

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.014

基于时空耦合的玉米播种位置预测系统设计与试验

贾麟^{1,2} 马飞扬^{1,3} 徐征鑫^{1,2} 张馨悦^{1,2} 徐子杨¹ 王超^{1,2}
王庆杰^{1,2} 李洪文^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对玉米播种环节设计了一种基于时空耦合的玉米播种位置预测系统。该系统集成对射式红外光电传感器、GNSS-RTK高精度定位模块及数据传输单元,通过实时监测种子下落信号,结合播种机航向、速度与时空滞后补偿模型,预测种子落地空间位置,最终将数据上传云端。系统采用STM32F103单片机作为中枢控制器,构建分段式空间位置换算模型解决播种机主天线与红外传感器间的偏移问题;引入时空滞后补偿模型,测量得种子下落延时、定位信息传输延时及程序执行延时分别为107.7、50、39.5 ms,最终修正播种机前进方向位移偏差;通过制定不同区间对经纬度偏差正负值的方向响应规则,明确耦合预测模型最终形态。田间试验结果表明,系统预测种子落地位置与实际位置平均偏差为36.86 mm,标准差为3.57 mm,变异系数为9.69%,验证了模型有效性。该系统能够实现播种位置数据实时记录与云端存储,为后续中耕、施肥等环节的精准协同管理提供参考。

关键词: 玉米播种; 空间位置; RTK定位; 时空耦合; 预测模型

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0146-09

OSID:



Design and Test of Maize Sowing Position Prediction System Based on Spatial – Temporal Coupling

JIA Lin^{1,2} MA Feiyang^{1,3} XU Zhengxin^{1,2} ZHANG Xinyue^{1,2} XU Ziyang¹
WANG Chao^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} LI Hongwen^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A maize sowing position prediction system based on spatial temporal coupling was designed for maize sowing process. The system integrated an opposed infrared photoelectric sensor, a GNSS – RTK high-precision positioning module and a data transmission unit to predict the spatial position of seed landing by real-time monitoring of seed falling signals and combining the sowing machine heading, speed and spatial – temporal lag compensation model, and data would eventually be uploaded to the cloud. The system adopted STM32F103 microcontroller as the central controller, and a segmented spatial position conversion model was constructed to solve the offset problem between the main antenna of the planter and the infrared sensors; the spatial temporal hysteresis compensation model was introduced, and the seed falling delay, the localization information transmission delay, and the program execution delay were measured to be 107.7 ms, 50 ms, and 39.5 ms, respectively, and finally the position deviation of the planter's forward direction was corrected. The final shape of the coupled prediction model was clarified by formulating the directional response rules for the positive and negative values of latitude and longitude deviations in different intervals. The results of the field test showed that the average deviation of the seed landing position predicted by the system from the actual position was 36.86 mm, with a standard deviation of 3.57 mm and a coefficient of variation of 9.69%, which verified the effectiveness of the

收稿日期: 2025-05-01 修回日期: 2025-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1500405)

作者简介: 贾麟(2002—),男,硕士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: jialin0617@163.com

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

model. The system was capable of real-time recording and cloud storage of seeding position data, providing a reference for the subsequent precise and collaborative management of mid-tillage and fertilization.

Key words: maize sowing; spatial location; RTK positioning; spatial - temporal coupling; prediction models

0 引言

随着智慧农业向全流程数字化方向发展,作物种植空间位置成为贯通全农事环节的逻辑纽带。在玉米种植生产体系中,这种空间基准的建立尤为关键^[1-2]。从农田电子地图构建到精准除草、追肥,全周期农事管理的科学决策高度依赖播种阶段玉米植株地理坐标体系,而传统的作业模式导致“种管收”的数据链断裂,制约了农业生产全局配置优化^[3-4]。因此,在玉米播种阶段,如何实现种子空间位置高精度记录,已成为现代农业装备智能化升级面临的重大挑战。

确定播种阶段种子空间位置包括落种检测与定位技术两方面。光电检测法是常见的检测方法之一,多采用光电传感器发射端和接收端对射布置,通过判断有无物体遮挡时的不同电压状态明确是否有种子下落^[5-9]。GARCIA 等^[8]基于红外光电传感器完成了播种检测系统的研制;纪超等^[10]开发了基于反射式光电传感器的播种机排种监测系统,通过设计清洁装置和不同探头安装方式,提高了播种检测合格率;为进一步提高检测性能,文献^[10-14]对高精度和强鲁棒性的双层对射式激光传感与平面镜反射光栅进行了研究。随着导航定位技术发展,高精度的 GNSS 定位服务逐渐应用于农业领域,提高了作业精度^[15-16]。基于 GNSS - RTK 取速的电驱播种控制系统通过准确获取作业速度并调控电机转速,实现了精准播种^[17-22];张闻宇^[23]提出一种基于北斗定位系统的油菜直播机组作业导航技术,提高了直播机导航精度、直线行走和其他复杂操作的稳定性;播量与株距均匀性是评价作物播种质量的关键^[24-25],SUN 等^[26]利用 GNSS 接收器获取播种机实时位置与姿态信息设计了定位与补偿模型,提高了播种合格率。目前,落种检测与定位技术已经能够实现对于播种机作业过程播种质量监控与位置记录,但未见对于种子下播空间位置确定与记录研究,播种作业数字化档案难以构建,制约了中耕、除草和施肥等环节的精准调控与协调管理。

针对上述问题,本文提出一种基于时空耦合的玉米播种位置预测系统,通过集成落种检测、地理位置确定、速度测量、数据传输和云存储等功能,建立

多源数据耦合模型预测播种位置,以实现数据再现,以期对播种质量评估提供新技术手段。

1 系统总体架构与工作原理

玉米播种位置预测系统选用单片机作为中枢控制器,系统主要由集成对射红外光电传感器式导种管、GNSS 接收模块、北斗天线、数据传输单元(Data transfer unit, DTU) 等部件组成,如图 1 所示。红外光电传感器用于监测种子通过情况;GNSS 接收模块与北斗天线负责获取经纬度、航向和速度等信息;其中数据传输单元 1 用于实现网络 RTK 定位,数据传输单元 2 负责将定位信息上传至云端。

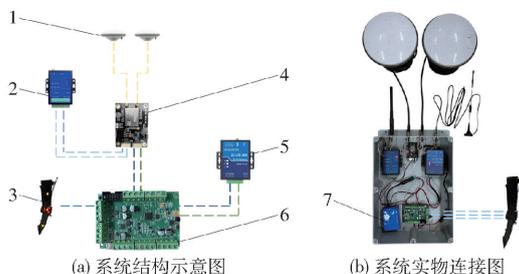


图 1 玉米播种位置预测系统结构图

Fig. 1 Structure diagrams of maize sowing position prediction system

1. 北斗天线 2. 数据传输单元 1 3. 集成对射红外光电传感器式导种管 4. GNSS 接收模块 5. 数据传输单元 2 6. 单片机
7. 电源

系统工作时,玉米种子经排种器投出,经过导种管时,红外光电传感器检测种子流状态;单片机在识别到传感器传播电平下降沿信号后,获取当前经纬度、航向和综合速度等信息,运用耦合位置预测模型测算出种子落地空间位置,并将该位置信息传输至数据传输单元,最终通过数据传输单元将数据上传至云服务器进行存储,并在监测平台实现 JSON 数据流展示,实现作业过程实时记录和数据监控,工作原理如图 2 所示。

2 播种位置预测系统设计

2.1 中枢控制器

系统中枢控制器采用意法半导体公司生产的 STM32F103 单片机,基于 ARM Cortex - M3 内核,具备多个定时器、USART、ADC 接口,能够在 Keil5 环

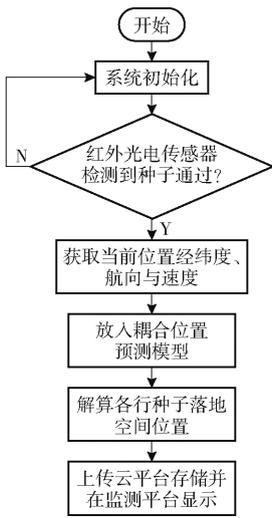


图2 玉米播种位置预测系统工作原理

Fig.2 Working principle of maize sowing position prediction system

境下进行基于 C 语言的程序开发。该单片机能够满足种子下落检测、地理位置信息获取、作业速度反馈及数据计算与传输等功能需求,确保系统能够高效运行并实现实时数据处理。

2.2 落种信息获取子系统

落种信息获取包括种子下落检测与地理位置信息获取两部分。

种子下落检测模块通过集成导种管与对射式红外光电传感器,对投种过程中的种子流进行实时监测。红外光电传感器由 IO 口与中枢控制器相连,当种子流状态从无种转变为有种时,接口电平由高电平降低至低电平,因此,该下降沿信号可作为后续获取地理位置信息的指令依据。

地理位置信息获取选用 UM982 GNSS 接收模块搭配北天通讯 BT-800D 天线。该 GNSS 接收模块通过 MMCX 接口与天线连接,支持北斗等多卫星系统,基于 WGS84 坐标系输出定位数据。系统通过集成 DTU 接入千寻位置 FindCM 服务,利用网络 RTK (Real-time kinematic) 差分技术将粗略 GNSS 数据变成厘米级定位精度的数据(图 3)。UM982 由 TTL 串口向外输出 NMEA-0183 协议报文,中枢控制器通过解析 GPRMC 与 HEADINGA 信息帧获得经纬度和与作业航向信息,为种子落地位置定位提供数据基础。UM982 GNSS 接收模块的报文输出中包含作业速度信息,通过串口解析处理可获取。

2.3 数据记录子系统

在完成种子下落检测、速度感知和位置预测后,系统还需具备远程无线传输、数据存储和显示功能。STM32F103 芯片梳理种子数量并进行编号,将与之对应的预测位置信息通过 RS485 和 Modbus-RTU 协议与 DTU 通讯,DTU 利用 4G 网络和 MQTT 协议

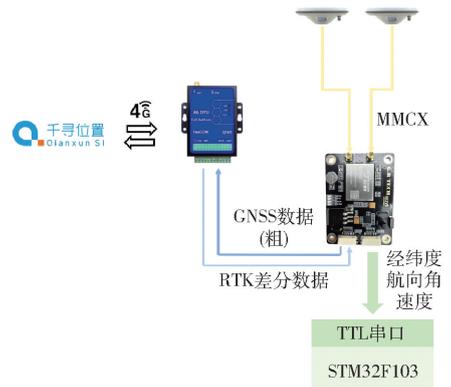


图3 厘米级地理位置信息获取原理

Fig.3 Principle of centimeter-level geographic location information acquisition

将数据远程上传至阿里云服务器,并存储于 MySQL 数据库中;数据流显示基于 Node-Red 搭建的播种机作业智能监测平台完成,用户可通过 PC 端输入监测平台网址访问数据。数据记录子系统信息传输如图 4 所示。



图4 数据记录子系统信息传输示意图

Fig.4 Schematic of information transfer in data logging subsystem

3 时空耦合模型构建

3.1 分段式空间位置换算模型

主天线固定于播种机特定位置,与红外光电传感器存在三维空间偏移。为实现播种位置精准定位,需要换算二者中心空间位置。最终通过二维数据点记录,即经度和纬度,故不考虑天线与传感器竖向偏差。HEADINGA 语句获取的航向角为 $0^\circ \sim 360^\circ$,通过水平面投影,将播种机作业前进航向角划分为 4 个区间,包括区间 I ($0^\circ \sim 90^\circ$)、区间 II ($90^\circ \sim 180^\circ$)、区间 III ($180^\circ \sim 270^\circ$) 和区间 IV ($270^\circ \sim 360^\circ$),进而构建分段式空间位置换算模型。

水平投影后播种机在 4 个区间内作业示意图如图 5 所示,各播种行红外光电传感器检测中心与主天线位置中心换算公式为

$$\begin{cases} \Delta x_i = (L_1 + L_2) \cos \alpha \pm \frac{Rm}{n-1} \sin \alpha \\ \Delta y_i = (L_1 + L_2) \cos \alpha \mp \frac{Rm}{n-1} \sin \alpha \end{cases} \quad (\text{区间 I}) \quad (1)$$

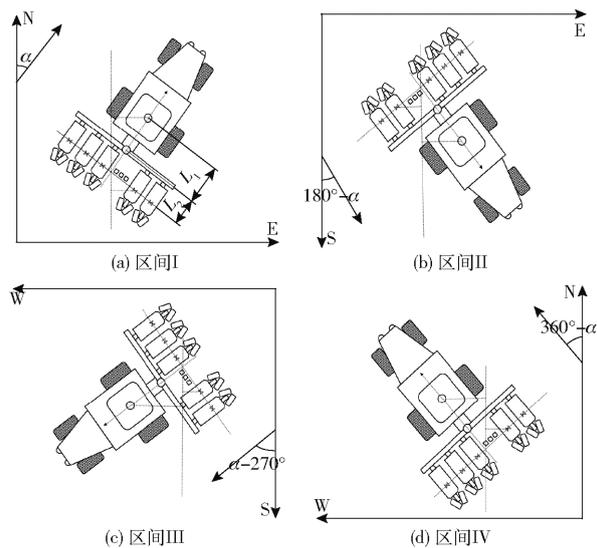


图5 播种机区间作业示意图

Fig. 5 Schematics of planter zone operation

$$\begin{cases} \Delta x_i = (L_1 + L_2) \cos(180^\circ - \alpha) \mp \frac{Rm}{n-1} \sin(180^\circ - \alpha) \\ \Delta y_i = (L_1 + L_2) \sin(180^\circ - \alpha) \pm \frac{Rm}{n-1} \cos(180^\circ - \alpha) \end{cases} \quad (\text{区间 II}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta x_i = (L_1 + L_2) \cos(\alpha - 270^\circ) \pm \frac{Rm}{n-1} \sin(\alpha - 270^\circ) \\ \Delta y_i = (L_1 + L_2) \sin(\alpha - 270^\circ) \mp \frac{Rm}{n-1} \cos(\alpha - 270^\circ) \end{cases} \quad (\text{区间 III}) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta x_i = (L_1 + L_2) \cos(360^\circ - \alpha) \mp \frac{Rm}{n-1} \sin(360^\circ - \alpha) \\ \Delta y_i = (L_1 + L_2) \sin(360^\circ - \alpha) \pm \frac{Rm}{n-1} \cos(360^\circ - \alpha) \end{cases} \quad (\text{区间 IV}) \quad (4)$$

其中
$$m = \begin{cases} (2i - 1)/2 & (n \text{ 为偶数}) \\ i - 1 & (n \text{ 为奇数}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δx_i ——沿经线方向的距离偏差, mm
 Δy_i ——沿纬线方向的距离偏差, mm
 L_1 ——主天线到播种机横梁中线距离, mm
 L_2 ——播种机横梁中线到红外光电传感器距离, mm

α ——航向角, ($^\circ$)

R ——播种机作业幅宽, mm

m ——行系数, 与播种机作业行数 n 有关

i ——第 i 行播种单体, 从播种机中线向左右两侧计数

3.2 时空滞后补偿模型

系统具有时间和空间滞后性。时间滞后性体现在红外光电传感器检测到种子至种子落地延时 t_1 、北斗系统定位信息发送频率产生的延时 t_2 和中枢控制器程序执行延时 t_3 ; 空间滞后性与时间滞后相关。播种机作业时, 各播种单体以相同速度前进, 滞后性会导致坐标转换得到的各单体落种位置坐标与实际坐标存在偏差, 对落种空间定位精度影响很大, 因此需要建立时空滞后补偿模型。

采用电驱式玉米气吸播种试验台, 导种管自身集成 1 个红外光电传感器, 在靠近种沟处再布置 1 个红外光电传感器, 如图 6 所示, 利用 Keil 向单片机写入程序脚本进行时间测量。当种子下落通过第 1 个传感器时开始计时, 通过第 2 个时停止, 2 个传感器记录的时间差即为 t_1 。使用手持终端设置播种株距为 20 cm, 设置模拟作业速度为 4 ~ 12 km/h, 作业速度间隔为 1 km/h, 每个速度下排出 100 粒玉米种子, 取下落时间差平均值作为 t_1 , 结果如表 1 所示。



图6 时间差 t_1 测量试验台

Fig. 6 Time difference t_1 measurement test bench

1. 手持终端 2. 电驱播种控制盒 3. 导种管自身集成红外光电传感器 4. 种沟处红外光电传感器

表1 不同作业速度下时间差 t_1

Tab. 1 Time difference t_1 at different operating speeds

作业速度 $v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	4	5	6	7	8	9	10	11	12
时间差 t_1 / ms	114.2	111.6	109.3	108.2	106.3	105.9	105.3	104.8	104.1

由表 1 可得, 随着速度增大, 玉米种子下落时间差 t_1 变化幅度较小, 因此取 9 种速度下对应的下落时间差平均值作为 t_1 , 即为 107.7 ms。

UM982 GNSS 接收模块的定位信息输出频率为 f , 其定位周期 $T = 1/f$ 。如图 7 所示, 落种检测时刻,

即电平产生下降沿可能分布于两次信息传输中的任意时刻, 滞后时间 t_2 被限定为 $0 \sim T$, 且服从均匀分布, 其概率密度函数 $g(t_2)$ 可表示为

$$g(t_2) = \frac{1}{T} \quad (6)$$

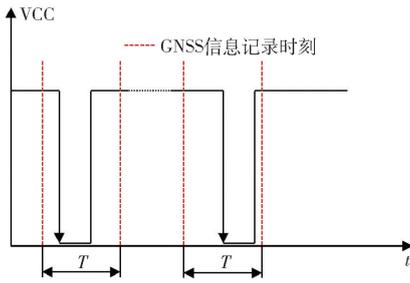


图7 落种时刻与GNSS信息传输时间

Fig. 7 Falling seed moment and GNSS information transmission time

根据均匀分布性质,滞后时间数学期望 $E(t_2)$ 可通过积分运算求得,即

$$E(t_2) = \int_0^T t_2 g(t_2) d(t_2) = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} \quad (7)$$

式(7)表明平均滞后时间为定位周期的1/2,即 t_2 取 $T/2$ 。设定系统输出频率为10 Hz,故 t_2 取50 ms。

中枢控制程序执行延时 t_3 包括数据通讯时间和算法运行耗时。

数据通讯时间包括UM982发送定位信息给中枢控制器的TTL串口传输时间、数据传输单元发送读取指令帧给中枢控制器的RS485传输时间以及中枢控制器回复DTU的RS485传输时间,其中TTL和RS485通讯速率为115.2 kb/s和9.6 kb/s,且二者数据帧1次最大传输容量为8 bit(即1字节),如图8所示。UM982输出的GPRMC语句由71个ASCII码字节组成,HEADINGA语句由133个ASCII码字节构成,因此中枢控制器完成一次信息接收需要耗时 $(71 + 133) \times 10/115.2 \approx 17.7$ ms;DTU发送每条读取指令帧长度为8个字节,发送耗时 $8 \times 10/9.6 \approx 8.3$ ms;中枢控制器回复DTU的数据帧长度为13个字节,耗时 $13 \times 10/9.6 \approx 13.5$ ms。则数据通讯耗时为 $17.7 + 8.3 + 13.5 = 39.5$ ms。

TTL/RS485	1 bit	8 bit	0 bit	1 bit
	起始位	数据位	检验位	停止位

图8 TTL与RS485数据传输格式

Fig. 8 TTL and RS485 data transmission format

使用Keil软件对中枢控制器进行代码汇编,为减少控制器信息接收打断主程序运行的频率,多采用DMA传输方式。控制器时钟频率为72 MHz,利用基于DWT模块的代码执行时间测量方法对程序进行时间评估,测得算法运行1次的时间为微秒级,可忽略不计。故中枢控制程序执行延时 t_3 可视为39.5 ms。

可得总滞后时间为197.2 ms。

空间滞后性表现为时间滞后期间内播种机位移 S_{Lag} ,计算式为

$$S_{Lag} = \frac{v(t_1 + t_2 + t_3)}{3600} \quad (8)$$

式中 S_{Lag} ——播种机作业理论与实际值偏差距离,即落种位置理论与实际值偏差距离,m
 v ——播种机作业速度,km/h

导种管末端排种口下方设有种沟舌,用于平整双圆盘开沟器所开的种沟,并且下落后立即被后方镇压轮覆土掩埋,故忽略种子沿种沟方向与垂直于种沟方向偏移。

3.3 耦合位置预测模型

空间滞后为从红外光电传感器有种状态电平信号触发到种子落地空间位置记录时间内播种机前进位移 S_{Lag} ,由于惯性玉米种子与播种机看做一个整体同时向前,如图9所示,因此对位置偏差换算式(1)~(4)进行变换,将 $L_1 + L_2$ 项更变为 $L_1 + L_2 - S_{Lag}$,令换算后沿经纬度方向距离偏差为 Δx_{inew} 和 Δy_{inew} 。

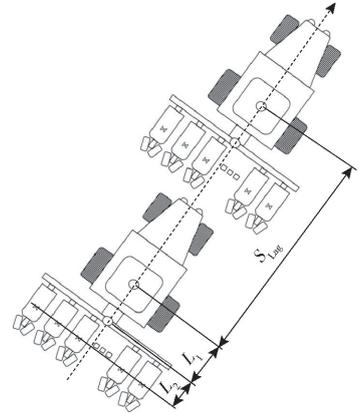


图9 空间滞后示意图

Fig. 9 Schematic of spatial lag

根据新距离偏差进行播种单体种子空间位置经纬度偏差换算^[27],计算式为

$$\Delta L_{o_i} = \frac{\Delta y_{inew}}{1.112 \times 10^8 \cos L_a} \quad (9)$$

$$\Delta L_{a_i} = \frac{\Delta x_{inew}}{1.112 \times 10^8} \quad (10)$$

式中 ΔL_{o_i} ——单体经度偏差,(°)

ΔL_{a_i} ——单体纬度偏差,(°)

L_a ——主天线所在纬度,(°)

结合3.1节中区间I~IV,耦合位置预测模型表示为

$$L_{o_i} = L_o + \Delta L_{o_i} \quad (11)$$

$$L_{a_i} = L_a + \Delta L_{a_i} \quad (12)$$

式中 L_{o_i} ——预测种子空间落地位置经度,(°)

L_{a_i} ——预测种子空间落地位置纬度,(°)

不同区间对经纬度偏差正负方向响应规则如表2所示。W、E、N和S分别表示向西、向东、向北和向南

表 2 区间 I ~ IV 对经纬度偏差正负方向响应规则

Tab. 2 Directional response rules of intervals I ~ IV to latitude and longitude deviation in positive and negative directions

参数	区间 I		区间 II		区间 III		区间 IV	
	$\Delta L_{o_i} +$	$\Delta L_{o_i} -$						
$\Delta L_{a_i} +$	W S	E S	W N	E N	E N	W N	E S	W S
$\Delta L_{a_i} -$	W N	E N	W S	E S	E S	W S	E N	W N

增加数值。

4 田间试验

4.1 试验方法

为验证基于时空耦合的玉米播种位置预测系统性能,于 2025 年 4 月在黑龙江贝克锐斯现代农业科技有限公司试验田进行田间试验,土壤含水率为 16.1%。采用中国农业大学保护性耕作团队与贝克锐斯共同研制的 2BQDM-2A 型玉米智能电驱播种机进行试验,如图 10 所示,配套动力为中联重科 RK604 型拖拉机,作业时将玉米播种位置预测系统布于驾驶舱内。



图 10 试验现场

Fig. 10 Test field

1. 主天线 2. 玉米播种位置预测系统 3. 从天线

试验时播种机正常作业,完毕后,从数据记录子系统中调取种子进行预测位置与实际位置对比验证。为降低测定种子实际位置难度,播种作业时利用吊绳将安装于播种单体后部的覆土镇压装置抬起(图 10);通过手动打点方式对种子实际位置进行测量,如图 11 所示,天线圆心在种沟面投影与玉米种子重合。

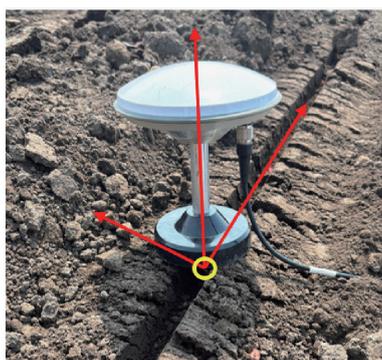


图 11 手动打点测量种子位置方法

Fig. 11 Manually measuring seed position method

对玉米播种位置预测系统精度进行评价,指标主要包括定位偏差平均值、定位偏差标准差和定位偏差变异系数,计算式为

$$\bar{\Delta s} = \frac{\sum_{i=1}^z \Delta s_i}{z} \quad (13)$$

$$S_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z (\Delta s_i - \bar{\Delta s})^2}{z}} \quad (14)$$

$$C_{V_s} = \frac{S_s}{\bar{\Delta s}} \times 100\% \quad (15)$$

$$\Delta s_i =$$

$$\sqrt{1.112 \times 10^8 \cos L_{a_R} (L_{o_S} - L_{o_R})^2 + 1.112 \times 10^8 (L_{a_S} - L_{a_R})^2} \quad (16)$$

式中 $\bar{\Delta s}$ ——定位偏差平均值,mm

Δs_i ——取样点存储位置与实际位置偏差,mm

z ——取样点数量

S_s ——定位偏差标准差,mm

C_{V_s} ——定位偏差变异系数,%

L_{o_S} ——取样点种子在系统中存储经度,(°)

L_{o_R} ——取样点种子手动打点测量经度,(°)

L_{a_S} ——取样点种子在系统中存储纬度,(°)

L_{a_R} ——取样点种子手动打点测量纬度,(°)

4.2 试验结果

试验结束后每个作业行随机挑选种子,最终以 130 粒种子作为样本,图 12 为实际位置与预测位置对比效果,整体来看二者基本重合,玉米播种位置预测系统测算效果较好。

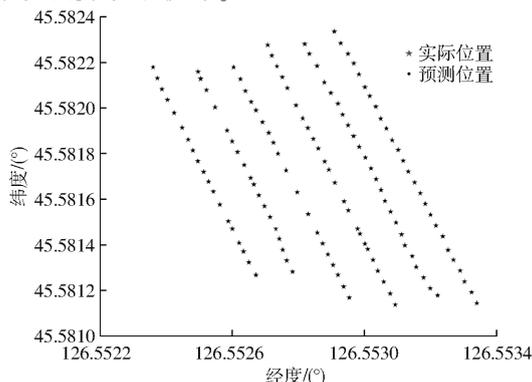


图 12 实际位置与预测位置对比

Fig. 12 Comparison of actual and predicted positions

试验结果表明,本系统预测的种子位置与实际位置偏差平均值为 36.86 mm,标准差为 3.57 mm,变异系数为 9.69%,系统能够较为准确地预测玉米播种位置。

种子预测位置与实际位置关系如图 13 所示。播种机实际作业工况复杂,多种自身及环境因素导致预测位置与实际位置会产生前、后、左、右 4 个方位的混合偏差。试验中,作业地局部土质变化会引起播种机机身姿态的微幅倾斜,导致实际位置与预测位置之间产生左右偏移;试验中未进行覆土镇压,种子落地弹跳现象增多,同时播种机本身播种精度误差和种子在导种管内多次碰撞等原因导致实际株距不准^[28-29](图 14),使得预测位置产生前后偏差;由于信息传输时间影响,在播种机作业速度突变时,



图 14 播种情况示意图

Fig. 14 Schematic of sowing situation

预测模型未能同时响应,难以测算实时的位置信息,机身振动加剧了信号波动性与延迟;另外,厘米级的 RTK 定位精度可能限制了系统更加精准的运算。

5 结论

(1) 设计了基于时空耦合的玉米播种位置预测系统,包括中枢控制器、落种信息获取子系统和数据记录子系统,实现了播种过程中的落种信息获取、位置预测计算、数据传输和存储显示功能。

(2) 构建了分段式空间位置换算模型,实现了北斗主天线到各播种单体中红外光电传感器检测中心的位置换算;构建了时空滞后补偿模型,分析了滞后时间组成部分,通过台架测量与理论计算等方法得到系统滞后时间为 197.2 ms,明确了空间滞后距离计算方法;建立了耦合位置预测模型,同时设定了不同区间对经纬度偏差正负值的方向响应规则,保证了系统在不同情况下测算的准确性。

(3) 田间试验结果表明,受多种因素影响,系统定位偏差均值为 36.86 mm,标准差为 3.57 mm,变异系数为 9.69%,能够较好地预测玉米播种机作业后种子落地空间位置,为实现全周期农事管理数据获取提供参考。

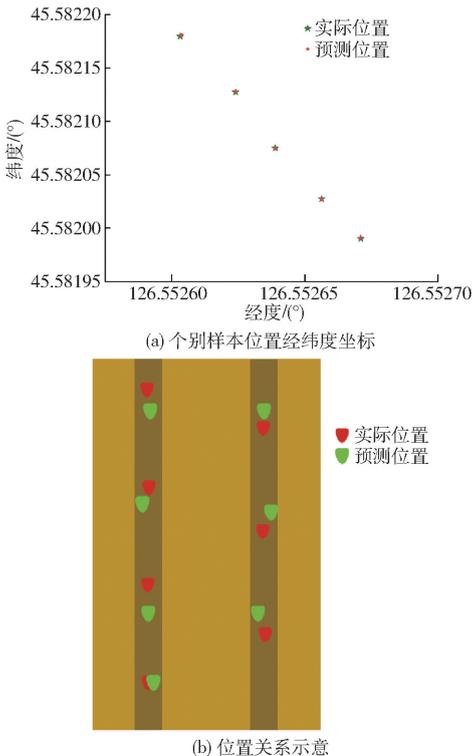


图 13 实际位置与预测位置关系示意图

Fig. 13 Schematics of relationship between actual position and predicted position

参 考 文 献

- [1] 郑适,舒坤良,杨双,等. 完善玉米主产区粮食调控政策的思路与对策[J]. 经济纵横, 2016(4):62-65. ZHENG Shi, SHU Kunliang, YANG Shuang, et al. Ideas and countermeasures for improving food control policies in main corn producing areas[J]. Economic Review Journal, 2016(4):62-65. (in Chinese)
- [2] 仇焕广,李新海,余嘉玲. 中国玉米产业:发展趋势与政策建议[J]. 农业经济问题, 2021(7):4-16. QIU Huangang, LI Xinhai, YU Jialing. China maize industry: development trends and policy suggestions[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021(7):4-16. (in Chinese)
- [3] 张宇,成海燕. 我国智慧农业高质量发展的困境及对策[J]. 智慧农业导刊, 2025, 5(4):6-9. ZHANG Yu, CHENG Haiyan. The dilemmas and countermeasures for the high-quality development of smart agriculture in China [J]. Journal of Smart Agriculture, 2025, 5(4): 6-9. (in Chinese)
- [4] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11):1941-1959. LI Shaokun, ZHAO Jiuran, DONG Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China [J]. Scientia

- Agricultura Sinica, 2017, 50(11). 1941 – 1959. (in Chinese)
- [5] 李润涛, 王宪良, 姚艳春, 等. 播种机智能检测技术研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 93 – 101.
LI Runtao, WANG Xianliang, YAO Yanchun, et al. Research on intelligent detection technology of seeders[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 93 – 101. (in Chinese)
- [6] 李兆东, 孙誉宁, 杨文超, 等. 光束阻断式小粒蔬菜种子漏充与堵孔同步检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 119 – 126.
LI Zhaodong, SUN Yuning, YANG Wenchao, et al. Design of synchronous detection system of missing filling seeds and suctionhole blocking based on beam blocking for small vegetable grains [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 119 – 126. (in Chinese)
- [7] 丁幼春, 王凯阳, 刘晓东, 等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30 – 41.
DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small-size seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 30 – 41. (in Chinese)
- [8] GARCIA P, ITO N, KITO K, et al. Computer-based optimal control of seeding rate based on travel speed and seed signals (Part 1)[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1997, 59(6): 93 – 101.
- [9] LI Yunxia, ZHANG Zhao, AFSHIN A, et al. Seeding detection and distribution evaluation using the developed automatic maize seeding machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108872.
- [10] 纪超, 陈学庚, 陈金成, 等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 1 – 6.
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 1 – 6. (in Chinese)
- [11] 史智兴, 高焕文. 玉米精播机排种监测报警装置[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(2): 18 – 20.
SHI Zhixing, GAO Huanwen. A seeding monitoring & alarming device for corn precision seeder [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(2): 18 – 20. (in Chinese)
- [12] 谯睿, 杨文彩, 韩文霆, 等. 三七精密播种机漏播重播检测系统设计与试验[J]. 传感技术学报, 2019, 32(7): 1115 – 1122.
QIAO Rui, YANG Wencai, HAN Wenting, et al. Design and test of missed broadcast and over sowing system for panax precision seeder[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(7): 1115 – 1122. (in Chinese)
- [13] 朱凯. 油麦种子流光电式传感装置设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
ZHU Kai. Design and experiment of photoelectric sensor device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [14] ZHANG Chunling, XIE Xiaodong, ZHENG Zihao, et al. A plant unit relates to missing seeding detection and reseeding for maize precision seeding[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1634.
- [15] 张超. 基于卫星导航自动驾驶技术在播种作业中的试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
ZHANG Chao. Design and experimental study of excitation device of self-propelled dwarf and close planting jujube harvester [D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [16] 夏俊芳, 魏有帅, 郑侃, 等. 宽苗带小麦播种机多行匀播分控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 145 – 156.
XIA Junfang, WEI Youshuai, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of multi-row uniform seeding control system for wide-row wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 145 – 156. (in Chinese)
- [17] 和贤桃. 处方图式变量播种控制系统研究与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
HE Xiantao. Research and experiment on map-based control system of variable rate seeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 吴昆鹏. 基于北斗导航的玉米高速精量播种电控系统设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
WU Kunpeng. Design and test of electric control system for high-speed precision sowing of corn based on Beidou navigation [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [19] 廖庆喜, 罗湛程, 杨恒, 等. 基于 RTK 测速的油菜直播机随速可控可调排种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 65 – 74.
LIAO Qingxi, LUO Zhancheng, YANG Heng, et al. Variable-rate seeding control system based on RTK speed measurement for rapeseed direct seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 65 – 74. (in Chinese)
- [20] 罗湛程. 基于 RTK 测速的油菜直播机随速可控可调排种控制系统设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
LUO Zhancheng. Design and experiment of a variable-rate seeding control system based on RTK speed measurement for rapeseed direct planter[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [21] 冯玉岗, 金诚谦, 袁文胜, 等. 基于卫星测速小麦精量电驱式播种控制系统[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 124 – 130.
FENG Yugang, JIN Chengqian, YUAN Wensheng, et al. Research on precision electric seeding control system based on satellite velocity measurement for wheat[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12): 124 – 130. (in Chinese)

- [22] LI Yang, LI Shangping, WEN Chunming, et al. Design of an electrically driven sugarcane seeding system based on GNSS-RTK receiver and SAPSO-LADRC algorithm[J]. Sugar Tech., 2025, 27(3): 1-12.
- [23] 张闻宇. 基于BDS(北斗)的油菜直播机组作业导航技术研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
ZHANG Wenyu. Automatic navigation technology for direct seeding planter for rapeseed based on BDS[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [24] 孙佳泽. 精密播种机弯道播种定位补偿技术研究[D]. 保定:河北农业大学, 2023.
SUN Jiaze. Curve seeding position compensation of precision planter[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [25] 程方平, 赵帮泰, 梅林森, 等. 玉米变量播种技术研究现状及趋势[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 41-46.
CHENG Fangping, ZHAO Bangtai, MEI Linsen, et al. Current status and trends of research on variable seeding technology for corn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization Society, 2024, 45(12): 41-46. (in Chinese)
- [26] SUN Jiaze, ZHANG Yan, ZHANG Yuting, et al. Precision seeding compensation and positioning based on multisensors[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7228.
- [27] 张晓龙, 朱平安, 胡春生. 基于经纬度的弹目距离和方位角简易算法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 7-9.
ZHANG Xiaolong, ZHU Pingan, HU Chunsheng. A simple algorithm for distance and azimuth of missile-to-target based on longitude and latitude[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(10): 7-9. (in Chinese)
- [28] 黄鑫光, 王宪良, 孟志军, 等. 玉米电驱精量播种机作业工况参数检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 61-71.
HUANG Xinguang, WANG Xianliang, MENG Zhijun, et al. Corn electric drive precision seeder operating condition parameter detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 61-71. (in Chinese)
- [29] 衣淑娟, 张清朋, 戴智博, 等. 玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 261-274.
YI Shujuan, ZHANG Yupeng, DAI Zibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding device for maize detail-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 261-274. (in Chinese)

(上接第 145 页)

- [21] 张静, 刘昱, 郑德聪, 等. 丘陵山地拖拉机机身自平衡机构稳定性分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 102-108.
ZHANG Jing, LIU Yu, ZHENG Decong, et al. Stability analysis of self-balancing mechanism for the body of hilly tractors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 102-108. (in Chinese)
- [22] YANG H T, XIA C G, HAN J Y, et al. Analysis of stability and dynamic model simulation of mountain tractor rollover[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 512(1): 012151.
- [23] 全国农业机械标准化技术委员会(SAC/TC 201). 旋耕机: GB/T 5668—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 潘冠廷, 杨福增, 孙景彬, 等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 374-383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374-383. (in Chinese)
- [25] 彭贺, 马文星, 王忠山, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1): 157-165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 157-165. (in Chinese)