

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.036

基于响应动态约束条件的仓储 AGV 路径规划协同优化模型

杨震涛

(国网天津市电力公司物资公司,天津 300304)

摘要:为了解决仓储 AGV 无碰撞路径规划问题,设计响应动态约束条件的仓储 AGV 路径规划协同优化模型。建立路径节点模型和车体坐标系模型,获得仓储 AGV 所在位置;建立碰撞描述模型,将全局路径规划问题简化为虚线框架的局部环境,建立时间窗,分别计算空车线段的时间窗、空车转向段的时间窗,获得不同工况下的运输时间。将路径最短作为动态约束条件,采用目标规划法对生成的多条路径求解,处理冲突问题,实现仓储 AGV 路径规划协同优化。算例分析结果表明:基于无人仓库二维顶视图网格系统,在没有障碍物的工况下,行走栅格较少;在有障碍物的工况下,以两条路径为例,未出现碰撞情况,路径优化效果明显。

关键词:响应动态约束条件;仓储;路径规划;协同优化;目标函数;碰撞

中图分类号:TP18 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0170-05

Collaborative Optimization Model of Warehouse AGV Path Planning Based on Response Dynamic Constraints

YANG Zhengtao

(State Grid Tianjin Procurement Company, Tianjin 300304, China)

Abstract: A collaborative optimization model of storage AGV path planning responding to dynamic constraints is designed for planning a collision free path of storage AGV. Path node model and vehicle body coordinate system model are established to obtain the location of AGV in the warehouse. The collision description model is constructed to simplify the global path planning problem to the local environment of the dotted frame. Time window is built to calculate the time windows of empty car line segment and empty car steering segment respectively, obtaining the transportation time under different working conditions. Based on the shortest path as the dynamic constraint condition, the goal programming method is used to solve the generated multiple paths, deal with the conflicts, and realize the collaborative optimization of warehousing AGV path planning. The results of numerical examples show that, based on the 2D top view grid system of unmanned warehouse, there are fewer walking under the working condition with no obstacles, while under the working condition with obstacles, taking two paths as an example, no collision occurs, and the path optimization effect is obvious.

Keywords: response to dynamic constraints; warehousing; path planning; collaborative optimization; objective function; collision

0 引言

自动导引运输车(automated guided vehicle, AGV)是智能仓库中的一个关键设备,它在货物的运输、堆垛、分拣等过程中起着举足轻重的作用。随着自动驾驶设备智能化水平的不断提高,AGV 已被广泛应用于智能仓库。

相关学者研究了 AGV 路径规划方法。徐晗等^[1]研究了基于拓扑栅格建模的 AGV 路径规划算法的优化方法,介绍了一种基于两层环境模型的 AGV 路线规划模型并对其路径规划算法进行了改进,在该算法中加入了路径平滑性分析过程,

提出了仿真退火的群体选取方法,实现了 AGV 路径规划算法优化;郭兴海等^[2]研究了一种融合多目标与能耗控制的无人仓库内 AGV 路径规划方法,以最短路径、最平滑度为约束条件,采用改进的微粒群算法求解曲率不连续的初始路径,然后采用贝兹尔曲线和光滑约束对原始轨迹进行拟合,得到速度变化小、能耗低的连续几何轨迹,实现了路径规划。

以往研究成果虽然能够实现路径规划,但是规划后的路径还存在碰撞情况,并且在发生冲突时,路线规划时间较长。基于此,本文设计一个响应动态约束条件的仓储 AGV 路径规划协同优化

作者简介:杨震涛(1976—),男,天津人,高级工程师,硕士,研究方向为物资管理、物资采购标准管理、物资供应链管理等,qianyuan2855244@163.com。

模型,以提高路径规划效果。

1 碰撞描述模型

在对路径规划之前,需要分析路径中小车的碰撞问题。在多 AGV 环境中,事先建立了各路径节点的坐标,将工作路段的长度记作 Q ,根据节点坐标和节点的限制,计算得到 Q 的带权重临界矩阵 Q_w ,其表示阶方阵^[3],计算式如下:

$$Q_w(i,j) = \begin{cases} e_i - e_j, & (r_i, r_j) \in E \\ \infty, & (r_i, r_j) \notin E \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_w(i,j)$ 表示 i, j 两个路径之间的相对位置; e_i, e_j 分别表示相对路径的节点; (r_i, r_j) 表示两个节点之间的实际距离值; E 表示连通参数。

车体坐标系模型如图 1 所示。

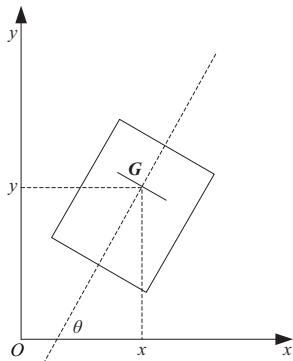


图 1 车体坐标系模型

将 AGV 的位姿矩阵表示为

$$G = [X, Y, \theta]^T \quad (2)$$

式中: G 表示两个驱动轮连接线之间的中心点; $[X, Y, \theta]$ 表示 AGV 位置角信息; t_0 表示初始时刻位置。

在整个路径中,会不可避免地检测到障碍物与小车碰撞情况^[4],为此在上述环境模型的基础上建立碰撞描述模型。

在 AGV 路径规划中,各个路段的占用情况不同,有 3 种碰撞情况:相向碰撞、同向碰撞和节点碰撞。在不同碰撞情况的约束下,为了方便后续相对策略的应用,需要按照占用情况分配时间窗^[5]。设任务执行时间为 T ,以时间为序列相关属性系数,当前位置坐标计算公式为

$$\begin{cases} T_{n_i} = [T_{in, r_j, k}, T_{out, r_j, k}] \\ T_{n_j} = [T_{in, n_j, k}, T_{out, n_j, k}] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{in, r_j, k}, T_{out, r_j, k}$ 分别表示第 r_j 个节点中进入时间与离开时间的判断参数; $T_{in, n_j, k}, T_{out, n_j, k}$ 分别表示第 n_j 个节点中的进入时间与离开时间。

基于上述过程确定每一辆小车的位置^[6]。为了确保小车在 2D 环境中不会出现碰撞,即小车的坐标位置不会重叠,通过公式描述为

$$E = Y^T[X_{i+k}(t)] - \sum u Y^T[X_i(t)] \quad (4)$$

式中: $Y^T[X_{i+k}(t)]$ 、 $\sum u Y^T[X_i(t)]$ 分别表示相遇的两个小车 X_{i+k}, X_i 在 t 时刻所在的位置; u 表示安全系数。

实际的小车轨迹规划问题较为复杂,需要保证所有小车都不发生碰撞问题^[7-8],为此将小车所在窗体状态与所在窗体目标位置状态误差最小作为约束条件,碰撞描述公式为

$$I(t) = \sum_{i=1}^n Y[X_i(t)] - y[X_i(T)]_1/P \quad (5)$$

式中 P 表示误差计算参数。

经过上述约束条件的建立,寻找到碰撞点,避免小车行走时出现碰撞情况。

2 时间窗模型建立

通过上节的碰撞描述模型避免碰撞情况,为进一步固定每辆小车的道路使用权,将时间窗口定义为一条路线的时间窗口。在时间窗模型建立前,设置如下假设条件:

- 1) 在各道路上,小车可以双向行驶,且同一方向上的小车数量不能超过道路的最大流量;
- 2) 某一特定路线上 AGV 小车的车速是固定的;
- 3) AGV 小车在相同的路线上,通过第一节碰撞检测模型计算彼此间的安全距离和碰撞^[9];
- 4) 每个通道可以容纳至少一个 AGV (包含装载时的最大长度)。

在假设条件的基础上,多 AGV 路径规划的时间窗模型如下:

$$A = M \times [c_{jk}^{m_s}, c_{jk}^{m_e}] \quad (6)$$

式中: M 表示负载运行的速度; $c_{jk}^{m_s}, c_{jk}^{m_e}$ 分别表示时间为 m_s, m_e 时的优先级顺序计算参数。

空车线段的时间窗计算公式如下:

$$L = c_{jk}^{m_e} - c_{jk}^{m_s} \times \frac{K_{j0} + J_{j0}}{K_0} \quad (7)$$

式中: K_0 表示直线路段 AGV 空车运行的速度; K_{j0}, J_{j0} 分别表示小车长度与路径为 j_0 上的直线路段长度。

空车转向段的时间窗计算公式如下:

$$L = \frac{J_{j0} + H \times l_{t0}}{K_{j0} + 2 \times K_0} \quad (8)$$

式中: l_{v0} 表示路径 $v0$ 上的时间窗; K_0 表示交叉口编号; H 表示交叉口的总数目。以此计算不发生其他工况下的行走时间。

3 路径规划协同优化

基于时间窗模型,在满足上述各个约束条件下,AGV 运行的总时间最少,即选取的路径是最短的^[10]。在实际的运行中,需要考虑如下内容:

- 1) 考虑 AGV 小车从等候站返回路线的时间;
- 2) 对 AGV 小车装载和卸载的时间计算;
- 3) 当 AGV 小车在经过十字路口时,其减速和通过之后的加速度需要计算^[11]。

采用不同的调节策略能够得到不同的路径,但同时会出现不同的冲突工况^[12],不同冲突工况下构建的目标函数表示为

$$G = (F_i) + d/s \times \sum_{i=1}^n cd_i \quad (9)$$

式中: F_i 表示在第 i 个路径上调节冲突后的时间; d 、 s 分别表示增加的时间量; c 表示重新规划后距离的增加量。

采用目标规划法进行多目标决策问题求解^[13],将综合指标函数表示为

$$s' = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \omega_2 \times a_i \\ \omega_1 \times z + \omega_2 \times x \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_2 、 ω_1 分别表示在冲突调节后距离指标; a 、 z 、 x 分别表示冲突调节后的不同路径长度值。

将最短路径寻找方法与避障模型结合^[14],实现路径优化,避障路径如图 2 所示。

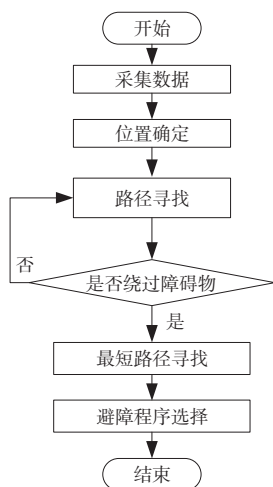


图2 路径优化流程

基于上述过程,采用目标规划法对多目标问题求解,重新对路径规划,保证所走路径花费时间

最少,并且避免撞到障碍物。

4 算例分析

4.1 操作环境与参数

在 CPU (Intel (R) Corei7 - 4710HQ CPU @ 2.50 HQ), GB 内存, 64 位 Windows10 操作系统, Python3.5 集成开发环境中,算例分析所用小车详细参数如表 1 所示。

表1 小车详细参数

序号	项目	参数
1	生产厂家	北京电子科技有限公司
2	负载质量/kg	400
3	电机参数/V	直流 24
4	转向机构	差速转向
5	直线行驶速度/(m/s)	0~2.0
6	转弯行驶速度/(m/s)	0~1.5
7	是否可以双向行驶	是
8	通信模式	无线
9	导航模式	磁导航

采用 Python 语言,在 Pycharm 平台上开发了一套无人仓库的二维顶视图网格系统(20×20),其布局如图 3 所示。

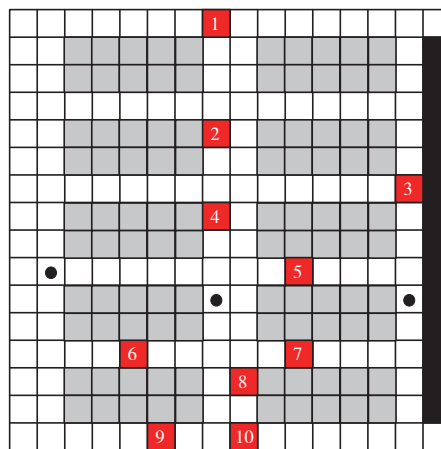


图3 仓储栅格系统示意图

图 3 中,白色表示可以通行的路径,灰色表示货架,红色表示 AGV,黑色表示禁止通行区,黑色圆点表示故障点。设置 AGV 在 1 s 内通过格栅,指示行驶速度与通过格栅的速度相对应,即本次算例分析过程中,行驶速度是 1 m/s,则通过栅格

的速度也为 1 m/s (本刊为黑白印刷,疑问之处可向作者咨询)。

利用拓扑模型建立仓库电子地图,使具有配送作业的 AGV 能够在作业过程中进行双向操作,并将其定义为

$$n_m = \{c', v', b', \dots, l'\} \times k_1 \quad (11)$$

式中: c' 、 v' 、 b' 、 l' 等分别表示待运输的货物; k_1 表示货物的搬运状态。

如果 k_1 为 -1 时表示任务没有安排小车,如果为 0 则表示任务即将被搬运,如果等于 1 则表示任务在搬运途中。

根据以上方法,对所提物品进行了分类,把工作排队分为 3 个优先级,再利用第 2 个时间窗口的计算方法,对各加点时间窗口进行锁定。

4.2 结果分析

以部分栅格作为分析对象,运行序号 1 的 AGV 小车,使其运行到 3 附近,分别采用 3 种方法使其运动,对比结果如图 4 所示。

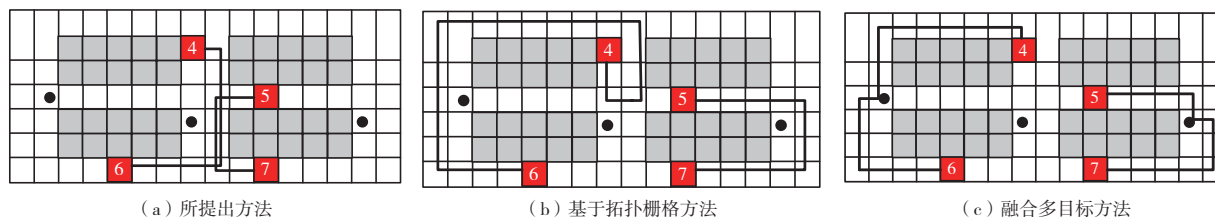


图 4 运行路径

分析图 4 可知,所提出方法共走过 12 个栅格到达目标位置,基于拓扑栅格方法共走过 24 个栅格,融合多目标规划方法共走过 18 个栅格。经过对比可知,所提出方法所行走的路径明显少于另外两种方法,各相差 12 个与 6 个栅格,优势较为明显。

算例分析过程中,3 种方法均能够寻找到相应的路径,而在实际配送中,会存在障碍物,为此,以上述栅格中有障碍点的部分为例,在有障碍物的工况下对比各个方法的运行工况,对比结果如图 5 所示。

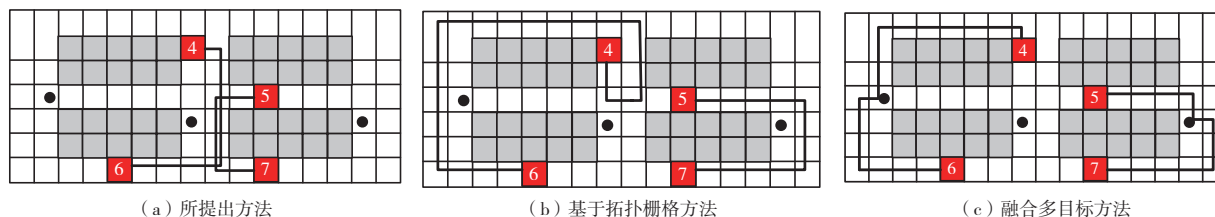


图 5 有障碍物工况下最短路径对比

图 5 中,黑色圆点表示障碍物,分别由序号 4 小车向序号 6 小车运输货物,由 7 号小车向 5 号小车运输货物。

所提方法在序号 4—序号 6 运输路径寻找上共走过 9 个栅格,没有发生碰撞情况;在 7 号小车到 5 号小车运输路径上寻找,共走过 6 个栅格,这两条路径寻找没有出现碰撞到障碍物的工况,均从障碍物周围绕过。

基于拓扑栅格模型的方法,在序号 4—序号 6 运输路径寻找上共走过 23 个栅格,寻找路径较远。原因是,在遇到障碍物的工况下,该方法选择从其他路段绕过,走到目的地,在这个过程中没有寻找到最短的路径;在 7 号小车到 5 号小车运输路径寻找上,共走过 12 个栅格。

融合多目标规划方法在规划后,在序号 4—序号 6 运输路径上寻找共走过 17 个栅格;在 7 号小车到 5 号小车运输路径上寻找共走过 12 个栅格。在这两条路径寻找过程中,均发生碰撞情况,在发生碰撞后,选择其他路径进行运输货物。

通过上述对比结果可知,所提出方法在序号 4—序号 6 号运输上,寻找到的路径较基于拓扑栅格方法少走 14 个栅格,较融合多目标规划方法少走 8 个栅格;在 7 号小车—5 号小车路径寻找上,较基于拓扑栅格方法、融合多目标规划方法少走 6 个栅格,证明所提出方法在有障碍物的工况下也能够寻找到最短路径,不发生碰撞情况。此次研究的优化模型效果较好的原因是:预先建立了障碍物模型,在路径规划初始阶段,充分考虑障碍物的影响并将寻找最短路径作为目标,有效提高了路径寻找效果。

5 实例分析

基于全面性和相互独立性的原则,应用 ET200S 远程通信模块与 PLC 建立 profinet 通信连接小车,在 720 m² 的范围内进行实例分析,即展示仓储 AGV 路径规划协同优化结果。以实心圆点和实心三角形代表两辆小车标志点,在同一条路线的时间窗口内,设置同一个装载任务,应用本文方法进

规划算法优化[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(1): 101-109.

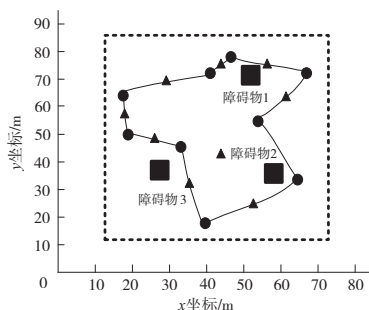


图 6 仓储 AGV 路径规划协同优化结果

如图 6 所示,在两辆小车同时执行装载任务时,本文方法可以同时绕开障碍物,避开同类小车且覆盖面较广,有利于保证仓储 AGV 行驶过程的安全性。

- [2] 郭兴海, 计明军, 刘双福. 融合多目标与能耗控制的无人仓库内 AGV 路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(5): 1268-1276.
- [3] 李俊兰, 张中伟, 吴立辉, 等. 面向多运输任务的节能单负载 AGV 路径规划研究[J]. 制造技术与机床, 2022(3): 62-67.
- [4] 杨瑶, 付克昌, 蒋涛, 等. 启发式 RRT 算法的 AGV 路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(12): 125-133.
- [5] 张飞, 张彬, 周烽, 等. 面向自动仓储的绳索牵引并机器人构型选择与参数优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 1-8.
- [6] 余娜娜, 李铁克, 王柏林, 等. 自动化分拣仓库中多 AGV 调度与路径规划算法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 171-180.
- [7] 于军琪, 李若琳, 赵安军, 等. 并行排序蚁群算法规划仓库 AGV 路径研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(4): 609-618.
- [8] 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.
- [9] 姜兴宇, 王明皓, 刘伟军, 等. 药品仓库堆垛机与 AGV 集成调度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 230-241.
- [10] 陈广锋, 余立潮. 多帧时间窗轮换算法规划仓储多 AGV 小车路径[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(23): 270-278.
- [11] 王晓军, 王博, 杨春霞, 等. 紧致密集 Auto Store 系统 AGV 路径规划与避碰策略[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(15): 259-270.
- [12] 袁洋, 叶峰, 赖乙宗, 等. 结合负载均衡与 A* 算法的多 AGV 路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(5): 251-256.
- [13] 冯浩然, 吴瑞明, 傅阳, 等. 基于 ROS 与融合算法的 AGV 路径规划研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(9): 55-60.
- [14] 廉胤东, 谢巍. 基于视觉引导多 AGV 系统的改进 A* 路径规划算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 1881-1890.

收稿日期:2022-10-24

- 3) 在没有障碍物与有障碍物工况下, 小车均能够寻找到最短路径, 并不发生碰撞, 在很大程度上提高了仓储的运作效率。

此次研究获得了较好的应用效果,但是还有不足之处,因为货架调度具有动态性,在后续研究中还需要结合该特点做进一步分析。

[1] 徐晗,金隼,罗磊,等. 基于拓扑栅格建模的 AGV 路径

(上接第 165 页)

参考文献:

- [5] HG/T 3796.5—2005 圆盘涡轮式搅拌机[S].
- [6] 崔亮. 基于 ANSYS FLUENT Meshing 的复杂模型网格划分[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2014(4): 56-58.
- [7] 闫文标. 基于 FLUENT 三种多相流模型的选择及应用说明[J]. 云南化工, 2020, 47(4): 43-44.
- [8] 张仪, 李兵, 白玉龙, 等. 液固流态化动态过程中相间作用力的数值模拟及实验验证[J]. 化工学报, 2020, 71(11): 5129-5139.

收稿日期:2022-11-07