

玉米中耕除草复合导航系统设计与试验^{*}

张漫¹ 项明¹ 魏爽² 季宇寒² 仇瑞承¹ 孟庆宽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: 为了实现玉米中耕除草过程中的自动导航作业,提高自动除草的效率和准确性,设计了一种玉米中耕除草复合导航系统。系统由基于 GNSS 的农机自动导航部分和基于机器视觉的农具自动导航部分组成,可通过 GNSS 位置信息进行农机自动导航,同时根据摄像头获取的玉米作物行信息控制农具铲刀进行行间除草。对农机的转向控制部分和前轮转角检测部分进行了机械改装,以 PLC 和步进电机驱动器为基础设计了农机转向控制电路和农具液压控制电路;以横向偏差和横向偏差变化率作为模糊控制的输入变量设计了自适应模糊控制方法;采用摄像头获取玉米作物行,通过扫描滤波方法进行作物行检测。农机独立导航除草试验和农机具复合导航试验结果表明:在车速为 0.6 m/s 时,农机自动导航最大横向偏差为 10.04 cm,平均偏差为 4.62 cm;农机具复合导航时的最大偏差为 6.35 cm,平均偏差为 2.73 cm;农机具复合导航系统能较好地满足玉米中耕除草的要求。

关键词: 玉米 中耕除草 复合导航 GNSS 机器视觉

中图分类号: S224.1⁺5; TP273⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0008-07

Design and Implementation of a Corn Weeding-cultivating Integrated Navigation System Based on GNSS and MV

Zhang Man¹ Xiang Ming¹ Wei Shuang² Ji Yuhang² Qiu Ruicheng¹ Meng Qingkuan¹

(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: In order to achieve the automatic navigation of corn weeding-cultivating operations and improve the efficiency and accuracy of automatic weeding, a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV was designed and developed. The system, which consisted of two parts, the agricultural vehicle automatic navigation based on GNSS and the weeding implement navigation based on machine vision, could achieve automatic navigation in the process of corn weeding-cultivating. In order to avoid the damage corn, the proper safety distance between implement moldboard and crop rows is necessary when the agricultural machinery is working, which is controlled by tracing the GNSS information of corn planting navigation and the image information of crop rows acquired by industrial camera. During the hardware part, the steering wheel controlling and the front wheel angle testing parts were designed and refitted. The steering control circuit and the implement moldboard hydraulic control circuit were designed based on PLC and stepper motor drive. To the vehicle navigation, the steering wheel controlling and the front wheel angle testing institutions were designed. The vehicle operated through tracing the corn row by the GNSS information of corn planting navigation. In the integrated navigation intelligent decision module, the fuzzy control system was taken as the main control algorithm

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-20
^{*} 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: 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

for navigation control decisions, and the lateral deviation of agricultural machinery and lateral deviation error rate were used as input variables of fuzzy control. In the implement visual navigation module, the crop row detection algorithm based on scanning filter was adopted, which could improve the precision of navigation line detection and processing efficiency. Corresponding experiments were designed to test the feasibility of the system, the accuracy of automatic navigation were calculated respectively. The results show that, in the speed of 0.6 m/s, the maximum lateral deviation of GNSS navigation is 10.04 cm, the average deviation is 4.62 cm. The maximum lateral deviation of integrated navigation is 6.35 cm, the average deviation is 2.73 cm. The corn weeding-cultivating integrated navigation system can effectively satisfy the requirement of the corn weeding.

Key words: Corn Weeding-cultivating Integrated navigation GNSS Machine vision

引言

机械除草可以减少化学除草对农作物的农药残留,提高土壤透气性,对生态环境保护以及农作物生长都起到积极的作用。然而目前比较普遍的机械除草都是通过人工驾驶拖拉机并悬挂除草农具进行作业^[1-2],驾驶员作业强度大且容易对农作物造成损伤。如何提高除草率和工作效率并减少农作物的受损率,是机械除草作业中的难点之一。

在农田自动除草作业方面,国外的农业机械(简称农机)自动驾驶已经相对成熟,因此更多集中在除草机器人的设计以及除草方式的创新上^[3-6]。Kim 等设计了一种基于多传感器融合的水稻田除草机器人,将激光测距仪和惯性测量单元进行融合导航,作业最大偏差为 6.2 cm^[7]。Kailerle 等建立杂草主动形状模型,利用机器视觉识别杂草并用激光进行除草,作业精度高于一般的机械除草^[8]。国内对于农机自动驾驶作业的研究有很多,主要集中在通过 GNSS(Global navigation satellite system)导航或者视觉导航进行预定路径的识别和跟踪^[9-14],如白晓平等提出了一种农机导航自校正模型控制方法,采用模型控制方法设计控制规律,并用模糊自适应方法自动调节模型控制规律的控制量,在 1.0 m/s 的速度下,直线跟踪最大偏差小于 6.5 cm^[15]。李景彬

等研究了棉花铺膜播种机田间作业时导航路线和田端的图像检测算法^[16]。在自动除草作业中,农机导航可以提高作业效率,减少驾驶员的工作量;而农田土地的不平整和拖拉机的行驶会造成除草农具随之左右晃动,因此,结合农具导航则可以提高机械除草的精度,最大限度减小农作物的损伤^[17]。

本文设计一种玉米中耕除草的复合导航系统。农机通过播种时获取的作物位置信息进行 GNSS 自动驾驶,同时摄像头实时获取作物行的位置信息并对农具进行视觉导航,根据作物行的位置自动调节铲刀和作物行的距离,以达到提高玉米中耕除草效率和精度的目的。

1 系统设计

1.1 总体设计

复合导航系统主要包括基于 GNSS 的农机导航系统和基于机器视觉的农具导航系统,如图 1 所示。其中农机导航系统以 John Deere 940 型拖拉机为试验平台,主要进行农机转向和转向角检测的机械改装。该部分主要由工控机、PLC(Programmable logic controller)、步进电机、步进电机驱动器、角度传感器等构成。步进电机控制方向盘进行农机导航控制,角度传感器获取前轮转向角信息作为反馈。农具导航系统以除草农具为平台,该部分主要由工控机、

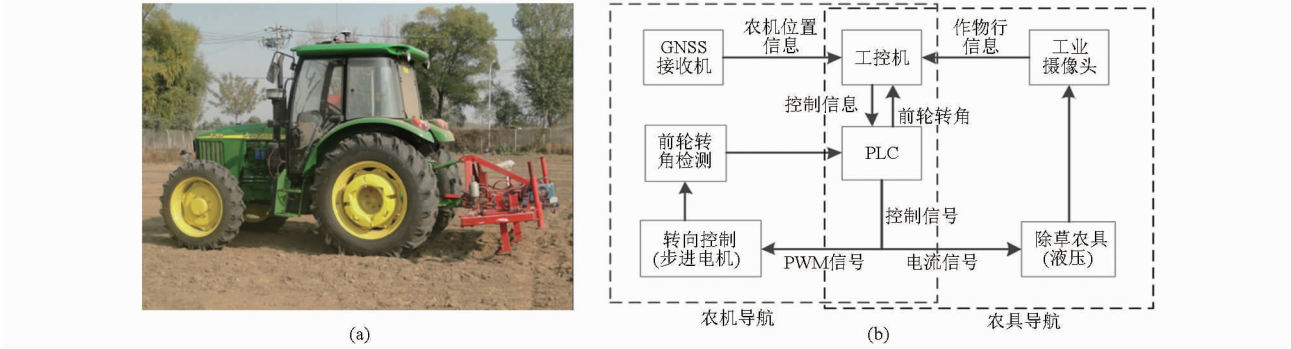


图 1 复合导航系统总体设计图

Fig.1 Overall design of integrated guidance system

(a) 系统实物图 (b) 系统结构图

PLC、工业摄像头和液压系统组成。由摄像头采集作物行信息,通过 PLC 控制液压系统进而控制除草农具的铲刀自动调整其作业位置。

GNSS 接收机、工业摄像头作为农机导航和农具导航的主要传感器,分别获取农机的作业位置信息和作物行信息。工控机作为系统的主处理器,主要负责导航信息的采集和处理以及生成导航控制的决策信息。下位机 PLC 作为系统的控制器,主要负责接收工控机的控制信息并输出相应的控制信号以及对转向角进行检测,其中前轮转角作为农机控制的反馈信号,由 PLC 获取并发送给上位机。步进电机和液压系统为执行机构,主要负责农机转向和农具铲刀移动的命令执行。在作业过程中,工控机实时获取农机位置信息、作物行信息和前轮转角信息进行控制决策,生成控制信息后发送给 PLC。PLC 分别生成相应的 PWM 信号和电流信号对转向机构和除草农具进行控制。

1.2 农机导航系统硬件设计

1.2.1 车辆转向控制机械模块

车辆转角控制机械模块主要由步进电机、转台、上下压盘、套管托盘组成,如图 2 所示。其中,转台部分通过套管托盘与拖拉机方向盘操作杆外壳固定,同时套管上的 3 个螺丝可以调整并保持转台与方向杆同心,工作时这部分保持静止不动,方向盘通过上下压盘与转台旋转部分连接。经验估计拖拉机方向盘转动力矩一般小于 $10\text{ N}\cdot\text{m}$,步进电机的转矩为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,通过减速比为 $1:10$ 的转台后可以输出最大 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 的转矩;当步进电机驱动器设定为 800 脉冲/ r 时,经测定车轮转动的角度与输出脉冲的比例为 $1:454$,步进电机的转速为 $150\sim1\,200\text{ r/min}$,在控制频率为 1 Hz 时,减去设定的电机 0.2 s 的加速时间,理论上步进电机每秒最多可以带动车轮转 28° ,完全可以满足农机自动导航的要求。

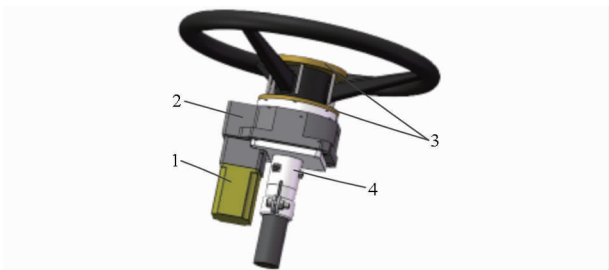


图 2 转向控制模块机械结构图

Fig. 2 Mechanical design of steering control part

1. 步进电机 2. 转台 3. 上下压盘 4. 套管托盘

1.2.2 转向角检测模块

拖拉机转向角检测模块主要由角度传感器、左右摆臂和传感器支架组成,如图 3 所示。拖拉机转

向过程中,右摆臂随之转动,由此带动左摆臂随角度传感器的轴心转动,从而进行转向角的检测。此方法可以很好地解决角度传感器与拖拉机转向轴不同心而损坏传感器的问题。角度传感器采用通磁伟业公司的 WYT-AT-3 型,可以输出 $4\sim20\text{ mA}$ 的检测电流,检测的角度范围为 $0^\circ\sim90^\circ$,可以满足拖拉机转向角的测量。当方向盘旋转到左右两侧并与拖拉机中轴线的夹角达到 40° 时,系统可以通过对转向角的检测来控制步进电机停止运行,保证自动导航时的安全性。

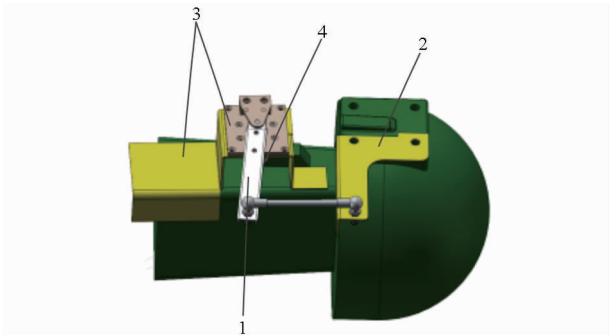


图 3 转向角检测模块机械结构图

Fig. 3 Mechanical design of steering angle detection part

1. 左摆臂 2. 右摆臂 3. 传感器支架 4. 角度传感器

1.2.3 转角控制电路模块

拖拉机转角控制电路模块主要由 PLC、步进电机驱动器以及电源模块组成。其中 PLC 系统包括 PLC 主机、串口通信模块和 AD 转换模块。串口通信模块负责 PLC 和工控机之间的通信,进行前轮转角信息的上传以及控制命令的接收;AD 转换模块用于检测角度传感器输出的电流;PLC 主机负责对上位机控制指令的执行,输出高频脉冲信号对步进电机驱动器进行控制。电源模块包括 PLC 主机、串口通信模块、AD 转换模块、步进电机驱动器的 24 V 供电和步进电机驱动信号、角度传感器的 12 V 供电以及电路保护模块。

1.3 农具导航系统硬件设计

农具导航硬件结构如图 4 所示,摄像头固定在机具内框向外延伸的位置,除草铲刀固定在机具内框的后下方。液压比例换向阀、油缸、液压表、液压散热风扇、行程开关、运动导轨均固定在机具外环。进行玉米中耕除草作业时,摄像头采集作物行信息,获取作物行偏差,从而控制机具内框及固定在内框上的铲刀和摄像头左右调整位置进行玉米行间除草。系统通过液压比例阀控制机具内框在直线导轨上移动。其中液压比例阀的电阻为 $7.6\ \Omega$,可控制最大电流为 1.5 A ,通过改变驱动电流的大小来改变铲刀移动的速度;农具的两侧分别安装一个行程开关作为系统的保护开关,当铲刀移动到两侧的边

缘时触发行程开关,此时驱动电路断开,铲刀停止作业并只能往相反的方向移动。本文设计的系统中,采用 PLC 的 AD 模块进行液压驱动,可以输出最大 10 V 的直流电压驱动液压比例阀。经试验验证,10 V 的电压驱动可以满足除草作业中机具移动的最大速度要求。

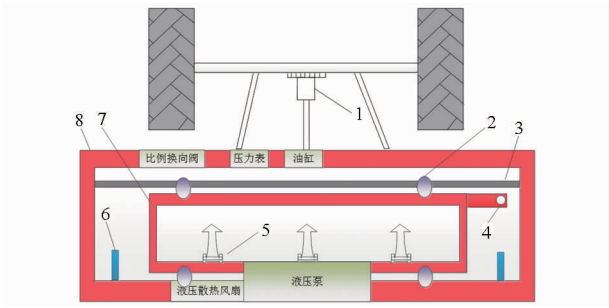


图 4 农具导航硬件结构图

Fig. 4 Hardware diagram of implement navigation

1. 传动输出轴 2. 滑环 3. 直线运动导轨 4. 摄像头 5. 除草铲刀 6. 行程开关 7. 机具内框 8. 机具外框

1.4 农机导航控制方法设计

在实际导航控制中,系统在不同状态下对横向偏差及其变化率的权重要求不同。本文采用自适应模糊控制器作为农机导航控制方法,以农机导航的横向偏差和横向偏差变化率作为模糊控制的输入量。使用基于修正因子的自适应模糊控制方法,当横向偏差比较大时,系统应尽快消除偏差,此时应加大横向偏差作为模糊控制输入量的比重;当横向偏差较小时,要求系统尽快达到稳定状态,此时应加大横向偏差变化率的比重,从而控制不同状态下横向偏差和横向偏差变化率所占有权重的自适应调整。

(1)横向偏差模糊化
基本论域:[- 30 cm,30 cm];量化等级:{ - 6, - 5, - 4, - 3, - 2, - 1,0,1,2,3,4,5,6 };量化因子: $K_{offset}=6/30=0.2$ 。
(2)横向偏差变化率模糊化
基本论域:[- 30 cm,30 cm];量化等级:{ - 6, - 5, - 4, - 3, - 2, - 1,0,1,2,3,4,5,6 };量化因子: $K_d=6/30=0.2$ 。
(3)期望转角补偿量模糊化
基本论域:[- 60,60];量化等级:{ - 6, - 5, - 4, - 3, - 2, - 1,0,1,2,3,4,5,6 };量化因子: $K_u=6/6=1$ 。
横向偏差、横向偏差变化率和期望转角补偿量 3 个变量的模糊等级均为:负大 (NB),负中 (NM),负小 (NS),零 (ZO),正小 (PS),正中 (PM),正大 (PB)。横向偏差、横向偏差变化率和前轮期望转角的隶属度函数均采用高斯函数。

(4)自适应调整因子设定
模糊控制规则使用带因子的控制规则,公式为
$$U = \text{Fuzzy}(\alpha E, (1 - \alpha) E_c) \tag{1}$$

其中
$$\alpha = \frac{1}{M}(\alpha_h - \alpha_l) |E| + \alpha_l$$

$$(0 \leq \alpha_l \leq \alpha \leq \alpha_h \leq 1)$$

式中 E ——横向偏差 E_c ——横向偏差变化率
 $\text{Fuzzy}(\cdot)$ ——模糊控制算法
 $\alpha E、(1 - \alpha) E_c$ ——模糊控制的自适应输入量

通过调整 α 的值改变横向偏差 E 和横向偏差变化率 E_c 的加权程度。其中 M 设定为横向偏差论域的最大值 30, $\alpha_h、\alpha_l$ 分别设定为 0.8 和 0.3。此时自适应模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 自适应模糊控制规则
Tab. 1 Rule of adaptive fuzzy control (°)

横向偏差变化 率量化等级	横向偏差量化等级												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6.0	5.7	5.4	4.9	4.5	4.8	5.3	4.0	2.8	2.0	0	-2.3	-4.0
-5	5.7	5.3	5.1	4.7	4.0	4.0	4.4	3.3	2.3	1.1	-1.1	-2.7	-4.2
-4	5.6	5.0	4.6	4.2	3.8	3.4	3.6	2.6	1.5	0.2	-1.7	-3.0	-4.4
-3	5.6	4.8	4.1	3.6	3.1	2.8	2.6	1.5	0.6	-0.3	-2.0	-3.3	-4.6
-2	5.6	4.7	3.7	3.1	2.5	2.1	1.6	0.8	0	-0.7	-2.3	-3.5	-4.9
-1	5.6	4.6	3.4	2.6	2.0	1.6	0.9	0.2	-0.3	-1.1	-2.7	-3.9	-5.2
0	5.6	4.5	3.2	1.9	1.2	0.5	0	-0.5	-1.2	-1.9	-3.2	-4.5	-5.6
1	5.2	3.9	2.7	1.1	0.3	-0.2	-0.9	-1.6	-2.0	-2.6	-3.4	-4.6	-5.6
2	4.9	3.5	2.3	0.7	0	-0.8	-1.6	-2.1	-2.5	-3.1	-3.7	-4.7	-5.6
3	4.6	3.3	2.0	0.3	-0.6	-1.5	-2.6	-2.8	-3.1	-3.6	-4.1	-4.8	-5.6
4	4.4	3.0	1.7	-0.2	-1.5	-2.6	-3.6	-3.4	-3.8	-4.2	-4.6	-5.0	-5.6
5	4.2	2.7	1.1	-1.1	-2.3	-3.3	-4.4	-4.0	-4.0	-4.7	-5.1	-5.3	-5.7
6	4.0	2.3	0	-2.0	-2.8	-4.0	-5.3	-4.8	-4.5	-4.9	-5.4	-5.7	-6.0

1.5 作物行提取方法

1.5.1 图像预处理算法

作物行提取的准确度是农具导航精度最根本的保障,本文采用直线扫描滤波的方法对玉米作物行进行检测^[18]。在作物行扫描前,首先需要对采集的图像进行预处理,包括彩色图像的灰度化和二值化处理,然后采用 $2G-R-B$ 颜色特征因子对图像进行灰度化处理,最后使用最大类间方差法 (OTSU) 进行图像分割,从而将作物行从土壤、杂草等背景中分离出来,得到一幅只有玉米作物行的二值化图像。

1.5.2 基于直线扫描的作物行提取算法

在玉米作物行的二值化图像中,玉米的作物行从图像的近端到远端可相连成近似一条直线来确定作物行的位置。据此,本文采用基于直线扫描的作物行检测算法,检测原理及过程如下:

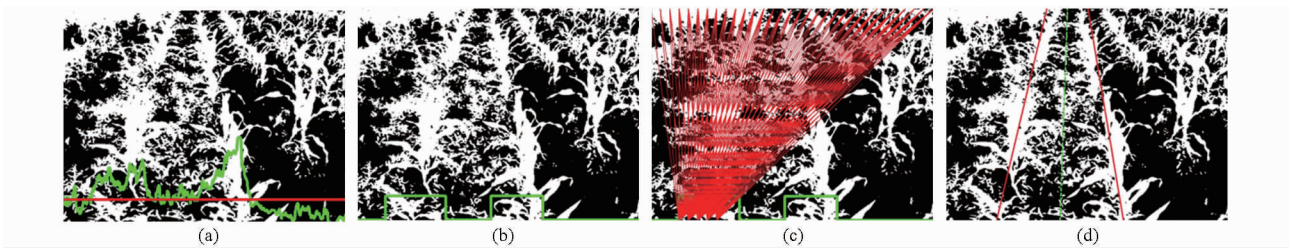


图 5 作物行提取算法

Fig.5 Algorithm of crop line extraction

(a) 垂直投影 (b) 近端作物行获取 (c) 直线扫描 (d) 导航线提取

2 试验与结果分析

为了测试复合导航系统的精度,验证玉米中耕除草复合导航系统的可行性,本文分别设计了农机独立导航试验和复合导航试验。选择中国农业大学上庄试验站进行玉米中耕除草复合导航系统的性能测试;试验中选用 John Deere 940 型拖拉机为试验平台,采用塑料玉米苗模型作为试验对象,GNSS 接收机采用司南 M300 型,在差分状态其静态精度为 $\pm 1\text{ cm}$ (95%)。工业摄像头型号为 OK-AC1303。复合导航系统终端界面如图 6 所示,其中左侧为 GNSS 导航部分,显示农机的行驶轨迹;右侧为机具导航部分,显示摄像头采集的作业行信息;下方为农机具状态信息和操作按钮。

2.1 农机独立导航试验

主要测试在农机自动导航作业情况下,农具以常规方式作业不进行导航控制时的除草精度。此时将 GNSS 天线置于拖拉机顶端中心为农机导航获取位置信息,同时将另一套 GNSS 的天线置于农具铲刀上方,用于获取铲刀与作物行的横向偏差。假定玉米作物行为一条标准的直线。作业时,首先设定 A、B 点确定农机导航预定的直线。导航开始后,系

(1) 由于每个图像都可能包含多个作物行,因此采用垂直投影的方法来检测作物行数和位置。垂直投影的过程如图 5 所示。绿色部分为作物行的灰度投影,将波形高度与其平均值进行对比,大于平均高度的部分可视为作物行,同时滤除伪作物行。根据作物行近端的位置信息,利用线性扫描提取作物行。

(2) 作物行直线检测算法,首先在图像近端和远端选择 2 个点,然后控制上下端点位置产生不同斜率直线,统计落在直线一定区域范围内目标点个数,最后将包含目标点最多的直线作为作物行直线,并根据作物行直线计算得到导航线。将图像近端的作物行作为作物行直线起点选择范围,远端全部区域作为直线终点选择范围。作物行直线检测过程如图 5 所示。

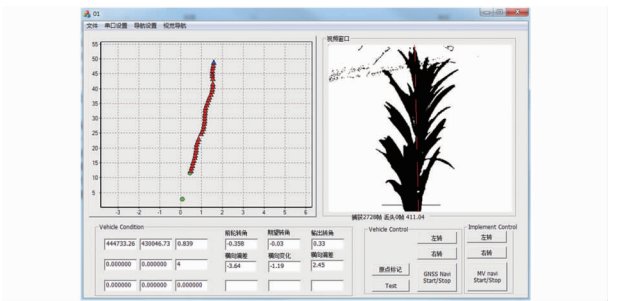


图 6 复合导航系统终端软件主界面

Fig.6 Interface design of navigation software

统根据预定路径调节方向盘使农机沿着 AB 直线行走。导航结果如图 7 所示,在作业速度为 0.6 m/s 时,农具铲刀的横向偏差最大值为 10.04 cm ,平均横向偏差为 4.62 cm 。

2.2 复合导航试验

主要测试农机进行自动导航和农具进行视觉导航相结合时农具的除草精度。此时,GNSS 天线的位置不变,在农具上安装工业摄像头。将塑料玉米苗按照实际种植方式插在地上,总长度为 40 m ,株间距为 30 cm 。导航结果如图 8 所示,在作业速度为 0.6 m/s 时,横向偏差最大值为 6.35 cm ,平均值为 2.73 cm 。

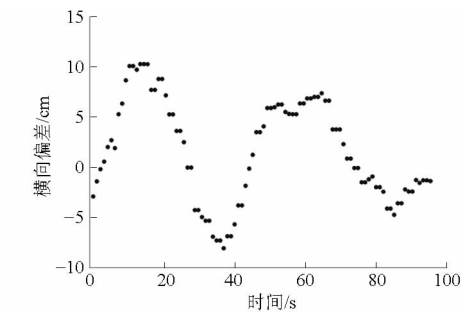


图7 GNSS 导航横向偏差

Fig.7 Lateral deviation of GNSS navigation

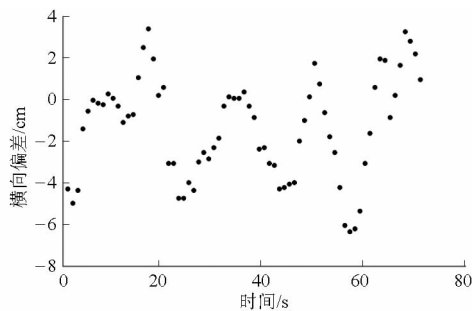


图8 复合导航横向偏差

Fig.8 Lateral deviation of integrated navigation

2.3 试验结果分析

试验结果表明,在单独进行 GNSS 导航除草时,作业精度大致能满足农田作业的需求,但农具除草铲刀的位置无法针对作物行位置进行调整,同时机具本身也存在一定的晃动,对作业精度造成影响,引

起铲苗、伤苗的现象。所以农机导航在本系统中最主要目的是控制直线行走,跟随播种时的 GNSS 信息进行导航,将除草部分交由农具导航部分进行处理。农具调节的范围为 $\pm 20\text{ cm}$,因此理论上农机导航的偏差只要小于 20 cm ,农具都可以调节到合适的位置。试验证明,结合农具导航能够较好地满足中耕除草的精度要求。

3 结论

- (1)设计了玉米中耕除草复合导航系统,将基于 GNSS 的农机导航系统和基于机器视觉的农具导航系统进行融合。系统可控制农机跟踪预定的路径进行 GNSS 导航,同时通过获取作物行直线进行农具导航,自动调节铲刀位置,从而实现玉米中耕除草复合导航作业。
- (2)对农机具自动导航硬件进行改装并设计了组合导航软件。通过自适应模糊控制进行农机导航,采用直线扫描算法进行玉米作物行提取。经过试验验证,本文设计的导航系统及算法性能稳定可靠。在车速为 0.6 m/s 时,农机自动导航的平均偏差为 4.62 cm ;农机具复合导航时的平均偏差为 2.73 cm ,系统可以满足实际作业需求,为下一步农机具自动导航作业研究奠定了基础。

参 考 文 献

1 马旭,齐龙,梁柏,等.水稻田间机械除草装备与技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):162 – 168.
Ma Xu, Qi Long, Liang Bai, et al. Present status and prospects of mechanical weeding equipment and technology in paddy field [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 162 – 168. (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 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.

4 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.

5 Igawa H, Tanaka T, Kaneko S, et al. Visual and tactual recognition of trunk of grape for weeding robot in vineyards [C] // Industrial Electronics, 35th Annual Conference of IEEE, 2009: 4274 – 4279.

6 Blackmore B S, Fountas S, Gemtos T A, et al. A specification for an autonomous crop production mechanization system [C] // Proceedings of the International Symposium on Application of Precision Agriculture for Fruits and Vegetables, 2008: 201 – 216.

7 Kim G H, Kim S C, Hong Y K, et al. A robot platform for unmanned weeding in a paddy field using sensor fusion [C] // 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2012: 904 – 907.

8 Kaierle S, Marx C, Rath T, et al. Find and irradiate-lasers used for weed control[J]. Laser Technik Journal, 2013, 10(3): 44 – 47.

9 胡炼,罗锡文,曾山,等.基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12 – 18.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12 – 18. (in Chinese)

10 周建军,张漫,汪懋华,等.基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):151 – 156.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151 – 156. (in Chinese)

11 张成涛, 谭戔, 吴刚, 等. 谷物联合收割机电控全液压转向系统建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20):11 – 17.
Zhang Chengtao, Tan Yu, Wu Gang, et al. Modeling and simulation of electronic control full hydraulic steering system for grain combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20):11 – 17. (in Chinese)

12 丁幼春, 王书茂. 联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5):137 – 142.
Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):137 – 142. (in Chinese)

13 郭伟斌, 陈勇. 基于模糊控制的除草机器人自主导航[J]. 机器人, 2010,32(2):204 – 209.
Guo Weibin, Chen Yong. Fuzzy control based autonomous navigation for a weeding[J]. Robot, 2010,32(2):204 – 209. (in Chinese)

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):0715002 – 1 – 0715002 – 7.
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): 0715002 – 1 – 0715002 – 7. (in Chinese)

15 白晓平, 胡静涛, 高雷, 等. 农机导航自校正模型控制方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):1 – 7.
Bai Xiaoping, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):1 – 7. (in Chinese)

16 李景彬, 陈兵旗, 刘阳. 棉花铺膜播种机导航路线图像检测方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1):40 – 45.
Li Jingbin, Chen Bingqi, Liu Yang. Study on image detection method of navigation route of the cotton plastic film mulch planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):40 – 45. (in Chinese)

17 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 株间除草装置横向偏移量识别与作物行跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 8 – 14.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 8 – 14. (in Chinese)

18 何洁, 孟庆宽, 张漫, 等. 基于边缘检测与扫描滤波的农机导航基准线提取方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):265 – 270.
He Jie, Meng Qingkuan, Zhang Man, et al. Crop baseline extraction method for off-road vehicle based on boundary detection and scan-filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):265 – 270. (in Chinese)