

机耕道自动驾驶农机局部路径规划

杨丽丽^{1,2}, 唐晓宇^{1,2}, 吴思贤^{1,2}, 文 龙^{1,2}, 杨卫中^{1,2}, 吴才聪^{1,2*}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农机作业监测与大数据应用重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对机耕道场景下自动驾驶农机行驶的安全性、平稳性与规划实时性的实际需求, 该研究提出了一种基于二次规划的局部路径规划方法。首先基于有限状态机构建农机机耕道行驶模式, 其次采用横纵向解耦的方法, 通过改进状态栅格法分别对农机速度行为和轨迹行为进行决策, 随后利用二次规划方法生成满足多目标、多约束条件的农机轨迹和速度, 得到最优路径, 最后在多种行驶环境中进行仿真和实车试验, 行驶参考速度为 2 m/s。实车试验结果表明, 在绕行静态障碍物场景中, 规划轨迹的平均绝对曲率为 0.021 m^{-1} , 最大绝对曲率为 0.056 m^{-1} , 平均绝对横向误差为 3.23 cm, 最大绝对横向误差为 8.69 cm, 农机与障碍物外轮廓的距离大于 0.76 m; 在规避相向行驶、同向行驶和横穿机耕道的动态障碍物场景中, 规划速度的平均绝对速度误差为 $0.08 \sim 0.12 \text{ m/s}$, 绝对速度误差小于 0.38 m/s , 加速度变化范围为 $-0.38 \sim 0.44 \text{ m/s}^2$ 。在规划周期为 200 ms 的仿真试验中, 本文算法平均耗时 48 ms, 最大耗时 75 ms, 相比采用静态状态栅格法平均耗时减少 38 ms, 算法效率提升 44%。研究结果可为机耕道场景下的农机局部路径规划提供技术支持。

关键词: 农业机械; 自动驾驶; 局部路径规划; 二次规划; 有限状态机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307231

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0027-10

杨丽丽, 唐晓宇, 吴思贤, 等. 机耕道自动驾驶农机局部路径规划[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 27-36. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307231 <http://www.tcsae.org>

YANG Lili, TANG Xiaoyu, WU Sixian, et al. Local path planning for autonomous agricultural machinery on farm road[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 27-36. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307231 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近年来, 随着用工难、用工贵和用工差问题日益突出, 我国开始探索无人化农机驾驶技术^[1-5]。机耕道是自动驾驶农机往返机库和农田的必经场景, 开展机耕道场景下的自动驾驶农机局部路径规划与自主避障, 具有重要的理论和现实意义。自动驾驶农机在农业生产中的运用越来越广泛^[6-9], 其中实时障碍物检测^[10-14]与遇到障碍物后的局部路径规划^[15-17]是确保自动驾驶农机安全作业的关键技术之一。

局部路径规划算法可以分为基于图搜索的局部路径规划^[18]、基于采样的局部路径规划^[19-20]、基于曲线插值拟合的局部路径规划^[21]和基于强化学习的局部路径规划^[22]。在汽车领域, 陈丹凤等^[23]提出了一种基于强化学习和人工势场改进的蚁群算法, 提高了算法收敛速度。张智能等^[24]针对现有局部路径规划方法无法应对多车道、多静/动态障碍等复杂工况的问题, 提出一种基于离散优化思想的动态路径规划算法, 降低换道次数, 提升了通行效率。WANG 等^[25]提出了一种基于风险评估的局部路径规划算法, 从高维数据集中提取并重建了主动变道场景

和纵向防碰撞场景以进行验证和评估, 所提算法降低了风险, 提高了驾驶效率, 尤其是在速度和轨迹发生突变时。在农业领域, 奚小波等^[26]提出一种基于 Bezier 曲线的局部路径规划的方法, 改进了规划路径曲率不连续的问题。程越等^[27]提出一种在改进最短切线法的基础上, 采用五次多项式函数规划路径的避障路径规划算法, 改进了最短切线法的中曲率不连续的问题。杨洋等^[28]在文献 26 的基础上通过引入动态识别区, 并改进贝塞尔曲线的控制点选取范围, 使规划曲率更加平滑。郭楠^[29]提出了一种基于 B 样条曲线和改进快速搜索随机树算法的局部路径规划算法, 提高了算法的时效性和平滑性。

现有的农机路径规划算法大都针对田内作业场景的静态避障规划, 而机耕道的行驶环境较为复杂, 机耕道是一种半结构化道路, 不具备标识线, 路面宽度一般为 3~6 m^[30]。机耕道上存在诸多种类动态和静态障碍物及交通参与者, 具体包括: 临时停放在的道路两侧的农机, 同向行驶、相向行驶和横穿通过机耕道的各类农业机械或其他交通参与者。机耕道狭长的特性, 决定了大体积的农机在机耕道中不能做复杂的轨迹运动, 对于规划轨迹平滑性要求更高, 同时, 需要速度规划来规避动态障碍物。

本文针对机耕道特性和机耕道中障碍物的特性, 研究机耕道自动驾驶农机在多种行驶环境下的局部路径规划问题。首先, 基于有限状态机设计农机机耕道行驶模式, 并通过改进的动态栅格法对农机的轨迹行为和速度行为进行决策, 建立机耕道农机行为决策模型。随后, 基

收稿日期: 2023-07-23 修订日期: 2023-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3901302)

作者简介: 杨丽丽, 博士, 副教授, 研究方向为信息与通信技术在农业中的应用。Email: llyang@cau.cn

*通信作者: 吴才聪, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农机大数据、农机导航与位置服务。Email: wucc@cau.edu.cn

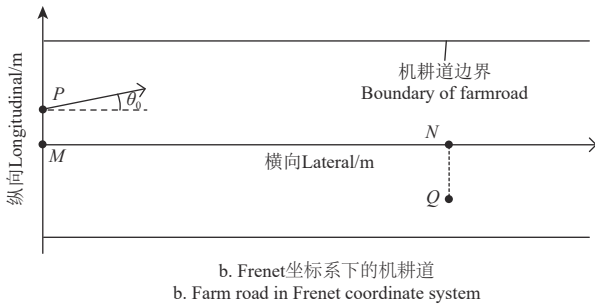
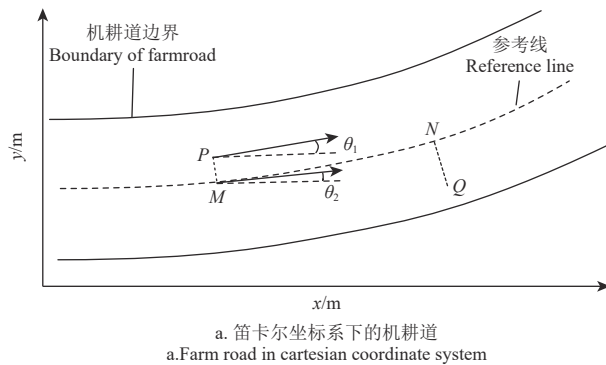
于二次规划算法对局部路径进行优化, 建立机耕道农机实时局部路径规划模型, 实现动态避障和速度规划, 提升轨迹的平滑性和速度的平稳性。为农机行驶的自动化、智能化和机耕道运输的安全性和高效性提供技术参考。

1 农机行为决策模型

机耕道自动驾驶农机行为决策模块包括行农机机耕道行驶模式定义、农机轨迹行为决策和农机速度行为决策。

1.1 机耕道局部环境建模

在局部路径规划前农机需要获得的外界信息包括: 由高精地图提取的机耕道宽度和中心线信息, 由激光雷达实时探测到的障碍物位置、轮廓和速度信息, 依靠组合导航实时获取的农机定位信息。为准确描述农机、障碍物和机耕道三者之间位置的相互关系, 避免受道路曲率的影响, 构建 Frenet 坐标系下的机耕道局部行驶环境地图, 见图 1, 其中参考线为机耕道中心线。



注: P 为农机的后轮中心, Q 为障碍物几何中心, M , N 为 P 和 Q 在参考线上的投影点, θ_1 为农机行驶方向与 x 轴的夹角, $^\circ$; θ_2 是参考线在投影点 M 处的切线与 x 轴的夹角, $^\circ$; $\theta_0 = \theta_1 - \theta_2$ 。

Note: P is the rear wheel center of agricultural machinery, Q is the centroid of the obstacle, M and N are the projection points of P and Q on the reference line, θ_1 is the angle between the direction of agricultural machinery travel and the x -axis, $^\circ$; θ_2 is the angle between the tangent of the reference line at projection point M and the x -axis, $^\circ$; $\theta_0 = \theta_1 - \theta_2$.

图 1 笛卡尔坐标系与 Frenet 坐标系对应关系图

Fig.1 Correspondence diagram between Cartesian coordinate system and Frenet coordinate system

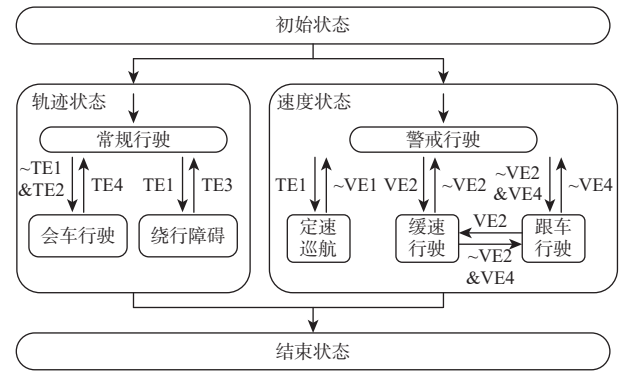
图 1 中 Frenet 坐标系使用参考线的切线方向 (s 轴) 和法线方向 (l 轴) 建立坐标系, 由图 1 可知, 相比笛卡尔坐标系, Frenet 坐标系可以将农机在平面内的二维运动解耦为两个一维运动, 将非线性约束的机耕道边界转化为线性约束, 降低了求解的复杂度。

1.2 农机机耕道行驶模式

为构建农机机耕道行驶模式, 采用横纵向解耦的方

法, 将农机的行驶状态分解为轨迹状态和速度状态, 根据机耕道行驶环境定义农机轨迹状态事件和速度状态事件, 并结合机耕道半结构化的特性, 设计相应的农机行驶状态。

图 2 为农机在机耕道中行驶的有限状态机, 其中农机初始状态代表农机局部路径规划任务的开始, 结束状态代表农机局部路径规划任务的结束。农机从初始状态分别对轨迹状态事件和速度状态事件进行判别, 根据判别结果, 跳转到新的轨迹状态和速度状态, 两种状态共同组成农机新的行驶状态, 跳转事件定义和状态定义见表 1 和表 2。



注: TE1~TE4、VE1~VE4 的定义见表 1 和表 2。

Note: The definitions of TE1~TE4 and VE1~VE4 are shown in Tables 1 and 2.

图 2 农机机耕道行驶有限状态机

Fig.2 Farm road agricultural machinery driving finite-state machine

表 1 轨迹状态跳转事件表

Table 1 Track state jump event table

| 代号 Code | 事件含义 Event meaning |
|------------|-----------------------|
| TE1 | 避障范围内是否存在静态障碍物 |
| TE2 | 是否存在迎面驶来的障碍物 |
| TE3 | 是否完成绕障任务 |
| TE4 | 是否完成会车任务 |

表 2 速度状态跳转事件表

Table 2 Speed status jump event table

| 代号 Code | 事件含义 Event meaning |
|------------|-----------------------|
| VE1 | 机耕道行驶环境是否安全 |
| VE2 | 是否存在轨迹任务 |
| VE3 | 是否存在动态障碍物 |
| VE4 | 是否处于跟车范围内 |

1.2.1 轨迹状态

轨迹状态包括以下 3 种:

(1) 常规行驶: 农机沿参考线 (机耕道中心线) 行驶, 当轨迹偏移参考线距离较大时, 对轨迹进行修正。

(2) 绕行障碍: 判别农机对障碍物的绕行方式, 开启绕障任务。

(3) 会车行驶: 引导农机完成会车任务, 参考线调整至机耕道右侧。

轨迹状态之间跳转事件判别如下:

TE1: Frenet 坐标系下静态障碍物的横坐标记为 d ,

若 $d < d_{\text{out}}$ (d_{out} 为农机进入避障范围的最大距离阈值), TE1 事件为真;

TE2: 障碍物在农机运动方向反向时, TE2 事件为真;

TE3: 农机处于绕行障碍物状态, 若时间间隔 T_v 内检测到农机前方始终无静态障碍物, TE3 事件为真;

TE4: 农机处于会车状态时, 若时间间隔 T_m 内 TE2 始终为假, TE4 事件为真。

1.2.2 速度状态

速度状态包含以下 4 种:

(1) 警戒行驶: 参考速度为警戒速度 v_{warn} , 同时对动态障碍物的规避方式进行决策。

(2) 定速巡航: 设置参考速度为巡航速度 v_{cruise} , v_{cruise} 为机耕道规定的最高时速。

(3) 缓速行驶: 农机在进行轨迹任务时, 设置参考速度为安全速度 v_{safe} , 农机在此速度下具有较高的控制精度, 同时对动态障碍物的规避方式进行决策。

(4) 跟车行驶: 预留纵向安全距离并与前车车速保持一致。

速度状态之间跳转事件判别如下:

VE1: 农机行驶在机耕道中, 若时间间隔 T_s 内机耕道内始终无障碍物, VE1 事件为真;

VE2: 若农机的轨迹状态不处于常规行驶状态, VE2 事件为真;

VE3: 若农机检测到行驶环境中存在动态障碍物, VE3 事件为真;

VE4: 若农机检测到跟车范围内存在同向行驶的动态障碍物, 且农机速度低于前车速度, 则事件 VE4 为真, 跟车距离 d_{follow} 为

$$d_{\text{follow}} = d_0 + v_0 t_0 \quad (1)$$

式中 d_0 为补偿距离, m; v_0 为农机当前速度, m/s; t_0 为车间时间间隔, s。

1.3 基于改进栅格法的农机行为决策方法

状态栅格法是一种基于采样和搜索的局部路径规划方法, 不同于随机采样, 状态栅格法中的采样方法给定了被控对象的初始状态和目标状态, 然后反向计算中间过程, 求解过程通常包括大密度采样直接拼接和小密度采样再优化 2 种方式。本文采用后者, 以采样结果为粗解, 即决策方案, 再通过优化得到最终路径。

图 3a 为静态栅格法, 点阵采样是静态栅格法中常用的采样方法, 状态点数量为点阵的行数与列数的乘积, 在城市多车道路场景应用中应用广泛。但由于机耕道不涉及车道切换, 静态栅格法的冗余度较高, 为提高算法时效性, 本文提出了动态栅格法。

图 3b 为动态栅格法, 采样的状态点基于实时障碍物位置动态生成, 在保持采样效果不变的前提下, 尽可能降低采样密度, 设计方法如下:

包含农机 n 个自由度的状态集合称为农机的配置空间, 记为 C 。在包含障碍物和机耕道边界的二维平面中, 障碍物空间记为 C_{obs} , 机耕道边界外的区域记为 C_{off} , 则农机的自由空间 C_{free} 定义为

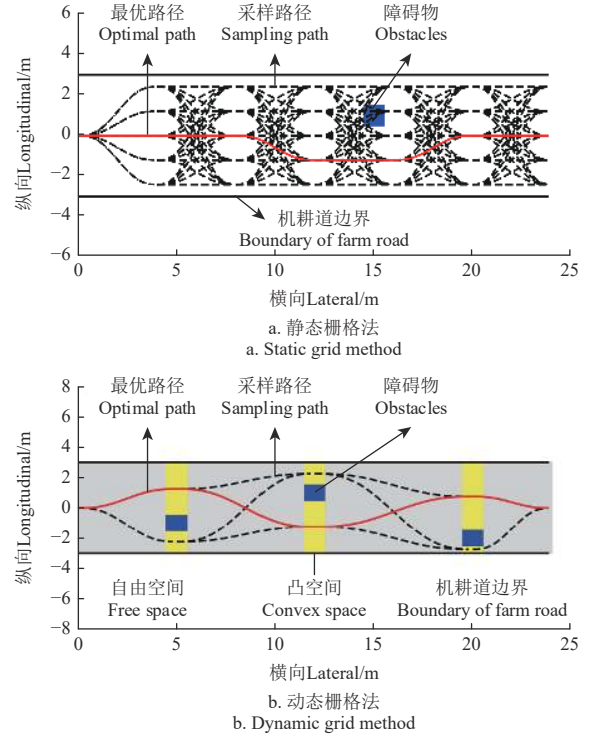


图 3 状态栅格法

Fig.3 State grid method

$$C_{\text{free}} = C / (C_{\text{obs}} \cup C_{\text{off}}) \quad (2)$$

动态栅格法的采样过程为: 将障碍物和农机之间的一段自由空间拆解为多个凸空间, 记为 V , 该部分自由空间可以表示为

$$C_{\text{free}} = \sum_{i=1}^k V_i \quad (3)$$

式中 k 代表凸空间的数量。

对比图 3a 和图 3b 两种状态栅格法, 图 3a 中共计 30 个状态点, 图 3b 中共计 6 个状态点, 静态栅格法中状态点的数量和位置相对局部环境固定, 不随环境变化而变化, 而本文动态栅格法的状态点根据机耕道中障碍物的位置和数量实时调整, 可减少大量的状态点, 提高算法效率。

1.3.1 农机轨迹行为决策

农机轨迹行为决定对静态障碍物的绕行方式, 对每个静态障碍物可能采取的轨迹行为见表 3。

表 3 中下一行为对应动态栅格法中的状态点, 以状态点描述机耕道凸空间状态, 对相邻状态点采用五次多项式拟合生成多条轨迹曲线作为候选轨迹。随后, 设计代价函数对包含 n 个轨迹点的轨迹曲线进行评价, 遴选出一条最优方案作为最终轨迹策略。

表 3 轨迹行为决策表

| Table 3 Trajectory behavior decision table | | |
|--|---------------------|------|
| 当前障碍物 Current obstacles | 下一行为 Next action | |
| 第 1 个障碍物 | 左侧绕行 | 右侧绕行 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 第 m 个障碍物 | 左侧绕行 | 右侧绕行 |

(1) 平滑性

对于离散点组成的曲线, 取相同横向距离间隔, 则轨迹点的一阶导数大小与曲线的长度正相关, 即轨迹点的一阶导数越小, 平滑性越高, 由此可得平滑性代价函数 C_{smooth} 为

$$C_{\text{smooth}} = W_{\text{lenth}} \sum_{i=1}^n l'(s_i)^2 \quad (4)$$

式中 W_{lenth} 为距离权重, $l(s_i)$ 为农机在纵向距离 s_i 处的横向位移。

(2) 危险程度

以农机距离障碍物的距离评估绕行静态障碍物的危险程度, 记 d 为农机距离障碍物的直线距离, 危险程度代价函数 C_{danger} 为

$$C_{\text{danger}} = \begin{cases} 0, d > d_2 \\ \frac{W_{\text{danger}}}{d}, d_1 \leq d < d_2 \\ +\infty, d \leq d_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 W_{danger} 为危险程度权重, d_1 为风险距离, m ; d_2 为安全距离, m 。在安全距离之外, 认为农机与障碍物没有碰撞风险, 代价为 0。在风险距离内, 认为农机存在碰撞风险, 代价为无穷大。在风险距离与安全距离之间, 危险代价与 d 成反比。

(3) 轨迹偏移量

农机行驶要以参考线为指引, 记 $W_{\text{reference}}$ 为偏移参考线的距离权重, 轨迹偏移代价函数 C_{dev} 为

$$C_{\text{dev}} = W_{\text{reference}} \sum_{i=1}^n l(s_i)^2 \quad (6)$$

1.3.2 农机速度行为决策

农机速度行为决策确定农机对动态障碍物的规避方式, 在轨迹规划结束之后, 对动态障碍物轨迹进行预测, 获取农机轨迹与动态障碍物轨迹的交集, 在时间上分离两者的轨迹交集。表 4 为对每个动态障碍物可能采取的行为, 在下一行为中, 在农机轨迹和障碍物轨迹交集中, “先行”表示让农机优先通过, “让行”表示让动态障碍物优先通过。

表 4 速度行为决策表

Table 4 Speed behavior decision table

| 当前障碍物 Current obstacles | 下一行为 Next action | |
|----------------------------|---------------------|----------|
| 第 1 个障碍物 | 先行 | 让行 |
| \vdots | \vdots | \vdots |
| 第 m 个障碍物 | 先行 | 让行 |

由表 4 中下一行为对应动态栅格法中的状态点, 以状态点描述机耕道速度凸空间状态, 对相邻状态点采用五次多项式拟合生成多条速度曲线作为候选决策方案。随后, 设计代价函数对包含 n 个速度点的速度曲线进行评价, 遴选出一条最优曲线作为最终速度策略。

(1) 平稳性

以加速度大小衡量农机行驶的平稳性, 加速度越小, 农机行驶平稳性越高, 设计平稳性代价函数 C_{stable} 为

$$C_{\text{stable}} = W_{\text{accel}} \sum_{i=1}^n s''(t_i)^2 \quad (7)$$

式中 W_{accel} 为速度权重, $s(t_i)$ 表示农机在 t_i 时刻的位置。

(2) 危险程度

以农机距离动态障碍物的距离评估规避动态障碍物的危险程度, 代价函数为 C_{danger} 。

(3) 速度偏差值

农机行驶速度要以参考速度为指引, 代价与偏差值大小正相关, 设计速度偏差代价函数 C_{dif} 为

$$C_{\text{dif}} = W_{\text{speed}} \sum_{i=1}^n [s'(t_i) - v_{\text{reference}}]^2 \quad (8)$$

式中 W_{speed} 为速度权重, $v_{\text{reference}}$ 是农机的参考速度, m/s 。

2 农机路径规划模型

2.1 规划起点与路径拼接

由于机械控制并非理想状态, 在农机行驶过程中不可避免会产生误差, 如果每次规划都以农机当前位置作为规划起点, 新规划的路径将会与上一周期规划的路径之间出现不连续的情况, 不利于农机控制。

因此, 本文对规划路径起点做出调整, 图 4 为规划起点选取方法, 将控制与规划相结合, 以上一周所规划的路径为参照, 计算农机当前位置的绝对横向误差, 如果误差小于最大误差阈值 L_e , 则认为控制效果良好, 以当前控制周期中的预瞄点作为本次规划的规划起点, 取上一周期中农机到预瞄点之间未行使的路径, 与本周期规划的路径进行拼接, 由此得到的路径可保证农机轨迹和速度变化的连续性。对于控制精度差的时刻, 以农机当前位置作为规划起点。

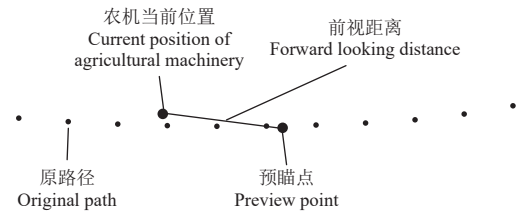


图 4 规划路径起点选取方法

Fig.4 Method for starting point select of path planning

2.2 轨迹规划

在轨迹行为决策后, 由最终的轨迹决策方案得到农机的轨迹凸空间, 即轨迹二次规划方程的可行域。

为求解最优路径, 以轨迹平滑性、参考线偏移距离和横向安全距离代价构建二次规划方程的目标函数 C_{traj} 。

$$C_{\text{traj}} = C_{\text{smooth}} + C_{\text{dev}} + C_{\text{safe}} \quad (9)$$

式中横向安全距离代价 C_{safe} 设计如下:

凸优化问题中通常将安全距离作为约束函数, 但在可行域宽度小于 $2d_{\text{safe}} + w_{\text{trackor}}$ ($2d_{\text{safe}}$ 为农机左右两侧的横向安全距离之和, w_{trackor} 为农机宽度) 时, 此时安全距离约束中的下限会超出可行域上限导致二次规划问题无解, 本文针对上述缺点, 引入惩罚函数, 将 $(s_{\text{avoid}}, 0)$ 和 $(l_{\text{obs}}, d_{\text{safe}} + 0.5w_{\text{trackor}})$ 带入五次多项式曲线中得到动态惩罚

函数 $h(x)$ ，其中 s_{avoid} 为避障任务开始距离，m； l_{obs} 为障碍物外轮廓距离农机的横向距离，m。

改进后的横向安全距离代价可以表示为

$$C_{\text{safe}} = W_{\text{safe}} \sum_{i=1}^n [l(s_i) - h(s_i)] \quad (10)$$

随后，为轨迹规划构建二次规划方程的约束函数：

(1) 轨迹平滑性约束

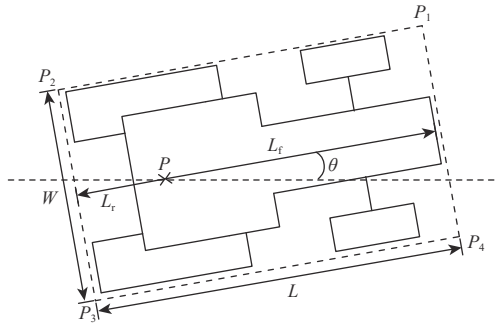
采用 piecewise-jerk 优化算法约束轨迹平滑性，假设轨迹点的三阶导数恒定，则在 $l(s_{i+1})$ 和 $l'(s_{i+1})$ 处可以进行有限项的泰勒展开，得到如下约束：

$$\begin{cases} l(s_{i+1}) = l(s_i) + l'(s_i) \Delta s + \frac{1}{2} l''(s_i) \Delta s^2 + \frac{1}{6} l'''(s_i) \Delta s^3 \\ l'(s_{i+1}) = l'(s_i) + l''(s_i) \Delta s + \frac{1}{2} l'''(s_i) \Delta s^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中， Δs 为轨迹点的横向间隔，m。取相同横向间隔时， Δs 为常数。

(2) 碰撞约束

为了保障农机与道路边缘和障碍物无碰撞，将农机抽象为矩形模型，运动学模型如图 5 所示。



注： $P_i (i=1,2,3,4)$ 为拖拉机的 4 个角点； L_f 为后轮中心到车头的距离，m； L_r 为后轮中心到车尾的距离，m； L 为农机长度，m； W 为农机宽度，m； θ 为拖拉机行驶方向与参考线的夹角，°。

Note: $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ is the four corners of the tractor, L_f is the distance from the center of the rear wheel to the front of the vehicle, m; L_r is the distance from the center of the rear wheel to the rear of the vehicle, m; L is the length of the agricultural machinery, m; W is the width of the agricultural machinery, m; θ is the angle between the direction of tractor travel and the reference line, °.

图 5 农机运动学模型

Fig.5 Kinematics model of agricultural machinery

由图 5 可以计算出农机所对应的一段凸空间为

$$[s_o - L_r \cos \theta - 0.5W \sin \theta, s_o + L_f \cos \theta + 0.5W \sin \theta] \quad (12)$$

式中 s_o 为 P 在 Frenet 坐标系下的横坐标，由此可以得到对应凸空间中任意一点的边界范围，记沿参考线行进方向的左侧道路为正，右侧道路为负，由此得到左边界中最小值为 u_{\min} ，右边界中最大值为 l_{\max} ，则农机 4 个角点处的碰撞约束为

$$\begin{cases} l_{\max} \leq l_o + L_f \sin \theta + \frac{w}{2} \cos \theta \leq u_{\min} \\ l_{\max} \leq l_o + L_f \sin \theta - \frac{w}{2} \cos \theta \leq u_{\min} \\ l_{\max} \leq l_o - L_r \sin \theta + \frac{w}{2} \cos \theta \leq u_{\min} \\ l_{\max} \leq l_o - L_r \sin \theta - \frac{w}{2} \cos \theta \leq u_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

式中 l_o 为 P 在 Frenet 坐标系下的纵坐标。

(3) 动力学约束和机耕道边界约束

农机在任意轨迹点处的转弯半径应大于最小转弯半径，规划初始的位置、航向角应与当前规划起点保持一致，同时，农机不能驶出机耕道边界外。

2.3 农机速度规划

在速度行为决策后，由最终的速度决策方案得到农机的速度凸空间，即，速度二次规划方程的可行域。

为速度规划构建二次规划的目标函数，以速度平稳性、速度偏差值代价，建立机耕道农机行驶速度的目标函数 C_{speed} 。

$$C_{\text{speed}} = C_{\text{stable}} + C_{\text{dif}} \quad (14)$$

随后，为速度规划构建二次规划方程的约束函数：

(1) 速度平滑性约束

采用 piecewise-jerk 优化算法来约束农机速度的平滑性。

(2) 动力学约束

农机的速度和加速度受自身约束，不能无限增大和减小，同时，规划的初始速度和加速度要与当前规划起点一致。

由上述方法得到的规划路径中包含了路径点的位置和速度信息，本文采用 PID 控制算法，根据预瞄点的目标位置和目标速度，结合农机当前的位置和速度，计算方向盘转角和扭矩作为控制量，输入整车控制器执行。

3 试验验证

3.1 仿真验证

为了验证上述机耕道自动驾驶农机局部路径规划算法的有效性，在 python 中进行仿真试验，农机选用 DF1204 无级变速拖拉机，整机外廓尺寸（长×宽）为 4 660 mm×2 100 mm，最小转弯半径为 6 m。

首先建立机耕道地图，全局路径由直线轨迹点组成，机耕道全长为 160 m，宽度为 6 m，农机的起点坐标为 (0,0)，终点坐标为 (160,0)，单次规划周期为 200 ms，忽略控制误差。

根据速度大小和方向设计了 4 类障碍物，在多种行驶环境下的局部路径规划算法进行测试，其中障碍物包括：大小分别为 2 m×2 m 和 4 m×2 m 的 2 个静态障碍物，大小为 4 m×2 m、速度为 1 m/s 迎面驶来的其他农机 1，大小为 4 m×2 m、速度为 1 m/s 同向行驶的其他农机 2，大小为 1 m×1 m、速度为 1 m/s 穿行机耕道的行人。

测试中参数设置如下：警戒速度 $v_{\text{warn}}=2$ m/s，安全速度 $v_{\text{safe}}=1$ m/s，横向安全距离 $d_{\text{safe}}=1$ m。

图 6 为仿真试验结果，图 6a 为全过程中轨迹规划结果， $t_1 \sim t_9$ 标识了对应时刻时农机所在位置。图 6b 为规划轨迹对应的曲率，从图中看出，曲率呈现连续性变化，规划全过程中最大绝对曲率为 0.06 m^{-1} ，平均绝对曲率为 0.013 m^{-1} 。图 6c 为速度规划结果， $t_1 \sim t_9$ 与图 6a 中时刻相对应。

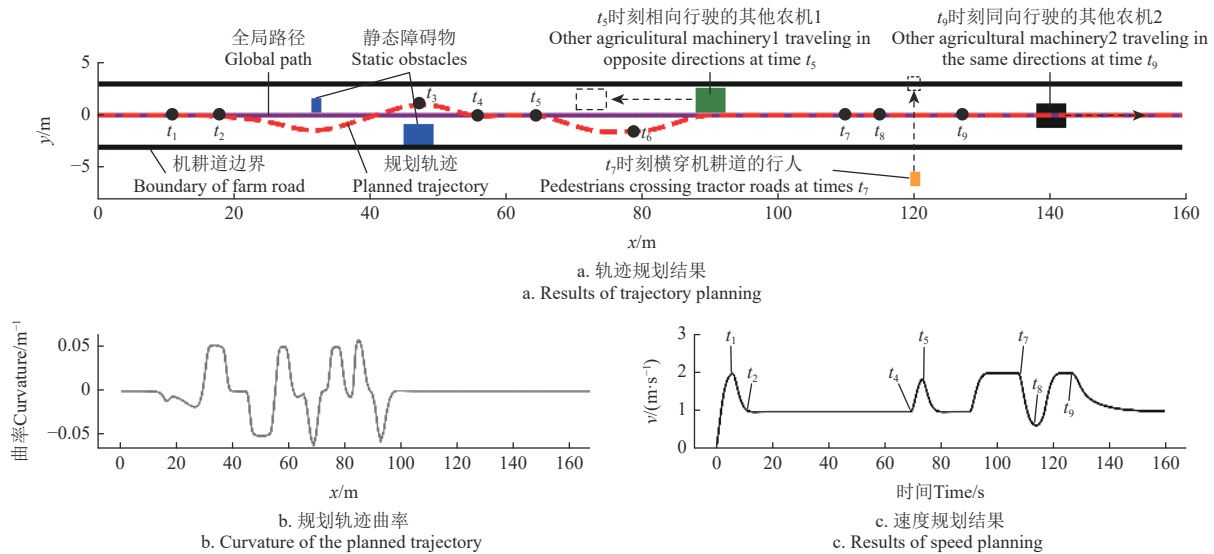


图 6 仿真试验结果
Fig.6 Simulation test results

试验过程如下：在 $0 \sim t_1$ 时刻农机启动，轨迹状态和速度状态分别进入常规行驶状态和警戒行驶状态，速度平稳提升至参考速度 v_{wam} ； t_1 时刻检测到机耕道中存在静态障碍物，速度状态跳转到缓速行驶状态，农机开始减速；在 t_2 时刻农机轨迹状态跳转至绕行障碍状态， $t_1 \sim t_2$ 期间对 2 个静态障碍物的轨迹行为决策结果分别为右绕行和左绕行，以速度 v_{safe} 沿规划的绕障轨迹行驶，决策过程见表 5； t_3 时刻农机超越静态障碍物，农机的轨迹状态和速度状态继续保持绕行障碍状态和缓速行驶状态； t_4 时刻完成绕障任务，轨迹状态和速度状态分别跳转到常规行驶状态和警戒行驶状态； t_5 时刻检测到机耕道中存在相向行驶的动态障碍物，农机轨迹状态和速度状态分别跳转到会车状态和缓速行驶状态，开始沿机耕道右侧行驶，同时速度降低至 v_{safe} ； t_6 时刻会车任务完成，农机轨迹状态和速度状态分别跳转至常规行驶状态和警戒行驶状态，开始驶回机耕道中心线并将速度提升至 v_{wam} ； t_7 时刻农机检测到有横向穿行机耕道的动态障碍物，农机速度状态保持警戒行驶状态，对动态障碍物的规避方式决策为“让行”，降低车速让障碍物先行通过，决策过程见表 6； t_8 时刻，检测到动态障碍物与农机不存在轨迹交集，农机轨迹状态跳转到常规行驶状态； t_9 时刻，农机检测到跟车范围内前方有同向行驶的动态障碍物，速度状态跳转到跟车行驶状态，车速降低至前车相同。

表 5 轨迹行为决策代价函数值

| 决策方案 Decision plan | 平滑代价 Smoothness cost | 危险代价 Dangerous cost | 偏移距离代价 Offset distance cost | 总代价 Total cost |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 00 | 10^7 | $+\infty$ | 10^7 | $+\infty$ |
| 01 | 2×10^7 | $+\infty$ | 2.6×10^7 | $+\infty$ |
| 10 | 56 | 6 159 | 843 | 7 058 |
| 11 | 10^7 | $+\infty$ | 10^7 | $+\infty$ |

注：对障碍物的左侧绕行记为“0”，右侧绕行记为“1”，例如“01”代表对第一个障碍物左侧绕行，对第二个障碍物右侧绕行。
Note: The left side detour of an obstacle is marked as "0", and the right side detour is marked as "1". For example, "01" represents detour to the left of the first obstacle and to the right of the second obstacle.

为了进一步描述农机对于障碍物的行为决策过程，表 5 和表 6 中列出了对应位置处的代价函数值。

表 6 速度行为决策代价函数值

Table 6 Cost function value of speed behavior decision

| 决策方案 Decision plan | 平稳代价 Stationarity cost | 危险代价 Dangerous cost | 速度偏差代价 Speed deviation cost | 总代价 Total cost |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 0 | 25 600 | 9 223 | 64 000 | 98 823 |
| 1 | 1 600 | 0 | 36 000 | 37 600 |

注：在农机和动态障碍物的轨迹交集中，农机优先通过记为“0”，障碍物优先通过记为“1”。
Note: At the intersection of the trajectories of agricultural machinery and dynamic obstacles, the priority passage of agricultural machinery is marked as "0", and the priority passage of obstacles is marked as "1".

试验参数取值如下：偏移距离权重 $W_{\text{reference}}=100$ ，危险权重 $W_{\text{danger}}=1\,000$ ，距离权重 $W_{\text{lenth}}=100$ ，速度权重 $W_{\text{speed}}=4\,000$ ，加速度权重 $W_{\text{accel}}=100$ 。

在 $x=25\text{ m}$ 处，农机检测到机耕道内存在 2 个静态障碍物，由表 5 可知，方案“10”的总代价最小，最终决策方案为：对第一个障碍物右侧绕行，对第二个障碍物左侧绕行。

在 t_7 时刻 ($x=110\text{ m}$ 处)，农机检测到存在横穿机耕道的动态障碍物，由表 6 可知，方案“1”的总代价最小，最终对该动态的决策方案为：在农机与动态障碍物的轨迹交集处，让动态障碍物优先通过。

表 7 为动态栅格法和静态栅格法进行局部路径规划的耗时，仿真试验过程中共规划次数 586 次，采用动态栅格法后，算法平均耗时减少 38ms，算法效率提升 44%。

表 7 局部路径规划耗时

Table 7 Local path planning takes time

| 采样方法 Sampling method | 最大耗时 Maximum time /ms | 最小耗时 Minimum time /ms | 平均耗时 Average time /ms |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 静态栅格法 Static grid method | 136 | 50 | 86 |
| 动态栅格法 Dynamic grid method | 75 | 21 | 48 |

3.2 实车试验

2023 年 4 月 23 日在北京密云河南寨开展自动驾驶

农机局部路径规划实车试验。以 DF1204 无级变速拖拉机为试验平台，如图 7 所示，拖拉机为后轮驱动，阿克曼转向，采用工控机、车载控制器和电动方向盘通过局域网控制发动机和变速箱，拖拉机响应速度为 2.5~35 km/h。



图 7 试验平台

Fig.7 Test platform

试验以 100 m×10 m 地块作为机耕道，对 3.1 中所述的 4 个场景分别进行 4 次实车验证，规划周期为 200 ms。试验中通过模拟数据代替激光雷达探测的障碍物位置、速度和轮廓信息，障碍物种类与 3.1 节所设计相同，模拟障碍物的信号输出频率为 5 Hz。GNSS 系统采用星网

宇达组合导航，实时获取农机的位姿信息。

试验中采用 PID 控制算法对农机进行控制，控制频率为 50 Hz，PID 积分参数 $k_i=0.1$ ，微分参数 $k_d=0.5$ ，比例参数 $k_p=1$ 。

图 8 为静态障碍场景实车试验结果。图 8a 为规划轨迹结果，图中坐标系为 utm 坐标系，在规划轨迹中，农机外轮廓距离障碍物外轮廓最小距离为 0.85 m，在实际轨迹中，农机外轮廓距离障碍物外轮廓的最小距离为 0.76 m，满足农机行驶的安全性要求。图 8b 为规划轨迹与实际轨迹的绝对横向误差，平均绝对横向误差为 3.23 cm，最大绝对横向误差为 8.69 cm。图 8c 为农机规划轨迹的曲率，平均绝对曲率为 0.021 m^{-1} ，最大绝对曲率为 0.056 m^{-1} ，其中绕障轨迹（图 8a 中绕障开始到绕障结束期间的轨迹）平均绝对曲率为 0.027 m^{-1} ，最大绝对曲率为 0.054 m^{-1} 。图 8d 为规划速度与实际速度随时间的变化曲线，加速度变化范围为 $-0.07 \sim 0.44 \text{ m/s}^2$ ，绝对平均速度误差为 0.08 m/s，最大绝对速度误差为 0.32 m/s。由图 8 可知，本文算法保证了农机轨迹、速度和曲率变化的连续性，同时，在绕障过程中自动调节农机速度，从轨迹规划和速度规划上保障农机具有较高的跟踪精度，利于农机控制，提高农机行驶的安全性。

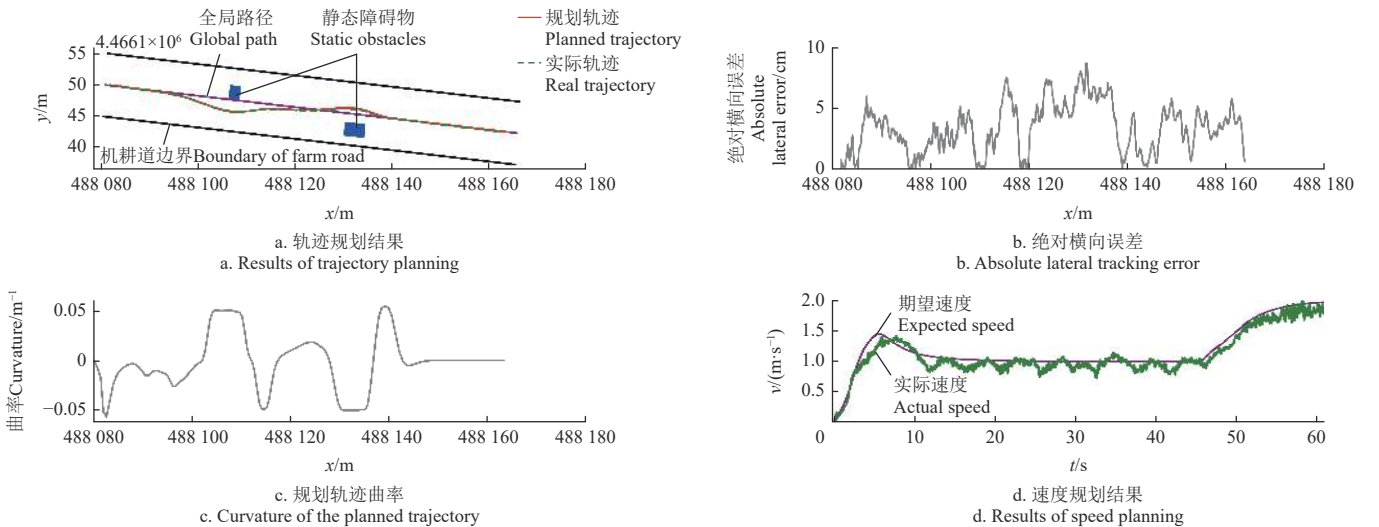


图 8 静态障碍场景实车试验结果

Fig.8 Real vehicle test results in static obstacle scenarios

图 9 为相向行驶动态障碍物场景实车试验结果，图 9a 为农机的轨迹规划结果，农机在 $t=24 \text{ s}$ 时检测到机耕道存在相向行驶的动态障碍物，开启会车任务，调整轨迹至机耕道右侧，在 $t=35 \text{ s}$ 处完成会车任务，返回机耕道中心线。图 9b 为速度规划结果，平均绝对速度误差为 0.12 m/s，最大绝对速度误差为 0.35 m/s，速度变化连续平缓。图 9c 为规划轨迹与实际轨迹的绝对横向误差，平均绝对误差为 3.1 cm，最大绝对横向误差为 10.1 cm。图 9d 为规划轨迹的曲率，全过程中曲率呈连续性变化，平均绝对曲率为 0.19 m^{-1} ，最大绝对曲率为 0.06 m^{-1} 。由图 9 可知，在会车任务开始后，本文算法通过调节农机

速度来提高跟踪精度，在会车任务完成后迅速恢复至原速度，提高安全性和行驶效率。

表 8 为 4 种行驶环境下的实车试验数据，其中，横穿机耕道和同向行驶动态障碍物场景中，由于不涉及农机的轨迹规划，农机始终沿机耕道中心线行驶，因此曲率为 0，横向误差也较小。四种场景中平均绝对加速度分别为 0.04、0.07、0.1 和 0.05 m/s^2 。由表 8 可知，本文算法适用于多种机耕道场景，能够针对实时环境调整轨迹和速度，同时全过程中轨迹曲率变化连续，在进行绕障和会车任务时会自动调节农机行驶速度，保证农机具有较高的跟踪精度，提高行驶安全性。

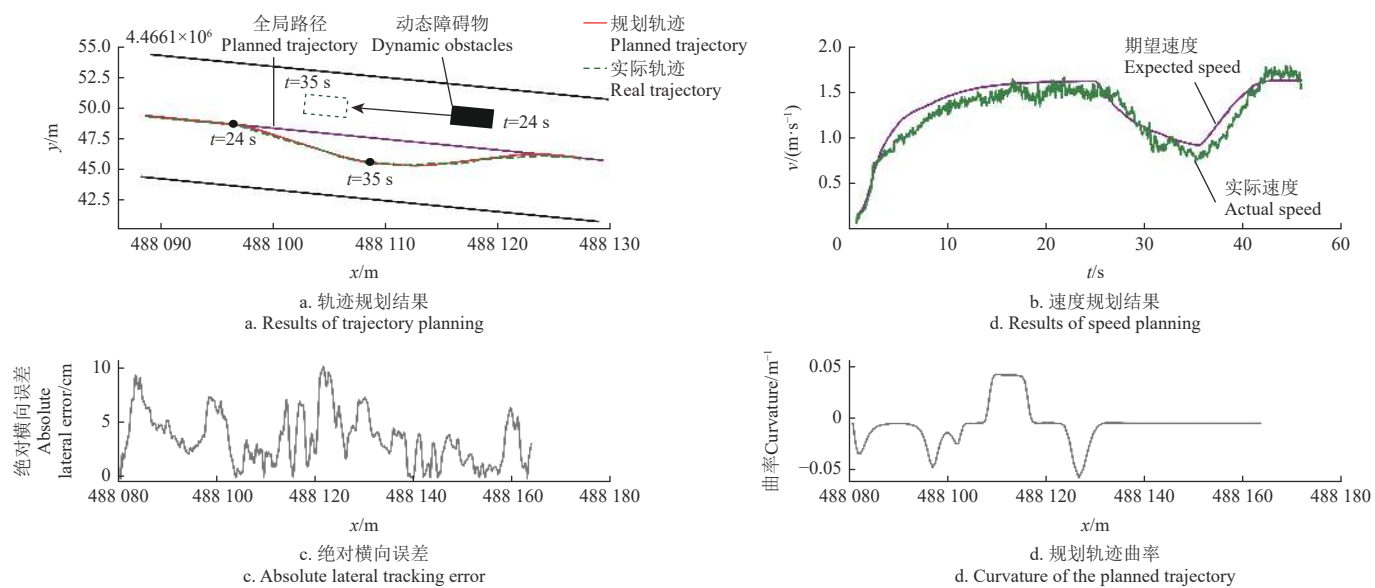


图 9 相向行驶动态障碍物场景实车试验
Fig.9 Real vehicle test of dynamic obstacle scenes in opposite directions

表 8 不同行驶环境下的实车试验数据

| Table 8 Real vehicle test data under different driving environments | | | | | | | |
|---|--|---|---|---|--|---|--|
| 行驶环境 Driving environment | 最大绝对曲率 Maximum absolute curvature/ m^{-1} | 平均绝对曲率 Mean absolute curvature/ m^{-1} | 最大绝对横向误差 Maximum absolute lateral error/cm | 平均绝对横向误差 Average absolute lateral error/cm | 平均绝对速度误差 Average absolute velocity error/ $(m\cdot s^{-1})$ | 最大绝对速度误差 Maximum absolute speed error/ $(m\cdot s^{-1})$ | 加速度变化 Acceleration variation range/ $(m\cdot s^{-2})$ |
| 静态障碍物 | 0.056 | 0.021 | 8.69 | 3.23 | 0.08 | 0.32 | -0.07~0.44 |
| 相向行驶农机 | 0.060 | 0.019 | 10.10 | 3.10 | 0.12 | 0.38 | -0.26~0.43 |
| 横穿道路行人 | 0 | 0 | 9.30 | 2.64 | 0.12 | 0.35 | -0.38~0.43 |
| 同向行驶农机 | 0 | 0 | 10.00 | 2.36 | 0.08 | 0.36 | -0.08~0.44 |

4 结 论

(1) 为实现机耕道农机实时避障与速度规划, 本文提出机耕道农机行为决策方法和实时局部路径规划算法, 使用有限状态机针对障碍物类别定义农机机耕道行驶模式; 基于改进的动态栅格法设计了轨迹行为决策和速度行为决策方法, 降低了算法的冗余度, 提高了算法的时效性; 设计了规划起点算法, 将规划与控制结合, 以控制预瞄点为规划起点, 有效地解决了规划时当前周期轨迹与上周期轨迹之间不连续的问题; 采用二次规划算法对采样路径进行优化, 所规划的轨迹、轨迹曲率和速度均满足动力学约束, 引入安全距离惩罚函数, 解决了二次规划求解中约束超过可行域上限的问题。

(2) 在 4 种行驶环境中进行实车试验和仿真试验。试验结果表明, 本文算法所规划轨迹平均绝对曲率为 $0.019\sim0.021\text{ m}^{-1}$, 绝对曲率不超过 0.06 m^{-1} , 绝对横向误差不超过 10.1 cm , 满足动力学约束, 农机轮廓与障碍物距离不低于 0.76 m , 满足安全性要求。所规划的速度随时间变化连续, 绝对速度误差不超过 0.38 m/s^2 , 加速度变化范围为 $-0.38\sim0.44\text{ m/s}^2$, 满足平稳性要求。采用改进后的状态栅格法, 算法平均耗时减少 38 ms , 算法效率提升 44% 。

本文在 Frenet 坐标系下开展局部路径规划研究, 采用横纵向解耦的方式将农机在平面内的二维运动解耦为两个一维运动, 大大降低了求解难度, 但对于大曲率机

耕道, 障碍物在坐标转化中会发生“横向膨胀”, 障碍物越长, “膨胀”程度越大, 在大曲率机耕道中可能会将“长”障碍物误判为无法通过, 对于机耕道曲率对障碍物在坐标转化中的影响程度未进行细致探讨, 探究在丰富机耕道场景中的自动驾驶农机局部路径规划将是未来的工作重点。

[参 考 文 献]

[1] 常君瑞, 马斌畅, 国芳. 5G 通信技术在无人驾驶农机领域的应用研究[J]. 南方农机, 2022, 53(2): 48-50.

[2] 陈智博, 文龙, 杨卫中, 等. 基于 DF2204 无级变速拖拉机的农机无人驾驶系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 1-9.

CHEN Zhibo, WEN Long, YANG Weizhong, et al. Development of the unmanned driving system for agricultural machinery based on DF2204 continuously variable transmission tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[3] 刘小伟, 吴才聪, 车宇. 无人化农机技术与装备发展趋势[J]. 农机科技推广, 2019, 19(10): 26-27, 30.

[4] 徐广飞, 陈美舟, 金诚谦, 等. 拖拉机自动驾驶关键技术综述[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(6): 126-134.

XU Guangfei, CHEN Meizhou, JIN Chengqian, et al. A review of key technology tractor automatic driving[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 126-134. (in Chinese with English abstract)

[5] 杨一鸣. 复杂环境下无人农机的环境感知与路径规划关键

- 技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
- YANG Yiming. Environment Perception and Path Planning of Unmanned Agricultural Machinery in Complex Environment[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [6] 翟卫欣, 王东旭, 陈智博, 等. 无人驾驶农机自主作业路径规划方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 1-7.
- ZHAI Weixin, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al. Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(16): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [7] 薛丽君, 赵业慧, 宋悦, 等. 无级变速和电传动农业作业机械现状研究[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(7): 81-89.
- XUE Lijun, ZHAO Yehui, SONG Yue, et al. Research on the current situation of continuously variable transmission and electric drive technology[J]. *Jornal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(7): 81-89. (in Chinese with English abstract) (in Chinese with English abstract)
- [8] 解彬彬, 刘继展, 何蒙, 等. 改进 AOA 模式的大田农机无人驾驶导航参数检测系统设计[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(14): 40-51.
- XIE Binbin, LIU Jizhan, HE Meng, et al. Design of the detection system for the unmanned navigation parameters of field agricultural machines based on improved AOA mode[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(14): 40-51. (in Chinese with English abstract)
- [9] KAIVOSOJA J, LINKOLEHTO R. GNSS error simulator for farm machinery navigation development[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 119: 166-177.
- [10] QIU Z, ZHAO N, ZHOU L, et al. Vision-based moving obstacle detection and tracking in paddy field using improved YOLOv3 and deep SORT[J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4082 - 4096.
- [11] 李昂, 孙士杰, 张朝阳, 等. 改进 YOLOv5s 的轨道障碍物检测模型轻量化研究[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59 (4): 197-207.
- LI Ang, SUN Shijie, ZHANG Chaoyang, et al. Research on lightweight of improved YOLOv5s track obstacle detection model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(4): 197-207. (in Chinese with English abstract)
- [12] QIN J, SUN R, ZHOU K, et al. Lidar-based 3D obstacle detection using focal voxel R-CNN for farmland environment[J]. *Agronomy*, 2023, 13(3): 650 - 666.
- [13] 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]. *农业机械学报*, 2018, 49(S1): 35-41.
- XUE Jinlin, YAN Jia, FAN Bowen, et al. Classification and identification method of multiple kinds of farm obstacles based on convolutional neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(S1): 35-41. (in Chinese with English abstract)
- [14] YANG L, XU Y, LIANG Y, et al. Extraction of straight field roads between farmlands based on agricultural vehicle-mounted LiDAR[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(5): 155-162.
- [15] LIU Z, LU Z, ZHENG W, et al. Design of obstacle avoidance controller for agricultural tractor based on ROS[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(6): 58-65.
- [16] LU E, XU L, LI Y, et al. Modeling of working environment and coverage path planning method of combine harvesters[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(2): 132-137.
- [17] MAHMUD M S A, ABIDIN M S Z, MOHAMED Z, et al. Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 488-499.
- [18] ZHONG X, TIAN J, HU H, et al. Hybrid path planning based on safe A* algorithm and adaptive window approach for mobile robot in large-scale dynamic environment[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 99: 65-77.
- [19] ZHANG X, ZHU T, DU L, et al. Local path planning of autonomous vehicle based on an improved heuristic bi-rrt algorithm in dynamic obstacle avoidance environment[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7968 - 8000.
- [20] SUN J, LIU G, TIAN G, et al. Smart obstacle avoidance using a danger index for a dynamic environment[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1589 - 1602.
- [21] 高嵩, 张金炜, 戎辉等. 基于贝塞尔曲线的无人车局部避障应用[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(9): 163-166.
- GAO Song, ZHANG Jinwei, RONG Hui, et al. Application of unmanned vehicle local obstacle avoidance method based on Bezier curve[J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(9): 163-166. (in Chinese with English abstract)
- [22] 宋世杰. 基于强化学习的移动机器人路径规划研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- SONG Shijie. Research on Path Planning of Mobile Robot Based on Reinforcement Learning[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陈丹凤, 雷昊, 刘俊朗, 等. 基于强化蚁群算法的机器人路径规划研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(6): 239-245, 303.
- CHEN Danfeng, LEI Hao, LIU Junlang, et al. Research on robot path planning based on reinforced ant colony optimization[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(6): 239-245, 303. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张智能, 李以农, 余颖弘, 等. 复杂动态环境下智能汽车局部路径规划与跟踪算法研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(9): 372-386.
- ZHANG Zhineng, LI Yinong, YU Yinghong, et al. Study on local path planning and tracking algorithm of intelligent vehicle in complex dynamic environment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(9): 372-386. (in Chinese with English abstract)
- [25] WANG H, LU B, LI J, et al. Risk assessment and mitigation in local path planning for autonomous vehicles with LSTM based predictive model[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, 19(4): 2738-2749.
- [26] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*

- (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 82-88. (in Chinese with English abstract)
- [27] 程越, 李川, 李鑫, 等. 无人驾驶拖拉机实时避障路径规划算法[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(8): 66-77.
- CHENG Yue, LI Chuan, LI Xin, et al. Real-time obstacle avoidance path planning algorithm for unmanned tractors[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(8): 66-77. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨洋, 温兴, 马强龙, 等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报, 2022, 38 (6): 34-43.
- YANG Yang, WEN Xing, MA Qianglong, et al. Real time planning of the obstacle avoidance path of agricultural machinery in dynamic recognition areas based on Bezier curve[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [29] 郭楠. 农业拖拉机路径规划与避障方法研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- GUO Nan. Research on Path Planning and Obstacle Avoidance Method of Agricultural Tractor[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [30] 国家市场监督管理总局. 高标准农田建设通则: GB/T30600-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

Local path planning for autonomous agricultural machinery on farm road

YANG Lili^{1,2}, TANG Xiaoyu^{1,2}, WU Sixian^{1,2}, WEN Long^{1,2}, YANG Weizhong^{1,2}, WU Caicong^{1,2*}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Machinery Monitoring and Big Data Applications, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Path planning of agricultural machinery is currently focused on static obstacle avoidance infield operation scenarios. The driving environment of the tractor is characterized by semi-structured roads with a width of 3-6 m. The tractor roads are relatively complex without identification lines. Many types of dynamic and static obstacles can be found, including the agricultural machinery temporarily parked on both sides of the road, various agricultural machinery, or other traffic participants traveling in the same or opposite direction, even crossing the tractor road. Large-scale agricultural machinery cannot perform the complex trajectory movements in the narrow and long path. It is highly required for the smoothness of the planned trajectory. At the same time, the speed planning is needed to avoid the dynamic obstacles. In this study, local path planning was proposed using quadratic programming, in order to fully meet the practical needs of safety, smoothness, and real-time planning of autonomous agricultural machinery in the scenario of tractor roads. Firstly, a finite state machine was used to define the driving mode of agricultural machinery for the obstacle categories. Secondly, a horizontal and vertical decoupling was adopted to reduce the redundancy for better timeliness. The behavior decision-making of trajectory and velocity was also designed using an improved dynamic state grid method. Thirdly, the planning starting point was designed with a control preview point to combine the planning and control systems. The discontinuity of the cycle trajectory was then effectively solved during planning. Finally, quadratic programming was used to optimize the sampling path. All planned trajectories, trajectory curvature, and velocities fully met the dynamic constraints. A penalty function of safety distance was introduced to solve the constraints exceeding the feasibility of a quadratic programming solution. That was the domain's upper limit. A series of vehicle tests were conducted in various driving environments, with a reference speed of 2 m/s. The results show that in the scenario of bypassing static obstacles, the average and maximum absolute curvature of the planned trajectory were 0.021, and 0.056 m⁻¹, respectively, while the average and maximum absolute lateral error were 3.23, and 8.69 cm, respectively, and the distance from the agricultural machinery to the outer contour of the obstacle was greater than 0.76 m. Furthermore, the average and absolute error of planning speed were 0.08-0.12 m/s, and less than 0.38 m/s, respectively, while the acceleration variation range was -0.38-0.44 m/s, in order to avoid the dynamic obstacles, such as driving in the opposite or same direction, or crossing tractor tracks. Therefore, there was the average and maximum time of 48, and 75 ms, respectively, after simulation with the planning period of 200 ms. The average time was reduced by 38 ms, whereas, the efficiency was improved by 44%, compared with the static state grid method. The findings can also provide technical support to the local path planning of agricultural machinery in the scenario of machine plowing roads.

Keywords: agricultural machinery; Autonomous driving; local path planning; quadratic programming; finite-state machine