

# 自主跟随车辆航向控制系统\*

丁永前 王致情 林相泽 毕伟平 林小兰 薛金林

(南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031)

**摘要:** 提出了一种基于红外传感器检测相对航向角的车辆自主跟随控制系统建模和设计方法,对相对航向角的检测机构及其工作原理进行了介绍,重点讨论了基于步进电动机驱动的转向控制系统的建模方法、前轮转向角和航向角之间的关系以及相应的控制算法的设计,航向角控制系统模型的 Matlab 仿真结果和控制系统的实际运行结果高度吻合。结合自主改装的电动车自主跟随系统在果园路径进行了实验,实验过程中,引导车和跟随车行驶路径之间的最大横向偏差为 9.2 cm,平均偏差为 3.3 cm,方差为 5.5 cm<sup>2</sup>。实验结果表明,基于红外传感器的车辆自主跟随控制系统能实现车辆的自主跟随,系统运行稳定可靠,体现出其在复杂农业环境中的应用前景。

**关键词:** 车辆自主跟随 航向角 控制系统 红外传感器

**中图分类号:** S123; TP702 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0008-06

## Heading Control System of Autonomous Following Vehicle

Ding Yongqian Wang Zhiqing Lin Xiangze Bi Weiping Lin Xiaolan Xue Jinlin

(Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** A kind of control system modeling and designing method for autonomous following vehicle was provided according to the relative heading angle detected by infrared sensors. The device and working principle of relative heading angle detecting device were introduced in detail. The control system modeling of the steering system driven by a stepper motor, dynamic relationship between front-wheel steering angle and relative heading angle, and the corresponding control algorithm design of the whole control system were mainly discussed. The Matlab simulation results of relative heading angle control system were highly consistent with the practical running results of the control system. The autonomous following vehicle system which was modified from electric-driven vehicles was tested in an orchard. During the test, the biggest lateral deviation of the tracks between the guiding vehicle and the following vehicle was 9.2 cm, the average deviation was 3.3 cm and the variance was 5.5 cm<sup>2</sup>. The experimental results showed that the designed autonomous following vehicle system can run stably and reliably, reflected its application prospects in complex agricultural environment.

**Key words:** Vehicle autonomous following Heading angle Control system Infrared sensor

### 引言

农业生产中自主车辆导航方式主要有 GPS 导航和路标导航<sup>[1-4]</sup>。GPS 导航精度受到视野中卫星的几何分布状况、星历误差、时钟误差、传播误差、多路径误差以及接收机噪声等因素影响<sup>[5]</sup>,同时其可靠性也受到高大树木、山坡以及建筑物等因素影

响<sup>[6]</sup>。路标导航主要运用机器视觉技术和激光雷达扫描技术识别作物行、垄等自然路标<sup>[7-10]</sup>,但路径特征的丢失(如植株的缺失、大面积杂草出现及路标环境杂乱复杂)和视觉传感器自身局限性(如动态范围、分辨率、漂移及噪声)及户外使用约束条件(如光照)等都可能路标导航失效<sup>[11]</sup>。

车辆引导与自主跟随能弥补自主导航车辆的智

收稿日期: 2014-02-26 修回日期: 2014-03-29

\* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201127)和江苏省农机局-南京农业大学工学院科研启动基金资助项目(6KH-0603)

作者简介: 丁永前,副教授,博士,主要从事农业信息化和自动化研究,E-mail: yongqiand@njau.edu.cn

能不足,并提高安全性。国内外对车辆跟随控制和人机协同研究已取得一定成果<sup>[12-14]</sup>。但是,实现主-从跟随控制大多数采用机器视觉、GPS、激光扫描等多传感器融合技术,成本高昂且结构复杂,在农业领域的相关研究较少。

小型电动车相比拖拉机体积小,车身矮,在果园环境中作业时具备良好的通过性能,避免果树枝叶和果实遭受损伤,同时电动车没有尾气污染,作业更加环保,在实际中有较好的应用前景。本文以自主改装的 2 辆小型电动车构建了车辆自主跟随系统,开展在果园环境下的车辆自主跟随研究,在参考车辆速度、转向和跟随导航控制研究成果的基础上<sup>[15-19]</sup>,设计一套基于红外传感器的车辆自主跟随控制系统,并提出相应的控制算法。

## 1 材料与方法

### 1.1 车辆跟随运动学模型

农用车作业时纵向速度较小,一般保持恒速作业,没有剧烈的转向行为。本文设计的自主跟随车辆主要应用在诸如果园等路面硬度较大的作业环境中,轮胎和车体侧滑等因素对车辆运动的影响较小,因此可以将车辆运动学模型简化为二轮单车模型<sup>[20]</sup>。跟随车辆运动学分析如图 1 所示,当引导车辆与跟随车辆之间产生角度为  $\theta$  的相对航向偏角时,跟随车需要通过控制前轮偏转使相对航向偏角  $\theta$  趋向于  $0^\circ$ ,以实现跟随。图中虚线矩形轮廓代表车辆假想的两轮模型, $O$  为跟随车的速度瞬心。

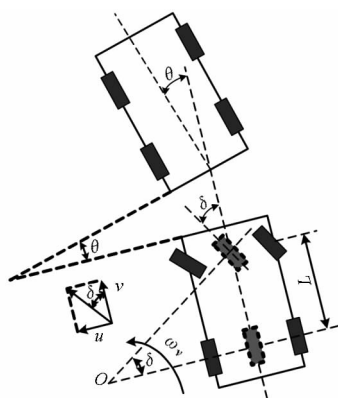


图 1 跟随车辆运动学分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the following vehicle for kinematical analysis

图 1 中, $L$  为跟随车前后轮轴距, $m$ ;  $\theta$  为引导车和跟随车相对航向偏角,rad;  $\delta$  为跟随车前轮偏转角,rad;  $\omega_v$  为跟随车的角速度,rad/s;  $v$  为跟随车的纵向速度,m/s;  $u$  为跟随车的横向速度,m/s。

根据运动学理论可以得出计算关系式

$$u = L\omega_v = v \tan \delta \quad (1)$$

$$\omega_v = \frac{v}{L} \tan \delta \quad (2)$$

## 1.2 系统硬件实现

### 1.2.1 控制系统结构

自主跟随车辆航向控制硬件系统由核心控制器、检测机构和转向控制机构 3 部分构成,硬件系统结构如图 2 所示。其中,数字信号处理器 TMS320F28335 作为核心控制器;检测机构实现前轮转角和两车间航向偏角的检测;转向控制机构采用步进电动机配合链轮传动机构带动方向盘旋转实现车辆转弯。自主跟随系统实物如图 3 所示。

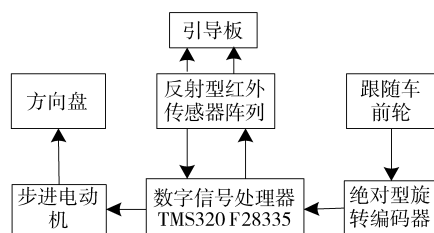


图 2 控制系统结构图

Fig. 2 Schematic diagram of control system



图 3 自主跟随车系统

Fig. 3 Autonomous following vehicles system

### 1.2.2 检测系统

为了实现车辆的航向跟随控制,需要检测前轮转角  $\delta$  和两车相对航向偏角  $\theta$  2 个物理量。

#### 1.2.2.1 前轮转角检测

前轮导向轴上安装绝对型旋转编码器,实际转向时前轮偏转角度与导向轴旋转的角度相等,编码器通过检测导向轴的旋转角间接获取前轮转角,如图 4 所示。绝对型旋转编码器电压输出量程为  $0 \sim 5 \text{ V}$ ,对应测量角度为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,数字信号处理器 TMS320F28335 的 AD 模块采集绝对型旋转编码器的输出电压,通过计算可以获知前轮转角。

#### 1.2.2.2 航向偏角检测

相对航向偏角检测装置结构如图 5 所示,跟随车前端安装反射型红外传感器,红外传感器分左右对称布置,并相隔一定间距,引导车后端安装有反射板,初始对中后,反射板尺寸长于红外传感器安装尺寸,此时所有传感器均能接收到反射信号,当引导车

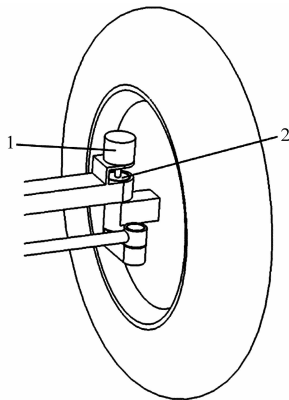


图4 前轮转角检测机构

Fig. 4 Detecting mechanism for front wheels' turning angle

1. 绝对型旋转编码器 2. 导向轴

和跟随车产生航向偏角时,安装在跟随车上左右两侧的红外传感器将根据转向的变化和偏角的增大而逐步丢失反射信号,根据红外传感器的安装位置可以获知相应的偏角度,实现航向偏角的检测。

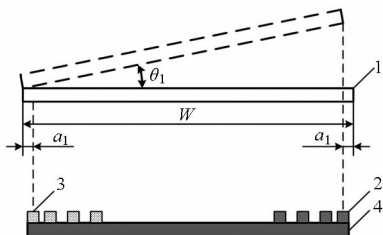


图5 相对航向偏角检测机构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of detecting relative heading angle

1. 反射板 2. 右侧红外传感器 3. 左侧红外传感器 4. 安装板

如图5所示,当引导车左转,最右侧红外传感器最先丢失反射信号,其对应的偏角 $\theta_1$ 计算式为

$$\theta_1 = \arccos \frac{W - a_1}{W} \quad (3)$$

式中  $W$ ——引导车反射板宽度, m

$a_1$ ——跟随车前端传感器与引导板外端的距离, m

本文涉及的检测装置,左右两侧分别安装了4个反射型红外传感器,设定分别检测跟随车与引导车在航向(左右)方向产生的4个离散偏转角度:  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 。左右两侧8个红外传感器的安装原理是:以最右侧红外传感器为例,由图5所示其对应的偏转角检测值 $\theta_1$ 为 $5^\circ$ ,结合反射板宽度 $W$ ,由式(3)反推计算可得 $a_1$ 的值,根据 $a_1$ 的值确定最右侧红外传感器的安装位置,同理可确定其他7个红外传感器的安装位置。确定了8个红外传感器的安装位置,则在实际自主跟随过程中,每个红外传感器对应着一个确定的偏转角度。

反射板在垂直方向有足够宽度,保证红外传感

器不会由于车辆颠簸产生垂直方向运动而丢失反射信号。同时为了避免红外反射信号引起多个传感器接收响应,红外传感器采用周期扫描的工作方式,确保每个采样时刻只有一个传感器工作,主控制器以0.1 s为扫描周期完成8个红外传感器的输出状态检测,实时获取航向偏角。

### 1.3 跟随车辆航向控制系统建模

车辆跟随时,若两车保持相同的行驶速度,则车辆跟随问题实质上是航向跟随问题,航向跟随主要是解决引导车与跟随车之间相对航向偏角 $\theta$ 的消除问题,跟随车角速度 $\omega_r$ 的控制规律将决定消除航向偏角的控制品质,由式(2)可知,跟随车辆的角速度大小取决于前轮转角的大小,由此可知,转向系统控制问题的本质是制定合适的前轮转角控制规律。

#### 1.3.1 转向系统模型

转向系统采用步进电动机驱动,驱动步进电动机时采用固定转速的运行方式。由于步进电动机具备精确定位功能,在驱动力矩足够的前提下,对步进电动机的控制实际上只是开关控制,构成闭环控制时,偏差的极性决定电动机的旋转方向,因此,其运行方式具有典型的继电器特征,为了减少电动机在目标值附近的颤振现象,可以人为限定一个最小偏差允许范围,此时,步进电动机的运行方式具有带死区的继电器特征。实际系统中步进电动机通过传动机构带动前轮转动,步进电动机的角速度和前轮转向角速度之间可以近似看成线性关系,理论上通过积分运算可以计算出前轮的转向角,但在实际应用时,前轮立式转轴上安装了绝对编码式角度传感器,可以消除积分累积误差。若前轮的转向角速度为 $\omega_r$ ,则步进电动机驱动下的转向系统闭环结构框图可以表达为图6的形式。图6中, $R$ 为前轮目标控制转角,rad。

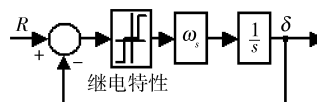


图6 转向系统闭环控制结构框图

Fig. 6 Closed-loop control structure diagram of steering system

#### 1.3.2 车辆航向跟随控制系统模型

由式(2)可知,前轮转角与车辆整体角速度之间存在明确的解析关系,图7所示的结构框图表达了前轮转角和车辆航向角之间的动态传递关系。图中, $\beta$ 为车辆的航向偏角,rad。

图7所示的结构框图只是一种开环结构,要精确控制车辆的航向角,实现车辆的跟随,需要将引导车和跟随车之间的相对航向偏角作为跟随车控制系

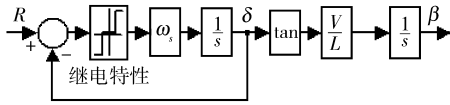


图 7 前轮转角和航向角传递关系

Fig. 7 Transfer relationship of heading angle and front wheels' turning angle

系统的控制目标,使跟随车在转向系统的作用下产生航向偏转以消除相对航向偏差,闭环控制系统结构框图可以表示成图 8 所示形式。根据图 8 所示的控制结构,控制系统的设计转化为控制器的设计,即建立跟随车实际航向偏角  $\beta$  和目标偏角  $\theta$  之间偏差  $e$  与前轮偏角之间的传递关系。

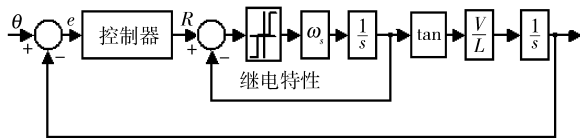


图 8 航向跟随闭环控制系统结构框图

Fig. 8 Closed-loop control structure diagram of heading angle following system

### 1.3.3 控制器设计

从图 8 所示的控制系统结构分析,系统包含带死区继电器特性单元和正切函数单元 2 个非线性环节,将控制器等效成单位比例环节时,系统闭环总体呈现二阶系统特征,由于非线性环节的影响,系统运行特征会随着运行状态的变化而变化。根据控制理论知识可知,采用比例控制器(P 控制器)或比例微分控制器(PD 控制器)可以保持系统稳定,但在控制器中引入积分控制量将导致系统不稳定,本文采用比例微分控制器,并通过 Matlab 仿真确定控制器的控制参数。图 9 为采用 PD 控制器的闭环控制结构框图,图中线性饱和环节是考虑前轮转向角的极限值,当控制器产生的前轮转角目标值超出转角极限值时起限位作用。图 9 中,  $K_p$  为比例控制系数,  $K_p > 0$ ;  $K_d$  为微分控制系数,  $K_d > 0$ 。

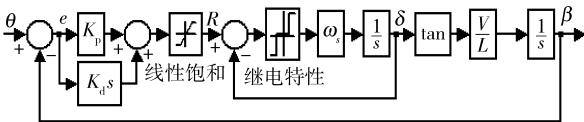


图 9 航向跟随 PD 闭环控制系统结构框图

Fig. 9 Closed-loop control structure diagram of the heading angle following system with PD controller

### 1.3.4 控制系统仿真

控制系统进行仿真需要跟随车行驶速度  $v$  和前轮转向角速度  $\omega_s$  2 个参数,行驶速度  $v$  使用农业作业车常用速度 3 km/h。为了确定前轮转向角速度  $\omega_s$ ,进行了步进电动机驱动下的前轮转角响应实验,其中向右偏转转角为正,向左偏转为负。实验结果

如图 10 所示,由图 10 拟合直线的方程可知前轮转向角速度  $\omega_s$  为 0.16 rad/s。

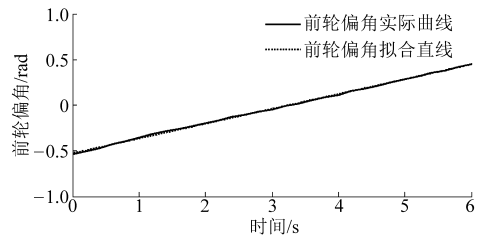


图 10 步进电动机驱动下前轮偏角响应

Fig. 10 Front wheels' turning angle response driven by stepping motor

控制系统仿真中的目标航向偏角设定为本系统航向偏角检测装置检测的最小值  $5^\circ$  和最大值  $20^\circ$ ,基于性能指标<sup>[21]</sup>,整定比例微分控制器的结构参数  $K_p$  和  $K_d$ ,调试出目标航向偏角分别为  $5^\circ$  和  $20^\circ$  的仿真结果如图 11 和图 12 所示,对应控制器的结构参数  $K_p$  为 2.7,  $K_d$  为 0.8。图 11 中阶跃响应的调节时间为 3 s,无超调;图 12 中阶跃响应的调节时间为 3.1 s,超调量小于 5%。

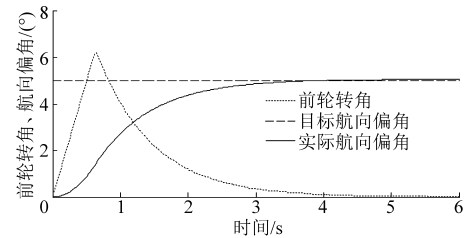


图 11  $5^\circ$  目标航向偏角阶跃仿真响应

Fig. 11 Simulation step response of heading angle in a  $5^\circ$  target

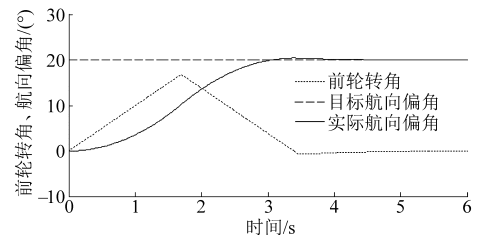


图 12  $20^\circ$  目标航向偏角阶跃仿真响应

Fig. 12 Simulation step response of heading angle in a  $20^\circ$  target

### 1.4 跟随车辆航向控制算法实现

控制目标  $\theta$  来源于航向角检测装置提供的 4 个离散目标值,控制系统的反馈量  $\beta$  (也是控制系统达到的控制效果)需要通过模型运算给出,如图 9 所示的闭环控制结构中,内环前轮转角  $\delta$  的获取实际不需要进行积分运算,可以通过转角编码传感器实时获取,跟随车的航向偏角  $\beta$  需要根据  $\delta$  值和车辆的纵向速度  $v$  进行积分运算获取。当航向角检测装置产生可检测值时,开始对前轮施加转向控制作用,

而控制作用的撤销需要同时满足3个条件:①所有红外传感器接收到反射信号。②航向偏角 $\beta$ 值与控制目标 $\theta$ 的差值绝对值小于设定的阈值 $\Delta_0$ 。③前轮偏角量值小于设定的阈值 $\Delta_1$ 。

控制算法流程如图13所示。

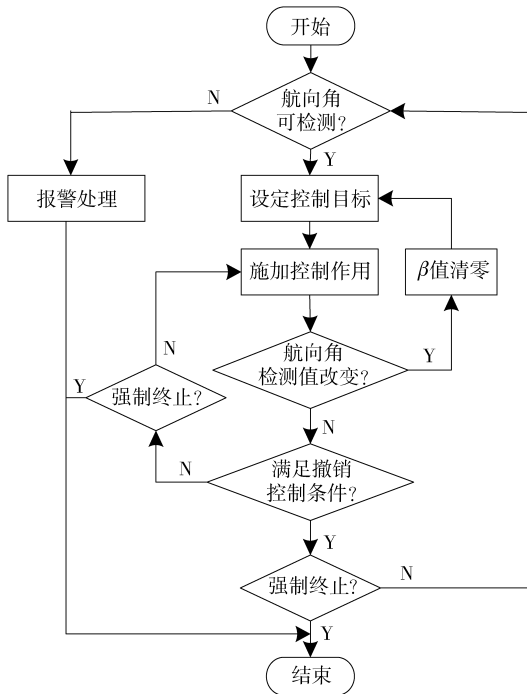


图13 控制算法流程图

Fig. 13 Flow chart of control algorithm

## 2 实验结果分析

### 2.1 转向系统控制实验

车辆实际运行时很难保持特定的运行状态,无法完成跟随控制系统的阶跃响应实验,为此,在实验室进行了虚拟跟随控制实验,由控制程序设定目标航向偏角和虚拟的车辆行驶速度,控制转向系统运行,并根据图9所示的控制系统模型推算跟随车辆的航向角变化情况,控制周期为0.1s。图14、15给出了目标航向偏角分别为 $5^\circ$ 和 $20^\circ$ ,运行速度设定为3 km/h时的实验结果。图14所示的阶跃响应调节时间为2.9s,无超调;图15所示的阶跃响应调节时间为3.3s,超调量小于5%。图14和图15表明,控制系统的转向实际控制与仿真基本一致,且控制效果较好。

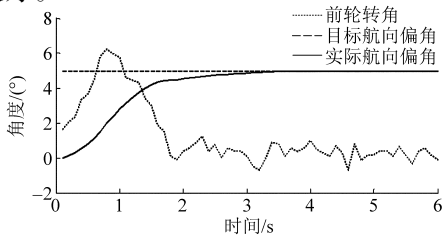


图14  $5^\circ$ 目标航向偏角的阶跃响应

Fig. 14 Heading angle step response in a  $5^\circ$  target

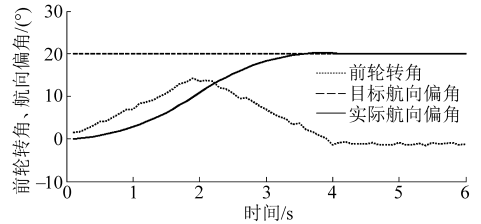


图15  $20^\circ$ 目标航向偏角的阶跃响应

Fig. 15 Heading angle step response in a  $20^\circ$  target

### 2.2 自主跟随实验

2014年1月在南京农业大学江浦农业实验基地的果园进行了自主跟随实验,引导车由人遥控驾驶,跟随车在其后自主跟随,设定引导车和跟随车的行驶速度为3 km/h,两车通过速度闭环控制系统实现恒速行驶,本文主要研究自主跟随车辆的航向控制,因此不对车辆速度控制系统的设计与实现作具体分析介绍。跟随车的控制响应如图16所示,引导车与跟随车的行驶速度如图17所示,为了有效评估自主跟随性能,实验使用RTK-DGPS定位系统

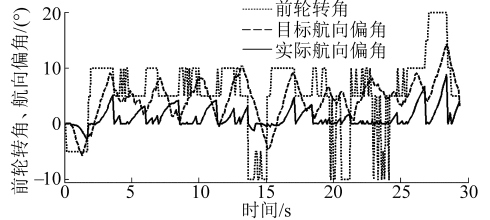


图16 自主跟随车果园路径跟随响应曲线

Fig. 16 Control response of the following vehicle in an orchard track

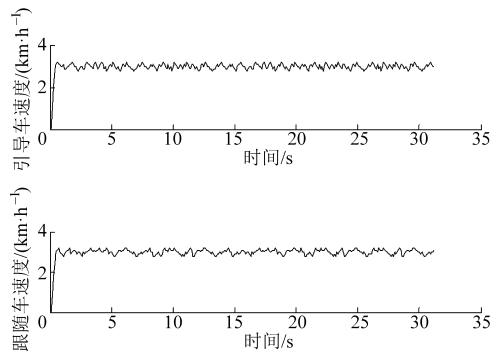


图17 引导车与跟随车行驶速度

Fig. 17 Speed of the guiding vehicle and the following vehicle

(cm级精度)记录两车的行车轨迹,通过UTM计算将轨迹的球体坐标转换为大地平面坐标,并以跟随车初始位置为大地平面坐标原点,两车行驶路径如图18所示,跟随车路径与引导车路径的横向偏差如图19所示,其中横向偏差为跟随车当前行驶点至引导车行驶点切线方向的距离。图16表明:跟随车能随着引导车航向的变化调整航向,使其与引导车航向保持基本一致跟随行驶;图17表明:引导车和跟

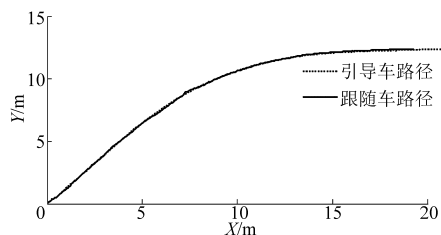


图 18 引导车与自主跟随车行车轨迹

Fig. 18 Recorded tracks of the guiding vehicle and the autonomous following vehicle

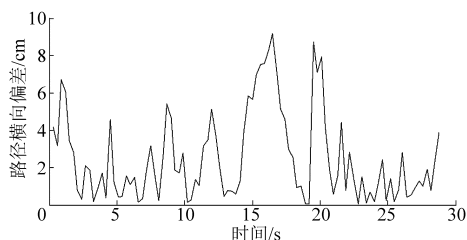


图 19 引导车与跟随车路径横向偏差

Fig. 19 Track lateral deviation between the guiding vehicle and the following vehicle

随车行驶速度相对波动率小于 10%，能够保持基本恒定；图 18 中两车路径最大横向偏差为 9.2 cm，平均偏差为 3.3 cm，方差为 5.5 cm<sup>2</sup>。实验结果整体说明文中提出的控制模型和控制算法正确有效。

### 3 结束语

应用红外传感器检测车辆跟随系统相对航向偏角，应用绝对编码器实现前轮偏角的测量，应用步进电动机实现前轮偏角的控制，设计了一种电动车辆自主跟随控制系统，并对该控制系统进行了理论建模、控制算法设计和相应的果园环境控制实验。实验过程中基于红外传感器的检测装置能有效实现相对航向偏角的检测，所设计的控制算法能有效控制跟随车辆的前轮偏转，实现车辆的自主跟随，跟随车辆和引导车辆轨迹之间的横向平均偏差为 3.3 cm，方差为 5.5 cm<sup>2</sup>。实验结果表明：本文提出的硬件系统、建模方法和控制算法能够实现车辆的自主跟随，体现了其在实际果园作业中的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2):155-167.
- 2 Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2):169-194.
- 3 Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25(1-2):133-153.
- 4 Li Ming, Imou K, Wakabayashi K, et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(3):1-16.
- 5 Zhang Q, Reid J F, Noguchi N. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors[C]//Proceeding of International Conference on Field and Service Robotics, 1999: 293-298.
- 6 Yoshisada Nagasaka, Naonobu Umeda, Yutaka Kanetai, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,43(1-2): 223-234.
- 7 Pinto F A C, Reid J F, Zhang O, et al. Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principle component analysis [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2000,75(3):257-264.
- 8 Torii T, Kitade S, Teshima T. Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000,62(2):41-48.
- 9 Barawid O C Jr, Akira Mizushima, Kazunobu Ishii, et al. Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application[J]. Biosystems Engineering, 2007,96(2):139-149.
- 10 刘沛,陈军,张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制[J]. 农业工程学报,2011,27(3):196-199.  
Liu Pei, Chen Jun, Zhang Mingying. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(3):196-199. (in Chinese)
- 11 周俊,姬长英. 自主车辆导航系统中的多传感器融合技术[J]. 农业机械学报,2002,33(5):113-116.  
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(5):113-116. (in Chinese)
- 12 Iida M, Kudou M, Ono K, et al. Automatic following control for agricultural vehicle[R]. Laboratory of Farm Machinery Graduate School of Agriculture, Kyoto University,2000.
- 13 Noboru Noguchi, Jeff Will, John Reid, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,44(1-2): 1-19.
- 14 彭新荣. 基于智能小车平台的多车协作研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- 15 麻博. 车辆自动驾驶中的速度跟踪控制策略研究[D]. 太原:中北大学,2008.
- 16 方凯. 电动车辆控制器系统设计及控制策略的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.

- 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)
- 6 郭娜, 胡静涛, 王鹤. 基于 GPS 导航的插秧机作业控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 200 - 204.  
Guo Na, Hu Jingtiao, Wang He. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 200 - 204. (in Chinese)
- 7 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95 - 97.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 95 - 97. (in Chinese)
- 8 Kise M, Zhang Q, Noguchi N, et al. Obstacle detection using laser range finder for autonomous agricultural machinery [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3): 1269 - 1278.
- 9 Aziza M, Arafa O, Sanaa I. Microcontroller-based mobile robot positioning and obstacle avoidance [J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2014, 1(1): 58 - 71.
- 10 张磊, 王书茂, 陈兵旗, 等. 基于双目视觉的农田障碍物检测[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(4): 70 - 74.  
Zhang Lei, Wang Shumao, Chen Bingqi, et al. Detection of obstacles in farmland based on binocular vision [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(4): 70 - 74. (in Chinese)
- 11 Belhouche F, Rastgoufard P. Line of sight robot navigation toward a moving goal [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2006, 36(2): 255 - 267.
- 12 Jung E J, Lee J H, Yi B J, et al. Development of a laser-range-finder-based human tracking and control algorithm for a marathoner service robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(6): 1963 - 1976.
- 13 Rezaee H, Abdollahi F. A decentralized cooperative control scheme with obstacle avoidance for a team of mobile robots [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 347 - 354.
- 14 Chaoxia S, Yanqing W, Jingyu Y. A local obstacle avoidance method for mobile robots in partially known environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(5): 425 - 434.
- 15 Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564 - 575.
- 16 Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603 - 619.
- 17 Isard M, Blake A. Condensation-conditional density propagation for visual tracking [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 29(1): 5 - 28.
- 18 Crisan D, Doucet A. A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(3): 736 - 746.
- 19 Jain R, Kasturi R, Schunck B G. Machine vision[M]. New York: McGraw Hill, 1995.

~~~~~

(上接第 13 页)

- 17 陈无畏, 施文武, 王启瑞, 等. 新型自动引导车导航与控制系统[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 70 - 73.  
Chen Wuwei, Shi Wenwu, Wang Qirui, et al. A new navigation and control system for an automatic guided vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 70 - 73. (in Chinese)
- 18 陈军, 鸟巢谅, 朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 104 - 107.  
Chen Jun, Torisu Ryo, Zhu Zhongxiang. Study on automatic guidance for tractor on grassland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 104 - 107. (in Chinese)
- 19 周建军, 张漫, 汪德华, 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)
- 20 Benson E, Stombaugh T, Noguchi N, et al. An evaluation of a geomagnetic direction sensor for vehicle guidance in precision agriculture applications[C]//ASAE Paper, 983203, 1998.
- 21 张美娜, 林相泽, 丁永前, 等. 基于性能指标的农用车辆路径跟踪控制器设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 40 - 46.  
Zhang Meina, Lin Xiangze, Ding Yongqian, et al. Design of path following controllers based on performance index for agricultural vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 40 - 46. (in Chinese)