

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.013

水稻钵体育秧智能补种决策方法与试验

周海波^{1,2} 李晨铭^{1,2} 张 镔^{1,2} 王海欣^{1,2} 李 霞^{1,2}

(1. 天津理工大学天津市先进机电系统设计及智能控制重点实验室, 天津 300384;

2. 天津理工大学机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384)

摘要: 针对水稻工厂化育秧播种中普遍存在空穴和单粒穴的问题,运用播种质量视觉检测技术,设计了一种高效智能补种决策系统。采用视觉采集和图像处理系统对播种质量进行检测,建立种群分布数据库;采用卷积计算方法对空穴和单粒穴的补种方案进行智能决策;对吸种相关参数进行设计计算,以确保吸种可靠;通过伺服电机驱动和气动组合吸针相结合的方式组成伺服补种机构,实现了精准、高效、连续的动态补种过程。试验表明:当每个钵体盘的补种率为2%时,平均每穴补种时间为1.51 s,智能补种系统生产率达到420盘/h。说明智能补种决策大大提高了补种系统的工作效率。

关键词: 水稻;钵体育秧;视觉检测;伺服补种机构;补种决策

中图分类号: S233.71; TP23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0122-08

OSID:



Decision and Experiment on Intelligent Reseeding System of Rice Bowl Nursing Seedling

ZHOU Haibo^{1,2} LI Chenming^{1,2} ZHANG Bin^{1,2} WANG Haixin^{1,2} LI Xia^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Aiming at the problems of cavity and single hole rate in rice seedling planting, in order to further improve the qualification rate of 2~3 grains per holes, a visual inspection technology of seeding quality was presented, and an efficient intelligent reseedling decision system was designed. The visual collection and image processing system were used to check the quality of seeding, and a population distribution database was established. The convolution calculation method was adopted to intelligently decide the reseedling scheme of the cavity and the single hole, and the dynamic coordinates of the replanted acupoints were positioned. The relevant parameters of seed suction were calculated to ensure its reliable performance. Finally, the combination of the servo motor and the pneumatic combined suction needle was used to form the reseedling mechanism, which realized an accurate, efficient and continuous dynamic reseedling process. According to the statistics of the test results, the average reseedling time per hole was 1.51 s when the rice seed replenishment rate was 2%, and the intelligent seed replenishment system can meet the production requirements of 420 dishes per hour. The intelligent replanting decision greatly improved the working efficiency of the replanting system, and which can provide a theoretical basis for low-seeded reseedling technology of rice, vegetables, flowers and other crops in the factory.

Key words: rice; bowl nursing seedling; visual inspection; servo seeding mechanism; reseedling decision

收稿日期: 2020-02-07 修回日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275209)和大学生创新创业训练计划项目(201810060001)

作者简介: 周海波(1973—),男,教授,主要从事智能机器人技术研究, E-mail: haibo_zhou@163.com

通信作者: 李霞(1978—),女,副教授,主要从事现代智能机械装备与生物机器系统技术研究, E-mail: lixia0415@163.com

0 引言

我国水稻种植技术以育秧移栽为主^[1]。机械移栽在育秧方式上可分为毯状苗移栽、钵体苗移栽以及钵体毯状苗移栽等,其中钵体苗移栽具有伤根轻、返青快、分蘖早、秧龄弹性大的优势,弥补了传统机插秧的不足,增产显著,已成为主要的水稻种植模式。现有排种器可以达到 1~3 粒/穴的性能,但空穴率达 5%,单粒穴比率也比较高,同时受种子发芽率和秧苗伤秧率的影响^[2-3],使水稻种植的成秧率较低,故需要补全空穴、减少单粒穴率,以保证水稻钵体育秧的播种质量,这对杂交稻钵体育秧 2~3 粒/穴的理想播种目标尤为重要。目前,针对漏播补种问题的研究较少,缺少补种决策方法及技术等相关理论依据。因此,提升水稻钵体育秧播种机补种装置的智能化和自动化水平具有重要意义^[4],对蔬菜、花卉等钵体育秧作业的低播量精密播种也具有借鉴意义。

针对育秧精密播种的监测预警和检测控制等国内外学者进行了很多研究^[5-10],但对补种工序研究相对较少。由于播种质量的实时检测、补种机构的效率问题很难突破,无法满足实际生产需求,从而成为了秧盘育秧精密播种技术发展的瓶颈。周海波等^[11-12]研制了 2CYL-450 型水稻秧盘育秧精密播种机,该机可满足不同播种量的生产需求,达到 1~3 粒/穴的精密播种性能指标,但单粒穴和空穴问题仍无法避免。为了解决播种质量实时检测的问题,齐龙等^[13]设计了检测水稻秧盘空穴位置视觉系统,并建立了与穴孔相对应的掩模图像,识别空穴准确率达到 75%。邱兆美等^[14]设计了小粒种子电动播种机作业质量监测系统,采用多传感器检测技术,检测精度达 96%,实现了实时监控、显示和报警。TAN 等^[15-16]提出一种杂交稻籽粒分割计数算法,基于分水岭算法、改进的角点算法和 BP 神经网络分类算法对杂交稻的粒数进行分类计数,平均准确率达到 94.63%;同时为解决机器视觉系统只能捕获部分秧盘补种图像的问题,提出一种结合相位相关和 SURF 的快速秧盘图像拼接技术 PC-SURF,以获得整个秧盘的播种性能,拼接速度也满足实时性的要求。DONG 等^[17]提出一种杂交水稻播种性能实时在线监测系统,该系统基于 HSL 模型的固定阈值分割技术提取网格图像和种子图像,计算空穴的数量,并利用机器学习方法监测托盘播种的种子数,在生产效率低于 500 盘/h 条件下,种子数检测的平均准确率为 95.68%。

本文采用视觉检测、智能补种决策、伺服电机驱

动和组合吸针等技术,设计一种高效智能补种决策系统,对钵体盘播种质量进行检测,优化空穴和单粒穴补种方案,通过伺服电机驱动和气动组合吸针相结合实现水稻育秧的高效补种。

1 系统设计

1.1 结构与原理

智能补种系统主要由视觉采集与检测系统、伺服补种机构、气动组合吸针组成,以及由 LabVIEW 软件开发的计算机运动控制系统,如图 1 所示。首先,水稻育秧播种机对钵体盘进行播种,播后钵体盘随输送系统经过视觉采集传感器,视觉采集系统实时采集图像,采集到当前水稻钵体盘的图像信息,再通过图像检测系统对钵体盘播种质量进行检测,同时将种群分布信息以数组的形式存储。然后,采用卷积计算方法,智能决策空穴和单粒穴的补种方案。最后,当钵体盘运送到补种传感器位置时,由伺服电机驱动和组合吸针相结合的补种机构,实现精准、高效、连续的动态补种过程。

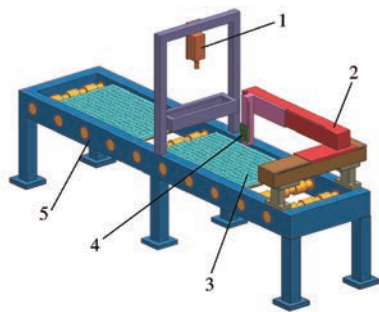


图 1 智能补种系统结构示意图

Fig. 1 Main structure of intelligent precision reseedling mechanism

1. 视觉采集与检测系统 2. 智能补种器 3. 秧盘 4. 组合吸针
5. 机架

1.2 视觉采集与检测系统

输送机构将水稻钵体盘输送到视觉采集传感器的位置时,触发传感器产生高电平信号,启动图像采集系统实时采集图像,CCD 相机通过千兆网(GigE)传入计算机,进行水稻钵体盘中种子穴粒数信息提取。

在图像采集完成后,对图像进行预处理。本视觉检测系统中采用加权平均法进行灰度化处理,将彩色图像转换成有 256 个灰度级的灰度图像,再利用二值化方法即大津法(Otsu 法)得出合适的阈值。最后对图像进行先腐蚀后膨胀的去噪处理,使种子图像的轮廓光滑、毛刺消失;然后采用面积剔除法,去除图像中的细小反光点,最后建立 12×6 个穴位掩膜图像与原图像进行重叠,并进行单个掩膜种子

数量的提取,得到一个包含穴位位置和粒数信息的种群分布数组存入数据库以供调用^[18]。

1.3 伺服补种机构

伺服补种机构(如图2所示)由交流伺服电机驱动的X、Y、Z三轴水平式机械臂和气动系统构成,可以实现机构的吸种、携种、补种连续运动轨迹控制。

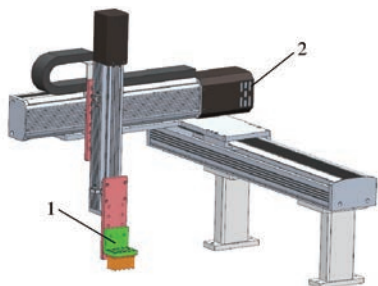


图2 伺服补种机构结构示意图

Fig.2 Servo reseeding mechanism

1. 组合吸针 2. 伺服机构

由于机构要求具有高精度、高速度,需要选用大扭矩、高精度的电动机作为执行元件,3个轴均选用松下MINASA5系列交流伺服电机。

气动系统主要由组合吸针、真空发生器、两位五通电磁阀、气泵、计算机、数据采集卡、电压放大电路等组成,如图3所示。组合吸针吸种是利用上位机使数据采集卡的输出物理通道产生电平信号,再经共射极电压放大电路输出24V电压来驱动二位五通电磁换向阀的先导阀改变位置。即数据采集卡的物理输出通道为低电平时,电磁换向阀处于断电状态,出气口为正压气,此时组合吸针为补种状态;反之当数据采集卡的物理输出通道为高电平时,电磁换向阀处于通电状态,再通过与另一进气口连接的真空发生器形成负压压力,此时组合吸针为吸种状态。

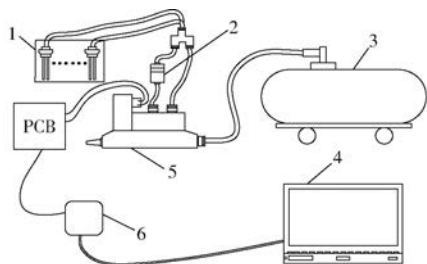


图3 气动系统原理图

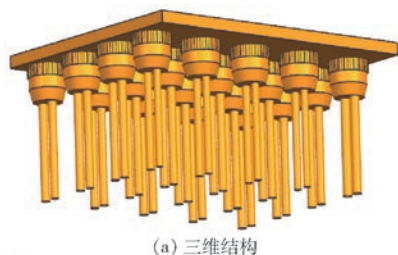
Fig.3 Pneumatic seed suction system

1. 组合吸针 2. 真空发生器 3. 气泵 4. 计算机 5. 电磁阀
6. 数据采集卡

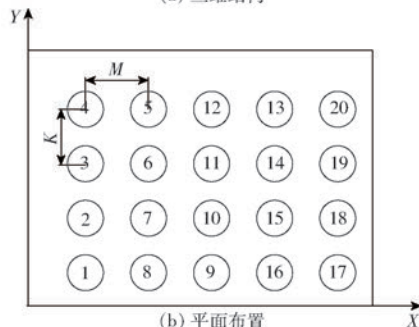
1.4 组合吸针

为了使补种操作更加高效,减少每一次补种的周期时间,本文提出组合吸针的方案,即多个双孔针头按照行、列组合起来(如图4a所示)。将组合吸

针固定在伺服补种机构Z轴上,代替原来单个吸针的位置。



(a) 三维结构



(b) 平面布置

图4 组合吸针

Fig.4 Combined sucker

本研究采用的钵体盘规格为23穴×12穴。经播种工序后,统计空穴率 a 为0~3%;综合考虑智能补种系统补种率和生产率,由智能控制系统决策出真正待补穴位占全部1粒穴比例 b 为0~4%。伺服补种机构需将空穴和部分1粒穴重新补种,建立组合吸针中双孔吸针个数与水稻钵体盘中待补穴位的数学模型为

$$\begin{cases} J = 23 \times 12(a + b) \leq 20 \\ 0 \leq a \leq 3\% \\ 0 \leq b \leq 4\% \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)中 J 可知每水稻钵体盘中的空穴和待补1粒穴个数都在0~20个之间。所以设置组合吸盘中装有20个双孔吸针,以保证每一个待补穴位都有对应的双孔吸针进行补种,满足所有钵体盘的补种需求。

在补种动作开始之前,保证组合吸针中的20个吸针在补种槽同时吸种,组合吸针可以吸取原来单个吸针20倍的种子。按照智能补种决策方案中的就近原则选择下一个补种穴位,并计算出相应吸针到达下一个预测补种位置的动态坐标,该吸针下落至相应穴位吹气补种,如此往复,直至补完最后一个穴位。组合吸针省去了伺服补种系统每一次补种回到补种槽重新吸种和赶往下一个穴位的时间,为总体补种节省了时间,提升了补种效率。组合吸针利用传送钵体盘与钵体盘之间的间隙,恢复到系统原点,等待为下一钵体盘吸种。

1.5 吸种参数设计

为了进行精准补种操作,不伤害种子并保证气

吸的稳定性,对吸针吸取单粒种子时的参数进行设计。组合吸针选用天弘点胶 16G 双孔针头,小直径 1.25 mm,大直径 1.61 mm,可以实现单次吸取 2 ~ 4 粒种子的作用。采用风豹无油空气压缩机作为气泵,额定压力 0.7 MPa,吸针吸种性能与气体负压有关,当种子被吸附后,双孔吸针吸嘴处内外压力差使得种子被牢牢吸附,受力分析如图 5 所示。

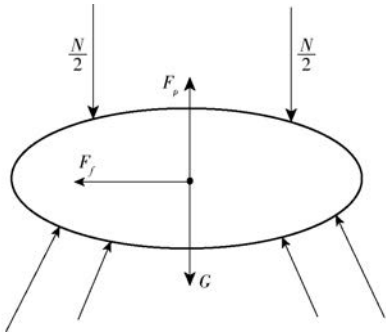


图 5 种子受力分析图

Fig. 5 Analysis of seed stress

芽种千粒质量与种子所受吸力为

$$F_p = bC_d(G + N) \quad (2)$$

其中 $F_p = ma \quad (3)$

$$G = \frac{m_2g}{1000}$$

式中 N ——吸针支反力, N

F_p ——种子所受吸力, N

G ——杂交稻芽种种子重力, N

m_2 ——芽种千粒质量, kg

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

b ——双孔吸针的最大吸种个数, 取 2 ~ 4

C_d ——阻力系数, 考虑吸种过程中的空气摩擦力, 以及种子之间产生碰撞的等阻力, C_d 取 1.8 ~ 2

a ——种子移动加速度, m/s^2

吸种临界负压计算式为

$$p = \frac{F_p}{S} = \frac{4F_p}{\pi d^2} \quad (4)$$

式中 S ——吸针的横截面积, m^2

d ——双孔针头小直径, m

经理论计算后通过试验验证吸种最小负压。选取杂交稻种子泰丰优 208、特优 2068、国稻 1 号作为研究对象, 分别测量干种千粒质量 m_1 , 芽种千粒质量 m_2 [19]。试验时测量双孔吸针的吸嘴到种槽中“沸腾”种子的距离为 1 ~ 3 mm, 每次至少吸 2 颗种子, 记录此时吸种负压。在携种条件下, 当速度为 1 400 mm/s 和加速度为 1 500 mm/s² 时, 对 3 种杂交稻分别重复进行 10 组负压吸种试验, 并取负压最大值, 试验结果见表 1。

表 1 3 种水稻种子吸种负压试验结果

Tab. 1 Pressure test on three rice seeds

| 试验用种 | 干种千粒 | 芽种千粒 | 理论吸种负 | 试验吸种负 |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | 质量 m_1/g | 质量 m_2/g | 压 p_1/kPa | 压 p_2/kPa |
| 泰丰优 208 | 22.5 | 28.1 | 2.7 | 2.9 |
| 特优 2068 | 25.7 | 32.1 | 3.1 | 3.3 |
| 国稻 1 号 | 27.5 | 34.4 | 3.3 | 3.5 |

注: 水稻芽种含水率约为 20%, 便于机器播种。

由表 1 可知, 杂交稻芽种的质量越大, 所需的吸种负压越大。由于理论计算中未考虑补种系统的振动和组合吸针中各吸针气体相互交换造成的干扰影响, 导致试验数据要比理论计算值大。为保证双孔吸针的吸种性能, 设置负压为 3.5 kPa, 且种子可以随伺服补种机构以最大速度和最大加速度运动, 一直被吸附不掉落。

为防止种子中的细小杂质堵塞吸孔, 从而影响播种的性能, 在普通的双孔吸针中加入通针和十字挡片 (如图 6 所示)。在正负压气体的作用下, 可以推动通针往复运动, 对双孔吸针进行清孔, 吸入的杂质以及灰尘可以在负压作用下经气管排出, 十字挡片限定通针行程, 从而解决了双孔吸针易堵塞和清理问题。

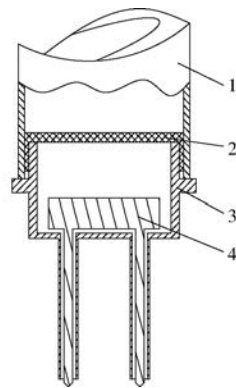


图 6 双孔吸针结构示意图

Fig. 6 Schematic of double hole suction needle structure

1. 吸管 2. 十字挡片 3. 双孔吸针 4. 通针

1.6 运动控制系统

伺服驱动补种控制系统采用 LabVIEW 与 C++ 联合编写。由计算机发出执行信号, 通过运动控制卡、端子板向伺服电机驱动器输出脉冲, 控制伺服电机的旋转方向与转速, 进而控制伺服补种机构的移动。

运动控制卡 GTS-400-PG-PCI 是固高科技的一款运动控制卡, 端子板 GT2-400-ACC2-V2.2-G 是连接运动控制卡和驱动器的中间设备, 并控制 3 个电机的运行, 控制电机有 2 个脉冲接线和 2 个方向接线。而且运动控制卡和端子板靠专用中继电缆 CN-17 来连接, 并给端子板提供

24 V 的直流电源。伺服电机驱动器采用单相供电,交流 220 V,驱动器型号 MADKT1505E,工作在位置控制模式下,U、V、W 及地线和伺服电机相连,X6 位置是与伺服电机编码器相连的带屏蔽线的四芯电缆线,因为电机工作在低频脉冲下,X4 位置需要引出 2 个脉冲和 2 个方向线,供给其 24 V 直流稳压电,最后引至伺服信号使能端。

2 定位算法

2.1 补种规划

伺服补种系统默认脉冲坐标是相对坐标,在补种之前需要改变每一个吸针的脉冲坐标位置。组合吸针共有 20 个双孔吸针,智能决策补种系统标定水稻钵体盘的第 1 个吸针中心位置为系统原点。为减少组合吸针的补种移动距离,补种吸针按“S”形顺序依次补种,如图 4b 所示。视觉采集和图像处理系统识别出水稻钵体盘中需要补种的第 1 个穴位用第 1 个吸针补种。再补下一个待补穴位时,需要改用下一个吸针补种,实现对应的穴位用对应的吸针进行补种,并由智能控制系统计算出动态待补种穴位坐标再加上组合吸针的各双孔吸针的相对变换坐标,得到最终的待补种穴位脉冲输出坐标。

2.2 补种决策

为保证水稻育秧播种的质量,提高补种器的补种效率,避免盲目补种,智能决策补种系统需要达到消除空穴、减少 1 粒/穴的效果,决策出真正需要补种的 1 粒/穴并保证以 1 粒/穴周边穴位种子数,使秧苗具有更高的播种合格率。根据视觉检测系统检测出水稻钵体盘图像的种群分布数据库的穴位数据信息,辨识补种穴位的决策过程如下:

(1) 首先检索出数据库中必补的 0 粒穴的位置信息,将其穴位直接存入待补穴位数组中。由于双孔针头至少能吸取 2 粒种子进行补种,所以为方便决策出需要补种的 1 粒穴位,假设已检测出来的 0 粒穴位用 2 粒补齐。

(2) 将视觉检测系统采集到的水稻钵体盘中种子信息结合卷积计算的思想^[20-21]进一步决策出待补种 1 粒穴。卷积是对两个实变函数的一种数学运算。

设立 1×3 卷积核,卷积核中每一个权重都设为 1,步长为 1,再与存有种子个数信息数组中每一个元素相乘线性加权,并将计算数值存入输出结果,输出数值小于 6 则补 1 粒穴位置,大于或等于 6 则进入下一循环的检测,决策此穴位是否补种。其中需要补种穴位的情况有 4 种,如表 2 所示。

(3) 检测核心 1 粒穴 ($1 \leq x < 11, 1 \leq y < 22$) 周边 8 个穴中所含 1 粒种子的数量。同样采用卷积计

表 2 待补 1 粒穴决策方案

| 3 穴种子总数 | 每穴种子数量 | | | 补种 1 粒穴策略 |
|---------|--------|---|---|-------------|
| 3 | 1 | 1 | 1 | 补第 1 和第 2 穴 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 补第 2 穴 |
| 5 | 2 | 2 | 1 | 补第 3 穴 |
| 5 | 1 | 1 | 3 | 补第 1 穴 |

算的方法,设立 3×3 卷积核,卷积核中每一个权重都设为 1,步长为 1,输出卷积计算结果。如果周边 1 粒穴数量超过 3 个,卷积计算输出结果小于等于 14,则无法保证钵体盘在此处的成毯性,需要补种核心 1 粒穴,将此位置 1 粒穴存入待补种数组。

(4) 补种路径规划由智能决策补种系统计算所有待补穴位(所有空穴和前期决策出的 1 粒穴)到组合吸针原点位置(x_0, y_0)最近的待补穴位(x_1, y_1)距离 l ,该穴位则是第 1 个待补种穴位。如果出现 2 个穴位距离相同,则先补同行或行数接近的穴位。

之后确定下一个最近的待补穴位,直至完成整盘最后一行的待补穴位的路径规划。

通过智能决策补种方案,为尽可能地降低待补种穴位的个数,同时保证水稻播种钵体盘的成秧率和成毯性,优化空穴和 1 粒穴的补种方案,使智能决策补种系统可以达到较高的生产率。

2.3 钵体盘穴位动态坐标定位

由 LabVIEW 控制系统通过数据分析出待补种的所有穴位后,对信息进行处理,并加上组合吸针原点位置的相对变换,计算出动态脉冲坐标,最终由伺服电机驱动和组合吸针相结合的方式进行补种。

假设钵体盘(0,0)穴位坐标为(x_0, y_0),则任意已完成穴位坐标为(x_1, y_1),当下一待补穴位坐标为(x_2, y_2),则它的动态待补穴位坐标为(x_3, y_3)。 n 为组合吸针中每一个吸针的编号,补种穴位数对应相同编号的双孔吸针。 K 为 Y 轴方向上相邻双孔吸针的间距, M 为 X 轴方向上相邻双孔吸针的间距。 (x_4, y_4) 表示将组合吸针原点吸针位置变换之后的动态待补穴位坐标。 X 、 Y 轴滑块最大速度 v_{\max} , X 、 Y 轴滑块最大加速度为 a_{\max} ,输送机构输送钵体盘的速度为 v_0 ;取种与补种时间均为 T_0 ,延迟时间为 T_y (初值为 0),补种穴位(x_2, y_2)之前所用的累计时间为 T_n ,则完成单次补种总时间 T 。计算公式如下:

(1) 伺服补种机构待补种第 1 个穴位时,组合吸针需要先到达($0, y_1$)进行吸种,并携种到达待补种的第 1 个动态穴位坐标进行补种。设组合吸针从脉冲原点到补完第 1 个待补种穴的时间为 t_1 ,则有

$$t_1 = 2T_0 + \sqrt{\frac{2|x_1 - 1000Tnv| + 4y_1}{1000a_{\max}}} \quad (5)$$

(2) 如果待补种穴位的动态坐标 $x_1 < 0$, 设由当前穴位到达下一穴位的时间为 t_2 , 则当 $|x_2 - x_1| \geq |y_2 - y_1|$ 时, 在 $|x_2 - x_1| > \frac{1\ 000v^2}{a_{\max}}$ 的条件下, 滑块运动属于匀加速、匀速、匀减速的过程, 有

$$t_2 = \frac{a_{\max}|x_2 - x_1| + 1\ 000v^2}{1\ 000a_{\max}v} \quad (6)$$

在 $|x_2 - x_1| \leq \frac{1\ 000v^2}{a_{\max}}$ 的条件下, 滑块运动属于匀加速、匀减速的过程, 有

$$t_2 = 2\sqrt{\frac{|x_2 - x_1|}{1\ 000a_{\max}}} \quad (7)$$

当 $|x_2 - x_1| < |y_2 - y_1|$ 时, 在 $|y_2 - y_1| > \frac{1\ 000v^2}{a_{\max}}$ 的条件下, 滑块运动属于匀加速、匀速、匀减速的过程, 则有

$$t_2 = \frac{a_{\max}|y_2 - y_1| + 1\ 000v^2}{500a_{\max}v} \quad (8)$$

在 $|y_2 - y_1| \leq \frac{1\ 000v^2}{a_{\max}}$ 的条件下, 滑块运动属于匀加速、匀减速的过程, 则有

$$t_2 = 2\sqrt{\frac{|y_2 - y_1|}{500a_{\max}}} \quad (9)$$

当伺服补种机构补完下一待补种穴位时, 钵体盘经过输送机构以由原来静态穴位坐标 x_2 变成新的动态穴位坐标

$$\begin{cases} x_3 = x_2 - 1\ 000v(Tn + t_1 + t_2 + 2T_0) \\ y_3 = y_2 \end{cases} \quad (10)$$

(3) 如果待补种穴位的动态坐标 $x_1 \geq 0$, 伺服补种机构无法立刻补种, 待补穴位未到达伺服补种机构合理补种范围内, 需要加上延时时间, 设延时时间为 t_3 , 则有

$$t_3 = \left\lfloor \frac{x_1}{1\ 000v} \right\rfloor + t_1 + Tn + 2T_0 \quad (11)$$

则此时动态待补种穴位位置为

$$\begin{cases} x_3 = x_2 - 1\ 000v(Tn + t_1 + t_2 + t_3 + 2T_0) \\ y_3 = y_2 \end{cases} \quad (12)$$

(4) 将组合吸针原点吸针位置变换与动态补种穴位位置整合之后, 得到最终每个补种穴位所对应的原点双孔吸针运动的动态补种穴位坐标

$$\begin{cases} x_4 = \begin{cases} x_3 - M & (n = 5 + 4f) \\ x_3 & (n \neq 5 + 4f) \end{cases} \\ y_4 = \begin{cases} y_3 & (n = 1 + 4f) \\ y_3 - K & (1 + 8f < n \leq 4 + 8f) \\ y_3 + K & (5 + 8f < n \leq 8 + 8f) \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中 f ——组合吸针已补种列数

3 试验

3.1 试验材料与设备

试验使用钵体盘穴位规格为 23 穴 \times 12 穴 (297 mm \times 583 mm), 钵体育秧土壤选择过筛育秧土, 使用杂交水稻种子国稻 1 号作为试验用种。试验使用 2SJB-500 型水稻育秧盘育秧精密播种流水线输送预先完成播种的钵体盘, 松下 A5 系列伺服电机的伺服运动机构实现补种动作, 安装有 LabVIEW 的计算机作为上位机, 选用容积流量 135 L/min 的无油气泵和德国 AVT Manta G-201B/C 型重工业相机, 整体试验系统如图 7 所示。

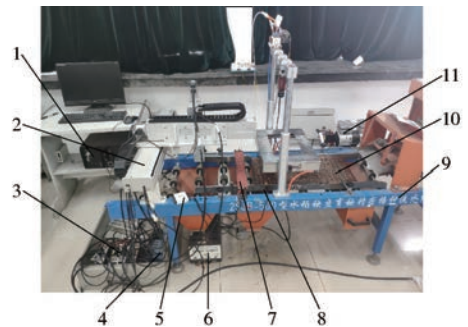


图 7 智能补种器整体试验系统

Fig. 7 Test device for intelligent reseeding

1. 计算机
2. 三轴伺服补种系统
3. 驱动器
4. 端子板
5. 数据采集卡
6. 电源
7. 补种槽
8. 光电传感器
9. 试验平台
10. 育秧盘
11. 气泵

3.2 试验内容与与方法

为了实现智能补种系统自动实时检测播种质量, 并对所需补种穴位进行自动补种操作, 验证智能补种系统对待补穴位的补种精准性和高效性, 对水稻钵体盘智能补种系统进行试验调试。将水稻钵体盘补种系统安放在 2SJB-500 型水稻钵体盘育秧精密播种机播种流水线的播种工序与覆土工序之间, 进行补种操作, 可以有效弥补水稻钵体盘中存在 0 粒穴和 1 粒穴过多的问题, 提高播种质量和效率。

试验 2 中每个水稻钵体盘的待补种率 (水稻钵体盘中所有 0 粒穴数和决策出待补 1 粒穴数之和) 不同, 选取补种率为 1%、2%、4%、7% 的水稻钵体盘进行试验。并分别重复 10 组试验取平均值, 并在补种后观察并统计平均每盘补种时间、每盘补种时间相对误差最大值、生产率, 试验结果见表 3。

试验 3 目的是证明使用伺服电机和组合吸针的智能补种系统比采用步进电机和活塞杆气缸的补种效率高。步进电机使用日本信浓 SST58D4830 型两相混合步进电机, 气缸采用日本 SMC 公司的 13-MXQ8-75A 型双活塞杆气缸, 试验中选取补种率为 1%、2%、4%、7% 的水稻钵体盘分别进行试验, 并记

录步进电机和伺服电机完成整盘补种的时间,试验结果见图8。

表3 试验结果统计

Tab.3 Statistics of test result

| 试验编号 | 补种率/% | 补种穴数/个 | 平均每盘补种时间/s | 补种相对误差最大值/% | 平均每穴补种时间/s | 生产率/(盘·h ⁻¹) |
|------|-------|--------|------------|-------------|------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 3 | 4.78 | 19.07 | 1.59 | 622 |
| 2 | 2 | 5 | 7.56 | 12.55 | 1.51 | 420 |
| 3 | 4 | 11 | 16.04 | 23.28 | 1.46 | 211 |
| 4 | 7 | 20 | 28.74 | 31.62 | 1.44 | 121 |

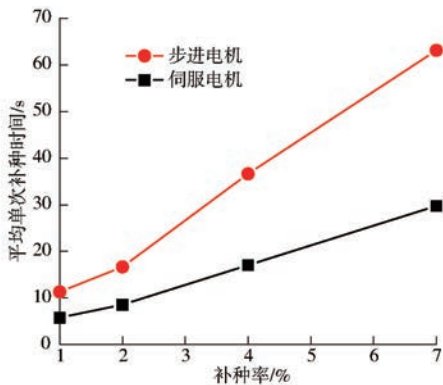


图8 伺服电机与步进电机平均单次补种时间的变化曲线

Fig.8 Average single reseeding time of servo motor and stepping motor

3.3 试验结果与分析

表3为不同补种率水稻钵体盘的单盘平均补种统计,由表3可知,当每个钵体盘的补种率为2%时,智能补种系统生产率可以达到420盘/h,平均每盘补种时间7.56s,平均每穴补种时间可达到1.51s。平均每穴补种时间随补种率的上升而下降。当补种率为7%时,每个水稻钵体盘中所需待补种穴数为20个,达到组合吸针补种数的上限,平均每穴补种时间达到1.44s,达到最小每穴补种时间。补种效果又称补种率,受平均每穴补种时间的限制,补种率与生产率有关,即生产率越高,补种率越小,补种效果下降。

同一补种率的水稻钵体盘中待补种穴位位置随机分布,且有很大的差距,智能补种系统的补种行程

不尽相同,造成每个水稻钵体盘的补种时间也不相同。补种率为7%,相对补种率1%的补种个数增加,各待补穴位之间距离小,平均每穴的补种时间较少。各待补种穴位的相对位置距离越大,每盘补种时间相对误差最大值越大。

试验3在补种率为1%、2%、4%、7%的4种情况下分别进行试验,由图8可知,使用伺服电机和组合吸针组成的智能补种系统比由步进电机和活塞杆气缸组成的补种系统在整盘补种时间上至少缩短了53.48%。装有步进电机的补种机构,气缸动作时间所占单次补种时间比例过大,导致高于伺服电机单次补种时间。

组合吸针的20个双孔吸针同时吸种,相较于单个吸针补种,节省了每次补种完成后需回到补种槽补种和前往下一待补穴位的时间,可以将整盘补种的时间大大缩减,提高了智能补种系统的工作效率。

4 结论

(1)以2SJB-500型水稻育秧盘育秧精密播种流水线为试验平台,设计了智能补种决策系统,该系统能够满足从实时检测播种质量到自动补种一体化的要求。当水稻钵体盘触发视觉采集传感器时,进行图像采集,并对钵体盘播种质量进行实时检测,并记录种群分布信息。基于卷积计算和路径规划设计了LabVIEW决策补种检测系统,得到空穴和真正待补种1粒穴位,计算出组合吸针原点相对变化的动态脉冲位置,最终由伺服补种机构对待补穴位进行补种。

(2)设计了组合吸针机构,大大缩短了补种时间。对吸种设计参数进行理论计算和试验,证明吸种负压至少为3.5kPa才能保证吸种性能。在双孔吸针中加入十字挡片和通针结构,解决了吸针易堵和难清理的问题。

(3)当补种率为2%时,平均每盘补种时间7.56s,平均每穴补种时间可达到1.51s,智能补种系统生产率可以达到420盘/h。该智能补种机构满足对空穴和1粒穴进行补种、最终达到2~3粒/穴的农艺要求,提高了补种合格率,保证了水稻钵体盘中秧苗的成毯性和成秧率。

参考文献

- [1] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 1-20. LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180501&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001. (in Chinese)
- [2] NY/T 1534—2019 水稻工厂化育秧技术规程[S]. 2019.
- [3] GB 4404.1—2008 粮食作物种子 第1部分:禾谷类[S]. 2008.
- [4] 商庆银, 杨秀霞, 吕伟生, 等. 不同播种量对机插晚稻生长发育和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 63-65.

- [5] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140808&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [6] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170901&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [7] ANIL C, HABIB K, BILAL K, et al. Development of an opto-electronic measurement system for planter laboratory tests[J]. Measurement, 2017, 102: 90-95.
- [8] XAVIER B, ANGELA R, MARIA G, et al. Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 337-346.
- [9] AHMAD A A, KATAOKA T. Monitoring the flow of seeds in grain drill using fiber sensor[J]. IFAC, 2013, 46(18): 311-314.
- [10] ZAHRA A, SAMAN A M. Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 187-198.
- [11] 周海波, 马旭, 玉大略, 等. 2CYL-450型水稻秧盘育秧播种流水线的研制[J]. 农机化研究, 2008, 30(11): 95-97.
ZHOU Haibo, MA Xu, YU Dalue, et al. Rice seeding for nursing seedlings pipeline of 2CYL-450 type design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(11): 95-97. (in Chinese)
- [12] 周海波, 马旭, 刘明亮. 精准插秧机秧盘连续输送与穴孔同步对中系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(5): 1212-1217.
ZHOU Haibo, MA Xu, LIU Mingliang. Seedling tray continuous feed and synchronous cave-hole alignment device for precision paddy seedling transplanter[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1212-1217. (in Chinese)
- [13] 齐龙, 马旭, 周海波. 基于机器视觉的超级稻秧盘育秧播种空穴检测技术[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 121-125.
QI Long, MA Xu, ZHOU Haibo. Seeding cavity detection in tray nursing seedlings of super rice based on computer vision technology [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 121-125. (in Chinese)
- [14] 邱兆美, 张巍朋, 赵博, 等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 77-83.
QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 77-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190409&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.009. (in Chinese)
- [15] TAN Suiyan, MA Xu, MAI Zhijie, et al. Segmentation and counting algorithm for touching hybrid rice grains [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 493-504.
- [16] TAN Suiyan, MA Xu, QI Long, et al. Fast and robust image sequence mosaicking of nursery plug tray images [J]. International Journal of Agricultural & Biological, 2018, 11(3): 197-204.
- [17] DONG Wenhao, MA Xu, LI Hongwei, et al. Detection of performance of hybrid rice pot-tray sowing utilizing machine vision and machine learning approach[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(23): 5332-5347.
- [18] 王安, 丁晓迪, 马旭, 等. 基于改进形状因子的钵体秧盘播种质量检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 29-35, 8.
WANG An, DING Xiaodi, MA Xu, et al. Research on the method of seeding quantity detection in potted seedling tray of super rice based on improved shape factor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 29-35, 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151105&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.005. (in Chinese)
- [19] 陈林涛, 马旭, 曹秀龙, 等. 基于主成分分析的杂交稻芽种物理特性评价研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 334-342.
CHEN Lintao, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Evaluation research of physical characteristics of hybrid rice buds based on principal component analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 334-342. (in Chinese)
- [20] 周飞燕, 金林鹏, 董军. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报, 2017, 40(6): 1229-1251.
ZHOU Feiyan, JIN Linpeng, DONG Jun. Review of convolution neural networks [J]. Journal of Computers, 2017, 40(6): 1229-1251. (in Chinese)
- [21] 薛金林, 闫嘉, 范博文. 多类农田障碍物卷积神经网络分类识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 35-41.
XUE Jinlin, YAN Jia, FAN Bowen. Classification and identification method of multiple kinds of farm obstacles based on convolutional neural network [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 35-41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s006&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.006. (in Chinese)