

基于优化人工势场法的插秧机绕障策略研究

姜龙腾^{1,2} 迟瑞娟^{1,2} 熊泽鑫^{1,2} 马悦琦^{1,2} 班超^{1,2} 朱晓龙^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学车辆智能控制实验室, 北京 100083)

摘要: 针对水田中存在的壕沟、田埂、石块、电线杆等障碍物使得插秧机无法保证作业连续性和插秧直线性等问题, 设计了基于优化人工势场法的插秧机绕障路径规划策略。通过增加插秧机实时位置与目标作业点的相对距离作为判断条件来动态改变势场大小, 同时设立了虚拟局部目标点来弥补传统人工势场法目标点不可达和局部最小点的算法缺陷; 将插秧机简化为二轮车模型, 建立插秧机转向系统数学模型, 得出插秧机速度、行驶航向角和前轮转角表达式, 以横向偏差与航向偏差作为评判路径优化效果的因素。转向控制器以复合模糊 PID 算法控制插秧机的转角, 不断减小理想前轮转角与实际转角的偏差, 实现转角最优化; 采用超声波传感器实时检测道路障碍物并结合 RTK-GPS 实时更新位置坐标, 设计出插秧机绕障转向控制策略。通过 Matlab 对优化的人工势场法的避障路径控制策略进行仿真, 仿真结果表明, 当障碍物不在影响范围内, 插秧机直线追踪的最大横向位置偏差为 5 cm, 平均偏差约为 2 cm, 最大避障横向偏差小于 0.5 m, 优化后的算法具有较好的控制精度, 可避免目标点不可达的问题。基于洋马 VP6E 插秧机作为实验平台进行了实车实验, 实验结果表明, 当插秧机以速度 0.5、1.0、1.5 m/s 行驶时, 左侧绕障的最大横向偏差均不大于 1.221 8 m, 航向偏差最大值为 30.149 1°, 绕障前后直线追踪的平均横向偏差为 0.025 m, 平均航向偏差为 3.12°; 右侧绕障的最大横向偏差均不大于 1.245 9 m, 航向偏差最大值为 25.229 4°, 绕障前后直线追踪的平均横向偏差为 0.023 m, 平均航向偏差为 3.36°, 所设计的避障方法可满足插秧机在农艺作业过程中的避障要求, 具有很好的可行性与鲁棒性。

关键词: 自主导航插秧机; 人工势场法; 避障路径规划; 自主决策

中图分类号: S223.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0020-8

Obstacle Winding Strategy of Rice Transplanter Based on Optimized Artificial Potential Field Method

JIANG Longteng^{1,2} CHI Ruijuan^{1,2} XIONG Zexin^{1,2} MA Yueqi^{1,2} BAN Chao^{1,2} ZHU Xiaolong^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Vehicle Intelligent Control Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems that the obstacles such as ditches, ridges, stones and electric poles in paddy fields make the rice transplanter unable to ensure the continuity of operation and the straightness of rice transplanting, a path planning strategy for rice transplanter around obstacles based on optimized artificial potential field method was designed. The relative distance between the real-time position of the transplanter and the target operation point was added as the judgment condition to dynamically change the size of the potential field. At the same time, a virtual local target point was set up to make up for the algorithm defects of the target point unreachable and local minimum point of the traditional artificial potential field method. The transplanter was simplified into a two wheeled vehicle model, the mathematical model of the steering system of the transplanter was established, and the expressions of the speed, heading angle and front wheel angle of the transplanter were obtained. The lateral deviation and heading deviation were used as the factors to judge the effect of path optimization. The steering controller used the compound fuzzy PID algorithm to control the rotation angle of the transplanter, continuously reduce the deviation between the ideal front wheel rotation angle and the actual rotation angle, and realize the optimization of the rotation angle. Using ultrasonic sensor to detect road obstacles in real time and

收稿日期: 2022-06-15 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172396)

作者简介: 姜龙腾(1999—), 男, 硕士生, 主要从事车辆机电控制及智能化研究, E-mail: 656065332@qq.com

通信作者: 迟瑞娟(1969—), 女, 副教授, 主要从事车辆机电控制及智能化研究, E-mail: chiruijuan@cau.edu.cn

RTK - GPS to update the position coordinates in real time, the steering control strategy of rice transplanter around obstacles was designed. The obstacle avoidance path control strategy of the optimized artificial potential field method was simulated by Matlab. The results showed that when the obstacles were not within the influence range, the maximum transverse position deviation of the straight-line tracking of the rice transplanter was 5 cm, the average deviation was about 2 cm, and the maximum obstacle avoidance transverse deviation was less than 0.5 m. The optimized algorithm had good control accuracy and can avoid the problem of unreachable target points. Based on Yangma Vp6E rice transplanter as the experimental platform, the real vehicle experiment was carried out. The experimental results showed that when the rice transplanter ran at the speed of 0.5 m/s, 1.0 m/s and 1.5 m/s, the maximum lateral deviation of the left side obstacle was no more than 1.221 8 m, the maximum heading deviation was $30.149\ 1^\circ$, the average lateral deviation of the straight line tracking before and after the obstacle was 0.025 m, and the average heading deviation was 3.12° . The maximum lateral deviation of the right side obstacle was not more than 1.245 9 m, the maximum heading deviation was $25.229\ 4^\circ$, the average lateral deviation of straight-line tracking before and after the obstacle was 0.023 m, and the average heading deviation was 3.36° . The designed obstacle avoidance method can meet the obstacle avoidance requirements of the transplanter during driving, and had good feasibility and robustness.

Key words: self-guided rice transplanter; artificial potential field method; obstacle avoidance path planning; independent decisions

0 引言

自主避障是保障农机自动驾驶正常作业必不可少的一环。无人驾驶插秧机作为一种具有自主决策能力的智能农业机械,能够从外部环境中根据信息并做出决策,进行全局路径规划和局部危险状态下的避障路径规划。同时为了提升农田作业效率和作业质量,要求农机能针对环境中的障碍物,结合相应的自身位姿信息,规划出最优避障路径^[1-3]。

目前,研究局部路径规划的方法有神经网络算法^[4]、人工势场法^[5]、模糊逻辑算法^[6]、遗传算法^[7]、A*算法^[8]等。其中,国内外研究者针对不同算法对局部路径规划进行了大量研究。劳彩莲等^[9]采用A*与DWA算法融合对温室机器人进行路径规划,采用超声波传感器进行局部避障,能够生成全局最优路径,但温室不同于农田环境,无法保证地形复杂的农田中的避障效果。甘新基^[10]将Bézier曲线有限点方位优化问题应用于路径规划,满足了动态避障的需求,但此方法对路径曲率有较大要求,且计算量大;江明等^[11]通过增加初始信息素浓度对转移概率进行改进,并进行二次路径规划,改良了蚁群算法的不足,提高了全局避障性能,但其路径的平顺性较差,同样不适应于农田作业环境;SONMEZ等^[12]根据遗传算法设置了无人机的最佳飞行路径,实现避障,但路径连贯性受到影响。以上采取的避障方法都不同程度的满足了避障需求,但针对行驶作业环境恶劣、同时需要满足不同作业情况的插秧机来说,存在计算代价高、耗时长、环境适应性差等缺点,从而影响了农机的作业效率。

人工势场法相比于其他算法,具有较好的环境

适应性,且计算代价低、实时性好、耗时短,适用于农田作业机械,能针对农田内不同形状的障碍物进行最优避障处理。但传统的人工势场法存在目标不可达、局部最小值等问题,影响了路径设计的适用性。对于传统人工势场法设计的避障方法存在的缺陷问题,国内外学者也对传统人工势场法进行了优化研究。鲁新军等^[13]将水流法应用到势场中,解决势场算法中的局部最小问题。文勇等^[14]通过引入沿墙跟踪方法,实现了障碍物附近目标点可达,避免了移动机器人进入陷阱区域;ZHANG等^[15]在传统人工势场的基础上提出可变边界斥力磁场方法来调节对障碍物的路径优化。WEN等^[16]为了解决局部最小值的问题,通过设置障碍物影响范围来改变引力与斥力的大小,提高避障的灵活性。

鉴于插秧机所处水田环境复杂,道路中若存在壕沟、田埂、石块、电线杆等障碍物会对插秧机行进的直线性和连续性产生影响,为提升插秧机的插秧效率,降低农田插秧的遗漏率,保证农艺作业正常进行,本文依据优化人工势场法的思想进行插秧机避障策略的设计。该策略在保留传统人工势场法优点的同时对其进行优化,以解决传统势场法存在的目标点不可达与局部最小值问题,实现自主导航农机安全高效的避障作业。利用Matlab设置障碍物避障实验仿真,并设置实体障碍物进行插秧机实车实验,根据横向偏差和航向偏差分析避障策略的可行性。

1 插秧机自主避障策略

1.1 传统的人工势场法

人工势场算法的中心思想是将障碍物及周围环

境作为斥力势场,将作业目标及周围环境作为引力势场^[17-20]。如图 1 所示,被控对象即插秧机在引力势场及斥力势场的复合场下同时受到引力 F_y 与斥力 F_c 的作用,由引力 F_y 与斥力 F_c 组成的合力 F 引导插秧机搜索总势场下的路径作为避开障碍物行至目标作业点的最优路径。

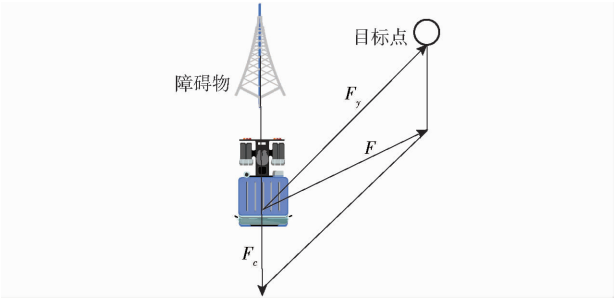


图 1 斥力及引力示意图

Fig. 1 Schematic of repulsion and attraction

势场中引力势场主要与插秧机和目标点的距离有关,随着距离逐渐缩小,引力势场逐渐减小。假设车辆位置为 $q(x,y)$,目标点位置为 $q_g(x_g,y_g)$,则引力势场的负梯度与引力势场的函数表达式分别为

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2}\eta\rho^2(q,q_g) \tag{1}$$

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -\eta\rho(q,q_g) \tag{2}$$

式中 η ——比例增益系数

$\rho(q,q_g)$ ——插秧机的位置和目标作业点位置之间的欧几里得距离

U_{att} ——引力势场

F_{att} ——引力,N

$\rho(q,q_g)$ 的方向定义为插秧机位置指向目标作业点位置的方向。

同理,可得斥力势场表达式为

$$U_{req}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\gamma\left(\frac{1}{\rho(q,q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right) & (0 \leq \rho(q,q_0) \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho_0 \leq \rho(q,q_0)) \end{cases} \tag{3}$$

式中 U_{req} ——斥力势场

γ ——比例增益系数

q_0 ——障碍物位置

ρ_0 ——障碍物影响半径,m

相应的斥力 $F_{req}(q)$ 为斥力势场的负梯度,表达式为

$$F_{req}(q) = \begin{cases} \gamma\left(\frac{1}{\rho(q,q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{1}{\rho^2(q,q_0)}\nabla\rho(q,q_0) & (0 \leq \rho(q,q_0) \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho_0 \leq \rho(q,q_0)) \end{cases} \tag{4}$$

针对插秧机在水田插秧时需保持插秧直线性、插秧连续性的作业特点,传统人工势场法存在的问题有:

(1)障碍物距目标点较近,插秧机到达目标点附近时,如图 2a 所示,由势力场关系可知,引力为 0,但斥力不为 0,使插秧机无法到达目标点。

(2)当插秧机达到某位置时,如图 2b 所示,斥力的合力与引力等大反向,合力为零,无法继续搜索最优局部路径。

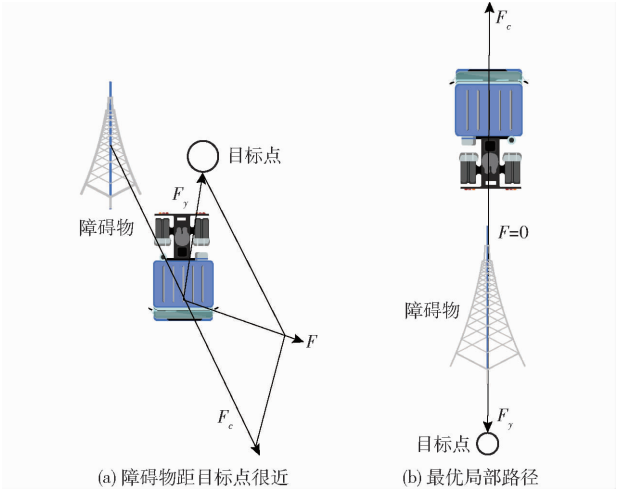


图 2 人工势场法曲线示意图

Fig. 2 Diagrams of artificial potential field method curve

1.2 优化后人工势场法

通过上述分析并结合插秧机的作业特点,对传统人工势场法进行优化,针对问题(1),增加插秧机实时位置与目标作业点的相对距离 $\rho^n (n \geq 1)$ 作为判断条件,判断是否到达目标点,当插秧机行驶至目标点时,斥力与引力同时减小至 0,防止出现目标不可达的问题,新的势场公式为

$$U_{req}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\gamma\left(\frac{1}{\rho(q,q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\rho^n & (0 \leq \rho(q,q_0) \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho_0 \leq \rho(q,q_0)) \end{cases} \tag{5}$$

相应斥力公式为

$$F_{req}(q) = \begin{cases} (F_{req1} + F_{req2})\nabla\rho(q,q_0) & (0 \leq \rho(q,q_0) \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho_0 \leq \rho(q,q_0)) \end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} F_{req1} = \gamma\left(\frac{1}{\rho(q,q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{\rho^n}{\rho^2(q,q_0)} \\ F_{req2} = \frac{n}{2}\gamma\left(\frac{1}{\rho(q,q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2\rho^{n-1} \end{cases} \tag{7}$$

针对问题(2),采用增加虚拟目标点 q_f 的方法引导插秧机走出局部极小值点,当合力为 0 且未至

作业目标点时,忽略原有引力及斥力的作用,通过设置的虚拟目标点 q_f ,使插秧机进行局部路径规划,然后再使用人工势场法搜索避障路径。同时,考虑到保障水田插秧利益最大化,采用在斥力方向偏转 90° 的方向设置虚拟目标点,距插秧机位置等于车身宽度,虚拟引力公式与原引力类似,则引力表达式可表示为

$$F_{att}(q) = \begin{cases} -\nabla U_{att}(q) - \eta\rho(q, q_g) & (F=0 \text{ 且 } \rho^n \neq 0) \\ -\nabla U_{att}(q) - \eta\rho(q, q_f) & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

综上,当检测到障碍物进入影响范围,由合力 $F(q)$ 控制自动驾驶农机进行绕障运动, $F(q)$ 计算公式为

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{req}(q) \quad (9)$$

2 自动转向控制器建立

2.1 插秧机转向系统数学模型

鉴于插秧机作业时的低速性,同时为了简化模型便于控制,只需将四轮插秧机简化成二轮车模型来建立插秧机的运动学模型。在插秧机运动分析中,需将插秧机假设为刚体,运动时只考虑进行纵向、侧向以及横摆运动,同时假设车轮为纯滚动,不计侧滑等情况^[21-22],建立的运动学模型如图 3 所示。

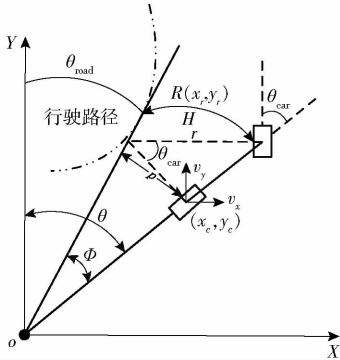


图 3 运动学模型

Fig. 3 Kinematic model

基于上述假设可以得到插秧机运动学模型公式为

$$\begin{cases} v_x = v \cos \theta \\ v_y = v \sin \theta \\ \theta = \frac{v \tan \theta_{car}}{L} \\ \theta_{car} = \arctan \frac{L}{r} \end{cases} \quad (10)$$

式中 v ——插秧机行驶速度, m/s

v_x ——X 轴方向速度分量, m/s

v_y ——Y 轴方向速度分量, m/s

r ——插秧机转弯半径, m

θ ——插秧机行驶航向角, rad

θ_{car} ——插秧机前轮转角, rad

L ——车辆轴距, m

对于优化后的人工势场法设计的自主导航避障路径,以横向偏差 d 和航向偏差 Φ 来评判所规划的避障路径优化效果,计算式为

$$\begin{cases} d = \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2} \\ \Phi = 57.3(\theta - \theta_{road}) \end{cases} \quad (11)$$

式中 θ_{road} ——目标点处切线航向角, rad

x_r ——目标点横坐标

x_c ——插秧机横坐标

y_r ——目标点纵坐标

y_c ——插秧机纵坐标

2.2 转向控制器设计

为实现插秧机能够自主导航作业,转向控制系统的设计需要尽可能提高插秧机作业的稳定性和调整的准确性,本文采用 PID 控制与模糊控制复合的自适应模糊 PID 控制插秧机的转向。

复合模糊 PID 控制器主要通过对输入量——插秧机转角期望值与实际值的偏差进行分析,进而调节输出量——增量式 PID 控制参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 实现车轮转角的最优化处理,最终达到目标转向值。插秧机的理论转角主要由上位机根据横向偏差与航向偏差通过路径跟踪控制算法计算得出。横向偏差是由 RTK-GPS 设备获取的高精度的定位坐标与插秧机预设路径的坐标值计算而来;航向偏差基于惯性导航可以获取插秧机机身的航姿信息,与预先设定的航向角计算差值即可得到航向偏差 Φ 。

选用的复合模糊 PID 控制算法既融合了 PID 算法简单、稳定性好的特点,又含有模糊控制鲁棒性高的优势。转向控制通过比较理论预设转角与实际转角的差值,根据复合模糊 PID 控制算法不断做出调整减小偏差,最终输出转向的期待转角,完成最优化转向,转向控制流程图如图 4 所示。



图 4 转向控制框图

Fig. 4 Steering control block diagram

插秧机进行正常作业时,RTK-GPS 设备保证高精度的导航定位,超声波雷达传感器接收检测到的障碍物信息后,首先判别障碍物是否在影响范围内,若障碍物不影响插秧机的正常行驶,插秧机继续直线纠偏行驶;若障碍物在影响范围内,则进行避障路径规划并实时更新位置坐标,直至障碍物逸出影

响范围,导航程序流程图如图 5 所示。

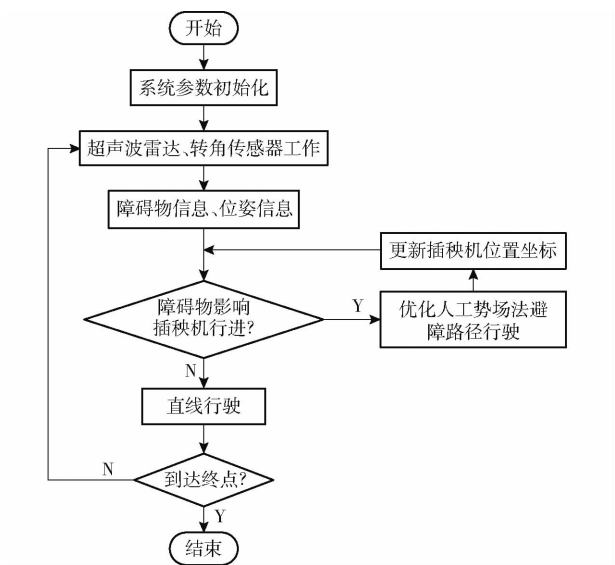


图 5 插秧机自主导航行驶主程序流程图
Fig.5 Transplanter autonomous navigation main program flow chart

3 基于优化后人工势场法的避障策略仿真分析

为验证优化后的人工势场法进行避障路径规划的有效性,利用 Matlab 进行算法仿真,在自动驾驶农机沿参考路径行走的过程中,设置障碍物,测试该方法是否可以重新规划局部路径,避开障碍物并行至作业目标点。

在 Matlab 中建立参考路径为起始点(0,0)至目标点(10,10)的一条直线,其函数表达式为 $y = x$,在(0.5,1)、(1,2)、(3,4)、(4,5)、(6,6)、(7,7)、(8,8)共 7 处位置分别建立障碍物,验证避障算法局部路径规划的能力。

经多次调试后,选取引力比例增益系数 $\eta = -15$;选取斥力比例增益系数 $\gamma = 5$;选取障碍物影响范围 $\rho_0 = 0.5\text{ m}$;实时位置与作业目标点的相对距离中 ρ_n 取 2;仿真程序中步长为 0.2、循环迭代次数为 200。运行仿真程序,得到避障局部规划仿真路径。

根据图 6 可以看出,优化后的人工势场法不受传统人工势场法存在的目标不可达与局部最小值的影响,可根据障碍物自主规划路径。避障精度观测分 2 部分,当障碍物未在影响范围之内时,根据横向偏差和航向偏差按照参考路径沿直线纠偏行驶部分;另一部分为避障曲线部分,当障碍物与目标点在同一条直线上时,优化后的势场算法可根据增设的虚拟点自主逃脱,再根据势场法搜寻目标点。如图 6a 所示,在所建立的人工势场仿真环境中,农机的实际路径与参考路径基本重合,最大横向位置误差为

5 cm,平均偏差约为 2 cm;如图 6b 所示,势场合力引导车辆成功避开参考路径中出现的障碍物点(7,7)、(8,8),避免了传统人工势场法的目标点不可达及最优局部路径问题,最远避障路径点距参考轨迹点小于 0.5 m,且在插秧机最远行走直线距离 2 m 后,重新追踪至参考路径。由仿真结果可知,算法及控制逻辑可满足农机避障绕行、安全行驶的需求。

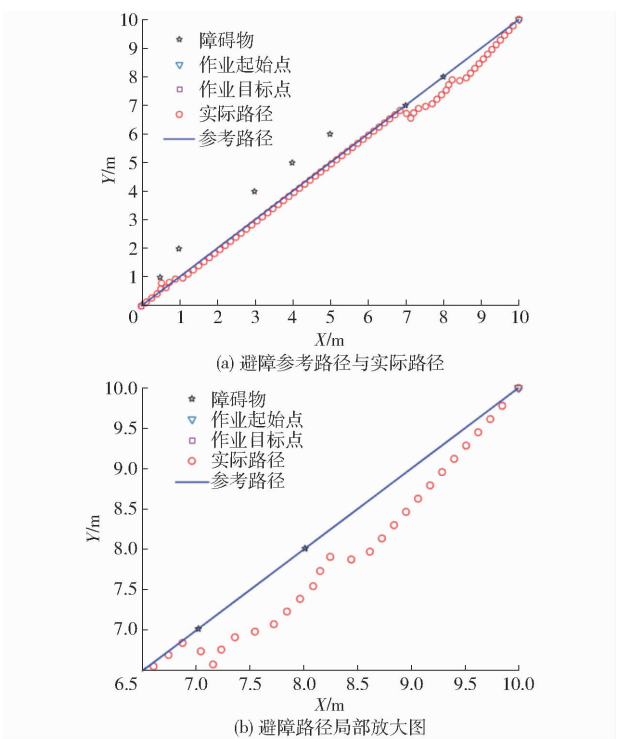


图 6 避障局部规划路径仿真图
Fig.6 Simulation diagrams of local planning path for obstacle avoidance

4 插秧机绕障实验

以改造后的洋马 VP6E 插秧机为实验平台进行实车实验,验证本文方法的有效性,其中插秧机车辆参数如表 1 所示。

表 1 插秧机洋马 VP6E 参数	
Tab.1 Rice transplanter VP6E parameters	
参数	数值
整车质量/kg	496
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 890×2 440×2 290
轴距/mm	1 050
前轮距、后轮距/mm	1 181、1 200
最小离地间隙/mm	300

改造后的插秧机装载了超声波传感器、RTK-GPS、转角传感器和方向盘角度传感器等传感设备,超声波传感器可实现作业环境的障碍物感知,RTK-GPS 保证高精度定位,上位机可通过接收 RTK-GPS 的位置信息,计算出理论转角,产生控制指令传

至下位机控制器,下位机进而操控转向系统与动力系统;转向控制系统由无刷直流电机驱动啮合齿轮实现插秧机的自动转向;动力系统则由电推杆控制插秧机的行走,实现自动启停功能,插秧机外观及转向系统改造示意图如图 7 所示。

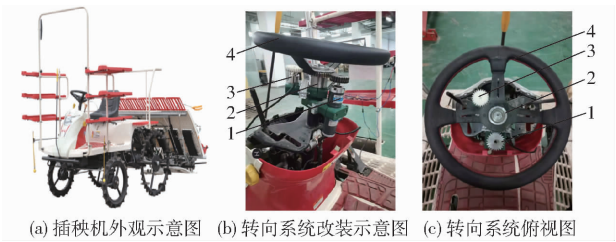


图 7 插秧机外观图及转向系统改造示意图

Fig. 7 Appearance diagrams of transplanter and transformation diagram of steering system

1. 转向电机 2. 齿轮套筒 3. 方向盘角度传感器 4. 方向盘

实地实验预先设定了起始点 ($116.349\ 883^{\circ}\text{E}$, $40.004\ 788^{\circ}\text{N}$) 至终止点 ($116.349\ 883^{\circ}\text{E}$, $40.004\ 894^{\circ}\text{N}$) 长约 9 m 的直线路径。在参考路径中放置静态障碍物,障碍物为外形 $0.72\text{ m}\times0.44\text{ m}\times0.95\text{ m}$ 的长方体,障碍物避障区半径设为 1.50 m ,实验通过设定插秧机不同车速及障碍物不同位置来验证算法的正确性及鲁棒性。

通过采集插秧机实际行走的经纬度数据,将参考路径及实车行走的经纬度数据转换为墨卡托投影

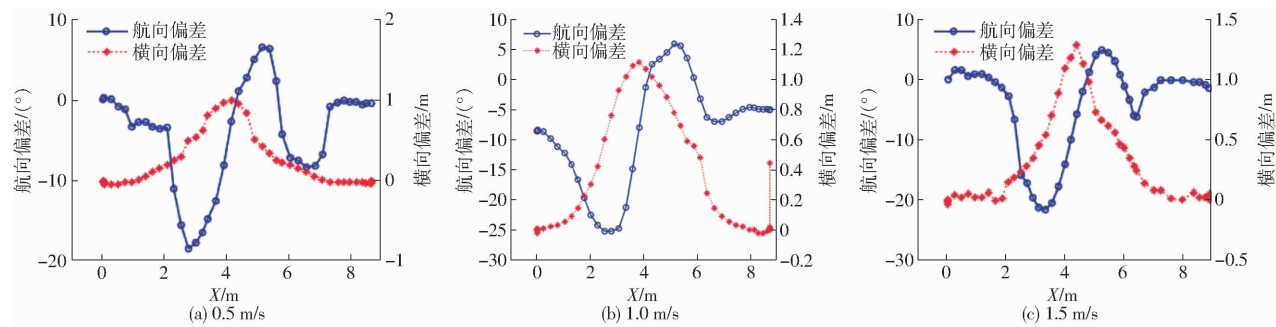


图 9 不同行驶速度时右侧绕障横、航向偏差示意图

Fig. 9 Schematics of rightward traverse and heading deviation

参考路径不变,将障碍物放置在行驶路径右侧,即图 8 中矩形向右方平移,障碍物中心位置坐标为 ($0.56\text{ m},3.72\text{ m}$),当障碍物位于插秧机前方偏右位置时,插秧机分别以行驶速度 $0.5、1.0、1.5\text{ m/s}$ 追踪预设参考路径,采集插秧机实时数据,得到行走路线如图 10 所示。

由图 10 可知,当前方进入障碍物影响范围时,插秧机开始转向,自主决策从左侧绕行。如图 11 所示,当插秧机未到达障碍物设定影响值范围时,路径跟踪的最大横向偏差为 0.073 m ,平均横向偏差为 0.025 m ,最大航向偏差为 10.70° ,平均航向偏差为 3.12° ;当插秧机进行避障时,其绕

下的平面坐标数据,并将所有平面坐标数据减去各自第 1 组的初始平面坐标数据,绘制如图 8 所示的绕障路径图。

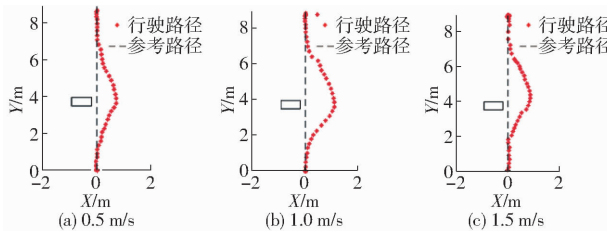


图 8 不同行驶速度时右侧绕障路径图

Fig. 8 Path diagrams around obstacles on right

图 8 中矩形为障碍物相对位置示意图形,障碍物中心位置坐标为 ($-0.56\text{ m},3.72\text{ m}$),如图 8 所示,当障碍物放置在插秧机前方偏左位置时,插秧机分别以行驶速度 $0.5、1.0、1.5\text{ m/s}$ 按照参考路径行驶,插秧机自主决策从右侧绕行,可顺利完成避障任务,且在成功绕障后可重新追踪参考路径中的目标位置。如图 9 所示,插秧机自动驾驶分为两种模式,当障碍物不在设定影响值范围之内时,插秧机根据横向偏差和航向偏差按照参考路径纠偏行驶,其最大横向偏差为 0.056 m ,平均横向偏差为 0.023 m ,最大航向偏差为 11.83° ,平均航向偏差为 3.36° ;当插秧机在障碍物影响距离范围之内时,插秧机绕行路径距参考路径的最大横向偏差为 1.2459 m 。

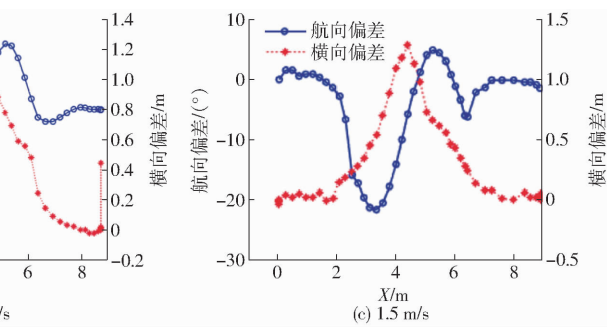


图 10 左侧绕障路径图

Fig. 10 Obstacle path diagram on left

行路径距参考路径的最大横向偏差为 1.2218 m ,在成功绕开障碍物后,插秧机跳出避障模式,继续追踪参考路径中的目标点。实车实验横向偏差结果如表 2 所示。

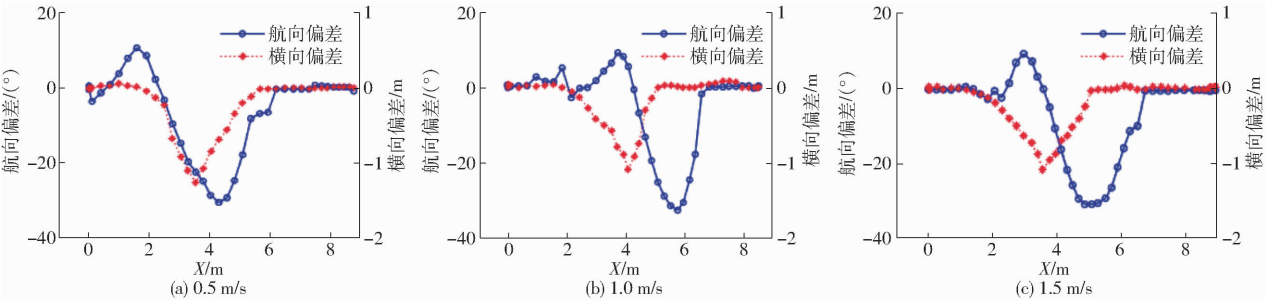


图 11 左侧绕障横向偏差、航向偏差示意图
Fig. 11 Schematics of left side obstacle traverse and heading deviation

表 2 实车实验横向偏差

Tab.2 Lateral deviation of real vehicle experiment

速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	左侧避障最大 横向偏差	右侧避障最大 横向偏差	平均横向偏差
0.5	1.221 8	1.031 6	1.126 7
1.0	1.114 6	1.158 6	1.136 6
1.5	1.113 7	1.245 9	1.179 8
平均值	1.159 9	1.145 4	

通过实车绕障实验可得出:①改进后的人工势场法可以成功应用于插秧机自动驾驶时的绕障路径规划,在绕障过程中,插秧机的横向偏差与航向偏差较小且变化平稳。②通过以插秧机为实验平台进行的左右侧绕障实验可知,在 3 种速度下,左侧绕障实验最大横向偏差不大于 1.221 8 m,航向偏差最大值为 30.149 1°,横向偏差平均值为 1.159 9 m;右侧绕障实验最大横向偏差不大于 1.245 9 m,航向偏差最大值为 25.229 4°,横向偏差平均值为 1.145 4 m,左侧绕障路径轨迹平滑性略好于右侧,不同车速对横向偏差与航向偏差影响不明显,最大横向偏差保证在 1.25 m 内,避免了传统人工势场法的缺陷,有效降低了插秧的遗漏。经分析,超声波传感器存在累计误差,测量精度受到影响,同时,安放位置的偏差与实验环境温湿度及噪声因素对传感器预测障碍物位置信息也造成左右侧绕障效果差异。考虑到插秧机传感器采样时间的误差、导航设备的累积误差以及传感器安装位置的误差等因素影响,实车实验避障效

果略差于仿真实验避障效果,但该避障方法总体上满足插秧机在不同车速下的农田避障要求。

5 结论

- (1)针对插秧机自主导航时的避障问题,采用优化人工势场法进行路径设计。通过将车辆与障碍物实时距离引入势场函数、设立虚拟局部目标点,有效地解决了传统势场法存在的问题。
- (2)利用 Matlab 建立优化后的人工势场法的绕障仿真实验,通过设置不同坐标点的障碍物进行避障测试。结果显示:当障碍物未在影响范围之内时,直线追踪的最大横向位置偏差为 5 cm,平均偏差约为 2 cm,可实现精确的直线行驶;当障碍物与目标点在一条直线上时,插秧机可根据障碍物位置自主决策绕行路径,最大避障横向偏差小于 0.5 m。
- (3)插秧机绕障实车实验结果表明,自主导航插秧机可根据障碍物位置自主决策绕行路径,当障碍物不在影响范围内时,插秧机直线行驶的横向偏差平均值不大于 0.025 m,航向偏差平均值不大于 3.36°;其避障绕行路径距参考路径的最大横向偏差不大于 1.245 9 m,航向偏差最大值为 30.149 1°。左右避障最大横向偏差均保证在 1.25 m 内,避免了传统人工势场法存在的缺陷,最大程度降低了对水田秧苗的遗漏率。且在成功绕障后,可重新追踪参考路径恢复直线自动驾驶,表明所设计的避障方法可满足插秧机在实际插秧农艺作业时的避障需求,具有很好的鲁棒性和适应性。

参 考 文 献

[1] CAMPBELL S, NAEEM W, IRWIN G W. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(2):267-283.

[2] 刘宇峰,姬长英,田光兆,等.自主导航农业机械避障路径规划[J].华南农业大学学报,2020,41(2):117-125.
LIU Yufeng,JI Changying, TIAN Guangzhao, et al. Obstacle avoidance path planning for autonomous navigation agricultural machinery[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(2): 117-125. (in Chinese)

[3] 刘美辰.农机作业障碍物检测与避障方法研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
LIU Meichen. Research on inspection and obstacle avoidance methods of agro-machinery obstructions[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[4] 陈华志,谢存禧,曾德怀.基于神经网络的移动机器人路径规划算法的仿真[J].华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(6):56-59.

- CHEN Huazhi, XIE Cunxi, ZENG Dehuai. Simulation of a neural network-based path planning algorithm for mobile robot[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(6): 56–59. (in Chinese)
- [5] 于振中, 闫继宏, 赵杰, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 50–55.
YU Zhenzhong, YAN Jihong, ZHAO Jie, et al. Mobile robot path planning based on improved artificial potential field method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(1): 50–55. (in Chinese)
- [6] 付宜利, 顾晓宇, 王树国. 基于模糊控制的自主机器人路径规划策略研究[J]. 机器人, 2004, 26(6): 548–552.
FU Yili, GU Xiaoyu, WANG Shuguo. A fuzzy control based on path planning strategy for autonomous robot[J]. Robot, 2004, 26(6): 548–552. (in Chinese)
- [7] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清. 基于遗传算法的移动机器人动态避障路径规划方法[J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(2): 161–166.
LI Qingzhong, GU Weikang, YE Xiuqing. Genetic path planning and dynamic obstacle avoidance for mobile robots[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, 15(2): 161–166. (in Chinese)
- [8] 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 137–143.
CHENG Chuanqi, HAO Xiangyang, LI Jiansheng, et al. Global dynamic path planning combining improved A* algorithm and dynamic window method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 137–143. (in Chinese)
- [9] 劳彩莲, 李鹏, 冯宇. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 14–22.
LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14–22. (in Chinese)
- [10] 甘新基. 基于 Bézier 曲线的差速驱动机器人混合避障路径规划算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59(4): 943–949.
GAN Xinji. Hybrid obstacle avoidance path planning algorithm for differential driven robot based on Bézier curve [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59(4): 943–949. (in Chinese)
- [11] 江明, 王飞, 葛愿, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 113–121.
JIANG Ming, WANG Fei, GE Yuan, et al. Research on mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 113–121. (in Chinese)
- [12] SONMEZ A, KOCYIGIT E, KUGU E. Optimal path planning for UAVs using genetic algorithm [C] // 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2015.
- [13] 鲁新军, 陈焕文, 谢丽娟, 等. 机器人导航中势场局部最小的水流解法[J]. 微计算机信息, 2009, 25(2): 241–242, 221.
LU Xinjun, CHEN Huanwen, XIE Lijuan, et al. Water flow solution for local minimum potential field in robot navigation [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(2): 241–242, 221. (in Chinese)
- [14] 文勇, 张怀相, 曾虹. 新型势场法的移动机器人避障研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2009, 29(1): 50–53.
WEN Yong, ZHANG Huaixiang, ZENG Hong. Research on obstacle avoidance of mobile robot based on new potential field method [J]. Journal of Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2009, 29(1): 50–53. (in Chinese)
- [15] ZHANG S Y, SHEN Y K, CUI W S. Path Planning of mobile robot based on improved artificial potential field method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 644–650: 154–157.
- [16] WEN S F, GUO G Y. Path planning of mobile robot based on improved artificial potential field approach[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(10): 2818–2822.
- [17] 郭成洋, 刘美辰, 高泽宁, 等. 基于改进人工势场法的农机避障方法研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 152–157.
GUO Chengyang, LIU Meichen, GAO Zening, et al. Research on obstacle avoidance method of agricultural machinery based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 152–157. (in Chinese)
- [18] MOUSAZADEH H, JAFARBIGLU H, ABDOLMALEKI H, et al. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an unmanned surface vehicle (USV) by algorithms fusion[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 56–65.
- [19] 郭凯红, 李博昊, 宗晓瑞, 等. 基于改进人工势场的避障路径规划策略研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 54–57.
GUO Kaihong, LI Bohao, ZONG Xiaorui, et al. Research on obstacle avoidance path planning strategy based on improved artificial potential field[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(13): 54–57. (in Chinese)
- [20] 奚小波, 史扬杰, 单翔, 等. 基于 Bezier 曲线优化的农机自动驾驶避障控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 82–88.
XI Xiaobo, SHI Yangjie, SHAN Xiang, et al. Obstacle avoidance path control method for agricultural machinery automatic driving based on optimized Bezier[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 82–88. (in Chinese)
- [21] 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148–152, 162.
LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Tractor automatic navigation system based on adaptive fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148–152, 162. (in Chinese)
- [22] 郑平平. 无人驾驶拖拉机路径跟踪与转向控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
ZHENG Pingping. Research on path tracking and steering control of driverless tractor [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)