

货架下方可通行无人仓中多自动导引车系统的路径规划

杨洪玖^{1*}, 赵国威¹, 李洪波², 程富阳¹

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 北京极智嘉科技股份有限公司, 北京 100012)

摘要:多自动导引车(automated guided vehicle, AGV)系统进行搬运作业时容易发生冲突、碰撞和死锁。为此,引入多值栅格和交通规则改进A*算法解决货架下方可通行场景下多AGV系统的轨迹规划问题。为提升系统搬运效率,通过增加货架召回机制、转弯代价和热度代价对规划路径进行优化,并采用二叉堆数据结构提高路径规划速度。利用Python搭建了可视化的四方向栅格无人仓模型,对改进A*算法和轨迹优化策略进行仿真验证。仿真结果表明,改进A*算法具有求解速度快、防死锁能力强的优点,可以快速完成该场景下的多AGV系统的路径规划。

关键词:A*算法;多自动导引车系统;交通规则;多值栅格;路径规划

中图分类号:TP242.6 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)04-104-10



Path planning of a multiple AGV system in unmanned warehouse with bottom passable shelves

YANG Hongjiu^{1*}, ZHAO Guowei¹, LI Hongbo², CHENG Fuyang¹

(1. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Geekplus Technology Co., Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: The multiple AGV (automated guided vehicle) system is prone to conflict, collision and deadlock in the process of carrying. Therefore, the A* algorithm was improved by introducing multi-valued grid and traffic rules to solve the path planning problem for the multiple AGV system in scenarios where there was passable space beneath shelves. To improve handling efficiency of the multiple AGV system, the planned path was optimized by adding shelf recall mechanism, turning cost and heat cost. A binary heap data structure was also used to improve calculation speed of the path planning. The simulation results show that the improved A* algorithm has the advantages of fast solution and strong deadlock resistance, and can quickly complete the path planning of multi-AGV system in this scenario.

Keywords: A* algorithm; multiple AGV system; traffic rule; multi-valued grid; path planning

传统物流仓库模式下,工作人员需要根据订单信息找到货物进行搬运,劳动力成本高且工作效率低。利用自动导引车(automated guided vehicle, AGV)自动取货实现“货到人”的模式可以提高订单处理效率、降低人力成本。目前大多数企业的智慧仓库通过通道堆垛机、穿梭车或基于移动式货架的AGV运输货物。本文构建的无人仓模型采用顶升式AGV作为搬运工具,装载货架时AGV移动到货架正下方,利用液压装置将整个货架托起,将其运送到站台进行拣选,拣选完成后再由AGV将货架运回原处并放下。该模式下

无须在货架底部安装车轮,也无须机械臂将货物转移到AGV上,即可实现货物的搬运,适用范围广且成本低。

路径规划的研究当中,比较常用的有A*算法^[1-5]、蚁群算法^[6-7]、遗传算法^[8-10]、强化学习^[11-13]和快速扩展随机树^[14-15]等。文献[16]提出的改进遗传算法适用于求解多自由度移动机器人在障碍物分布复杂场景下的最短路径。文献[17]提出的改进蚁群算法改善了多AGV系统路径规划收敛速度慢、容易陷入局部最优的缺点。文献[18]提出的改进深度强化学习算

收稿日期:2023-03-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973230)

*第一作者:杨洪玖(1981—),男,河北秦皇岛人,教授,博士,博士生导师,E-mail:yanghongjiu@tju.edu.cn

引用格式:杨洪玖,赵国威,李洪波,等. 货架下方可通行无人仓中多自动导引车系统的路径规划[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(4): 104-113.

Citation: YANG H J, ZHAO G W, LI H B, et al. Path planning of a multiple AGV system in unmanned warehouse with bottom passable shelves[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 104-113.

法通过引入先验规则和先验知识提高收敛速度,对移动和碰撞行为做出惩罚并训练出最优无碰撞路径。上述方法适用于障碍物分布复杂场景下对多自由度的少量 AGV 进行路径规划,当 AGV 数量增多时容易陷入局部最优解,训练速度慢。无人仓场景下货架分布规则,且有多台 AGV 同时进行搬运工作,上述方法的实用性不强。目前大多数无人仓路径规划的研究中,没有考虑到 AGV 空载时可以在货架下方通行的情况,而空载 AGV 在货架下方的通行可以极大地减少路径成本。针对顶升式 AGV 的无人仓协同路径规划提出了一种改进的 A* 算法,将货架下方区域纳入空载 AGV 的路径规划范围,具有计算量低、简单高效和仓库利用率高的优势,尤其是对多 AGV 系统中的冲突问题具有良好的处理能力。

A* 算法作为一种经典且简单的启发式算法,是求解最短路径最有效的直接搜索方法,在栅格地图中容易应用且效果显著。文献[19]使用交通规则和预约表改进 A* 算法可以很好地解决多 AGV 的路径冲突问题,但交通规则下 AGV 可通行方向减少会使得最短路径加长。此方法适用于大量 AGV 协同运作下交通拥堵、绕路成本小于避障成本的情况,且简单的交通规则不能解决因货架下方通行产生的冲突和死锁问题。文献[20]引入时间窗改进的 A* 算法可以由其他 AGV 未来时间路径来判断可能发生的冲突并提前做出处理,可以不受交通规则的限制规划出无冲突路径,但该方法在 AGV 数量多且交通拥挤时计算量大,难以找到适用于过道狭窄仓库模型的多 AGV 系统路径规划方案。

为了解决在仓库中投入多台 AGV 时 AGV 之间存在的死锁和冲突问题,本文对 AGV 的任务类型进行分类,将栅格多值化存储位置和状态信息,基于多值化的栅格和交通规则约束,利用改进过的 A* 算法求解空载和负载 AGV 的全局路径,并用转弯代价和热度代价对路径进行优化。

1 算法设计

图 1 是智能仓库模型的简化示意图。AGV 用蓝色的长方形表示,车身宽度略小于货架,实际物理模型为双轮差速小车,可进行原地转向和倒退,无法进行左右平移。车身高度小于货架底层离地高度,空载时可在货架下方通行。充电桩所在栅格用黄色表示,位于仓库两侧靠墙处,当 AGV 电量小于阈值时自动寻找空闲充电桩充电,

充电时间由耗电量决定,耗电量简化为 AGV 的运行时间^[21]。工作人员用圆形表示,空闲时为绿色,拣选商品时切换为红色。站台包括等候区和工作区,工作人员面前的一个栅格区域为工作区,工作人员在处理货架商品时其余货架在等候区等待。货架区由货架及过道组成,为提高仓库的储货能力,过道宽度仅略大于一个货架的宽度,不能容纳两辆 AGV 并排行驶。送货架时 AGV 路径规划的终点不是工作区而是站台入口,之后按照固定路线排队前往工作区。文中用到的符号详见表 1。

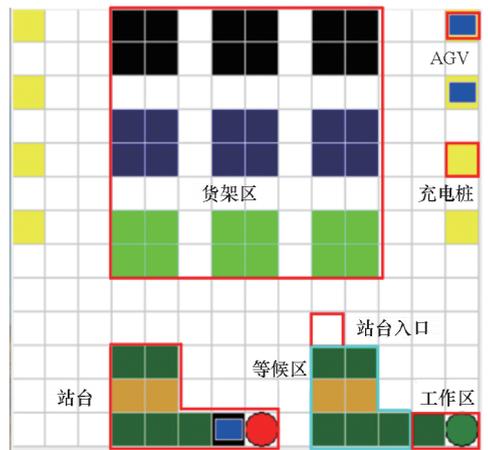


图 1 智能仓库模型

Fig. 1 Intelligent warehouse model

路径规划问题基于如下规定和假设:

- 1) AGV 匀速行驶,单位栅格的通行时间和转弯时间恒定。
- 2) AGV 只能在无障碍区域行驶,空载时可在货架下方行驶。
- 3) 不考虑 AGV 在运行时出现故障以及意外障碍物的情况。
- 4) AGV 完成订单后,若无下一个订单,则停在最后归还的货架下方。
- 5) 货架搬离原地后带货架 AGV 仍不能从此处通过,以减少相向冲突。
- 6) 任一时刻同一栅格上最多只能有一台 AGV。

1.1 栅格地图构建

栅格地图中环境被分成一系列栅格,每一栅格的取值表示该栅格被占据的概率,取值介于 0 和 1 之间。无人仓环境下障碍物规则分布,适合构造栅格地图进行路径规划。为了对 AGV 在不同区域、不同任务下的路径规划做出详细的规定,表 2 给出了栅格值的含义。

表 1 符号含义

Tab. 1 Meaning of symbol

符号表示	符号含义
V	栅格值, $V \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$
x, y	位置坐标
D	栅格可通行方向集合
R_r^y	第 y 行的方向限制
R_c^x	第 x 列的方向限制
M	任务类型, $M \in \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$
S	路径起点
E	路径终点
F	节点的估算代价
G	起点到该节点的实际代价
H	该节点到终点的预估代价
C	当前节点
N	扩展节点
L	当前节点的父节点
R	规划路径
n	规划路径中的下一节点
x_j, y_j	货架坐标位置
x_w, y_w	站台坐标位置
d	站台与货架之间的曼哈顿距离
Q_{pass}	栅格上经过的 AGV 总数
Q_{load}	栅格上装卸货架的次数
Q_{wait}	栅格上 AGV 等待让行的次数
Q_{block}	栅格上发生相向冲突的次数
T	栅格热度值
k_1, k_2, k_3, k_4	Q 在 T 中所占权重
$turnloss$	转弯代价
T_{value}	热度代价
α_1	空载 AGV 热度代价的权重
α_2	带货架 AGV 热度代价的权重
z	选择被送回货架的优先程度

表 2 栅格值含义

Tab. 2 Meaning of grid value

栅格值	含义
0	站台区域外无障碍通路
1	不在货架下方且有 AGV 通行
2	工作人员所处栅格
3	该栅格上有且只有货架
4	位于货架下方且有 AGV 通行
5	带货架 AGV 在货架区域外停滞
6	空载 AGV 在货架区域内停滞
7	站台区域内无障碍通路
8	位于站台区域内且有 AGV 存在

栅格值取 1 和 4、5 和 6 的区分是为了保留栅格是否位于货架下的位置信息,避免带货架 AGV 在规划路径中通过货架下方。栅格值取 2、7、8 是为了强调站台的位置信息,禁止规划出的路径穿过站台。当 AGV 在一个栅格上停留时间超过停滞判定时间后判定为停滞,停滞的原因可以分为以下五类:

- 1) AGV 间产生相向冲突;
- 2) 交通拥堵,AGV 等待时间过长;
- 3) AGV 在货架下方进行取货或卸货工作;
- 4) 没有接到新任务,AGV 停留在货架下方;
- 5) AGV 在充电桩处充电。

每个栅格的位置由坐标 (x, y) 表示,坐标系原点位于地图左上方,向右为 X 轴正方向,向下为 Y 轴正方向。

1.2 改进交通规则

交通规则的优势是通过限制每条通路的方向来解决最难处理的相向冲突问题。将交通规则扩展到栅格地图的货架区域后,得到每一行的交通规则 R_r^y 和每一列的交通规则 R_c^x ,可以解决 AGV 在货架下方穿行的冲突问题,但会导致 AGV 取完货架后无法离开的情况,如图 2 所示。

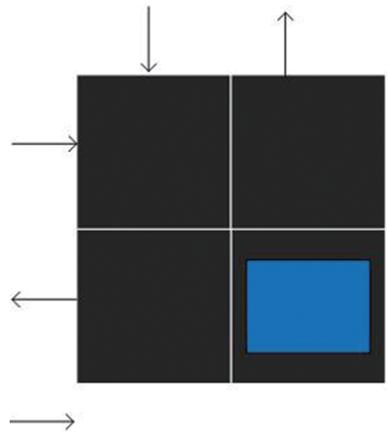


图 2 路径死锁 1

Fig. 2 Path deadlock 1

图 2 中 AGV 的可通行方向只有向左和向上,而取到货架的 AGV 无法穿过这两个方向上的货架,从而导致无法求得路径。

本文对交通规则进行更加详细的约束,按 AGV 运行的任务类型 M 不同分为取货架、送货架、还货架和充电,编码分别为 M_1, M_2, M_3 和 M_4 。取货架和充电为空载状态,在整个栅格地图上进行交通规则约束。送货架和还货架时只在过道进行交通规则约束,保证相邻的两条过道通行方向相反即可。由于货架区内的过道不允许两辆

AGV 并排行驶,在货架区的过道垂直方向上不对带货架 AGV 施加方向限制。然而这种约束下带货架 AGV 与空载 AGV 在货架处出现例如如图 3 所示的相向冲突问题。

图 3 中带货架 AGV 需要将货架送回到空载 AGV 所处栅格,而空载 AGV 向右行驶,产生相向冲突的双方必定存在空载 AGV。考虑到空载 AGV 通行区域更广,规定产生相向冲突后由空载 AGV 重新进行路径规划避让带货架 AGV。

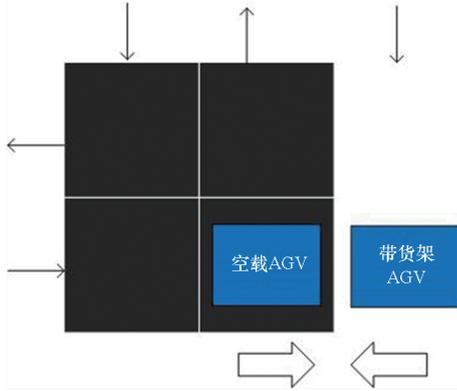


图 3 路径死锁 2
Fig. 3 Path deadlock 2

当 AGV 前往充电或充完电后取货架时,由于充电桩靠近墙壁,可通行方向减少会导致死锁问题,如图 4 所示,AGV 通行方向为向左和向下,而下边有 AGV 充电无法通行,左边是墙壁无法通行,无法重新规划路径。

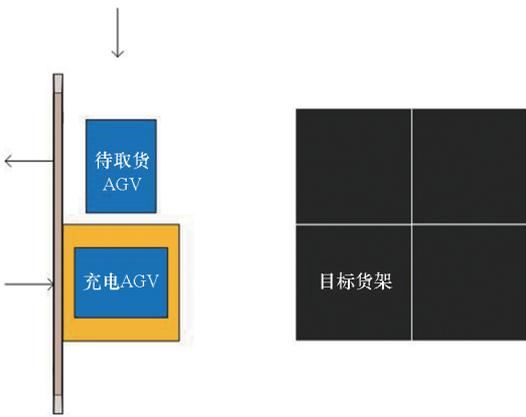


图 4 路径死锁 3
Fig. 4 Path deadlock 3

规定充电桩所在列的通行方向统一为驶离充电桩的方向,充电时在充电桩外的一列水平通行方向统一为驶向充电桩的方向。将方向用数字进行编码,上、左、下、右分别为 1,2,3,4。确定的交通规则见表 3。由 AGV 的类型和栅格的位置 (x, y) 可以确定通行方向。

表 3 交通规则表
Tab. 3 Table of traffic rules

任务类型	AGV 所处位置	可通行方向
M_2, M_3	货架区东西过道	$R_r^1, 1, 3$
	货架区南北过道	$R_c^2, 2, 4$
	货架区交叉路口及货架区外	R_r^1, R_c^2
	货架区内其他位置	1, 2, 3, 4
M_1	左充电桩所在列	4
	右充电桩所在列	1
	其他区域	R_r^1, R_c^2
M_4	左充电桩所在列	4
	右充电桩所在列	2
	左充电桩右侧一列	$R_c^2, 2$
	右充电桩左侧一列	$R_c^2, 4$
	其他区域	R_r^1, R_c^2

当订单信息较少时大部分 AGV 处于空闲状态,可能会出现路径死锁,如图 5 所示,空载 AGV 需要取到右边的货架,其可通行方向为向上和向左,而这两个方向上都有 AGV 停滞,若多次规划路径失败后可以解除方向限制进行路径规划。

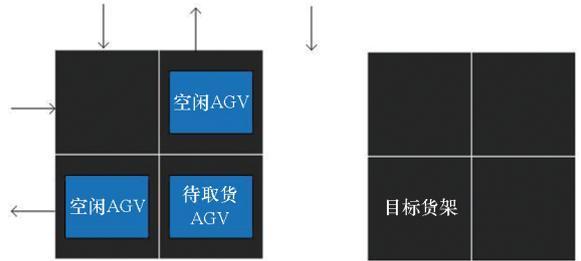


图 5 路径死锁 4
Fig. 5 Path locked 4

新规划出来的路径与原路径对比如图 6 所示,虚线为交通规则下的最优路径,实线为无交通规则下的最优路径。在交通不拥堵的情况下可以通过解除空载 AGV 的方向限制以提高效率,遇到新的相向冲突则重新进行施加交通规则的规划。

1.3 基于交通规则的改进 A* 算法

A* 算法是一种经典的启发式搜索算法,通过启发函数的引导,从起点向终点方向搜索直到找到终点,扩展方向一般分为四方向和八方向。由于考虑了空载 AGV 在货架下方穿行的情况,沿对角方向行驶会撞到货架腿,所以规定小车只能朝

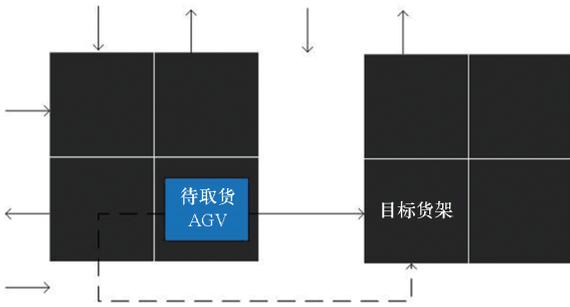


图 6 路径比较

Fig. 6 Path comparison

东南西北四个方向行驶。在路径规划时根据当前时刻的栅格地图和交通规则,在不考虑其他 AGV 位置的情况下为每台 AGV 规划出一条无碰撞最短全局路径。在实际跟踪该路径时,再由每个栅格的实际取值决定前进、停车或者重新规划路径。由两个列表 open list 和 close list 存储搜索过的节点,每个节点的估算代价为:

$$F = G + H \quad (1)$$

H 使用不考虑障碍物的曼哈顿距离计算,计算公式为:

$$H = |x_E - x_C| + |y_E - y_C| \quad (2)$$

式中: x_E, y_E 表示终点坐标; x_C, y_C 表示当前节点横纵坐标。改进 A* 算法的运行步骤如下:

步骤 1: 清空 open list 和 close list,将起点加入 open list 中。

步骤 2: 选择 open list 中 F 值最小的节点作为当前节点 C ,将当前节点从 open list 中删除,加入 close list 中。

步骤 3: 搜索与当前节点相邻的节点,要求扩展节点 N 不在 close list 中。由于空载 AGV 的通行区域广,绕路成本低,要求其路径规划结果能够解决相向冲突并且能绕开货架下方停留的 AGV,扩展节点除了要满足交通规则,还不能是阻塞节点,在路径规划阶段不将移动 AGV 视为障碍物。若为空载小车 i 进行路径规划,节点可以作为扩展节点的要求为:

$$\begin{cases} M \in \{M_1, M_4\} \\ V_N \in \{0, 1, 3, 4\} \\ |x_N - x_C| + |y_N - y_C| = 1 \\ (x_N - x_C + 3) |x_N - x_C| + \\ (y_N - y_C + 2) |y_N - y_C| \in D_{(x,y)} \\ N \notin \text{close list} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $D_{(x,y)}$ 表示小车 i 在坐标位置为 (x, y) 的栅格处的交通规则约束, V_N 表示扩展节点的栅格

值, N_x, N_y 表示扩展节点的横纵坐标。

若为带货架小车 j 进行路径规划,将货架所在栅格视为静态障碍物绕开,节点可以作为扩展节点的要求为:

$$\begin{cases} M \in \{M_2, M_3\} \\ V_N \in \{0, 1, 5\} \\ |x_N - x_C| + |y_N - y_C| = 1 \\ (x_N - x_C + 3) |x_N - x_C| + \\ (y_N - y_C + 2) |y_N - y_C| \in D_{(x,y)} \\ N \notin \text{close list} \end{cases} \quad (4)$$

由于带货架 AGV 可通行区域小、绕路成本高,在路径规划时假定当小车 j 到达阻塞节点时阻塞已经被解决,路径规划时不将阻塞节点视为障碍物。计算扩展节点的 F, G 和 H ,扩展节点的父节点为当前节点。

步骤 4: 若扩展节点已经存在于 open list 中,检验通过当前节点到达扩展节点是否更优,如果 G 更小则将该节点的父节点改为当前节点,更新 F 和 G 。若扩展节点不存在于 open list 中,则将扩展节点加入 open list。

步骤 5: 不断重复步骤 2 ~ 4,直到终点 E 出现在 open list 中,再通过节点的父节点由终点向前找到起点,得到一条从起点到终点的最短路径。

2 算法优化

通过交通规则的设计可以解决大部分的相向冲突,对于交叉冲突和追尾冲突可以采用栅格值判断的方法解决。当 AGV 移动时将 AGV 车身所处的两个栅格根据其所处位置赋值为 $V_C, V_C \in \{1, 4, 8\}$,赋值后其他 AGV 无法通过该栅格,从而保证 AGV 之间的安全距离。AGV 移动一个栅格后判断路径中下一个节点 n 的栅格值 V_n 是否满足 $V_n \in \{0, 3, 7\}$,若满足则继续行驶,不满足则等待让行或者重新规划路径。若 AGV 在站台外的某一栅格处等待让行时间超过预设时间,则将其车身所处的栅格判定为停滞,此时栅格值 $V_C \in \{5, 6\}$ 。当 AGV 离开后将栅格值恢复,允许其他 AGV 经过此处。

使用 A* 算法寻找 F 值最小的节点时需要判断每一个节点的大小,open list 中节点数量过多会影响程序运行速度,将 open list 由无序表改为二叉堆结构的半有序表可以大大加快这一进程。二叉堆中父节点的 F 值小于等于其两个子

节点的 F 值,根节点为 F 值最小的节点。路径规划时可以直接选择根节点作为当前节点,将根节点与堆的最后一个节点互换位置并将最后一个节点删除,然后从堆顶开始从上往下维护堆,如果节点的 F 值比子节点大则将该节点与子节点交换。将备选节点加入 open list 时直接插入堆的末尾并往根节点进行更新,如果插入节点的 F 值比父节点还小则将该节点与其父节点交换,直到父节点 F 值小于新插入的元素或到达根节点。

考虑到转弯时具有转弯时间,在 G 值的计算过程引入转弯代价来减少 AGV 的转弯次数。引入转弯代价前后的路线如图 7 和图 8 所示。

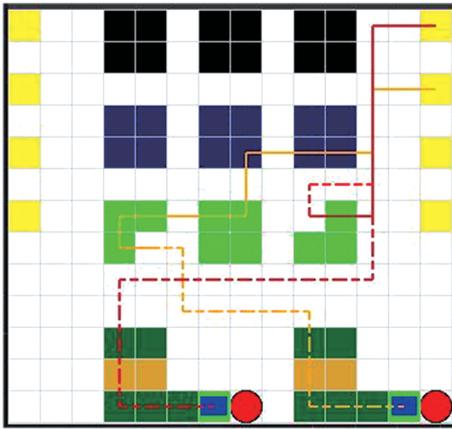


图 7 无转弯代价路线图

Fig. 7 Road map of no turning cost

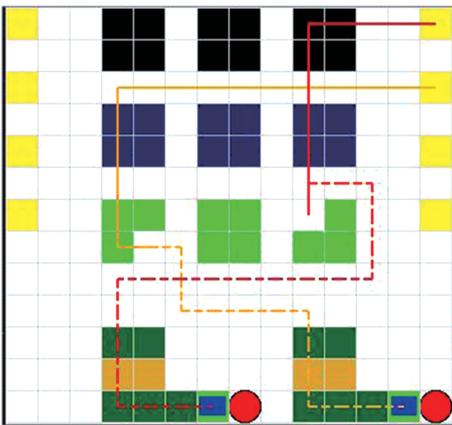


图 8 引入转弯代价路线图

Fig. 8 Road map for introducing turning cost

红色和橙色路线分别代表两辆 AGV 的路线,实线部分是取货架的路线,虚线部分是送货架的路线。无转弯代价下取货架路线的总长度为 26 m,转弯次数为 8;引入转弯代价后取货架路线总长度为 26 m,转弯次数为 3。两种情况下送

货架路线基本一致。空载 AGV 通行区域广,可以在保证路径总长度不变的情况下大幅降低转弯次数,而带货架 AGV 的路线灵活度低,难以通过转弯代价进行优化。

站台接收到订单后按照订单信息寻找距离最近的可搬运货架,将正在送回原地的货架也认定为可搬运货架,且调用此种货架可以直接免去将其继续送回原处的代价,提高整个系统的工作效率。未被搬运的货架与站台的距离采用曼哈顿距离计算,正在送回的货架与站台的距离计算公式为:

$$d = |x_j - x_w| + |y_j - y_w| - z \quad (5)$$

通过执行历史订单的情况计算出每个栅格点上 AGV 的通行数量和停滞次数,可以近似求出该模型下的交通热度图,每个栅格热度值的计算公式为:

$$T = Q_{\text{pass}} \cdot k_1 + Q_{\text{wait}} \cdot k_2 + Q_{\text{block}} \cdot k_3 + Q_{\text{load}} \cdot k_4 \quad (6)$$

式中, Q_{pass} 和 Q_{load} 用于表示可能发生的冲突, Q_{wait} 和 Q_{block} 用于表示已经发生的冲突。将热度值变换为 0 ~ 1 的热度代价 T_{value} , 将每个栅格上的 T_{value} 引入 A* 算法的 G 值的计算中,可以让 AGV 以增加路径长度为代价避开容易发生冲突的位置。

基于交通规则改进 A* 算法的全局路径规划解决了同类型 AGV 的相向冲突问题,不同类型 AGV 相向冲突导致的阻塞问题由空载 AGV 路径重规划解决,重新规划出的路径可以有效避开当前发生阻塞的节点,有利于缓解交通压力。跟踪全局路径时基于前方栅格的栅格值判断是否有 AGV 存在,并将车身所处栅格进行赋值,从而解决 AGV 之间的交叉冲突和追尾冲突。因此本文所提出的方法可以解决多 AGV 系统的冲突和死锁问题,并且具有计算量小和结构简单的优势。路径规划的伪代码在算法 1 中给出。

在算法 1 中, G_N 、 H_N 和 F_N 分别表示扩展节点的 G 、 H 和 F 值, G_C 表示当前节点的 G 值, N_{parent} 和 C_{parent} 分别表示扩展节点的父节点和当前节点的父节点。AGV 寻路行驶的伪代码如算法 2 所示。

本文主要研究了多 AGV 路径规划问题,并简化了无人仓系统的其他问题^[22-23]。①简化了仓库最优布局问题:本文参照某企业建立的栅格地图模型具有一定的科学性和研究价值,将所有站

算法 1 路径规划

Alg. 1 Path planning

输入: 起点 S , 终点 E , 栅格地图栅格值 V 输出: 规划路径 R 将起点 S 加入 open list**while** $E \notin \text{openlist do}$ $C \leftarrow$ open list 中根节点将当前节点 C 从 open list 中删除并加入 close list

从上到下更新 open list 保持二叉堆结构

由式(3)或式(4)得到扩展节点 N , 使 C 到 N 的方向

满足交通规则

 $G_N \leftarrow G_C + 1 + \alpha T_{\text{value}}$ $H_N \leftarrow |x_E - x_N| + |y_E - y_N|$ $N_{\text{parent}} \leftarrow C$ $L \leftarrow C_{\text{parent}}$ **if** $(x_L - x_N)(y_L - y_N) \neq 0$ $G_N \leftarrow G_N + \text{turnloss}$ **end if** $F_N \leftarrow G_N + H_N$ **if** $N \notin \text{open list}$ 将扩展节点 N 加入 open list 末端

从下到上更新 open list 保持二叉堆结构

else if $N \in \text{open list}$ **if** G_N 变小更新该节点的 G, H, F 和父节点**end if****end if****end while**由父节点从终点找到起点得到路径 R return R

算法 2 路径跟踪

Alg. 2 Path tracing

输入: 规划路径 R ; 栅格地图栅格值 V ; 任务类型 M **if** $hisvalue1 = 0$ $hisvalue1 \leftarrow V_C$ **end if****while** $(x_C, y_C) \neq (x_E, y_E)$ **if** $M \in \{M_1, M_4\}$ **while** $V_n \in \{1, 4\}$

停车让行

if 等待时间超过预设时间

车身所处栅格判定为停滞

根据栅格位置更改栅格值, $V_C \in \{5, 6\}$ **end if****end while****if** $V_n \in \{5, 6\}$

goto Path planning

end if**end if****if** $M \in \{M_2, M_3\}$ **while** $V_n \in \{1, 5, 8\}$

停车让行

if 等待时间超过预设时间

车身所处栅格判定为停滞

根据栅格位置更改栅格值, $V_C \in \{5, 6\}$ **end if****end while****if** 货架被召回

goto Path planning

end if**end if** $hisvalue2 \leftarrow V_n$, 保存节点 n 的栅格初始值 $V_n \leftarrow V_n + 1$, 将栅格值更改为 AGV 通行状态

移动一个栅格

 $V_C \leftarrow hisvalue1$, 将节点 C 的栅格值复原 $hisvalue1 \leftarrow hisvalue2$ 将当前节点 C 替换为路径 R 中的下一个节点 n **end while**

台放置于仓库下方,按照货物所在货架在订单中出现的热度来决定其与站台的距离,所有充电桩分布在仓库左右两侧。② 简化了调度问题,在后台按照预先设定的货物拣选热度随机生成订单后依次分配给站台,由站台根据订单选择距离最近的可用货架,再由货架的位置将任务分配给距离最近的空闲 AGV,这里的距离简化为无视障碍物的曼哈顿距离^[23-27]。通过优化调度程序可以使 AGV 的订单分配更加智能,总体效率进一步提高,AGV 在得到具体订单后的路径规划方法是一致的。AGV 接到订单后进行路径规划,依次完成取货架、送货架和还货架的过程。

3 实验结果

用 python 软件搭建出了一个 $100 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的仓库栅格地图,并用 Tkinter 画布进行可视化仿真,仿真界面如图 9 所示。

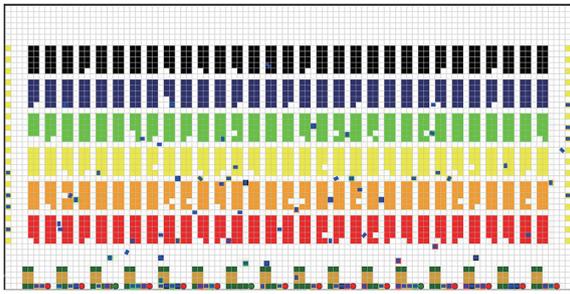


图9 仿真界面

Fig.9 Simulation interface

将货物由拣选热度分为六类,热度由高到低分别用红、橙、黄、绿、蓝、黑六种颜色表示,每种颜色的三种货物以十个货架为单位穿插排放;仓库最上方空白处作为AGV的主要初始存放处,其余设置与图1相同。仿真所用的参数见表4。

表4 仓库模型参数

Tab.4 Warehouse map parameters

参数	取值	参数	取值
仓库长度/m	100	取放货架时间/s	2
仓库宽度/m	50	AGV 行驶速度/(m · s ⁻¹)	10
AGV 数量	100	AGV 旋转时间/s	0.2
货架数量	1 860	停滞判定时间/s	1.5
货物种类	18	运回货架选择优先级	20
站台数量	16	红色货架被选中概率	0.25
充电桩数量	32	橙色货架被选中概率	0.25
工作人员数量	16	黄色货架被选中概率	0.20
拣选时间/s	3	绿色货架被选中概率	0.15
转弯代价	2	蓝色货架被选中概率	0.10
α_1	3	黑色货架被选中概率	0.05
α_2	1		

在订单完全一致的前提下,增加热度代价前后的实验结果分别如图10和图11所示。图10和图11中颜色越亮的区域热度越大,交通拥堵程度越高。引入热度损失鼓励空载AGV从货架下方穿行并避开装卸货架频繁的区域,缓解货架区过道的交通压力,使AGV的路线分布更加均匀,充分利用仓库空间。

实验数据见表5,加入热度代价后经常发生相向冲突的地区通行代价最大,绕过该地区可以大幅度减少路径重新规划的次数。有热度代价与无热度代价相比会在增加转弯次数的前提下减小

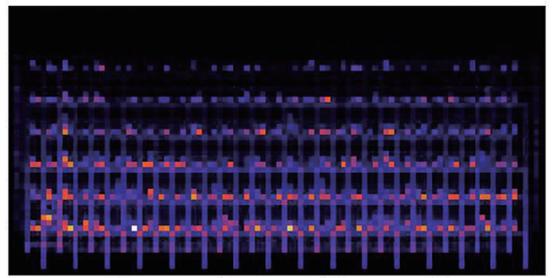


图10 无热度代价热度图

Fig.10 No heat cost heat map

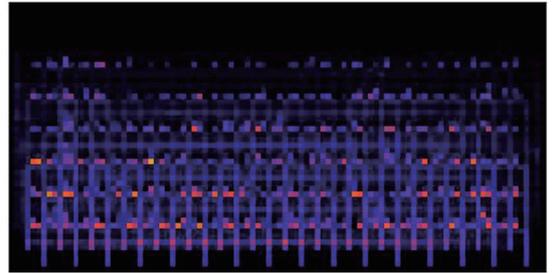


图11 加入热度代价热度图

Fig.11 Heat map with added heat cost

路径总长度。交叉冲突在每一行和每一列都有可能发生,绕路行驶不会产生太大作用。完成订单时间表明本文引入的热度损失可以小幅度缩短订单完成时间,大幅度减少相向冲突次数并使AGV路线分布更广。

表5 加入热度代价前后数据

Tab.5 Data before and after adding heat cost

参数	无热度代价	加入热度代价
转弯次数	18 794	18 877
停车让行次数	21 956	22 097
相向冲突次数	273	83
路径总长度	164 636	161 746
完成订单时间/s	430.40	421.38
地图总热度	238 829	227 843
栅格最大热度	651	485

表6给出了一些优化项对于完成订单时间和AGV运行总距离的影响,所有数据均是多次实验的平均值。由表6可以看出,召回机制可以减小AGV的运行总距离从而缩短完成订单时间,增加转向损失可以增大单位时间内AGV运行总距离从而加快订单完成,使用二叉堆结构可以加快路径规划速度从而缩短订单完成时间。

表 6 优化项选择及实验数据

Tab.6 Selection of optimization items and experimental data

优化项选择			实验数据		
转弯	二叉堆	召回	完成订单 时间 t/s	总距离 ρ/m	$(\rho/t)/$ $(m \cdot s^{-1})$
√	√	×	44.37	14 317	322.67
×	√	√	43.21	13 132	303.89
√	×	√	48.37	12 966	268.06
√	√	√	41.26	13 349	323.56

4 结论

以贴近实际场景的智能仓库模型作为研究对象,针对多 AGV 系统的冲突、碰撞和死锁问题,提出通过引入多值栅格和交通规则改进的 A* 算法,解决了货架下方可通行的无人仓中多 AGV 系统的轨迹规划问题。通过增加转弯代价、热度代价、二叉堆和货架召回机制对算法进行优化,有效减小了 AGV 运行总距离、缩短了订单完成时间。仿真结果表明,所提方法对路径冲突的处理能力强,求解速度快,不易陷入死锁,能够实现该场景下多 AGV 系统的流畅运行。

参考文献 (References)

[1] DE RYCK M, VERSTHEYHE M, DEBROUWERE F. Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 54: 152 - 173.

[2] 杨旭, 王锐, 张涛. 面向无人机集群路径规划的智能优化算法综述 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (11): 2291 - 2302.

YANG X, WANG R, ZHANG T. Review of unmanned aerial vehicle swarm path planning based on intelligent optimization[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37 (11): 2291 - 2302. (in Chinese)

[3] FRANSEN K J C, VAN EEKELEN J A W M, POGROMSKY A, et al. A dynamic path planning approach for dense, large, grid-based automated guided vehicle systems[J]. Computers & Operations Research, 2020, 123: 105046.

[4] MOHAMMADI E K, SHIRAZI B. Toward high degree flexible routing in collision-free FMSs through automated guided vehicles' dynamic strategy: a simulation metamodel[J]. ISA Transactions, 2020, 96: 228 - 244.

[5] ZHONG M S, YANG Y S, DESSOUKY Y, et al. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106371.

[6] 袁帅, 邢景怡, 尧晓, 等. 基于概率分布区间的纳米操作

机器人路径规划 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (1): 129 - 142.

YUAN S, XING J Y, YAO X, et al. Trajectory planning of nano-manipulation robot based on the probabilistic distribution region[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36 (1): 129 - 142. (in Chinese)

[7] 胡春阳, 姜平, 周根荣. 改进蚁群算法在 AGV 路径规划中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (8): 270 - 278.

HU C Y, JIANG P, ZHOU G R. Application of improved ant colony optimization in AGV path planning [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56 (8): 270 - 278. (in Chinese)

[8] 葛显龙, 李祖伟, 葛小波. 考虑灵活充电策略的带时间窗物流配送路径优化研究 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (6): 1293 - 1301.

GE X L, LI Z W, GE X B. Research on logistics distribution route optimization with time window considering flexible charging strategy[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37 (6): 1293 - 1301. (in Chinese)

[9] LEE C W, WONG W P, IGNATIUS J, et al. Winner determination problem in multiple automated guided vehicle considering cost and flexibility [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106337.

[10] 范厚明, 刘浩, 刘鹏程, 等. 集货需求模糊的异型车同时配集货路径优化 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (5): 661 - 675.

FAN H M, LIU H, LIU P C, et al. Heterogeneous fleet vehicle routing problem with simultaneous deterministic delivery and fuzzy pickup [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38 (5): 661 - 675. (in Chinese)

[11] GOLI A, TIRKOLAEI E B, AYDIN N S. Fuzzy integrated cell formation and production scheduling considering automated guided vehicles and human factors [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29 (12): 3686 - 3695.

[12] 邹启杰, 刘世慧, 张跃, 等. 基于强化学习的快速探索随机树特殊环境中路径重规划算法 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (8): 1737 - 1748.

ZOU Q J, LIU S H, ZHANG Y, et al. Rapidly-exploring random tree algorithm for path re-planning based on reinforcement learning under the peculiar environment [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37 (8): 1737 - 1748. (in Chinese)

[13] ZHANG Z, CHEN J, GUO Q. Application of automated guided vehicles in smart automated warehouse systems: a survey [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2023 (3): 1529 - 1563.

[14] 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 (Basel), 2022, 22 (20): 7968.

[15] 汪琴, 张波涛, 宋士吉. 期望时间下的移动机器人目标搜索路径规划 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (7): 1451 - 1460.

- WANG Q, ZHANG B T, SONG S J. Path planning of target search for mobile robot with expected time[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(7): 1451–1460. (in Chinese)
- [16] QU H, XING K, ALEXANDER T. An improved genetic algorithm with co-evolutionary strategy for global path planning of multiple mobile robots[J]. *Neurocomputing*, 2013, 120: 509–517.
- [17] LUO Q, WANG H B, ZHENG Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32: 1555–1566.
- [18] YANG Y, LI J T, PENG L L. Multi-robot path planning based on a deep reinforcement learning DQN algorithm[J]. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2020, 5(3): 177–183.
- [19] 张丹露, 孙小勇, 傅顺, 等. 智能仓库中的多机器人协同路径规划方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(2): 410–418.
- ZHANG D L, SUN X Y, FU S, et al. Cooperative path planning in multi-robots for intelligent warehouse [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(2): 410–418. (in Chinese)
- [20] MURAKAMI K. Time-space network model and MILP formulation of the conflict-free routing problem of a capacitated AGV system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 141: 106270.
- [21] DE RYCK M, VERSTEYHE M, SHARIATMADAR K. Resource management in decentralized industrial automated guided vehicle systems [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 54: 204–214.
- [22] MAXIMILIAN L, NILS B, MICHAEL S. Picker routing in AGV-assisted order picking systems[J]. *Inform Journal on Computing*, 2021, 34(1): 440–462.
- [23] XIE L, LI H Y, LUTTMANN L. Formulating and solving integrated order batching and routing in multi-depot AGV-assisted mixed-shelves warehouses [J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 307(2): 713–730.
- [24] ZOU W Q, PAN Q K, MENG T, et al. An effective discrete artificial bee colony algorithm for multi-AGVs dispatching problem in a matrix manufacturing workshop [J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 161: 113675.
- [25] ZOU W Q, PAN Q K, TASGETIREN M F. An effective iterated greedy algorithm for solving a multi-compartment AGV scheduling problem in a matrix manufacturing workshop [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 99: 106945.
- [26] 周亚勤, 汪俊亮, 吕志军, 等. 密集仓储环境下多AGV/RGV调度方法研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(10): 245–256.
- ZHOU Y Q, WANG J L, LYU Z J, et al. Research on multi-AGV/RGV scheduling method in intensive storage environment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(10): 245–256. (in Chinese)
- [27] LU J S, REN C H, SHAO Y P, et al. An automated guided vehicle conflict-free scheduling approach considering assignment rules in a robotic mobile fulfillment system [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 176: 108932.