

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.066

# 基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法

王猛 赵博 王长伟 李宏伟 刘阳春 方宪法

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室,北京 100083)

**摘要:**履带拖拉机采用差速转向,转向可控性差,影响自动导航性能,为提高履带拖拉机自动导航的性能,以液压传动控制行星差速转向履带拖拉机为研究对象,建立履带拖拉机转弯半径数学模型。构建每个控制量下转弯半径均值和方差计算方法,建立基于卡尔曼滤波和局部加权回归的转弯半径均值和方差更新方法。分别针对直线路径跟踪和掉头建立基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法。采用纯跟踪算法分别以不同的初始位置偏差进行自动导航仿真试验,得到导航轨迹、位置偏差和角度偏差。以农夫 NF-702 型履带拖拉机为平台,分别以不同车速进行导航试验,试验结果表明,在初始航向角为 0,车速分别为 1.0、1.5 m/s 时,导航平均误差分别为 -0.62 cm 和 0.28 cm,导航误差绝对值极值分别为 10.14 cm 和 8.10 cm,导航误差绝对值均值分别为 2.34 cm 和 2.57 cm,导航均方根误差分别为 3.77 cm 和 3.99 cm。本文提出的基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法可应用到液压传动控制行星差速转向履带拖拉机自动导航领域,满足实际田间作业需求。

**关键词:**履带拖拉机;自动导航;高斯混合模型;转弯半径;卡尔曼滤波

**中图分类号:** S219.2; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0557-07

## Method for Controlling Turning Radius of Crawler-type Tractors Based on GMM

WANG Meng ZHAO Bo WANG Changwei LI Hongwei LIU Yangchun FANG Xianfa

(State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Crawler-type tractors use differential steering, which has poor steering controllability and affects the performance of automatic navigation. In order to improve the performance of the automatic navigation of the crawler-type tractor, hydraulic transmission control planetary differential steering crawler-type tractor was taken as the research object, and the mathematical model of the turning radius of the crawler tractor was established. A calculation method for the mean and variance of the turning radius under each control variable was constructed, and a method for updating the mean and variance of the turning radius based on Kalman filter and local weighted regression was established. Based on Gaussian mixture model a tracked tractor turning radius control method was established for straight-line path tracking and turn round respectively. The pure pursuit was used to conduct automatic navigation simulation tests with different initial position deviations, and the results of navigation trajectory, position deviation and angle deviation were obtained. Using the NF-702 crawler-type tractor as experiment platform, a series of simulation tests were done at different speeds. Experiment results showed that when the initial heading angle was 0, the vehicle speed was 1.0 m/s and 1.5 m/s, the average navigation error was -0.62 cm and 0.28 cm, and the absolute value of the navigation error was 10.14 cm and 8.10 cm, respectively. The mean absolute value of navigation error was 2.34 cm and 2.57 cm, respectively, and the root mean square error of navigation was 3.77 cm and 3.99 cm, respectively. The experiment results showed that the proposed turning radius control method of crawler-type tractors based on Gaussian mixture model can be applied to the field of tracked tractor automatic navigation to meet the actual field operation requirements.

**Key words:** crawler-type tractors; automatic navigation; Gaussian mixture model; turning radius; Kalman filter

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700403)

作者简介: 王猛(1987—),男,博士生,主要从事农机多机协同和自动驾驶技术研究, E-mail: 854995120@qq.com

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化和农业工程领域技术研究, E-mail: fangxf@caams.org.cn

## 0 引言

农机自动驾驶技术是智能农机装备领域的一项关键技术,其中基于北斗的农机定位与导航技术是研究的重点<sup>[1-4]</sup>,拖拉机作为农机的载体,是自动驾驶领域的主要研究对象。

轮式拖拉机在大田使用广泛且拖拉机转弯半径精确可控,其自动驾驶技术研究较多<sup>[5-12]</sup>;履带拖拉机具有转向灵活、机动性强并且对农田破坏小等优点,在农业生产尤其水田作业中得到越来越广泛的应用,但由于其采用差速转向,转向可控性差,因此对履带拖拉机自动驾驶技术研究较少。目前,在履带车辆自动驾驶领域研究较多的是路径跟踪技术和掉头技术。在直线路径跟踪方面,TAKAI等<sup>[13-14]</sup>利用RTK结合IMU作为导航传感器,采用PI控制实现0.6 m/s速度下导航偏差1.4 cm,航向角偏差0.22°;文献[15-16]采用RTK定位技术,并依靠在拖拉机两侧驱动轮安装转速传感器,采用模糊控制实现直线路径跟踪。在曲线路径跟踪方面,王博洋等<sup>[17-18]</sup>研究了一种基于高斯混合-隐马尔可夫模型的履带车辆横向控制模型,采用模糊控制实现曲线路径跟踪;胡家铭等<sup>[19]</sup>研究一种基于模型预测控制的无人驾驶履带车辆轨迹跟踪方法实现曲线路径跟踪。在掉头技术研究方面,TAKAI等<sup>[20]</sup>研究了一种锁孔形路径掉头方法,该方法采用2个等半径的圆相切的轨迹作为掉头路径,进而实现了履带拖拉机的掉头。一般情况下,履带拖拉机无法实现精确转弯半径控制,其自动驾驶一般采用模糊控制或PID控制等方法实现,很难实现精确掉头控制,导航控制精度较差,一些比较成熟的轮式车辆控制方法很难应用到履带车辆自动驾驶控制领域。

本文以农夫NF-702型履带拖拉机为研究对象,研究液压传动控制差速转向履带拖拉机转弯半径模型,构建每个控制量下转弯曲率均值和方差的计算方法,基于卡尔曼滤波和局部加权回归建立模型更新方法,提出一种基于高斯混合模型的转弯半径控制方法,为履带拖拉机自动驾驶提供一种较为精确的转弯半径控制方法。

## 1 液压传动控制履带拖拉机转向模型

履带拖拉机采用差速转向,转向灵活,其中液压传动控制行星差速转向履带拖拉机是当前履带拖拉机的主要产品,本文以NF-702型履带拖拉机为研究对象。履带拖拉机转向可控性差,给自动驾驶带来了困难。履带拖拉机转向示意图如图1所示。

理想条件下履带拖拉机的转弯半径和横摆角速

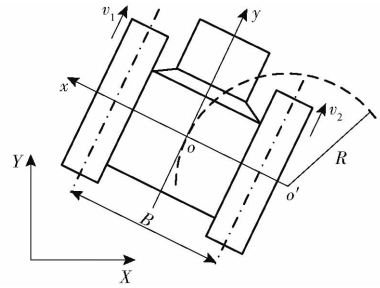


图1 履带拖拉机转向示意图

Fig. 1 Crawler-type tractor steering schematic

度为

$$R = \frac{(v_1 + v_2)B}{2(v_1 - v_2)} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{v_1 - v_2}{B} \quad (2)$$

式中  $R$ ——拖拉机的转弯半径, m

$v_1$ ——左侧履带速度,向前为正, m/s

$v_2$ ——右侧履带速度,向前为正, m/s

$\omega$ ——拖拉机横摆角速度, rad/s

$B$ ——两履带中心间距, m

NF-702型履带拖拉机采用整体式液压传动装置(HST)控制拖拉机的行走和转向。拖拉机行走机构如图2所示,其中HST由变量柱塞泵和定量马达组成。通过控制变量柱塞泵的斜盘倾角,控制柱塞泵的排量与方向,从而控制液压马达输出轴转速和方向,进而控制驱动轮的转速和方向。

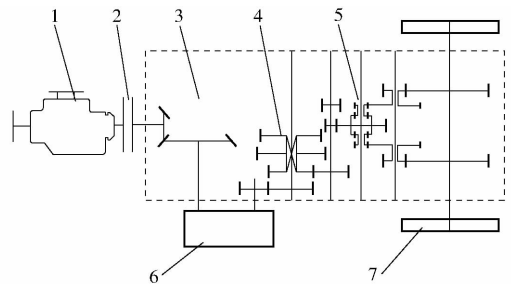


图2 拖拉机行走机构示意图

Fig. 2 Schematic of tractor walking mechanism

1. 发动机 2. 离合器 3. 变速箱 4. 副变速 5. 转向机构  
6. HST 7. 驱动轮

行走机构柱塞泵流量为

$$q_{pd} = \frac{\pi}{4i_1} d_1^2 D_1 \tan \gamma_1 z_1 n_m \eta_{Vpd} \quad (3)$$

式中  $i_1$ ——发动机输出轴与行走机构柱塞泵输入轴传动比

$d_1$ ——行走机构柱塞泵柱塞直径, m

$D_1$ ——行走机构柱塞泵柱塞分布圆盘直径, m

$\gamma_1$ ——行走机构柱塞泵斜盘倾斜角, rad

$z_1$ ——行走机构柱塞泵柱塞数量

$n_m$ ——发动机转速, r/min

$\eta_{v_{pd}}$ ——行走机构柱塞泵容积效率  
行走机构定量马达的输出轴转速为

$$n_{md} = \frac{q_{pd}\eta_{v_{md}}}{V_{md}} \quad (4)$$

式中  $\eta_{v_{md}}$ ——行走机构液压马达容积效率  
 $V_{md}$ ——行走机构液压马达排量,  $\text{m}^3/\text{r}$

副变速挡位固定时 HST 输出轴与驱动轮转速比为定值, 本文在低速挡位进行研究。

行走机构提供给驱动轮的转速为

$$n_d = k_1 n_{md} = \frac{k_1 \pi d_1^2 D_1 \tan \gamma_1 z_1 n_m \eta_{v_{pd}} \eta_{v_{md}}}{4 i_1 V_{md}} \quad (5)$$

式中  $k_1$ ——比例系数

拖拉机转向控制机构与行走控制机构相似, 由 HST 控制转向机构液压马达输出轴转速和方向, 并通过行星差速装置提供给两侧驱动轮大小相等、方向相反的转速。

转向机构提供给驱动轮的转速为

$$n_t = \frac{k_2 \pi d_2^2 D_2 \tan \gamma_2 z_2 n_m \eta_{v_{pt}} \eta_{v_{mt}}}{4 i_2 V_{mt}} \quad (6)$$

式中  $k_2$ ——比例系数

$i_2$ ——发动机输出轴与转向机构柱塞泵输入轴传动比

$d_2$ ——转向机构柱塞泵柱塞直径,  $\text{m}$

$D_2$ ——转向机构柱塞泵柱塞分布圆盘直径,  $\text{m}$

$\gamma_2$ ——转向机构柱塞泵斜盘倾斜角,  $\text{rad}$

$z_2$ ——转向机构柱塞泵柱塞数量

$\eta_{v_{pt}}$ ——转向机构柱塞泵容积效率

$\eta_{v_{mt}}$ ——转向机构液压马达容积效率

$V_{mt}$ ——转向机构液压马达排量,  $\text{m}^3/\text{r}$

履带拖拉机两侧驱动轮转速分别为  $n_d + n_t$  和  $n_d - n_t$ , 由式(1)、(5)、(6)得

$$R = C \eta \frac{\tan \gamma_1}{\tan \gamma_2} \quad (7)$$

其中  $C = \frac{k_1 d_1^2 D_1 z_1 i_2 V_{mt}}{k_2 d_2^2 D_2 z_2 i_1 V_{md}}$  (8)

$$\eta = \frac{\eta_{v_{pd}} \eta_{v_{md}}}{\eta_{v_{pt}} \eta_{v_{mt}}} \quad (9)$$

式中  $C$ ——常系数  $\eta$ ——容积效率比

设拖拉机速度为  $v$ , 则横摆角速度为

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{v \tan \gamma_2}{C \tan \gamma_1 \eta} \quad (10)$$

由式(7)可知, 理想条件下拖拉机的转弯半径只取决于行走机构和转向机构 HST 变量柱塞泵斜盘倾角和 HST 机构的容积效率。

## 2 基于高斯混合模型的转弯半径控制方法

当  $\gamma_1 \neq 0$  时  $R \neq 0$ , 令拖拉机的转弯曲率  $K = 1/R$

为状态量, HST 斜盘转角  $\gamma_1, \gamma_2$  为控制量。定义状态量  $\mathbf{x}_t = \{K\}$ , 控制量  $\mathbf{u}_t = \{\gamma_1, \gamma_2\}$ 。拖拉机转弯曲率为

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{C \eta} \frac{\tan \gamma_2}{\tan \gamma_1} \quad (11)$$

根据式(7)、(11), 在理想条件下 NF-702 型履带拖拉机转弯曲率只取决于  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的组合。假设电动控制可实现 HST 斜盘转角  $m$  个位置的定位控制, 则在电控控制下曲率  $K$  为多个离散数据的集合。假设 HST 斜盘转角每个位置为一个状态, 在  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  每个状态组合进行多次试验, 采用分层抽样等比分配方法进行抽样, 得到每个组合下的  $n$  个样本, 并认为这  $n$  个样本服从正态分布。

利用无偏估计得到  $\gamma_1, \gamma_2$  每个组合状态下拖拉机转弯曲率  $K$  的均值和方差

$$\bar{X}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n X_{ijk}}{n} \quad (12)$$

$$s_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (X_{ijk} - \bar{X}_{ij})^2}{n-1} \quad (13)$$

式中  $X_{ijk}$ —— $\gamma_1$  在第  $i$  个状态、 $\gamma_2$  在第  $j$  个状态下第  $k$  个样本的值,  $\text{m}^{-1}$

令  $\mu_{ij} = \bar{X}_{ij}$   $\sigma_{ij}^2 = s_{ij}^2$

状态量  $\mathbf{x}$  的高斯模型为

$$G(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_{ij} g(\mathbf{x}; \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2) \quad (14)$$

其中  $p_{ij} = 1/m^2$  (15)

$$g(\mathbf{x}; \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ij}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_{ij}^2}(\mathbf{x} - \mu_{ij})^2\right) \quad (16)$$

式中  $p_{ij}$ —— $\gamma_1$  在第  $i$  个状态、 $\gamma_2$  在第  $j$  个状态高斯模型的先验概率

$g(\mathbf{x}; \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ —— $\gamma_1$  在第  $i$  个状态、 $\gamma_2$  在第  $j$  个状态高斯模型的概率密度函数

导航过程中的误差主要源于作业过程中  $\eta$  的变化和滑移率的改变, 为减少误差采用不断更新模型中  $\mu_{ij}$  和  $\sigma_{ij}^2$  的方法来降低  $\eta$  和滑移率变化带来的误差。设观测量为转弯曲率  $z_t = \{k\}$ , 对导航过程中的每个时刻的控制位置进行卡尔曼滤波对模型进行更新

$$z_t = \mathbf{C}_t \mathbf{x}_t + \delta_t \quad (17)$$

式中  $z_t$ ——转弯曲率

$\mathbf{C}_t$ ——观测模型矩阵, 由于观测量与状态量相同,  $\mathbf{C}_t$  为 1

$\delta_t$ ——测量噪声,均值为0

$$\begin{cases} \bar{\mu}_{ij} = \mu_{ij} \\ \bar{\delta}_{ij} = \delta_{ij} \\ K_{aij} = \bar{\delta}_{ij} C_t^T (C_t \bar{\delta}_{ij} C_t^T + Q_t)^{-1} \\ \mu_{ij} = \bar{\mu}_{ij} + K_{aij} (z_t - C_t \bar{\mu}_{ij}) \\ \delta_{ij} = (I - K_{aij} C_t) \bar{\delta}_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

式中  $K_{aij}$ ——卡尔曼增益

$Q_t$ ——测量噪声的方差矩阵

由式(11)可知,理想条件下在  $\gamma_1$  不变时,  $K$  是一条平滑曲线,且当  $\gamma_2 = 0$  时  $K = 0$ 。当  $\gamma_1, \gamma_2$  分别为  $i, j$  时,利用卡尔曼滤波更新的值,采用局部加权回归方法更新模型中的  $\mu_{ij-1}$  和  $\mu_{ij+1}$ , 曲率为

$$y = \theta^T x \quad (19)$$

其中  $\theta = [\theta_0 \quad \theta_1]^T$  (20)

$$x = [1 \quad \gamma_2]^T \quad (21)$$

式中  $\theta_0, \theta_1$ ——需要优化的系数

优化函数为

$$\min \sum_t w^{(i)} (y^{(i)} - \theta^T x^{(i)})^2 \quad (22)$$

其中  $w^{(i)} = \exp\left(-\frac{(x^{(i)} - x)^2}{2\tau^2}\right)$  (23)

式中  $y^{(i)}$ ——第  $i$  个样本的曲率,  $m^{-1}$

$x^{(i)}$ ——第  $i$  个样本的自变量

$w^{(i)}$ ——权重系数

$\tau$ ——带宽,取1

直线路径跟踪过程中,假设只通过控制转向 HST 实现近似转弯半径的控制,当行走 HST 斜盘倾角位于第  $i$  个状态,要实现实际转弯曲率为  $x_k$  时,转向 HST 斜盘倾角  $\gamma_2$  位于第  $j$  个状态的概率为

$$p(\gamma_{2j} | \gamma_{1i}, x_k) = \frac{p_{ij} g(x_k; \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)}{\sum_{l=1}^m p_{il} g(x_k; \mu_{il}, \sigma_{il}^2)} \quad (24)$$

转向 HST 斜盘倾角的位置状态函数为

$$f(x_k, \gamma_{1i}) = \operatorname{argmax}_j (p(\gamma_{2j} | \gamma_{1i}, x_k)) \quad (25)$$

得到转向 HST 斜盘倾角  $\gamma_2$  的位置为第  $j$  个状态。

掉头过程中,为使转弯半径更精确,采用同时调整行走和转向 HST 的方式,要实现状态量  $x_k$ ,行走 HST 斜盘倾角和转向 HST 斜盘倾角分别为第  $i$  和第  $j$  个状态的概率为

$$p(u_{ij} | x_k) = \frac{p_{ij} g(x_k; \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)}{\sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m p_{ab} g(x_k; \mu_{ab}, \sigma_{ab}^2)} \quad (26)$$

控制量状态函数为

$$f(x_k) = \operatorname{argmax}_{i,j} (p(u_{ij} | x_k)) \quad (27)$$

得到行走 HST 和转向 HST 斜盘倾角的位置分别位

于第  $i$  个状态和第  $j$  个状态。

### 3 试验与结果分析

直线路径跟踪采用纯跟踪算法,如图3所示,导航坐标系选用高斯坐标系  $X_g O_g Y_g$ ,拖拉机车体坐标系为  $X_b O_b Y_b$ 。  $G(x, y)$  为期望路径上的跟踪目标点,  $x$  和  $y$  分别为目标点  $G$  在车体坐标系中的横坐标和纵坐标;  $\theta_e$  为拖拉机当前航向和目标点航向的偏差;  $L_d$  为前视距离;  $\phi$  为拖拉机沿着预期弧线到达目标点所转过的航向角;  $d$  为拖拉机相对于预期目标点的横向偏差,以拖拉机前进方向为基准,规定拖拉机在预设路径右侧时横向偏差为正 ( $d > 0$ ),拖拉机在预设路径左侧时横向偏差为负 ( $d < 0$ )。

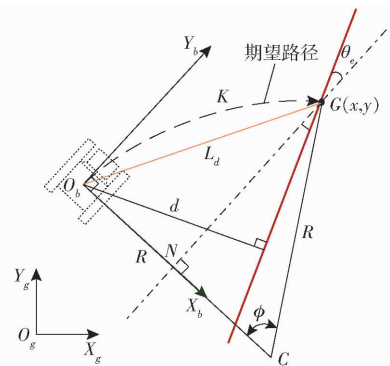


图3 纯跟踪模型示意图

Fig.3 Pure tracking model

根据文献[7],拖拉机转弯曲率  $K$  为

$$K = 2 \frac{d \cos \theta_e - \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta_e}{L_d^2} \quad (28)$$

掉头过程中,设相邻两个作业路径之间的距离为  $W$ ,则拖拉机的理想掉头半径为  $W/2$ 。履带拖拉机容易实现的3种掉头路径为:①路径1:取拖拉机最接近  $W/2$  的转弯半径  $R$ ,以  $R$  为半径形成半圆形掉头路径。②路径2:取小于  $W/2$  的转弯半径  $R$ ,形成转弯-直线-转弯的弓形掉头路径。③路径3:取两个均值约为  $W/2$  的转弯半径  $R_1$  和  $R_2$  ( $R_1 > R_2$ ),先以  $R_1$  为半径掉头  $90^\circ$ ,接着以  $R_2$  为半径掉头  $90^\circ$  形成掉头路径,如图4所示。

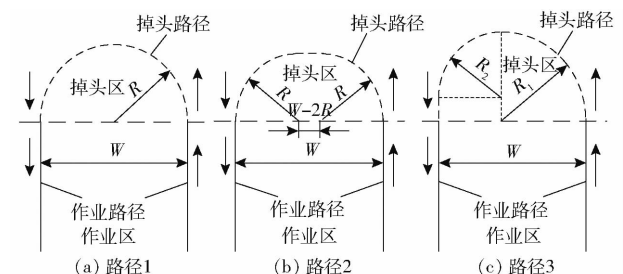


图4 掉头路径示意图

Fig.4 Schematic trajectory of turning

### 3.1 仿真试验

容积效率比  $\eta$  与 HST 压力、转速等参数有关,为 方便仿真计算设  $\eta = (-2.3 \times 10^{-4} \gamma_2^2 + 1) / (-2.5 \times 10^{-4} \gamma_1^2 + 1)$ , 常系数  $C = 8$ , 由式(11)令当行走和转向 HST 斜盘转角分别为第  $i$  和第  $j$  个状态时转弯曲率的均值  $\mu_{ij} = \tan \gamma_{2j} / (C \eta \tan \gamma_{1i})$ , 方差  $\sigma_{ij}^2 = 1$ , HST 斜盘转角  $\gamma_1 = \{0, 1, \dots, 30\}$ ,  $\gamma_2 = \{-30, -29, \dots, 0, 1, \dots, 30\}$ 。采用纯跟踪直线路径跟踪算法和第 1 种掉头路径进行仿真试验, 设控制周期  $T = 0.2$  s, 拖拉机速度为 2.0 m/s, 初始角度偏差为 0, 初始位置偏差分别为 0.5、1.0、1.5 m, 前视距离为 3 m, 作业行距为 3 m, 试验结果如图 5、6 所示。

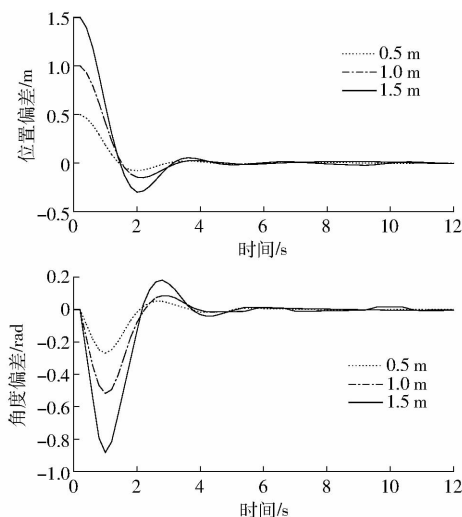


图 5 不同初始位置偏差路径跟踪效果  
Fig. 5 Path tracking effect of different initial position deviation

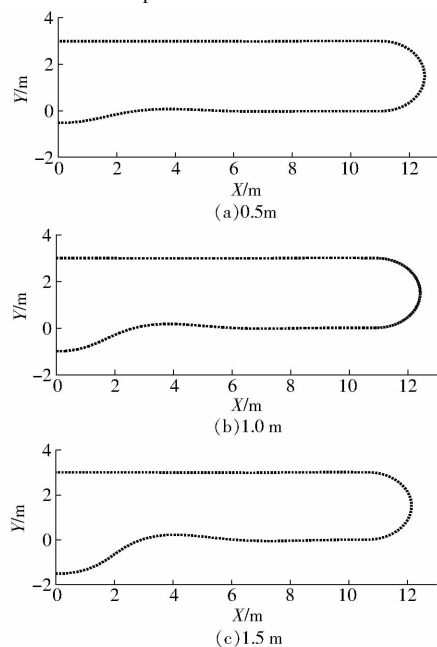


图 6 不同初始位置偏差导航路径  
Fig. 6 Navigation path under different initial position deviations

仿真结果表明,初始位置偏差分别为 0.5、1.0、1.5 m 时,拖拉机均可在 2 s 以内完成上线,上线距离小于 3 m,上线后位置偏差和角度偏差逐渐趋近于零。由仿真结果可知,基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法在履带拖拉机自动导航上线、直线路径跟踪和掉头等方面均满足农业生产需求。

### 3.2 路径跟踪试验

#### 3.2.1 车辆改造

对 NF-702 型履带拖拉机进行改造,如图 7 所示,拖拉机采用双天线 RTK 定位,可以高精度获取自身实时位置和航向;拖拉机行走机构和转向机构的 HST 采用电动推杆控制;操纵杆在手动驾驶时控制行走电动推杆行程;角度传感器在手动驾驶时读取方向盘的转动方向和角度,进而由导航控制器控制转向电动推杆行程;数字电位计在自动驾驶过程中控制油门电磁阀开启的大小。



图 7 履带拖拉机改造结果

Fig. 7 Crawler-type tractor retrofit

#### 3.2.2 试验与分析

设行走电动推杆伸长量为  $l_1$ , 转向电动推杆伸长量为  $l_2$ , 根据 HST 变量泵斜盘移动范围和电动推杆的控制精度将电动推杆移动范围平均分成 40 份。

试验分别以行驶速度 1.0、1.5 m/s, 前视距离 3.0 m, 作业路径行距 3.0 m, 初始位置偏差和航向角偏差均为 0 进行自动导航试验, 试验结果如图 8 和表 1 所示。

试验结果表明,在速度 1.0 m/s 时,误差绝对值平均值和均方根误差分别为 2.34 cm 和 3.77 cm;在速度 1.5 m/s 时,误差绝对值平均值和均方根误差分别为 2.57 cm 和 3.99 cm。由试验结果可知,基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法在 NF-702 型履带拖拉机自动导航领域可满足农业生产需求。

## 4 结论

(1) 针对履带拖拉机转弯半径与方向盘转角不

表1 导航试验结果

Tab.1 Results of navigation test

车速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	平均误差/ cm	误差绝对值 极值/cm	误差绝对值 均值/cm	均方根误 差/cm
1.0	-0.62	10.14	2.34	3.77
1.5	0.28	8.10	2.57	3.99

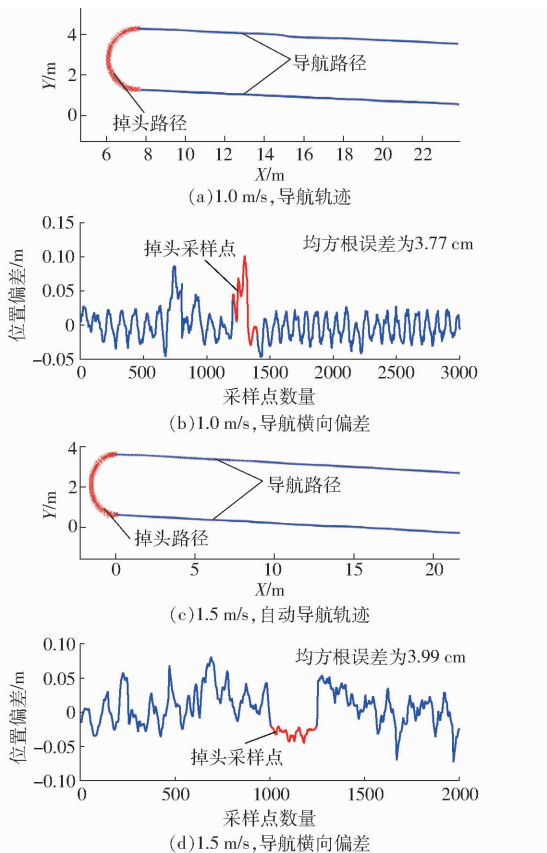


图8 不同速度下自动导航轨迹和横向偏差

Fig.8 Trajectory and lateral error of autonomous navigation at different speeds

是定比的问题,以NF-702型履带拖拉机为研究对象,研究拖拉机转弯半径和相关控制量的关系,建立

NF-702型履带拖拉机转弯半径数学模型。

(2)根据NF-702型履带拖拉机转弯半径数学模型,计算每个控制位置转弯曲率的均值和方差,构建基于卡尔曼滤波和局部加权回归的模型更新方法,建立基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法。

(3)分别以初始位置偏差0.5、1.0、1.5 m,初始角度偏差0,速度2 m/s,前视距离3 m,作业行距3 m,进行自动导航仿真试验,得到上线时间小于2 s,上线距离小于3 m的导航轨迹。

(4)分别以车速1.0 m/s和1.5 m/s,前视距离3 m,作业行距3 m,初始位置偏差和初始角度偏差均为0进行导航试验,得到导航轨迹和误差,平均误差分别为-0.62 cm和0.28 cm,误差绝对值极值分别为10.14 cm和8.10 cm,误差绝对值均值分别为2.34 cm和2.57 cm,均方根误差分别为3.77 cm和3.99 cm。试验结果表明,基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法在NF-702型履带拖拉机自动导航领域可满足农业生产需求。

## 参 考 文 献

- [1] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020,51(1): 1-18.  
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):1-18. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20200101&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200101&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)
- [2] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2020,51(4):1-18.  
ZHANG Man, JI Yuhuan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):1-18. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20200401&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200401&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)
- [3] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(8):1-17.  
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):1-17. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180801&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180801&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [4] 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.  
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(10):1-10. (in Chinese)
- [5] 伟利国. 农机导航多模变结构智能控制方法研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2015.  
WEI Ligu. The application of multimode variable structure intelligent control in typical agriculture machinery navigation system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015. (in Chinese)

- [6] 韩树丰, 何勇, 方慧. 农机自动驾驶及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4):381-391.  
HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review[J]. Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.), 2018,44(4):381-391. (in Chinese)
- [7] 贾全. 拖拉机自动驾驶系统自适应控制方法研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2018.  
JIA Quan. Adaptive control method for tractor auto-guidance system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese)
- [8] 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630型水稻插秧机GPS自动驾驶系统[J]. 农业机械学报, 2011,42(7):186-190.  
WEI Liguó, ZHANG Quan, YAN Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(7):186-190. (in Chinese)
- [9] 魏爽, 李世超, 张漫, 等. 基于GNSS的农机自动驾驶路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报, 2017,33(增刊):70-77.  
WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(Supp.):70-77. (in Chinese)
- [10] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019,35(4):11-19.  
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(4):11-19. (in Chinese)
- [11] 张智刚, 王桂民, 罗锡文, 等. 拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(3):352-357.  
ZHANG Zhigang, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Detection method of steering wheel angle for tractor automatic driving [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3):352-357. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190340&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190340&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.040. (in Chinese)
- [12] 李革, 王宇, 郭刘粉, 等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(5):21-26.  
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):21-26. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180502&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180502&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)
- [13] TAKAI R, YANG L, NOGUCHI N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014,7(4):143-147.
- [14] TAKAI R, BARAWID O, ISHII K, et al. Development of crawler-type robot tractor based on GPS and IMU[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010,43(26):151-156.
- [15] 贾全, 张小超, 苑严伟, 等. NF-752型履带式拖拉机自动驾驶系统[J]. 农业工程, 2018,8(4):24-29.  
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Automatic driving system for NF-752 tracked tractor[J]. Agricultural Engineering, 2018,8(4):24-29. (in Chinese)
- [16] 伟利国, 胡小安, 王丽丽. 开沟铺管机自动驾驶系统设计与试验[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2012, 34(6):667-670.  
WEI Liguó, HU Xiaoan, WANG Lili. Automatic navigation system design and experiment of pipe-laying trencher[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2012,34(6):667-670. (in Chinese)
- [17] 王博洋, 龚建伟, 高天云, 等. 基于双层驾驶员模型的履带车辆纵向与横向协同跟踪控制方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(9):1675-1682.  
WANG Boyang, GONG Jianwei, GAO Tianyun, et al. Longitudinal and lateral path following coordinated control method of tracked vehicle based on double-layer driver model[J]. Acta Armamentarii, 2018,39(9):1675-1682. (in Chinese)
- [18] 王博洋, 龚建伟, 高天云, 等. 基于高斯混合-隐马尔可夫模型的速差转向履带车辆横向控制驾驶员模型[J]. 兵工学报, 2017,38(12):2301-2308.  
WANG Boyang, GONG Jianwei, GAO Tianyun, et al. Steering control driver model of skid steering vehicle based on Gaussian mixture model-hidden Markov model[J]. Acta Armamentarii, 2017,38(12):2301-2308. (in Chinese)
- [19] 胡家铭, 胡宇辉, 陈慧岩, 等. 基于模型预测控制的无人驾驶履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(3):456-463.  
HU Jiaming, HU Yuhui, CHEN Huiyan, et al. Research on trajectory tracking of unmanned tracked vehicles based on model predictive control[J]. Acta Armamentarii, 2019,40(3):456-463. (in Chinese)
- [20] TAKAI R, BARAEID O, NOGUCHI N. Autonomous navigation system of crawler-type robot tractor[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011,44(1):14165-14169.