

基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的多机协同全局路径规划

曹如月¹ 张振乾² 李世超¹ 张 漫¹ 李 寒² 李民赞¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现农田作业环境下的多机协同导航作业的远程调度管理,开展了基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的全局路径规划研究。阐述了农田作业环境下的多机协同路径规划,多机协同路径规划分为全局路径规划和局部动态避障;利用改进 A* 算法实现了全局路径寻优和拐角优化,并基于 Bezier 曲线对全局路径进行了平滑处理;根据随机生成的障碍物环境地图和涿州试验农场环境地图,利用 Matlab 平台分别对全局路径规划算法进行了仿真试验。仿真结果表明,通过调节改进 A* 算法中的权重 $w(n)$,搜索效率得到了明显提高,基于涿州试验农场的仿真试验中,优化后算法运行时间为 0.832 s;通过对全局路径进行拐角优化,在路径长度相近的情况下,有效降低了转弯次数;同样,利用 Bezier 曲线进行路径平滑后,拐角处的尖峰得到了优化,确保农机在实际农田作业中平稳行进,初步满足了实时性和平滑性需求,为实现农田作业环境下的多机协同路径规划提供了基础。

关键词: 多机协同; 全局路径规划; 改进 A* 算法; Bezier 曲线; 拐角优化; 路径平滑

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0548-07

Multi-machine Cooperation Global Path Planning Based on A-star Algorithm and Bezier Curve

CAO Ruyue¹ ZHANG Zhenqian² LI Shichao¹ ZHANG Man¹ LI Han² LI Minzan¹
(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the remote dispatching management of multi-machine cooperative navigation operation in complex farmland environment, the research of global path planning based on improved A-star algorithm and Bezier curve was carried out. Multi-machine cooperative operation path planning in farmland operation environment was introduced, which was divided into global path planning and local dynamic obstacle avoidance; The improved A-star algorithm was used to optimize the global path and corner optimization, and the global path was smoothed based on Bezier curve; According to the randomly generated obstacle environment map and Zhuozhou Experimental Farm environment map, the multi-machine cooperative global path planning algorithm was simulated by using Matlab platform. The simulation results showed that by adjusting the value of weight $w(n)$ in the improved A-star algorithm, the search efficiency was significantly improved, the running time of the optimized algorithm was 0.832 s in the simulation experiment based on Zhuozhou Experimental Farm. Through corner optimization, the number of turns was effectively reduced when the path length was similar. Similarly, after using Bezier curve to smooth the path, the peak at the corner was well optimized to ensure the smooth progress of agricultural machinery in the actual farmland operation, which preliminarily met the real-time and smooth requirements, and provided a basis for further solving the multi-machine cooperative path planning in the field environment.

Key words: multi-machine cooperation; global path planning; improved A-star algorithm; Bezier curve; corner optimization; path smoothing

收稿日期: 2021-07-05 修回日期: 2021-08-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1312300-2019YFB1312305)和中国农业大学建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金项目(2021AC006)
作者简介: 曹如月(1992—),女,博士生,主要从事多机协同导航技术研究,E-mail: 951132967@qq.com
通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

0 引言

农机自动驾驶技术是实施精细农业的关键技术之一,可以实现农机高效、精准作业^[1-2]。随着中国农业集约化、规模化、产业化发展,以及对自动驾驶作业需求的提高,“智慧农业”、“无人农场”等新型概念相继出现,多台同种或异种农机在田间协同导航作业模式已成为农机导航研究的重点^[3-5],其研究主要集中在机群定位技术和队形保持控制技术两方面^[6-8]。

多机协同作业路径规划是协同导航领域的关键问题之一,高效合理、安全可靠的路径规划可以提高整个系统的执行效率,同时降低执行代价^[9]。虽然国内外学者在多机协同路径规划方面已取得了较多成果,研究方法也在不断地创新,但是仍然有一定的局限性^[10-11]。大部分研究成果应用在多无人机协同^[12]、多机器人协同^[13-15]和自动驾驶汽车^[16-17]领域,结合实际农业应用场景的农机协同导航领域研究较少^[18-19]。另外,在实际农田作业中,路径规划是一个多约束条件下的优化问题^[20-21],除了保证路径代价尽可能小、安全无碰撞之外,还要符合农机运动学和动力学约束。因此在利用各种算法解决路径规划问题时,需要结合实际作业场景进行改进。

本文通过分析农田作业环境下的作业约束问题,根据涿州实验农场地图,利用改进 A* 算法进行全局路径寻优,并基于 Bezier 曲线对全局路径进行平滑处理,寻求一条平滑且无碰撞的全局最优路径,为进一步解决区域农田复杂作业环境下的多机协同作业路径规划提供支撑。

1 多机协同作业路径规划

多机协同作业路径规划需要在多台农机和多个作业地块间建立一种映射关系,在满足实际作业约束条件的前提下,以最小化调度成本和损失为目标,生成一条安全无碰撞的最优路线,使农机有序地为农田作业地块服务,建立一个路径短、效率高、安全可靠的调度模型^[22]。

多个农机在同一农田区域作业时,需要规划出多条最优路径,但在具体的作业过程中,由于农田作业环境中障碍物较多,并且农机之间也会相互影响,成为彼此的障碍物,因此,多机协同作业路径规划难度较大^[23],单一路径规划算法无法得到很好的规划效果,需要将多种方法进行改进和整合^[24-25],取长补短,从而实现最优路径规划。

农田作业环境具有复杂性和动态性,在多机协同作业过程中可能会存在动静态障碍物,为了解决

复杂农田作业环境下的多机协同作业路径规划,需要在全局路径规划的前提下,进行局部路径调整,不发生冲突时保证全局规划最优,冲突发生时进行局部规划,冲突解决后继续以全局最优行进^[26]。因此,本研究将多机协同作业路径规划分为 2 个环节:全局路径规划和局部动态避障,整体框架如图 1 所示。

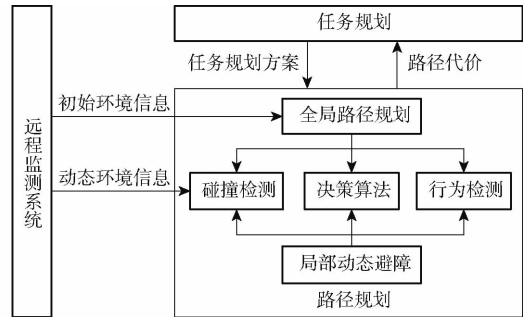


图 1 多机协同路径规划整体框架
Fig. 1 Overall framework of multi-machine cooperation path planning

在多机协同作业路径规划过程中,首先,根据初始环境信息建立环境地图模型,基于任务规划方案进行全局路径规划,规划出一条由农机当前位置到目标地块的最优或较优的全局路径;然后,在农机行进的过程中,利用车载传感器对周边环境信息进行实时检测,获取动态障碍物或其他农机信息;最后,根据动态环境信息进行碰撞检测并生成决策方案,实时调整全局路径,在调整过程中,始终以任务地块为最终目标,避免出现局部极值点而忽略整体作业规划,同时,对农机行为进行检测,引导农机安全行进到指定位置,从而使自身具有更强的环境适应能力。

2 基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的全局路径规划

2.1 基于改进 A* 算法的路径寻优

A* 算法^[27-28]是建立在 Dijkstra 算法和 BFS 算法基础上的一种启发式搜索算法,在静态环境中可以求解出最短路径。A* 算法是在状态空间中的搜索算法,首先对每一个搜索的位置进行评估,得到最好的位置,再从这个位置进行搜索,直到目标,这样可以省略大量无价值的搜索路径,提高了效率。

在启发式搜索中,对位置的估价很重要,采用不同的估价可以有不同的效果,估价函数为

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{1}$$

式中 $f(n)$ ——从初始节点经由节点 n 到目标节点的估计代价

$g(n)$ ——从初始节点到节点 n 的实际代价

$h(n)$ ——从节点 n 到目标节点最佳路径的估计代价

估价函数的确定与实际情况密切相关,会直接影响 A^* 算法的结果,为了保证找到最短路径,关键在于估价函数 $f(n)$ 的选取^[29]。

考虑到 A^* 算法估价函数的特性,本研究采用改进 A^* 算法进行全局路径规划,改进 A^* 算法估价函数为

$$f(n) = g(n) + w(n)h(n)$$

(2)

式中 $w(n)$ ——估计代价 $h(n)$ 的权重

改进 A^* 算法增加了权重 $w(n)$, $w(n)$ 可以影响评估值。通过设定 $w(n)$ 可以改变路径搜索过程中 $h(n)$ 对 A^* 算法的影响, $w(n)$ 越大,越趋近于 BFS 算法, $w(n)$ 越小,则趋近于 Dijkstra 算法。

如图 2 所示,基于改进 A^* 算法的全局路径规划具体实现步骤如下:①参数初始化。②根据初始环境信息建立农田栅格地图。③将农机起始位置加入 OpenList 中,循环迭代,找出农机起始点到目标作业地块的最优路径。④拓展子节点:如果需拓展的节点处有障碍物,则忽略该点;如果需拓展的节点不在 OpenList 中,则将其加入 OpenList;如果需拓展的节点已经存在于 OpenList 矩阵或 CloseList 矩阵中,判断当前拓展的节点的路径代价是否更小,若成立,则用当前更小代价替代之前的代价,选取距离起始点和目标点的代价和最小的待选点进行拓展,以该待选点作为下一次拓展的父节点,将其放到 CloseList 中,并从 OpenList 中删除。每次拓展,把拓展得到的符合要求的点放到 OpenList 中作为待选点,不断迭代循环,直到没有可拓展的点或找到目标作业点。⑤路径回溯:找到目标作业地块之后,寻找其父节点,不断地回溯,直到起始位置点,找到的所有父节点也就包含了规划的农机从起始位置到达目标地块的路径信息。

2.2 拐角优化

利用改进 A^* 算法规划的路线只是数学上的最优路径,而对于实际作业来说,最终目标是为了得到农机的最优行进路线,过多的转弯没有必要,所以需要对路线拐角做进一步优化,在保证不增加路径代价的基础上尽量减少转弯次数。

利用改进 A^* 算法拓展子节点时,拐角优化的思路如下:

(1)在计算下一个期望拓展子节点的索引值之前,先判断原本需拓展的子节点的索引值是否等于农机起始位置点的索引值,若相等,说明该子节点是由起始位置点拓展得来,朝任何方向拓展都是直线,则跳过优化,否则进入下一步。

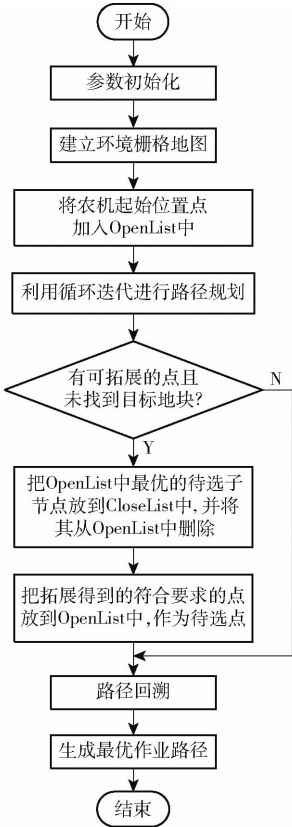


图 2 基于改进 A^* 算法的全局路径优化流程图

Fig. 2 Global path optimization flow chart based on improved A-star algorithm

(2)根据父节点的索引值,可以查看父节点位置信息,基于此计算期望拓展子节点的索引值。例如,父节点的位置信息是 R ,说明该父节点是由右边的节点拓展得来,如果想拓展直线,则期望拓展子节点就是父节点左边的节点。

(3)如果原本需拓展的子节点就是期望拓展直线的点,则跳过优化;如果期望拓展子节点在 OpenList 中,对比期望拓展子节点与原本需拓展的子节点的路径总代价,若相等,则进行拐角优化;如果期望拓展子节点比原本需拓展子节点的路径总代价大,则跳过优化;如果期望拓展子节点不在 OpenList 中,说明该点是障碍物或者超出边界,则跳过优化。

2.3 基于 Bezier 曲线的路径平滑

Bezier 曲线^[30-31]是应用于二维图形应用程序的数学曲线。Bezier 曲线的特点在于其“皮筋效应”,通过调整控制点,Bezier 曲线的形状会发生变化。

在实际农田作业中,路径规划需符合农机运动学和动力学约束。因此,所规划的路径应满足平滑性的要求,尽量保证规划的路径与实际作业路线相同^[32]。

由于 A^* 算法采用栅格法表示环境地图,因此

会在转弯处产生尖峰,为了使农机平稳前进,同时减少在路径尖峰处不必要的能量损耗,在完成路径规划之后需要对全局路线进行平滑处理。

基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的全局路径规划流程如图 3 所示。首先,根据实际作业场景建立环境栅格地图,然后,利用改进 A* 算法规划出从农机起始位置到目标地块位置的全局最优路径,并进行拐角优化,最后以全局路径坐标点作为控制点,生成具有行驶曲率、避障安全距离的 Bezier 曲线,从而得到一条连续无障碍的全局作业路径。

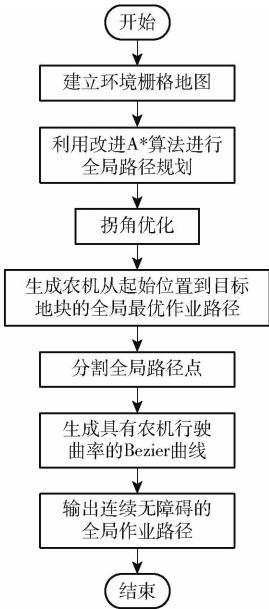


图 3 基于 Bezier 曲线的全局路径平滑流程图

Fig. 3 Global path smoothing flow chart based on Bezier curve

3 算法仿真与数据分析

3.1 随机障碍物环境地图仿真试验

基于以上算法思想,采用 Matlab 对基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的全局路径规划开展了仿真试验。

首先,根据随机生成的障碍物环境地图进行了路径规划仿真,栅格地图尺寸为 30×30 ,障碍物占总方格数的比例为 30%,基于障碍物环境地图随机设置路径起始点和目标点,在路径搜索过程中,为拓展的子节点着色。当估计代价 $h(n)$ 的权重 $w(n)$ 取不同值时,基于改进 A* 算法的路径规划结果如图 4 所示,其中,黑色方格表示障碍物,绿色圆圈表示起始位置,黄色方块表示目标位置,黑色实线表示生成的全局路径。

当 $w(n)$ 取不同值时,基于改进 A* 算法规划的路径长度和运行时间分别如表 1 所示,相对于传统 A* 算法 $w(n) = 1$ 的情况,在 $w(n) = 0.5$ 时,虽然路径长度均为 51,但运行时间却明显增加;而在 $w(n) = 4$ 时,算法搜索效率明显加快,运行时间为 1.213 s,但与此同时,随着拓展子节点的减少,获得的路径并不是最短路径,所以在实际应用时,需要根据具体情况灵活地调节 $w(n)$ 。

建立 20×20 的栅格地图,障碍物占总方格数的比例为 20%,根据试验验证结果,权重 $w(n)$ 设为 3,拐角优化前后和路径平滑仿真结果如图 5 所示,图 5c 中的红色实线为路径平滑后的路径,可以看

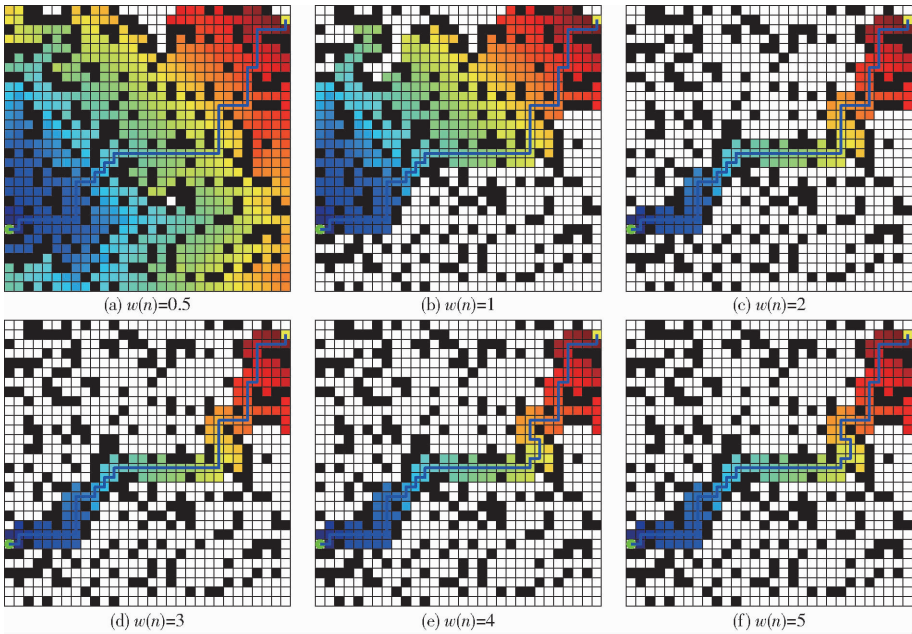


图 4 基于改进 A* 算法的路径规划仿真结果

Fig. 4 Path planning simulation results based on improved A-star algorithm

表 1 当 $w(n)$ 取不同值时的路径长度和运行时间

Tab.1 Path length and running time when $w(n)$ took different values

序号	$w(n)$	路径长度	运行时间/s	序号	$w(n)$	路径长度	运行时间/s
1	0.5	51	7.694	4	3	51	1.238
2	1	51	3.776	5	4	53	1.213
3	2	51	1.671	6	5	53	1.384

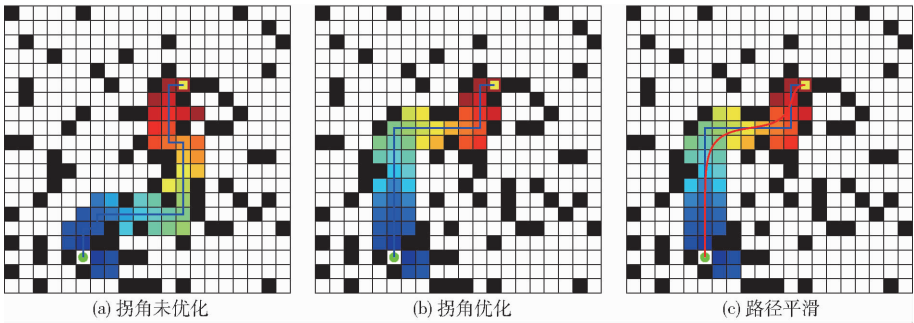


图 5 拐角优化和路径平滑仿真结果

Fig.5 Corner optimization and path smoothing simulation results

出,在拐角优化和路径平滑之前,基于改进 A* 算法生成的全局路径有很多不必要的转弯以及拐角尖峰。

拐角优化前后的路径长度、运行时间和拐角数量分别如表 2 所示,从表 2 可以看出,对全局路径进行拐角优化后,在路径长度和运行时间相近的情况下,拐角数量从 7 个减少到 3 个,有效降低了转弯次数;利用 Bezier 曲线进行路径平滑后,拐角处的尖峰得到了很好的优化,确保了路径平滑性,以满足实际需求。

表 2 拐角优化前后的路径长度、运行时间和拐角数量
Tab.2 Path length, running time and number of corners before and after corner optimization

类别	路径长度	运行时间/s	拐角数量/个
拐角未优化	21	0.813	7
拐角优化	19	0.806	3

3.2 涿州试验农场环境地图仿真试验

基于中国农业大学涿州试验农场环境地图开展了全局路径规划仿真试验验证,根据涿州试验农场实际道路分布情况,为每个地块设置作业入口,作为该地块的任务坐标,各地块作为障碍物存在,不可随意穿行。

建立涿州试验农场 150 × 150 栅格地图,权重 $w(n)$ 取为 3,基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线规划一条由农机当前位置到目标地块的最优或较优的全局路径,仿真试验结果如图 6 所示,其中,黑色方格表示不可穿行的地块,绿色方格表示可通行的道路,蓝色实线和红色实线分别表示优化前后的全局路径。

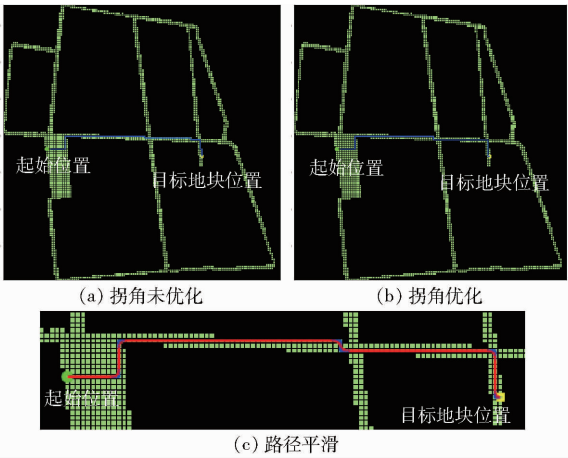


图 6 涿州试验农场环境地图仿真结果

Fig.6 Simulation results of Zhuozhou Experimental Farm environment map

全局路径拐角优化前后的路径长度、运行时间和拐角数量分别如表 3 所示,对全局路径进行拐角优化后,在路径长度不变、运行时间相近的情况下,拐角数量从 9 个减少到 6 个,有效降低了转弯次数;同样,利用 Bezier 曲线进行路径平滑后,拐角处的尖峰得到了优化,确保农机平稳行进;同时,优化后的运行时间为 0.832 s,初步满足了农机作业的平滑性和实时性需求。

表 3 全局路径拐角优化前后的路径长度、运行时间和拐角数量
Tab.3 Path length, running time and number of corners before and after global path corner optimization

类别	路径长度	运行时间/s	拐角数量/个
拐角未优化	102	0.835	9
拐角优化	102	0.832	6

4 结论

(1) 综合考虑了路径代价、路径平滑和碰撞检测等因素, 分析了农田作业环境下的多机协同作业路径规划问题, 将路径规划分为全局路径规划与局部动态避障。

(2) 提出了基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的全局路径规划方案, 考虑了权重 $w(n)$ 对估计代价 $h(n)$ 的影响, 对生成的作业路径进行了拐角优化, 并利用 Bezier 曲线对其进行了路径平滑处

理。

(3) 根据随机生成的障碍物环境地图和涿州试验农场环境地图, 利用 Matlab 平台分别对全局路径规划算法进行了仿真。结果表明, 通过选择合适的权重 $w(n)$, 路径搜索效率得到了明显提高, 优化后运行时间为 0.832 s; 对全局路径进行拐角优化后, 在路径长度和运行时间相近的情况下, 有效降低了转弯次数; 利用 Bezier 曲线进行路径平滑后, 拐角处的尖峰得到优化, 确保了农机平稳行进, 初步满足了实时性和平滑性需求。

参 考 文 献

- [1] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44–54.
JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44–54. (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] LIDA M, KUDOU M, ONO K, et al. Automatic following control for agricultural vehicle[C]//6th International Workshop on Advanced Motion Control Proceedings, 2000: 158–162.
- [4] WANG H. Development of robot vehicles adaptable to changing ground conditions and their work management system[D]. Sapporo: Hokkaido University, 2019.
- [5] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34–39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 34–39. (in Chinese)
- [6] NOGUCHI N, WILL J, REID J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1–19.
- [7] ZHANG P, QIAO J F, ZHANG H Y. Path planning and tracking for agricultural master-slave robot system[C]//2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, 2010: 55–58.
- [8] LI S C, XU H Z, JI Y H, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 158: 335–344.
- [9] MUNOZ P, MD R M, BARRERO D F. Unified framework for path-planning and task-planning for autonomous robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 82: 1–14.
- [10] 夏清松. 复杂环境下多移动机器人协同路径规划[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
XIA Qingsong. Cooperative path planning for multiple mobile robots in complex environment[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 黄如林. 无人驾驶汽车动态障碍物避撞关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
HUANG Rulin. Research on key technologies of dynamic obstacle avoidance for autonomous vehicle[J]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [12] EUN Y, BANG H. Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(1): 338–343.
- [13] 许凯波, 鲁海燕, 黄洋, 等. 基于双层蚁群算法和动态环境的机器人路径规划方法[J]. 电子学报, 2019, 47(10): 2166–2176.
XU Kaibo, LU Haiyan, HUANG Yang, et al. Robot path planning based on double-layer ant colony optimization algorithm and dynamic environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(10): 2166–2176. (in Chinese)
- [14] TANG X R, ZHU Y K, JIANG X X. Improved A-star algorithm for robot path planning in static environment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1792(1): 012067.
- [15] YU H F, XIANG W. Application of A-star algorithm in robot for catering service based on laser radar navigation[C]//International Conference on Electronic and Information Technology (ICEIT 2017), 2017.
- [16] 王沙晶. 基于 Frenet 坐标系采样的自动驾驶轨迹规划算法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
WANG Shajing. Research of trajectory planning for autonomous driving based Frenet coordinate and sampling[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 张金炜, 王文扬, 郭蓬, 等. 基于蚁群四次贝塞尔曲线的无人车路径规划[J]. 现代电子技术, 2019, 42(13): 113–116.

- ZHANG Jinwei, WANG Wenyang, GUO Peng, et al. Unmanned vehicle path planning based on ant colony quartic Bezier curve [J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(13): 113 – 116. (in Chinese)
- [18] 贾会群, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于改进粒子群算法的路径规划[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 371 – 377.
JIA Huiqun, WEI Zhonghui, HE Xin, et al. Path planning based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 371 – 377. (in Chinese)
- [19] 宫金良, 王伟, 张彦斐, 等. 基于农田环境的农业机器人协同作业策略[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 11 – 19.
GONG Jinliang, WANG Wei, ZHANG Yanfei, et al. Cooperative working strategy for agricultural robot groups based on farmland environment [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 11 – 19. (in Chinese)
- [20] 付勇. 复杂环境下农业机器人路径规划方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
FU Yong. Research on path planning for agricultural robot in complex environment [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [21] 殷建军, 董文龙, 梁利华, 等. 复杂环境下农业机器人路径规划优化方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 17 – 22.
YIN Jianjun, DONG Wenlong, LIANG Lihua, et al. Optimization method of agricultural robot path planning in complex environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 17 – 22. (in Chinese)
- [22] CAO R Y, LI S C, JI Y H, et al. Task assignment of multiple agricultural machinery cooperation based on improved ant colony algorithm [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 105993.
- [23] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1 – 18.
ZHANG Man, JI Yuhua, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1 – 18. (in Chinese)
- [24] 赵珍. 基于改进蚁群算法的多机器人路径规划研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
ZHAO Zhen. Study on multi-robot path planning based on an improved ant colony algorithm [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [25] 郑延斌, 王林林, 席鹏雪, 等. 动态环境下改进蚁群算法的多 Agent 路径规划[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(6): 1078 – 1085.
ZHENG Yanbin, WANG Linlin, XI Pengxue, et al. An improved ant colony algorithm for multi-Agent path planning in dynamic environments [J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(6): 1078 – 1085. (in Chinese)
- [26] 张衡. 基于蚁群算法的多农业机器人路径规划研究[J]. 数字技术与应用, 2017(6): 147 – 149.
ZHANG Heng. Research on path planning of multi farm robot based on ant colony algorithm [J]. Digital Technology and Application, 2017(6): 147 – 149. (in Chinese)
- [27] 黄辰, 费继友, 刘洋, 等. 基于动态反馈 A* 蚁群算法的平滑路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 34 – 40, 102.
HUANG Chen, FEI Jiyu, LIU Yang, et al. Smooth path planning method based on dynamic feedback A* ant colony algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 34 – 40, 102. (in Chinese)
- [28] 常晨. 基于改进 A-star 算法的路径规划的研究及应用[D]. 南京: 南京大学, 2020.
CHANG Chen. Research and application on path planning based on improved A-star algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020. (in Chinese)
- [29] 赵辉, 郝梦雅, 王红君, 等. 基于改进 A* 算法与天牛须搜索算法的农业机器人路径规划方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 185 – 190.
ZHAO Hui, HAO Mengya, WANG Hongjun, et al. Research on path planning method of agricultural robot based on improved A* algorithm and beetle antennae search algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(31): 185 – 190. (in Chinese)
- [30] 郭江, 肖宇峰, 刘欣雨, 等. Bezier 曲线与 A* 算法融合的移动机器人路径规划[J]. 微型机与应用, 2017, 36(2): 52 – 55, 59.
GUO Jiang, XIAO Yufeng, LIU Xinyu, et al. Mobile robot path planning based on fusion of A* algorithm and Bezier curve [J]. Microcomputer & Its Applications, 2017, 36(2): 52 – 55, 59. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 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)