

除草机器人机器视觉自动导航技术研究

何东健^{1,2,3}, 张庭锋^{1,2}, 李邦国^{1,3}, 修伟杰^{1,2} (1.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2.农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3.陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 针对除草机器人导航系统存在的成本高和实时性亟待改进的问题, 在对自动导航机器人进行总体设计和搭建原型的基础上, 通过对 RGB 和 HSI 颜色空间进行对比试验, 确定视觉导航系统路径提取采用 HSI 颜色模型。研究了作物与土壤分割方法、导航路径和参数自动检测方法, 用 Otsu 算法对 H 分量图像进行目标和背景分割, 再使用数学形态学、Canny 边缘检测、Hough 直线检测等操作获取垄间边缘, 并计算出导航偏角参数, 从而对实现对机器人行走的控制。结果表明, 设计的导航系统平均导航误差为 3.01° , 偏差基本达到应用要求, 可实现自动导航。

关键词 除草机器人; 自动导航; 机器视觉; 图像处理; 路径

中图分类号 S126 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)18-0201-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.18.055



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research on Automatic Navigation Technology Based on Machine Vision for Weeding Robot

HE Dong-jian^{1,2,3}, ZHANG Ting-feng^{1,2}, LI Bang-guo^{1,3} et al (1.College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Key Laboratory of Internet of Things in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract In order to solve the problems of high cost and real-time performance of navigation system of weeding robot, based on the overall design and prototype of automatic navigation robot, the RGB and HSI color space were compared and tested, the HSI color model was used for path extraction in vision navigation system. Then the methods of crop and soil segmentation, navigation path and parameter automatic detection were studied. Otsu algorithm was used to cut apart the target and background of H component image and use mathematical morphology, Canny edge detection, Hough line detection and other operations to obtain the inter-ridge edge, and calculate the navigation angle parameters, so as to achieve the control of the robot walking. The test results showed that the average navigation error of the designed navigation system was 3.01° , the deviation basically could meet the application requirements, and the automatic navigation could be realized.

Key words Weeding robot; Automatic navigation; Machine vision; Image processing; Path

田间杂草与农作物争夺水分、养分和阳光等, 会影响农作物的生长发育, 从而导致产量和品质降低, 故需要进行田间除草作业。人工除草劳动强度高、效率低下, 而喷施除锈剂的除草机械无论有无杂草均均匀喷施, 若过量喷施会导致成本高、对环境造成污染。若能设计一种能够在田间导航行走、且识别杂草的机器人, 搭载精准喷药、施肥等工作部件, 则能实现精准喷药、施肥, 以提高生产效率、降低生产成本、减小农业环境污染。除草机器人涉及到作物及环境感知系统、动力及行走系统、导航及控制系统、精准喷施控制系统等, 其中除草机器人的导航系统和动力系统是必不可少的 2 个重要模块。

自动导航系统在军事、航空、交通和农业等领域均得到关注和广泛应用。目前, 农业装备中常用 GPS 导航技术和视觉导航技术^[1]。GPS 导航由地面控制部分、空间部分和用户装置组成。测量出位置已知卫星到用户接收机之间的距离, 并综合多颗卫星的数据, 便可对安装接收机的设备进行定位。但 GPS 民用定位精度为 3 m, 若不用差分技术, 则导致定位误差大, 难以满足农业作业要求。计算机视觉导航技术成本低廉、能够更好地描述当前环境, 更全面反映当前信息, 其核心就是识别出机器人行走的路线。因此, 机器视觉导航的

主要任务是从图像中识别作物行, 并检测出轨迹路径, 为确定机器的相对位置提供依据^[2]。

国内外学者对计算机视觉导航技术做了大量研究。Marchant 等^[3]使用里程计和视觉传感器并融合 Kalman 滤波器进行试验, 车辆横向位置误差的 RMS 为 20 mm, 但硬件结构复杂。伊利诺伊大学的 Han 等^[4]通过 k-means 算法分割作物, 过作物行空间等先验信息辅助, 并利用大豆田和玉米田的 2 个图像数据集来评估程序的准确性, 但算法运行速度慢, 实时性较差。Kise 等^[5]研究了双目立体视觉的方法, 该方法在农田环境较理想的情况下效果较好, 但算法复杂, 且对 2 个摄像头的同步性要求较高。刁智华等^[6]利用改进的过绿特征法及中值滤波算法, 对玉米田间作物图像进行背景分割, 通过随机 Hough 变换检测出玉米作物行中心线。孙元义等^[7]研究棉田农药喷洒机器人导航路径识别, 根据图像坐标系中垄的变化特征, 通过 Hough 变换得到所需的导航路线。冯娟等^[8]针对果园环境导航的相对复杂的条件, 提取主干与地面的交点作为特征点, 以此为基础生成果园导航基准线, 导航基准线的生成准确率在 90% 以上。曾勇等^[9]在 YUV 色彩空间中实现了水稻列苗的中心线提取。

尽管国内外在农业装备导航方面进行了大量研究, 并取得了丰硕成果, 但在低成本和实时性方面亟待改进和提高。为了提供一种喷施作业的通用机器人本体, 笔者基于计算机视觉导航技术, 设计一种能够自行导航并行走的机器人, 在需求分析的基础上, 对自动导航机器人进行总体设计, 并搭建了机器人原型, 重点研究了机器人田间自动导航系统(包

基金项目 2018 年国家级大学生创新创业训练计划项目(201810712030)。

作者简介 何东健(1957—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士, 博士生导师, 从事智能检测与农业信息技术研究。张庭锋(1998—), 男, 辽宁营口人, 从事机械电子工程研究。何东健和张庭锋为共同第一作者。

收稿日期 2020-03-18

括颜色模型选择、作物与土壤分割方法、导航路径和参数的自动检测),并进行性能测试,调试优化参数,以实现机器人的自动行间识别和导航。

1 除草机器人总体设计

1.1 需求分析 考虑到机器人能在关中小麦田(行宽15~16 cm,行距20 cm)进行作业,需满足以下条件:①自动驾驶机器人跨行行走,不过度压实土壤,且重心不宜过高以保持稳定。②除草机器人在作业过程中动态进行作物行及路径识别,故识别算法应具有实时性。③考虑到除草机器人在垄间作业,导航横向误差直接影响喷施农药、化肥的位置精度,故应有较高的导航精度。

1.2 机器人总体设计 除草机器人结构示意图如图1所示,主要由控制箱、喷头、喷杆、摄像头和履带式行走系统等组成,其中树莓派、L289N驱动板和锂电池等安装在控制箱中。行走系统由24 V的锂电池驱动37GB520直流电机带动履带主动轮行走,机体使用3030铝型材和6061铝板,控制系统包括树莓派3B+、L289N驱动板和USB摄像头。

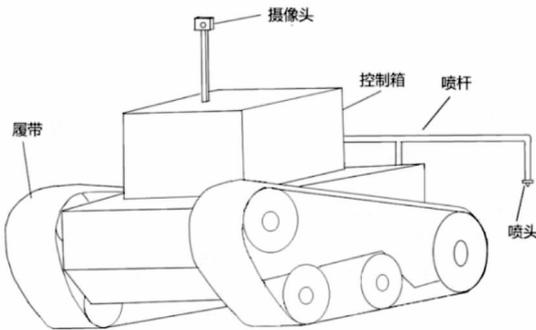


图1 机器人结构示意图

Fig.1 Robot structure

1.2.1 导航系统。导航系统使用USB单目摄像头获取垄间图像,使用树莓派处理垄间图像,获得导航参数,再调用动力系统纠正小车方向。导航摄像头安装在控制箱上方,距地面1.20 cm,视轴与平面的夹角(俯视角)为40°。

1.2.2 动力及驱动系统。动力系统由37GB520直流电机、L289N驱动板、树莓派和锂电池组成。树莓派作为动力系统的主控板,负责向驱动板提供占空比为50%、频率为60 Hz的PWM波和逻辑信号,再由驱动板控制电机的转速和方向;L289N驱动板接收树莓派输出的PWM波和24 V电源,根据使能端和逻辑信号,输出正反方向的电压,进而控制直流电机的方向和转速。

树莓派与L289N驱动板、电机连接如图2所示,1块L289N驱动板可控制2个直流电机,其中引脚IN1和IN2控制1个直流电机,IN3和IN4控制另1个,可调节输入EnA或EnB的方波的频率和占空比,即形成不同频率的PWM波,实现控制电机的转速;同时,控制IN1~IN4的电平高低实现电机的正转和反转;小车通过控制左右车轮的电机方向实现原地转向。

表1为L289N驱动板的真值表。此外,L289N驱动板支持输入0~35 V的电机电源,当常规应用时,电机电源不高于

12 V,需安装板载5 V使能跳线帽,+5 V输出口可向外供电。该研究供电电源为24 V,属于非常规应用,需要拔掉板载5 V的跳线帽,+5 V输出口需接入外部的+5 V电压,为驱动板提供逻辑电平,其余端子的接法与常规应用时一致。

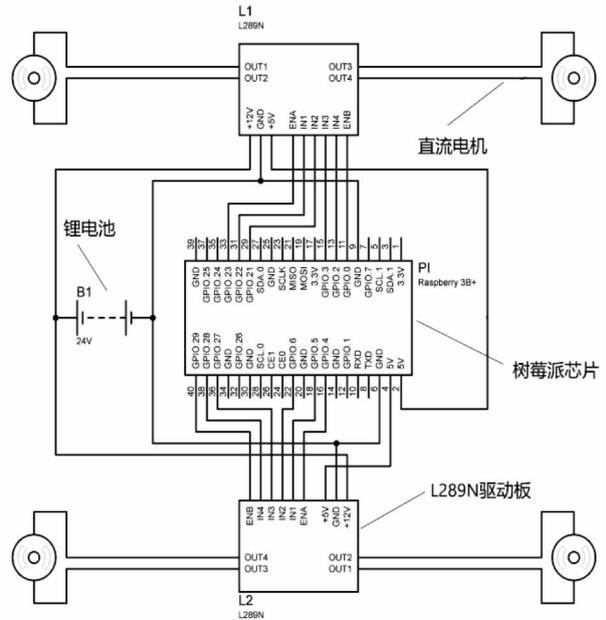


图2 动力系统连接示意

Fig.2 Power system's connection

表1 L289N真值

Table 1 Truth of L289N

EnA/B	IN1/IN3	IN2/IN4	电机 Motor
0	—	—	停转
1	0	0	制动
1	0	1	反转
1	1	0	正转
1	1	1	制动

2 除草机器人视觉导航系统的设计

视觉导航系统采用USB摄像头获取作物垄间图像,并对获取的图像进行分析,提取作物行边界以确定机器人导航路径。为实时、准确提取作物边界,需要在确定颜色模型的基础上,研究快速获取边界的方法。

2.1 颜色模型的选择 常用的颜色模型有RGB、HSI和LAB等。RGB颜色空间是以红(Red)、绿(Green)、蓝(Blue)三原色为基础,通过不同红、绿和蓝色分量值的组合,可生成1 677万种颜色,该颜色模型适合于计算机处理,故广泛使用。但其颜色空间中从蓝色到绿色之间存在较多的过渡色彩,而绿色到红色之间缺少其他色彩,因此存在色彩分布不均的问题^[10]。

视觉系统获取的田间图像和对应的R、G、B分量图像如图3所示。R、G、B分量图像的直方图如图4所示。

由图4可知,3个分量图像的直方图处于单峰状态,并不利于作物与土地的区别,因此不适合导航系统的使用。

HSI颜色空间用色调H、饱和度S和亮度I表示颜色,其特点是亮度分量与图像的彩色信息无关,可以避免颜色受到光线等条件的干扰,且H和S分量与人眼感受颜色的方式紧

密相关^[11]。将图 3(a)所示图像由 RGB 转换为 HSI 模型,并

提取 H、S、I 3 个分量图像如图 5 所示。

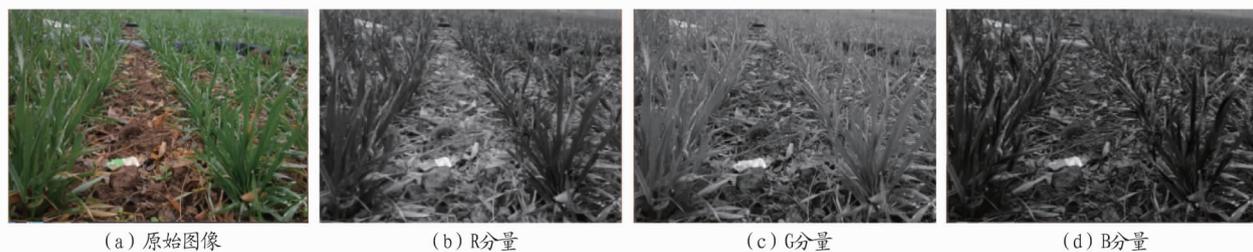


图 3 摄像机获取的彩色图像及 RGB 分量图像

Fig.3 Color image and RGB component image acquired by the camera

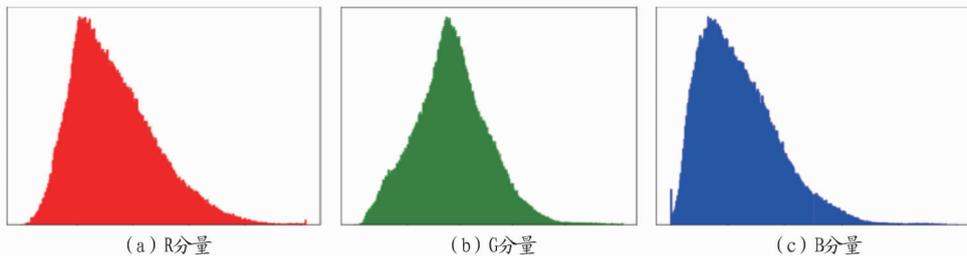


图 4 RGB 分量图像的直方图

Fig.4 Histogram of RGB components

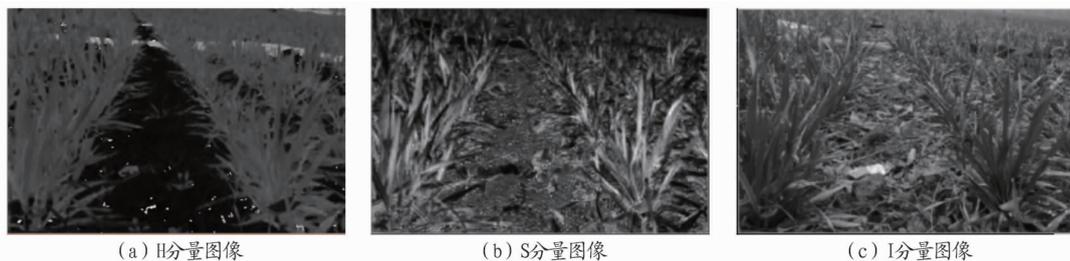


图 5 彩色图像及对应 HSI 分量图像

Fig.5 Color image and corresponding HSI component images

HSI 分量图像直方图如图 6 所示。由图 6 可知,S 与 I 分量的直方图均为单峰,小麦植株和垄间裸地不易区分,不适合

用于图像分割;H 分量图像直方图属于“双峰”,用于图像分割可取得较好效果。

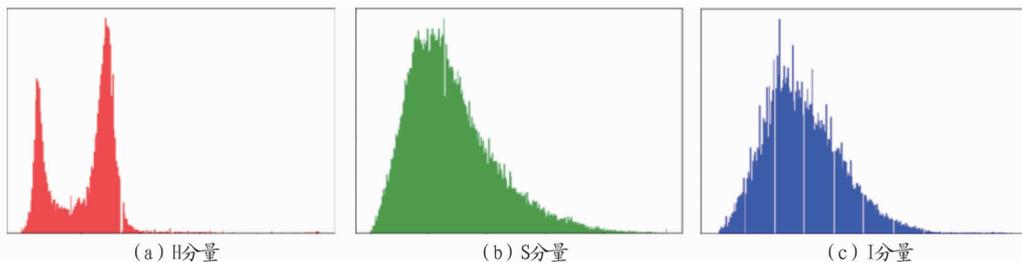


图 6 HSI 分量图像直方图

Fig.6 The histogram of HSI component image

故采用 HSI 模型的 H 分量确定阈值,进行作物和土壤的图像分割。采用 Otsu 算法^[12]确定分割阈值,对目标及背景进行分割的结果如图 7 所示。由图 7 可知,对 H 分量直方图用 Otsu 算法确定阈值,能够很好地将作物和土壤分割开来。

2.2 导航路径和参数的自动检测

2.2.1 导航路径的检测。为了获得导航路径,需要先提取出小麦垄间边缘线,并由此确定出导航路径。具体步骤如下:
①形态学运算去除噪声。分割出小麦垄间图像后,为了去除

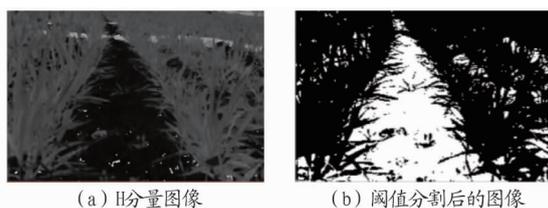


图 7 H 分量图像及阈值分割后的图像

Fig.7 H-component image and the images after threshold segmentation

二值图像中的噪声和细小物,填充孔洞,并平滑较大物体的边界,采用 5×5 结构元素,对二值图像进行开运算^[13],结果如图8(a)所示。②边缘检测提取垄间边界。预备试验对Roberts算子、Prewitt算子、Sobel算子和Canny算子^[14]的边缘检测效果进行对比,表明Canny算子边缘检测效果好,故

选择该算法检测提取出垄间边界如图8(b)所示。③Hough变换^[15]直线检测拟合垄间边缘线。对图8(b)所示的垄间边缘线进行Hough变换,检测出垄间边缘直线如图8(c)所示。拟合垄间边缘两侧边缘线后,计算出2条直线的角平分线,该角平分线即为垄间的中心路径。

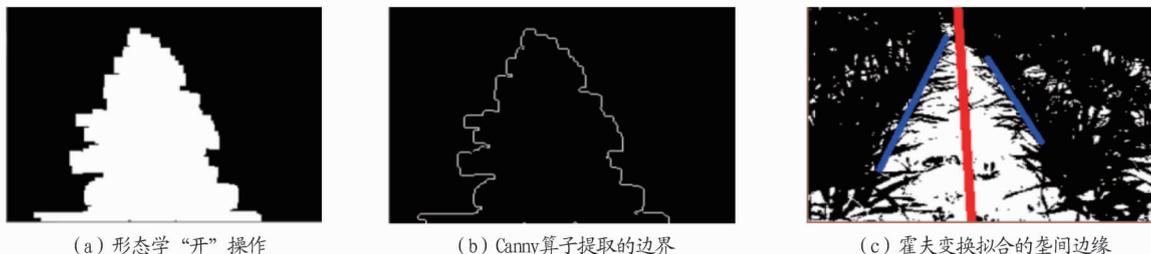


图8 垄间边缘提取和直线拟合

Fig.8 Edge extraction and straight line fitting between ridges

2.2.2 导航偏角的检测。检测出导航路径后,通过导航路径可以得到所需要的导航控制信息^[16],如图9所示,可计算出导航路径线与图像上、下边缘交叉点A、B的横坐标 x_1 和 x_2 , h 为图像的高度,便可计算出导航路径和图像中竖直直线之间的夹角 θ 。当导航机器人在当前路径无须纠正时, θ 在

0° 左右,故根据 θ 值,判断机器人的偏转方向和偏转角度。

如图9所示, θ 可根据式(1)计算:

$$\theta = \arctan \left[\frac{x_2 - x_1}{h} \right] \quad (1)$$

当机器人行走方向向右偏时 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ]$,而 $\theta \in [-90^\circ, 0^\circ)$ 时机器人向左偏,机器人导航程序运行时间为 $|\theta|/90^\circ \times t_0$, t_0 为机器人转向 90° 所用的时间,经多次测量后取平均值, t_0 设置为6.70 s。

2.3 导航试验结果及分析 为了验证导航系统的识别路径的准确性,在小麦试验田采集图像。通过导航系统测试图像中导航路径得到 θ 的角度作为系统测量值,再依据式(1)计算 θ 作为计算值,与导航系统的系统测量值进行比较。用 θ 的均方根误差(RMSE)评价导航系统性能。

图10为导航系统的检测结果,图像中的红色直线是导航系统的测量结果,左上角的数值是程序计算出的 θ , θ 的大小和机器人偏转的方向与理论分析相一致。

表2为 θ 的计算值和标注值的比较,计算值和标注值的平均误差为 3.01° ,均方根误差为 2.94° ,导航误差较小。

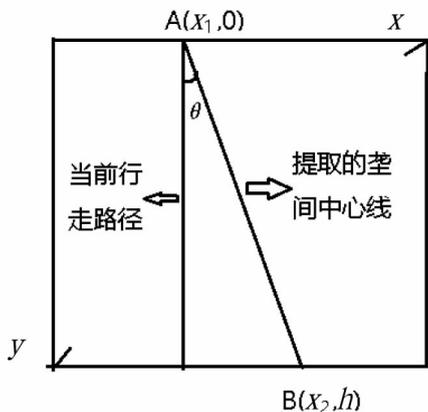


图9 导航偏转示意

Fig.9 The navigation deflection

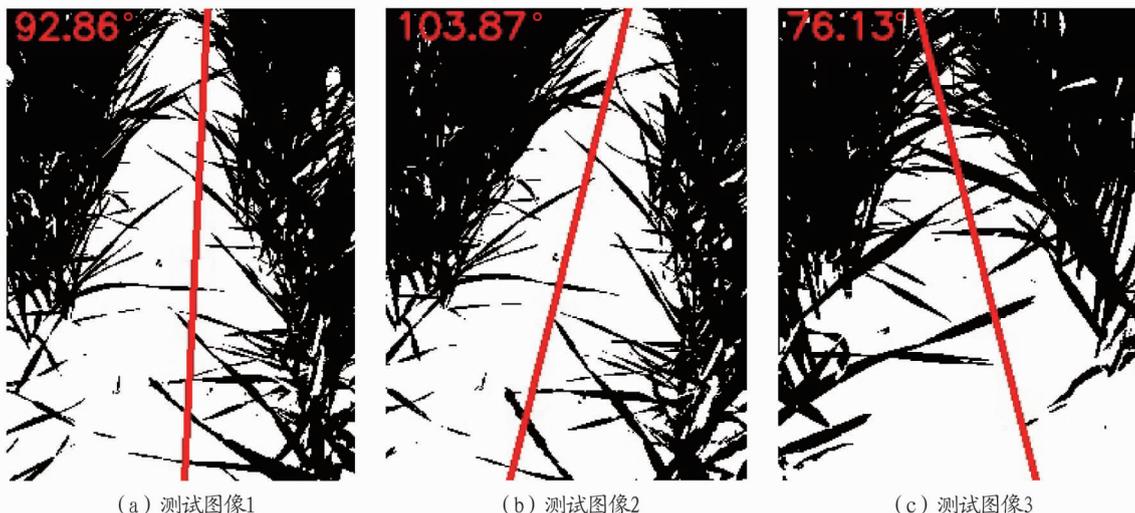


图10 导航系统检测结果

Fig.10 The testing results of navigation system

表 2 θ 计算值和标注值的比较Table 2 Comparison of θ calculated value and labeled value

图像序号 Image number	测量值 Measured values	计算值 Calculated values	差值 Difference
1	92.86	92.88	0.02
2	103.87	104.14	0.27
3	76.13	84.24	8.11
4	70.71	76.20	5.49
5	82.00	86.87	4.87
6	80.42	80.10	0.32
7	86.25	88.26	2.01
平均值 Mean	—	—	3.01
均方根 Root mean square	—	—	2.94

3 结语

基于计算机视觉导航技术,研究并开发除草机器人作业平台,重点对视觉导航系统进行设计,通过对比试验选择 HSI 颜色空间的 H 分量进行作物与土壤的分割,并经数学形态学处理、霍夫变换边缘检测、边缘直线拟合等提取导航路径,计算出小车的偏转方向,依据该偏角进行方向调整。该试验结果表明,设计的导航系统平均导航误差为 3.01° ,可以达到导航行走的目的。但采用树莓派处理数据的能力有限,进行路径和偏角检测耗时较长,尚需在实时性方面进一步改进。

参考文献

[1] 姬长英,周俊.农业机械导航技术发展分析[J].农业机械学报,2014,45(9):44-54.

(上接第 183 页)

3 结论与讨论

通过在 VAE 型搭口胶 S3033 中添加陈皮香精制备陈皮味搭口胶的研究,确定最优制备配方(M4) $m(S3033):m(\text{陈皮香精}):m(\text{PVA}):m(\text{阿拉伯胶})=400:50:10:2$ 。采用最优配方制备得到陈皮味搭口胶初黏度 $442 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,固含量 49.96% ,平均粒径 $0.946 \mu\text{m}$,pH 4.9,在卷烟车速 $8000 \text{ 支}/\text{min}$ 时能满足实际生产要求。通过卷烟主流烟气分析发现,陈皮味搭口胶 M4 替代 S3033 制得的卷烟烟气酸性、中性、碱性香味成分总量分别提升 8.78% 、 10.39% 和 7.68% 。目前,陈皮味搭口胶制备处于中试制备阶段,将其应用于卷烟生产中可提高卷烟香气丰富性、改善口腔舒适性,为实现卷烟特色加香提供了新思路。

参考文献

[1] 罗恒,田井速,舒凯,等.水基烟用搭口胶的发展与展望[J].中国胶粘剂,2018,27(4):43-45.
 [2] 尹俊林,牟定荣,温光和,等.卷烟搭口胶现状和发展[J].中国胶粘剂,2005,14(10):43-46.
 [3] 温光和,沈清轩,马涛,等.新型搭口胶的制备及其对卷烟品质的影响[J].应用化工,2010,39(11):1723-1725.

[2] 张方明,应义斌.机器视觉在农业车辆导航系统中的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(5):133-136.
 [3] MARCHANT J A,HAGUE T,TILLET N D.Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle[J].Computers and electronics in agriculture,1997,16(2):165-175.
 [4] HAN S,ZHANG Q,NI B,et al.A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems[J].Computers and electronics in agriculture,2004,43(3):179-195.
 [5] KISE M,ZHANG Q,MÁS F R.A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance[J].Biosystems engineering,2005,90(4):357-367.
 [6] 刁智华,赵明珍,宋寅卯,等.基于机器视觉的玉米精准施药系统作物物识别算法及系统实现[J].农业工程学报,2015,31(7):47-52.
 [7] 孙元义,张绍磊,李伟.棉田喷药农业机器人的导航路径识别[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(2):206-209.
 [8] 冯娟,刘刚,司永胜,等.果园视觉导航基准线生成算法[J].农业机械学报,2012,43(7):185-189.
 [9] 曾勇,熊瑛,向阳,等.基于机器视觉的田间水稻苗列识别算法的研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(3):320-325.
 [10] 张飞飞,孙旭,薛良勇,等.融合简单线性迭代聚类类的高光谱混合像元分解策略[J].农业工程学报,2015,31(17):199-206.
 [11] 宋玉婷.基于三维彩色直方图均衡化的彩色图像增强算法研究[D].济南:山东财经大学,2013.
 [12] 唐泽华.基于机器视觉的步行插秧机自主导航关键技术研究[D].杭州:浙江理工大学,2012.
 [13] 何东健,耿楠,龙满生,等.数字图像处理[M].3版.西安:西安电子科技大学出版社,2015.
 [14] CANNY J.A computational approach to edge detection[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1986,8(6):679-698.
 [15] MARCHANT J A,BRIVOT R.Real-time tracking of plant rows using a Hough transform[J].Real-time imaging,1995,1(5):363-371.
 [16] OKAMOTO H,HAMADA K,KATAOKA T,et al.Automatic guidance system with crop row sensor[C]//Proceedings of automation technology for off-road equipment.Chicago, Illinois, USA:ASAE,2002.

[4] 孙炜炜,彭雅婷,陈胜,等.焦甜香味搭口胶的制备及其在卷烟中的应用[J].中国胶粘剂,2016,25(6):35-38.
 [5] 周景喜,陈广平,李红.顶空-气相色谱-质谱法测定烟用水基型乳胶中苯系物[J].质谱学报,2012,33(1):32-36.
 [6] 肖卫强,李海峰,曹得坡,等.卷烟胶热裂解产物的对比分析[J].中国胶粘剂,2015,24(2):10-14.
 [7] 章莉娟,郑忠.胶体与界面化学[M].广州:华南理工大学出版社,2006.
 [8] 牛聪阳,倪建东,张彩云,等.高速卷烟胶:YC/T 188—2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
 [9] 胡红梅,侯一斌,刘正龙,等.胶黏剂黏度的测定 单圆筒旋转黏度计法:GB/T 2794—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
 [10] 忻仁芬,曹慧.胶黏剂的 pH 值测定:GB/T 14518—1993[S].北京:中国标准出版社,1994.
 [11] 武怡,刘建福,王迪汗,等.卷烟 中式卷烟风格感官评价方法:YC/T 497—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
 [12] 徐达,苏加坤,蔡继宝,等.补骨脂挥发油微胶囊包埋工艺优化及其在卷烟中的应用[J].河南农业科学,2015,44(7):148-152.
 [13] 谢剑平,胡清源,罗丽娜,等.烟用香精香气质量通用评定方法:YC/T 145.6—1998[S].北京:中国标准出版社,1998.
 [14] 王芳,陈再根,张威,等.卷烟用常规分析用吸烟机测定 总颗粒物 and 焦油:GB/T 19609—2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
 [15] 徐达,苏加坤,洪流,等.基于 3 种烟尾介质的烟用美拉德反应香料[J].烟草科技,2019,52(5):57-66.
 [16] 裴惠,蒋建利,韩志慧,等.卷烟用高速包装搭口胶的研究[J].包装工程,2004,25(6):61-62.
 [17] 刘彦,黄卫宁,贾春利,等.阿拉伯胶和羧甲基纤维素钠对荞麦面团发酵流变学及烘焙特性的影响[J].食品科学,2013,34(17):5-9.