

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.041

豌豆苗期田间杂草识别与变量喷洒控制系统^{*}

张小龙 谢正春 张念生 曹成茂

(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

【摘要】 以图像实时控制器 CVS-1456 为核心设计了图像实时识别与变量喷洒系统。在普通光照下分别采集包含豌豆苗、土壤背景、杂草(刺儿菜)等的原始图像,分析其颜色模型,根据色差分量 $R-B$ 颜色特征采用 LabVIEW 和 IMAQ Vision 编程实现杂草实时识别。基于 Canny 算子对识别的杂草进行边缘检测,并提取目标杂草的面积、密度和形心位置 3 个特征参数为变量喷洒定位提供依据。随机试验表明:基于 $R-B$ 色差分量对豌豆苗期复杂背景下刺儿菜杂草平均正确识别率达到 83.5%,均方差 0.066,该方法准确可靠。

关键词: 杂草识别 虚拟实时系统 颜色特征 边缘检测 变量喷洒

中图分类号: S126; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0220-06

Weed Recognition from Pea Seedling Images and Variable Spraying Control System

Zhang Xiaolong Xie Zhengchun Zhang Niansheng Cao Chengmao

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract

The application system of real-time image recognition and variable spraying was designed based on the virtual image real-time controller CVS-1456. The original images, which contained pea seedlings, soil background, weed of cephalanoplos segetum, etc, were collected in normal sunlight. The color models of original images were analyzed and real-time weed recognition was realized based on $R-B$ color features by using LabVIEW software and IMAQ Vision toolbox. The Canny algorithm was employed to detect weed edges, and three characteristic parameters of target weed, namely area, density, centroidal position, were extracted to provide positioning evidences for variable spraying. The random tests verified the accuracy and reliability of the purposed cephalanoplos segetum recognition method from complex background images based on $R-B$ color features, in which the average right recognition rate was 83.5%, mean square deviation 0.066.

Key words Weed recognition, Virtual real-time system, Color feature, Edge detection, Variable spraying

引言

杂草对农作物苗期生长危害很大,及时清除尤为重要。传统除草方式以粗放式的大面积喷洒化学药剂为主,不仅造成浪费,而且危害农田环境。实现杂草区域选择和农药变量喷洒的前提是准确识别杂

草,并确定杂草的位置。

利用计算机视觉进行杂草识别是实现机械化变量喷洒、锄草机器人目标自行识别的有效方法^[1]。国外计算机视觉识别杂草技术主要基于叶片形状特征^[2]、植物纹理^[3]、颜色特征^[4]、不同波长(蓝、绿、红和近红外光)下的反射光^[5]、成像光谱仪^[6]等,涉

收稿日期: 2012-06-20 修回日期: 2012-07-25

^{*} 安徽省高等学校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2011A101)

作者简介: 张小龙,副教授,博士后,主要从事车辆导航理论与装备研究,E-mail: sunshine.lzh@gmail.com

通讯作者: 曹成茂,教授,主要从事智能检测与控制技术研究,E-mail: caochengmao@sina.com

及的杂草包括禾本类和阔叶类杂草,作物包括大豆、小麦、马铃薯、甜菜等。我国基于机器视觉识别杂草研究尚处于探索阶段,主要基于作物不同颜色模型色度阈值,或神经网络模型(包括支持向量机 SVM 模型)进行分割和识别^[7-11]。神经网络模型方法识别精度依赖于样本和模型的复杂程度,学习和识别速度慢;YCbCr 颜色模型方法应用于单一背景分割,适应性差。

本文针对豌豆苗期杂草、土壤等复杂组成背景颜色下的杂草实时识别需要,基于虚拟仪器构建图像采集与实时分析系统,分析颜色模型识别杂草的可行性,引入色差特征识别杂草的方法,同时提取出分割后杂草目标的几何特征参数,为机器除草和农药变量喷洒定位提供依据。

1 图像采集、识别与实时控制系统

研究豌豆苗期杂草实时识别是为了满足后续精确变量农药喷洒的需要,图 1 是基于试验车(拖拉机)搭建的系统框图。主要由数字图像采集、识别与实时控制模块(包括嵌入式图像采集与控制器 CVS-1456、工业级摄像头及镜头、光源等),GPS 精

确位置姿态测量模块和农药变量喷洒驱动模块组成。GPS 精确位置姿态测量模块获取车体姿态位置信息并通过串口发送到图像采集与实时控制器,该控制器对同步采集到的图像进行识别,并实时计算变量喷雾器的位置,通过 I/O 口发送控制信号给变量喷洒驱动器,实现精确变量喷洒控制。主要选型传感器性能如表 1 所示。

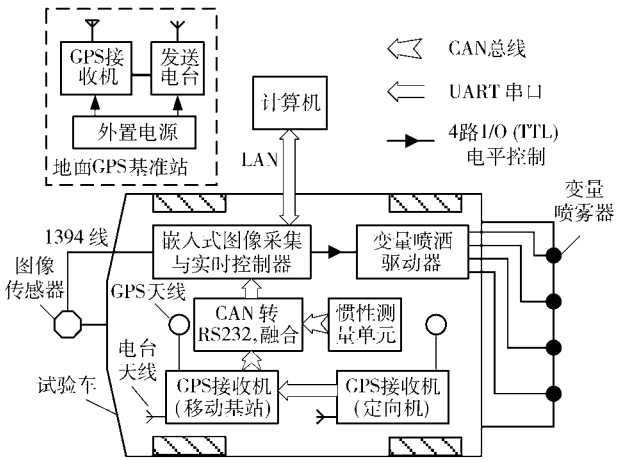


图 1 图像实时识别与变量喷洒控制系统框图

Fig. 1 Scheme of images real-time recognition and variable spraying control system

表 1 主要传感器性能指标
Tab. 1 Main sensors' parameters

传感器		生产厂商	精度	数据输出 物理接口	数据更新 速率/Hz
图像传感器	摄像头	德国 Basler SCA1390-17fc	彩色摄像头,1 390 像素×1 040 像素	1394b	
	光学镜头	美国 EDMUND	25 mm 定焦		
	光源	美国 AI	AI 环形红色 RL1424-660 光源 和红外 RL1424-880 光源		
GPS 接收机	车载接收机	美国 Trimble SPS 852	RTK 水平定位精度 8 mm RMS, 速度精度 0.1 km/h RMS, 定向精度 0.1°(天线距离 2 m)	SCIA (UART)	20
	地面基站接收机	中国华测 X60	为车载接收机提供 RTK CMR 格式差分改正信息,主要信息 1 帧/s		
惯性测量单元	自行研制	美国 VectorNav	加速度量程 ±2g, 非线性度 ±0.5% FS 角速度量程 ±100(°)/s, 非线性度 ±1% FS	CAN UART	200
		VN-100 芯片	侧倾角、俯仰角、侧偏角精度 0.5°	SPI	

图 1 中摄像头和喷雾器相对于试验车的位置是固定的。而试验车的运动轨迹和速度、姿态等信息由 GPS 精确位置测量模块实时测量得到。系统中选用的 GPS 位置精度优于 2 cm。定义原点在试验车附近场地的东北天坐标系,由 GPS 精确位置测量模块可测量得到对应 GPS 天线位置处试验车的位置信息,经过高斯投影可得到试验车在东北天坐标系中的位置表示。通过计算可得到摄像头和喷雾器在东北天坐标系中的位置表示。虽然一幅图像中的杂草位置分布只相对于图像本身,但通过对摄像头

的标定可以得到杂草分布在东北天坐标系中的位置表示。

假设在某时刻识别出杂草,并计算出杂草在东北天坐标系中的位置。根据实时测量的试验车速度、姿态和位置信息,实时监测喷雾器的位置。当一段时间后,喷雾器喷洒区域已经开始覆盖识别的杂草区域,即可根据杂草分布信息进行变量喷洒控制。

1.1 嵌入式图像采集与实时控制模块

图像采集与实时控制器选用了美国国家仪器公司的嵌入式系统 CVS-1456,其处理器处理速度快,

每秒可处理 1.585 G 条指令,内存 128 MB,通过 Firewire 1394b 可同时连接 3 个摄像头,帧处理速度为 100 f/s。控制器上有 VGA 接口,可以方便地与显示装置连接用于监控。计算机基于 LabVIEW 开发环境通过网线对其调试和下载应用程序。

CVS-1456 通过 RS 232 串行接口实时接收车身位置姿态信息,通过 4 路 TTL 数字输出端口给变量喷洒驱动器发出控制指令。CVS-1456 TTL 数字输出端口共有 10 路,输入端口 2 路,可方便地与外围设备同步使用。

1.2 GPS 精确位置测量模块

车身位置姿态模块由双天线差分 GPS(简称 DDGPS)、惯性测量单元、基于 DSP 的数据融合和 CAN 转 RS232 板卡组成。

图 1 中左上侧虚线框内为 DDGPS 基准站,放置在试验场地地面。2 套车载 GPS 接收机及天线,选用美国 Trimble 公司的 SPS 852 接收机及 GA 810 GPS 双频天线,1 台作为移动基站,另 1 台作为定向机,布置时将 GPS 天线放在试验车车顶纵向对称面内,且相互间距离越远越好。2 台接收机均开通双频功能,内部集成电池和数据接收电台。移动站可独立完成定向和速度测量,在地面基准站提供载波相位差分信息时可同时实现高精度的位置测量。

选用美国 VectorNav 公司 VN-100 芯片设计 9 测量自由度惯性测量单元,完成试验车坐标系中 3 个方向线加速度、角速度,以及姿态角和侧偏角的直接测量,提高了可靠性和实时性。测量数据通过 CAN 接口实时输出。

基于 TI 公司 DSP 28335 设计了 CAN 转 RS 232 的板卡,实现 GPS 接收机和惯性测量单元的 CAN 输出数据转换后由串口实时传输到图像采集与实时控制器。另外,这张板卡也同时完成 GPS 数据与惯性测量单元数据预处理和校正融合功能。

2 嵌入式图像采集与实时识别编程

CVS-1456 是嵌入式实时系统,能够独立快速采集处理图像。对其部署实时应用程序步骤如下:

(1) 用网线将 CVS-1456 与计算机相连,在 MAX 程序中搜索添加终端设备 CVS-1456,并部署 LabVIEW 开发软件(特别是 Real time 模块)和硬件驱动等。

(2) 在 LabVIEW 开发环境中,在线调试好应用程序,利用程序生成规范器将其编译成实时应用程序,配置其属性,并将其设置为启动项,最后保存并部署到 CVS-1456 中去。

(3) 断开 CVS-1456 与计算机之间的网线连

接,CVS-1456 重启后即可独立运作。

2.1 图像帧数据的截取与杂草实时识别算法编程

图 2 是 CVS-1456 中运行的主程序图,包括 3 部分:图像实时获取与识别、特征参数提取;TCP 通信的配置和实时传输;外部 I/O 口控制程序的暂停与终止。GPS 精确位置测量模块数据接收、杂草和喷雾器位置计算与喷雾控制程序图中没有给出。

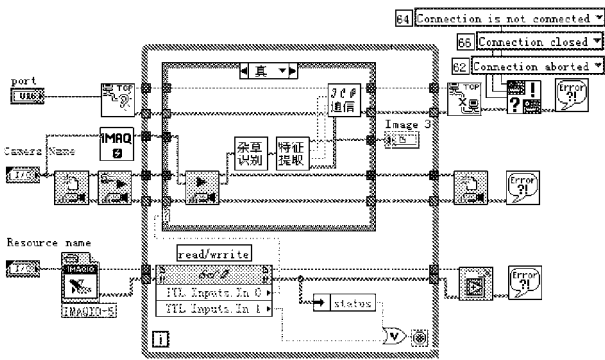


图 2 图像实时采集与处理程序框图

Fig. 2 Program diagram of real-time image acquisition

在图像采集编程中,首先调用 IMAQdx Open Camera. vi 打开与采集卡相连的摄像头(系统中为 Cam0)。然后调用 IMAQdx Configure Grab. vi 对图像采集进行初始化,调用 IMAQ Create. vi 为图像数据创建一个数据缓冲区。最后在退出应用程序之前调用 IMAQdx Grab. vi 完成摄像头和图像缓冲内存区释放。在图像处理编程中包括杂草识别、特征提取和 TCP 通信 3 个子函数。杂草识别子函数如图 3 所示,包括色差提取、图像分割与滤波等。

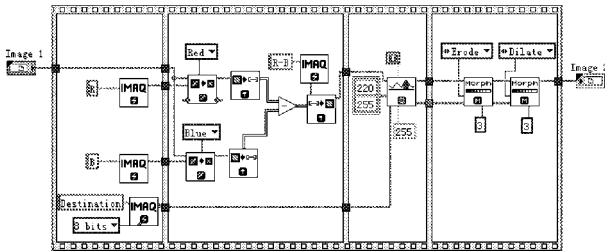


图 3 杂草识别程序框图

Fig. 3 Program diagram of image identification

通过 CVS-1456 硬件两路 TTL I/O 口高低电平状态控制应用程序运行暂停和结束,如图 2 左下角所示。调用 LabVIEW FPGA 接口函数打开 TTL 输入端口(系统中端口 IP 地址配置为 192.168.10.13),引入 TTL 控制信号,一路用于控制图像采集与识别暂停,一路用于控制程序退出。

2.2 杂草几何特征实时提取与 LAN 口输出编程

杂草特征提取子函数编程时调用 IMAQ Centroid. vi 计算目标杂草质心,调用 IMAQ Particle Analysis. vi 计算目标杂草面积,其程序如图 4 所示。

TCP 通信具有传输速度快、传输信息量大的优

势。系统中将 CVS - 1456 与便携式计算机通过 LAN 口连接,实现对 CVS - 1456 工作过程监控和数据记录。编程时将 CVS - 1456 配置为服务器端,PC 机为客户端,服务器端向客户端发送数据。如图 2 中左上为调用 TCP Listen. vi 在指定端口(本系统中指定为 1 054)监听是否有客户端请求连接,当客户端发出连接请求后,进入主循环发送数据。

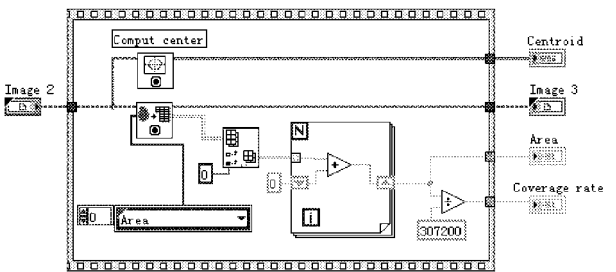


图 4 特征提取程序框图

在 TCP 协议通信子函数中,先将 3 个杂草几何特征参数打包转成 ASCII 码,然后写入 TCP 发送缓冲区排队发送。

3 基于颜色模型杂草识别

3.1 图像的获取

基于图 1 中的图像采集与实时控制模块,采用 LabVIEW 和 IMAQ Vision 软件编写应用程序并下载到 CVS - 1456 控制器中实时运行。试验地为安徽农业大学农萃园豌豆试验田,不同光照强度下采集 100 幅图像,图像大小为 640 像素 × 480 像素,jpg 格式。图 5a 所示是正常光照下采集到的包含豌豆、土壤背景、杂草(刺儿菜)等的原始图像。

3.2 颜色模型分析

图像处理中颜色空间包括 RGB、HSI 和 HSV 等。RGB 颜色模型是由红、绿和蓝三基色构成的表色系统,对光照变化具有较强的敏感性。HSI 颜色模型定义以色调、饱和度和亮度 3 种基本特征量来感知颜色,更接近于人眼对颜色的感知。HSV 比较直观,同样也比较符合人的视觉特性, H 、 S 和 V 分别表示色调、饱和度和明度。图 5a 中各分量灰度分布如图 5b ~ 5d 所示。

图 5a 图像 RGB 颜色模型三基色分量灰度分布比较集中,区别不大。HSI、HSV 颜色模型下仅 H 分量的灰度曲线呈较明显的双峰特性。进一步分析可知, H 灰度曲线其中一个单峰是由土壤背景颜色构成,另一个单峰是由豌豆和杂草共同组成(豌豆和杂草颜色相近),所以对于土壤以及和豌豆颜色接近的杂草等,不能用 H 分量颜色特征直接分割。

3.3 基于 $R - B$ 色差特征的阈值分割及去噪

对 RGB 各颜色分量灰度信息统计分析发现,分

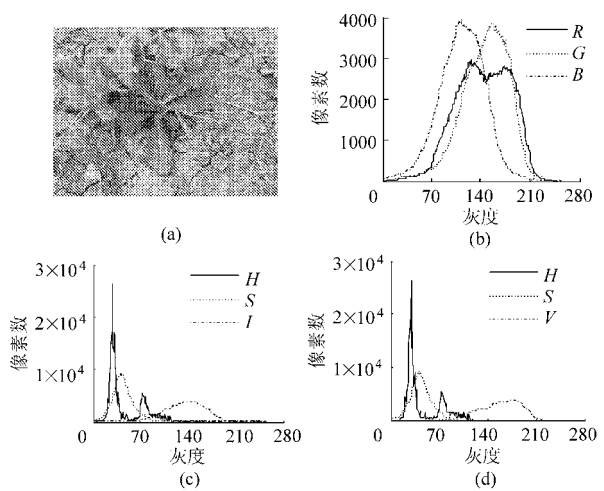


图 5 原始图像及其颜色空间各分量灰度图

Fig.5 Original image and its color weight histogram

(a) 原始图像 (b) RGB (c) HSI (d) HSV

量 R 和 B 减法运算得到的 $R - B$ 色差灰度图中杂草和混合背景(主要由豌豆和土壤构成)有较大区别。图 5a 图像 $R - B$ 分量色差图及其灰度分布如图 6a 和 6b 所示。 $R - B$ 灰度图呈双峰型,左峰主要由豌豆和土壤构成,右峰由杂草构成,可利用此特征进行图像分割。

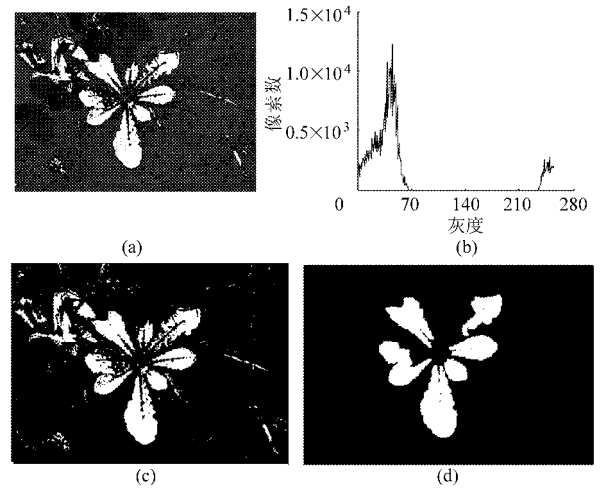


图 6 $R - B$ 分量色差处理与滤波

Fig.6 $R - B$ weight difference processing and denoising

(a) 色差图 (b) 直方图 (c) 分割结果 (d) 去噪结果

选择合适的阈值可以得到理想的只含杂草的二值图像。图 6b 中取阈值 $T = 150$,可得到较好的分割效果。图 5a 分割后的图像如图 6c 所示,但仍含有较多的非杂草目标噪声。采用 3×3 结构模板对二值图像先作 3 次腐蚀运算,再作 3 次膨胀运算以消除噪声,去噪后结果如图 6d 所示。

3.4 杂草识别结果统计分析

表 2 是从不同光照强度下采集 100 幅图像中随机抽取的 20 幅图像进行杂草辨识的结果,其中主要杂草是刺儿菜,部分图像中含有青草。一幅图像,首

先通过人眼根据经验判断豌豆苗和杂草分布,然后通过编程分别统计出是杂草已识别出杂草的像素、不是杂草被识别成杂草的像素、是杂草而未被识别出杂草的像素,并将三者相加得到总像素。定义正确识别率为是杂草已识别出杂草的像素与总像素的比值,错误识别率为不是杂草识别成杂草的像素与总像素的比值,未识别率为是杂草未识别出杂草的像素与总像素的比值。

从表中可以看出,平均正确识别率为 83.5%,均方差为 0.066;平均错误识别率为 11.7%,均方差为 0.065。表中序号 12 和 15 对应的图像中出现是杂草未识别出杂草的情况,主要原因是图像中含有青草部分,基于 $R-B$ 色差不能进行分割,但试验表明采用 $R-G$ 色差模型可以有效地对其进行分割。正确识别率的波动和具体图像质量和采用的滤波方法有关。由此可以认为基于 $R-B$ 色差特征固定阈值分割和去噪方法对豌豆苗期刺儿菜杂草识别是可靠有效的。

文中豌豆苗与刺儿菜 $R-B$ 色差阈值范围为

80~220,对于识别豌豆苗和其他杂草,此阈值需要根据实际需要选取,或由软件自适应调整。表 2 中选取的图像已考虑到光照的影响,为了进一步提高系统对刺儿菜和其他与豌豆苗颜色特征接近的杂草的识别正确率,构建应用系统时已考虑加入了红色和红外光源(表 1)以提高区别程度,必要时采用包含页面形状特征在内的神经网络融合方法。作者将对此展开深入研究以提高系统对不同环境的适应性。

4 Canny 算法边缘检测和几何特征提取

4.1 边缘检测

杂草边缘检测为农药精确变量喷洒提供定位信息。Canny 边缘检测算子是一种有效算法,能够在噪声和边缘检测中取得较好的平衡。首先对灰度图像用高斯滤波器进行平滑,然后对平滑后的图像像素计算梯度幅值和梯度方向,用于细化边缘。使用两个幅值阈值检测边缘,高阈值检测梯度幅值大的强边缘,低阈值检测梯度幅值较小的弱边缘。当强

表 2 杂草识别结果统计
Tab.2 Statistic result of weeds recognition

序号	总像素数	是杂草已识别出 杂草的像素数	不是杂草识别 成杂草的像素数	是杂草未识别出 杂草的像素数	正确 识别率/%	错误 识别率/%	未识 别率/%
1	65 926	50 937	14 989	0	77.3	22.7	0
2	43 809	42 652	1 157	0	97.4	2.6	0
3	35 498	30 932	4 566	0	87.1	12.9	0
4	40 763	36 716	4 047	0	90.1	9.9	0
5	59 220	57 319	1 901	0	96.8	3.2	0
6	47 891	39 181	8 710	0	81.8	18.2	0
7	41 932	33 287	8 645	0	79.4	20.6	0
8	59 574	42 418	17 156	0	71.2	28.8	0
9	54 232	50 187	4 045	0	92.5	7.5	0
10	41 331	39 099	2 232	0	94.6	5.4	0
11	45 504	40 185	5 319	0	88.3	11.7	0
12	42 383	35 231	3 237	3 915	83.1	7.6	9.3
13	44 934	39 678	5 256	0	88.3	11.7	0
14	58 606	52 180	6 426	0	89.0	11.0	0
15	58 579	49 624	6 130	2 825	84.7	10.5	4.8
16	43 663	37 910	5 753	0	86.8	13.2	0
17	52 104	47 265	4 839	0	90.7	9.3	0
18	44 269	41 898	2 371	0	94.6	5.4	0
19	55 660	48 745	6 915	0	87.6	12.4	0
20	59 643	51 442	8 201	0	86.2	13.8	0
均值					83.5	11.7	
均方差					6.6	6.5	

边缘和弱边缘连接成轮廓边缘时才输出。图 7 是 Canny 算子对分割后的杂草图像(图 6d)的边缘检测效果,可见边缘完整清晰。

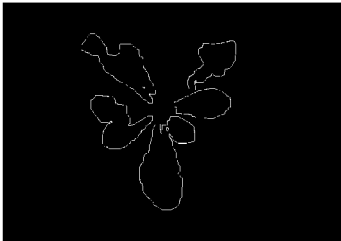


图 7 Canny 算子边缘检测结果

Fig. 7 Canny algorithm based image edge detection

4.2 几何特征提取

为便于为后续变量喷洒定位提供依据,一幅图像中识别出的杂草其分布信息还需要提取。

图 8 是一幅多处含有刺儿菜杂草的图像,根据杂草分布情况将其分割为 5 块,对每块杂草分别提取其杂草质心位置、面积和覆盖率等信息,结果如表 3 所示。其中面积是当前杂草块所占的像素数;质心位置是当前杂草块的形心位置,以其在整幅图像中的像素位置表示;杂草的覆盖率表示其密度,用

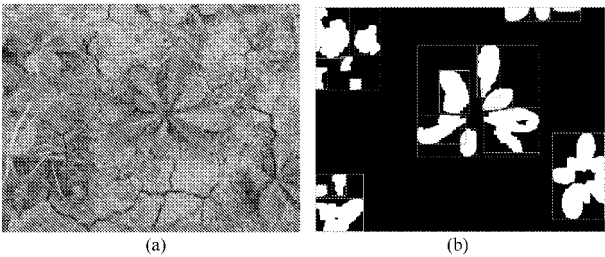


图 8 多块杂草图像及杂草分块图

Fig. 8 Weeds mixed image and its block diagram

(a) 原始图像 (b) 杂草识别分块

杂草面积与整幅图像像素数比值表示。

表 3 一幅图像多块杂草几何特征测量值
Tab.3 Extracted weed geometry characteristic value from an image with several weed blocks

块	质心位置	面积/像素数	覆盖率/%
左上	(48.5, 71.1)	7 609	3.29
右上	(411.6, 9.5)	2 066	0.89
右下	(502.2, 268.2)	8 520	3.68
左下	(42.4, 377.7)	5 022	2.17
中间	(309.6, 189.8)	17 156	7.41

5 结论

(1) 构建了以实时控制器 CVS-1456 为核心的图像实时识别与变量喷洒系统。给出了图像采集与实时控制系统中实时应用程序部署、图像获取、识别、分割滤波、几何特征参数提取与 LAN 口输出等编程方法。为快速算法验证和系统试验提供了有效手段。

(2) 对豌豆苗期田间常见杂草 RGB、HSV、HSI 颜色空间中各分量灰度分布进行对比分析,提出了基于 R-B 色差特征的复杂背景中的杂草分割提取方法。试验表明该方法能够准确分割出和背景颜色相近的杂草目标,且对普通太阳光照下的正确识别率达到 83.5%,且一致性好。

(3) 基于 Canny 算子对分割滤波后的杂草进行边缘检测,并提取出杂草面积、覆盖率和质心位置等几何特征参数,通过 LAN 口实时输出,便于对 CVS-1456 工作过程监控和实时控制功能扩展。

参 考 文 献

1 张春龙,黄小龙,刘卫东,等. 苗间锄草机器人信息获取方法的研究[J]. 农业工程学报,2012, 28(9): 142~145.
Zhang Chunlong, Huang Xiaolong, Liu Weidong, et al. Information acquisition method of mechanical intra-row weeding robot [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 142~145. (in Chinese)

2 Guyer D E, Miles G E, Gaultney L D, et al. Application of machine vision to shape analysis in leaf and plant identification [J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(1): 163~171.

3 Woebbecke D M, Meyer G E, Bargen K V, et al. Shape features for identifying young weeds using image analysis [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 271~281.

4 El-Faki M S, Zhang N, Peterson D E. Factors affecting color-based weed detection [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 1 001~1 009.

5 Biller R H. Reduced input of herbicides by use of optoelectronic sensors [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 41(4): 357~362.

6 Borregaard T, Nielsen H, Norgaard L, et al. Crop-weed discrimination by line imaging spectroscopy [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(4): 389~400.

7 吕朝辉,陈晓光,吴文福,等. 机器视觉田间植物检测与识别技术[J]. 吉林工业大学:自然科学学报,2001, 17(3): 90~93.
Lü Zhaohui, Chen Xiaoguang, Wu Wenfu, et al. The technique of detecting and identifying field plants by machine vision [J]. Natural Science Journal of Jilin University of Technology, 2001, 17(3): 90~93. (in Chinese)

- laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 109 ~ 114. (in Chinese)
- 18 潘云, 吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 59 ~ 61, 77.
Pan Yun, Lü Dianqing. Effects of soil bulk density on characteristics of soil infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 59 ~ 61, 77. (in Chinese)
- 19 王锐, 孙西欢, 郭向红, 等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 45 ~ 48.
Wang Rui, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Numerical simulation for soil water movement at different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 45 ~ 48. (in Chinese)
- 20 李淑芹, 王全九. 垂直线源入渗土壤水分分布特性模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 51 ~ 57.
Li Shuqin, Wang Quanjiu. Simulation of soil water distribution under vertical line source infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 51 ~ 57. (in Chinese)
- 21 肖蓉, 高照良, 张兴昌, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区高速公路边坡不同生物防护模式的土壤特性—以铜(川)—黄(陵)—延(安)高速公路为例[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(3): 79 ~ 85.
Xiao Rong, Gao Zhaoliang, Zhang Xingchang, et al. Soil features on slopes of expressway under different biological protection models in the Hilly-gully Region of Loess Plateau: Taking Tongchuan-Huangling-Yan' an expressway as an example[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(3): 79 ~ 85. (in Chinese)
- 22 韩信来, 高建恩, 樊恒辉, 等. 黄土高原不同地区固化土强度变化规律研究[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 76 ~ 78.
Han Xinlai, Gao Jianen, Fan Henghui, et al. Study on the change rules of stabilized soil intensity in different regions of Loess Plateau[J]. Yangtze River, 2009, 40(22): 76 ~ 78. (in Chinese)
- 23 张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. PAM 对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(3): 75 ~ 77.
Zhang Zhenhua, Xie Hengxing, Liu Jilong, et al. The experimental study on the influences of PAM on one-dimensional vertical infiltration[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(3): 75 ~ 77. (in Chinese)
- 24 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 水平—维土壤水分入渗特性分析[J]. 水利学报, 2000(6): 34 ~ 38.
Wang Quanjiu, Wang Wenyan, Lü Dianqing, et al. Theoretical analysis of horizontal one dimensional unsteady soil water transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(6): 34 ~ 38. (in Chinese)
- 25 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13 ~ 16.
Wang Quanjiu, Lai Jianbin, Li Yi. Comparison of Green-Ampt model with Philip infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 26 刘春成, 李毅, 任鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 62 ~ 67.
Liu Chuncheng, Li Yi, Ren Xin, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristic of water repellent soils[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 62 ~ 67. (in Chinese)
- 27 梁爱民, 邵龙潭. 土壤中空气对土结构和入渗过程的影响[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 502 ~ 506.
Liang Aimin, Shao Longtan. Experimental study of the air entrapment effects on soil structure and infiltration[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 502 ~ 506. (in Chinese)

(上接第 225 页)

- 8 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)
- 9 吴兰兰, 刘剑英, 文友先, 等. 基于支持向量机的玉米田间杂草识别方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 162 ~ 166.
Wu Lanlan, Liu Jianying, Wen Youxian, et al. Weed identification method based on SVM in the corn field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 162 ~ 166. (in Chinese)
- 10 刘洪臣, 陈忠建, 冯勇. 结合颜色和形态特征的杂草识别方法[J]. 光电工程, 2006, 33(7): 90 ~ 93.
Liu Hongchen, Chen Zhongjian, Feng Yong. Real-time weed recognition method based on color and morphological features[J]. Opto-electronic Engineering, 2006, 33(7): 90 ~ 93. (in Chinese)
- 11 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)