

# 扰动下农用运输车辆路径跟踪控制器设计与试验

刘正铎<sup>1,2</sup> 张万枝<sup>1,2</sup> 吕钊钦<sup>1,2</sup> 郑文秀<sup>1,2</sup> 穆桂脂<sup>1,2</sup> 程向勋<sup>1,2</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

**摘要:** 为提高农用运输车辆路径跟踪的鲁棒稳定性, 基于线性模型预测控制结合农用运输车辆特点设计了路径跟踪控制器。该方法首先将农用运输车辆的运动学模型进行离散化求解, 推出误差模型作为控制器预测方程, 为使农用运输车能够克服在田间行驶时的各种干扰, 通过构建李雅普诺夫函数重点分析了该模型的鲁棒稳定性, 得到控制周期约束条件, 然后建立目标函数并引入松弛因子, 最后把预测模型代入目标函数进行优化求解, 重复以上过程, 实现优化控制。Matlab 仿真表明: 当前轮转角扰动不大于  $15^\circ$  及横向扰动不大于 1.5 m 时, 控制器可以迅速起到调节作用, 使车辆快速回到参考轨迹上行驶。对应的场地试验结果表明: 试验小车以 2 m/s 的速度跟踪参考路径时, 直线路段跟踪效果良好, 最大横向偏差为 10.57 cm, 均值为 8.49 cm; 添加扰动路段的跟踪偏差较大, 最大横向偏差为 23.89 cm, 最大纵向偏差为 62.53 cm, 但在控制器的控制作用下可以实现对路径的有效跟踪。由此可见, 该控制器在速度小于等于 2 m/s 的情况下, 可以满足农用运输车辆对路径跟踪的精度与鲁棒稳定性要求。

**关键词:** 农用运输车; 路径跟踪; 扰动; 控制器; 鲁棒稳定性

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0378-09

## Design on Trajectory Tracking Controller of Agricultural Vehicles under Disturbances

LIU Zhengduo<sup>1,2</sup> ZHANG Wanzhi<sup>1,2</sup> LÜ Zhaoqin<sup>1,2</sup> ZHENG Wenxiu<sup>1,2</sup> MU Guizhi<sup>1,2</sup> CHENG Xiangxun<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

**Abstract:** Aiming to improve the trajectory tracking robust stability of agricultural vehicles, a path tracking control method was proposed based on the linear predictive model. Through the proposed method, the path tracking problem can be divided into two problems: the trajectory planning problem and the trajectory tracking optimization problem with speed and steering angle constraints. Firstly, a dynamic model of the agricultural vehicle was established and discretized to deduce the system error model, based on which the prediction model was obtained for the controller. Then the Lyapunov function was introduced to validate the convergence and robust of the controller. Secondly, an objective function based on system variables and control inputs was coined. And the constraints of system state variables and control inputs were taken into consideration. The optimal control system was transformed into an optimization problem. Finally, the interior point method was brought forward to solve the optimization problem. The Matlab simulation results validated the road tracking ability of the tested road with enough robust performance. When front wheel disturbance was not more than  $15^\circ$  and tracking disturbance in lateral direction was not more than 1.5 m, the controller can quickly adjust the vehicle to the reference track. Meanwhile, the corresponding experiments were conducted. It was showed that the maximum lateral tracking deviation was 10.57 cm and the mean was 8.49 cm with forward speed of 2 m/s. During circular sections or after injecting the disturbance, the deviation was significantly increased and the maximum lateral deviation was 23.89 cm, but the effective tracking can still be achieved. It can be concluded that the controller can satisfy the requirements of the precision and robustness of agricultural vehicles when the speed was less than 2 m/s.

**Key words:** agricultural transport vehicles; path tracking; disturbances; controller; robust stability

收稿日期: 2018-08-07 修回日期: 2018-08-22

基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF020-07、2017YF002)、山东省现代农业产业技术体系薯类创新团队农业机械岗位专家项目(SDAIT-16-10)和山东农业大学青年科技创新基金项目(24158)

作者简介: 刘正铎(1990—),男,博士生,主要从事农业智能机械导航研究,E-mail: 15094808087@163.com

通信作者: 吕钊钦(1962—),男,教授,主要从事农业机械设计与智能农机设备研究,E-mail: lzqsdau2003@126.com

## 0 引言

自动驾驶技术在农业机械研究中的应用<sup>[1-8]</sup>越来越受到学者们的重视。农用运输车辆需要快速、准确地跟踪到期望路径。现阶段农用运输车主要是人工驾驶,不仅工作效率低,而且还加大了劳动人员的工作强度。文献[8]利用 GPS 与电子罗盘实现了拖拉机的自动导航,结果表明,平均偏差率为 14.38%,最大偏差率为 31.10%,GPS 信号接收效果及定位精度均不理想。这是由于果树的枝叶遮挡 GPS 接收机,使其不能稳定接收卫星信号而造成的。为提高定位精度,RTK-DGPS 高精度自动导航系统在实际农业生产中得到广泛应用<sup>[9-12]</sup>,文献[13]采用 RTK-DGPS 定位技术,设计了东方红 X-804 型拖拉机的自动导航系统,通过田间试验验证了控制系统的精确性和可靠性。文献[14]通过改进纯追踪模型的控制方法,在仿真条件下得到了较好的跟踪结果,但是其控制器的鲁棒稳定性较差,没有一套完善的参数调节标准,难以应用于实际生产。文献[15]基于最小二乘法实现了车辆的参数辨识,基于 GNSS 设计了路径跟踪模糊控制器,但是在实际应用过程中跟踪偏差较大。文献[16]利用模糊控制调整纯追踪模型的前视距离,设计了水稻插秧机的路径跟踪控制器,试验证明,该方法在速度 0.3 m/s 与 1 m/s 的情况下具有很好的适应性。

由此可以看出,由于田间的作业环境复杂(树木的枝叶遮挡信号、高温、沙尘、地面不平等),农用车辆的路径跟踪问题难点主要在于跟踪精度与跟踪稳定性上<sup>[17-19]</sup>。

模型预测控制被广泛应用于车辆自动导航<sup>[20]</sup>、主动前轮转向<sup>[21]</sup>等方面,它能及时弥补模型失配、时变、干扰等因素引起的不确定性。文献[22-24]从理论角度详细阐述了将线性模型预测控制器应用到汽车导航的可能性并进行了相关的仿真试验,但其中并未涉及控制器的鲁棒性分析及证明,更没有通过实物验证。针对上述问题,本文将模型预测控制与农用运输车辆相结合,设计导航控制器,实现农用运输车辆的路径跟踪。本文所述导航控制器能够通过内部积分器实时计算农用车辆的位姿信息,实现对所设计路径的有效跟踪,通过滚动优化实时反馈,增强控制系统稳定性,减少对外部环境的依赖。

## 1 路径跟踪的运动学模型

对农用运输车进行运动学分析,建立如图 1 所示的模型。该模型前轮转向,后轮驱动。在整个运

动学分析过程中,将农用运输车视为刚体,运行在水平面上。为了确定车辆在整个运行轨迹中的位姿,建立导航坐标系。选取农用运输车后轴中心点为参考点并定义小车的位姿信息 $(x, y, \varphi)$ ,其中 $(x, y)$ 为农用运输车后轴中心坐标, $\varphi$ 为农用运输车航向角。在不考虑车辆侧倾、俯仰、侧滑等运动的情况下,可将低速行驶的农用运输车简化为二自由度的运动学模型<sup>[7]</sup>。其运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ \frac{\tan\delta}{l} \end{bmatrix} v \quad (1)$$

式中  $l$ ——轴距  $\delta$ ——前轮转角  
 $v$ ——后轴中心速度

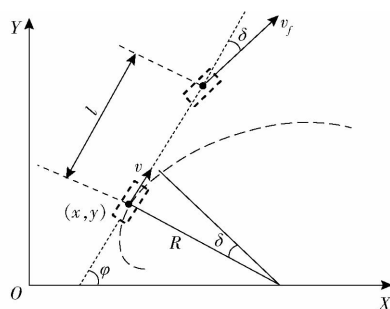


图 1 农用运输车的运动学模型

Fig. 1 Kinematic model of agricultural transport vehicle

## 2 线性模型预测控制器的设计

### 2.1 线性误差模型

为进一步提高定位精度,减少定位过程中的外界干扰,通过控制器中的内置积分器来处理传感器收集到的速度与转角信息,通过对速度与转角的不间断积分得到农用运输车的实时位姿为

$$\begin{cases} X_t = x_0 + \int_{t_0}^t x dt \\ Y_t = y_0 + \int_{t_0}^t y dt \\ \varphi_t = \varphi_0 + \int_{t_0}^t \varphi dt \end{cases} \quad (2)$$

式中  $X_t, Y_t, \varphi_t$ —— $t$ 时刻农用车的实际位姿

$x_0, y_0, \varphi_0$ ——农用车的初始位姿

用  $r$  表示目标轨迹, $x_r, y_r, \varphi_r$  为目标位姿, $v_r, \delta_r$  为目标速度和目标前轮转角,农用运输车的线性误差模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \Delta v \cos\varphi_r - v_r \varphi_e \sin\varphi_r \\ \dot{y}_e = \Delta v \sin\varphi_r + v_r \varphi_e \cos\varphi_r \\ \dot{\varphi}_e = \frac{\Delta v \tan\delta_r}{l} + \frac{\Delta \delta v_r}{l \cos^2 \delta_r} \end{cases} \quad (3)$$

其中,控制增量为

$$\Delta v = v - v_r \quad \Delta \delta = \delta - \delta_r$$

状态偏差为

$$x_e = x - x_r \quad y_e = y - y_r \quad \varphi_e = \varphi - \varphi_r$$

将该模型应用到控制器,对式(3)进行离散化处理并写成状态空间方程形式

$$\begin{cases} \xi_t(k+1) = A_{k,t} \xi_t(k) + B_{k,t} u_t(k) \\ \eta_t(k) = h \xi_t(k) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\xi_t = (x, y, \varphi) \quad u_t = (v, \delta)$

$$A_{k,t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_r \sin \varphi_r T \\ 0 & 1 & v_r \cos \varphi_r T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{k,t} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_r T & 0 \\ \sin \varphi_r T & 0 \\ \frac{\tan \delta_r T}{l} & \frac{v_r T}{l \cos^2 \delta_r} \end{bmatrix}$$

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中  $u_t(k)$ —— $t$ 时刻递推  $k$ 次系统控制量  
 $\xi_t(k)$ —— $t$ 时刻递推  $k$ 次系统状态量  
 $A_{k,t}$ —— $t$ 时刻递推  $k$ 次系统矩阵  
 $B_{k,t}$ —— $t$ 时刻递推  $k$ 次输入矩阵  
 $\eta_t(k)$ —— $t$ 时刻递推  $k$ 次系统输出量  
 $k$ ——离散变量  $T$ ——采样周期  
 $t$ ——采样时刻

### 2.2 误差模型鲁棒性分析

农用运输车辆在田间行驶时会受到各种各样的扰动,为使农用运输车稳定性达到使用要求,对式(3)进行鲁棒性分析。

定义新的状态变量为

$$E = \frac{x_e^2}{2} + \frac{y_e^2}{2} \quad (5)$$

于是将证明式(3)的收敛性转换为证明式(5)的收敛性。定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{E^2}{2} + \frac{\varphi_e^2}{2} \quad (6)$$

求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{E}E + \dot{\varphi}_e \varphi_e = & \left( x_e \cos \varphi_r + y_e \sin \varphi_r + \frac{\varphi_e \tan \delta_r}{El} \right) E \Delta v + \\ & \left( -v_r x_e E \sin \varphi_r + v_r y_e E \cos \varphi_r + \frac{v_r \Delta \delta}{l \cos^2 \delta_r} \right) \varphi_e \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\Delta v, \Delta \delta$  的取值与控制器参数采样周期  $T$  有关,为了便于证明,令

$$\begin{cases} \Delta v = \frac{-E}{T} \\ \Delta \delta = \left( x_e \sin \varphi_r - \frac{y_e \cos \varphi_r + E \varphi_e}{T} \right) l \cos^2 \delta_r \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$\dot{V} = -\frac{E^2}{T} - \frac{\varphi_e^2}{T} \leq 0 \quad (T > 0) \quad (9)$$

根据李雅普诺夫第二法可以得出当  $T > 0$  时,  $V, \varphi_e$  收敛,于是可以得到  $x_e, y_e, \varphi_e$  收敛且收敛于 0。

农用运输车辆在田间行驶过程中的各种扰动,最终都可以归结为沿  $x$  方向的偏差  $d_x$  与沿  $y$  方向的偏差  $d_y$ ,将  $d_x, d_y$  代入式(3)得

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \Delta v \cos \varphi_r - v_r \varphi_e \sin \varphi_r + d_x \\ \dot{y}_e = \Delta v \sin \varphi_r + v_r \varphi_e \cos \varphi_r + d_y \\ \dot{\varphi}_e = \frac{\Delta v \tan \delta_r}{l} + \frac{\Delta \delta v_r}{l \cos^2 \delta_r} \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)、(10)代入式(7)得

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{E}E + \dot{\varphi}_e \varphi_e = & \left( x_e \cos \varphi_r + y_e \sin \varphi_r + \frac{\varphi_e \tan \delta_r}{El} \right) E \Delta v + E(x_e d_x + y_e d_y) + \\ & \left( -v_r x_e E \sin \varphi_r + v_r y_e E \cos \varphi_r + \frac{v_r \Delta \delta}{l \cos^2 \delta_r} \right) \varphi_e = \\ & -\frac{E^2}{T} - \frac{\varphi_e^2}{T} + E(x_e d_x + y_e d_y) \end{aligned} \quad (11)$$

用杨氏不等式对式(11)右侧进行处理得

$$\begin{aligned} \dot{V} = -\frac{E^2}{T} - \frac{\varphi_e^2}{T} + E(x_e d_x + y_e d_y) \leq & -\frac{E^2}{T} - \frac{\varphi_e^2}{T} + E \left[ \frac{x_e^2}{2T^2} + \frac{y_e^2}{2T^2} + \frac{T^2(d_x^2 + d_y^2)}{2} \right] \leq \\ & -\frac{\varphi_e^2}{T} + \frac{E^2(T-1)}{T^2} + \frac{T^2 E(d_x^2 + d_y^2)}{2} \end{aligned}$$

当  $0 < T < 1$  时,  $-\frac{\varphi_e^2}{T}, \frac{E^2(T-1)}{T^2}$  小于 0,

$\frac{T^2 E(d_x^2 + d_y^2)}{2}$  大于 0,当  $T$  减小时,  $-\frac{\varphi_e^2}{T}, \frac{E^2(T-1)}{T^2}, \frac{T^2 E(d_x^2 + d_y^2)}{2}$  都会减小,所以总会存在  $T$  使  $\dot{V}$  小于

0,因此可以得出当系统因受到外界干扰而引起轨迹改变时,控制器可以通过调节  $T$  使  $\dot{V} < 0$ ,使  $e_x, e_y$  收敛。

由以上分析可知当采样周期  $T > 0$  时,农用运输车在没有外界干扰情况下即可实现路径跟踪,当采样周期  $0 < T < 1$  时,农用运输车可以在扰动情况下的路径跟踪,且控制器抵抗扰动的能力随采样

周期  $T$  的减小而增大。但此时系统的计算量随之增大,使控制器实时性降低。

### 2.3 预测模型

为得到系统的预测模型,构建状态变量为

$$\boldsymbol{\lambda}(k|t) = [\boldsymbol{\xi}(k|t) \quad \mathbf{u}(k-1|t)] \quad (12)$$

将式(12)代入式(4)得到新的状态空间表达式

$$\begin{cases} \boldsymbol{\lambda}(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}_{k,t} \boldsymbol{\lambda}(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta \mathbf{U}(k|t) \\ \boldsymbol{\eta}_{k,t}(k|t) = \tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \boldsymbol{\lambda}(k|t) \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \tilde{\mathbf{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{O}_{m \times n} & \mathbf{I}_m \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{I}_m \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_{k,t} = [\mathbf{h} \quad \mathbf{O}_{n \times m}]$$

式中  $n$ ——状态量维度  $m$ ——控制量维度

$\Delta \mathbf{U}$ ——控制增量

$\mathbf{I}_m$ —— $m$  维单位矩阵

$\mathbf{O}$ ——零矩阵

从而得到输出方程即系统的预测模型为

$$\boldsymbol{\Gamma}(t) = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\xi}(t|t) + \boldsymbol{\Theta} \Delta \mathbf{U}(t) \quad (14)$$

其中

$$\boldsymbol{\Gamma}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_{k,t}(t+1|t) \\ \boldsymbol{\eta}_{k,t}(t+2|t) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}_{k,t}(t+N_c|t) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}_{k,t}(t+N_p|t) \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^2 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Theta} =$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-2} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} & \dots & \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p-N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_{t,t} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(t|t) \\ \Delta \mathbf{u}(t+1|t) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}(t+N_c|t) \end{bmatrix}$$

式中  $\Delta \mathbf{u}$ ——系统控制量增量

$N_c$ ——系统控制时域

$N_p$ ——系统预测时域

### 2.4 设计目标函数

为将路径跟踪问题转换为二次规划问题,构造

目标函数<sup>[25-26]</sup>。通过权重系数将系统状态量偏差与控制量偏差关联起来,设置状态量与控制量的约束条件,通过有效集法把每步迭代中有效约束作为等式约束进行求解,重复此过程寻得最优解,同时引入松弛因子防止系统出现无可行解现象。目标函数为

$$\min J = \sum_{t=1}^{N_p} \Delta \boldsymbol{\Gamma}(t)^T \mathbf{Q} \Delta \boldsymbol{\Gamma}(t) + \sum_{t=0}^{N_c-1} \Delta \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}(t) + \rho \varepsilon^2 \quad (15)$$

其中  $\Delta \boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{\Gamma} - \boldsymbol{\Gamma}_r$   $\boldsymbol{\Gamma}_{\min} \leq \boldsymbol{\Gamma}(t) \leq \boldsymbol{\Gamma}_{\max}$

$$\Delta \boldsymbol{\Gamma}_{\min} \leq \Delta \boldsymbol{\Gamma}(t) \leq \Delta \boldsymbol{\Gamma}_{\max}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_r(k) = [\boldsymbol{\eta}_r(t+1|t) \quad \dots \quad \boldsymbol{\eta}_r(t+N_p|t)]^T$$

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t+k) \leq \mathbf{u}_{\max}$$

$$\Delta \mathbf{u}_{\min} \leq \Delta \mathbf{u}(t+k) \leq \Delta \mathbf{u}_{\max}$$

式中  $\rho$ ——权值系数  $\varepsilon$ ——松弛因子

$\mathbf{Q}$ ——权重矩阵  $\mathbf{R}$ ——权重系数

$J$ ——目标函数

$\boldsymbol{\Gamma}_{\min}$ 、 $\boldsymbol{\Gamma}_{\max}$ ——状态变量约束最值

$\Delta \boldsymbol{\Gamma}_{\min}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\Gamma}_{\max}$ ——状态变量增量约束最值

$\mathbf{u}_{\min}$ 、 $\mathbf{u}_{\max}$ ——控制量约束最值

$\Delta \mathbf{u}_{\min}$ 、 $\Delta \mathbf{u}_{\max}$ ——控制增量约束最值

### 2.5 滚动优化

文中采用内点法进行求解,将  $t$  时刻控制输入量的第 1 个元素作为实际控制量。在  $t+1$  时刻,重复以上控制过程实现最优控制。

## 3 控制器仿真与分析

### 3.1 仿真路径

图 2 为农用无人驾驶车辆从  $O$  点到  $G$  点的参考轨迹。农用车辆从  $O$  点进入,对其进行喷药或果实运输, $G$  点为终点。其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $J$ 、 $K$ 、 $L$  为路径方程改变的节点,在一定程度上其各项参数可以反映出控制器对该路段的路径跟踪性能。其中定义  $A$  点为路径跟踪动态响应阶段最大超调量的坐标点。定义  $F$  点为扰动测试点,在此位置加入扰动以测试控制器的鲁棒稳定性。基于 Matlab 平台进行模型预测控制器设计,从采样周期  $T$ 、横向偏差扰动  $Y_r$ 、前轮转角扰动  $\delta_f$  等 3 方面进行仿真分析。

根据路径信息(参考路径的坐标范围与小车轮转向时前轮转角的取值范围设定目标函数的极值约束)与目标速度设置控制器参数如下: $l=1$ ;  $\mathbf{Q} = \text{diag}(100, 100, 100)$ ,  $\mathbf{R} = 100$ ;  $\mathbf{u}_{\min} = [-3.2 \text{ m/s} \quad -0.5 \text{ rad}]^T$ ,  $\mathbf{u}_{\max} = [3.2 \text{ m/s} \quad 0.5 \text{ rad}]^T$ ;  $\Delta \mathbf{u}_{\min} = [-0.05 \text{ m/s} \quad -0.47 \text{ rad}]^T$ ,  $\Delta \mathbf{u}_{\max} = [0.05 \text{ m/s} \quad 0.47 \text{ rad}]^T$ ;  $\boldsymbol{\Gamma}_{\min} = [-5 \quad -1 \quad -0.5]^T$ ,  $\boldsymbol{\Gamma}_{\max} = [5 \quad 1$

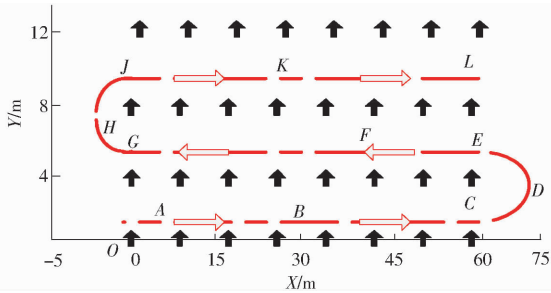


图2 参考路径

Fig. 2 Reference path

$$0.5]^\top; \Delta \Gamma_{\min} = [-0.05 \quad -0.05 \quad -0.008 \quad 2]^\top,$$

$$\Delta \Gamma_{\max} = [0.05 \quad 0.05 \quad 0.008 \quad 2]^\top.$$

### 3.2 采样周期对路径跟踪的影响

设定控制器参数为:  $N_c = 30$ ,  $N_p = 60$ ,  $v = 2 \text{ m/s}$ ,  $T$  为  $0.05$ 、 $0.10$ 、 $0.15 \text{ s}$ 。在导航坐标系下, 路径跟踪结果如图3所示。

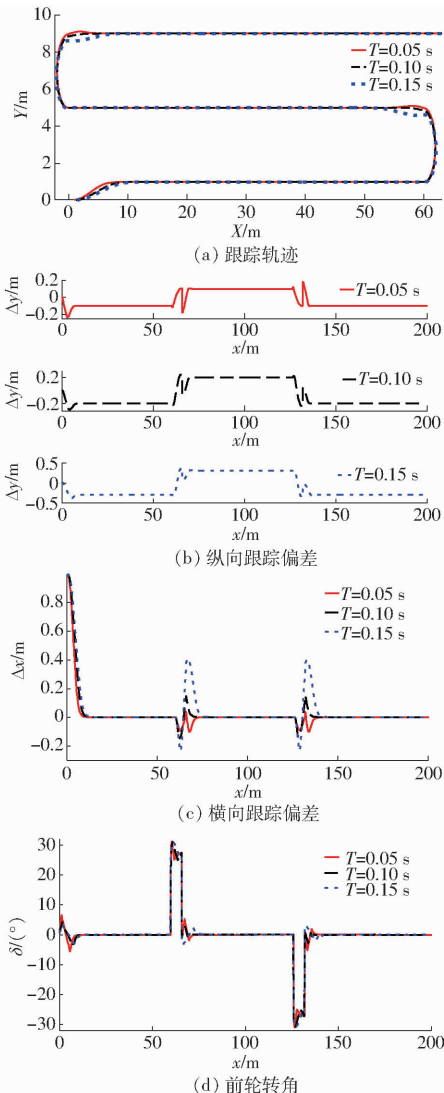


图3 采样周期对路径跟踪的影响

Fig. 3 Effect of sampling period on path tracking

可以看出, 3种不同采样周期下的控制器路径跟踪效果均较好。图3b农用运输车的纵向跟踪偏

差, 反映农用运输车路径跟踪的实时性, 在  $AC$ 、 $EG$ 、 $JL$  直线段出现稳态纵向跟踪偏差且偏差随采样周期  $T$  的增大而增大, 这说明车辆在跟踪圆形路径时相对于仿真路径产生了延迟, 且延迟随采样周期的增大而增大。图3c为农用运输车的横向跟踪偏差, 反映了农用运输车的跟踪精度, 可以看出节点  $E$ 、 $J$  处横向偏差出现较大波动, 这是由于路径方程改变引起的, 此时控制器需要重新预测控制量以适应新的参考路径。图3d反映出路径跟踪时农用运输车的行驶稳定性, 可以看出, 在仿真条件下农用运输车可以稳定地跟踪参考路径。

### 3.3 横向扰动对路径跟踪的影响

设定控制器参数为:  $N_p = 60$ ,  $N_c = 30$ ,  $v = 2 \text{ m/s}$ ,  $T = 0.05 \text{ s}$ ,  $Y_r$  为  $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5 \text{ m}$ 。在导航坐标系下, 路径跟踪结果如图4所示。

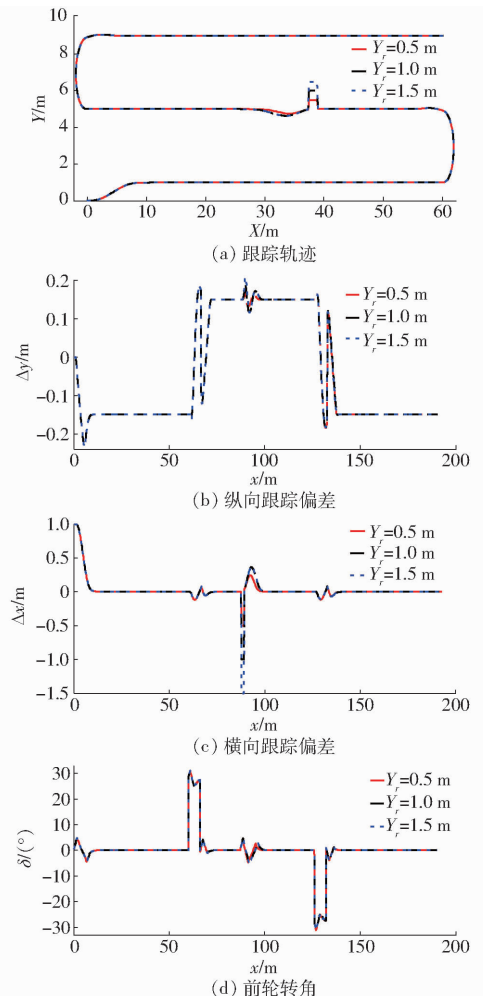


图4 横向扰动对路径跟踪的影响

Fig. 4 Effect of lateral disturbance on path tracking

当农用运输车在果园运输时, 车辆会进行人为的横向移动, 将此移动作为扰动加入路径分析。在节点  $F$  处加入横向偏差扰动, 可以看出, 在3种不同横向偏差的扰动作用下控制器的鲁棒性均较好, 随着扰动的增大, 跟踪偏差也在增大; 当扰动出现

时,控制器会快速地做出反应,及时调节前轮转角与速度,使车辆尽快回到参考路径上行驶。

### 3.4 前轮转角的扰动对路径跟踪的影响

设定控制器参数为: $N_p = 60, N_c = 30, v = 2 \text{ m/s}, T = 0.03 \text{ s}, \delta_{fr}$  为  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 。在导航坐标系下,路径跟踪结果如图 5 所示。

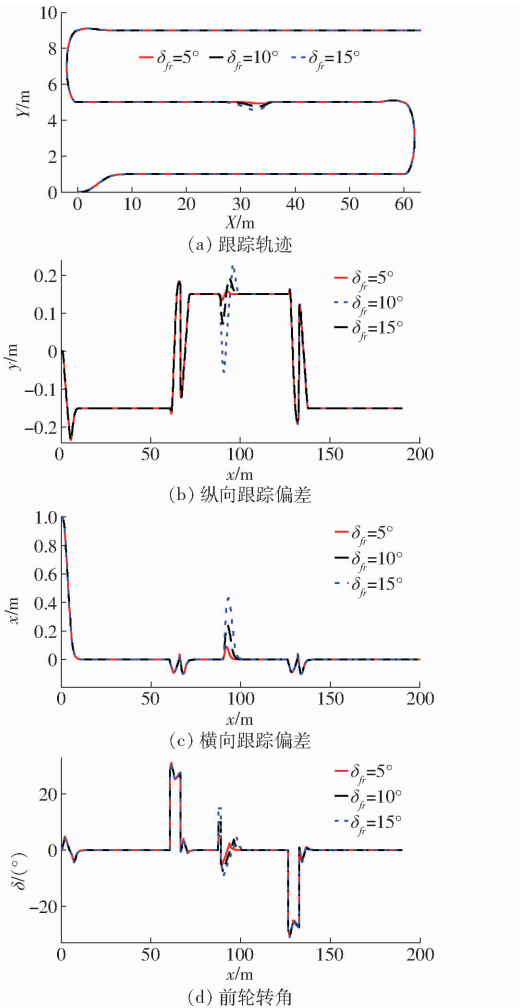


图 5 前轮转角扰动对路径跟踪的影响

Fig. 5 Effect of front wheel angle on path tracking

当农用运输车在果园间行驶时,由于地面不平等因素会造成车辆在行驶过程中前轮转角的变化,在  $F$  点加入前轮转角扰动。对路径跟踪情况进行分析。从图 5 可以看出,跟踪偏差随着前轮偏角扰动的增大而增大,此时控制器会快速地做出反应,及时调节前轮转角,使车辆尽快地回到参考路径上行驶。

## 4 试验与结果分析

### 4.1 路径跟踪系统结构

自主设计的田间路径跟踪试验小车如图 6 所示,具体结构参数如表 1 所示。

路径信息采集模块:转角传感器为 E6B2-CCWZ3E 型编码器,测量误差为  $\pm 0.3^\circ$ ;速度传感



图 6 试验小车

Fig. 6 Test car

1. 前轮转角传感器 2. 速度传感器 3. 差速驱动装置 4. 前轮转向驱动器 5. 信号转换装置 6. 蓄电池 7. 后轮驱动器 8. 前轮转向装置

表 1 自主设计小车主要技术参数

Tab. 1 Main technical indexes of autonomously designed vehicle

参数	数值/方式
外形尺寸(长×宽×高)/(cm×cm×cm)	120×63×33
轴距/cm	100
最大速度/(m·s <sup>-1</sup> )	3.2
质量/kg	50
控制方式	PWM
轮胎半径/cm	15

器为 JK5002D 型霍尔接近开关,测速误差  $\pm 0.05 \text{ m/s}$ 。控制执行模块:转向驱动器为 ASMT-01 series 大功率直线舵机控制器;转向执行装置为 42BYGH47 型步进电机驱动涡轮蜗杆式转向装置,其行程为 80 mm,速度最快可达 29 mm/s;后轮驱动器为 CM2010 型有刷电机控制器;后轮驱动装置为 DMW86 型无刷直流电机,额定转速为 3 200 r/min,额定功率为 1 000 W。路径信息处理模块:导航控制器的下位机为 STM32F103ZET6 型单片机,其主要任务是采集试验小车转速传感器与前轮转角传感器收集来的信息并转换成数字信号,通过 Wi-Fi 传输至导航控制器上位机戴尔 Vostro 计算机中的 Matlab 软件,从而进行算法处理。

### 4.2 场地试验

试验场地为山东农业大学本部紫叶李树林,如图 7 所示。场地尺寸及树木位置与仿真时(图 2)一致。



图7 山东农业大学紫叶李树林

Fig.7 Prunus cerasifera forest in Shandong Agricultural University

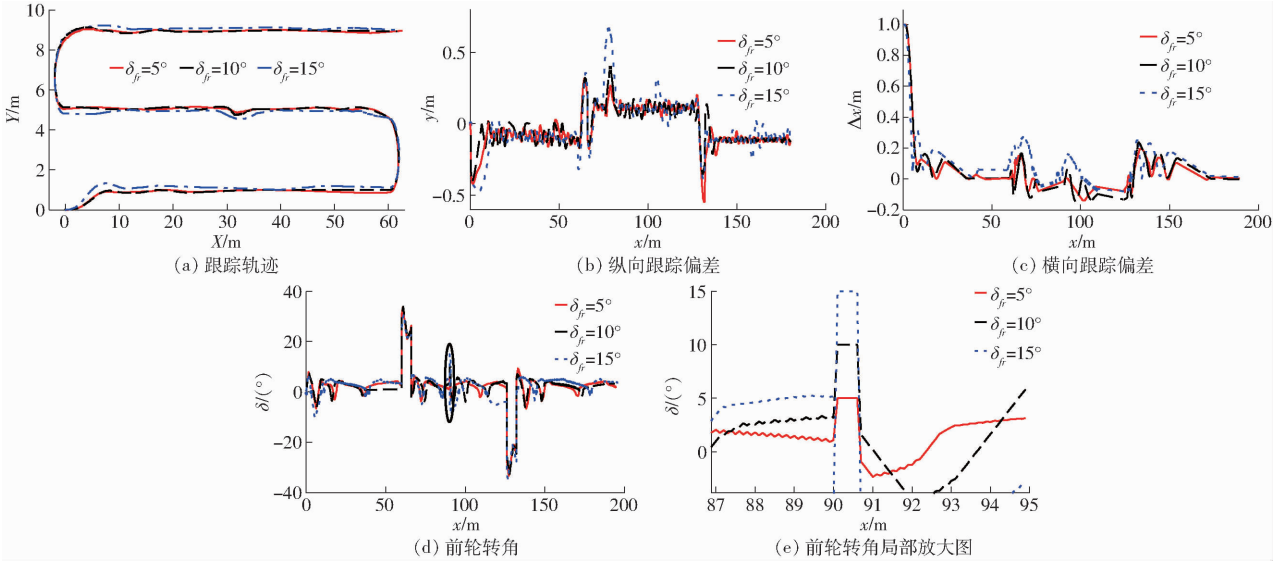


图8 场地试验中前轮转角扰动对路径跟踪的影响

Fig.8 Effect of front wheel angle disturbance on path tracking in field test

表2 试验结果

Tab.2 Results of test

前轮转角 扰动/(°)	横向偏差				纵向偏差				cm
	扰动处最大值	直线段最大值	圆弧段最大值	均值	扰动处最大值	直线段最大值	圆弧段最大值	均值	
5	9.76	8.82	19.56	7.54	34.95	18.32	39.42	16.45	
10	15.64	9.25	20.97	7.89	45.67	19.64	39.33	15.31	
15	23.89	10.57	22.83	8.49	62.53	25.77	39.31	18.47	

横向偏差主要出现在节点 C 处与添加扰动节点 F 处,分别为 19.56、20.97、23.89 cm,出现较大偏差一方面是因为受到试验条件的制约:小车各个机构之间的链接间隙、轮胎打滑、数据传输与处理的延迟、上位机(计算机上的 Matlab)与下位机(STM32 单片机)之间的耦合等;另一方面是因为路径方程改变的位置大都处于直线路径的末端,此时小车在行驶过程中已经有了较大的累积偏差,再加上路径方程的突然改变,致使控制器无法在短时间内解出最优控制量。

通过试验可以看出,该控制器对于直线路段有着较好的控制作用,在控制精度上, $v = 2 \text{ m/s}$  时直线段最大横向偏差为 10.57 cm,均值保持在 8.49 cm

初始时,车辆中心位置与路径起点重合。设定控制器参数为  $v = 2 \text{ m/s}$ 、 $N_p = 60$ 、 $N_c = 30$ 、 $T = 0.05 \text{ s}$ 。为了更好地验证本文所述控制器的鲁棒性,向节点 F 处添加前轮转角扰动  $\delta_{fr}$  为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 。试验结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,场地试验中小车在跟踪参考路径时,直线路段偏差较小,圆形路段与加入前轮转角扰动时偏差较大,试验小车可以有效地跟踪参考路径。其具体数据如表 2 所示。

由试验结果可以看出,不同转角扰动下的最大

以内;在跟踪实时性上,最大纵向偏差为 25.77 cm,均值保持在 18.47 cm 以内。试验小车跟踪圆弧段的偏差较大,最大横向偏差为 22.83 cm,最大纵向偏差为 39.42 cm,这主要是由于控制器中采用线性模型作为预测方程造成的,在跟踪圆形路径时,受轮胎侧偏、车辆质心变化等因素的影响,小车非线性特性突出,此时控制器依然采用线性模型预测小车下一时刻运动,与实际情况差别较大,造成了较大的跟踪偏差。

在添加前轮转角扰动的节点 F 处,横向偏差随扰动的增大而增大,当  $\delta_{fr} = 15^\circ$  时,横向偏差最大为 23.89 cm,纵向偏差最大为 62.53 cm,说明试验小车在跟踪精度上偏离参考轨迹 23.89 cm,在跟踪实时

性上,落后仿真路径 62.53 cm。由图 8 可以看出,此时控制器可以迅速起到调节作用,使小车回到参考轨迹继续行驶。

由此可以看出本文所述控制器无论是在行驶稳定性上,还是在跟踪精度上,都可以满足农用运输车辆对路径跟踪的要求。

#### 4.3 对比分析

与现有研究进行对比,文献[27-28]在未使用外部定位的情况下实现了拖拉机的自动导航,减少了控制器对外部环境的依赖。其中文献[27]结合最优控制理论,设计了基于速度和转向角的双参数最优控制算法,横向偏差最大值为 12 cm;文献[28]设计一种基于指数趋近律的滑模变结构控制器,速度为 2 m/s 时,横向偏差最大值为 11 cm。分析可知:本文采用的线性模型预测控制方法,在跟踪精度上要优于文献[27-28],同时利用农用车辆的纵向跟踪偏差分析了路径跟踪的实时性,并对控制器的鲁棒性做了详细研究,通过仿真与试验验证了农用车路径跟踪在添加了外部扰动情况下的行驶稳定性。

## 5 结论

(1) 针对农用运输车辆作业环境复杂,路径跟踪稳定性较差等问题,结合线性模型预测控制理论设计了农机自动导航控制器。该控制器通过内部积分器实现了农用车的定位,通过引入松弛因子解决了运算过程中出现非可行性解的问题,从而实现农机设备的自动导航。

(2) 通过构建车辆误差模型的李雅普诺夫函数,得到系统采样周期  $T$  与车辆鲁棒稳定性的关系,并通过仿真与试验验证了本文所述控制器在添加外界扰动的情况下依然可以有效跟踪参考路线。

(3) 在仿真中,分析了采样周期  $T$ 、横向扰动  $Y_f$ 、前轮转角扰动  $\delta_{f_r}$  对路径跟踪稳定性的影响;在场地试验中, $v=2\text{ m/s}$  无扰动情况下试验小车最大横向偏差为 22.83 cm,均值为 8.49 cm,基本实现了农用车辆的自动导航;前轮转角  $\delta_{f_r}$  扰动下的最大横向跟踪偏差为 23.89 cm,均值为 8.49 cm,偏差随扰动的增大而增大,控制器可以迅速起到调节作用,使小车回到参考轨迹继续行驶。

#### 参 考 文 献

- 1 CEN Y, SONG C, XIE N, et al. Path planning method for mobile robot based on ant colony optimization algorithm[C]//3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008: 298-301.
- 2 SUTOH M, OTSUKI M, WAKABAYASHI S, et al. The right path: comprehensive path planning for lunar exploration rovers[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(1): 22-23.
- 3 褚佳, 张立博, 张铁中, 等. 葫芦科穴盘苗单人操作嫁接机器人设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 7-13. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170102&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170102&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.002.
- 4 CHU Jia, ZHANG Libo, ZHANG Tiezhong, et al. Design and experiment of grafting robot operated by one person for cucurbitaceous seedlings cultivated in plug trays[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 7-13. (in Chinese)
- 5 赵源深, 贡亮, 周斌, 等. 番茄采摘机器人非颜色编码化目标识别算法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 1-7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160701&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160701&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.001.
- 6 ZHAO Yuanshen, GONG Liang, ZHOU Bin, et al. Object recognition algorithm of tomato harvesting robot using non-color coding approach[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 1-7. (in Chinese)
- 7 钱晓明, 张浩, 王晓勇, 等. 基于激光扫描匹配的移动机器人相对定位技术研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 14-21. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160303&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160303&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.003.
- 8 QIAN Xiaoming, ZHANG Hao, WANG Xiaoyong, et al. Relative localization technology for mobile robot based on laser scan matching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 14-21. (in Chinese)
- 9 刘军, 袁俊, 蔡骏宇, 等. 基于 GPS/INS 和线控转向的农业机械自动驾驶系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 46-53.
- 10 LIU Jun, YUAN Jun, CAI Junyu, et al. Autopilot system of agricultural vehicle based on GPS/INS and steer-by-wire[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 46-53. (in Chinese)
- 11 张美娜, 吕晓兰, 陶建平, 等. 农用车辆自主导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 42-47. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160707&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160707&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.007.
- 12 ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, TAO Jianping, et al. Design and experiment of automatic guidance control system in agricultural vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 42-47. (in Chinese)
- 13 KAYACAN E, RAMON H. Towards agrobots: trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(1): 287-298.



- 9 王万章,洪添胜,陆永超,等.基于超声波传感器和DGPS的果树冠径检测[J].农业工程学报,2006,22(8):158-161.  
WANG Wanzhang, HONG Tiansheng, LU Yongchao, et al. Fruit tree crown diameter detection based on ultrasonic sensor and DGPS [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 158-161. (in Chinese)
- 10 ORTIZ B V, BALKCOM K B, DUZY L, et al. Evaluation of agronomic and economic benefits of using RTK-GPS-based auto-steer guidance systems for peanut digging operations[J]. Precision Agriculture, 2013(14): 357-375.
- 11 O'CONNOR M, BELL T, ELKAIM G, et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[C]//3rd International Conference on Precision Agriculture. Minnesota, 1996: 767-778.
- 12 JUJNOVICH B A, CEBOON D. Path-following steering control for articulated vehicles[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2013, 135(3): 576-586.
- 13 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等.东方红X-804拖拉机的DGPS自动导航控制系统[J].农业工程学报,2009,25(11):139-145.  
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- 14 黄沛琛,罗锡文,张志刚.改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J].计算机工程与应用,2010,46(21):216-219.  
HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21): 216-219. (in Chinese)
- 15 ERKAN K, ERDAL K, HERMAN R, et al. Towards agrobots: identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 78-87.
- 16 MONTALVOA M, PAJARES G, GUERRERO J M, et al. Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 11889-11897.
- 17 PATRICK W, THORSTEN R, KARSTEN B, et al. Behavior-based control for safe and robust navigation of an unimog in off-road environments[M]. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018: 5-16.
- 18 胡景涛,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.  
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Research progress on automatic navigation of agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- 19 MOUSAZADEH H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50(3): 211-232.
- 20 李升波,王建强,李克强,等. MPC实用化问题处理及在车辆ACC中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(5):645-648.  
LI Shengbo, WANG Jianqiang, LI Keqiang, et al. Processing of practical application of MPC and its application in vehicle ACC [J]. Journal of Qinghua University (Natural Science Edition), 2010, 50(5): 645-648. (in Chinese)
- 21 YOON Y, SHIN J, KIM H J, et al. Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous ground vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(7): 741-750.
- 22 张亮修,吴光强,郭晓晓.自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(10): 1595-1603.  
ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao. Path tracking using linear time-varying model predictive control for autonomous vehicle[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(10): 1595-1603. (in Chinese)
- 23 ZHANG Wanzhi, LIU Zhengduo, LÜ Zhaoqin. Path tracking based on model predictive control for agricultural vehicle [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2016, 25(4): 148-154.
- 24 龚建伟,姜岩,徐威.无人驾驶车辆模型预测控制[M].北京:北京理工大学出版社,2014.
- 25 张万枝,白文静,吕钊钦,等.线性时变模型预测控制器提高农业车辆导航路径自动跟踪精度[J].农业工程学报,2017,33(13):104-111.  
ZHANG Wanzhi, BAI Wenjing, LÜ Zhaoqin. Path tracking based on model predictive control for agricultural vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 104-111. (in Chinese)
- 26 陈虹.模型预测控制[M].北京:科学出版社,2013.
- 27 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等.基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法[J/OL].农业机械学报,2013,44(2): 165-170. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130231&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130231&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.031.
- HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Joint control method of speed and heading of navigation tractor based on optimal control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 165-170. (in Chinese)
- 28 刘进一,杜岳峰,张硕,等.GNSS/MIMU/DR的农业机械组合导航定位方法[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):1-7.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s001&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s001&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.001.
- LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuo, et al. Automatic navigation method for agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR information fusion [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.): 1-7. (in Chinese)