



计算机工程与应用
Computer Engineering and Applications
ISSN 1002-8331, CN 11-2127/TP

《计算机工程与应用》网络首发论文

题目: 基于时间窗模型的双向机器人路径规划方法
作者: 王琛, 茅健
网络首发日期: 2020-10-26
引用格式: 王琛, 茅健. 基于时间窗模型的双向机器人路径规划方法. 计算机工程与应用. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20201023.1737.011.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于时间窗模型的双向机器人路径规划方法

王琛, 茅健

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘要: 随着智能化与自动化的发展, 机器人应用越来越广泛; 多机器人路径规划和协作问题就成为当前关注的焦点。针对以上问题, 提出了一种改进的遗传算法。在初始化总群时, 通过选择中点的相邻点扩大选择范围确保线路连续。通过种群适应度函数改进路径平滑度防止转向次数过多。为了防止遗传算法陷入局部最优解, 通过轮盘赌的方法确保一部分非最优个体。在优化后的遗传算法基础上根据优先级顺序, 并结合提出的时间窗模型, 对冲突类型进行分类处理并制定对应的协调方案。仿真结果表明, 该方法可以有效地解决多机器人的路径冲突问题, 通过合理的规划线路提高系统效率。

关键词: 路径规划; 时间窗; 自动搬运; 机器人

文献标志码: A 中图分类号: TP3 doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2005-0286

王琛, 茅健. 基于时间窗模型的双向机器人路径规划方法. 计算机工程与应用

WANG Chen, MAO Jian. Path planning method of bidirectional robot based on time window model. Computer Engineering and Applications

Path planning method of bidirectional robot based on time window model

WANG Chen, MAO Jian

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: With the development of intelligence and automation, robots are more and more widely used; multi-robot path planning and collaboration issues have become the focus of current attention. In response to the above problems, an improved genetic algorithm is proposed. When initializing the total group, the selection range is expanded by selecting the adjacent points of the midpoint to ensure the continuity of the line. The path fitness is improved by the population fitness function to prevent excessive turning times. Some non-optimal individuals are guaranteed through roulette, which can effectively prevent the algorithm from falling into the local optimal solution. Based on the optimized genetic algorithm, according to the priority order, combined with the proposed time window model, the conflict types are classified and the corresponding coordination plan is formulated. The simulation results show that this method can effectively solve the path conflict problem of multi-robots, and improve the system efficiency through reasonable route planning.

Key words: Path planning; Time window; Automatic handling; Robot

作者简介: 王琛(1990-),男,硕士研究生,研究领域为路径规划与视觉识别,E-mail: wangchen006@126.com;茅健(1972-),男,博士,教授,研究领域为智能控制技术,精密测量与传感器。

1 引言

提起搬运设备,一般人首先想到的无非是叉车、卡车等传统的搬运设备。随着智能化与自动化的发展,制造业对自动化智能化的需求渐增,对提高制造系统的物流效率,进而提高整个生产系统的生产效率需求更为强烈,机器人搬运车应运而生^[1]。双驱双向机器人不仅速度快、精度高、可靠性高、操作维护方便,并且沿预定轨迹行驶,因而被广泛使用^[2]。物流配送系统优化主要是进行配送车辆的合理调度^[3]。优化后的配送路径不仅大大提高了企业仓储的运行效率,而且将人们从繁重的体力劳动中解放出来,同时也避免了安全事故的发生^[4]。

宋宇,王志明^[5]将 RRT 算法用于栅格环境下产生初始路径,其次提出一种新的插入算子,最后进行路径优化。党宏社,孙心妍^[6]采用遗传算法进行机器人路径规划,并加入物料类型选择的循环套,通过多次实验确定最合理的控制参数,从而产生机器人运输多种类型物料的最优路径结果。李天童,宁平凡^[7]在传统的障碍物栅格地图中叠加了环境安全信息,构建了融合信息栅格地图,提出了一种改进的遗传路径规划算法。以上算法都是针对单机器人路径规划。

通常在实际生产时,需要多台机器人同时进行货物运输^[8]。因为受到空间和场地的影响,多机器人不能自由的穿越障碍物,所以多机器人路径规划就成为众多挑战中的一个^[9]。通常我们遇到的算法主要有、A*算法^{[10][11]}、遗传算法^{[12][13]}、模拟退火算法^[14]、Dijkstra 算法^[15]等。孟祥忠,刘健^[16]将时间窗算法和 Dijkstra 算法相结合,依次规划各机器人的路径,并采用实时更新位置信息和时间窗排布的方法对冲突路段进行路径动态规划。虽然能得出最短路径的最优解,但由于它遍历计算的节点很多,所以效率低。袁洋,叶峰^[17]摒弃了传统 A*算法只考虑单一运行路程的评价函数,引入了运行路程结合区域负载作为新评价函数的方式。在几乎不增大运行路程的前提

下,实现了机器人运行路网的区域负载均衡。齐权,张新敏^[18]在分析影响柔性生产车间内机器人运行效率因素的基础上,建立了多机器人路径优化数学模型,并提出一种两阶段的路径规划方法。孙炜等人^[19]以路径分割成节点的方法对 A*算法进行改进,虽然可以获得比遗传算法更快的解决方案,但很容易地陷入一些局部极小值,而遗传算法总是可以达到全局最优或近似全局最优。

对于多台机器人同时行驶,不仅要使每台机器人行驶路径最短,用时最少,还要能够保证机器人之间的协作问题^[20]。针对以上问题,提出了一种改进的遗传算法。在初始化总群时,尽可能使随机生成的路径较短,通过选择中点的相邻点扩大选择范围确保线路连续。种群适应度函数保证机器人路径最短和改进路径平滑度防止转向次数过多。为了防止遗传算法陷入局部最优解,通过轮盘赌的方法确保一部分非最优个体。在改进后的遗传算法基础上,对车辆冲突类型进行分类处理,明确辨别方法。根据优先级顺序,并结合提出的时间窗模型,制定对应的协调方案,以实现多机器人物流系统总时间最少为目标的多机器人路径规划系统。

2 时间窗模型说明

为防止单车道双向机器人系统中的冲突,有必要确定每个正在运行的机器人占据路段的时间段,即机器人系统路径规划的时间窗口。它的真正含义是从进入某个路径到离开该路径的时间段,在此期间,机器人有权延特定方向使用该路径。在机器人路径规划中,时间窗算法由于其简单性和实用性而被广泛使用。

建立模型的前提条件:

- (1) 机器人可以在每个路线上沿两个方向行驶;
- (2) 在路径的特定状态下,机器人以恒定速度行驶;
- (3) 为避免碰撞,沿同一方向行驶的机器人

通过一定的安全措施确定机器人之间的间隔距离。

(4) 忽略通过交叉点后的减速时间和加速时间；

(5) 忽略机器人从等候站返回路径的时间；

(6) 任务期间忽略机器人的装卸时间；

(7) 任务的优先级可以预先设置，通常情况下优先级设置顺序为任务调度顺序。

基于以上假设，多机器人路径规划系统的时间窗口公式：

$$T = \{t_{jk}^m = [t_{jk}^{ms}, t_{jk}^{me}]\} \quad (1)$$



图 1 机器人
Fig.1 Robot

时间窗口代表一段时间段及机器人从进入路段到离开路段这段时间。根据市面上一些常见的设备如图 1，确定下列相关参数： r 为弯曲路段上的转弯半径，取 2m； v_{z1} 为空载机器人在直线路段的速度，通常取 3 m/s； v_{z2} 为空载机器人在弯曲路段的速度，通常取 1.5 m/s； v_{l1} 为运货机器人在直线路段的速度，通常取 2 m/s； v_{l2} 为运货机器人在弯曲路段的速度，通常取 1 m/s； l_{jk} 表示 jk 路段的直线距离； t_{jk}^m 表示 jk 路段的第 m 个时间窗口； t_{jk}^{ms} 表示 jk 路段的第 m 个时间窗口的开始时间； t_{jk}^{me} 表示 jk 路段的第 m 个时间窗口的结束时间；

3 基于时间窗口的算法流程

3.1 建立模型

根据上述的条件，定义机器人物流规划系统不能只依据最短路径。机器人物流规划系统的最终目标是系统所有机器人完成规定任务的时间最少。它

的目标函数是：

$$Target_{\min} = \sum_{i=1}^n a_i (t_{ti} + t_{ci}) \quad (2)$$

它的约束函数是：

$$\sum_{i=1}^n a_i \leq n \quad (3)$$

$$N_{jk}^{t_{jk}^m} = y_{jk} \sum_{i=1}^n x_{it_{jk}^m} \quad (4)$$

$$N_{kj}^{t_{kj}^m} = y_{jk} \sum_{i=1}^n z_{it_{kj}^m} \quad (5)$$

$$n \leq \sum_{i=1}^p \sum_{i=1}^p y_{ik} \quad (6)$$

$$N_{jk}^{t_{jk}^m} N_{kj}^{t_{kj}^m} = 0 \quad (7)$$

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{机器人 } i \text{ 已接受任务} \\ 0, & \text{机器人 } i \text{ 未接受任务} \end{cases} \quad (8)$$

$$x_{it_{jk}^m} = \begin{cases} 1, & \text{机器人 } i \text{ 在 } t_{jk}^m \text{ 内已在路径 } jk \text{ 上} \\ 0, & \text{机器人 } i \text{ 在 } t_{jk}^m \text{ 内不在路径 } jk \text{ 上} \end{cases} \quad (9)$$

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{交叉口 } j \text{ 到 } k \text{ 的路径存在} \\ 0, & \text{交叉口 } j \text{ 到 } k \text{ 的路径不存在} \end{cases} \quad (10)$$

$$z_{it_{kj}^m} = \begin{cases} 1, & \text{机器人 } i \text{ 在 } t_{kj}^m \text{ 内已在路径 } kj \text{ 上} \\ 0, & \text{机器人 } i \text{ 在 } t_{kj}^m \text{ 内不在路径 } kj \text{ 上} \end{cases} \quad (11)$$

参数说明： n 表示仓储系统中存在的机器人数量； t_{ti} 表示第 i 台机器人执行系统任务所需的时间； t_{ci} 表示第 i 台向系统输入任务到开始执行规定任务所花费的最少时间； $N_{jk}^{t_{jk}^m}$ 表示在 t_{jk}^m 时间窗内在路段 jk 上的机器人数量； $N_{kj}^{t_{kj}^m}$ 表示在 t_{kj}^m 时间窗内在路段 kj 上的机器人数量。

公式的含义：式 (3) 表示执行任务的机器人不大于物流系统中的机器人数量；式 (4) 和 (5) 表示在 t_{jk}^m 时间窗内在路段 jk 上的机器人数量；式 (6) 表示路径总数大于物流系统中机器人数量；式 (7) 表示在 t_{jk}^m 时间窗内在路段 jk 上不存在沿相反方向行驶的机器人。

3.2 优化后的遗传算法

遗传算法是一种智能优化算法，主要用来解决优化问题，其主要步骤为种群初始化、适应度函数计算、选择、交叉和变异。应用于移动机器人路径规划时其主要步骤，流程图如图 2 所示。下面将对每步的方法做详细介绍。

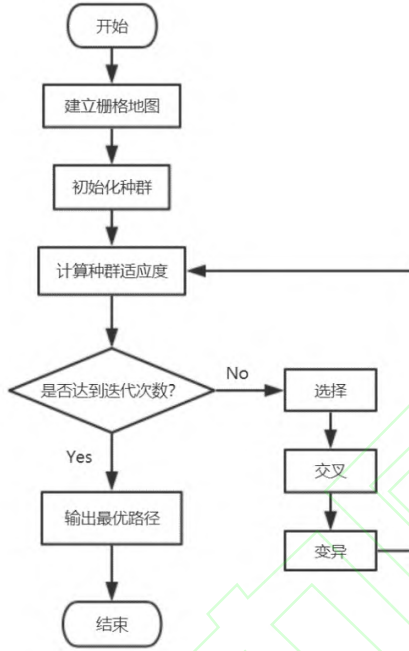


图 2 遗传算法流程图
Fig.2 Flow chart of genetic algorithm

3.2.1 建立栅格地图

在对机器人进行路径规划时，需要先建立地图。本文通过栅格法建立空间地图模型，栅格越密集，空间中各种环境信息表示越精确。

3.2.2 初始化种群

初始化种群要求随机产生多条可行路径，可行路径表示不与障碍物栅格相碰撞的路径。可行路径的产生分为两个主要步骤。

首先产生一条间断路径。机器人每次行走一个栅格，因此每一行或者每一列至少有一个栅格在可行路径中。所以初始化时先按顺序在每一行或每一列随机取出一个无障碍栅格，形成一条间断的路径。

第二步是将间断的路径连接为连续路径。在这一步中首先从第一个栅格开始判断相邻的两个栅格是否为连续栅格，栅格是否连续的判断方法为： $S = \max \{abs(x_{i+1} - x_i), abs(y_{i+1} - y_i)\}$ 。若 S 等于 1 则说明两个相邻栅格连续，反之不连续。

对于不连续的栅格取两个栅格的中点栅格，中点栅格的坐标计算为：

$$x_{middle} = \text{int}(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}) \quad (12)$$

$$y_{middle} = \text{int}(\frac{y_{i+1} + y_i}{2}) \quad (13)$$

若中点栅格为障碍物栅格，则取相邻栅格。如果相邻栅格是障碍物栅格，则删除这条路径。如果中点栅格或者相邻栅格为无障碍栅格且不在路径中则插入路径中，继续判断新插入的栅格和新插入的栅格的前一个栅格是否连续，若不连续则循环以上步骤，直到两个栅格连续。当两个栅格连续后取下一个栅格，循环以上步骤，直到整条路径连续。初始化一条路径的流程图如图 3 所示。

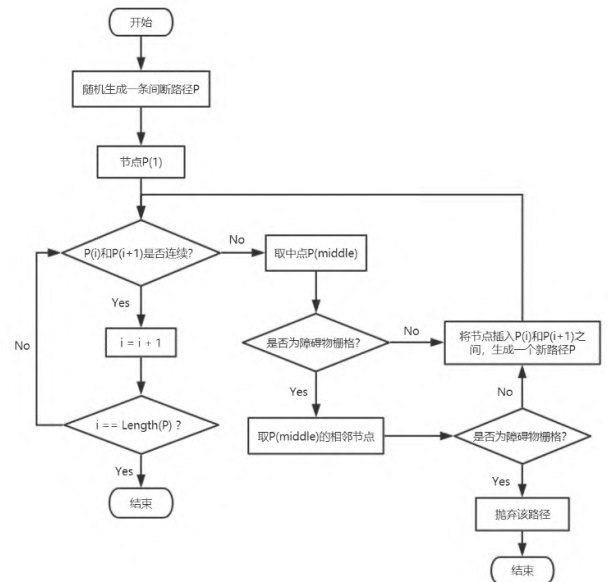


图 3 初始化种群
Fig.3 Initialized population

3.2.3 种群适应度

适应度函数分成两部分，分别用来判断路径的长短和平滑程度。路径长度的计算相对简单，公式如下：

$$d_1 = \sum_{i=1}^{end-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (14)$$

要求的是机器人的路径最短，而选择方式采用的是轮盘赌的方式，所以适应度函数的第一部分为：

$$fit_1 = 1/d_1 \quad (15)$$

机器人由于运动学和动力学的约束，行进时拐弯不宜过大，并且相对平滑的路径有利于机器人的行驶，因此产生的路径有平滑度的要求。路径之间的夹角越大，用来表示路径夹角的三个点之间的距离就越大，路径也就越平滑，计算公式如下：

$$d_2 = \sum_{i=1}^{end-2} \sqrt{(x_{i+2} - x_i)^2 + (y_{i+2} - y_i)^2} \quad (16)$$

d_2 的值可对应路径中连续三点的夹角的情况分别为 180 度和直角，其中 180 度的三点成一直线，平滑度最好，直角次之。对除直线外情况给予惩罚 30，可以根据实际情况改动惩罚的大小。惩罚之和的倒数即为适应度函数的第二部分 fit_2 。

适应度函数的两部分需要取一个权重，权重公式如下：

$$fit = afit_1 + bfit_2 \quad (17)$$

根据路径长度和平滑度之间的权重选择参数 a 和 b 。

3.2.4 选择方法

选择方法采用简单的基于概率的轮盘赌方法。首先计算出所有个体的适应度函数的和，再计算每一个个体所占的比率，计算公式如下：

$$p_i = fit_i / \sum_{i=1}^{end} fit_i \quad (18)$$

然后根据每个个体的概率，以轮盘赌的方式选

择出下一代个体。为了防止遗传算法陷入局部最优解，通过轮盘赌的方法确保一部分非最优个体。

3.2.5 交叉

首先需要确定一个交叉概率 P_c ，产生一个 0 到 1 的随机数，并和交叉概率 P_c 比较，若小于 P_c 则进行交叉操作。交叉方式采用的是单点交叉的方式，具体的交叉操作是找出两条路径中所有相同的点，然后随机选择其中的一个点，将之后的路径进行交叉操作。具体的流程图如图 4 所示。

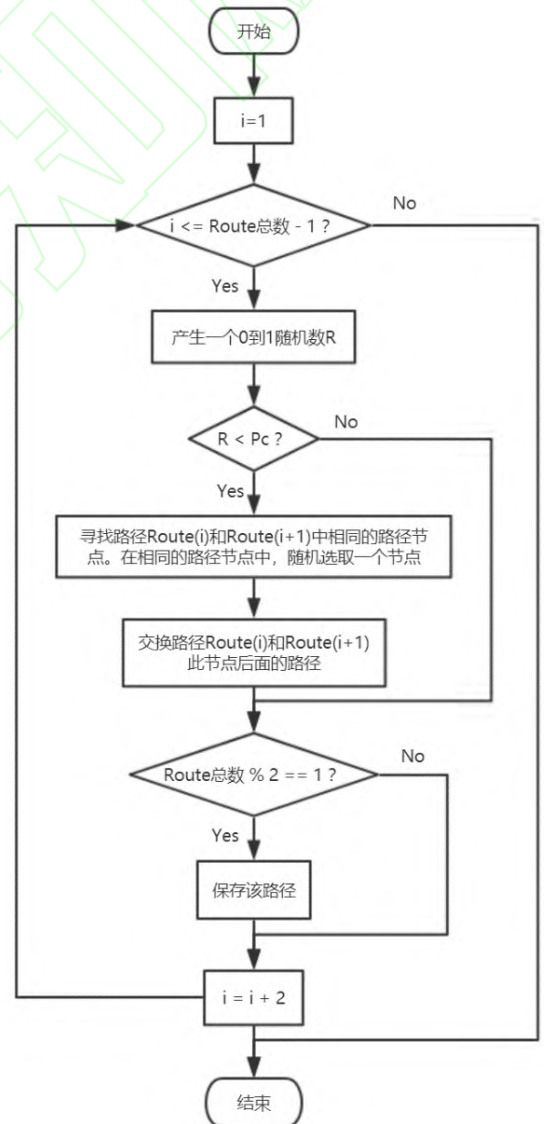


图 4 交叉

Fig.4 Cross

3.2.6 变异

首先需要确定一个变异概率 P_m ，产生一个 0 到 1 的随机数，并和变异概率 P_m 比较，若小于 P_m 则进行变异操作。变异方法是随机选取路径中除起点和终点以外的两个栅格，将这两个点进行连续操作。此时有可能无法产生连续的路径，则需要重新选择两个栅格执行以上操作，直到完成变异操作。具体的流程图如图 5 所示。

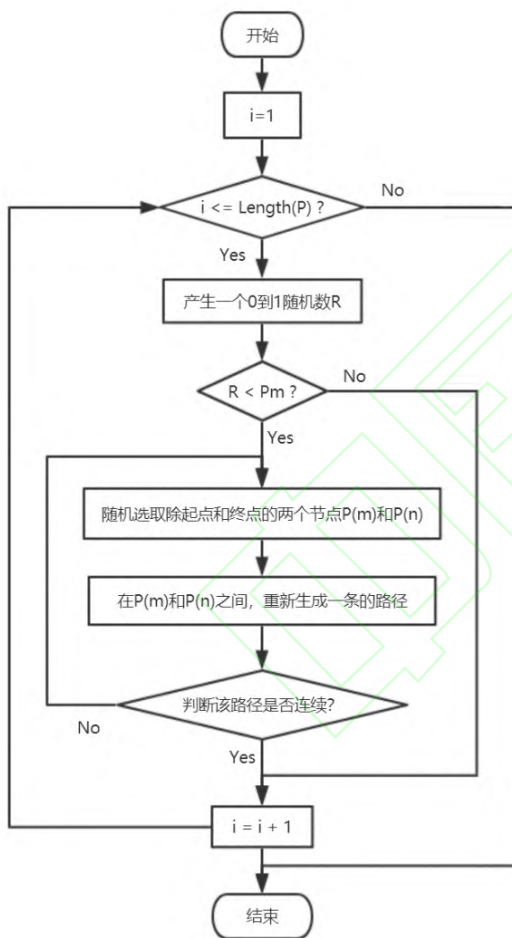


图 5 变异
Fig.5 Variation

3.2.7 算法说明

在 Matlab 2018a, i7-9700KF 的 CPU 环境下进行仿真。改进遗传算法的平均计算时间与路径长度之间的关系，如表 1 所示。

表 1 时间与路径长度之间的关系

Table 1 The relationship between time and path length

平均计算时间/s	路径长度/m
0.23	160

3.3 基于时间窗的算法流程

当系统中输入任务时，机器人路径规划系统都会根据任务设定的优先级对整体任务进行规划。该算法流程是：

- 1) 向系统中导入任务列表。
- 2) 找出优先级顺序与时间顺序相符的任务和优先级顺序与时间顺序不相符的任务。
- 3) 优先级较高的任务在执行完当前任务是否能参与次一级任务从当前停靠点到达任务出发点的运行。时间顺序较早的任务在执行完当前任务是否能参与优先级较高任务从当前停靠点到达任务出发点的运行。
- 4) 明确各个机器人的任务分配，根据优化后的遗传算法确定运输线路。
- 5) 在步骤 4) 的基础上，判断各个任务从开始到结束的运输线路的是否存在重合的节点。如果存在，根据重合节点数判断冲突的类型，如果不存在，跳转到步骤 8)。
- 6) 如果机器人在同一条线路上重合的节点数等于 1 表明可能存在交叉冲突。交叉冲突如图 6 所示。通过机器人通过交叉节点的时间判断是否存在交叉冲突。如果存在交叉冲突，次优先级任务选择等待和重新规划路径，通过比较选择较好的方案。



图 6 交叉冲突
Fig.6 Cross conflict

- 7) 如果机器人在同一条线路上重合的节点数大于等于 2 且顺序相同表明可能存在同向冲突，同向冲突如图 7 所示。判断所容纳的数量是否小于

道路承受能力, 来确定是否存在同向冲突。



图 7 同向冲突

Fig.7 Co-direction conflict

8) 如果机器人在同一条线路上重合的节点数大于等于 2 且顺序相反表明可能存在相向冲突, 相向冲突如图 8 所示。通过机器人通过相向冲突节点的时间判断是否存在交叉冲突。如果存在交叉冲突, 依照任务的优先级从低到高的顺序, 选择等待和重新规划优先级低的任务, 时间成本太高, 对优先级高的任务进行线路规划, 路径增加则放弃当前新路径。以上情况都不满足, 再次对优先级低的任务选择等待和重新进行路径规划, 选择出最优路径。



图 8 相向冲突

Fig.8 Opposing conflict

9) 得出最优路径。

4 对基于时间窗的算法进行验证计算

4.1 情景说明

随着货物数量的爆炸性增长和用工成本的不断增加, 更高效的仓储和物流系统就成为越来越多企业的首选。现在简化了一个大型仓库, 如图 9 所示。

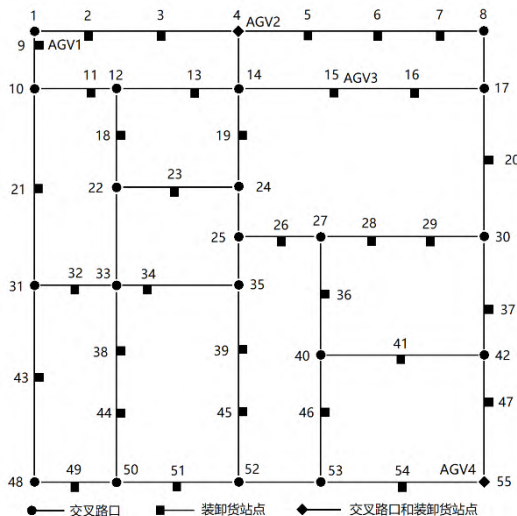


图 9 仓库作业的路网结构和作业站点

Fig.9 The road network structure and operation sites

任务 1、任务 2、任务 3 和任务 4 是 4 个即将输入系统任务, 具体任务为见表 2, 优先级数字越小优先级越高。物流系统中有 4 台机器人分别是机器人 1、机器人 2、机器人 3 和机器人 4。当前处于空载空闲状态, 停靠点分别是在 9、4、15 和 55 号站点等待系统调用。

表 2 机器人系统作业任务表

Table 2 Task list of robot system

任务	起始点	目标点	任务开始时间	优先级
1	11	28	0	1
2	13	38	10	2
3	19	34	20	3
4	54	26	10	4

4.2 最优路径计算

4.2.1 最优任务分配和确定运输线路

根据遗传算法, 可以计算出机器人到起点的相应最短路径以及最短的行驶时间。通过比较确定任务分配的机器人, 在此基础上计算完成任务所需的时间。

分别计算任务 1、任务 2、任务 3 和任务 4 调用机器人到达各自任务起点的路径, 如表 3、4、5、6 所示。

表 3 机器人 1、2、3、4 到达起始点 11 的优化路径

Table 3 The optimized path of robots 1, 2, 3, 4 to point 11

机器人 1	9-10-11
机器人 2	4-14-13-12-11
机器人 3	15-14-13-12-11
机器人 4	55-54-53-52-51-50-44-38-33-22-18-12-11

执行任务 1 时, 分别计算机器人 1、机器人 2、机器人 3、机器人 4 到达起点 11 的时间。因为机器人 1 执行任务 1 任务所花费的时间最少, 所以选择机器人 1 执行任务 1。

表 4 机器人 1、2、3、4 到达起始点 13 的优化路径

Table 4 The optimized path of robots 1, 2, 3, 4 to point 13

机器人 1	28-27-26-25-24-19-14-13
机器人 2	4-14-13
机器人 3	15-14-13
机器人 4	55-54-53-52-45-39-35-25-24-19-14-13

使用机器人 1 计算任务 2 时, 机器人 1 已经完成任务 1, 因此需要从 308.04 秒开始计算。通过对比发现机器人 2 到达起始点 13 的时间所花费的时间最少, 因此选择机器人 2 执行 Task2 任务。

表 5 机器人 1、2、3、4 到达起始点 19 的优化路径

Table 5 The optimized path of robots 1, 2, 3, 4 to point 19

机器人 1	28-27-26-25-24-19-14-13
机器人 2	4-14-13
机器人 3	15-14-13
机器人 4	55-54-53-52-45-39-35-25-24-19-14-13

机器人 1 和机器人 2 必须先完成任务 1 和任务 2, 才能够执行任务 3。任务 3 的优先级高于任务 4, 任务 4 的开始执行时间早于任务 3。分别计算机器人 1、机器人 2、机器人 3、机器人 4 到达任务 3 起始点 19 的时间, 机器人 3 所花费的时间最少。在上述基础上, 执行任务 4。当执行完任务 4, 机器人 4 到达起始点 19 的时间大于机器人 3 到达任务 3 起始点 19 所花费的时间。选择机器人 3 执行任务 3。

表 6 机器人 1、2、3、4 到达起始点 54 的优化路径

Table 6 The optimized path of robots 1, 2, 3, 4 to point 54

机器人 1	28-27-36-40-46-53-54
机器人 2	38-44-50-51-52-53-54
机器人 3	34-35-39-45-52-53-54
机器人 4	55-54

最优任务分配: 任务 1 选择机器人 1; 任务 2 选择机器人 2; 任务 3 选择机器人 3; 任务 4 选择机器人 4。它们到达起始点的路径分别是 9-10-11、4-14-13、15-14-19 和 55-54。运输线路: 任务 1 的运输线路: 9-10-11-12-13-14-19-24-25-26-27-28; 任务 2 的运输线路: 4-14-13-12-18-22-33-38; 任务 3 的运输线路: 15-14-19-24-25-35-34; 任务 4 的运输线路: 55-54-53-46-40-36-27-26。

4.2.2 当前线路时间窗

系统当前线路时间窗结果如表 7、8、9、10 所示。

表 7 机器人 1 执行任务 1 的优化路径

Table 7 The optimized path of robot 1 to perform task 1

站	9-10-11-12-13-14-19-24-25-26-27-28
---	------------------------------------

点	
t/s	0-21.43-40.76-60.76-105.76-134.76-166.9-196.9-229.04-253.04-278.04-308.04

表 8 机器人 2 执行任务 2 的优化路径

Table 8 Robot 2's optimized path for task 2

站点	4-14-13-12-18-22-33-38
t/s	10-34.76-54.09-98.09-130.23-160.23-220.23-260.23

表 9 机器人 3 执行任务 3 的优化路径

Table 9 Robot 3's optimized path for task 3

站点	15-14-19-24-25-35-34
t/s	20-54.76-74.09-104.09-134.09-166.23-225.23

表 10 机器人 4 执行任务 4 的优化路径

Table 10 Robot 4's optimized path for task 4

站点	55-54-53-46-40-36-27-26
t/s	10-43.33-95.47-131.97-169.47-206.97-246.61-270.61

4.2.3 优化当前线路时间窗冲突

分析任务发生冲突的时间窗详细情况如下:

1) 任务 1:

机器人 1 与机器人 2:

$$t_{12,13}^1 = [60.76, 105.76], t_{13,14}^1 = [105.76, 134.76]$$

机器人 1 与机器人 3:

$$t_{14,19}^1 = [134.76, 166.9], t_{19,24}^1 = [166.9, 196.9]$$

$$t_{24,25}^1 = [196.9, 229.04]$$

机器人 1 与机器人 4: $t_{26,27}^1 = [253.04, 278.04]$

2) 任务 2:

机器人 2 与机器人 1:

$$t_{14,13}^2 = [34.76, 54.09], t_{13,12}^2 = [54.09, 98.09]$$

3) 任务 3:

机器人 3 与机器人 1:

$$t_{14,19}^3 = [54.76, 74.09], t_{19,24}^3 = [74.09, 104.09]$$

$$t_{24,25}^3 = [104.09, 134.09]$$

4) 任务 4:

机器人 4 与机器人 1: $t_{27,26}^1 = [270.61, 246.61]$

在路径 12-13 和 13-14 上, 机器人 1 和机器人 2 某一时间段内沿相反方向行驶。机器人 1 和机器人 3 在路径 14-19、19-24 和 24-25 上沿相同方向行驶。机器人 1 和机器人 4 沿相反方向行驶。

解决线路冲突的方法主要有两种: 避让和

尝试新的线路,通过尝试两种可能方案,选择花费时间较短的作为最优方案。

(1) 避让

当机器人 1 按照任务 1 规划的线路行驶和机器人 2 按照任务 2 规划的线路行驶时,在节点 12-13-14 处产生碰撞。为避免该碰撞,将如任务 2 的时间节点后移动,至少需要推迟的时间是:100 s。

(2) 尝试新的线路

路径的发生冲突时,依照任务的优先级从低到高的顺序,重新规划优先级低的任务,路径增加则放弃当前新路径,对优先级高的任务进行线路规划,路径增加则放弃当前新路径。以上情况都不满足,再次对优先级低的任务重新进行路径规划。对比新路径和在当前路径基础上进行避让,选择出最优路径。

任务 2 的优先级低于任务 1,因此重新对任务 2 进行线路规划。新路径大于原路径,转而寻找任务 1 的新路径。结果如下:任务 1 的路径是 9-10-11-12-18-22-23-24-25-26-27-28;任务 2 的路径是 4-14-13-12-18-22-33-38。机器人 1 和机器人 2 在执行任务 1 和任务 2 时,避免了在线路 12-13-14 冲突。

对于 26-27 路径的冲突,因任务 4 优先级更低,对任务 4 重新进行路径规划,见表 11。运输路径是 55-54-53-52-45-39-35-25-26,所花费时间 310.61 s。在原路径基础上进行等待,生成的路径是 55-54-53-46-40-36(等待)-27-26,所花费时间 260.61 s。在解决了冲突后,任务 1 和 4 的时间窗口如表 12 和 13 所示。

表 11 机器人 4 执行任务 4 重新进行路径规划

Table 11 Robot 4 performs task 4 and re-plans the path

站点	55-54-53-52-45-39-35-25-26
t/s	10-43.33-93.33-145.47-184.47-224.47-264.47-296.61-320.61

表 12 任务 1 最优路径(优化后)

Table 12 The optimal path of task 1 (Optimized)

站点	9-10-11-12-18-22-23-24-25-26-27-28
t/s	0-21.43-40.76-59.76-91.9-124.04-160.54-200.18-231.32-255.32-280.32-310.32

表 13 任务 4 最优路径(优化后)

Table 13 The optimal path of task 4 (Optimized)

站点	55-54-53-46-40-36-等待时间-27-26
t/s	10-43.33-95.47-131.97-169.47-206.97-35.71-282.32-306.32

机器人 4 的等待时间:280.32-246.61+2=35.71 s

新路径的可能冲突的时间窗详细分析:

1) 任务 1:

机器人 1 与机器人 2:

$$t_{12,18}^1 = [59.76, 91.9], t_{18,22}^1 = [91.9, 124.04]$$

机器人 1 与机器人 3: $t_{24,25}^1 = [200.18, 231.32]$

机器人 1 与机器人 4: $t_{26,27}^1 = [255.32, 280.32]$

2) 任务 2:

机器人 2 与机器人 1:

$$t_{12,18}^2 = [98.09, 130.23], t_{18,22}^2 = [130.23, 160.23]$$

3) 任务 3:

机器人 3 与机器人 1: $t_{24,25}^3 = [104.09, 134.09]$

4) 任务 4:

机器人 4 与机器人 1: $t_{27,26}^1 = [246.61, 270.61]$

任务 1 和任务 4 的新路径所花费的时间增多,分别是 310.32-380.04=2.28 s, 320.61-306.32=14.29 s。

任务 1 重新规划路径增加的 2.28s 在可接受范围内,如果任务 1 不重新规划,任务 2 将会推迟 100 s。任务 4 重新规划路径增加的 15.9 s 大于推迟时间窗的 11.5 s,故对任务 4 使用等待的方法来避免冲突。

5 结束语

通过对单车道双向多机器人路径规划问题进行研究,提出了一种基于时间窗的算法流程,同时通过一个模型进行验证证明了算法流程的有效性。为多机器人协同作业,提供了新的选择。未来将进一步对多机器人协同作业进行研究,为了提高效率可以让各机器人预先出发,从而为执行任务进一步节约时间。以及不同性能的双车道双向机器人以及机器人在交叉路口相遇,在保证安全的前提下如何避障。

参考文献:

- [1] 颜灿明,张程.基于 MQTT 的 AGV 自动导航机器人[J].单片机与嵌入式系统应用,2020,20(4):22-24+28.
Canming Yan, Cheng Zhang. AGV automatic navigation robot based on MQTT[J]. Microcontroller and Embedded System Application, 2020,20(4):22-24+28.
- [2] 陈亚,张栗铭,张雪峰,李欢欢,寇海波.基于 SAPI 的双驱双向 AGV 语音控制系统的设计[J].北京石油化工学院学报,2020,28(1):54-58.
Ya Chen, Liming Zhang, Xuefeng Zhang, Huanhuan Li, Haibo Kou. Design of a dual-drive bidirectional AGV voice control system based on SAPI[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2020,28(1):54-58.
- [3] 范厚明,岳丽君,李荡,马梦知.考虑路径冲突的 AGV 配置与调度优化[J].运筹与管理,2020,29(5):43-51.
Houming Fan, Lijun Yue, Dang Li, Mengzhi Ma. AGV Configuration and Scheduling Optimization Considering Path Conflicts[J]. Operational Research and Management, 2020,29(5):43-51.
- [4] 齐权.混入 U 型框架车的某装配车间多 AGV 路径优化问题研究[D].沈阳工业大学,2019.
Quan Qi. Research on multi-AGV path optimization of an assembly shop mixed with U-shaped frame car[D]. Shenyang University of Technology, 2019.
- [5] 宋宇,王志明.基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J].现代电子技术,2019,42(24):172-175.
Yu Song, Zhiming Wang. Mobile robot path planning based on improved genetic algorithm[J]. Modern Electronic Technology, 2019,42(24):172-175.
- [6] 党宏社,孙心妍.基于遗传算法的工厂 AGV 路径优化研究[J].电子产品世界,2020,27(1):48-51+73.
Hongshe Dang, Xinyan Sun. Study on factory AGV path optimization based on genetic algorithm[J]. Electronic Product World, 2020,27(1):48-51+73.
- [7] 李天童,宁平凡,牛萍娟.基于改进遗传算法的工厂 AGV 安全路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2020(3):160-163.
Tiantong Li, Pingfan Ning, Pingjuan Niu. Factory AGV safe path planning based on improved genetic algorithm[J]. Combined Machine Tool and Automated Machining Technology, 2020(3):160-163.
- [8] 刘庆周,吴锋.多智能体路径规划研究进展综述[J].计算机工程,2020:1-13.
Qingzhou Liu, Feng Wu. Summary of the research progress of multi-agent path planning[J]. Computer Engineering, 2020:1-13.
- [9] FANTIMP, MANGINIAM, PEDRONCELLIG, et al. A decentralized control strategy for the coordination of AGV systems[J]. Control Engineering Practice, 2018, 70: 86.
- [10] 王云常,戴朱祥,李涛.基于 A 星算法与人工势场法的无人机路径规划[J].扬州大学学报(自然科学版),2019,22(3):36-38+49.
Yunchang Wang, Zhuxiang Dai, Tao Li. UAV path planning based on A star algorithm and artificial potential field method[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2019,22(3):36-38+49.
- [11] LIN Na, LI Tian-xiao. Urban UAV Route Planning Based on Bidirectional A* Algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 33(4): 55-60.
- [12] 李少波,宋启松,李志昂,张星星,栢龙炫.遗传算法在机器人路径规划中的研究综述[J].科学技术与工程,2020,20(2):423-431.
Shaobo Li, Qisong Song, Zhiang Li, Xingxing Zhang, Longxuan Zhe. A review of genetic algorithms in robot path planning[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(2):423-431.
- [13] Nazarahari M, Khanmirza E, Doostie S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced Genetic Algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 115(JAN.):106-120.
- [14] 杨志龙.模拟退火算法在室内定位中的应用[J].北京测绘,2020,34(3):356-360.
Zhilong Yang. The application of simulated annealing algorithm in indoor positioning[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2020,34(3):356-360.
- [15] Qinghe L, Haiwei L, Yao W, et al. An Optimal Trajectory Planning for Autonomous Vehicles Based on Vehicle Dynamics Constraints[C]//2019 3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI). IEEE, 2020.
- [16] 孟祥忠,刘健,李鹏.多 AGV 定位和路径规划方法研究[J].工业仪表与自动化装置,2019(5):7-10+29.
Xiangzhong Meng, Jian Liu, Peng Li. Research on multi-AGV positioning and path planning method[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2019(5):7-10+29.
- [17] 袁洋,叶峰,赖乙宗,赵雨亭.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.
Yang Yuan, Feng Ye, Yizong Lai, Yuting Zhao. Multi-AGV path planning combining load balancing and A* algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2020,56(5):251-256.
- [18] 齐权,张新敏.基于改进克隆选择算法的多 AGV 路径规划研究[J].物流工程与管理,2019,41(8):96-99.
Quan Qi, Xinmin Zhang. Research on Multi-AGV Path Planning Based on Improved Clonal Selection Algorithm[J]. Logistics Engineering and Management, 2019,41(8):96-99.
- [19] 孙炜,吕云峰,唐宏伟,等.基于一种改进 A* 算法的移动机器人路径规划[J].湖南大学学报:自然科学版,2017,44(4):94-101.
Wei Sun, Yunfeng Lü, Hongwei Tang, et al. Mobile robot path planning based on an improved A* algorithm[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2017,44(4):94-101.
- [20] 李靖,杨帆.区域多任务安全隐患排除的机器人调度策略[J].电讯技术,2020,60(1):97-105.
Jing Li, Fan Yang. Robot scheduling strategy for eliminating multi-task security hidden troubles[J]. Telecommunication Technology, 2020,60(1):97-105.

gy,2020,60(1):97-105.

