

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407940

改进双向 A* 联合最优控制的无人农机轨迹规划*

李 钰 孙金林 马 莉 丁世宏

(江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)

摘要:为了解决无人农机在复杂狭窄的非结构化环境下轨迹规划效率低且容易陷入局部解的问题,提出了一种改进双向 A* 算法联合最优控制的方法。首先,引入方向导向搜索并改进启发式函数,加快双向 A* 在大规模复杂环境中的路径规划速度,同时设计路径平滑策略,减少路径拐点,提升参考路径的质量;接着,针对最优控制问题中避障约束的处理难度随障碍物密度增大而显著上升的问题,构建安全驾驶走廊,降低环境复杂度对计算效率的影响;最后,基于车辆非线性运动学模型制定惩罚迭代框架,逐步求解优化问题,提高轨迹规划成功率,获取全局最优或近似最优轨迹。在 3 种不同规模的地图仿真,结果表明,提出的改进双向 A* 算法与 A* 算法相比,规划时间和路径长度平均减少了 48.0% 和 5.2%,路径也更平滑。在无人农机轨迹规划中,所提方法与改进 Hybrid A* 算法、变体 1 和变体 2 相比,生成的轨迹代价分别减少了 19.3%、5.4% 和 33.1%,轨迹质量具有明显的优势,为实际应用提供了有效的解决方案。

关键词:双向 A* 算法;路径规划;最优控制;无人农机

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Improved bidirectional A* with optimal control for unmanned agricultural vehicle trajectory planning

Li Yu Sun Jinlin Ma Li Ding Shihong

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to address the issues of low trajectory planning efficiency and easy to fall into local solutions of unmanned agricultural vehicles in complex and narrow unstructured environments, an improved bidirectional A* algorithm combined with optimal control method is proposed in this paper. Firstly, the direction-guided search is introduced and the heuristic function is improved to accelerate the speed of bidirectional A* path planning in large-scale complex environments. Additionally, a path smoothing strategy is designed to reduce the number of inflection points and improve the quality of the reference path. Next, to address the challenge that the difficulty of handling obstacle avoidance constraints in optimal control problems increases significantly with the density of obstacles, safe driving corridors are constructed to reduce the impact of environmental complexity on computational efficiency. Finally, a penalty iteration framework is established based on the vehicle's nonlinear kinematic model to solve optimization problems iteratively, thereby improving the success rate of trajectory planning and obtaining globally optimal or approximately optimal trajectories. In three different scale map simulations, the results show that compared with A* algorithm, the proposed improved bidirectional A* algorithm reduces the planning time and path length by 48.0% and 5.2%, and the path is smoother. In the unmanned agricultural vehicle trajectory planning, compared with Hybrid A* algorithm, variant 1 and variant 2, the proposed method reduces the cost of generated trajectory by 19.3%, 5.4% and 33.1%, respectively. The trajectory quality has obvious advantages, and provides an effective solution for practical application.

Keywords: bidirectional A* algorithm; path planning; optimal control; unmanned agricultural vehicle

收稿日期:2024-11-05 Received Date: 2024-11-05

* 基金项目:国家自然科学基金(62203189, 62373170)、江苏省自然科学基金(BK20220518)、中国博士后科学基金(2024M751187)、农业农村部黄淮海智慧农业技术重点实验室开放基金(202403)资助

0 引言

随着现代农业的快速发展,构建高效、智能的运输系统对于种植、育苗、移栽、运送等农业活动至关重要^[1-3]。无人农机作为一种自主导航的农业机械,通常由牵引车和挂载设备组合而成,牵引车负责提供动力,挂车设备用于执行特定的农业任务。轨迹规划是无人农机实现自主导航的核心技术之一,能够提高生产效率,保障运行安全^[4]。然而,由于无人农机特殊的欠驱动特性以及在复杂环境中容易出现折叠效应^[5],导致其行动受到限制,这些问题构成了轨迹规划的关键挑战。

当前一种流行的趋势是将基于搜索采样的方法与基于优化的方法相结合,以解决上述问题。基于搜索采样的方法,如 Lattice 算法^[6]、概率路线图算法^[7]和 Hybrid A* 算法^[8],被用于生成路径作为后续优化求解的初始迭代。然而,在复杂和大规模环境中这些方法往往搜索效率低,并容易陷入局部最优解。因此,双向 A* 算法通过同时从起点和目标点进行搜索,能够提高大型复杂环境路径搜索的效率^[9-11]。文献[12]在双向 A* 的基础上引入分层策略并采用同步双向搜索,提高了响应突发障碍的能力。文献[13]采用多近邻栅格距离计算方案改进双向时效 A*,有效减少了规划时间和路径长度。但是,在高维空间和复杂环境中的适应性仍有待提升。在此基础上,基于优化的方法进一步提升解的质量,收敛到最优解。为了解决复杂的非线性优化问题,通常采用多阶段优化的策略。文献[8]采用 Hybrid A* 生成粗糙路径,并提出了一种渐进约束的方法将障碍物自适应扩展到标称尺寸求解优化问题,提升了轨迹的质量。文献[14]通过 A* 算法生成路径并平滑,采用车身和障碍物异步扩展到标称尺寸的方法处理避障约束,在障碍物密度大的环境中提高了算法的成功率。文献[15]结合 Lattice 算法和固定子起点和子终点分段优化的方法,提高了算法的适应性。然而,上述方法在面对障碍物增加的情况下计算时间消耗是巨大的,并且结果的最优性有所损失。因此,如何在复杂的非结构化环境下提供有效的初始解,避免障碍物数量对优化问题求解时间的影响是一个亟待解决的问题。

因此,本文提出了一种改进的双向 A* 算法与最优控制结合的无人农机轨迹规划方法。为了加快双向 A* 算法在复杂或大型环境中的路径搜索进程并提供转弯次数少的平滑路径,提出了方向导向搜索,并改进适应度函数,通过路径平滑策略删除冗余节点。这些改进大幅提升了算法的计算效率和路径质量,使其在大规模环境中的适应性更强。为了减少障碍物密度增加对计算效率的影响,优化求解空间的选择,针对无人农机设计了安全驾

驶走廊,并制定惩罚迭代框架以应对非线性运动学模型带来的求解困难。与现有的优化策略相比,该方法在复杂环境下表现出更强的适应性和鲁棒性。相较于之前研究的组合规划方法,本文方法在整体性能上有显著提升,从而实现了无人农机在复杂环境中更安全、可靠的轨迹规划。

1 无人农机的运动学模型

一台无人农机通常被描述为主动控制的牵引车拖动被动挂车的机械设备。根据挂载方式的不同,可分为轴上挂载和离轴挂载^[16]。混合挂载模式的牵引挂车可以统一用离轴挂载模式表示,如图 1 所示。本文的研究环境为非结构化环境,建模前对无人农机做出以下假设:

- 1) 无人农机全部由刚性部件组成;
- 2) 各个车轮与地面均为单点接触;
- 3) 忽略轮胎的横向滑移;
- 4) 纵向为纯滚动运动。

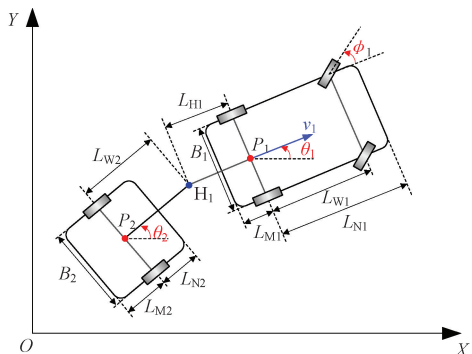


图 1 无人农机运动学模型

Fig. 1 The unmanned agricultural vehicle kinematic model

牵引车的运动学模型^[17]如式(1)所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ \theta_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1(t) \cdot \cos\theta_1(t) \\ v_1(t) \cdot \sin\theta_1(t) \\ v_1(t) \cdot \tan\phi_1(t)/L_{W1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (x_i, y_i) ($i = 1, 2$) 表示每辆车的后轮轴中点位置; θ_i ($i = 1, 2$) 表示方位角; v_1 表示牵引车速度; ϕ_1 表示牵引车前轮转向角; L_{W1} 表示牵引车轴距; $t \in [0, t_c]$ 表示预期运动完成整个路径的时间。

根据几何关系推导出挂车的后轮轴中点位置为:

$$\begin{aligned} x_2(t) &= x_1(t) - L_{H1} \cdot \cos\theta_1(t) - L_{W2} \cdot \cos\theta_2(t) \\ y_2(t) &= y_1(t) - L_{H1} \cdot \sin\theta_1(t) - L_{W2} \cdot \sin\theta_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: L_{H1} 表示牵引偏移; L_{W2} 表示挂车轴距。进一步,挂车的角速度为:

$$\frac{d\theta_2(t)}{dt} = \frac{v_1}{L_{W2}} \sin(\theta_1(t) - \theta_2(t)) -$$

$$\frac{L_{\text{HI}}}{L_{\text{W2}}} \cdot \frac{d\theta_1(t)}{dt} \cdot \cos(\theta_1(t) - \theta_2(t)) \quad (3)$$

2 改进双向 A* 算法

2.1 方向导向搜索

在路径规划中,传统的 A* 算法由于搜索方向单一,容易在障碍物密集或较长路径的情况下产生冗余计算,导致搜索效率低甚至失败^[18]。双向 A* 算法从起点和目标点同时展开搜索,显著减少了遍历节点数量和计算量,从而提升了规划效率。

A* 算法通常在搜索过程中选择 4 或 8 个相邻节点进行扩展。扩展节点较少时,路径规划可能仅找到次优解,难以覆盖全局最优路径;而当扩展节点较多时,虽然增加了找到最优路径的可能性,但也显著增加了计算量和时间复杂度,导致算法效率下降。综上所述,为了提升路径搜索的效率和全局性,本文采用 8 邻域节点扩展方法。

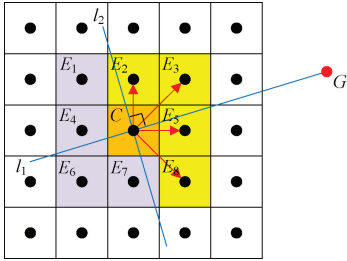


图 2 遍历节点确定示意

Fig. 2 Schematic diagram of node traversal determination

在已知目标点的情况下,每次由当前节点向 8 个方向扩展的节点并不都是有效的,往往存在大部分无用点,导致计算量大而效率较低。如图 2 所示,在双向 A* 正向搜索时,将反向搜索的当前节点作为目标点 G ,连接正向搜索的当前节点 C 和 G 形成直线 l_1 ,经过 C 作垂直于 l_1 的直线 l_2 。直线 l_2 将平面分成两部分,一部分包含 G ,另一部分不包含 G 。当扩展的节点位于包含目标点 G 的区域内则保留,如图 2 中的黄色节点;否则丢弃。

判断是否保留扩展节点 E ,相当于判断当前节点到扩展节点的向量 $\vec{CE}$ 和当前节点到目标节点的向量 $\vec{CG}$ 之间的夹角是否小于或等于 90° 。假设当前节点的坐标为 (x_c, y_c) ,目标节点的坐标为 (x_g, y_g) ,扩展节点的坐标为 (x_e, y_e) ,两向量点积为:

$$\vec{CE} \cdot \vec{CG} = (x_g - x_c)(x_e - x_c) + (y_g - y_c)(y_e - y_c) \quad (4)$$

如果式(4)的结果大于或等于 0,确定该节点在包含目标点 G 的区域内,则继续对该节点进行下一步的评估。

2.2 改进评价函数

双向 A* 算法基于传统 A* 的思想,通过设计一个评价函数来评估扩展节点。在路径搜索过程中,通过比较各节点的评价函数值,算法优先选择具有最低评价值的节点作为下一个扩展节点。双向 A* 算法的评价函数 $f(n)$ 定义为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5)$$

式中: $g(n)$ 是节点的代价函数,表示从起点到当前节点所累积的实际代价,本文用欧氏距离计算; $h(n)$ 是节点的启发式函数,反应当前节点到目标节点的估计代价。

当正向搜索和反向搜索在垂直障碍物附近相遇时,可能需要反复搜索附近节点甚至直到开放列表 Open list 为空集而搜索失败。因此,采用动态权重调节启发式函数 $h(n)$ 的估计值。当正向当前节点和反向当前节点距离较远时,增加权重加快节点的相遇;当两节点距离接近时,减小权重使评估函数更接近实际代价。此时, $f(n)$ 可表示为:

$$f(n) = g(n) + e^{h(n)} \cdot h(n) \quad (6)$$

这种动态调节有效减少了冗余节点的搜索,提升算法的效率和准确性。

2.3 路径优化

由于 A* 算法的路径规划策略倾向于沿着栅格节点搜索,生成的路径往往包含大量的拐点,影响后续的运行效率。针对这种情况,对不影响路径的冗余节点和在避开障碍物的前提下移除时能够减少转弯次数的可优化节点进一步处理,平滑搜索生成的路径。

假设生成的路径点为 $\text{Path} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$,从起点 P_1 开始依次检查与下一个路径点的线段是否经过障碍物,直到 P_1 与 P_k 的连线碰到障碍物,则删去节点 $\{P_2, \dots, P_{k-2}\}$,保留节点 P_{k-1} 。接着,从节点 P_k 开始继续检查直到终点 P_n 。完整的改进双向 A* 算法(improved bidirectional A* algorithm, IBA*)流程如图 3 所示。

3 基于优化的无人农机轨迹规划

3.1 建设安全驾驶走廊

由于无人农机运动学模型的特殊性,随着环境复杂度的增加,仅仅依靠 IBA* 生成的参考路径来求解由最优控制问题描述的规划任务,计算量会迅速增大,甚至可能求解失败。因此,通过构建安全驾驶走廊提取环境中的自由空间,从而减少障碍物对路径规划的影响,使得算法在复杂环境中依旧能够高效地求解全局最优的可行路径。

在构建安全走廊的过程中,为了有效地处理障碍物,引入一种映射方法,映射关系为:

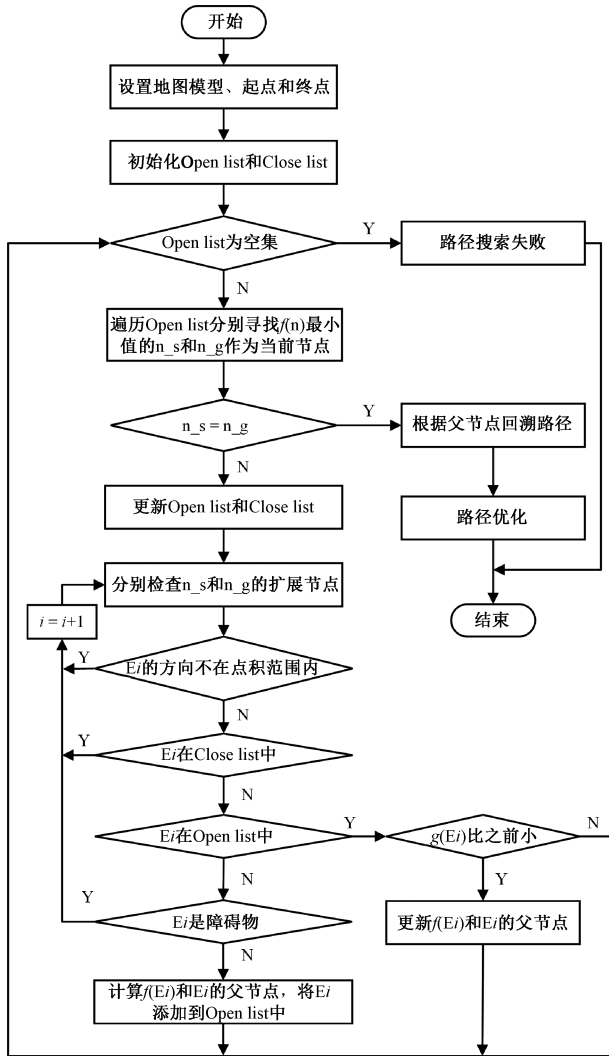


图3 改进双向 A* 算法流程

Fig. 3 Flow chart of improved bidirectional A* algorithm

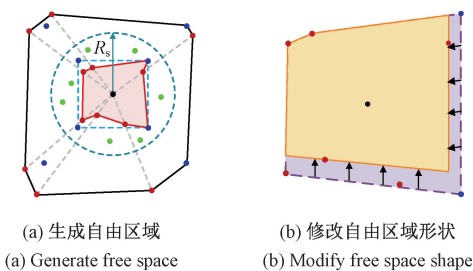


图4 驾驶走廊建设示意图

Fig. 4 Diagram of driving corridor construction

$$P' = P \cdot (2R_s - \|P\|) / \|P\| \quad (7)$$

式中: P 表示原始障碍物点, R_s 表示用户自定义半径。

本文建设安全驾驶走廊的步骤如下。

1) 使用 IBA* 分别对牵引车和挂车生成参考路径, 并

对每条路径均匀采样 N 个路径点;

2) 以每个路径点为中心, 自定义构建检测区域, 如图 4(a) 所示的蓝色点组成的矩形区域;

3) 在检测区域内查找障碍物点, 构成点集 S_o , 并将这些点根据式 (7) 逐一映射得到点集 S_m ;

4) 通过快速凸包算法确定包围点集 S_m 的凸包, 形成顶点集合 S_f ;

5) 将点集 S_f 中的点映射回点集 S_o , 获得检测区域内构成星凸多边形自由区域的障碍物点集 S_c ;

6) 对障碍物点集 S_c 采用快速凸包算法, 确定可能包含部分障碍物点的凸多边形区域, 如图 4(b) 所示;

7) 对于凸多边形内部的障碍物点, 将每条边依次平行推移到离圆心最近的障碍物点位置, 得到内部无障碍物的驾驶走廊。

3.2 最优控制问题及其优化策略

1) 最优控制问题表述

无人农机的轨迹规划任务可以定义为在状态向量 $s(\cdot)$ 和控制输入 $u(\cdot)$ 空间内寻找一条可行的轨迹, 使无人农机从初始状态 $s_{init} \in S_{free}$ 到达目标状态 $s_{fin} \in S_{free}$, 并实现性能指标 J 的最小化^[19]。为了清晰地构造这个问题, 从运动学模型、起点及目标点条件和防撞要求三方面考虑约束条件。完整的最优控制问题表述为:

$$\begin{aligned} \text{minimize } J &= t_c + \eta \cdot \int_0^{t_c} (a_1^2(t) + \omega_1^2(t)) \cdot dt \\ \text{subject to } & \text{kinematic model (1) - (3)} \\ & s(0) = s_{init}, \quad s(t_c) = s_{fin} \\ & s(t) \in S_{free} \\ & s^{\min} \leq s(t) \leq s^{\max} \\ & u^{\min} \leq u(t) \leq u^{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: 状态向量 $s(t) = [x_i(t), y_i(t), \theta_i(t)] (i = 1, 2)$; 控制输入 $u(t) = [v_1(t), \phi_1(t)]$; η 表示衡量轨迹平滑性的权重参数; a_1, ω_1 分别表示牵引车的加速度和角速度; S_{free} 表示环境中的自由空间; $s^{\min}$ 和 $s^{\max}$ 分别表示最小和最大状态向量; $u^{\min}$ 和 $u^{\max}$ 分别表示最小和最大控制输入。

2) 制定惩罚迭代框架

由于 IBA* 生成的路径并不符合无人农机的运动学要求, 同时, 依据质量不高的参考路径点建立的安全驾驶走廊也受到影响。因此, 直接求解式 (8) 只能获得一个可行解甚至无法求解。无人农机的运动学模型是非线性的, 求解过程受到非线性的限制, 找到一个满足所有约束的解可能是非常困难的。通过软化非线性约束, 可以降低求解的不可行性。将式 (8) 中的运动学模型约束转化为性能指标 J 中的惩罚项。

首先, 将非线性约束式 (1) 转化为:

$$J_{p1} = \int_{\tau=0}^{\tau_c} \|x_1'(\tau) - v_1(\tau)\cos\theta_1(\tau)\|^2 d\tau +$$
$$\int_{\tau=0}^{\tau_c} \|y_1'(\tau) - v_1(\tau)\sin\theta_1(\tau)\|^2 d\tau +$$
$$\int_{\tau=0}^{\tau_c} \|\theta_1'(\tau) - \frac{v_1(\tau)\tan\phi_1(\tau)}{L_{w1}}\|^2 d\tau \quad (9)$$

同样的,对式(2)和(3)也进行转化,在性能指标中加入惩罚项之和 J_p ,修改为:

$$J' = t_c + \eta \cdot \int_{\tau=0}^{\tau_c} (a_1^2(\tau) + \omega_1^2(\tau)) \cdot d\tau + w_p \cdot J_p$$
$$(10)$$

式中: w_p 表示惩罚项权重系数。式(8)修改后为:

$$\underset{s(t), u(t), t_c}{\text{minimize}} J' = t_c + \eta \cdot \int_{\tau=0}^{\tau_c} (a_1^2(\tau) + \omega_1^2(\tau)) \cdot d\tau +$$
$$w_p \cdot J_p$$
$$\text{subject to } s(0) = s_{\text{init}}, \quad s(t_c) = s_{\text{fin}}$$
$$s(t) \in S_{\text{free}}$$
$$s^{\min} \leq s(t) \leq s^{\max}$$
$$u^{\min} \leq u(t) \leq u^{\max} \quad (11)$$

通过迭代不断重构安全驾驶走廊并生成可行解,依次作为后续优化的初始解,最终实现轨迹的全局优化。本文所提的完整轨迹规划方法执行流程如算法 1。

算法 1 无人农机轨迹规划算法

输入:规划任务;车辆参数;环境地图

输出:轨迹

1: 利用 IBA* 生成车辆路径,并均匀采样成路径点

2: 设置最大迭代次数 N_{iter} ,轨迹可行性最大阈值 M

3: While ($J_p > M$)

4: If ($n > N_{\text{iter}}$)

5: 退出循环

6: End If

7: $n = n + 1$

8: For 每辆车个体 V_i

9: 建设安全驾驶走廊

10: End For

11: 根据式(11)求解当前可行轨迹,更新惩罚项值 J_p

12: If ($J_p < M$)

13: 输出全局最优轨迹

14: 退出循环

15: End If

16: End While

4 仿真对比

为了对所提出的轨迹规划算法的性能进行全面的评估,所有的仿真均在一台配备 Intel Core i7-13650HX CPU、16 GB 内存和运行频率为 3 GHz 的计算机上执行。

4.1 IBA* 仿真

为了验证 IBA* 的有效性,与 A* 算法分别在 40 m×

40 m, 80 m×80 m 和 100 m×100 m 规模的地图中进行仿真对比。从规划时间和路径长度两方面具体评估,如表 1 所示。

如图 5 所示,在 40 m×40 m 的地图中,IBA* 算法的计算时间比 A* 算法减少了 12.5%,路径长度减少了 3.7%。如图 6 所示,在 80 m×80 m 的地图中,IBA* 算法生成的路径转弯次数更少,路径更平滑,A* 算法生成的路径更保守。IBA* 算法的计算时间比 A* 算法减少了 54.4%,路径长度减少了 6.3%。如图 7 所示,在 100 m×100 m 的地图中,IBA* 算法的计算时间比 A* 算法减少了 77.1%,路径长度减少了 5.5%。

表 1 不同规模地图路径规划方法对比

Table 1 Comparison of path planning methods on different map scales

地图/m	规划算法	时间/s	路径长度/m
40×40	改进双向 A*	0.014	51.900
	A*	0.016	53.883
80×80	改进双向 A*	0.026	103.368
	A*	0.057	110.259
100×100	改进双向 A*	0.033	136.052
	A*	0.144	144.024

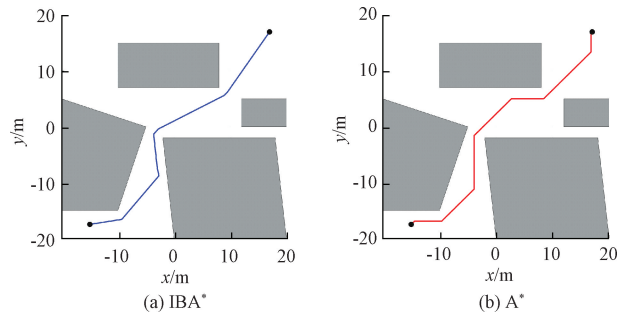


图 5 40 m×40 m 地图仿真结果
Fig. 5 Simulation results for the 40 m×40 m map scale

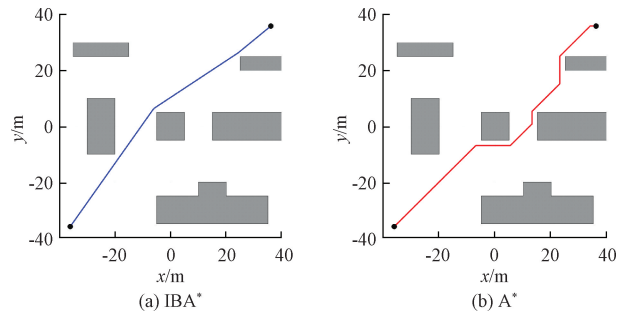


图 6 80 m×80 m 地图仿真结果
Fig. 6 Simulation results for the 80 m×80 m map scale

这些结果表明,随着地图规模的增大,IBA* 算法表

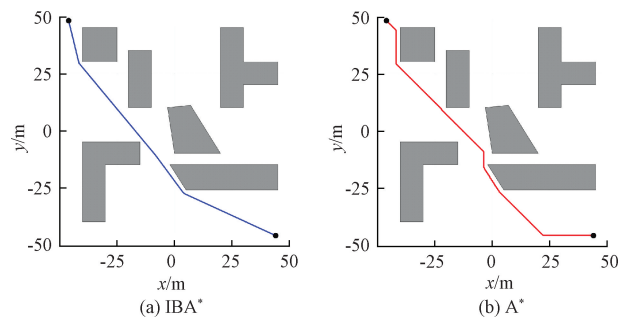


图 7 100 m×100 m 地图仿真结果

Fig. 7 Simulation results for the 100 m×100 m map scale

现出更高的搜索效率和路径质量,无论是在规划时间、路径长度还是路径平滑性上,均优于 A* 算法。这一改进使得 IBA* 算法在复杂和大规模环境下更加高效,为无人农机轨迹规划问题提供了高质量的参考路径。

4.2 无人农机轨迹规划算法仿真

无人农机轨迹规划所需参数如表 2 所示。为了全面评估所提出的无人农机轨迹规划方法的效果,设置了两个具有挑战性的测试场景,涵盖了无人农机多样化机动操作的需求。轨迹规划仿真结果如图 8 所示。

表 2 仿真参数		
Table 2 Simulation parameters		
符号	含义	值
L_{N1}	牵引车前悬长度	0.75 m
L_{N2}	挂车前悬长度	0.5 m
L_{M1}	牵引车后悬长度	0.25 m
L_{M2}	挂车后悬长度	0.5 m
L_{W1}	牵引车轴距	0.5 m
L_{W2}	挂车轴距	3 m
L_{H1}	牵引偏移	1.5 m
B_i	车辆宽度($i=1,2$)	2 m
R_s	映射半径	70 m
M	可行性最大阈值	0.05
N_{iter}	最大迭代次数	5
η	轨迹平滑权重参数	0.25
w_P	惩罚项权重系数	10^4

场景 1 具有两个不规则障碍物且其狭长部分对规划空间造成了限制,牵引车通过两次方向的调整避开障碍物,同时保证轨迹的平滑性。场景 2 需要无人农机向后机动停车。在进入狭窄通道之前,牵引车经历了几次小角度的调整,以确保整个系统绕过障碍物,并顺利停入狭窄的停车区域。相比之下,挂车的路径更加平滑,但同样进行了小幅度的方向调整,以适应牵引车的带动和路径的变化。

为了进一步验证所提算法的可靠性,与其他算法进行对比。文献[20]在 Hybrid A* 基础上加入无人农机的

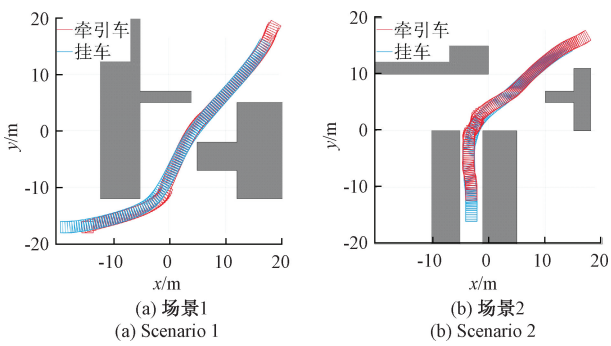


图 8 无人农机轨迹规划仿真结果

Fig. 8 Simulation results of tractor-trailer trajectory planning

运动学模型,在扩展新节点同时计算拖车的位置和转角,直接搜索完整无人农机的路径。除此以外,对所提算法设计两个变体进行对比。变体 1,采用 A* 算法生成参考轨迹,其余部分遵循所提出的方法。变体 2,直接求解式(8),不使用惩罚迭代框架。对比结果如表 3 所示。

表 3 轨迹规划方法对比			
Table 3 Comparison of trajectory planning			
场景	规划算法	规划时间/s	代价 t_c/s
场景 1	文献[20]	2.698	42.554
	变体 1	4.108	35.682
	变体 2	2.787	50.500
	本文	5.291	33.771
场景 2	文献[20]	1.325	—
	变体 1	6.778	33.392
	变体 2	2.092	—
	本文	4.467	26.962

根据表 3 可知,尽管改进的 Hybrid A* 算法在计算时间上具有一定的优势,但其搜索的轨迹的代价较高,特别是在涉及车辆向后机动的情况时,容易规划失败。A* 算法生成的参考轨迹没有 IBA* 的质量高,对后续求解最优控制问题产生不利影响。在不使用惩罚迭代框架的情况下,仅依赖参考路径作为初始解,在复杂的场景中面临求解失败的风险。在场景 1 中,本文算法与文献[20]算法、变体 1 和 2 相比,生成的轨迹代价分别减少了 19.3%、5.4%和 33.1%。综上所述,本文算法在复杂度高的环境和机动操作要求多样的情况下,生成全局最优轨迹的能力更强,具有高效性和稳定性。

5 结 论

针对无人农机在复杂狭窄环境下轨迹规划效率低和易陷入局部解的问题,本文提出了一种 IBA* 与最优控制相结合的方法。首先,通过引入方向导向搜索和优化启

发式函数,并设计路径平滑策略,提高了IBA*算法的搜索效率和路径质量;其次,构建安全驾驶走廊充分利用复杂环境的自由空间,减少避障约束复杂性;最后,制定了惩罚迭代框架,提高优化成功率,跳出局部最优解。通过将IBA*算法与A*算法对比以及本文所提无人农机轨迹规划方法与3种算法对比,结果表明,本文方法在计算效率、轨迹质量和求解稳定性方面具有显著优势。未来的工作将进一步提升算法的计算效率,扩展其在大规模环境中的应用。结合无人农机的操作条件,探索多目标优化策略,提高算法的适应性。此外,在动态场景中深入研究,增加算法处理动态障碍物的能力,加快其响应速度。

参考文献

- [1] 曹波,朱万洁,姜春霞,等.基于VBKF-CPA-TSA算法的UWB定位技术[J].仪器仪表学报,2023,44(10):120-129.
CAO B, ZHU W J, JIANG CH X, et al. A UWB localization technique based on the VBKF-CPA-TSA algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 120-129.
- [2] 吴家腾,李威,方志超,等.基于物理模型驱动优化WPD的弧齿锥齿轮故障诊断方法研究[J].电子测量与仪器学报,2023,37(8):214-222.
WU J T, LI W, FANG ZH CH, et al. Fault diagnosis method of spiral bevel gear based on physical model driven optimal WPD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (8) : 214-222.
- [3] SHOJAEI K. Coordinated saturated output-feedback control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester in crop-harvesting operation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71 (2) : 1224-1236.
- [4] 伞红军,杨晓园,陈久朋,等.基于拟水流算法在移动机器人路径规划中的应用[J].仪器仪表学报,2024,45(7):263-278.
SAN H J, YANG X Y, CHEN J P, et al. Research on path planning of mobile robot based on the stream algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 263-278.
- [5] BEGLINI M, LANARI L, ORIOLO G. Anti-jackknifing control of tractor-trailer vehicles via intrinsically stable MPC [C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 8806-8812.
- [6] 吴正,赵怀林.基于改进A*算法和lattice算法的路径规划方法[J].计算机应用与软件,2021,38(6):288-293,305.
WU ZH, ZHAO H L. A path planning method based on improved A* algorithm and lattice algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38 (6) : 288-293, 305.
- [7] 徐大也,胡立坤,王小勇,等.基于概率路线图法的窄道采样与轨迹优化[J].国外电子测量技术,2023,42(2):1-8.
XU D Y, HU L K, WANG X Y, et al. Narrow area sampling and trajectory optimization based on probabilistic roadmap [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(2): 1-8.
- [8] LI B, ACARMAN T, ZHANG Y, et al. Tractor-trailer vehicle trajectory planning in narrow environments with a progressively constrained optimal control approach [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 5(3): 414-425.
- [9] 孟凡齐,孙潇潇,朱金善,等.基于双向A*-APF算法的船舶路径规划研究[J].大连海洋大学学报,2024,39(3):506-515.
MENG F Q, SUN X X, ZHU J SH, et al. Research on ship path planning based on bidirectional A*-APF algorithm [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024, 39(3): 506-515.
- [10] 陈德童,刘贤达,刘生伟.基于双向搜索改进A*算法的自动导引车路径规划[J].计算机应用,2021,41(202):309-313.
CHEN D T, LIU X D, LIU SH W. Path planning for automated guided vehicles based on improved bidirectional A* Algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(202): 309-313.
- [11] 杜传胜,高焕兵,侯宇翔,等.基于改进双向A*算法的消防机器人路径规划[J].计算机与现代化,2023(4):15-19,25.
DU CH SH, GAO H B, HOU Y X, et al. Path planning for firefighting robots based on improved bidirectional A* algorithm [J]. Computer and Modernization, 2023 (4) : 15-19, 25.
- [12] 杜婉茹,王潇茵,贾福凯,等.基于多层双向A*的未知环境路径规划算法研究[J].计算机应用与软件,2019,36(12):261-267.
DU W R, WANG X Y, JIA F K, et al. Research on path planning algorithm for unknown environments based on multilayer bidirectional A* [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(12): 261-267.
- [13] 高民东,张雅妮,朱凌云.应用于机器人路径规划的双向时效A*算法[J].计算机应用研究,2019,36(3):792-795,800.
GAO M D, ZHANG Y N, ZHU L Y. Bidirectional time-

effective A* algorithm applied to robot path planning[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(3): 792-795, 800.

- [14] RUAN X, HUANG Y, WANG Y, et al. An efficient trajectory-planning method with a reconfigurable model for any tractor-trailer vehicle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 9(2): 3360-3374.
- [15] BERGMAN K, LJUNGQVIST O, AXEHILL D. Improved path planning by tightly combining lattice-based path planning and optimal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 6(1): 57-66.
- [16] 胡丹丹, 尹鹏飞, 牛国臣, 等. 非结构化道路下离轴式拖挂车辆主动避障控制研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2318-2329.
HU D D, YIN P F, NIU G CH, et al. Research on active obstacle avoidance control for off-axis towed vehicles on unstructured roads [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2318-2329.
- [17] 王元民, 王亚飞, 秦文刚, 等. 基于 SMPA 的半挂车自动泊车运动规划方法研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(4): 691-702.
WANG Y M, WANG Y F, QIN W G, et al. Research on the motion planning method for semi-trailer automatic parking based on SMPA[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(4): 691-702.
- [18] 杨国, 吴晓, 肖如奇, 等. 改进 A* 算法的安全高效室内全局路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(7): 131-142.
YANG G, WU X, XIAO R Q, et al. Improved A* algorithm for secure and efficient indoor global path planning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(7): 131-142.
- [19] BERGMAN K, LJUNGQVIST O, AXEHILL D. Improved path planning by tightly combining lattice-based path planning and optimal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 6(1): 57-66.
- [20] 焦嵩鸣, 陈雨溪, 白健鹏. 改进 Hybrid A* 的拖挂式移动机器人路径规划算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 80-86.
JIAO S M, CHEN Y X, BAI J P. Improved hybrid A*

path planning algorithm for towed mobile robots [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(16): 80-86.

作者简介



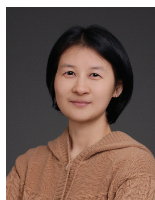
李钰, 2022 年于江苏大学获得学士学位, 现为江苏大学硕士研究生, 主要研究方向为轨迹规划以在智能车辆中的应用。
E-mail: liyu@stmail. ujs. edu. cn

Li Yu received her B. Sc. degree from Jiangsu University in 2022. Now she is a M. Sc. candidate in Jiangsu University. Her main research interests include trajectory planning and its application to intelligent vehicles.



孙金林 (通信作者), 2021 年于中国科学院自动化研究所获得博士学位, 现为江苏大学副教授, 主要研究方向为智能控制与无人农机。
E-mail: jsun@ujs. edu. cn

Sun Jinlin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2021. Now he is an associate professor at Jiangsu University. His main research interests include intelligent control and unmanned agricultural vehicles.



马莉, 2011 年于东南大学获得博士学位, 现为江苏大学副教授, 主要研究方向为随机控制系统与滑模控制理论。
E-mail: mali@ujs. edu. cn

Ma Li received her Ph. D. degree from Southeast University in 2011. Now she is an associate professor with Jiangsu University. Her main research interests include stochastic control system and sliding-mode control theory.



丁世宏, 2010 年于东南大学获得博士学位, 现为江苏大学教授, 主要研究方向为滑模控制与无人农机。
E-mail: dsh@ujs. edu. cn

Ding Shihong received his Ph. D. degree from Southeast University in 2010. Now he is a professor at Jiangsu University. His main research interests include sliding-mode control and unmanned agricultural vehicles.