

基于 DSP 和 MCU 的农机具视觉导航终端设计*

项明¹ 魏爽² 何洁¹ 仇瑞承¹ 张漫¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 农机具导航可以提高作业的精度和适应性。针对当前导航终端多基于工控机开发,成本相对较高,不利于在农业生产中大规模推广等问题,设计了一种基于 DSP 和 MCU 的农机具视觉导航终端,用于玉米中耕锄草自动导航作业。其中,DSP 作为核心处理器,负责农作物的图像采集、作物行检测和导航线提取;MCU 负责作业流程的管理、GNSS 位置信息的接收、存储和转发以及向执行单元发送控制指令等。针对导航终端中所涉及的串口、网络以及 CAN 总线之间的通信问题,制定了相应的协议规范;按照系统集成优化设计方法,构建了农机具视觉导航终端系统,保证了系统运行稳定性;对图像进行预处理后,采用基于边缘检测和扫描滤波的导航线检测算法提高了农机具导航线检测的精度和处理效率;针对农田玉米中耕锄草试验,设计了导航线算法适应性试验、偏移量测试试验和系统对比试验。结果表明:系统能够较好地适应有杂草和株数稀疏等农田环境下的测试工作;对偏移量检测的平均误差为 1.29 cm,最大误差为 4.1 cm;对比 PC 端和 ARM 端的导航算法运行速度,系统具有较好的实用性和经济可行性。

关键词: 农机具 导航 机器视觉 作物行检测 DSP

中图分类号: S22; TP242.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0021-06

Development of Agricultural Implement Visual Navigation Terminal
Based on DSP and MCU

Xiang Ming¹ Wei Shuang² He Jie¹ Qiu Ruicheng¹ Zhang Man¹

(1. Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: Agricultural implement automatic navigation is a major trend of modern agriculture. Agricultural implement navigation can avoid the errors during implement shaking in field and improve the precision of navigation and flexibility of operation. At present, most of the navigation terminals were developed based on the industrial computer which is expensive and difficult to be spread. In this paper, an agricultural implement visual navigation terminal based on DSP and MCU for automatic weeding was designed. As the core processor of the system, DSP was responsible for the image acquisition, crop rows detection and offset calculation of navigation line. MCU is the main control unit of the system, so it was used to manage the working process, receive, store and forward GNSS data, and also control the implement. The corresponding protocol of serial communication, network communication and CAN bus communication in the system was normalized to make sure the stability of the communication. In the image processing, the OTSU method and the crop row detection algorithm based on boundary detection

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-11

* 国家国际科技合作专项资助项目(2015DFG12280)、国家自然科学基金资助项目(31571570)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD004)

作者简介: 项明,硕士生,主要从事农机自动导航研究,E-mail: xiangming@cau.edu.cn

通讯作者: 张漫,副教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

and scan-filter (BDSF) were adopted, which could improve the accuracy and efficiency of navigation line detection. In order to verify the validity and stability of the system, the algorithm adaptive test, offset accuracy test and different system comparison tests were carried out. The experiment results showed that the crop line detection algorithm could work adaptively in the weed and crop thinning conditions. The average error of offset detection is 1.29 cm and the maximum error is 4.1 cm. The systems comparison test verified the economic feasibility of the proposed system by compared with the PC and ARM, which can satisfy the requirements of filed operation.

Key words: Agricultural implement Navigation Machine vision Crop row detection DSP

引言

农业机械的自动化和智能化是现代农业发展的主要方向之一,农机具的自动导航是农机智能化的另一个重要标志,在各种农田作业场景中有着广泛的应用^[1-2]。

基于机器视觉的自动导航技术凭借自身灵活、实时性好和导航精度高的特点,成为自动导航技术研究的一大热点。在图像处理方面,国内外较多研究主要集中在通过不同的图像预处理方法对图像进行分割,然后通过最小二乘法或者 Hough 变换进行作物行的检测^[3-10]。在导航系统设计方面,Guerrero 等^[11]以 FPGA (Field programmable gate array) 为平台提出了一个基于玉米行图像精确自动检测的专家系统,根据 CCD 相机几何参数和已知的机器播种位置得到作物行的精确位置。张成涛等^[12]以 ARM 为平台,提出一个基于达芬奇技术的收割机视觉导航图像处理算法试验系统。Meng 等^[13]提出了基于扫描滤波的作物行提取算法,并以工控机为平台设计了农具除草自动导航系统。通常情况下,为了满足作业实时性要求,基于机器视觉的导航终端对硬件要求较高,终端设备大多选用 x86 架构的工控机^[14-16],这直接导致了其成本较高,难以在生产实践中进行大规模推广。

基于以上问题,本文设计开发一种基于 DSP (Digital signal processor) 和 MCU (Microprogrammed control unit) 的农具机器视觉导航终端。该系统能将复杂的业务划分成图像处理部分和流程控制部分,进而最大程度地发挥双处理器的作用,既保证系统的高性能和低功耗,也能在很大程度上降低成本。

1 系统设计

1.1 总体设计

基于机器视觉的农机具导航系统总体结构如图 1 所示,主要包含网络层、控制层和执行层 3 部分。其中,控制层中的导航终端为本系统的核心部分,负责采集视觉信息和 GNSS (Global navigation

satellite system) 位置信息,对其进行处理,并将处理后的数据分别发送到网络层和执行层。GNSS 定位数据以无线传输方式发送到网络层,服务器接收到信息后存入数据库,用户可以通过互联网访问服务器,查询农机的实时作业轨迹^[17]。执行层的 PLC (Programmable logic controller) 接收到的信息是通过图像处理获取的农机具相对于作物行的横向偏差数据,导航系统以此为依据来控制农机具的移动。PLC 与导航终端之间通过 CAN 总线连接。

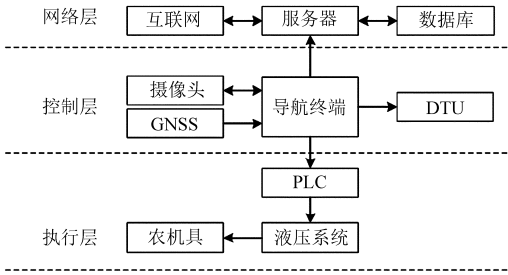


图 1 导航系统总体结构图

Fig.1 General structure of navigation system

1.2 导航终端硬件设计

导航终端的硬件结构及实物图如图 2 所示。信息采集部分包括 GNSS 接收机、工业摄像头;信息处理部分包括 DSP、MCU;数据存储、传输与浏览部分包括 DTU (Date transfer unit)、SD 卡以及液晶显示屏。其中,DSP 和单片机为核心处理单元,主要完成图像信息采集与处理、导航路径提取、导航控制量计算等功能。DSP 采用 TI (TEXAS INSTRUMENTS) 公司生产的 TMS320DM6437 集成芯片,主频 600 MHz,内存 128 MB。摄像器件选用 FPV 航拍视频摄像头,型号为 1/3 Sony 960H CCD Sensor,支持 PAL (Phase alteration line) 或 NTSC (National television standards committee) 视频制式。DSP 可实时获取摄像头采集的农田图像信息并处理,再结合提示信息生成新的图像在显示屏上实时显示。MCU 选用飞思卡尔公司的 MC9S12XEP100,支持串行通信、串行外设通信 (Serial peripheral interface, SPI) 和控制器区域网络总线 (CAN 总线) 通信。GNSS、DSP 和 DTU 数据传输模块均通过串口与单片机通信;MCU 对 SD 卡的

读写操作通过 SPI 协议实现。SD 卡用于保存农机具的位置信息,DTU 可将农机具的作业位置信息实时发送到服务器端。

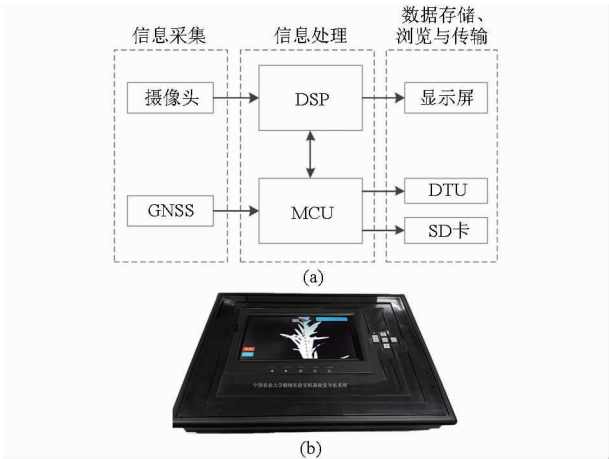


图 2 导航系统硬件图

Fig.2 Hardware diagram of navigation terminal
(a) 系统硬件框图 (b) 系统实物图

1.3 导航终端软件设计

1.3.1 软件功能设计

根据设计目标,从功能角度系统可划分为 3 个模块,分别是数据采集模块、数据处理模块和数据传输模块,系统功能模块图如图 3 所示。

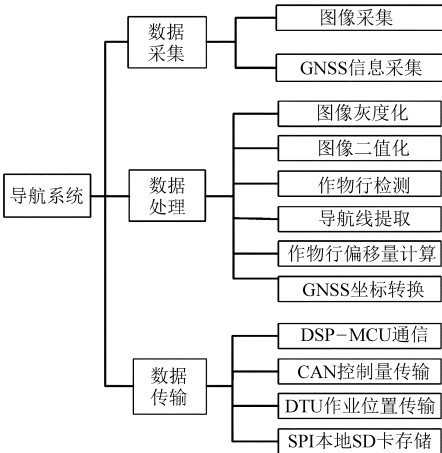


图 3 系统功能模块框图

Fig.3 Function module structure of system

数据采集模块负责农作物图像信息采集和农具 GNSS 位置信息的采集。

数据处理模块负责图像处理以及 GNSS 信息处理。图像处理过程包括图像灰度化、二值化、作物行检测、导航线提取和作物行偏移量计算;GNSS 信息处理部分是对 GNSS 位置信息进行坐标转换,将 WGS - 84 (World geodetic system - 1984 coordinate system) 投影坐标转换到二维直角坐标系。

数据传输模块包括 DSP - MCU 通信、基于 CAN 总线的导航控制量传输、基于 DTU 的作业位置远程传输和基于 SPI 的本地 SD 卡存储。MCU 是系统通

信的主体部分,为了实现通信过程中的稳定和透明,本文对系统的通信进行了规范,如表 1 所示。“发送 1”表示通信的标识符,“发送 2”表示通信的实际内容,“返回 1”代表了接收成功/失败后返回的信息。其中,DSP 与 MCU 之间、MCU 与 DTU 之间通过 RS232 串口进行通信,MCU 与 PLC 之间通过 CAN 总线进行通信,MCU 与 SD 卡之间通过 SPI 接口连接。MCU 通过按钮对 DSP 的作业流程进行控制,DSP 完成图像处理后将作物行的偏移量由 MCU 经 CAN 总线发送给 PLC 控制器。DTU、SD 卡分别将农机的实时位置信息发送到服务器端或存储在本地 SD 卡上。

表 1 系统通信协议

Tab.1 System communication protocol

通信方向	接口	发送 1	发送 2	返回 1
MCU→DSP	RS232	“D”	按钮信息	“SD”/“FD”
DSP→MCU	RS232	“M”	偏移控制量	“SM”/“FM”
MCU→PLC	CAN	“P”	偏移控制量	“SP”/“FP”
MCU→DTU	RS232	“U”	位置坐标	无
MCU→SD 卡	SPI	无	位置坐标	无

1.3.2 程序时序图

系统作业时,程序的循环过程如图 4 所示。其中,MCU 可以通过按钮控制 DSP 进行摄像头初始化并进行视觉导航。DSP 在提取导航线后将作物行的偏移量发送到 MCU,MCU 通过 CAN 总线将控制命令发送到 PLC,从而实现农机具导航。同时,MCU 可将实时获取农机具的绝对位置信息保存在 SD 卡上,并通过 DTU 上传至服务器。

1.4 作物行导航线提取方法设计

1.4.1 图像预处理

(1)灰度化

获取的图像由 R 、 G 、 B 分量组成,采用绿色分量减去红色分量 ($G - R$ 算法)对图像进行灰度化, $G - R$ 算法对图像的作物信息保留较为完整,作物和图像的灰度对比突出,可以提高后续二值化处理的效果。

(2)二值化

图像二值化的目的是使图像简化,从而有利于提取图像中的关键信息。本文采用最大类间方差法 (OTSU)进行图像分割。OTSU 算法相对简单,可以按图像的灰度特性自动划分阈值,从而将图像分成背景和目標两部分,一定条件下可以不受图像对比

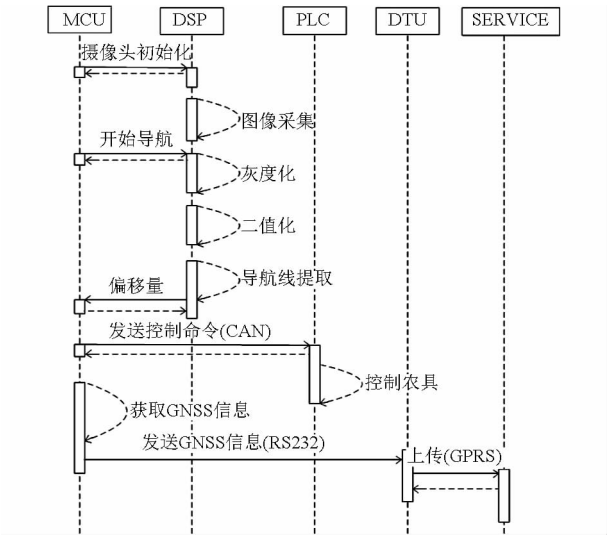


图 4 程序时序图

Fig. 4 Procedure sequence chart

度和亮度变化的影响。其基本原理为:为了将图像分成背景和目标两部分,设目标和背景之间的分割阈值为 k ,目标像素点数占整幅图像像素点总数的比例为 w_0 ,目标像素点的平均灰度为 μ_0 ;背景像素点数占整幅图像像素点总数的比例为 w_1 ,图像的平均灰度为 μ_1 ;背景像素点的平均灰度为 μ ,目标前景图像和背景图像类间方差为 $\sigma^2(k)$ 。则

$$\mu = w_0\mu_0 + w_1\mu_1 \tag{1}$$

$$\sigma^2(k) = w_0(\mu_0 - \mu)^2 + w_1(\mu_1 - \mu)^2 = w_0w_1(\mu_0 - \mu_1)^2 \tag{2}$$

对 k 在 $0 \sim 255$ 之间遍历, $\sigma^2(k)$ 取值最大,即为选取的最佳分割阈值。

1.4.2 导航线提取

为了提取作物行,获得农机具的导航线,采用边缘检测和扫描滤波(Boundary detection and scan-filter, BDSF)相结合的方法。

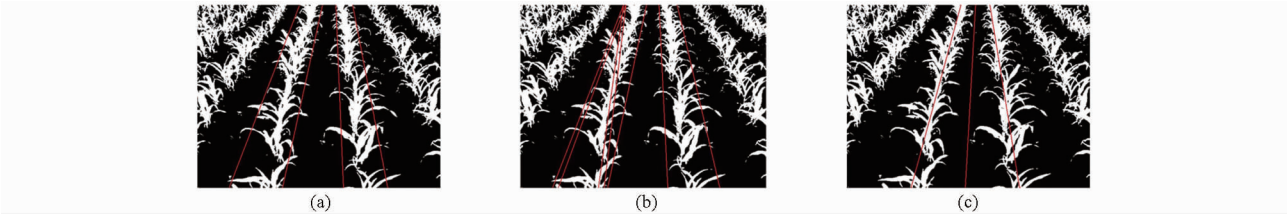


图 5 导航线提取示意图

Fig. 5 Schematic diagram of navigation line extraction

(a) 作物行边缘检测 (b) 扫描滤波 (c) 导航线提取

2 试验和结果分析

2.1 算法适应性试验

为了验证 BDSF 算法是否适应杂草、植株稀疏的农田环境,进行了算法适应性分析试验。使用 $640 \text{ 像素} \times 480 \text{ 像素}$ 的玉米彩色图像作为原图像,基

(1) 边缘检测

图像二值化处理后,白色部分代表作物,黑色部分代表土壤背景。为了确定作物行在图像中的位置范围,分别选取图像近处部分和远处部分高度为 20 像素的图像段进行灰度垂直投影,从而得到作物行近处部分和远处部分的位置范围。

确定作物行在图像两端的位置之后,系统需要对远近作物行上下匹配。每个近处作物行分别与远处所有作物行边缘位置点进行连线,形成若干个封闭的条形框。设封闭条形框内中间部分的 H_m 行小块四边形的白色像素数为 $m(i, j)$ 。其中, i 表示远处第 i 个作物行, j 表示近处第 j 个作物行, H_m 取值 20。从近处作物行开始匹配远处作物行,对于每个近处作物行,求 $\max(m(i, j))$ 对应的远处作物行位置,作为远近作物行的匹配位置。

(2) 直线扫描滤波

通过作物行边缘检测,作物行的位置已经定位到一定范围内,接下来可采用根据导航线两端点位置确定作物行直线的方法来提取导航线。连接作物行范围的端点,形成一个以远处端点为上底边、近处端点为下底边、高为图像高度 H (480 像素)的条形框。通过划分上底边和下底边来分割条形框,形成相同的小条形框。用小条形框扫描作物行范围条形框图像的有效点个数,选择其峰值所对应的小条形框作为进一步靠近真正作物行直线的小条形框,之后将该小条形框及其相邻左右 2 个小条形框合并成一个新的条形框,作为作物行的定位范围,然后再次分割,进行下一轮扫描循环,直到小条形框可以代表作物行直线,最后通过作物行直线求出导航基准线位置。导航线提取过程如图 5 所示。

于 Matlab 2013,分别对有杂草和缺株情况下的玉米图像进行处理。处理效果如图 6 所示。试验表明在有杂草和株数稀疏的情况下,BDSF 算法仍能有效的提取导航基准线,具有较强的适应性。

2.2 偏移量测试试验

为了测试本终端对作物行检测的准确性和导航

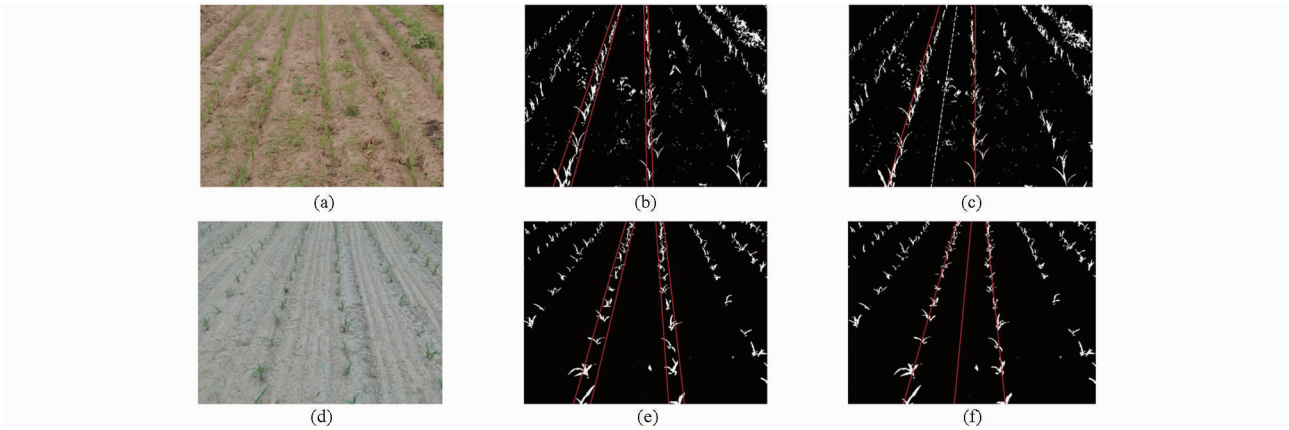


图 6 算法适应性分析结果

Fig.6 Results of algorithm adaptive analysis

(a) 含杂草情况原始图 (b) 含杂草情况作物行检测图 (c) 含杂草情况导航线提取图
(d) 缺株情况原始图 (e) 缺株情况作物行检测图 (f) 缺株情况导航线提取图

线偏移量计算的精度,进行了导航线偏移量测试试验。试验结合摄像头标定过程以及实际作业中摄像头的状态,将摄像头放置于水平高度为 60 cm、俯仰角为 30°的测试平台上。在摄像头正前方的地面上

插上一列仿真玉米苗草。固定摄像头不动,移动玉米苗草,测量实际横向偏移量。记录实测值和软件系统输出的值,采用了 8 组数据进行对比分析。试验结果如表 2 所示。

表 2 偏移量测试结果

Tab.2 Results of lateral deviation

参数	序号								cm
	1	2	3	4	5	6	7	8	
实际偏移量 λ	1.2	1.8	4.0	1.4	-3.0	-4.2	-11.80	-14.1	
软件输出的偏移量 λ'	1	2	3	0	-2	-4	-9	-10	
偏差 $\Delta\lambda$	0.2	-0.2	1.0	1.4	-1.0	-0.2	-2.8	-4.1	

由试验数据可得,软件输出的平均误差为 1.29 cm,标准差为 1.79 cm,最大偏差为 4.1 cm。可以证明摄像头标定参数和偏移量计算模型的正确性和系统导航自动跟踪的稳定性。

2.3 系统性能对比试验

为了对设计开发的导航终端进行性能分析,设计了系统性能对比试验。分别将 BDSF 算法移植到不同的终端上,包括 PC 端(PC 端代替工控机)、DSP 端和 ARM 端,进行系统性能对比。将 PC 端、DSP 端和 ARM 端的配置以及算法耗时进行对比,如表 3 所示。PC 端处理 BDSF 算法的耗时为 10 ms,DSP 和 ARM 端均为 30 ms;在一帧图像的完整处理上(包括图像采集、预处理、导航线提取等),PC 端优于 DSP 端,DSP 端优于 ARM 端。PC 端的处理时间小于 DSP 端的一半,而由于 DSP 是专门适用于数字

信号处理的一款处理器,在配置远低于 ARM 时,在算法处理速度上仍然具有优势。

表 3 各平台系统对比

Tab.3 Comparison of different systems

参数	PC 端	DSP 端	ARM 端
型号	启天 M7150	STM320DM6437	iTOP4412
公司	联想	德州仪器	三星
系统平台	Windows XP	DSP/BIOS	Linux + QT
主频	3.2 GHz (奔腾双核)	600 MHz (C64+)	1.6 GHz (Cortex + A9)
内存	3 GB	128 MB(DDR2)	2 GB(DDR2)
BDSF 算法耗时/ms	10	30	30
一帧图像耗时/ms	22	60	78

在成本上,上述配置的 DSP 和 ARM 的成本约为工控机的 1/5。因此,本研究开发的终端,具有一定的成本优势。3 种平台实现的导航线提取结果如图 7 所示,

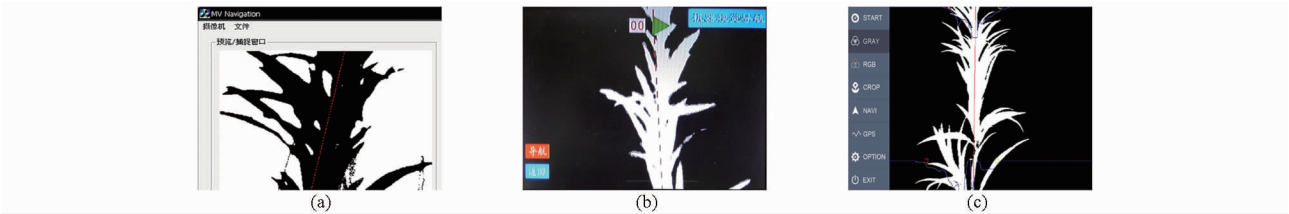


图 7 导航系统界面对比

Fig.7 Interface comparison of different systems

(a) PC 端 (b) DSP 端 (c) ARM 端

由于 PC 端和 ARM 端都有相应的操作系统,便于图像化界面管理和实现,而本系统的 DSP 采取的 OSD 叠加菜单功能,没有相应的图像化界面系统,界面相对简单,功能较少。

3 结束语

设计了一种基于 DSP 和 MCU 的农机具视觉导航终端。该终端采用 MCU 进行系统流程控制和通信管理,采用 DSP 进行图像采集和作物行检测,可以实现农作物中耕除草的自动导航作业,同

时可以将作业位置发送至服务器,实现农田作业信息实时监测。

采用基于边缘检测和扫描滤波的作物行检测算法,处理一帧图像的时间约为 65 ms,导航线提取的平均误差为 1.29 cm。通过算法适应性试验、导航线偏移量测试试验以及多平台系统对比试验,验证了系统的精度和环境适应性;同时,该终端能够有效降低农机具导航的设备成本,有利于农机具自动导航设备的大规模推广,为进一步提高农业自动化、拓展农情信息采集提供借鉴经验。

参 考 文 献

1 杨为民,李天石,贾鸿社.农业机械机器视觉导航研究[J].农业工程学报,2004,20(1):160-165.
Yang Weimin, Li Tianshi, Jia Hongshe. Simulation and experiment of machine vision guidance of agriculture vehicles [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 160-165. (in Chinese)

2 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.
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese)

3 张志斌,罗锡文,臧英,等.基于颜色特征的绿色作物图像分割算法[J].农业工程学报,2011,27(7):183-189.
Zhang Zhibin, Luo Xiwen, Zang Ying, et al. Segmentation algorithm based on color feature for green crop plants [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 183-189. (in Chinese)

4 李景彬,陈兵旗,刘阳,等.采棉机视觉导航路线图像检测方法[J].农业工程学报,2013,29(11):11-19.
Li Jingbin, Chen Bingqi, Liu Yang, et al. Detection for navigation route for cotton harvester based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 11-19. (in Chinese)

5 Burgos-Artizzu X P, Ribeiro A, Guijarro M, et al. Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 337-346.

6 Montalvo M, Pajares G, Guerrero J M, et al. Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(15): 11889-11897.

7 王新忠,韩旭,毛罕平,等.基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J].农业机械学报,2012,43(6):161-166.
Wang Xinzhong, Han Xu, Mao Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 161-166. (in Chinese)

8 张勤,黄小刚,李彬.基于彩色模型和近邻法聚类的水田秧苗列中心线检测方法[J].农业工程学报,2012,28(17):163-171.
Zhang Qin, Huang Xiaogang, Li Bin. Detection of rice seedlings rows' centerlines based on color model and nearest neighbor clustering algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 163-171. (in Chinese)

9 高国琴,李明.基于 K-means 算法的温室移动机器人导航路径识别[J].农业工程学报,2014,30(7):25-33.
Gao Guoqin, Li Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K-means algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 25-33. (in Chinese)

10 林桂潮,邹湘军,罗陆锋,等.改进随机样本一致性算法的弯曲果园道路检测[J].农业工程学报,2015,31(4):168-174.
Lin Guichao, Zou Xiangjun, Luo Lufeng, et al. Detection of winding orchard path through improving random sample consensus algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 168-174. (in Chinese)

11 Guerrero J M, Guijarro M, Montalvo M, et al. Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize fields [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(2): 656-664.

12 张成涛,谭彧,吴刚,等.基于达芬奇技术的收割机视觉导航图像处理算法试验系统[J].农业工程学报,2012,28(22):166-173.
Zhang Chengtao, Tan Yu, Wu Gang, et al. Testing system of image processing algorithm of visual navigation system for harvester based on DaVinci technology [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 166-173. (in Chinese)

13 Meng Q, Qiu R, He J, et al. Development of agricultural implement system based on machine vision and fuzzy control [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 128-138.

14 孟庆宽,何洁,仇瑞承,等.基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取[J].光学学报,2014,34(7):172-178.
Meng Qingkuan, He Jie, Qiu Ruicheng, et al. Crop recognition and navigation line detection in natural environment based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 172-178. (in Chinese)

15 Leemans V, Destain M F. A computer-vision based precision seed drill guidance assistance [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 59(1-2): 1-12.

16 Asif M, Amir S, Israr A, et al. A vision system for autonomous weed detection robot [J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2010, 2(3): 486-491.

17 何勇,聂鹏程,刘飞.农业物联网与传感器研究进展[J].农业机械学报,2013,44(10):216-226.
He Yong, Nie Pengcheng, Liu Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216-226. (in Chinese)