

基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究

张华强^{1,2} 王国栋¹ 吕云飞¹ 秦昌礼¹ 刘林¹ 官金良^{1,2}

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049; 2. 山东理工大学生态无人农场研究院, 淄博 255049)

摘要: 为提高农机作业时直线行驶的精度,提出了一种基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法。在建立了运动学模型和纯追踪模型的基础上,对农机直线跟踪方法进行研究;针对GPS导航精度易受噪声干扰的问题,通过卡尔曼滤波对航向误差以及横向误差进行了平滑处理,以获取更高精度的航向误差和横向误差;为提高纯追踪模型的自适应能力,以横向误差和航向误差的均方根误差为基础,构建适应度函数,并设计了权重函数,采用横向误差作为主要决策参数,通过粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法实时确定纯追踪模型中的前视距离;为使粒子群减少计算时间、尽快进行局部搜索,对PSO算法中惯性权重系数进行了改进。以东方红1104-C型拖拉机为试验平台,设计了农机自动导航控制系统,进行了农田播种试验。结果表明:当农机行驶速度为0.7 m/s时,采用基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法,直线跟踪的最大横向误差为0.09 m;当行驶距离超过5 m后,最大横向误差为0.02 m,该算法能够有效地提高农机作业时的直线行驶精度。

关键词: 农业机械; 自动导航控制; 改进纯追踪模型; 粒子群算法; 卡尔曼滤波; 前视距离

中图分类号: TP23; S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)09-0018-08

OSID:



Agricultural Machinery Automatic Navigation Control System Based on Improved Pure Tracking Model

ZHANG Huaqiang^{1,2} WANG Guodong¹ LÜ Yunfei¹ QIN Changli¹ LIU Lin¹ GONG Jinliang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shangdong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Academy of Ecological Unmanned Farm, Shangdong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of driving straight when agricultural machinery works, an agricultural machinery path tracking algorithm based on an improved pure tracking model was designed. The linear tracking method of agricultural machinery was studied, which was based on the establishment of agricultural machinery kinematics model and pure tracking model. Aiming at the problem that GPS navigation accuracy was susceptible to noise interference, the Kalman filter was used to smooth the heading error and the lateral error so that higher accuracy heading and lateral errors can be obtained. In order to improve the adaptive ability of the pure tracking model, a fitness function was constructed based on the root mean square error of the lateral error and the heading error, and a weight function was designed, and the lateral error was used as the main decision parameter to determine the forward view in the pure tracking model in real time distance. In order to reduce the calculation time of the particle swarm, which the local search of the particle swarm can be performed as soon as possible, the inertia weight coefficient in the particle swarm optimization (PSO) algorithm was improved. When conducting field planting trials, an automatic navigation control system for agricultural machinery was designed where Dongfanghong 1104-C was used as the experimental platform. Seeding experiment proved that: when the path tracking algorithm based on improved pure tracking model was adopted, the agricultural machinery travel speed was 0.7 m/s, the maximum lateral error of the linear tracking was 0.09 m; when the driving distance exceeded 5 m, the maximum lateral error was 0.02 m. The proposed improved pure tracking model had good applicability to the automatic navigation control of agricultural machinery, which can effectively improve the straight-line driving accuracy during agricultural machinery operation.

Key words: agricultural machinery; automatic navigation control; improved pure tracking model; particle swarm optimization; Kalman filter; forward-looking distance

0 引言

农业机械(以下简称农机)自动导航控制技术已经成为解放生产力、实现农业自动化的重要技术。2017年英国哈珀亚当斯大学建立了全球首家应用自动拖拉机进行播种、喷洒的无人农场,美国爱荷华州超级农场的智能拖拉机已经能够完成种植、喷洒农药的全部工作。我国正处在传统农业向现代农业转型的重要时期,农业科技对我国农业未来发展起着至关重要的作用^[1]。农机路径跟踪控制是农业装备自动导航技术的关键,我国研究人员对路径跟踪方法进行了研究,主要方法包括PID控制方法、模糊控制方法、A*控制方法、纯追踪模型等^[2]。文献[3]采用RTK-DGPS定位技术设计了直线跟踪的PID导航控制系统,在农机行进速度为0.8 m/s时,最大横向误差小于0.15 m,平均误差小于0.03 m。文献[4]采用模糊控制方法,路径跟踪最大误差小于0.1 m,最小误差小于0.05 m。PID控制方法的缺点是参数整定困难,需要进行大量的试验;模糊控制方法进行直线行驶的精度在很大程度上依赖于专家的经验 and 知识以及操作员的操作模式,因而精度有限。

纯追踪模型是一种模拟人驾驶行为的几何追踪模型,通过计算曲率将车辆从初始位置移动到目标位置,纯追踪模型的核心是确定一个合适的前视距离。文献[5]通过试验证明,取轮距为前视距离时能得到较好的跟踪效果,但得到的精度有限。文献[6]通过BP神经网络动态调整能够获得更加合适的前视距离,且具有较高的鲁棒性,但此方法需要大量的优质样本,并且容易陷入局部最优。

为了提升农机作业时直线行驶的精度,本文提出一种通过PSO算法动态确定纯追踪模型前视距离的路径跟踪算法,进而得到更高精度的跟踪轨迹。以东方红1104-C型拖拉机为试验平台构建农机自动导航系统,进行农田播种试验,以验证算法的有效性。

1 直线行驶路径跟踪方法设计

在自动导航控制系统中,为了对农机直线行驶路径进行精确跟踪,构建了路径跟踪控制器,其由卡尔曼滤波模块、PSO模块、纯追踪模型模块组成,如图1所示。图中 ξ_d 为经过卡尔曼滤波模块的横向误差、 ξ_θ 为经过卡尔曼滤波模块的航向角误差; L_d 为PSO算法自适应实时确定的前视距离。

1.1 运动学建模

农机在路径跟踪的作业过程中,符合低速行驶、

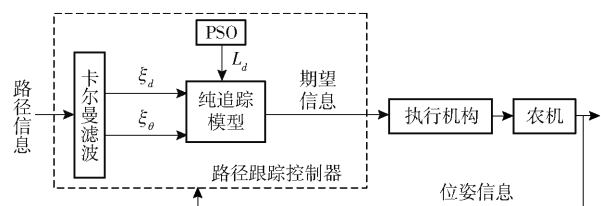


图1 路径跟踪系统原理图

Fig.1 Path following system

小转向角度微调行驶路径特点,假设轮胎与地面不产生横向力,轮胎不产生横偏角,则车辆遵循阿克曼转向模型^[7]。阿克曼转向几何示意图如图2所示,图中 δ_1 为外轮转向角、 δ_2 为内轮转向角、 L 为轴距、 r 为转向半径、 b 为轮距、 δ 为前轮平均转向角。

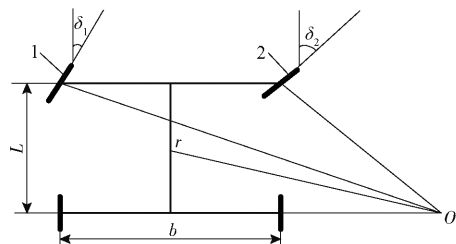


图2 阿克曼转向几何示意图

Fig.2 Ackerman steering geometry diagram

1. 前轮外轮 2. 前轮内轮

对图2中几何关系分析,内外轮转向角关系为

$$\cot \delta_2 - \cot \delta_1 = b/L \quad (1)$$

前轮平均转向角为

$$\delta \approx L/r \quad (2)$$

农机通常以二轮模型进行运动学分析,即假设农机在平滑路面行驶,轮胎与地面只产生纵向压力,可将农机模型简化为二轮模型。轮胎为刚性轮,不产生侧向滑动,二轮模型实际是简化后的阿克曼模型。二轮模型示意图如图3所示。图中, $A(x_s, y_s)$ 表示前轮轴心坐标, $B(x_d, y_d)$ 表示后轮轴心坐标, α 为农机航向角, δ_s 为前轮转向角, v_s 和 v_d 分别表示前、后轮速度。

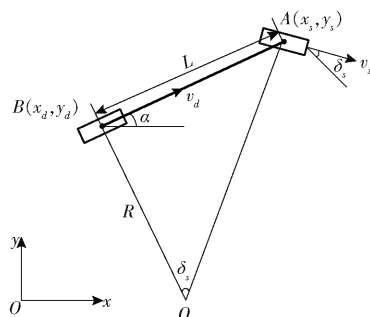


图3 二轮模型示意图

Fig.3 Schematic of two-round model

由二轮模型可得前轮转向角为

$$\delta_s = \arctan(L/R) \quad (3)$$

根据转向角与后轮线性速度关系可得

$$\dot{\alpha} = \frac{v_d}{R} = \frac{v_d \tan \delta_s}{L} \quad (4)$$

$r_1、r_2$ ——(0,1)之间的随机数

惯性权重系数 ω 具有平衡粒子群全局和局部搜索的能力,能够减小粒子群算法对最大速度的需要。当惯性权重系数 ω 较大时,粒子群全局搜索能力较强^[18];当惯性权重系数 ω 较小时,粒子群局部搜索能力较强。目前粒子群搜索方法主要采用惯性权重系数 ω 随着进化而线性减小的方法,但由于粒子群算法早期收敛的速度较快^[19],所以应尽快使粒子群进行局部搜索,因此惯性权重系数 ω 线性减小的方法求解效率较差。

2.1 PSO 算法惯性权重系数的改进

为尽快使粒子群进行局部搜索,应加速惯性权重系数 ω 的递减速度,故本文设计了一种惯性权重系数 ω 从 $\omega_{\max}$ 到 $\omega_{\min}$ 以凹函数递减的方法

$$\omega = e^{-s/s_{\max}} \tag{15}$$

式中 $s_{\max}$ ——最大迭代次数

根据式(15)得到不同迭代次数的凹函数和线性函数的变化对比,如图 5 所示。

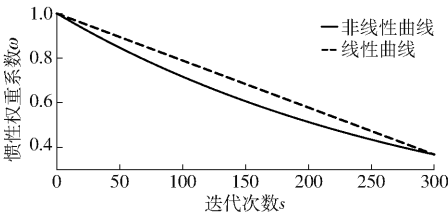


图 5 不同线性曲线权重系数 ω 变化对比
Fig. 5 Comparison of weight coefficients ω of different linear curves

由图 5 可知,当迭代次数 s 增大时,凹函数比线性函数的惯性权重系数降低更快,能够使 PSO 算法更快地进入局部搜索,使粒子群具有更好的局部搜索能力,且能够获得更好的求解效率。

通过多次对比试验,当惯性权重系数 ω 采用凹函数递减时,在迭代 260 次左右,粒子群便能获得最优解;而当惯性权重系数采用线性函数递减时,当迭代 400 次左右时,粒子群才能获得最优解。因此凹函数递减方法能够较大幅度提高粒子群算法计算的效率,减少计算时间。

2.2 适应度函数设计

适应度函数^[20]是粒子群算法的关键,合适的适应度函数能够使粒子快速找到最优解。均方根误差是衡量实际值与真值之间误差的重要依据,本文采用横向误差 d 与航向误差 θ 的均方根之和作为粒子群寻优的主要参考。

横向误差 d 的评价参数为

$$F_1 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=M-N}^M \left(d(t) - \frac{1}{N} \sum_{t=M-N}^M d(t) \right)^2} \tag{16}$$

航向误差 θ 的评价参数为

$$F_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=M-N}^M \left(\theta(t) - \frac{1}{N} \sum_{t=M-N}^M \theta(t) \right)^2} \tag{17}$$

由式(16)、(17)为基础设计适应度函数

$$F = \lambda F_1 + (1 - \lambda) F_2 \tag{18}$$

式中 N ——工作时长 M ——采样时刻
 λ ——权重

$d(t)、\theta(t)$ —— t 时刻的横向误差和航向误差

所设计的适应度函数 F 能够根据横向误差 d , 调整横向误差 d 和航向误差 θ 的决策权重,具有良好的适应性。

2.3 权重函数设计

在基于 PSO 算法的纯追踪模型中,当横向误差 d 较大时,前视距离 L_d 主要通过横向误差 d 进行决策;当横向误差 d 较小时,前视距离 L_d 主要通过航向误差 θ 进行决策,故设计权重为^[21]

$$\lambda = \log_a((d+1)/U) \quad (U \geq (d_{\max} + 1)/a) \tag{19}$$

式中 a ——权重函数的底数, $a > 1$

U ——调整参数

$d_{\max}$ ——最大横向误差

根据式(19)得到权重示意图如图 6 所示。

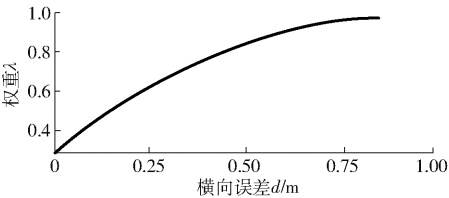


图 6 权重示意图
Fig. 6 Schematic of weight coefficient

由图 6 可知,当横向误差 d 增大时,权重加快增大,即横向误差 d 在适应度函数 F 中比重快速增大,航向误差 θ 比重减小,当横向误差增大到 0.25 m 时,权重 λ 为 0.65,即适应度函数为 $F = 0.65F_1 + 0.35F_2$,适应度函数 F 主要通过横向误差 d 进行决策。

2.4 PSO 算法参数设置及流程

在 PSO 算法中,最大迭代次数 t 为 300,粒子群个数为 50,步长 $c_1、c_2$ 均为 1,随机数 $r_1、r_2$ 均为 0.9,权重系数最大值 $\omega_{\max}$ 为 1、最小值 $\omega_{\min}$ 为 $1/e$,前视距离 L_d 范围为 $[1\text{ m}, 7\text{ m}]$,粒子速度 v 范围为 $[0.7\text{ m/s}, 1.5\text{ m/s}]$ 。PSO 算法流程如图 7 所示。

将 PSO 算法中惯性权重系数进行改进,设计了凹函数式(15)使粒子群能够尽快进行局部搜索,提高了 PSO 算法的求解效率;设计了具有权重调整的适应度函数式(18),能够使粒子群根据横向误差和

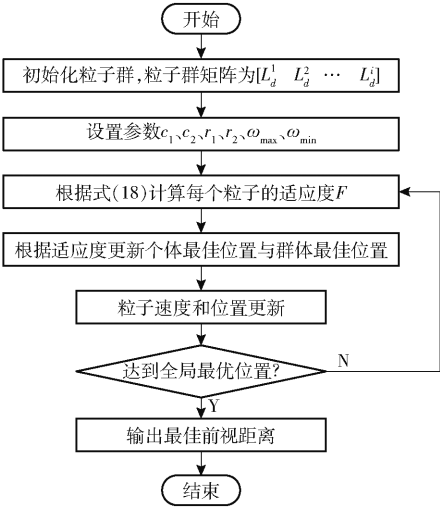


图7 PSO 算法流程图

Fig.7 PSO algorithm flow chart

航向误差调节决策权重^[22],以便能够获得更加合适的前视距离。

本文通过上述改进 PSO 算法确定前视距离,步骤如下:

(1)初始化粒子群,确定初始粒子的位置和速度。设定粒子群个数 i 为 50,在前视距离范围 $[1\text{ m}, 7\text{ m}]$ 内均匀分布生成前视距离粒子群矩阵 $[L_d^1\ L_d^2\ \cdots\ L_d^i]$,在粒子速度范围内均匀分布产生 v_{ij} 。

(2)计算每个粒子的适应度。根据农机的实时位姿信息,通过所设计的适应度函数式(18)确定每个粒子,即每个前视距离的适应度。

(3)比较每个粒子与个体最优位置 p_i 适应度,若更好,则将该粒子作为个体最优位置。

(4)比较每个粒子与全局最优位置 p_g 适应度,若更好,则将该粒子作为全局最优位置。

(5)根据 PSO 算法的基本进化公式(13)、(14),以及本文所设计的凹函数式(15)对粒子的位置和速度进行进化。

(6)在达到最大迭代次数前,重复步骤(2)~(5);达到最大迭代次数后,停止运算,输出全局最优位置,即最优前视距离。

3 试验与结果分析

3.1 试验平台搭建

通过前期仿真试验,本文所设计的基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法具有良好的适应性,能够以较高精度进行直线行驶。为了进一步验证该方法有效性,以东方红 1104-C 型拖拉机为试验平台构建农机试验系统,如图 8 所示,并于山东省淄博市朱台镇试验田进行了实地验证。

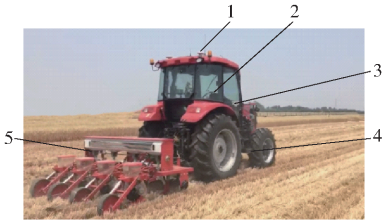


图8 播种试验系统平台

Fig.8 Seeding test system platform

1. GNSS 天线 2. 电动方向盘 3. 自动驾驶控制器 4. 角度传感器 5. 播种机

东方红 1104-C 型拖拉机参数见表 1。

表1 东方红 1104-C 型拖拉机参数

Tab.1 Dongfanghong 1104-C tractor parameters

参数	数值
外形尺寸/(mm×mm×mm)	4 436×2 250×2 990
最小使用质量/kg	4 250
速度范围/(km·h ⁻¹)	2.69~37.95
前轮轮距/mm	1 748~2 000
后轮轮距/mm	1 620~2 120
轴距/mm	2 314
最大牵引力/kN	20
最小转向圆半径/m	5.6

试验平台系统组成如图 9 所示,主要由平台端、自动驾驶端、控制执行端构成^[23]。其中自动驾驶端的核心是基于改进纯追踪模型的路径跟踪控制器^[24]。

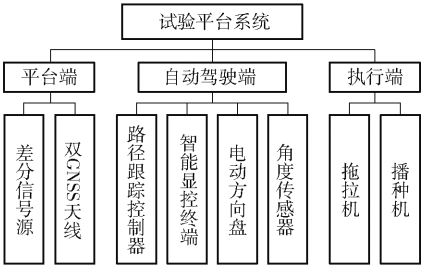


图9 试验平台系统组成图

Fig.9 Composition chart of test platform system

路径跟踪过程首先由平台端(RTK-DGPS)采集边界信息数据生成路径,随后指令下发给自动驾驶端^[25],自动驾驶端解析路径文件及控制文件,根据位置判断下发控制指令,通过 CAN 总线控制执行端,执行端完成启动、停止、加速、转弯、农具升降。试验平台系统结构如图 10 所示。

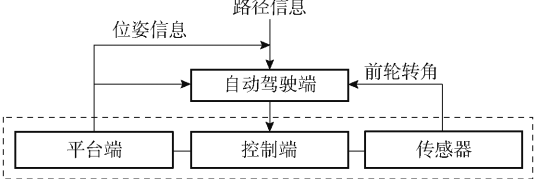


图10 试验平台系统结构示意图

Fig.10 Schematic of test platform system

3.2 前视距离对比试验

设置起始点 A 坐标为 $(20\text{ m}, 13\text{ m})$, 农机行驶速度为 0.7 m/s , 试验行驶长度为 70 m , 行距为 2.5 m , 采用鱼尾型调头方式, 设定当农机位于预设轨迹北侧时, 横向误差 $d > 0$; 位于南侧时, 横向误差 $d < 0$ 。试验路径规划如图 11 所示。

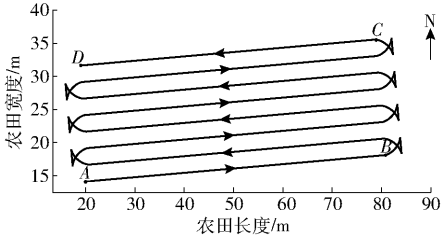


图 11 试验路径规划

Fig. 11 Test path planning

在相同的试验路径下, 对比固定前视距离和基于改进的纯追踪模型动态调整前视距离的方法进行对比, 设定初始固定前视距离为轮距 2.0 m 。

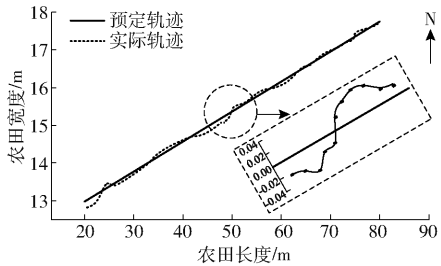


图 12 固定前视距离的行驶轨迹

Fig. 12 Driving trajectory with fixed-looking distance

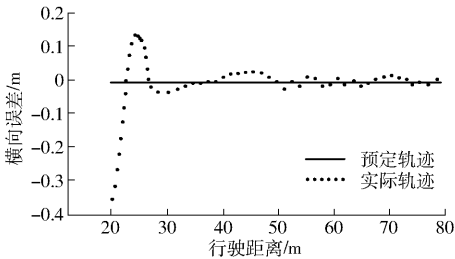


图 13 固定前视距离的横向误差

Fig. 13 Lateral deviation with fixed-looking distance

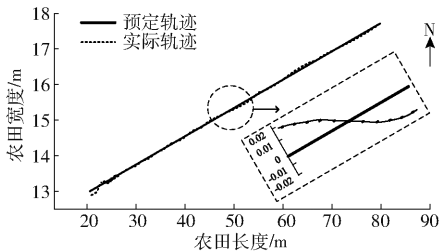


图 14 动态调整前视距离的行驶轨迹

Fig. 14 Dynamic adjustment of driving trajectory of forward-looking distance

图 12、13 表示在固定前视距离下的行驶轨迹和横向误差变化; 图 14、15 表示动态前视距离下的行驶轨迹和横向误差变化。对比试验结果, 在相同规

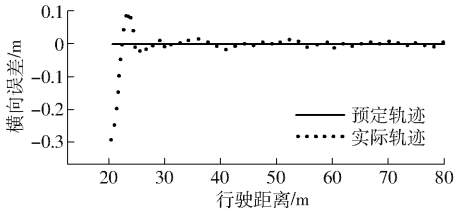


图 15 动态调整前视距离的横向误差

Fig. 15 Dynamic adjustment of lateral deviation of forward-looking distance

划路径下, 农机上线后, 固定前视距离的行驶轨迹横向误差波动较大, 最大横向误差为 0.15 m , 行驶距离大于 20 m 以后, 最大横向误差为 0.05 m ; 而动态前视距离行驶轨迹横向误差变化较小, 最大横向误差为 0.09 m , 当行驶距离大于 20 m 以后, 最大横向误差为 0.02 m 。动态前视距离变化如图 16 所示。

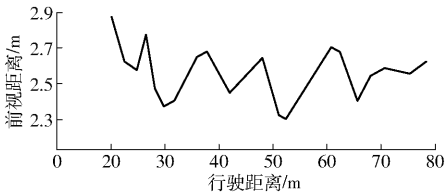


图 16 动态前视距离变化曲线

Fig. 16 Dynamic forward-looking distance change

通过对比试验可以确定: 基于改进的纯追踪模型动态调整前视距离的方法, 在直线跟踪的效果以及初始调整的距离上明显优于固定前视距离的方法。

3.3 试验结果分析

在改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法下, 以农机试验平台进行播种试验, 对农机行驶的 6 条轨迹的横向误差进行统计分析, 统计结果如表 2 所示。

表 2 横向跟踪误差统计结果

Tab. 2 Statistical results of horizontal tracking error

行号	最大误差	最小误差	平均误差	均方根误差
1	0.090	0.008	0.023	0.061
2	0.015	-0.007	0.004	0.006
3	-0.025	0.004	0.017	0.019
4	0.020	0.001	0.005	0.007
5	0.014	0.003	0.008	0.010
6	-0.016	-0.002	0.001	0.003

根据统计结果, 除第 1、3 行外, 其他行最大横向误差不大于 0.02 m , 这说明本文所设计系统方法具有良好的稳定性和精度。第 1 行最大误差 0.09 m , 是由于农机在前 5 m 时初始对准产生的; 第 3 行最大误差 -0.025 m , 超过 0.02 m , 是因为田间作业不确定因素较多, 有的轨迹路线上会出现凹坑、碎石

等。由于第1行初始校准误差较大,统计分析意义不大,所以只分析第2行及以后各行。不同轨迹横向误差示意图如图17所示。

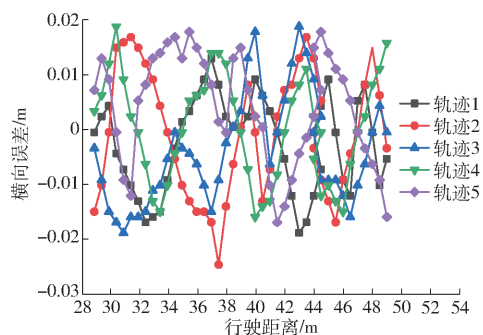


图17 不同轨迹横向误差变化曲线

Fig.17 Lateral deviation of different trajectories

由图17可知,除部分轨迹因田间不可避免因素产生较大误差,其余轨迹均能保证在预定轨迹0.02 m范围内波动,动态调整前视距离能够使横向误差快速消除,精度大幅提高。

4 结论

(1)针对农机直线行驶的精度问题,提出了一种改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法,基于PSO粒子群算法改进纯追踪模型,根据农机实时位姿信息动态调整前视距离。采用该方法的试验结果表明:当行驶距离超过5 m、前进速度为0.7 m/s时,农机行驶的最大横向误差为0.02 m,与常规方法相比,基于PSO算法的改进纯追踪模型能够提高直线行驶的精度。

(2)设计了以东方红1104-C型拖拉机为试验平台的农机自动导航系统,并进行农田播种试验。针对信号噪声影响GPS导航精度问题,设计了卡尔曼滤波器,保证了农机位姿信息的精度。

(3)改进的PSO算法参数能够使粒子群尽快进行局部搜索,减少运算时间,优于权重系数 ω 线性减小的方法。

参 考 文 献

- [1] 英媒:农业未来什么样?到英国看看全球首家无人农场[J].农业工程技术,2017,37(24):63.
British media: what is the future of agriculture? come to Britain to see the world's first unmanned farm[J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(24): 63. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 罗锡文,张智刚,赵祉喜,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. DGPS automatic navigation control system of Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- [4] 李逃昌,胡静涛,高雷,等.基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J/OL].农业机械学报,2013,44(1):205-210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205-210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130139&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039. (in Chinese)
- [5] PETRINEC K, KOVACIC Z, MAROZIN A. Simulator of multi-AGV robotic industrial environments[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. IEEE, 2009: 979-983.
- [6] 黄沛琛,罗锡文,张智刚.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)
- [7] 唐应时,朱位宇,朱彪,等.基于轮胎磨损的悬架与转向系统硬件优化[J].汽车工程,2013,35(7):640-644,653.
TANG Yingshi, ZHU Weiyu, ZHU Biao, et al. Hard-points optimization of suspension and steering systems based on tire wear[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(7): 640-644, 653. (in Chinese)
- [8] PRATAMA P S, GULAKARI A V, SETIAWAN Y D, et al. Trajectory tracking and fault detection algorithm for automatic guided vehicle based on multiple positioning modules[J]. International Journal of Control Automation Systems, 2016, 14(2): 400-410.
- [9] 张闻宇,丁幼春,王雪玲,等.基于SVR逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):29-36.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse model for tractor navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 29-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.005. (in Chinese)
- [10] 孟庆宽,仇瑞承,张漫,等.基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J/OL].农业机械学报,2015,46(3):29-36.
MENG Qingkuan, QIU Ruicheng, ZHANG Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,

- 2015,46(3):29–36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005. (in Chinese)
- [11] FRANCISCO E F J, GARY G Y. Particle swarm optimization of deep neural networks architectures for image classification [J]. Swarm and Evolutionary Computation,2019,49:62–74.
- [12] SUN Xin, CHAI Senchun, ZHANG Baihai. Trajectory planning of the unmanned aerial vehicles with adaptive convex optimization method[J]. IFAC-Papers OnLine,2019,52(12):67–72.
- [13] XIAO Mengli, ZHANG Yongbo, WANG Zhihua, et al. An adaptive three-stage extended Kalman filter for nonlinear discrete-time system in presence of unknown inputs [J]. ISA Transactions,2018,75:101–117.
- [14] ZHANG Shuo, WANG Yunyi, ZHU Zhongxiang, et al. Tractor path tracking control based on binocular vision[J]. Information Processing in Agriculture,2018,5(4):422–432.
- [15] WANG Zhifu, ZHOU Yang, LI Chaopeng, et al. Research on straight line stability control strategy of four-wheel drive vehicle based on the sliding mode variable structure control and optimization algorithm[J]. Energy Procedia,2016,104:342–347.
- [16] OLA R, THOMAS H, IWAN W, et al. Estimating wheel slip for a forest machine using RTK–DGPS [J]. Journal of Terramechanics,2012,49(5):271–279.
- [17] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [18] LIU Yufei, NOGUCHI N. Development of an unmanned surface vehicle for autonomous navigation in a paddy field [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food,2016,9(1):21–26.
- [19] KIM D, KIM H, YI K. Design of near-minimum time path planning algorithm for autonomous driving[J]. Trans. Korean Soc. Mech. Eng.,2013,37(5):609–617.
- [20] AUAT C, FERNANDO A, CARELLI R. Agricultural robotics: unmanned robotic service units in agricultural tasks[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2013,3(7):48–58.
- [21] BAYAR G, BERGERMAN M, KOKU A B, et al. Localization and control of an autonomous orchard vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,115:118–128.
- [22] LIU Changqing, ZHAO Xueyan, DU Yuefeng, et al. Research on static path planning method of small obstacles for automatic navigation of agricultural machinery [J]. IFAC-Papers OnLine,2018,51(17):673–677.
- [23] YANG Shanjie, MEI Shuli, ZHANG Yane, et al. Detection of maize navigation centerline based on machine vision[J]. IFAC-Papers OnLine,2018,51(17):570–575.
- [24] CHEN Jiawang, ZHU Huangchao, ZHANG Lei, et al. Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization[J]. Ocean Engineering,2018,156(15):217–223.
- [25] HUANG Peichen, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Path tracking control of a differential-drive tracked robot based on look-ahead distance[J]. IFAC-Papers OnLine,2018,51(17):112–117.

(上接第39页)

- [14] LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft COCO: common objects in context [C] // European Conference on Computer Vision. Cham:Springer, 2014:740–755.
- [15] PEZZEMENTI Z, TABOR T, HU P, et al. Comparing apples and oranges: off-road pedestrian detection on the national robotics engineering center agricultural person-detection dataset [J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(4):545–563.
- [16] 薛金林, 闫嘉, 范博文. 多类农田障碍物卷积神经网络分类识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):35–41. XUE Jinlin, YAN Jia, FAN Bowen. Classification and identification method of multiple kinds of farm obstacles based on convolutional neural network [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):35–41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.006. (in Chinese)
- [17] 刘慧, 张礼帅, 沈跃, 等. 基于改进 SSD 的果园行人实时检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4):29–35, 101. LIU Hui, ZHANG Lishuai, SHEN Yue, et al. Real-time pedestrian detection in orchard based on improved SSD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):29–35, 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190403&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.003. (in Chinese)
- [18] LIN T, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, 2017.
- [19] WU T, TANG S, ZHANG R, et al. Tree-structured kronecker convolutional network for semantic segmentation [C] // 2019 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Shanghai, China, 2019.
- [20] 李龙, 王翱翔, 韩越兴, 等. 基于几何约束的双目测距技术研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(7):8–11. LI Long, WANG Aoxiang, HAN Yuexing, et al. Research on binocular ranging by geometrical constraint[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(7):8–11. (in Chinese)
- [21] 廖娟, 汪鹄, 尹俊楠, 等. 基于双目视觉的作物点云获取与分割定位方法[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4):847–852. LIAO Juan, WANG Yao, YIN Junnan, et al. Point cloud acquisition, segmentation and location method of crops based on binocular vision[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(4):847–852. (in Chinese)