

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311272

物流机器人调度系统及其双向同步跳点搜索算法设计*

李艳生^{1,2}, 张静琦¹, 刘彦瑜¹, 张毅¹, 杨美美¹

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065; 2. 重庆重邮信科通信技术有限公司 重庆 400065)

摘要:针对物流机器人在物料配送中对路径规划的安全性、实时性与高效性要求逐步提升的问题,本文提出了一种物流机器人调度系统及其双向同步跳点搜索算法。首先,分析物流机器人调度系统的功能需求并设计总体实现方案。其次,采用正六边形栅格地图取代传统栅格地图,并在此基础上提出改进的双向同步跳点搜索算法(JPS)。该算法调整了传统JPS算法的节点拓展规则以适应新地图,并引入灰狼优化算法指导扩展的相对方向,确保两侧搜索能够相遇。通过仿真测试对比所提算法与传统算法,所提算法比正四边形栅格图传统JPS算法快34%,比正六边形栅格图传统JPS算法快23%,结果表明所提算法的规划效率与安全性更高。此外,实物实验显示本文提出的双向同步JPS算法相较对比方法路径长度更优,在调度系统监控下物流机器人行走更加安全。

关键词: 路径规划; 物流机器人; 调度系统; JPS算法; 灰狼优化算法

中图分类号: TH692.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

Logistics robot scheduling system and the design of bidirectional synchronous jump point search algorithm

Li Yansheng^{1,2}, Zhang Jingqi¹, Liu Yanyu¹, Zhang Yi¹, Yang Meimei¹

(1. School of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing CYIT Communication Technologies Co., Ltd., Chongqing 400065, China)

Abstract: This article proposes a logistics robot scheduling system and its bidirectional synchronous skip point search algorithm to address the increasing demand for safety, real-time, and efficiency in path planning for logistics robots in material delivery. Firstly, the functional requirement of the logistics robot scheduling system are analyzed and the overall implementation scheme is designed. Secondly, the ortho-hexagonal raster map is used to replace the traditional raster map, and on the basis of which an improved bidirectional simultaneous jump point search (JPS) algorithm is proposed. This algorithm adjusts the node expansion rules of the traditional JPS algorithm to adapt the new map, and introduces the grey wolf optimization algorithm to guide the relative direction of expansion, ensuring that both sides of the search can meet. By comparing the proposed algorithm with the traditional algorithm through simulation tests, the proposed algorithm is 34% faster than the unidirectional JPS algorithm for orthogonal quadrilateral raster graphs and 23% faster than the unidirectional JPS algorithm for orthogonal hexagonal raster graphs. The results show that the proposed algorithm is more efficient and secure in planning. In addition, the physical experiments conducted show that the proposed two-way synchronous JPS algorithm has a better path length compared to the comparison method, and the logistic robots are safer to walk under the supervision of the scheduling system.

Keywords: path planning; logistics robot; scheduling system; JPS algorithm; grey wolf optimizer

收稿日期: 2023-04-06 Received Date: 2023-04-06

* 基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX0340)、博士后国际培养交流计划项目(2021JLPY006)资助

0 引言

随着物流自动化需求的增加,机器人在物流行业得到广泛应用。特别是电商和快递业的兴盛推动了物流机器人的蓬勃发展。机器人从传统的码垛、拆垛、搬运工作逐渐延伸到仓储、分拣、配送等环节。物流机器人调度系统是一个能够对多个物流机器人进行中央监管、控制和调度的系统^[1]。它主要应用于机器人数量较多、运输路线复杂且频繁的场景,是制造环节的一部分^[2]。该系统的功能包括任务调度、路径规划、交通管制、设备对接以及与企业资源计划(enterprise resource planning administration, ERP)或制造执行系统(manufacturing execution system, MES)对接,此外这些功能可以应用数字孪生技术^[3]。数字孪生技术是实现信息物理融合的有效手段^[4],其在产品设计阶段和制造阶段有不同的应用形式^[5]。在设计阶段,它可以进行反复优化、虚拟评估、发现不良因素及提供高保真度和多学科融合的模式。在制造阶段,数字孪生技术可用于实时监控、生产控制和计划等环节,以高效、动态、智能的方式提高加工质量和降低生产成本。数字孪生技术在车间监控与调度方面也发挥着重要作用,通过三维建模技术搭建的车间监控系统实现了生产的可视化^[6]。进一步,基于虚拟引擎实现的车间三维可视化生产过程则方便了车间生产的运维和管控^[7]。

路径规划作为物流机器人调度系统的主要功能之一,其是物流机器人能否自主导航以及整个系统调度效率的重要影响因素^[8]。在物流机器人调度系统中,路径规划算法根据调度任务需求,计算最佳路径以达到目标位置。常用的传统非智能的路径规划算法包括 Dijkstra 算法^[9]、A* 算法^[10]、Theta* 算法^[11]、人工势场法^[12]、快速拓展随机树(rapidly-exploring random trees, RRT)算法^[13]和跳点搜索算法(jump point search, JPS)^[14]等。此外,智能优化算法如遗传算法^[15]、蚁群算法^[16]、灰狼算法^[17]和神经网络^[18]也常用于路径规划中。

JPS 算法是 Harabor 等^[14]于 2011 年提出的图搜索路径规划算法。该算法提出了强迫邻居和跳点搜索的概念,相比 A* 算法优化了节点查找数量和算法迭代次数,将规划效率提高了近 10 倍。然而,JPS 算法仍存在一些可以优化的问题:1)节点合并功能无法有效处理所有节点,导致搜索结果中仍存在冗余节点影响路径质量;2)对于动态变化的环境,每次地图改变都需要重新检索跳点,产生大量无用跳点,影响算法效率;3)传统的 JPS 算法基于正方形栅格地图进行搜索,得到的路径可能穿过墙角,存在碰撞风险。针对这些问题,有学者们进行了相关研究和改进,Luo 等^[19]通过引入角传播(angle-propagation

Theta*, AP Theta*)算法的思想^[20]来改进原始的 JPS 算法,进一步优化路径节点,提升路径质量。秦齐等^[21]采用双向动态跳点搜索的方式减小 JPS 算法受地图动态变化的影响程度。王文明等^[22]提出了一种改进算法,其放弃了传统的正方形栅格地图,改用正六边形栅格地图^[23]实现路径规划,避免了碰撞墙角的危险。尽管以上方法对 JPS 算法的对应问题进行了改进,但没有一种算法能全面改进这 3 种不足。因此本文着眼于以上 3 个方面不足对 JPS 算法的搜索效率与安全性问题进行改进。

受灰狼群体的捕食行为启发,Mirjalili 等^[24]于 2014 年提出灰狼优化算法。该算法通过模拟灰狼群体的狩猎行为及社会等级制度实现优化目标。灰狼优化算法具有结构简单、待调参数少、易实现等特点并在收敛速度和解决准确性等方面具有出色的性能^[25]。龙文等^[26]对种群初始化进行改进,使生成的初始种群个体分布均匀,从而保证种群的多样性。Saremi 等^[27]改进了原始灰狼算法的搜索机制,引入进化种群动态算子以促进探索并解决局部最优问题。Mittal 等^[28]对灰狼算法中的收敛因子进行了改进,增加了非线性变化,使算法全局探索和局部开发能力得到平衡。

本文旨在解决物流机器人物料配送问题,设计了机器人调度系统,重点解决了其路径规划的效率和安全性问题。本文的主要贡献包括:1)针对物流配送环境,在分析物流机器人调度需求的基础上,设计了适用于物流机器人的调度系统方案;2)针对 JPS 算法在正方形栅格地图应用中存在的冗余节点、无用跳点和碰撞风险问题,首先采用正六边形栅格地图替代原有的正方形栅格地图并对原始 JPS 算法进行适配与改进,然后在此基础上引入灰狼优化算法,实现了高效双向同步搜索策略。通过这些改进措施,提高了机器人移动的安全性,并减少了地图动态变化对算法的影响,从而提高了物流机器人调度系统的整体效率。

1 调度系统方案分析

本文研究的物流机器人调度系统主要用于物料配送环节,此类调度系统已在生产、仓储、分拣等较多场景^[29-32]中应用。其中针对物料配送环节,马洪泽等^[29]将物流机器人调度系统成功应用于化纤绵纶生产流程,实现了高效准确的原材料到成品的调度配送过程。徐玲等^[30]将物流机器人调度系统应用于口服液灭菌生产流程,优化了制药企业的灭菌物流线调度系统,提高了生产线的效率。尽管这些物流机器人调度系统的使用场景各不相同,但它们都具备一些通用的业务流程,如发起调度、监控运行和调度规划。本文的研究也主要围绕这些任务展开。

首先,发起调度由用户或第三方系统产生,包含移动机器人任务执行所需的起点工位、终点工位、物料需求等信息;其次,监控运行任务提供三维可视化界面,能够直观显示地图信息、任务信息、机器人的当前位置、机器人的任务状态和机器人的路径信息;最后,调度规划由调度系统产生,根据之前发起的调度任务安排时间下发给机器人执行,并为其规划任务路线。在指定的工作场景下,根据系统所需要执行的任务,产生了如下需求:

1) 系统需要实时显示移动机器人的位置、任务状态等信息在三维可视化界面;

2) 系统需要根据调度算法合理分配调度任务,保证优先将任务分配给距离相近的移动机器人;

3) 系统可以利用路径规划算法获取移动机器人任务路径,并通过场景实时分析确定最优路径;

4) 移动机器人的移动指令均由系统调度操作模块发出,指令均由调度算法和路径规划算法计算得出。

根据上述任务与需求分析,可得本系统功能具体如下:

1) 任务管理功能,主要完成在任务接受阶段接收到相关请求的处理操作,将请求转变为任务清单保存,并根据调度与规划服务和用户操作销毁已完成的任务或取消任务;

2) 运行监控功能,主要返回移动机器人的实时状态、当前任务的执行情况,并且可以在三维的数字孪生监控界面点击移动机器人查看相关信息;

3) 调度与规划服务,作为系统核心功能包含了任务分配、路径规划等子功能。任务分配将按照调度算法把任务清单中的任务分配给各个移动机器人,路径规划将按照路径规划算法生成各个任务的最优路径。

任务执行过程中,影响调度任务性能的客观影响因素是任务总量、路径规划线路的节点数及物流机器人数量,主观因素是算法本身的合理性^[33]。因此,调度与规划服务作为系统的核心功能,其路径规划算法不合理或效率低下将会导致客观影响因素中路径规划线路的节点数增多,直接降低调度系统的总体效率。则围绕路径规划算法的质量与效率的提升具有重要意义。就此,针对本系统的应用场景及功能,本文对路径规划功能模块进行着重改进。

2 双向同步 JPS 算法设计

2.1 正六边形栅格地图

如图 1 所示,原始的 JPS 路径规划算法通常使用直角坐标系建立正方形栅格地图,其可通行状态用 0 或 1 表示,0 代表可通行(白色栅格),1 代表不可通行(黑色栅格)。每个栅格对应的节点由该栅格中心的坐标表示,非边界栅格有 8 个相邻节点。则移动机器人从当前节点

到相邻节点,有 8 个可能的移动方向。水平和垂直移动的代价为 1 单位长度,对角线移动的代价为 $\sqrt{2}$ 单位长度,如图 2 所示。

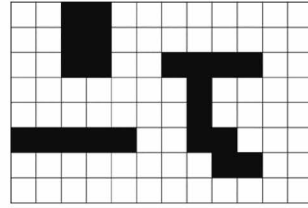


图 1 传统栅格地图

Fig. 1 Traditional grid map

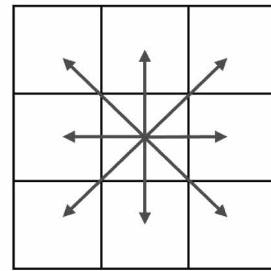


图 2 物流机器人的移动方向

Fig. 2 Moving direction of the logistics mobile robot

如图 3 所示,物流机器人在此类地图中存在穿越墙角的风险行为,极有可能发生碰撞。

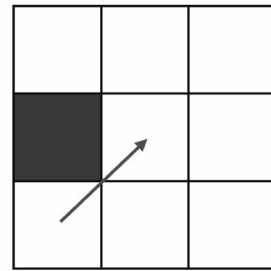


图 3 物流机器人移动越过墙角示意图

Fig. 3 Logistics mobile robot moving over a corner

建立正六边形栅格地图,可以基于一个平面直角坐标系,用相同内接圆半径 r 的正六边形将其铺满,并采用传统正方形栅格法标识方式,如图 4 所示。

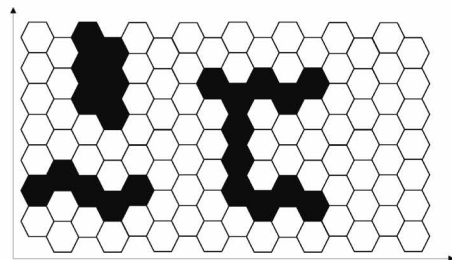


图 4 正六边形栅格地图

Fig. 4 Hexagonal grid map

在正六边形栅格中,物流机器人的移动方向减少至6个,此举可减少对关键节点的邻居节点搜索数目,从而提升扩展效率。由于正六边形的内接圆半径为 r ,则沿各个方向上移动的代价均为 $2r$,如图5所示。

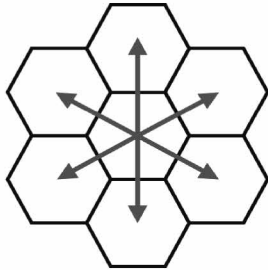


图5 物流机器人的移动方向

Fig. 5 Moving direction of the logistics mobile robot

通常,机器人穿墙和碰撞属于局部路径规划问题,但建图时会考虑安全性问题首先对障碍物进行膨胀处理。因此在栅格地图中,障碍物的外形已与实际外形不同,只要路径规划过程中避免碰撞,就能确保在实际环境中也不会发生碰撞。如图6所示,与正方形栅格地图相比,使用六边形栅格地图能够保证所有路径段均在无障碍栅格内。因此,在实际运行环境中,机器人可以安全地穿过墙角而避免碰撞。

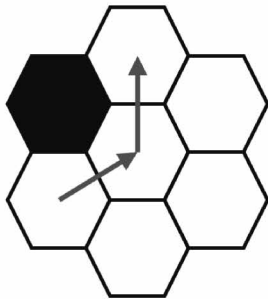


图6 在六边形栅格地图物流机器人移动越过墙角示意图

Fig. 6 Logistics mobile robot moving over a corner in a hexagonal grid map

JPS算法定义了强迫邻居与跳点,能将一些不必要的节点合并,帮助算法快速找到所需路径。如图7所示, p 为父节点, x 为当前节点。根据强迫邻居的定义:节点 x 的邻居中有障碍,且 x 的父节点 p 经过 x 到达 n 的距离代价比不经过 x 到达的 n 的任意路径的距离代价小,则称 n 是 x 的强迫邻居。而当前节点 x 满足以下3个条件之一为跳点:1)节点 x 是起点或终点;2)节点 x 至少有一个强迫邻居;3)如果父节点在斜方向上,节点 x 的水平或垂直方向上存在满足条件1)或2)的节点。但应用于正六边形栅格中,由于物流机器人的可移动方向减少为了6个,跳点搜索方向也会发生相应变化,因此需要改变强迫邻居和跳点的判断方法以适应正六边形栅格地图。

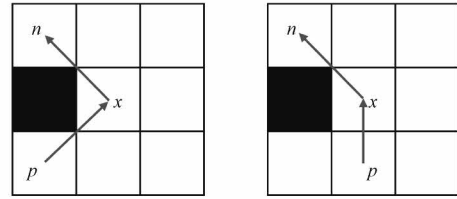


图7 正方形栅格中强迫邻居的判断

Fig. 7 Determination of forced neighbors in a square grid

图8所示为基于正六边形栅格地图建立的轴坐标系 $O-xy$,坐标原点 O 在直角坐标系中的坐标为 (x_0, y_0) , Ox 和 Oy 正方向的夹角为 120° 。设坐标系中的正六边形内接圆半径为 r ,即相邻两正六边形中心距离为 $2r$,可定坐标轴单位长度 $l = 2r$,则该轴坐标系中的坐标 (x, y) 与直角坐标系中的坐标 (x', y') 转换关系为:

$$\begin{cases} x' = xl\cos30^\circ + x_0 \\ y' = yl - xl\sin30^\circ + y_0 \end{cases} \quad (1)$$

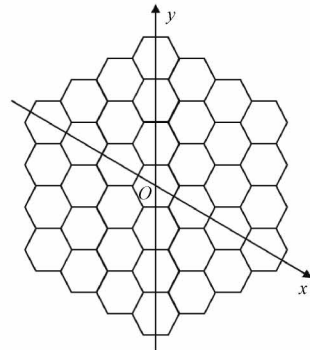


图8 轴坐标系

Fig. 8 Axis coordinate system

采用轴坐标系描述地图信息,可以将其直接保存为二维数组,有利于读写障碍物位置信息。相邻节点坐标关系如图9所示,各个节点的相邻节点的位置坐标关系固定,利于计算并提升效率。任意节点 $z = (x, y)$ 的相邻节点坐标集合 P 为:

$$P = \left\{ \begin{aligned} &(x, y + 1), (x + 1, y + 1), (x + 1, y), \\ &(x, y - 1), (x - 1, y - 1), (x - 1, y) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

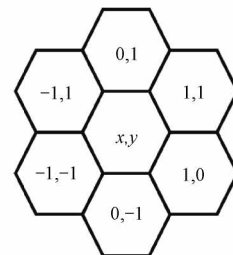


图9 相邻节点坐标关系

Fig. 9 Neighboring node coordinate relationships

2.2 基于轴坐标系的正六边形栅格地图的强制邻居与跳点

设有节点集合 $P = \{x_0, x_1, \dots, x_k\}$, x_n 和 x_{n+1} 是其中的节点,且 x_n 和 x_{n+1} ($0 \leq n \leq k$) 的轴坐标满足图 9 中的相邻节点坐标关系。搜索过程中,当前节点 x 有 i ($1 \leq i \leq 6$) 个相邻节点,用 n_i 对应表示,节点 p 为节点 x 的父节点, px 为当前的搜索方向,用 $P \setminus x$ 表示节点 x 不再集合 P 中, $length(P)$ 的值等于集合 P 中的节点元素个数。

1) 强迫邻居判断

由于在正六边形栅格地图中任意节点 x 的相邻节点相比于传统栅格地图要少,所以强迫邻居的定义需要发生变化。如图 10 所示,节点 x 的相邻节点中有一个被标记为障碍物,当前的搜索方向为 px ,要判断节点 n_i 为 x 的强迫邻居,需要节点 p 经由节点 x 到达节点 n_i 的最短路径比不经过节点 x 到达节点 n_i 的最短路径更。对于 x ,节点 n_2 有节点集 $\{p, x, n_2\}$ 的路径显然比节点集 $\{p, n_5, n_4, n_3, n_2\} \setminus x$ 的路径短,所以 n_2 为 x 的强迫邻居,又有 x 对于节点 n_3 的节点集 $\{p, x, n_3\}$ 的路径也小于节点集 $\{p, n_5, n_4, n_3\} \setminus x$ 的路径,但是 xn_3 的方向与搜索方向 px 一致,是可以合并的节点,因此,节点 n_3 不是 x 的强迫邻居。

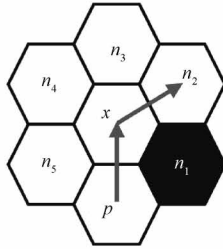


图 10 正六边形栅格地图中的强制邻居

Fig. 10 Forced neighbors in a hexagonal grid map

综上所述,基于轴坐标系的正六边形栅格地图的强制邻居的判断方法如下:

节点 x 的相邻节点中存在障碍栅格,对于节点 x 的非障碍相邻节点 n_i 及其不经过节点 x 的最短路径 $P_i \setminus x$ 若存在以下关系:

$$length(p, x, n_i) < length(p, \dots, n_i) \setminus x \quad (3)$$

$$px \neq xn_i \quad (4)$$

或只存在 $\{p, x, n_i\}$ 一条路径抵达节点 n_i 时,称节点 n_i 为节点 x 的强迫邻居。节点 x 是搜索方向 px 上的跳点。

2) 跳点检索

原始 JPS 算法基于以下条件判断跳点:(1)节点 x 是起点或终点;(2)节点 x 至少有一个强迫邻居;(3)如果父节点在斜方向上,节点 x 的水平或垂直方向上有满足条件(1)、(2)的点。

如图 11 所示,由于正六边形栅格地相比传统正四边形栅格缺少两个方向,若直接使用未修改的跳点判断方法,则会导致地图有区域没有被检索的问题。为此必须调整跳点的搜索方向。

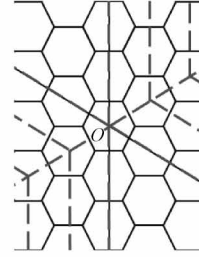


图 11 地图缺少部分搜索

Fig. 11 Missing part of the search on the map

原始 JPS 算法搜索时,会基于当前点先进行水平和垂直方向的搜索,直到搜索到跳点、障碍或边界,再进行斜向前进 1 格,继续搜索水平和垂直方向,直到斜方向上搜索障碍或边界时停止。如图 12 所示,针对正六边形栅格地图,将“斜方向”用向量确定 $(1, 1)$ 、 $(-1, 0)$ 和 $(0, -1)$ 3 个方向,称为主要方向;将“斜方向”左右相邻的两个方向作为“水平和垂直方向”,用向量表示为 $(1, 0)$ 、 $(0, 1)$ 和 $(-1, -1)$,称为次要方向,以此覆盖所有方向。

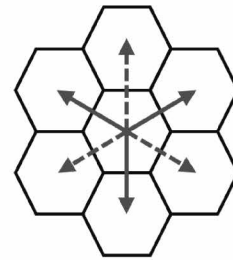


图 12 搜索方向

Fig. 12 Directions of search

基于此修改后的定义,则算法的跳点检索规则为:

(1)若节点 x 是起点或终点时定义 x 为跳点;

(2)检索当前节点 x 的两个次要方向上的点直到搜索到具有强迫邻居的跳点或终点、障碍或边界后跳出,若在次要方向上的其他节点分支出的其他方向上搜索到具有强迫邻居的跳点或终点时,也要定义 x 为跳点,将检索到的跳点加入优先级列表 *openlist*;

(3)沿节点 x 搜索的主要方向前进 1 步,若此栅格不是障碍物或地图外,判断当前节点是不是伴有强迫邻居的跳点或终点并重复步骤(2),反之则搜索完成。

2.3 灰狼优化算法改进的双向同步搜索

双向同步搜索通过分别以目标点和起始点为搜索的初始点,同步向各自搜索方向拓展跳点节点,直至检索到

同一节点或另一侧的 *closelist* 中的节点为止,最后合并结果得到路径。但进行双向搜索时存在两个方向生成的路径不存在相遇节点的情况,特别是在具有一定程度的对称性地图中更容易导致此类情况发生。而且在复杂障碍环境中,两侧检索相遇的位置也不一定在目标点与起始点连线附近的点上。

本文提出一种新的策略来选取跳点以解决上述问题。在双向同步搜索过程中的跳点选取过程中,引入灰狼优化算法以改进预估函数引导两侧搜索方向尽可能相遇。

1) 灰狼优化算法

灰狼优化算法根据适应度确定了3个最佳解决方案,第一是 α 狼,第二是 β 狼,第三是 γ 狼,所有其余的种群成员都被认为是 ω 狼。 α, β, γ 狼指导 ω 狼像猎物靠近。

原灰狼优化算法过程为:(1)初始创建一个随机灰狼种群;(2)根据设计的适应度函数计算灰狼个体适应度,保存适应度最高的前3个狼 α, β, γ ;(3)更新灰狼位置,收敛因子 a 和系数向量 A, C ;(4)计算当前所有灰狼的适应度,更新狼 α, β, γ ;(5)达到最大迭代次数前重复步骤(3)~(4);(6)输出适应度最高的个体。其中灰狼位置 $X(t)$ 和系数向量 A, C 通过列式(5)更新:

$$\begin{cases} D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \\ C = 2r_2 \\ X(t+1) = X(t) - A \cdot D \\ A = 2a \cdot r_1 - a \end{cases} \quad (5)$$

式中: D 表示个体间距离, r_1, r_2 的大小取 $[0, 1]$ 之间的随机数,收敛因子 a 随迭代次数从2线性减小。 α, β, γ 狼指导 ω 狼更新位置如式(6)所示。

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\gamma = |C_3 \cdot X_\gamma(t) - X(t)| \\ X_1(t+1) = X_\alpha(t) - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2(t+1) = X_\beta(t) - A_2 \cdot D_\beta \\ X_3(t+1) = X_\gamma(t) - A_3 \cdot D_\gamma \end{cases} \quad (6)$$

式中: $X_1(t+1), X_2(t+1), X_3(t+1)$ 为 ω 狼更新后的位置,则猎物位置如式(7)所示。

$$X(t+1) = \frac{X_1(t+1) + X_2(t+1) + X_3(t+1)}{3} \quad (7)$$

之后,根据设置的适应度函数计算当前更新位置后所有灰狼的适应度,将适应度前3的狼设为新的 α, β, γ 狼。

2) 适应度函数

为了使两侧搜索方向尽可能相遇,需要当前点检索得到的相邻跳点坐标与另一侧检索的当前点坐标之间的距离尽可能小。取 $X = (x, y)$ 为跳点坐标, $X' = (x', y')$

为对侧搜索的当前点坐标,可对预估函数做如式(8)的变化:

$$h'(X) = k \frac{h(X)}{\ln\left(\frac{1}{|XX'|} + 1\right)} = k \frac{h(x, y)}{\ln\left(\frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} + 1\right)} \quad (8)$$

为了保证两侧搜索相遇的同时,挑点搜索的主要方向不发生过大偏移故要对系数 k 进行控制,本文使用灰狼优化算法对每一步搜索时的系数 k 更新,为了使得系数 k 对控制主要搜索方向的 $h(X)$ 影响尽可能小,对引导两侧搜索相遇的 $|XX'|$ 影响尽可能大,设置系数 k 的适应度函数如式(9)所示。

$$f(k) = \frac{1-k}{\sum_{i=1}^n h(x_i, y_i)} + \ln\left(\frac{k}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i-x')^2 + (y_i-y')^2}} + 1\right) \quad (9)$$

式中: n 为当前步骤中两侧方向中当前点检索得到的相邻跳点个数, (x_i, y_i) 为相邻跳点对应坐标。

3)改进双向同步跳点搜索算法流程基于上述策略,在每一步更新预估函数后再计算代价函数,保证两侧路径相遇于一处。则基于正六边形栅格地图的双向同步跳点搜索算法的具体搜索过程如下:

(1)初始化搜索内容,载入栅格地图并读取起点和终点信息,分别为搜索的正、反两方向创建空队 $openlist$ 与 $closelist$,各自命名为 $op1, op2, cl1, cl2$;

(2)将起始节点和目标节点分别放入 $op1$ 和 $op2$ 中;

(3)使用灰狼优化算法更新两方向的预估函数,而后计算 $op1$ 和 $op2$ 列表中代价函数值最小的节点并存入对应的 $closelist$;

(4)根据强迫邻居和跳点规则从正、反两方向开始检索跳点,并将检索到的跳点加入对应的 $openlist$;

(5)对 $op1$ 或 $op2$ 内是否存在需要检索的节点以及两侧搜索是否相遇进行判断:若 $op1$ 和 $op2$ 为空且两侧未搜索未相遇则搜索失败;若 $op1$ 或 $op2$ 不为空且两侧搜索未相遇则返回步骤(3)继续搜索;若两侧搜索相遇,则表明找到通路,合并 $cl1$ 与 $cl2$ 即获得路径节点。

3 实验设计与验证

3.1 算法仿真实验

为了评估改进算法在不同物流应用环境中的安全性和搜索效率,本文进行了多组仿真对比实验。这些实验

考虑了各种复杂的障碍环境和不同尺寸的场景。仿真实验使用了 Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU 和 16 GB 的内存配置。

实验 1:针对一个大小为 40 m×40 m 的环境障碍地图,由于两种栅格形状的差异,当正四边形栅格地图的栅格规模为 40×40 时,正六边形栅格地图的栅格规模设置为 47×64(保证与正四边形栅格地图的单位距离一致)。则针对同样障碍物排列但不同形状的栅格地图,本实验分别测试对比了正四边形栅格图单向 JPS 算法、正四边形栅格图双

向 JPS 算法、正六边形栅格图单向 JPS 算法和正六边形栅格图改进双向同步 JPS 算法这 4 种算法的性能。

4 种算法在各自采用的栅格地图中分别进行路径规划。其中,4 种算法的起点和目标点的实际位置相同。仿真结果路径如图 13 所示,图中左下方标识点为起点,右上方标识点为目标点,路径途中标识点为双向同步算法的搜索相遇点,折线为结果路径。这 4 种算法的性能对比如表 1 所示,表中结果为各个算法运行 10 次的平均值,路径节点为算法生成的路径结果中包含的节点个数。

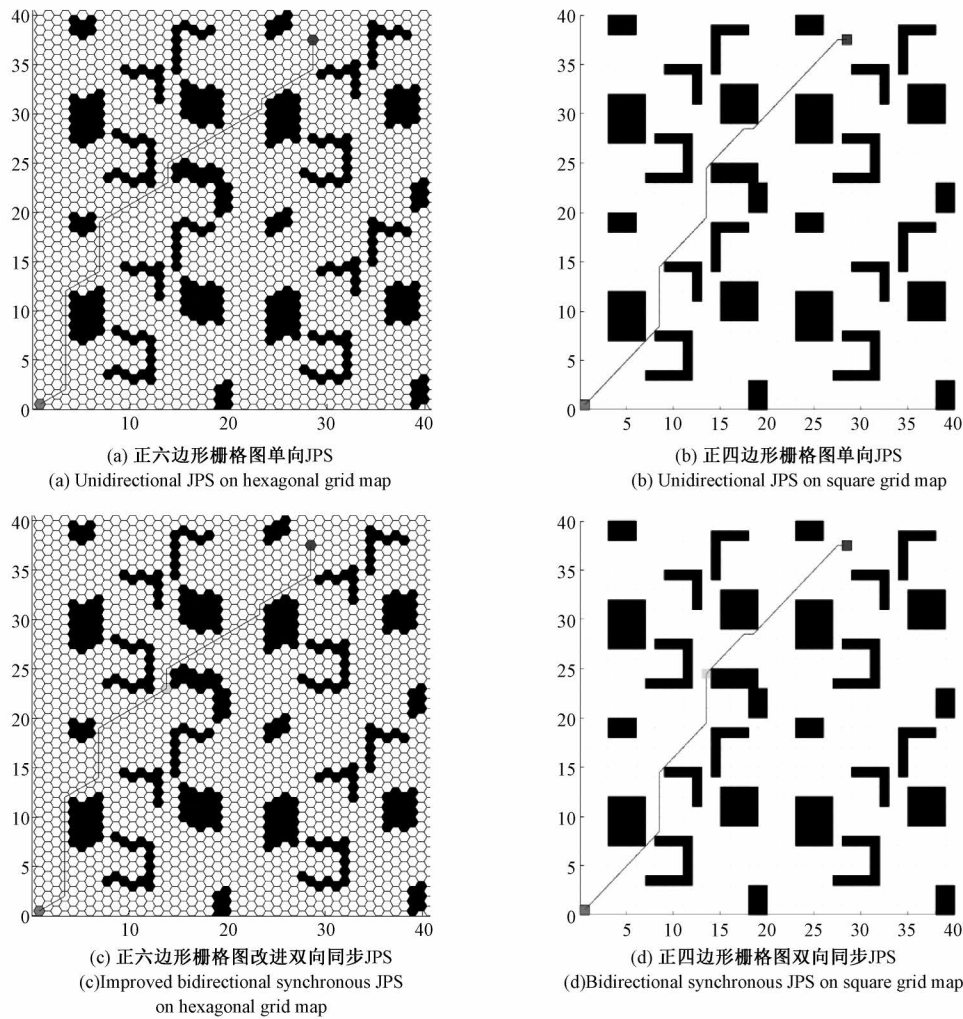


图 13 4 种算法的路径规划结果

Fig. 13 Path planning results of four algorithms

表 1 4 种算法仿真性能对比

Table 1 Performance comparison of four algorithms

算法名称	路径长度/m	穿越墙角次数	搜索时间/s	路径节点
正四边形栅格图单向 JPS	50.769 6	5	0.013 739 3	18
正四边形栅格图双向 JPS	50.769 6	5	0.011 154 7	18
正六边形栅格图单向 JPS	53	0	0.011 464 9	22
正六边形栅格图改进双向同步 JPS	53	0	0.009 048 7	22

由图 13(c) 可知,正六边形栅格图改进双向同步 JPS 算法能够得出可执行的路径。由表 1 可得,正六边形栅格的 JPS 算法的路径长度比四边形的要长 4.39%,路径节点数要多出 22.2%。但是在搜索时间这一项上,正六边形栅格图单向 JPS 算法比正四边形栅格图单向 JPS 算法快 16.55%,正六边形栅格图改进双向同步 JPS 算法比正四边形栅格图双向 JPS 算法快 18.88%,这是由于正六边形栅格节点的搜索方向相比于正四边形栅格节点减少了 2 个,使得六边形栅格地图的路径长度略微增长,但相应的,此举减少了节点的扩展数目,使得搜索效率获得较大提升。进一步,从搜索方式上来看,正六边形栅格图改进双向同步 JPS 算法比正六边形栅格图单向 JPS 算法快 26.70%,比正四边

形栅格图单向 JPS 算法快 34.14%,切实地提升了搜索效率。与此同时,由表 1 与图 13(b) 中可以看出,由正四边形栅格图单向 JPS 算法生成的路径中存在 5 处穿越墙角的风险行为,而对比的另外两种正六边形栅格图的 JPS 算法均规避了墙角障碍,使得路径更加安全。

实验 2:测试对比正六边形栅格地图单向 JPS 算法与正六边形栅格地图改进双向同步 JPS 算法分别针对 40×40 、 60×60 、 80×80 和 100×100 栅格规模的地图对相同起终点规划的算法效率变化。图 14(a)~(d) 所示为不同规模尺寸的正六边形栅格地图下改进算法搜索得到的从地图左下角起点到右上角终点的规划路径。搜索时间和节点数量结果如表 2 所示。

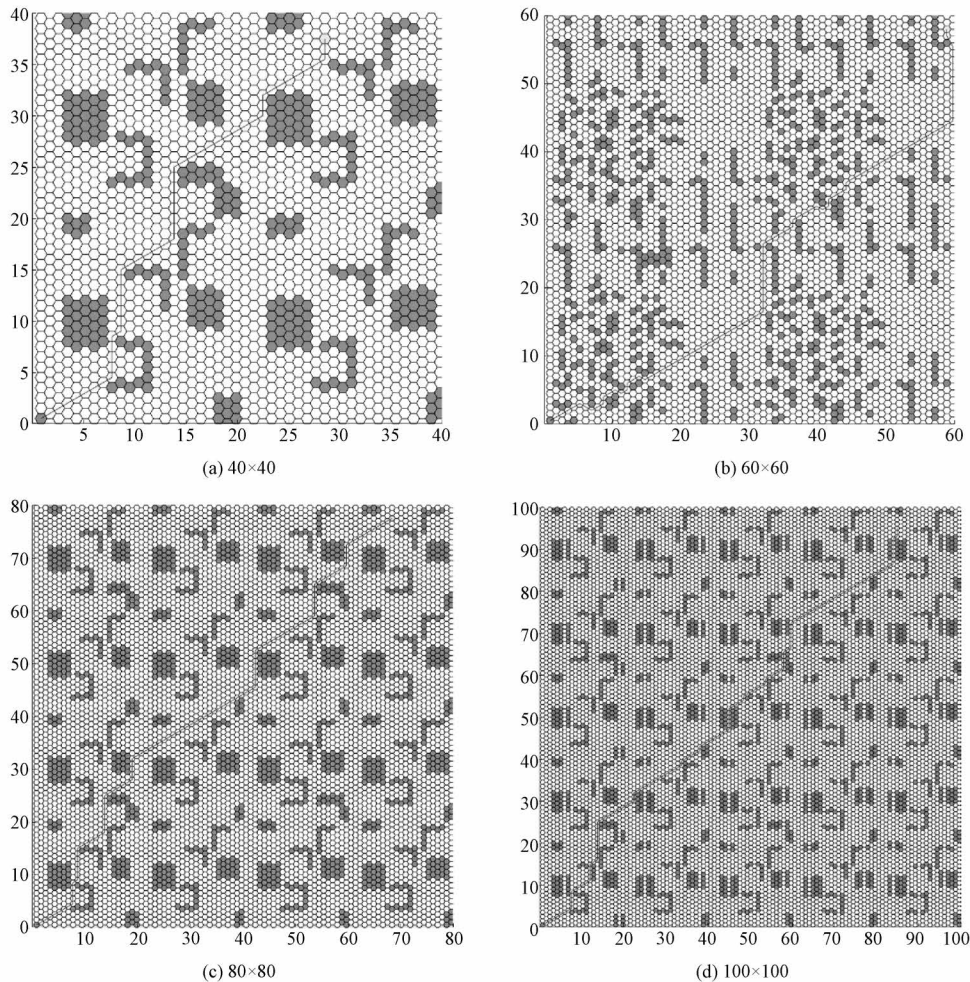


图 14 不同尺寸正六边形栅格地图下改进算法得到的路径

Fig. 14 Paths obtained by the improved algorithm for different sizes of hexagonal grid maps

结合图 14 对表 2 中的数据分析可以得,在不同地图尺寸下,改进双向同步 JPS 算法相比于单向 JPS 算法,搜索时间分别提升了 22.2%、25.7%、23.4% 和 21.1%。但随着地图逐渐变大,改进双向同步 JPS 算法

的搜索过程可能会导致存在更多的可合并节点而使得效率下降。

综上所述,正六边形栅格地图改进双向同步 JPS 算法在路径安全性和搜索时效性两个方面明显优于传统

表 2 不同规模尺寸正六边形栅格地图下的算法效率对比
Table 2 Comparison of algorithm efficiency on different size hexagonal grid maps

地图规模	搜索时间/s		路径节点	
	正六边形栅格单向 JPS	正六边形栅格改进双向同步 JPS	正六边形栅格单向 JPS	正六边形栅格改进双向同步 JPS
	40×40	0.008 750 8	0.006 808 1	20
60×60	0.014 405 9	0.010 704 4	56	56
80×80	0.028 693 8	0.021 966 9	49	50
100×100	0.045 667 8	0.036 026 8	81	82

JPS 算法。此外,在不同大小的正六边形栅格地图上,相比于正六边形栅格单向 JPS 算法,该改进算法平均减少了 23% 的运行时间。基于仿真实验的结果可得出,正六边形栅格地图改进的双向同步 JPS 算法的搜索性能明显优于传统 JPS 算法和正六边形栅格单向 JPS 算法。

3.2 系统样机实验

为了验证本文改进的正六边形栅格双向同步 JPS 算法在实际运行中的效果,将该算法应用于如图 15 所示的

环境中的移动机器人。由物流机器人调度系统将算法得到的全局路径结果发送给移动机器人,移动机器人的控制器会生成适配该路径的轨迹并进行移动。移动机器人采用 ROS 机器人控制系统,在测试系统上选取起终点,由正方形栅格单向 JPS 和正六边形栅格改进双向同步 JPS 分别进行规划,路径如图 16 所示,两种算法对比结果如表 3 所示。

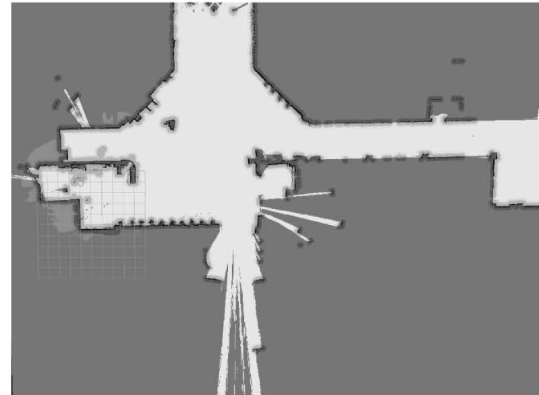


图 15 移动机器人实验环境

Fig. 15 Mobile robot experimental environment

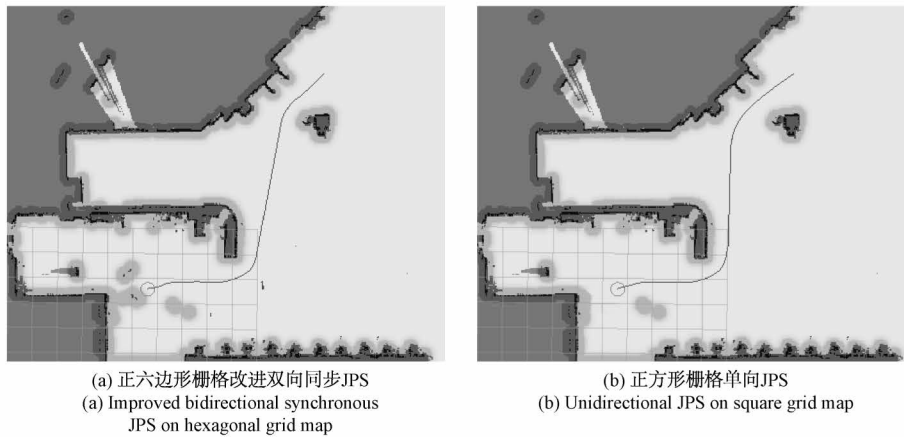


图 16 两种算法规划路径对比

Fig. 16 Comparison of the planning paths of the two algorithms

表 3 两种算法对比

Table 3 Comparison of two algorithms

算法名称	路径长度/m	穿越墙角次数	路径节点
正四边形栅格图单向 JPS	13.341 1	2	6
正六边形栅格图双向同步 JPS	12.780 8	0	8

由图 16 和表 3 可以看出,正四边形栅格图单向 JPS 相比于正六边形栅格图改进的双向同步 JPS 路径长度多出了 4.38%,同时正四边形栅格图单向 JPS 的路径存在

2 处穿越墙角的行为,而正六边形栅格图改进的双向同步 JPS 为 0 处。实验表明正六边形栅格图双向同步 JPS 的路径运行更快更安全。

为了验证设计的物流机器人调度系统下双向同步 JPS 算法的实际运行效果和路径规划能力,本文使用实验室团队自主研发的移动机器人,在学校某一教学楼大厅进行了系统运行测试。考虑到系统服务运行的稳定性和多平台可用性,本文基于 Java 语言环境的 SSM 框架实现物流机器人调度系统的搭建,通过 WebGL 三维渲染技术实现三维可视化状态监控,使用 Quartz 框架实现任务

管理功能,而调度与规划服务则会将路径规划算法的运行结果下发至物流机器人的控制系统。物流机器人将根据系统规划自行移动前往预定的位置,物流机器人实际运行与系统状态监控界面如图 17、18 所示。

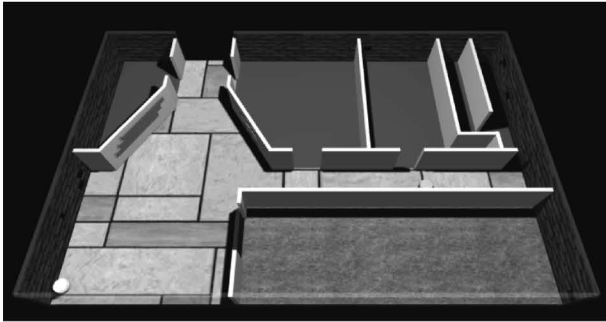


图 17 系统监控界面

Fig. 17 System monitoring screen



图 18 移动机器人实际运行过程

Fig. 18 Mobile robot actual operation process

通过实验结果可以看出,本文提出的基于正六边形栅格地图建模的双向同步跳点搜索算法在测试规划系统上表现良好,成功完成机器人的规划调度工作,实现了移动机器人在实际物流工作中的决策与规划。

4 结 论

本文首先分析了物流机器人调度系统的任务需求,对系统的功能方案进行了设计。之后,针对系统对路径规划算法的需求对跳点搜索算法进行改进设计,采用正六边形栅格绘制地图,调整改进传统 JPS 算法的强迫邻居和跳点检索的判断方法以适配正六边形栅格地图,避免了传统 JPS 算法中存在墙角碰撞的问题。本文提出的基于正六边形栅格建立轴坐标系地图的改进双向同步 JPS 算法,引入了灰狼优化算法改进并控制预估函数,引导两侧搜索方向相遇,保证算法的有效性。对该算法在各种环境地图中解决路径规划问题的性能与传统 JPS 算法及正六边形栅格单向 JPS 算法的性能作了仿真比较测试。

仿真实验的结果验证了该算法在执行上的有效性和

在性能上的优越性。仿真实验的结果中也显示出一个问题,即改进双向同步 JPS 算法得到的路径并不一定是最优路径。这一问题可能是由于在算法中双向搜索引导的偏移导致得到的路径长度与路径节点增加。后续研究可针对这一问题进行分析优化。

最后在物流机器人调度系统上的实验表明了正六边形栅格地图双向同步 JPS 算法能够在系统上安全快速地完成物流机器人规划调度工作。

本文提出的基于正六边形栅格地图的双向同步 JPS 算法可以应用于物流机器人和各类移动机器人解决在各种复杂环境下的路径规划问题。虽然本文的研究例子是一台机器人路径规划方法,但也验证了调度系统的基础功能,证明了提出的路径规划方法有效性。下一步将深入研究其对于多台机器人的可行性。

参考文献

- [1] 杨文华. 我国仓储物流机器人发展现状与未来趋势[J]. 物流技术与应用, 2017, 22(9): 100-102.
YANG W H. The current situation and future trends of warehouse logistics robot development in China [J]. Logistics & Material Handling, 2017, 22(9): 100-102.
- [2] 赵皎云. 物流移动机器人调度系统的不断迭代与创新[J]. 物流技术与应用, 2021, 26(12): 144-146.
ZHAO J Y. Continuous iteration and innovation of logistics mobile robot scheduling system [J]. Logistics Technology and Application, 2021, 26(12): 144-146.
- [3] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.
TAO F, MA X, HU T L, et al. Digital twin standard system [J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 25(10): 2405-2418.
- [4] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.
TAO F, ZHANG H, QI Q L, et al. Ten questions about digital twin: Analysis and reflection [J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 26(1): 1-17.
- [5] LIU M, FANG S, DONG H, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 346-361.
- [6] 姜康, 柯容, 赵小勇, 等. 数字化车间虚拟监控系统研究[J]. 航空制造技术, 2016(20): 97-100.
JIANG K, KE R, ZHAO X Y, et al. Study on virtual monitoring system for digital workshop [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(20): 97-100.
- [7] 梁兴明. 基于虚实融合的车间实时生产监控系统的设计与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

- LIANG X M. The design and implementation of realtime production monitoring system based on virtual-real fusion[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2017.
- [8] 林韩熙, 向丹, 欧阳剑, 等. 移动机器人路径规划算法的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(18):38-48.
- LIN H X, XIANG D, OUYANG J, et al. Review of path planning algorithms for mobile robots [J]. Computer Engineering and Applications, 2021,57(18):38-48.
- [9] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numer. Math., 1959,1(1):269-271.
- [10] 汪四新, 谭功全, 蒋沁, 等. 基于改进A*算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机仿真, 2021, 38(9):386-389.
- WANG S X, TAN G Q, JIANG Q, et al. Path planning for mobile robot based on improved A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2021,38(9):386-389.
- [11] FIRMANSYAH E R, MASRUOH S U, FAHRIANTO F. Comparative analysis of a and basic theta algorithm in android-based pathfinding games [C]. IEEE, 2016:275-280.
- [12] 梁献霞, 刘朝英, 宋雪玲, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4):291-294.
- LIANG X X, LIU CH Y, SONG X L, et al. Research on improved artificial potential field approach in local path planning for mobile robot [J]. Computer Simulation, 2018,35(4):291-294.
- [13] 彭君, 庞宗强, 陆昂. 改进RRT算法在机器人路径规划中的应用[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(18):37-41.
- PENG J, PANG Z Q, LU ANG. Application of improved RRT algorithm in robot path planning [J]. China Computer & Communication, 2021,33(18):37-41.
- [14] HARABOR D, GRASTIEN A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps [C]. Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2011,25(1):1114-1119.
- [15] 徐力, 刘云华, 王启富. 自适应遗传算法在机器人路径规划的应用[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(18):36-41.
- XU L, LIU Y H, WANG Q F. Application of adaptive genetic algorithm in robot path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2020,56(18):36-41.
- [16] 朱永强, 孙宗涛. 改进蚁群算法在物流机器人路径规划中的应用[J]. 科学技术与工程, 2020,20(30):12467-12471.
- ZHU Y Q, SUN Z T. Application of improved ant colony algorithm in logistics robot path planning [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (30): 12467-12471.
- [17] NADIMI-SHAHRAKI M H, TAGHIAN S, MIRJALILI S. An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 166:113917.
- [18] 陈麒瑞, 杜少华, 赵腾飞, 等. 基于人工神经网络的机器人路径规划研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(3):227-229.
- CHEN Q R, DU SH H, ZHAO T F, et al. Research on robot path planning based on artificial neural network[J]. Computer Knowledge and Technology, 2020,16(3):227-229.
- [19] LUO Y, LU J, QIN Q, et al. Improved JPS path optimization for mobile robots based on angle-propagation Theta* algorithm[J]. Algorithms, 2022,15(6):198.
- [20] DANIEL K, NASH A, KOENIG S, et al. Theta*: Any-angle path planning on grids [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2010,39:533-579.
- [21] 秦齐, 万熠, 侯嘉瑞, 等. 基于双向动态跳点搜索算法的AGV路径规划研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021,21(8):55-58.
- QIN Q, WAN Y, HOU J R, et al. AGV path planning based on bidirectional dynamic jumping search algorithm[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2021,21(8):55-58.
- [22] 王文明, 杜佳璐. 基于正六边形栅格JPS算法的智能体路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(12):3635-3642.
- WANG W M, DU J L. Agent path planning based on regular hexagon grid JPS algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021,43(12):3635-3642.
- [23] SNYDER W E, QI H, SANDER W A. Coordinate system for hexagonal pixels [J]. Proceeding of SPIE, 1999.
- [24] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [25] 张晓凤, 王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学, 2019,46(3):30-38.
- ZHANG X F, WANG X Y. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm[J]. Computer Science, 2019,46(3):30-38.
- [26] 龙文, 赵东泉, 徐松金. 求解约束优化问题的改进灰狼优化算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(9):2590-2595.
- LONG W, ZHAO D Q, XU S J. Improved grey wolf

- optimization algorithm for constrained optimization problem[J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(9):2590-2595.
- [27] SAREMI S, MIRJALILI S Z, MIRJALILI S M. Evolutionary population dynamics and grey wolf optimizer[J]. *Neural Computing and Applications*, 2015, 26(5):1257-1263.
- [28] MITTAL N, SINGH U, SOHI B S. Modified grey wolf optimizer for global engineering optimization [C]. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2016.
- [29] 马洪泽,艾雨馨,张敬敏,等. 化纤锦纶生产全流程物流调度系统[J]. *制造业自动化*, 2023, 45(4):170-173,195.
MA H Z, AI Y X, ZHANG J M, et al. Logistics scheduling system for the full process of chemical fiber nylon production[J]. *Manufacturing Automation*, 2023, 45(4), 170-173,195.
- [30] 徐玲,祝军. 制药智能工厂生产物流调度系统柔性管控优化算法[J]. *电子技术与软件工程*, 2019(22):102-103.
XU L, ZHU J. Flexible control optimization algorithm for production logistics scheduling system in pharmaceutical intelligent factory [J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2019(22), 102-103.
- [31] 王晓军,杨春霞,陈航慧,等. 考虑倒箱操作的AutoStore魔方型仓储系统自动引导车双层路径规划[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(36):15546-15554.
WANG X J, YANG CH X, CHEN H H, et al. Double-layer path planning of automated guided vehicles in AutoStore cubic warehousing system with considering box flipping operation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(36):15546-15554.
- [32] 廉胤东,刘彦汝,杨启帆,等. 基于信息物理系统的多分拣移动机器人调度策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1):281-288.
LIAN Y D, LIU Y R, YANG Q F, et al. Scheduling strategy for multi-picking mobile robots based on information-physical systems[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1):281-288.
- [33] 张慧. 工业移动机器人多机调度系统性能指标定义及性能优化[J]. *电子技术与软件工程*, 2022(10):59-62.
ZHANG H. Performance metric definition and optimization for multi-robot scheduling system in industrial mobile robots[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2022(10):59-62.

作者简介



李艳生(通信作者),分别在2009年和2016年于北京邮电大学获得学士学位和博士学位,现为重庆邮电大学副教授,主要研究方向为机器人和智能制造技术。

E-mail: liyansheng@cqupt.edu.cn

Li Yansheng (Corresponding author)

received his B. Sc. degree in 2009 and received his Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2016. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include robotics and intelligent manufacturing technology.



张静琦,2021年于河南科技学院获得学士学位,现为重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为多机器人路径规划与任务调度等。

E-mail: s212131030@stu.cqupt.edu.cn

Zhang Jingqi received her B. Sc. degree

from Henan Institute of Science and Technology in 2021. She is currently a master student at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests include multi-robot path planning and task scheduling.