

基于机器视觉的玉米定位施肥控制系统设计与试验

宗泽^{1,2} 刘刚^{1,2}

(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. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现农田环境下的苗期玉米定位定量施肥作业,提高肥料利用率,本文设计了基于机器视觉的苗期玉米定位施肥控制系统,控制自驱动履带式田间玉米定位施肥机,使用切片式排肥器结构实现间歇式施肥。采集苗期玉米冠层图像后,利用颜色特征区分连续拍摄过程中的大量背景图像和识别错误的株心,改进了株心识别定位方法;建立施肥滞后误差补偿模型,实时计算施肥相对距离,准确计算排肥器的落肥时刻,实现了按株间歇式自动定位施肥。经过试验与验证分析,改进的株心定位识别方法明显缩减了图像处理时间,提高了算法鲁棒性;3个挡位施肥量(7.25、14.5、21.75 g)的施肥稳定性变异系数分别为1.93%、1.87%、1.93%,施肥量控制精度大于95%,施肥位置准确性平均误差为3.2 cm,可以实现精准定位施肥。本文设计的施肥控制系统可以实现苗期玉米按株定位定量施肥,达到了减施提质、科学施肥的目的。

关键词: 施肥控制系统; 机器视觉; 苗期玉米; 按株间歇式施肥; 株心识别定位

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0066-08

Design and Experiment of Maize Fertilization Control System
Based on Machine Vision

ZONG Ze^{1,2} LIU Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory of 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 and Rural Affairs,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the positioning and quantitative fertilization of maize in seedling stage under farmland environment, a control system was designed, which was based on machine vision to position and fertilize maize in seedling stage and improve fertilizer utilization rate. The control system controlled the maize positioning fertilizer applicator to travel in the field through the self-driving crawler. The fertilizer applicator realized intermittent fertilization according to plant location by using the structure of slice fertilizer discharger. After collecting the images of maize canopy at seedling stage, the area of maize plants at seedling stage was small, and there were many collected images without maize. In order to solve the influence of the above problems on operation efficiency and accuracy, the system used color features to distinguish a large number of background images and misrecognized plant centers during continuous shooting. By adding image preprocessing and algorithm post-processing, the method of plant center recognition and location was improved; in order to solve the problem of fertilizer lag caused by fertilizer falling time, system response time and positioning error, the compensation model of fertilization lag error was established, the relative distance of fertilization was calculated in real time, and the time of fertilizer falling was calculated accurately, which improved the control precision of intermittent automatic positioning fertilization according to plant. After experiment and verification analysis, the improved plant center location recognition method obviously reduced the image processing time and improved the

收稿日期: 2021-07-15 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200605)

作者简介: 宗泽(1990—),男,博士生,主要从事机器视觉和农业电气化与自动化研究,E-mail: doctorzong@163.com

通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

robustness of the algorithm; according to the amount of single fertilization, the fertilizer applicator was set three gears (7.25 g, 14.5 g and 21.75 g), and the coefficient of variation of fertilization stability, which represented the stability of fertilizer application per plant, was 1.93%, 1.87% and 1.93%, respectively. The control precision of the actual fertilization amount and the target fertilization amount of the fertilizer discharger was more than 95%. The average error of the distance between the actual fertilizer drop point and the target drop point can reach 3.2 cm, which met the basic operation requirements of location fertilization. The fertilization control system designed can realize the quantitative fertilization according to the location of maize plants at seedling stage, and achieve the purpose of reducing application, improving quality and scientific fertilization.

Key words: fertilization control system; machine vision; seedling maize; intermittent positioning fertilization according to plant; identification and location of plant center

0 引言

在国内农业施肥作业中,一直存在化肥利用率偏低的问题^[1]。因此,合理高效的机械化施用化肥,提高肥料使用率成为精细农业的一个研究热点^[1-5]。近年来,国内外学者为了提高颗粒肥料的利用率,在施肥控制方面做了一些研究工作,设计了包括单变量、双变量等施肥控制系统^[1,6-11],提高了施肥量的控制精度。CHATTHA 等^[12]设计了一种自动识别控制施肥系统,根据施肥处方图实时定位非蓝莓种植区域,避免肥料的浪费。张季琴等^[7]设计了双变量施肥机,根据施肥处方图,通过调节外槽轮开度和转速,提高了变量施肥的控制精度。目前变量施肥控制系统,主要使用条施的施肥方式^[13-15],根据处方图对施肥量实现区块性的调节。

为进一步提高施肥量的控制精度,一些学者通过改变排肥方式,以按株穴施代替按行条施的施肥方式,实现玉米间歇式排肥作业。潘睿^[16]结合精量间歇排肥机构的结构特点,开发了种肥同步控制系统。胡红等^[17-18]通过棘轮离合机构与位置探测机构定位玉米,并通过控制水平位移补偿装置和曲柄连杆机构,实现玉米定点扎穴追肥机的扎穴施肥。万玲等^[19-20]设计了滚轮式玉米穴施追肥器,但固定的滚轮周长与株间距比例关系,缺乏电控系统和实时监控系统,无法精准施肥。王紫玉^[21]通过外槽轮式排肥器和圆盘式挡片结合,控制排肥口在特定时间排肥。

针对目前我国玉米中耕追肥方式以条施为主,按株定位施肥的控制系统研究较少,且作业效率低的现状,为进一步提高定位施肥的实时性和准确性,实现苗期玉米按株定量定位施肥,本文设计基于机器视觉的苗期玉米定位施肥控制系统,根据玉米的植株位置,控制位于施肥机后端的排肥口,按株间歇式点状定位施肥,以期达到减施提质、科学施肥的目的。

1 系统总体设计与工作原理

1.1 玉米株心识别与定位原理

团队前期工作实现了苗期玉米的株心识别定位方法^[22],通过最小交叉熵方法自动确定植被与土壤的超绿指标阈值进行图像分割,整体算法流程如图 1 所示。

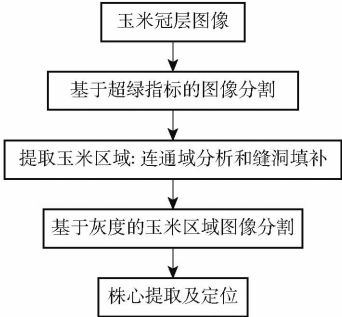


图 1 苗期玉米株心实时识别算法流程图
Fig. 1 Flow chart of real-time identification algorithm of corn plant center at seedling stage

在进行连续田间图像采集和施肥控制试验时,发现存在以下问题:①算法主要利用玉米区域与背景(主要为土壤)、玉米叶片和茎与株心的颜色特征差异进行设计,在整幅图像里没有玉米,只有土壤背景或者杂草时,会给出错误的玉米株心位置。②在只有土壤背景时,由于图像对比度小,算法运行时间偏长。苗期时,因为玉米植株所占面积偏小,存在较多的采集图像中没有玉米,上述问题对作业效率和精度影响较大。针对以上问题,本文从以下两方面进行改进:

(1) 图像预处理

背景图像分两种情况:①整幅图像全部为土壤。②图像中存在零星杂草。田间图像中,地物会因自身特性差异而呈现不同的颜色,如作物因品种、健康情况、生长期等不同而在色彩上发生变化,土壤因类型、湿度、杂质成分等因素呈现不同的颜色;同时,物体的颜色受到外界环境的影响,比如光照条件和相

机参数的差异。通过对比不同条件下拍摄图像发现,虽然作物和土壤的颜色会因自身因素和客观条件有所差别,但有一个共性的特征:在 RGB 颜色空间里,绿色植物像素的 G 通道亮度始终高于 R 和 B 通道;而土壤像素的 R 通道亮度通常高于 G 和 B 通道。

颜色指标可以强化目标物体的颜色特征,从而判断图像中是否包含待识别物体。WOEBBECKE 等^[23]比较了 $r - g$ 、 $g - b$ 、 $\frac{g - b}{g - r}$ 、 $2g - r - b$ 和 h 等颜色指标对植物、土壤的区分效果,其中超绿指标 $2g - r - b$ 能够在不同光照条件下较好地区分图像中的植物和土壤。

给定阈值 t_g ,当像素超绿指标大于等于 t_g ,标记该像素为植被像素,统计图像中植被像素个数相对全图像素个数的百分比 P_{veg} ,植被像素个数百分比小于等于给定值 t_v 时,认为该图像为背景图像,直接忽略。可表示为

$$P_{veg} = \frac{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h g(x,y)}{wh}$$

(1)

其中

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & (f(x,y) \geq t_g) \\ 0 & (f(x,y) < t_g) \end{cases}$$

(2)

式中 $f(x,y)$ ——像素 (x,y) 的超绿指标值
 w ——图像宽度 h ——图像高度

(2)算法后处理

对比分析玉米区域图像上株心和叶片在红、绿、蓝可见光波段的反射特性可知,玉米株心的 R 、 G 、 B 值相差不大,而玉米叶片的 G 比 R 和 B 高很多。

在算法识别和定位玉米株心后,计算相应位置像素的超绿指标值 veg_c ,当 veg_c 小于等于给定阈值时,认为识别和定位的株心为真实株心,否则为伪株心(杂草区域的暗区域)。

1.2 排肥器模块

为实现基于机器视觉的玉米定位施肥,提高玉米苗期追肥的肥料利用率,通过一种有别于外槽轮式的排肥器结构设计,以实现间歇性排肥的施肥效果。排肥器结构如图 2 所示。

通过继电器控制脱扣线圈,实现施肥切片的开关和闭合。当施肥切片打开的同时,施肥挡片闭合,肥箱中的颗粒肥落入施肥管的排肥口位置;然后施肥切片闭合,与施肥挡片之间形成柱状空间,即单株玉米的施肥量,施肥挡片打开,使颗粒肥从排肥口下落,完成一次间歇式点状施肥。通过调节施肥切片的不同位置,调节施肥挡片与施肥切片之间的距离,改变柱状空间,从而控制单次施肥量,并有效避免传

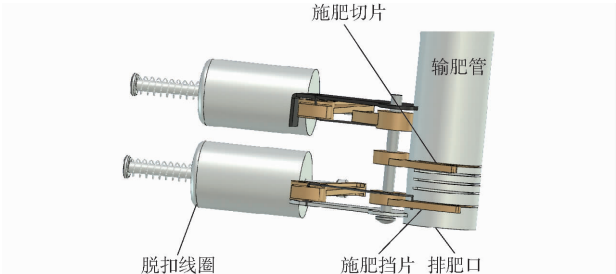


图 2 排肥器示意图

Fig. 2 Schematic of fertilizer discharger

统外槽轮停转时肥料颗粒仍然不断下落的情况。

1.3 施肥控制原理

为实现对施肥机排肥口实时位置的准确定位,在每次施肥机开始作业时,施肥控制系统中均重新设置一次参考点,通过安装在施肥机的增量式编码器,从参考点开始建立施肥机一维坐标系。在实际作业中,需考虑施肥口到相机距离 L 的影响(图 3)。

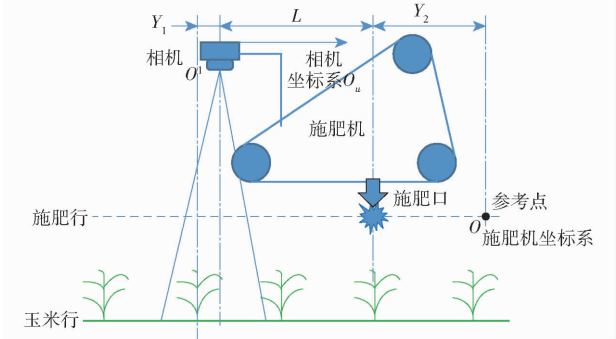


图 3 相机坐标系与施肥机坐标系示意图

Fig. 3 Schematic of camera coordinate system and fertilizer applicator coordinate system

根据玉米位置固定,施肥相对距离不会因车速改变而变化的特点,本文采用距离倒减的计算方法,计算式为

$$Y_1 = Y_2 + L - Y_0 - Y_3$$

(3)

式中 Y_1 ——目标施肥点的坐标
 Y_2 ——下位机实时返回的行进距离
 Y_0 ——玉米行起点处设置的参考点坐标
 Y_3 ——玉米株心与相机原点在水平面投影,施肥机行进方向上的实际空间坐标

当排肥口的实时位置与玉米位置重置时,由施肥控制系统发出指令进行施肥。通过对田间施肥样机的试验,发现精准定位施肥过程中存在滞后施肥的问题,主要受以下因素影响:

(1)系统响应时间。玉米识别定位模块的处理时间;机械系统的响应时间;上位机与下位机串口通信的延时;排肥口的肥料下落时间;图像采集模块打包数据时的数据处理和传输时间。

(2)图像定位误差。玉米苗不在相机正下方时,图像产生畸变;因行进过程中的震动导致相机高

度发生变化,产生标定偏差;施肥机底盘震动平移,导致距离定位计算误差。

针对以上误差产生的原因,本研究通过减小串口读取周期、裁剪图像中心部分改进识别方法,同时通过参考平均车速,以及田间整机试验,设置一个距离常量进行误差补偿,计算式为

$$Y_1 = Y_2 + L - Y_0 - Y_3 + Y_4 \tag{4}$$

式中 Y_4 ——进行误差补偿的距离,可以通过试验得到

2 系统软硬件设计

玉米定位施肥样机在田间连续行走过程中,XIMEA 相机以垂直俯拍方式实时采集幼苗期玉米冠层信息,通过串行接口将数据传输给车载计算机。在车载计算机上运行玉米定位施肥控制系统,采用机器视觉方法识别定位玉米株心,实现定位施肥作业信息的采集、显示、定位和控制,通过 RS232 与 TTL 互转模块与下位机施肥执行模块进行通信。下位机通过编码器测量定位施肥机位置信息,与上位机定位的玉米株心位置比较,距离差值为零时,控制排肥器模块间歇式按株点状施肥。试验样机如图 4 所示。

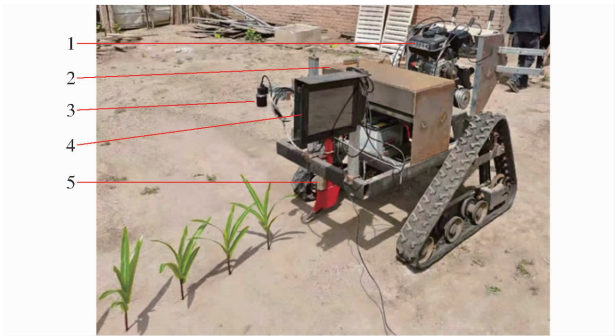


图 4 玉米定位施肥样机

Fig. 4 Prototype of corn fertilization

1. 驱动部分 2. 肥箱 3. 相机 4. 上位机 5. 开沟排肥器

2.1 系统硬件设计

玉米定位施肥机控制系统主要由 XIMEA 的 USB 3.0 单目彩色工业相机(参数见表 1)、运行玉米株心识别定位模块和下位机控制模块的上位机、运行施肥执行模块的下位机及其组成、施肥机驱动部分及底盘支架、肥箱及排肥器、开沟覆土装置等部件组成。定位施肥机控制系统组成如图 5 所示。

上位机主机采用 I7/16 GB 配置的 X86 Windows 平台,显示屏采用 IP67 等级,12 V 直流输入电源。上位机安装在施肥机的一侧便于作业人员在行进过程中实时查看玉米株心识别与施肥效果。

下位机包括中枢控制器、测距编码器(参数见表 2)、排肥器(继电器)(参数见表 3)、与上位机通

表 1 XIMEA 单目彩色工业相机基本参数
Tab. 1 Basic parameters of XIMEA monocular color industrial camera

参数	说明
传感器型号	Sony IMX250
传感器类型	CMOS RGB Bayer Matrix
传感器尺寸/英寸	2/3
传感器有效面积/(mm × mm)	8.5 × 7.1
传感器有效面对角线长/mm	11.1
分辨率/(像素 × 像素)	2 464 × 2 056

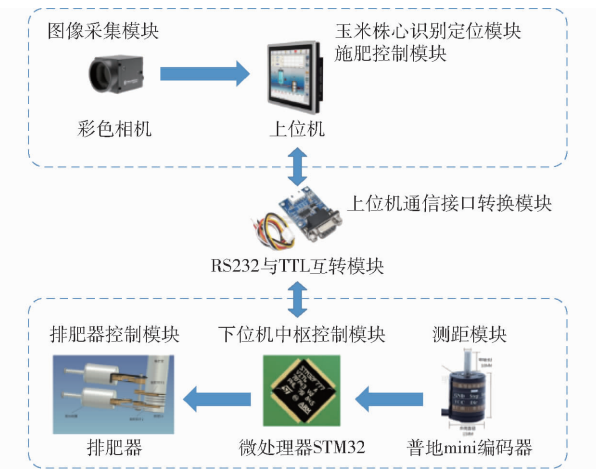


图 5 玉米定位施肥机控制系统组成

Fig. 5 Composition of control system of corn positioning fertilizer applicator

表 2 测距编码器基本参数

Tab. 2 Basic parameters of ranging encoder

参数	说明
型号	普地电子 PD-1503-ENC
编码器内核	DSP 内核,车规级
工作电压/V	3 ~ 5
工作电流/mA	6
输出电平	TTL
外壳直径/mm	15
外壳长度/mm	18.5
连接轴直径/mm	3
连接轴长度/mm	10
输出相数	ABZ,支持 X4,X2,X1 解码
输出脉冲	64/256/1 024/4 096

表 3 排肥器基本参数

Tab. 3 Basic parameters of fertilizer discharger

参数	说明
尺寸/(mm × mm × mm)	50 × 24 × 17
工作电压/V	3 ~ 4
工作电流/mA	120
触发电压/V	0 ~ 2.3 (低电平触发) 0.7 ~ 5.0 (高电平触发)
被控设备电流/A	0 ~ 10

信接口转换模块。中枢控制器采用 Cortex - M7 架构的 STM32F7 系列超高性能 MCU。中枢控制器通

过普通 I/O 与计数器采集施肥机轮子转动方向以及编码器的脉冲数进行距离测量,利用 RS232 与 TTL 互转模块实现施肥控制模块(上位机)与施肥执行模块中枢控制器(下位机 STM32)间的串口通信,通过排肥继电器实现中枢控制模块(STM32)对排肥器的控制。

底盘是由汽油机作为动力的履带式驱动结构,通过 L 形支架固定和支撑相机并保证相机镜头垂直向下。根据玉米识别定位模块的响应时间和施肥机在田间行进的平均速度(0.1 ~ 0.2 m/s),确定相机与施肥口的距离不能小于 1.2 m。通过测试相机视野的玉米冠层完整度和所占比例,确定支架固定相机的高度为 0.5 m。

2.2 软件设计

为实现精准定位施肥,减少系统响应时间和施肥滞后情况造成的误差,设计了玉米定位施肥控制系统,将机器视觉识别定位部分和施肥作业控制两部分集成,结合玉米植株和施肥机的位置信息,通过滞后补偿的施肥控制模型,计算出玉米施肥的准确时刻,通过串口通信给下位机施肥执行系统指令,控制施肥机实现精准定位施肥作业。玉米定位施肥控制系统整体流程如图 6 所示。

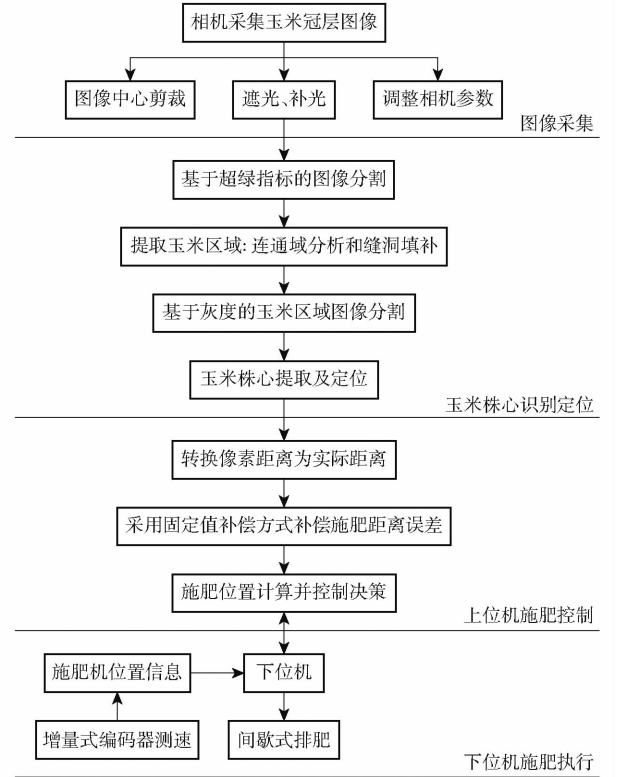


图 6 玉米定位施肥控制系统流程图
Fig.6 Flow chart of corn fertilization control system

3 试验与结果分析

为考察定位施肥控制系统性能,在河北省固安

县甜水营村,对株间距为 20 cm 的 20 株玉米进行施肥识别正确率、施肥稳定性试验,试验过程中施肥机前进速度为 0.36 ~ 0.72 km/h。玉米定位施肥样机的基本参数如表 4 所示。

表 4 定位施肥样机的基本参数
Tab.4 Basic parameters of positioning fertilization prototype

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 500×1 200×1 100
配套动力/kW	3.6
作业幅宽/mm	750
电池电压/V	12
电池容量/(A·h)	60
工作温度/℃	-10 ~ 50

3.1 算法运行速度

统计背景图像、无株心图像、有株心图像的处理时间,结果如表 5 所示。

表 5 图像预处理后系统响应时间
Tab.5 Statistics of system response time after image preprocessing

图像类型	图像数量/幅	平均耗时/ms	最小值/ms	最大值/ms
背景	2	13.5	12.9	14.1
无株心	5	411.6	381.7	425.7
有株心	213	431.4	420.8	448.3

从表 5 可以看出,背景图像处理时间远小于其他图像处理时间。说明通过加入预处理过程,极大地提升了背景图像的处理速度,为施肥和图像分析的异步处理提供了可能。

3.2 施肥识别正确率

将图像按实际情况、识别结果分为背景图像、无株心(图像为杂草或玉米叶片部分)、有株心 3 类,共 9 种组合,如表 6 所示。

表 6 系统识别结果设定
Tab.6 System identification result setting

实际类型	识别类型		
	背景图像	无株心	有株心
背景图像	n_{11}	n_{12}	n_{13}
无株心	n_{21}	n_{22}	n_{23}
有株心	n_{31}	n_{32}	$n_{33}(n'_{33})$

其中 n'_{33} 为图像中包括株心且成功进行株心识别和定位的图像数量。

在实际施肥场景中,施肥结果分为 3 种情况,分别为正确施肥(不需施肥实际未排肥和需要施肥控制排肥)、漏施(需要施肥但实际没有施肥)、多施(不需施肥实际排肥)。总图像数量 $n_t =$

$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 n_{ij}$ 。相应比例计算公式如下：

正确施肥比例为

$$u_c = (n_{11} + n_{12} + n_{21} + n_{22} + n'_{33}) / n_t \times 100\% \quad (5)$$

漏施比例为

$$u_l = (n_{31} + n_{32}) / n_t \times 100\% \quad (6)$$

多施比例为

$$u_d = (n_{13} + n_{23}) / n_t \times 100\% \quad (7)$$

在控制系统性能测试中,施肥结果统计如表 7 所示。

表 7 施肥结果统计

Tab.7 Statistics of fertilization results

实际类型	识别类型		
	背景图像	无株心	有株心
背景图像	2	0	0
无株心	0	2	3
有株心	0	8	205 (174)

经计算,正确施肥比例为 80.9%,漏施比例为 3.6%,多施比例为 1.4%。本次测试的正确施肥比例不高,主要是因为试验前阴雨天气滋生杂草,对正确识别和定位产生干扰。

通过图像后处理,避免了图像为杂草或图像为玉米叶片的错误,减少了多施情况的发生,多施比例由改进前的 7.5% 降为 1.4%。

3.3 施肥稳定性变异系数

参考国家施肥机试验办法 GB/T 20346.2 中对排肥器的主要性能要求,对施肥样机的施肥稳定性进行测试。选取品牌“心连心”复合肥(N-P₂O₅-K₂O)进行了田间测试。在试验田间环境下平均每株玉米的施肥量约为 14.5 g,将单次施肥量分别设置为 7.25、14.50、21.75 g,一行玉米 25 株,在玉米行侧 10 cm 的位置放置接料盒,便于对每株玉米苗的施肥料进行称量统计。单株玉米施肥量的统计结果如图 7 所示。

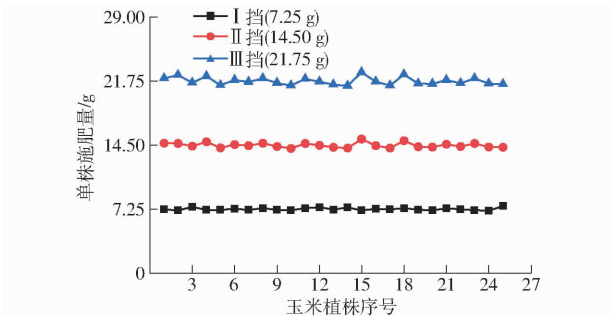


图 7 单株玉米施肥量统计曲线

Fig.7 Statistical curves of fertilization amount per plant of maize

由图 7 可以看出,3 个挡位的施肥量离散程度

不高,计算出 3 个挡位的施肥稳定性变异系数分别为 1.93%、1.87%、1.93%,表明施肥样机的稳定性较好,同一行玉米每株的施肥量比较均匀。

3.4 施肥量控制精度

通过设定不同的目标施肥量分别为 7.25、14.50、21.75 g,在每行玉米施肥作业完成后,通过对玉米行侧的接料盒称量,记录每株玉米的单次施肥量,统计结果如图 8 所示。

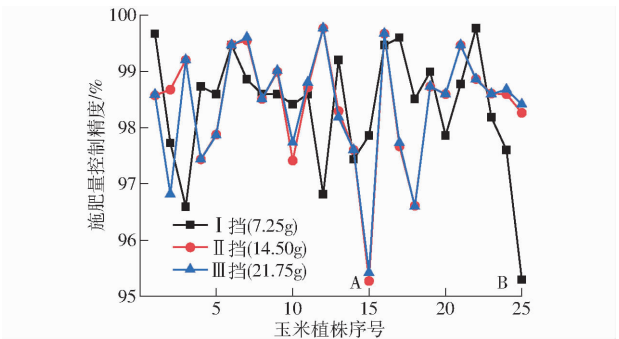


图 8 施肥量控制精度曲线

Fig.8 Accuracy curves of fertilization control

控制精度计算式为

$$\delta = \left(1 - \frac{|G_1 - G_2|}{G_2} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中 δ ——施肥量控制精度,%

G_1 ——实际单株玉米排肥量,g

G_2 ——目标单株玉米排肥量,g

从图 8 可以看出,在设置不同目标施肥量时,施肥量的控制精度均大于 95%,说明排肥器实际施肥量接近目标施肥量,并满足 GB/T 35487《变量施肥播种机控制系统》中对施肥量控制精度的要求。经过分析发现,第 1 个异常点 A,是因为该株玉米与前一株玉米间距太小,II、III挡需要的施肥量,分别是 I 挡的 2~3 倍,肥箱里的颗粒肥在重力作用下,来不及将施肥管柱状施肥空间注满,导致该株玉米,在施肥挡位增加时,施肥量的误差增大;第 2 个异常点 B 产生的原因,是该株玉米在 I 挡施肥时,施肥切片被颗粒肥卡住,没有完全切断细小颗粒肥进入输肥管的路径。

3.5 施肥位置准确性误差

施肥位置准确性误差是用来评价定位施肥效果的重要指标,本文设定每株玉米的行侧 10 cm 位置为定位施肥的目标肥点。样机作业完毕后,测量单株落肥的中心点与目标施肥点沿玉米行的投影间距 Δx ,作为施肥位置误差。

通过两行共 40 次按株施肥,测量并统计施肥位置误差的平均值,作为样机的施肥位置准确性误差,测量统计结果如图 9 所示。

从图 9 可以得出,偏移的施肥位置误差正态分

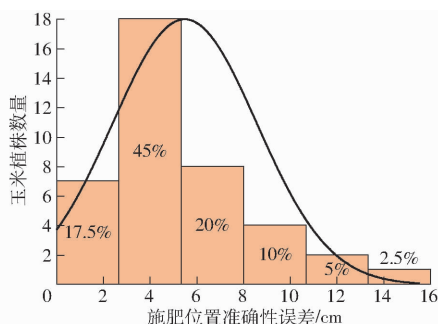


图9 调整前施肥位置误差统计图

Fig.9 Statistical diagram of fertilization position error before adjustment

布的期望值是 5.49 cm,因此可以在施肥控制系统中,通过设定补偿误差为 5.49 cm,以便提高施肥位置精度。系统调整后第 2 次测量并统计施肥位置误差的平均值,作为样机的施肥位置准确性误差,统计结果如图 10 所示。

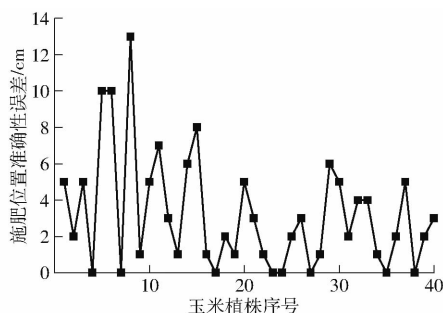


图10 调整后施肥位置准确性误差

Fig.10 Accuracy error of fertilization position after adjustment

通过对比图 9、10 可以看出,通过调整施肥控制系统的补偿误差,玉米施肥位置准确性误差明显减小,本文研究的定位施肥样机基本实现了按株定位

施肥作业,将颗粒肥料落在了玉米行侧 10 cm 的目标施肥位置,平均施肥位置误差为 3.2 cm。

通过分析发现,施肥位置误差的主要原因为玉米植株在生长过程中,可能会出现根心偏离现象,即玉米株心和根部不在同一铅垂线上,导致施肥控制系统计算的目标施肥点出现误差和偏移。通过测量统计发现,偏移的施肥位置准确性平均误差为 3.2 cm,与玉米根部的相对距离相差不大,在玉米的肥料吸收范围内,满足玉米定位施肥的基本需求。

4 结论

(1)设计了基于机器视觉的苗期玉米定位施肥控制系统,实现了根据苗期玉米的植株位置,按株定位的间歇式施肥方式,避免在玉米缺株的位置施肥,改变了传统玉米追肥条施的施肥方式,有效地减少了肥料的使用量,提高了肥料利用率。

(2)3 个挡位施肥量(7.25、14.50、21.75 g)的施肥稳定性变异系数分别为 1.93%、1.87%、1.93%,施肥量控制精度大于 95%,说明施肥样机的稳定性较好,同一行玉米每株的施肥量比较均匀,而且实际施肥量接近目标施肥量。

(3)利用颜色特征区分连续拍摄过程中的大量背景图像和识别错误的株心,改进了株心识别定位方法,明显缩减了图像处理时间,降低了杂草的影响,提高了株心识别定位方法的鲁棒性。

(4)在机器视觉定位施肥过程中,通过建立施肥滞后误差补偿模型,减小了系统响应时间等因素导致的滞后误差,提高了按株定位施肥的位置准确性。经过试验验证,施肥位置准确性平均误差为 3.2 cm,满足定位施肥的实际作业要求。

参 考 文 献

- [1] 安晓飞,付卫强,王培,等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 96-101.
AN Xiaofei, FU Weiqiang, WANG Pei, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 96-101. (in Chinese)
- [2] 洪延宏,吕新,张泽,等. 基于神经网络控制算法的液肥变量控制系统研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(7): 175-181.
HONG Yanhong, LÜ Xin, ZHANG Ze, et al. Research on liquid fertilizer variable control system based on neural network control algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(7): 175-181. (in Chinese)
- [3] 赵学观,王秀,何亚凯,等. 基于光谱信息的玉米变量追肥控制系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 37-44.
ZHAO Xueguan, WANG Xiu, HE Yakai, et al. Optimal design and experiment of variable topdressing control system for corn based on spectral information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 37-44. (in Chinese)
- [4] 赵学观,金鑫,邹伟,等. 基于双测速模式的玉米追肥机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 145-153.
ZHAO Xueguan, JIN Xin, ZOU Wei, et al. Design and experiment of double speed measurement mode of corn topdressing control system based on spectral information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 145-153. (in Chinese)
- [5] 杨立伟,黄家运,张季琴,等. 基于微波多普勒法的施肥质量流量检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 210-217.

- YANG Liwei, HUANG Jiayun, ZHANG Jiqin, et al. Mass flow measurement system of granular fertilizer based on microwave doppler method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 210 – 217. (in Chinese)
- [6] 狄小冬. 玉米中耕变量施肥电控液压驱动系统的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
DI Xiaodong. Research on electronic control hydraulic drive system of variable fertilization in corn[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [7] 张季琴, 刘刚, 胡号, 等. 双变量螺旋外槽轮排肥器控制序列对排肥性能的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 137 – 144.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Influence of control sequence of spiral fluted roller fertilizer distributor on fertilization performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 137 – 144. (in Chinese)
- [8] 苑进, 刘成良, 古玉雪, 等. 基于相关向量机的双变量施肥控制序列优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 184 – 189.
YUAN Jin, LIU Chengliang, GU Yuxue, et al. Bivariate fertilization control sequence optimization based on relevance vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 (Supp.): 184 – 189. (in Chinese)
- [9] 孟志军, 赵春江, 刘卉, 等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 338 – 342.
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, LIU Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable granule application system[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338 – 342. (in Chinese)
- [10] 陈立平, 黄文倩, 孟志军, 等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 101 – 104.
CHEN Liping, HUANG Wenqian, MENG Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 101 – 104. (in Chinese)
- [11] 王秀, 赵春江, 孟志军, 等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 114 – 117.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114 – 117. (in Chinese)
- [12] CHATTHA H S, ZAMAN Q U, CHANG Y K, et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 70 – 78.
- [13] 张继成, 严士超, 纪文义, 等. 基于增量式 PID 算法的多种固体肥精确施控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 99 – 106.
ZHANG Jicheng, YAN Shichao, JI Wenyi, et al. Precision fertilization control system research for solid fertilizers based on incremental PID control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 99 – 106. (in Chinese)
- [14] 贾洪雷, 温翔宇, 王刚, 等. 颗粒肥料质量流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 130 – 136.
JIA Honglei, WEN Xiangyu, WANG Gang, et al. Design and experiment of mass flow sensor for granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 130 – 136. (in Chinese)
- [15] 刘彩玲, 张福印, 都鑫, 等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 165 – 174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 165 – 174. (in Chinese)
- [16] 潘睿. 玉米精量间歇定点施肥系统的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
PAN Rui. Construction and experiment of maize precision intermittent fertilization system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 胡红. 玉米行间定点扎穴深施追肥机设计与研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
HU Hong. Design and research of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between maize rows[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] 胡红, 李洪文, 王庆杰, 等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 26 – 35.
HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26 – 35. (in Chinese)
- [19] 万玲, 谢东波, 李杨, 等. 玉米行间滚轮式穴施排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 64 – 73.
WAN Ling, XIE Dongbo, LI Yang, et al. Design and experiment of roller hole fertilizer application between corn rows[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 64 – 73. (in Chinese)
- [20] 万玲. 玉米行间穴施机设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
WAN Ling. Design and test of maize interrow hole fertilizer[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [21] 王紫玉. 玉米变量穴施肥试验台控制系统的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
WANG Ziyu. Research of corn variable hole fertilizer test bed control system[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [22] ZONG Z, LIU G, ZHAO S. Real-time localization approach for maize cores at seedling stage based on machine vision[J]. Agronomy, 2020, 10(4): 470.
- [23] WOEBBECKE D M, MEYER G E, VONBARGEN K, et al. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 259 – 269.