

油菜直播机组自动对厢作业控制器设计与试验

丁幼春 杨军强 舒彩霞 何志博 彭靖叶 夏中州 周雅文

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 针对基于视觉的油菜直播机组自动对厢作业控制,本研究提出了结合模糊控制和带死区的PD控制的组合控制器,其中模糊控制器作为对厢作业路径跟踪控制器,带死区的PD控制器作为直播机组转向控制器。根据直播机组运动模型和相机成像模型,分析了图像路径参数跟随直播机组运动的变化规律,并设计模糊控制器的控制规则。同时,在图像中将直播机组与目标厢沟相对位置没有偏差时的图像路径标定出来作为图像目标路径,据此以图像实时检测路径与图像目标路径的角度偏差和截距偏差设计为模糊控制器输入,前轮目标转角为模糊控制器输出。对直播机组前轮转向控制则设计了带死区的PD控制器,通过两者的有机结合实现了直播机组的自动对厢作业。田间试验结果表明:油菜直播机以0.5或0.8 m/s的速度行驶时,直线导航跟踪的横向偏差小于6 cm,以1.0 m/s的速度行驶时,横向偏差小于10 cm。

关键词 油菜直播机;对厢作业;路径跟踪;模糊控制器;比例-微分控制器

中图分类号 S 223.2⁺4; TP 273⁺.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2018)01-0101-07

油菜直播机挂载于拖拉机上,一般将两者统一称为油菜直播机组。油菜直播机组驾驶人员在田间作业过程中,为实现对播种区与未播种区的分界沟线即厢沟的准确跟踪,需要眼、手、脚、脑并用且重复枯燥的纠偏工作,不仅劳动强度大,而且对农机驾驶员的操作经验要求较高。利用当前热门的农机自动驾驶技术^[1-3],对油菜直播机开展基于视觉的田间自动对厢作业研究在提高作业效率、降低农机手操作难度与强度等方面具有重要的应用价值。视觉导航的关键技术之一是导航定位。目前,视觉导航定位方式仍然是以单目视觉检测目标路径为主^[4-6],而广大学者针对不同田间作业环境提出的路径检测方式虽然众多,但大部分路径检测仍然使用直线模型进行导航定位^[7-9],这些视觉导航系统的共同特点是:事先标定好相机成像模型的内外参数,在农机进行视觉导航时,假设目标路径处于大地平面内,通过图像检测路径参数(斜率和截距),计算农机相对目标路径的航向与航位偏差^[10-12]。基于这一原理需要借助标定板等工具对相机进行标定^[13],过程较为繁琐。因此,有关学者对视觉导航定位进行改进,提出了一些直接利用图像路径信息进行视觉导航定位的

方法,简化视觉导航定位过程。李金屏等^[14]、厉广伟等^[15]提出了虚拟定标线的方法进行电站巡线机器人的导航定位;张铁民等^[16]、李林等^[17]直接通过图像路径信息,分别获取高地隙小车和农药喷洒拖拉机的位置信息;余厚云等^[18]则通过图像检测路径位置进行汽车行驶的路径偏离预警。这些方法虽然都取得了不错的效果,但未从本质上分析图像路径信息变化的规律。

基于上述研究现状,本研究通过相机成像模型和直播机组运动模型分析图像路径跟随直播机位姿变化的规律,标定出直播机组与厢沟没有偏差时的图像路径作为图像目标路径,根据图像实时检测路径与图像目标路径的偏差关系,推测直播机组相对厢沟的位置状态,据此设计了用于油菜直播机组自动对厢作业的模糊控制器和PD控制器,为油菜直播机田间自动化作业提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 自动对厢作业控制系统结构组成

本研究的试验对象2BFQ-6型油菜精量联合直播机挂载于东方红LX-854拖拉机上,田间作业时

收稿日期: 2017-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700405、2016YFD020060602); 湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)

丁幼春,博士,副教授。研究方向:油菜机械化生产智能化技术与装备。E-mail: kingbug163@163.com

能够一次性完成旋耕、灭茬、开沟、施肥、播种、覆土等环[19],作业过程中形成的厢沟线为视觉定位提供了参考;拖拉机的前轮转向系统经过并入电液控制转向改造后,通过电磁阀实现前轮转向的手动/电动控制切换[20]。对厢作业控制系统的硬件部分由车载平板电脑、NI-USB-6218 数据采集卡、UI-2210RE-C-HQ 型工业相机、DWQT-BZV-60-G 型角度传感器及电控转向装置组成。相机分辨率为 640 (W)×480(H)像素,安装在直播机组前端中间位置,俯仰角为 15°,距地面 1.5 m,硬件关系如图 1 所示。

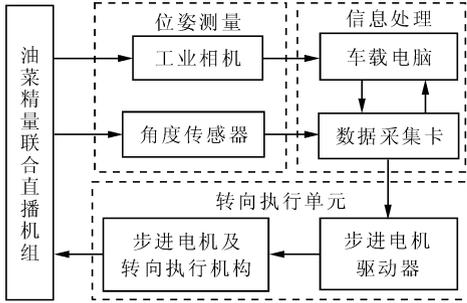
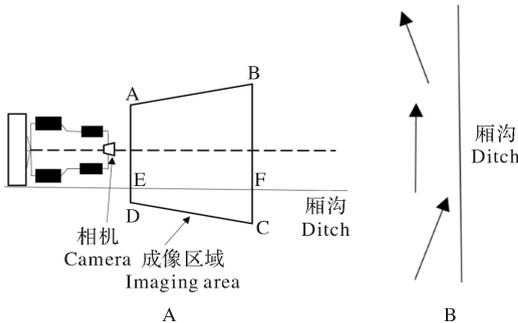


图 1 直播机组自动对厢作业硬件方案框图
Fig.1 Hardware components of test platform

1.2 自动对厢作业控制器设计

1)图像路径变化规律分析。根据单目视觉导航定位原理,实际路径与图像路径均能一一对应,本研究相机坐标系与直播机组坐标系形成固定关系,故图像路径变化能反映直播机组相对厢沟的位姿变化,分析这种变化规律,可以为自动对厢作业模糊控制器的规则制定提供依据。油菜播种对厢作业过程中,农机手一般习惯靠右行驶,如图 2 所示。本研究中 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机的宽度大于东方红 LX-854 拖拉机的后轮轴距,为保证播种作业质量,直播机组对厢作业过程中不能压过厢沟,所以对



A:作业示意图 Working sketch map; B:直播机组的 3 种位姿 3 postural of rape seeder unit.

图 2 直播机组作业示意图

Fig.2 Working sketch map of rape seeder unit

厢作业稳定跟踪状态过程中直播机组相对厢沟位置变化可分为靠近、远离和平行 3 种状态。

造成直播机组远离或靠近厢沟的主要原因是直播机组前轮很难处于绝对中位,导致直播机组做小幅转向运动,图像上检测的路径位置也随之变化,这种变化可以通过二轮阿克曼模型和相机成像模型分析。相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 与世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 定义如图 3 所示。为计算方便,令车体坐标系与世界坐标系重合。相机的安装俯仰角为 α ,高度为 h , X_c 轴与面 $O_w - Y_w Z_w$ 垂直, β' 、 C_i 、 K_i 分别表示图像路径的角度、截距和斜率; β 、 C_w 、 K_w 分别表示厢沟在 $O_w - X_w Y_w$ 坐标系下的角度、截距和斜率。

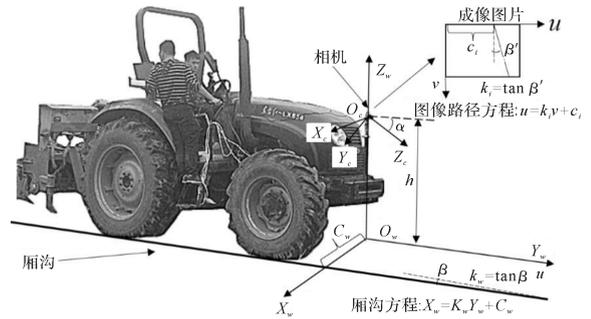


图 3 坐标系和路径参数的定义

Fig.3 Definition of coordinate and path parameter

由图 3 的相机安装位置与相机针孔成像模型[21]有:

$$\begin{cases} u = f_x \frac{X_w}{Y_w \cos \alpha + h \sin \alpha} + u_0 \\ v = f_y \frac{-Y_w \sin \alpha + h \cos \alpha}{Y_w \cos \alpha + h \sin \alpha} + v_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, (u, v) 为图像坐标系的列和行, (u_0, v_0) 为相机光轴在图像像素坐标系中的位置, (f_x, f_y) 为相机焦距, (X_w, Y_w) 为世界坐标系下的点。由此可得,图 3 中图像路径参数与厢沟方程参数的关系如式(2)、(3)所示,式(2)中 A、B、D、E 均为式(3)的方程系数

$$\begin{cases} A = -\frac{f_x}{f_y} \sin \alpha \\ B = \frac{f_x \cos \alpha}{f_y h} \\ D = f_x \cos \alpha + v_0 \frac{f_x}{f_y} \sin \alpha \\ E = f_x \frac{\sin \alpha}{h} - v_0 \frac{f_x \cos \alpha}{f_y h} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases}
 k_i = AK_w + BC_w \\
 c_i = DK_w + EC_w + u_o \\
 K_w = \frac{Ek_i - Bc_i + Bu_o}{AE - BD} \\
 C_w = \frac{Dk_i - Ac_i + Au_o}{BD - AE} \\
 \beta = \arctan K_w \\
 \beta' = \arctan k_i
 \end{cases} \quad (3)$$

相机与直播机组形成固定关系,则世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 跟随直播机组运动,故厢沟在 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 中的参数也随直播组的运动而变化,以 O_w 作为直播机组运动轨迹参考点的阿克曼模型见图 4, x 轴为厢沟, y 轴表示 O_w 到 x 轴的垂直距离。直播机组速度为 v , 前轮转角为 θ , 轴间距离为 l_1 , 相机安装点在直播机组水平面上的投影点 O_w (x_{O_w}, y_{O_w}) 与后轴中心点的距离为 l_2 , $p'(x_p, 0)$ 为 x 轴与 X_w 轴的交点。由几何关系与图 3 可知,图 4 中 Y_w 轴方向与直播机组航向一致,故直播机组的航向角与厢沟在 $O_w - X_w Y_w$ 坐标系下的角度相等,同为 β 。

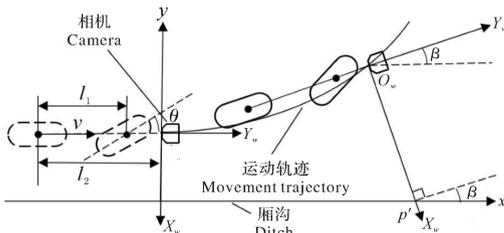


图 4 直播机组运动模型

Fig.4 Movement model of rape seeder unit

参考文献[22],结合图 4 得到以 O_w 为参考点的直播机组运动方程为:

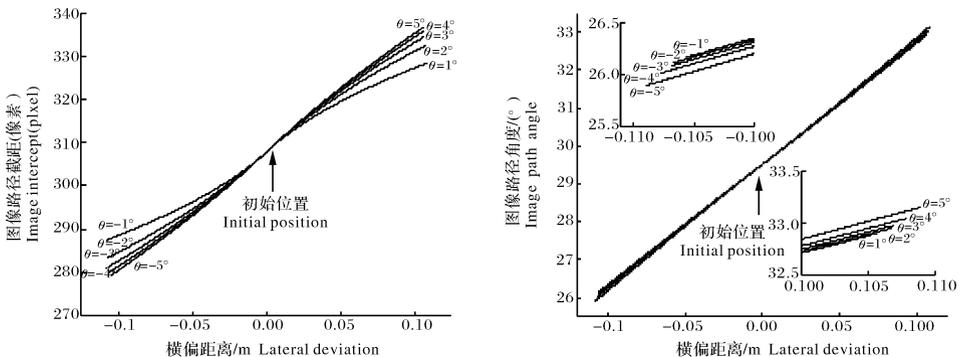
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{O_w} \\ \dot{y}_{O_w} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta - \frac{l_2}{l_1} \tan\theta \sin\beta \\ \sin\beta + \frac{l_2}{l_1} \tan\theta \cos\beta \\ \tan\theta / l_1 \end{bmatrix} v \quad (4)$$

由图 4 中的几何关系,可得厢沟方程参数 β, K_w, C_w 和点 $p'(x_p, 0)$, 点 $O_w(x_{O_w}, y_{O_w})$, 之间的关系为:

$$\begin{cases}
 K_w = \tan\beta \\
 x_p' = x_{O_w} - y_{O_w} / (\tan(\frac{\pi}{2} + \beta) x_{O_w}) \\
 C_w = O_w p' = \sqrt{(x_{O_w} - x_p')^2 + y_{O_w}^2}
 \end{cases} \quad (5)$$

结合式(2)~(5),使用 Matlab 计算从初始稳定状态开始,直播机组调整前轮转向,图像路径参数跟随直播机组运动变化的情况。设直播机组速度 $v = 1.0 \text{ m/s}$, 根据前文相机安装信息,令 $\alpha = 15^\circ, u_o = 320, v_o = 240, h = 1.5 \text{ m}$, 由直播机组参数得到 $l_1 = 2.185 \text{ m}, l_2 = 2.485 \text{ m}$, 直播机组在初始位置时, O_w 坐标为 $(0, 0.8)$, 航向角 $\beta = 0^\circ$ 。前转角调整幅度小, 设转角 θ 范围为 $[-5, 5]$ (前轮右转为负), 将上述条件代入式(2)~(5), 结果如图 5 所示, 横偏距离表示图 4 中, O_w 与厢沟距离相对初始位置变化的情况 (O_w 与厢沟减小时为负)。

由图 5 可知,前轮不同转角引起直播机位姿变化,导致图像路径发生改变有如下规律:直播机组远离厢沟时,横偏距为正值,图像检测路径的截距和角度随着直播机组远离厢沟的程度增加而增大;反之,则减小。



A: 图像检测路径截距的变化 Image measuring path's intercept trend; B: 图像检测路径角度的变化 Image measuring path's angle trend.

图 5 图像路径参数变化趋势

Fig.5 Image path parameter change trend

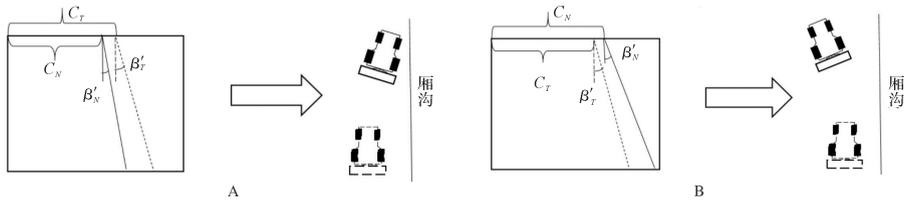
2) 模糊控制器设计。由单目视觉导航定位原理,直播机对厢作业没有偏差时,目标厢沟在图像上

的成像位置是唯一确定的,可以事先把这条路径在图像上标定出来作为图像目标路径(具体标定方法

在后文介绍),根据图像实时检测路径与图像目标路径的偏差推测直播机组的位置变化来设计模糊控制器。图像路径位置推测的直播机组的位置如图 6 所示, C_T, β'_T 分别表示图像目标路径的截距和角度, C_N, β'_N 分别表示图像实时检测路径的截距和角度,模糊控制器的输入定义为角度偏差 $\Delta\beta$ 和截距偏差 ΔC ,见式(6)。

$$\begin{cases} \Delta C = C_N - C_T \\ \Delta\beta = \beta'_N - \beta'_T \end{cases} \quad (6)$$

根据前文分析的图像路径变化规律,得到控制经验为:如图 6A 所示,当图像检测路径在图像目标路径左侧, C_T, β'_T 均减小时,表明直播机靠近厢沟,



虚线表示图像目标路径,实线表示图像检测路径。Dotted line means the image target path, solid line means the measuring path; A: 靠近厢沟时的图像路径 Approaching the ditch's image path; B: 远离厢沟时的图像路径 Stay away from the ditch's image path.

图 6 直播机组位置推测示意图
Fig.6 Seeder unit location speculation

表 1 模糊控制器规则表

Table 1 Table for fuzzy control rules

ΔC	$\Delta\beta$						
	ANB	ANM	ANS	AZO	APS	APM	APB
DNB	LB	LB	LB	LB	NA	NA	NA
DNM	LM	LM	LM	LM	NA	NA	NA
DNS	LM	LS	LS	LS	NA	NA	NA
DZO	RS	RS	RS	ZO	LS	LS	LS
DPS	NA	NA	NA	RS	RS	RS	RM
DPM	NA	NA	NA	RM	RM	RM	RM
DPB	NA	NA	NA	RB	RB	RB	RB

3)带死区的 PD 转向控制器设计。油菜直播机组田间作业时,航向的调节主要依靠前轮的转向,而前轮转向系统由电动、液压和机械等组成,且前轮与地面之间的相互作用较为复杂,影响前轮转向精度的因素较多(如土壤含水率,土壤坚实度等),故前轮转向控制的实际角度与目标角度之间会存在一定的控制死区(静态误差)。因此,本研究在设计控制算法时,当前轮转向实际角度与目标转向角度的差值小于死区宽度时,即可认为到达目标角度,这样虽然转向精度略有下降,但是可以避免转向控制时,前轮在目标角度左右的反复调节,降低转向执行机构的动作频率,减轻机械磨损。基于此,本研究选用带死区的 PD 控制器对直播机的前轮转向进行控制,计

此时 ΔC 与 $\Delta\beta$ 也随之减小,前轮应向左转,让直播机回归正常位姿状态;如图 6B 所示,当图像检测路径在图像目标路径右侧, C_T, β'_T 均增大时,表明直播机远离厢沟,此时 ΔC 与 $\Delta\beta$ 也随之增大,前轮应向右转,让直播机回归正常位姿状态。设置 $\Delta\beta$ 的论域范围为 $[-10^\circ, 10^\circ]$,其模糊子集为 $\{ANB, ANM, ANS, AZO, APS, APM, APB\}$; ΔC 的论域范围均为 $[-50, 50]$,其模糊子集为 $\{DNB, DNM, DNS, DZO, DPS, DPM, DPB\}$,前轮转角论域范围为 $[-5^\circ, 5^\circ]$,对应模糊子集为 $\{RB, RM, RS, ZO, LS, LM, LB\}$,控制规则见表 1,模糊推理规则采用重心法。

算机通过控制板卡输出 PWM 信号实现直播机的转向控制。试验研究直播机不同频率 PWM 信号下的转向速度(图 7),发现 50~900 Hz 区间内,直播机的转向速度处于上升状态,且在 900 Hz 时转向速度达到峰值。PD 控制器的输出频率采用公式(7)计算。

$$f_{PWM} = \begin{cases} 50 (0 < U_{PD} \leq 50) \\ U_{PD} (50 < U_{PD} \leq 900) \\ 900 (U_{PD} \geq 900) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, U_{pd} 为控制器计算的输出频率; f_{PWM} 为实际输出的频率。

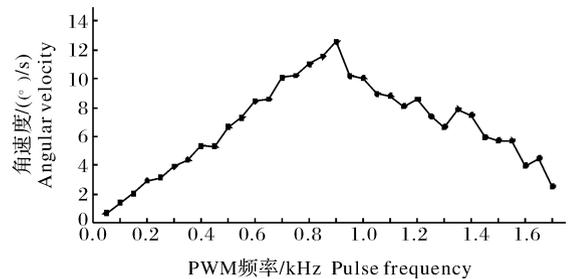


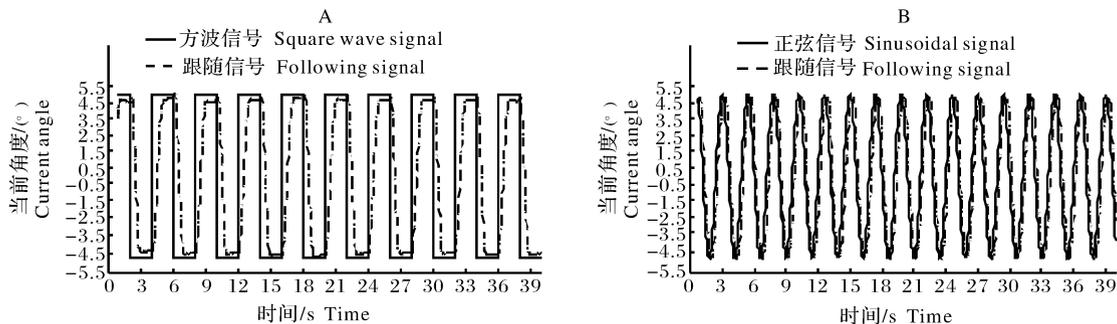
图 7 前轮转向特性曲线图

Fig.7 Front wheel steering characteristic curve

经过现场对 PD 控制器的参数进行整定选择 $P=380, D=120$,死区为 0.5,即前轮转向的控制精

度在 0.5° 以内。控制器的性能测试如图 8 所示,方波跟随测试中上升时间为 0.4 s ;前轮转向的延时时间为 80 ms ,跟踪误差为 0.5° ;正弦波跟随测试中前

轮转向的延时时间为 40 ms ,跟踪误差为 0.5° ,该转向控制器满足油菜直播机组对厢作业转向控制要求。



A:方波跟随信号 Square wave tracking signal; B:正弦跟随信号 Sine wave tracking signal.

图 8 前轮转向跟踪信号曲线

Fig.8 Front wheel steering track signal curve

2 结果与分析

控制器在平板工控电脑上采用 Visual Studio 2012 编程实现。系统的硬件安装如图 9 所示,车载平板电脑通过工业相机获取油菜田间路径图像信息,经过路径识别后进行定位;NI 数据采集卡输出 PWM 信号控制前轮转向,同时采集角度传感器电压信号获取直播机前轮转角位置信息。

线度较好且能够进行图像识别的路径,在前轮大概处于中位时让角度传感器的输出电压在 5 V 左右(传感器输出电压为 $0\sim 10\text{ V}$ 对应于 $0\sim 70^\circ$),然后人为驾驶直播机沿路径边缘行驶,在行驶稳定后的 20 s 内,记录下图像路径中竖直坐标分别为 120 、 240 、 360 等三点的横坐标值以及角度传感器的输出电压。最后对记录的数据进行处理:先计算传感器输出电压的平均值和方差,当方差小于 0.07 V 时,表明前轮转向波动小于 0.5° ,满足前轮中位标定精度要求。在前轮中位标定准确的基础上再进行目标路径的标定,为避免路径识别过程中个别噪声点的影响,采用随机抽样一致性算法和最小二乘法相结合来拟合目标路径。如果中位标定不准确,则表明目标路径的标定肯定也不准确,则需要按上述方法进行重新标定三点的横坐标值以及角度传感器的输出电压。



1.电脑+NI 数据采集卡 Computer and data collection card;
2.改造的油路 Modified oil circuit; 3.转向执行机构 Steering implement mechanism; 4.工业相机 Industrial camera; 5.角度传感器 Angle sensor.

图 9 对厢作业控制试验平台

Fig.9 Working on line control test platform

2.1 图像目标路径与前轮中位标定

根据油菜直播机组田间作业播种区与未播种区颜色对比度大的特点,使用旋转投影法^[23]对采集的每幅图像进行旋转变换,寻找图像列和的突变极值点来进行田间厢沟线的识别。由于每次试验时,摄像头和角度传感器的安装位置不尽相同,需要对直播机前轮转向的中位和目标厢沟在图像中的位置进行标定。中位与目标路径标定同时进行,标定方法参考文献^[24],采用如下方法进行:首先选择一段直

2.2 路面直线跟踪试验

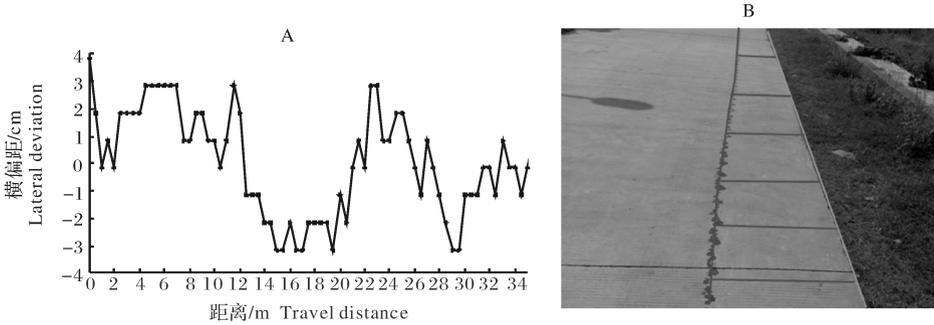
路面试验选择在华中农业大学试验田的一条水泥路面上进行,通过固定在直播机组尾部的水瓶滴水的方法记录直播机在水泥路面的行驶轨迹。借助钢卷尺每隔 0.5 m 测量 1 次水滴与水泥路边沿的距离;试验时人为控制直播机的行驶在中 II 档,行驶速度约为 0.8 m/s 。试验结果如图 10 所示,可以发现路面直线追踪的最大横向偏差为 3.5 cm ,平均横向偏差距离为 2.2 cm 。

2.3 田间对厢作业直线跟踪试验

田间试验选择在华中农业大学一块试验田中进行,导航行驶距离为 25 m 。试验中分别让直播机以 0.5 、 0.8 、 1.0 m/s 的速度行驶,测试直播机组田间视

觉导航的横偏误差,试验结果见图 11。在 0.5 与 1.0 m/s 时,在直播机组初始位置有偏差的情况下,可以回归到稳定导航状态,可见本研究设计的导航控制

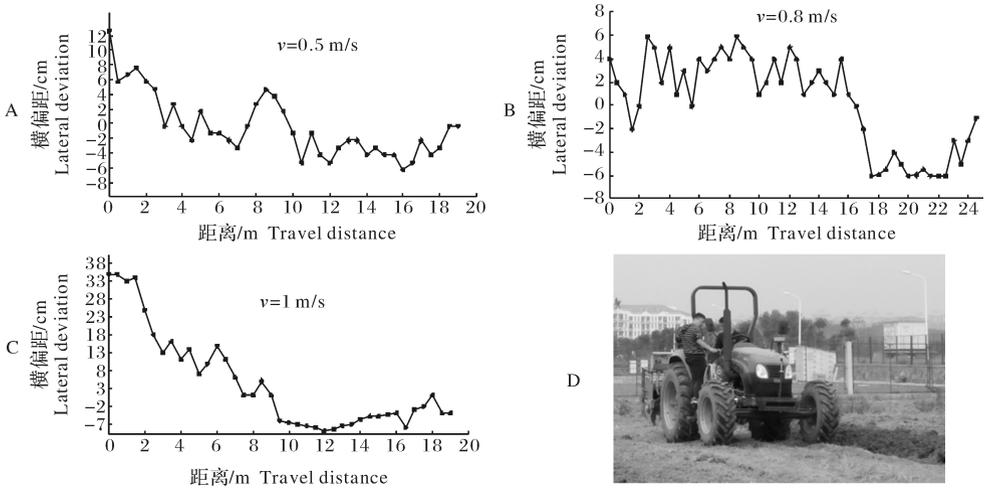
系统具有可行性,在 0.5 或 0.8 m/s 的速度下田间导航横偏距小于 6 cm,在 1.0 m/s 的速度下田间导航的横偏距能够控制在 10 cm 以内。



A: 横向偏差曲线 Lateral deviation curve; B: 路面试验现场 Pavement experimental side.

图 10 路面跟踪试验

Fig.10 Road tracking test results



A: $v=0.5$ m/s 的横偏距 Lateral deviation while $v=0.5$ m/s; B: $v=0.8$ m/s 的横偏距 Lateral deviation while $v=0.8$ m/s; C: $v=1.0$ m/s 的横偏距 Lateral deviation while $v=1.0$ m/s; D: 田间试验现场图 Fields experimental side.

图 11 田间试验结果

Fig.11 Road tracking test results

3 讨论

本研究针对油菜直播机组田间对厢作业设计了一种模糊控制器和带死区的 PD 控制器相结合的控制策略,该控制器硬件部分采用 NI 数据采集卡、平板电脑、相机等实现,软件采用 C++ 与 OpenCV 结合编程实现。通过结合相机成像模型和直播机阿克曼转向模型分析图像中路径跟随直播机位姿变化的规律。由此设计了以图像路径与图像目标路径位置偏差未输入的模糊控制器用于路径跟踪;在分析前轮转向特性的基础上,设计了带死区的 PD 转向控制器,获得了控制精度为 0.5° 的控制效果。通过路面试验和田间试验验证了该组合控制器的性能。路面

试验表明,油菜直播机组在水泥路面上以 0.8 m/s 的速度进行导航时,横偏距可以控制在 4 cm 以内。田间试验表明,油菜直播机组在以 0.5 m/s 和 0.8 m/s 的速度进行导航时,横偏距可以控制在 6 cm 以内,在以 1.0 m/s 的速度进行导航时,横偏距可以控制在 10 cm 以内。下一步还需引入测量速度的传感器,对控制器的田间速度适应性进行研究。研究结果表明,田间的滑移对于纠偏控制的精度具有较大的影响,下一步还需要建立轮地动力学模型参与到导航控制器中,以提高导航精度。

参 考 文 献

[1] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动导航技术研究进展

- [J].农业工程学报,2015,31(10):1-10.
- [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):102-103.
- [3] 周雅文,丁幼春,杨军强,等.油菜直播机导航路径识别方法研究[J].华中农业大学学报,2016,35(3):128-133.
- [4] 李建平,林妙玲.自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J].农业工程学报,2006,22(2):232-236.
- [5] HIREMATH S, EVERT F K V, BRAAK C T, et al. Image-based particle filtering for navigation in a semi-structured agricultural environment [J]. *Biosystems engineering*, 2014, 121(2):85-95.
- [6] 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.
- [7] 汤一平,王伟羊,朱威,等.基于机器视觉的茶陇识别与采茶机导航方法[J].农业机械学报,2016,47(1):45-50.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 迟德霞.水稻插秧机视觉导航系统设计与路径追踪试验[D].沈阳:沈阳农业大学,2015.
- [11] 安秋.农业机器人视觉导航系统及其光照问题的研究[D].南京:南京农业大学,2008.
- [12] 孟庆宽.基于机器视觉的农业车辆—农具组合导航系统路径识别及控制方法研究[D].北京:中国农业大学,2014.
- [13] 徐德.机器人视觉测量与控制[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [14] 李金屏,修择,吕玉彬,等.基于虚拟定标线的巡检机器人视觉导航[J].中国体视学与图像分析,2011(1):50-56.
- [15] 厉广伟,夏英杰,李金屏.变电站巡检机器人视觉导航模糊控制[J].济南大学学报(自然科学版),2011,25(1):31-35.
- [16] 张铁民,庄晓霖.基于DM642的高地隙小车的田间路径识别导航系统[J].农业工程学报,2015,31(4):160-167.
- [17] 李林,魏新华,朱文静,等.宽幅施药机械机器人视觉辅助导航系统研究[J].农业机械学报,2015,46(9):28-33.
- [18] 余厚云,张为公.直线模型下的车道线跟踪与车道偏离检测[J].自动化仪表,2009,30(11):1-3.
- [19] 田波平,廖庆喜,黄海东,等.2BFQ-6型油菜精量联合直播机的设计[J].农业机械学报,2008,39(10):211-213.
- [20] 张闻宇,丁幼春,廖庆喜,等.拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(3):43-50.
- [21] 于仕琪,刘瑞祯.学习OpenCV[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [22] 徐德,邹伟.室内移动机器人服务式机器人的感知、定位与控制[M].北京:科学出版社,2008.
- [23] 丁幼春,王书茂,陈度.基于图像旋转投影的导航路径检测算法[J].农业机械学报,2009,40(8):155-160.
- [24] 丁幼春,廖庆喜,黄海东,等.联合收获机视觉导航控制器设计[J].农业机械学报,2011(S1):239-243.

Design and implementation of the operation controller for rape seeder unit on the row

DING Youchun YANG Junqiang SHU Caixia HE Zhibo
PENG Jingye XIA Zhongzhou ZHOU Yawen

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Visual navigation of rape direct seeder unit can improve the intelligent and reduce labor intensity, so a visual navigation controller which was made up of fuzzy controller and PD controller with dead zone was proposed. The fuzzy controller was used to track path, and PD controller with dead zone control the front wheel steering. Through the two wheel ackerman steering model and camera imaging model, the law of image detection path changing with the rape seeder unit pose changes was got. Through the law, fuzzy controller rules can be designed. Image target path in the image was determined when the rape direct seeder distance the target ditch in the right place. And, the angle error and intercept error between image real-time detection path and image target path were the input of fuzzy controller. The output of fuzzy controller was front-wheel target steering angle. PD controller with dead zone was used to control front wheel angle. The field test results show that: the maximum lateral deviation was less than 6 cm when the speed of rape seeder was 0.5 m/s and 0.8 m/s, and the maximum lateral deviation was less than 10 cm when the speed is 1.0 m/s.

Keywords rape seeder; operation on row; track path; fuzzy controller; PD controller

(责任编辑:陆文昌)