具有一定的困难,对传感器的分辨率也提出了较高的要求。

能区分杂草和土壤的基于光谱的杂草传感器已经商品化,而能区分作物和杂草的基于光谱的杂草传感器尚处于研发阶段。美国 NTech 公司已经成功开发了杂草传感器 WeedSeeker,它由一个独特的叶色素光学传感器、控制电路和一个阀体组成。WeedSeeker 的工作原理如图 1 所示,传感器向地面发射 770 nm 近红外光和 656 nm 红光光波检测土壤背景中的杂草,检波器读取反射光波信息,检测到植被时,车载电子设备触发阀门喷药,WeedSeeker 会对杂草进行针对性喷洒,而不是喷在空地上。荷兰 Rometron 公司的 Weed-IT 系列杂草传感器,根据植物叶绿素荧光特性,传感器发射红光,叶绿素将其转

换为红外光,传感器探测红外光强度,识别杂草和土壤背景。WEED-IT Ag II 探测高度为 110 cm,探测宽度为 100 cm,能探测的最小植株面积为 5 cm²,最大速度为 25 km/h。

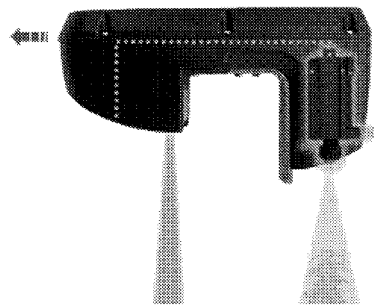


图 1 WeedSeeker 杂草传感器原理图

Fig. 1 Principle of WeedSeeker

2 基于图像的杂草信息获取技术

基于图像的田间杂草信息采集技术是利用机器视觉技术捕获、处理和分析田间图像中所包含的作物、杂草和土壤背景的形状、纹理和颜色等信息并进行分类,具有较高的空间分辨率,杂草识别率也较高,便于实时对靶控草,成为农田杂草信息采集技术领域的主攻方向。

多数基于机器视觉的农田杂草信息采集系统由光源、镜头、CCD 摄像机、图像采集卡及计算机等组成。光源一般采用氙气灯、卤素灯等作为可控光源,以规避田间自然光的影响。图像采集最常用的是彩色 CCD 摄像机,少数研究使用了 3CCD RGB、近红外、双目摄像机、3-D 摄像机。图像处理和分析采用的是通用 PC 机 (Personal computer),少数研究开发了基于 DSP (Digital signal process) 处理器的嵌入式系统^[12-18]。

杂草识别算法主要是根据作物及其伴生杂草的位置、形态、纹理、颜色特征进行。利用位置特征的识别算法,主要是利用 Hough 变换、像素直方图等算法提取作物行,适用于识别行间杂草;利用颜色特征的识别算法最简单,主要是利用颜色变换等算法提取作物或杂草的非绿色茎,但杂草识别率较低;利用形态特征的识别算法较简单,主要是利用区域标记算法提取叶片的无量纲形状特征或矩特征参数,适用于双子叶和单子叶植物的识别;利用纹理特征的识别算法最复杂,主要是利用共生矩阵、小波变换提取纹理特征,能达到很高的识别率,但识别速度也最慢^[12-28]。在早期的研究中,侧重于单一信息的提取,以检验利用该信息的可行性。如今,则侧重于多种信息的综合利用,以更准确、更快速地识别田间杂草。

由于图像的数据量大,对识别算法的处理速度具有很高的要求;而且光照、机械震动、叶片遮挡等因素也增加了田间应用的难度。因此,基于图像的农田杂草信息采集技术更适用于实时传感行间杂草,而对于行内杂草信息的实时采集则具有一定的困难,还需进一步研究。

目前,已产品化的通过图像识别作物行进行导航的系统有英国 Garford 公司的 Robocrop、德国 Kress & Co 公司的 Autopilot、德国 Claas 公司的 Cam Pilot,这些系统可安装在中耕除草机上实时传感作物行,实施机械对行防除行间杂草。Autopilot 是单目视觉系统,作物行中心线的定位精度达到了 ± 1 cm; Cam Pilot 是双目视觉系统,导航精度达到了 2~3 cm。Robocrop 视觉导航系统由 Robocrop 控制器、液压侧移装置、三点连接架、成像摄像机、轮速传感器、工作状态传感器组成,能引导锄头自动对行铲除行间杂草和作物周围的行内杂草。Robocrop InRow 机械除草机的原理如图 2 所示(图中数字 1 表示摄像机查看除草机前面的作物,2 表示计算机分析摄像机采集的图像,3 表示计算机监测旋耕锄的位置和速度,4 表示计程轮准确测量前移距离和速度,5 表示计算机通过液压阀调节旋耕锄的速度,6 表示除草旋耕锄绕作物旋转一周铲除杂草),根据作物之间具有一定的株距,且生长基本一致的特点,采用算法识别作物植株,无论作物植株附近有无杂草,都用独特的锄头沿作物植株四周进行除草动作。由于 Robocrop InRow 机械除草机作业要求株距不小于 15 cm,农作物的叶子要比杂草的叶子多,且作物叶片颜色要更接近于 540 nm 的绿色波段或 620 nm 的红色波段,因而限制了其使用范围。

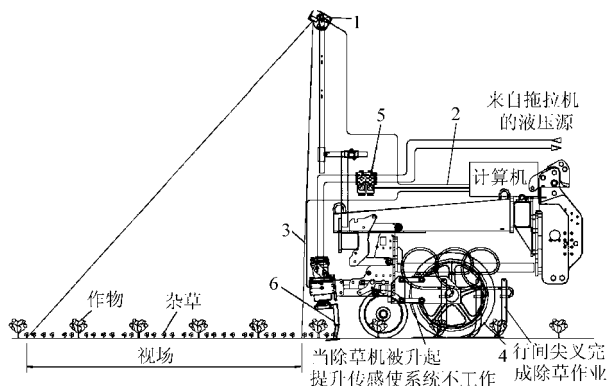


图 2 Robocrop InRow 除草机原理图

Fig. 2 Principle of Robocrop InRow weeder

3 基于光谱成像的杂草信息采集技术

基于光谱成像的田间杂草信息采集技术把光谱和图像技术结合起来,充分利用了二者的优点,互补

了不足。在紫外、可见光和近红外光区域的系列波长上,利用光谱成像技术捕获、处理和分析田间光谱图像序列中所包含的作物、杂草和土壤背景的光谱、位置、形状、纹理等信息并进行分类,具有较高的光谱分辨率和空间分辨率,杂草识别率也较高,是最有效、快捷的杂草自动传感方法,成为该领域新的发展方向。

多数基于光谱成像的农田杂草信息采集系统由光源、成像光谱仪及计算机等组成。一般也采用氙气灯、卤素灯等作为可控光源,用通用 PC 机进行数据采集和分析。所用成像光谱仪多为 3CCD 多光谱成像仪、滤光片型多光谱成像仪、调谐型高光谱成像仪。一般采用统计分析的方法,从多光谱或者高光谱图像中提取作物和杂草的光谱信息,分析有效识别作物和杂草的光谱特征集;再采用图像处理方法,从多光谱或者高光谱图像提取作物和杂草的位置、形状、纹理等信息,分析有效识别作物和杂草的空间特征集,以光谱特征集和(或)空间特征集建立杂草和作物的判别模型,进行作物和杂草的模式识别^[29-35]。

目前的研究多集中在适用于田间杂草识别的成像光谱仪的研制和有效识别杂草和作物的特征波长的选取方面。Nieuwenhuizen 等研制的甜菜田间杂草自动识别和控制车载系统,其多光谱成像系统由 5 盏氙气灯、2 台由地轮编码器触发的摄像机(RGB 彩色摄像机和近红外黑白摄像机)和 1 台实时 PXI 计算机组成。杂草识别算法是先提取作物行并确定其宽度,然后把作物行内的植物区域分成 100 mm^2 的方格单元,提取各单元的 6 项特征(1 项距离,4 项颜色,1 项纹理),输入贝叶斯分类器进行判别。实验结果表明:在 0.8 m/s 的行进速度下,沙土中杂草的控制率是 82.8%,粘土中杂草的控制率是 71.2%^[36]。刘波等利用自主设计的地面成像光谱系统(由扫描镜、镜头、ImSpector V9 分光器、CCD 相机组成),在自然环境下获取了胡萝卜幼苗以及马齿苋、牛筋草和地锦等杂草在 $380 \sim 760 \text{ nm}$ 波长区间的高光谱数据,通过数据归一化消除光照条件的影响之后,运用逐步法进行波段选择,采用 Fisher 线性判别方法对杂草与胡萝卜幼苗进行了识别,杂草的整体识别率达 89%,且红边波段对杂草有着显著的识别能力^[37]。Piron 等研究了根据作物和杂草的高度差异来识别胡萝卜田间行内杂草的多光谱立体视觉系统。立体视觉系统由一台多光谱相机和一台 PLC 视频投影仪组成,多光谱相机是一台装有滤光片旋转轮的黑白相机,旋转轮上有 22 片可见光至近红外光波段内的滤光片。系统通过感知作物和杂草

的高度差异来识别杂草,对叶片交叠不敏感,杂草识别率为 83%^[38]。

少数研究开始考虑田间环境的影响因素。Zhang 和 Slaughter 等研究了在可见光和近红外光区域内环境温度变化和太阳辐射照度对高光谱成像特征的影响,发现 6 种番茄和 2 种杂草的冠层反射率随温度变化主要在 480~670 nm 和 720~810 nm,通过精准的标定可以减少温度的影响,标定后的正确识别率达到了 92.2%^[39-41]。

基于光谱成像的田间杂草信息采集设备还处于研发阶段,低成本、通用性是急需解决的关键问题。丹麦 F. Poulsen APS 公司开发的 Robovator,采用了红光和近红外光组成的双光谱线扫描相机和 55 W 的卤素灯,视觉系统通过定位植物茎的出现点来识别作物,当以 3.5~4 km/h 速度行驶时,系统分辨率为 1.8 mm × 1.8 mm^[42]。澳大利亚埃迪斯科文大学 (Edith Cowan University) 和光电探测系统公司 (Photonic Detection Systems Pty Ltd.) 以及我国的大恒公司,正在合作研发基于光谱成像的微光子植物判别和杂草控制传感器,实现作物和杂草的实时区分和喷药防除。传感器原理图如图 3 所示,运用激光器发射可见光和红外光波段的多波长激光束 (473 nm、532 nm、635 nm、670 nm、785 nm),激光束通过一个光路照射到植物叶片、茎或土壤上,CCD 线扫摄像机 (1 024 像素) 采集从不同植物和土壤所反射的光信号强度,电子系统处理反射的数据,一旦发现杂草,发送信号打开喷嘴进行喷药。在实验室环境和农田环境下,可以成功地采集和分析目标的光谱数据,对不同品种的绿色植物实施精确识别^[43-44]。

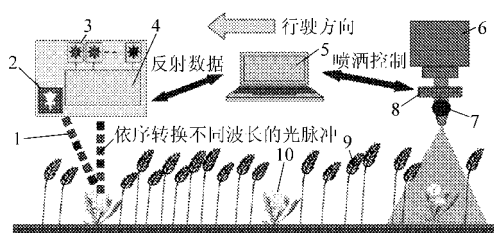


图 3 微光子植物判别和杂草控制传感器原理图

Fig. 3 Principle of microphotonic plant discrimination and weed control sensor

1. 反射激光脉冲 2. 光电探测器 3. 多光谱激光阵列 4. 激光组合器 5. 控制器 6. 喷筒 7. 喷嘴 8. 阀 9. 作物 10. 杂草

4 结束语

基于光谱、图像和成像光谱的 3 种田间杂草实时传感方法,各有利弊及其适用范围,具有最高分辨率和识别率的基于光谱成像的方法是杂草实时传感技术的发展方向。基于光谱的方法简易性、实时性和经济性最好,但识别精度低,无法识别作物和杂草,较适用于实时防除作物出苗前的杂草,国外已有 Weedseeker、Weed-IT 等杂草传感器。基于图像的方法简易性、实时性和经济性居中,但难于实时识别行内杂草,较适用于识别行间杂草,国外已有 Autopilot、Cam Pilot、Robocrop 等视觉导航产品和识别防除行内杂草的 Robocrop InRow 机械除草机。基于光谱成像的方法简易性、实时性和经济性最差,但识别精度最高,较适用于识别行内杂草,中、澳正联合研发微光子植物判别和杂草控制传感器。国外商品化的实时杂草传感设备,已经开始走向实际应用,而国内处于研发阶段,尚无成熟的产品问世。

由于农田杂草信息具有复杂性、多样性、分散性等特点,以及农田杂草信息采集所具有的野外测量、测量范围广、测量点分散等特殊特性,如何在复杂的开放式非结构的农田环境中,快速、准确地实时获取农田杂草信息是需要继续深入研究的课题。随着光电、机器视觉、智能控制等技术的不断发展,田间杂草实时传感技术与设备也会越来越成熟。就目前来看,杂草实时传感技术在准确性、实时性、适用性、通用性等方面还须进一步研究解决:

(1) 采用传感器融合技术,综合多种特征进行杂草传感,研究提高作物行内杂草识别精度的方法。

(2) 针对作物伴生杂草的田间场景,研究杂草传感、防除决策、对靶防除的快速方法,以满足杂草实时传感防控的要求。

(3) 全面考虑田间环境作业情况下影响植物光谱和图像特性的各种因素,研究规避影响因子的方法。

(4) 研究基于光谱成像的杂草实时传感技术与设备,开发适用于识别各种作物及其伴生杂草的通用方法和设备。

(5) 研究适于实时传感应用的农艺技术,实现规范化、标准化的农作物栽培管理。

参 考 文 献

- 1 Slaughter D C, Giles D K, Downey D. Autonomous robotic weed control systems: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(1): 63~78.
- 2 Christensen S, Sogaard H T, Kudsk P, et al. Site-specific weed control technologies[J]. Weed Research, 2009, 49(3): 233~241.

- 3 Lo'pez-Granados F. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real time approaches[J]. *Weed Research*, 2011,51(1): 1~11.
- 4 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.
- 5 Wang N, Zhang N, Wei J, et al. A real-time, embedded, weed-detection system for use in wheat fields [J]. *Biosystems Engineering*, 2007,98(3):276~285.
- 6 Longchamps L, Panneton B, Samson G, et al. Discrimination of corn, grasses and dicot weeds by their UV-induced fluorescence spectral signature[J]. *Precision Agriculture*, 2009,11(2):181~197.
- 7 Go'mez-Casero M T, Castillejo-Gonza'lez I L F, Garc'a-Ferrer A, et al. Spectral discrimination of wild oat and canary grass in wheat fields for less herbicide application[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010,30(3): 689~699.
- 8 陈树人,栗移新,毛罕平,等. 水稻中稗草光谱分析与识别[J]. *农业机械学报*,2008,39(9):96~99.
Chen Shuren, Li Yixin, Mao Hanping, et al. Distinguishing barnyard-grass from rice using spectrum analysis technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(9):96~99. (in Chinese)
- 9 吴迪,黄凌霞,何勇,等. 作物和杂草叶片的可见-近红外反射光谱特性[J]. *光学学报*,2008, 28(8):1 618~1 622.
Wu Di, Huang Lingxia, He Yong, et al. Visible-near infrared reflection spectroscopy for crop-weed discrimination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8):1 618~1 622. (in Chinese)
- 10 朱登胜,潘家志,何勇. 基于光谱和神经网络模型的作物与杂草识别方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(5): 1 102~1 106.
Zhu Dengsheng, Pan Jiazhi, He Yong. Identification methods of crop and weeds based on Vis/NIR spectroscopy and RBF-NN model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(5): 1 102~1 106. (in Chinese)
- 11 邓巍,赵春江,何雄奎,等. 绿色植物靶标的光谱探测研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2010,30(8):2 179~2 183.
Deng Wei, Zhao Chunjiang, He Xiongkui, et al. Study on spectral detection of green plant target [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010,30(8):2 179~2 183. (in Chinese)
- 12 Nieuwenhuizen A T, Hofstee J W, Henten E J. Performance evaluation of an automated detection and control system for volunteer potatoes in sugar beet fields[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(1):46~53.
- 13 Berge T W, Goldberg S, Kaspersen K, et al. Testing image-based site-specific weed control in cereals [C]//Poster at the 15th European Weed Research Society Symposium, Kaposvar, Hungary, 2010.
- 14 Tellaeche A, Burgos Artiztu 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.
- 15 熊锋.基于双目立体视觉的杂草定位技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2008.
Xiong Feng. Orientation technique research of weed based on binocular stereo vision [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 16 赵德升.基于机器视觉的精确喷施智能除草装置杂草实时识别技术[D]. 镇江:江苏大学,2009.
Zhao Desheng. Real-time weed identification technique for precise spraying intelligent weeding device based on machine vision [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2009. (in Chinese)
- 17 夏利兵.基于角点特征的双目视觉杂草定位系统研究[D]. 镇江:江苏大学,2009.
Xia Libing. Research on system of binocular vision weed locating based on corner feature [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 18 Gee C, Bossu J, Jones G, et al. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008,60(1): 49~59.
- 19 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)
- 20 Nieuwenhuizen A T, Tang L, Hofstee J W, et al. Colour based detection of volunteer potatoes as weeds in sugar beet fields using machine vision[J]. *Precision Agriculture*, 2007, 8(6): 267~278.
- 21 朱伟兴,金飞剑,谈蓉蓉.基于颜色特征与多层同质性分割算法的麦田杂草识别[J].*农业机械学报*,2007,38(12):25~28.
Zhu Weixing, Jin Feijian, Tan Rongrong. Weed recognition method based on color feature and hierarchical homogeneity segmentation in wheat field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(12):25~28. (in Chinese)
- 22 周平,汪亚明,赵匀.基于颜色分量运算与色域压缩的杂草实时检测方法[J].*农业机械学报*,2007,38(1):116~119.
Zhou Ping, Wang Yaming, Zhao Yun. Real-time detection of weeds based on color components and bit-mask operation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(1):116~119. (in Chinese)
- 23 陈树人,沈宝国,毛罕平,等. 基于颜色特征的棉田中铁苋菜识别技术[J]. *农业机械学报*,2009,40(5):149~152.
Chen Shuren, Shen Baoguo, Mao Hanping, et al. Copperleaf herb detection from cotton field based on color feature [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(5):149~152. (in Chinese)

- 24 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)
- 25 Tellaeche A, Burgos-Artizzu X P, Pajares G, et al. A vision-based method for weeds identification through the Bayesian decision theory[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 521~530.
- 26 曹晶晶,王一鸣,毛文华,等. 基于纹理和位置特征的麦田杂草识别方法[J]. 农业机械学报,2007,38(4):107~110.
Cao Jingjing, Wang Yiming, Mao Wenhua, et al. Weed detection method in wheat field based on texture and position features [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4):107~110. (in Chinese)
- 27 李先锋,朱伟兴,孔令东,等. 基于 SVM 和 D-S 证据理论的多特征融合杂草识别方法[J]. 农业机械学报,2011,42(11): 164~168,163.
Li Xianfeng, Zhu Weixing, Kong Lingdong, et al. Method of multi-feature fusion based on SVM and D-S evidence theory in weed recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):164~168, 163. (in Chinese)
- 28 李慧,祁力钧,张建华,等. 基于 PCA-SVM 的棉花出苗期杂草类型识别[J]. 农业机械学报,2012,43(9):184~189,196.
Li Hui, Qi Lijun, Zhang Jianhua, et al. Recognition of weed during cotton emergence based on principal component analysis and support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):184~189,196. (in Chinese)
- 29 Hamouz P, Novakova K, Soukup J, et al. Detection of *Cirsium Arvense* L. in winter wheat using a multispectral imaging system [J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2008,115:167~170.
- 30 Slaughter D C, Giles D K, Fennimore S A, et al. Multispectral machine vision identification of lettuce and weed seedlings for automated weed control[J]. Weed Technology,2008, 22(2): 378~384.
- 31 潘家志. 基于光谱和多光谱数字图像的作物与杂草识别方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
Pan Jiazhi. Study of crop and weed recognition based on Vis/NIR spectroscopy and multi-spectral digital image processing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 32 张玉珠. 基于多光谱图像机器视觉的棉田杂草识别研究[D]. 镇江:江苏大学,2008.
Zhang Yuzhu. Research on weeds identification in cotton fields based on multi-spectral images machine vision [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 33 张东彦,黄文江,王纪华,等. 基于扫描成像的作物近地高光谱获取与特征分析[J]. 农业工程学报,2010, 26(12):188~192.
Zhang Dongyan, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. In-situ crop hyperspectral acquiring and spectral features analysis based on pushbroom imaging spectrometer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12):188~192. (in Chinese)
- 34 Jon-Joseph Q A, Richard D D, Kevin D G. The use of early season multispectral images for weed detection in corn[J]. Weed Technology, 2007,21(4):857~862.
- 35 Gray J C J, Shaw D R, Gerard P D, et al. Utility of multispectral imagery for soybean and weed species differentiation[J]. Weed Technology, 2008, 22(4): 713~718.
- 36 Nieuwenhuizen A T, Hofstee J W, Henten E J. Performance evaluation of an automated detection and control system for volunteer potatoes in sugar beet fields[J]. Biosystems Engineering,2010,107(1):46~53.
- 37 刘波,方俊永,刘学,等. 基于成像光谱技术的作物杂草识别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010, 30(7):1 830~1 833.
Liu Bo, Fang Junyong, Liu Xue, et al. Research on crop-weed discrimination using a field imaging spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(7):1 830~1 833. (in Chinese)
- 38 Piron A, Leemans V, Lebeau F, et al. Improving in-row weed detection in multispectral stereoscopic images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009,69(1): 73~79.
- 39 Zhang Y, Slaughter D C. Development of a robust weed species mapping system using hyperspectral imaging for precision weed control in processing tomato[C]//ASAE, 2010, No:1009313.
- 40 Zhang Y, Slaughter D C. Hyperspectral species mapping for automatic weed control in tomato under thermal environmental stress [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011,77(1): 95~104.
- 41 Zhang Y, Slaughter D C. Influence of solar irradiance on hyperspectral imaging-based plant recognition for autonomous weed control[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 330~339.
- 42 Henrik S M, Thomas M G, Rasmus N J. Estimating the plant stem emerging points (PSEPs) of sugar beets at early growth stages [J]. Biosystems Engineering, 2012,111(1): 83~90.
- 43 Paap A, Askraha S, Alameh K, et al. Photonic-based spectral reflectance sensor for ground-based plant detection and weed discrimination[J]. Optics Express, 2008,16(2): 1 051~1 055.
- 44 Alameh K, Askraha S, Paap A, et al. Novel photonic sensor engine for discrimination and detection of weeds and crops[J]. Physics, 2010,39(10): 705~712.