

基于改进 A* 算法的多机器人动态路径规划^①

董朝瑞^② 郭欣^③ 李 宁 邵谢宁

(河北工业大学人工智能与数据科学学院 天津 300130)

摘 要 为解决智能仓储系统多机器人作业产生的交通拥堵问题,提出了一种基于预约栅格的多机器人动态路径规划算法。首先利用预约栅格与有向图的方法,对机器人之间的碰撞进行预防;然后利用预约栅格生成交通拥堵地图,实时显示当前仓库地图的拥堵状况;最后通过改进 A* 算法,实现多机器人的动态路径规划,解决机器人间的交通拥堵问题,提高了系统效率。通过仿真实验,将所提方法与传统方法进行了比较,对多机器人路径规划方法的有效性进行了验证。

关键词 多机器人系统;动态路径规划;智能仓储系统;交通拥堵地图

0 引 言

近年来,随着电商行业的迅猛发展,物流配送作为电商行业的核心要素之一越来越受到人们的关注。由于电子商务的物流配送工作具有品种多、批次多的特点,传统工作模式下工人大多数的时间都浪费在了取货上^[1]。因此人们对智能仓储系统的需求越来越迫切,随着以亚马逊 Kiva Systems 为代表的智能仓储系统兴起,高效的多移动机器人智能仓储系统成为研究热点之一^[2]。将多移动机器人应用在智能仓储系统中代替人来进行搬运工作可以有效降低仓储系统运维成本,提高运作效率。在多移动机器人智能仓储系统的研究中,多机器人路径规划和碰撞预防是实现多移动机器人智能仓储系统的关键。

对于多机器人路径规划,传统的方法是将 Dijkstra 算法和时间窗原理结合起来进行多机器人路径规划^[3-5]。但是,随着节点数量的不断增加,Dijkstra 算法的效率将显著降低,因此 Dijkstra 算法仅适用于小型系统。目前在智能仓库的环境下研究多机器

人系统主要采用以 A* 算法^[6,7]、蚁群算法^[8,9]、D* 算法^[10]为基础的路径规划。其中蚁群算法和 D* 算法可以避开环境中未知障碍,属于动态路径规划算法,但是这 2 种算法无法得到全局最优的路径。A* 算法作为一种启发式搜索算法,具有简单高效的特点,能够得到全局最优路径,是目前最流行的机器人路径规划算法。由于智能仓储系统中多机器人同时工作的特点,机器人工作环境变化迅速,应用传统的 A* 算法进行路径规划可能会导致交通堵塞问题,甚至产生死锁现象,导致系统崩溃。

为了解决上述问题,本文提出了基于预约表和交通拥堵地图的多机器人路径规划方法。通过使用预约表和基于机器人优先级的交通规则,解决多机器人间的碰撞冲突问题;通过基于交通拥堵地图的改进 A* 算法,在路径规划过程中考虑到交通拥堵状况带来的路径代价,使机器人运行时尽可能避开拥塞程度高的区域,以减小系统拥塞程度进而缩短系统运行时间;根据交通状况动态地更改路径代价,在机器人行进道路前方出现拥堵时,重新进行路径规划,实现了仓储环境下机器人的实时路径规划。

① 国家自然科学基金(61305101)资助项目。
② 男,1992 年生,硕士生;研究方向:智能控制理论研究与应用;E-mail: 13821307939@163.com
③ 通信作者,联系人,E-mail: gxhebut@aliyun.com
(收稿日期:2019-02-07)

1 仓储环境模型

本文采用栅格建模法构建地图模型,如图 1 所示,在物流配送中心仓储货架的布局是整齐对称的,同时货架间的道路也是垂直交叉的。多个移动机器人同时在此仓储空间中运动,货架之间的通道为单排车道,黑色栅格表示货架。本文对机器人在配送中心的应用场景进行如下简化。

(1)机器人在任意一条道路只能单向行驶;

(2)机器人在正常行驶过程中速度可变,机器人直行通过一个栅格的路径代价为 1,在机器人转弯过程会消耗更多的时间,在栅格完成 90°转向需要额外转向代价为 1;

(3)地图中的每个栅格均可容纳 1 台机器人,并且每一栅格同一时刻只允许通过 1 台机器人;

(4)为防止机器人间的意外碰撞,规定机器人间的最小安全距离,该距离根据机器人的长度和运行速度确定。

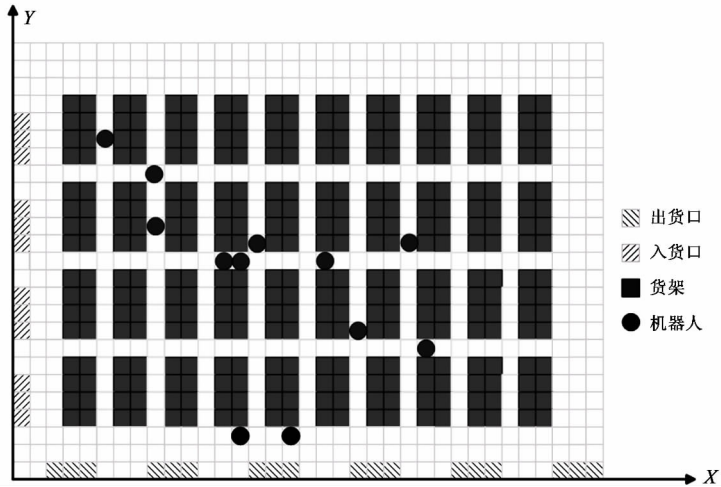


图 1 智能仓库模型

在多机器人系统中,需要确定不同机器人的优先级以确保系统安全稳定运行。根据智能仓储多机器人系统的工作流程,可以将机器人单个任务的拣选工作分为以下步骤:

- (1)机器人从当前所在位置前往目标货架;
- (2)机器人将货架从当前位置搬运至拣选站台;
- (3)机器人在拣选台等待工人从货架上拣选货物;
- (4)机器人将拣选完成的货物送回存储位置存放。

机器人在不同的工作状态下的优先级定义如表 1 所示。

当 2 台机器人工作状态不同时判断机器人的优先级,满载的机器人的优先级高于空载的机器人,去往拣选台的载货机器人的优先级高于返回存储位置的机器人;当 2 台机器人工作状态相同时判断机器人的优先级,对机器人所载货物进行判断,货物优先

级高的机器人有更高的优先级;对于 2 台机器人都是空载的情况,编号更小的机器人有更高的优先级。

表 1 机器人优先级

工作状态	负载状态	优先级
从出发点到目标货架	空载	低
从目标货架到拣选台	满载	高
从拣选台到货架放置点	满载	中

2 多机器人系统冲突预防策略

智能仓库中,多个移动机器人在同一区域来回穿梭,在其运动过程中难免会发生机器人之间的碰撞,如图 2 所示。针对图 2(a)中的迎面碰撞造成死锁的问题,本文采用单向图法^[11]对道路方向进行约束,规定货架间的道路为单行道,移动机器人在同一道路只能沿同一方向行驶。虽然单向图在某些情况下会使机器人在路径规划时存在绕远路的情况,但

是考虑到仓库的复杂环境,使用单向图约束可以明显提高系统运算效率以及多机器人系统的安全性和稳定性。

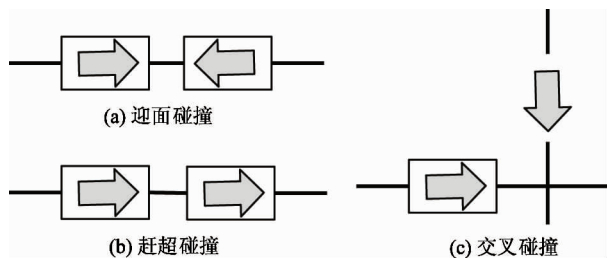


图2 几种碰撞类型

采用单向图的方式对智能仓储系统的道路环境进行定义后可以杜绝图2中迎面碰撞的发生,然而多机器人系统仍然存在着图2(b)、(c)中所示的碰撞情形。为了使其他机器人可以在碰撞发生前采取停车或绕行的方式避免冲突,在当前机器人规划好路径之后,必须通过一定的方法表示该机器人占有栅格的情况。为此结合上一节的机器人的优先级定义,通过使用预约栅格的方法对机器人的位置情况进行表述,预防碰撞。

本文中所研究的多机器人系统中,机器人在行驶过程中需要保证中央控制模块和各个机器人之间保持实时通讯。因此在为机器人申请预约位置的时候,机器人将行驶道路前方的一个栅格也加入了预约作为预约栅格。预约栅格的添加不仅可以为机器人的通讯留出足够的反应时间,同时可以为机器人的行驶提供一定的安全空间,保证机器人减速到停止过程中一直在所预约的栅格范围内。本文中,称机器人当前的位置为当前栅格,预留的栅格为预约栅格。此外,如果机器人处于停止状态,则当前栅格和预约栅格都为机器人当前所在位置的栅格。

多机器人系统运行过程中,由中央控制器统一协调处理机器人的预约栅格。如果有多个机器人同时申请一个栅格资源,则通过判断冲突机器人的优先级,各个机器人按照优先级顺序通过该栅格。在进行预约栅格协调过程中,系统所依据的原则主要有以下2条:

(1) 如果低优先级机器人的预约栅格与高优先级机器人的当前栅格或预约栅格相同,则低优先级的机器人停止移动,并将预约栅格的位置更改为当

前机器人所在位置,高优先级机器人正常行驶。

(2) 如果高优先级机器人的预约栅格与低优先级机器人的当前栅格相同,则高优先级的机器人停止移动,并将预约栅格的位置更改为当前机器人所在位置,低优先级机器人正常行驶。多机器人系统依据预约栅格进行冲突预防的过程如图3所示。

图3(a)显示了 t 时刻2台机器人 $r1$ 和 $r2$ 的当前位置和预约栅格的位置,图中灰色框内的栅格1为 $r1$ 的预约栅格,栅格2为 $r2$ 的预约栅格,机器人 $r2$ 的优先级大于 $r1$ 的优先级;图3(b)显示了 $t+1$ 时刻2台机器人移动之后的位置和预约栅格,图中机器人 $r1$ 与 $r2$ 的预约栅格冲突;如图3(c)所示, $t+2$ 时刻中央控制器读取各台机器人的预约栅格之后,对冲突栅格进行调整。由于 $r2$ 的优先级高于 $r1$,因此 $r2$ 的预约栅格不变, $r1$ 的预约栅格调整为机器人当前位置,同时机器人 $r1$ 做停车处理, $r2$ 继续前进; $t+3$ 时刻机器人位置如图3(d)所示,图中2台机器人的预约栅格不再有冲突,机器人 $r1$ 和 $r2$ 按规划路径正常行驶,冲突调节成功。

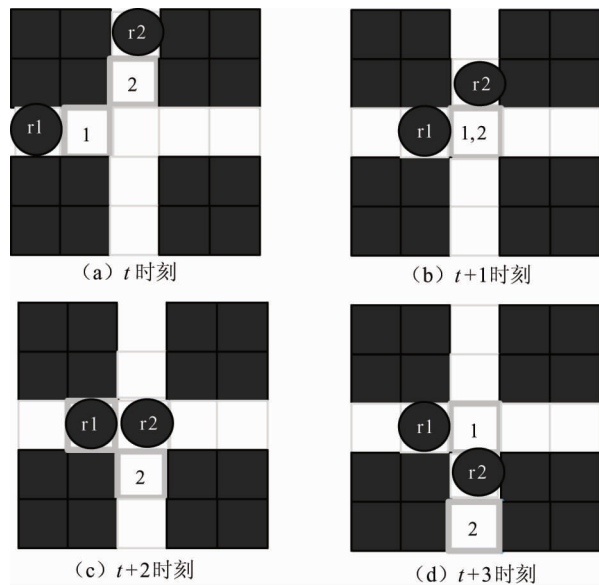


图3 利用预约栅格躲避碰撞

3 智能仓储系统多机器人动态路径规划算法

3.1 加入转向代价的 A* 算法

A* 算法的时间和空间复杂度较小,能够在短时

间内得到最优的路径,并且适应能力较强,其启发函数可以根据实际环境的约束条件进行调整,以满足多机器人路径规划的需要^[12]。A* 算法的基本流程为机器人从起始栅格出发,根据路径代价选择下一步将要扩展的栅格。其中路径代价是指机器人从起始栅格出发,经过将要扩展的栅格,到达目标栅格的最短估算值。机器人会选择路径代价最小的栅格进行扩展,直到扩展到目标栅格。其估价函数是寻找起点到终点最优路径的关键,估价函数的一般形式为

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

式中, $f(n)$ 代表从起始节点经节点 n 到达目标点的预估路径代价, $g(n)$ 为机器人从起始节点移动到当前节点 n 的真实路径代价, $h'(n)$ 代表当前节点 n 到目标点的估计距离。当 $h'(n) \leq h(n)$ (从当前节点 n 到目标点的实际最优距离)时,可以确保 A* 算法得到路径为最优路径^[13]。

根据仓储环境中机器人的移动规则,在栅格化的仓库模型中最优路径的搜索方向为上下左右 4 个方向,因此距离估计函数采用曼哈顿距离,其公式为

$$h'(n) = abs(n.x - goal.x) + abs(n.y - goal.y) \tag{2}$$

式中, $n.x$ 与 $n.y$ 分别为当前栅格的横坐标与纵坐标, $goal.x$ 与 $goal.y$ 分别为目标栅格的横坐标与纵坐标。

由于机器人在转向上的时间耗费和能量耗费比直线行驶时要多,本文在计算路径代价时中加入转向代价,此时路径代价函数为

$$f'(n) = g(n) + h'(n) + \varepsilon_0 \tag{3}$$

其中 ε_0 表示转向代价,其值为

$$\varepsilon_0 = \begin{cases} 0 & dis(l, n) = 2 \\ 1 & dis(l, n) = \sqrt{2} \end{cases} \tag{4}$$

式中, $dis(l, n)$ 代表扩展节点 n 到 f 值最小节点 m 的前驱节点 l 之间的欧式距离,可以通过 $dis(l, n)$ 的值来判断机器人的转角,如图 4 所示。 $dis(l, n) = \sqrt{2}$ 时,当机器人进行 90° 转向,此时转向代价 $\varepsilon_0 = 1$; $dis(l, n) = 2$ 时,机器人不发生转向,此时转向代价 $\varepsilon_0 = 0$ 。

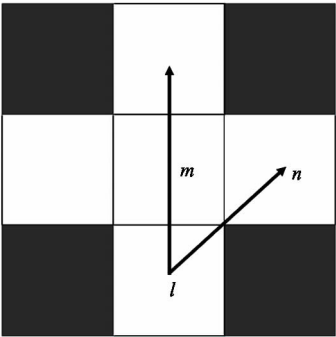


图 4 转向判断

3.2 交通拥堵地图

上文提到的改进后的路径规划算法通过引入转角代价和单向图约束,在机器人路径规划时可以有效降低路径的转角次数,减小机器人发生碰撞的概率。但是,在多机器人环境中,工作区域通常包含多台同时运行的机器人,交通拥堵的情况会大幅度降低机器人搬运货物的效率。本文通过基于交通拥堵地图的路径规划策略解决交通堵塞的问题,在路径规划时将环境的拥塞程度加入到考量中,使机器人运行时尽可能避开拥塞程度高的区域,通过减小系统拥塞程度来缩短系统运行时间,提高系统的运作效率。显然机器人在运行过程中某一区域的拥堵程度与在其范围内的机器人数量和附近的可通行道路栅格数有关。一般区域内的机器人数量越多,机器人在该区域发生拥堵的程度越大。因此考虑拥堵程度 P 用下式表示:

$$P = \frac{N_r}{C - N_r} \tag{5}$$

式中, N_r 表示该栅格附近区域的机器人数量,即 2 个栅格范围内的机器人数量, C 为该区域中的栅格总数,如图 5 所示。

通过式(5)可以求得当前时刻每一栅格的拥堵程度,并构建交通拥堵地图。机器人通过栅格 (i, j) 处所需要的代价 $G_p^{i,j}$ 为

$$G_p^{i,j} = 1 + K \cdot p^{i,j} \tag{6}$$

式中, K 是拥堵程度向路径代价转化的常数参数, $p^{i,j}$ 表示 (i, j) 栅格的拥堵程度。本文将 K 设置为机器人遇到堵塞时停车等待的额外时间所消耗的路径代价,所以通过改进的 A* 算法进行扩展节点 n 的 f 值计算时,式(3)中的实际路径代价 $g(n)$ 可以

表示为

$$g(n) = g(m) + G_p^{i,j} \tag{7}$$

式中, $g(m)$ 为当前 f 值最小栅格 m 到起点的实际路径代价。

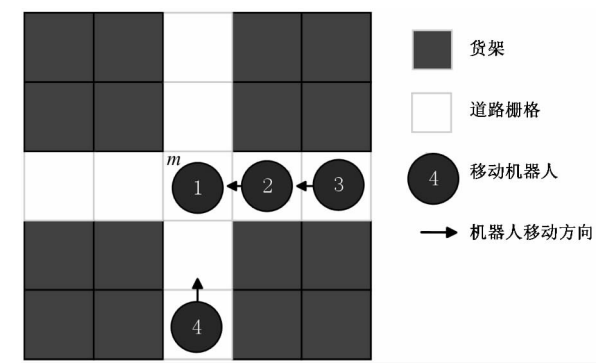


图 5 m 栅格附近的机器人数量

3.3 多机器人动态路径规划

上述的算法可以很好地解决仓储环境中机器人最优路径规划问题,但是该算法还是存在一些问题。首先,A* 算法在复杂环境下的搜索空间会增加,因此路径规划效率会相应地降低。其次,A* 算法作为一种全局路径规划方法,算法产生离线先验路径是根据静态环境中生成的全局路径,忽略了移动机器人运行环境的变化。为了减小 A* 算法的搜索空间,

减少搜索时的扩展节点数目,可以对栅格地图进行抽象处理,将整个地图划分依据道路分为若干部分,并为其设置关键节点,利用改进 A* 算法在各个道路中进行路径搜索,得到同一道路中各个关键点之间的路径代价,得到抽象地图。最后利用 A* 算法对关键节点进行扩展,得到从起点到终点的最优路径。为了提高机器人系统对运行环境变动的适应,在路径规划过程中加入在线规划阶段,实时检测机器人道路前方的路况信息,并对拥堵区域进行躲避,减少因停车等待耗费的时间。

3.3.1 离线阶段的静态路径规划

(1) 栅格预处理

在应用改进 A* 算法在仓储地图环境中搜索路径时,可以将地图分为若干道路,一条完整的路径可以表示为起点-道路 1-道路 2-...-道路 n -目标点。因此可以根据仓储地图环境将大地图分为若干个道路,如图 6 所示。图中 35×25 的地图被分成了 24 条道路,其中纵向道路 15 条(记为 $L_1 \sim L_{15}$),横向道路 9 条(记为 $H_1 \sim H_9$)。对于任意 2 条道路,在其交点定义一系列的关键词,用这些关键词来连接这 2 条道路。

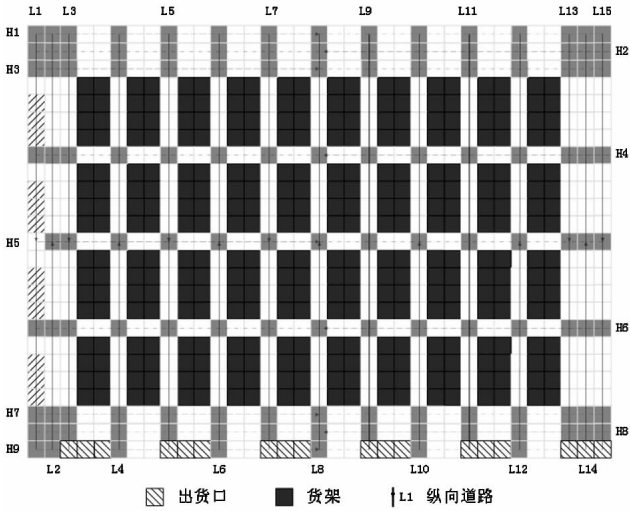


图 6 仓储地图关键节点示意图

(2) 地图抽象化

对于同一条道路内的任意 2 个关键节点之间定义一个键来连接它们,键值为每个关键节点之间的最优距离。例如图 6 中,道路 L_3 共有 8 个连接道路的

关键点,按从上到下的顺序将其标记为 A ~ H。在建立抽象地图的过程中,把任意 2 个关键点之间的路径长度返回作为节点之间的路径代价值,如表 2 所示。

表 2 道路 L₃ 所有键的键值

节点	A	B	C	D	E	F	G	H
A		1	6	11	16	21	22	23
B	∞		5	10	15	20	21	22
C	∞	∞		5	10	15	16	17
D	∞	∞	∞		5	10	11	12
E	∞	∞	∞	∞		5	6	7
F	∞	∞	∞	∞	∞		1	2
G	∞	∞	∞	∞	∞	∞		1
H	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	

(3) 路径搜索

路径搜索的第一步是要把起始节点 s 和目标节点 g 扩展到道路中,如图 7(a)所示。选取与起点和目标点最近的道路栅格,将其扩展为道路关键点,并计算该点到当前道路其他各个关键点的路径代价。这样就将起始及节点和目标节点添加到了抽象地图中,然后就可以通过改进 A* 算法在抽象地图上进行路径搜索,搜索过程如图 7(b)所示。图中当前节点为 N_1 , N_1 的可扩展节点为当前道路前方的所有关键节点。对抽象地图进行路径搜索可以提供一条从起始点所在道路关键节点到达目标点所在道路关键节点的抽象路径,通过对抽象路径细化可以获得从起始点到达目标点的真实路径。对于给定的起点 s 和目标点 g ,路径规划结果如图 8 所示。从图中可以看出由于仓库环境的拓扑结构的规律性,因此在细化路径时,无需再进行搜索,只需要将关键点之间的路径栅格加入规划好的路径中。货架区域中的道路关键节点较少,所以应用改进 A* 算法在抽象地图进行路径搜索可以减少路径搜索时扩展节点的数量,提高路径规划的效率。

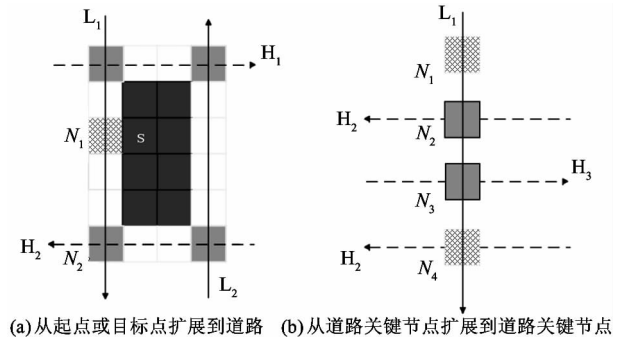


图 7 抽象地图中的路径搜索方式

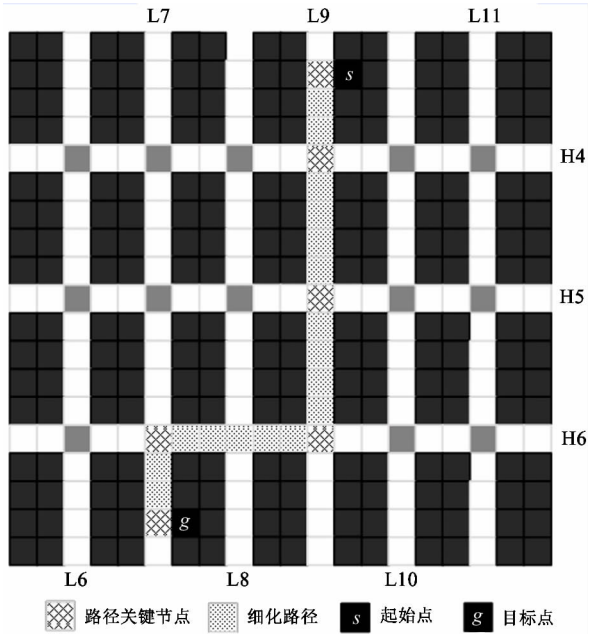


图 8 细化后返回的路径

3.3.2 在线阶段的动态路径规划

基于交通拥堵控制的多机器人路径规划可以在机器人开始执行任务之前规划出一条理论上的时间最少路径,但是由于该算法为对静态环境进行的路径规划,并且有任务不断加入到系统,机器人之间的路径可能出现干涉的情况。因此,为了提高机器人系统对运行环境变动的适应,本文提出动态路径规划算法,在路径规划过程中加入重新规划阶段,当检测到机器人因为交通拥堵而停车时,以当前位置为起点重新进行路径规划,对拥堵区域进行躲避,减少因停车等待的时间。

多机器人系统动态路径规划算法采用分布式结构。该系统中存在 $n + 1$ 个可以用作计算的模块,包

括 1 个中央控制模块和 n 个机器人模块。其中中央控制模块可以从各个机器人处接受预约栅格信息,根据一定的原则协调各机器人间的冲突,以及根据机器人位置信息维护交通拥堵地图。机器人模块则可以从中央控制模块处获得冲突协调信息和地图环境,并根据这些信息进行自身的路径规划及运动控制。由于各个机器人都执行计算任务,避免了系统中所有的计算任务集中到一个模块上,这样的分布式路径规划方法可提高系统的运行效率,避免计算资源的浪费。

在仓储地图环境中,中央控制模块根据各个机器人位置情况实时更新交通拥堵地图,机器人在交通拥堵地图中采用本文设计的改进 A* 算法各自进行路径规划,然后在机器人沿该路径行驶过程中协调机器人之间的碰撞,并在检测到机器人因路径冲突停车等待时,根据最新的交通拥堵地图重新进行路径规划,选择交通拥堵代价最小的路径。多机器人动态路径规划算法流程如图 9 所示。在线阶段的动态路径规划的主要步骤如下:

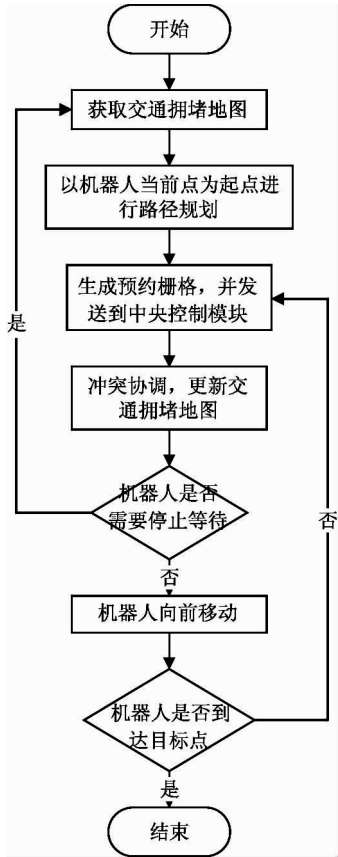


图 9 多机器人动态路径规划流程图

- (1) 中央控制模块根据各机器人预约栅格实时更新拥堵地图和道路各个关键点之间的键值;
- (2) 机器人模块根据交通拥堵地图进行离线静态路径规划;
- (3) 机器人根据规划好的路径信息生成预约栅格信息,并向中央控制模块发送预约栅格信息;
- (4) 从中央控制模块接收各机器人的预约栅格信息,并根据机器人的优先级对机器人间的冲突进行协调,并将协调后的结果返回各机器人模块;
- (5) 如果协调结果为该机器人停止移动,则将该机器人的预约栅格设置为当前栅格,返回步骤(2);
- (6) 机器人移动到预约栅格位置,然后更新机器人的当前栅格和预约栅格,转到步骤(3)。

4 仿真实验

为研究多移动机器人路径规划与任务分配算法的性能,本文使用智能仓储多机器人仿真系统进行了仿真实验。为了便于仿真系统的实现,本实验对仿真系统中多机器人的运行环境进行了简化,在机器人进行分拣过程时假设货架上的货物充足不存在缺货情况,机器人的电量足够完成所有任务。该仿真系统可以根据需要任意设置机器人数量等仿真环境,同时利用不同的路径规划算法模拟多移动机器人系统执行分拣任务,输出各种仿真数据。本仿真系统的界面设计如图 10 所示。

仿真系统界面左侧是多机器人系统运行区域,用于显示仿真系统中多移动机器人执行任务的情况。仓储地图环境采用 35×25 规格的栅格地图表示,整个地图区域中共 320 个货架,每 8 个货架相背排列成 1 组,共 40 组货架。仿真系统界面右侧是控制区域,包括所有的操作按钮及用来设置机器人各种参数的编辑框。

在上述的智能仓储仿真环境中进行仿真实验,验证多机器人动态路径规划方法的有效性。为保证实验结果的客观性,设定实验方法如下:

- (1) 所有任务都由随机算法生成。机器人顺序排列在地图环境的上方位置。

(2)设置任务数量为 300,随机生成 10 组任务。对比机器人数量分为 10、20、30、40 和 50 时执行相同任务的情况。每种情况下分别采用本文的动态路径规划方法和传统的 A* 算法完成随机生成的 10 组

任务,共 100 次实验。
(3)按照就近分配的原则为每台机器人分配任务,保证机器人的空闲时间最短。

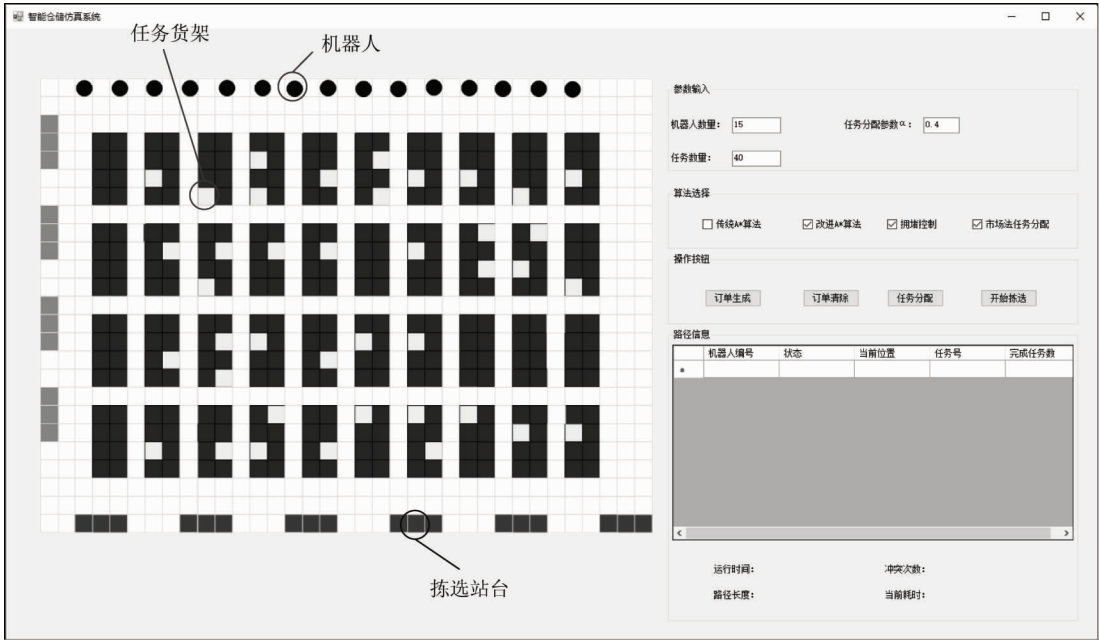


图 10 仿真系统主界面

机器人遇到交通堵塞的情况如图 11 所示,机器人 r1 在沿原规划路径行进到当前道路的关键节点时遇到了道路拥堵。图 12 使用了不同的灰度值表示当前交通拥堵地图中的每个栅格的拥堵概率,栅

格的颜色越深,该处的拥堵程度越高。图 13 中,机器人 r1 根据当前交通拥堵地图以当前点为起点重新进行路径规划,选择通过交通拥堵代价更小的路径,减少完成任务所需的时间。

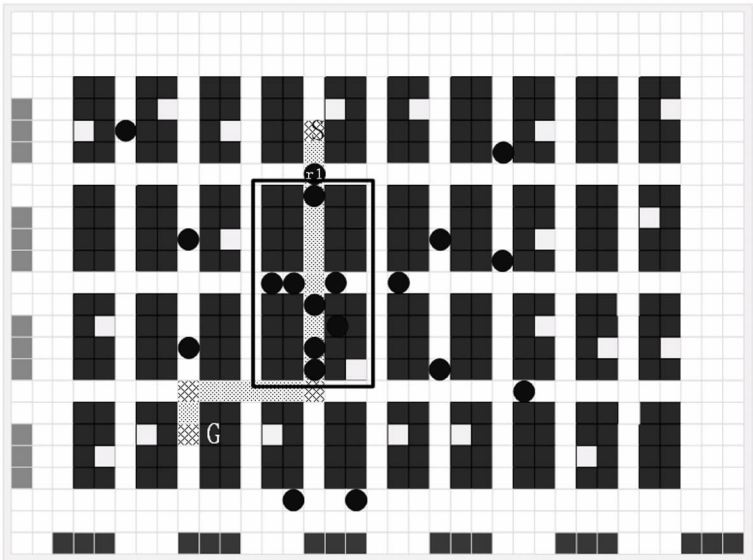


图 11 机器人遇到交通堵塞的情况

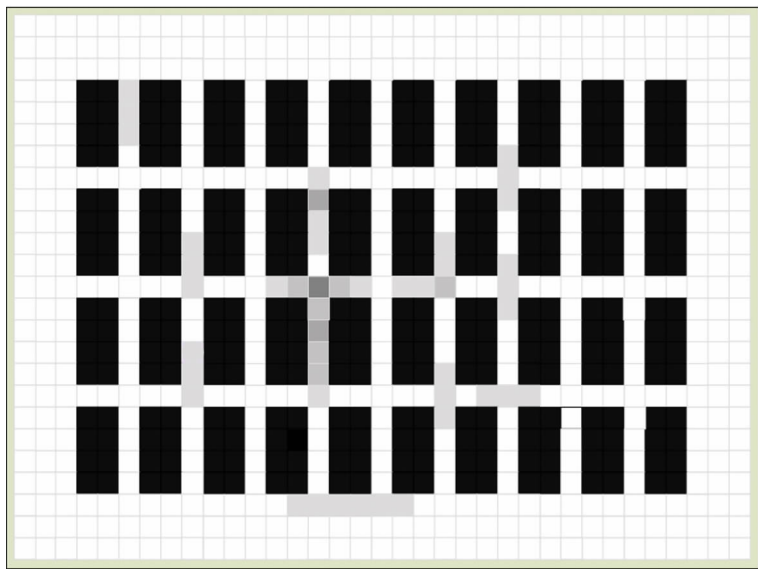


图 12 交通拥堵地图表示阻塞情况

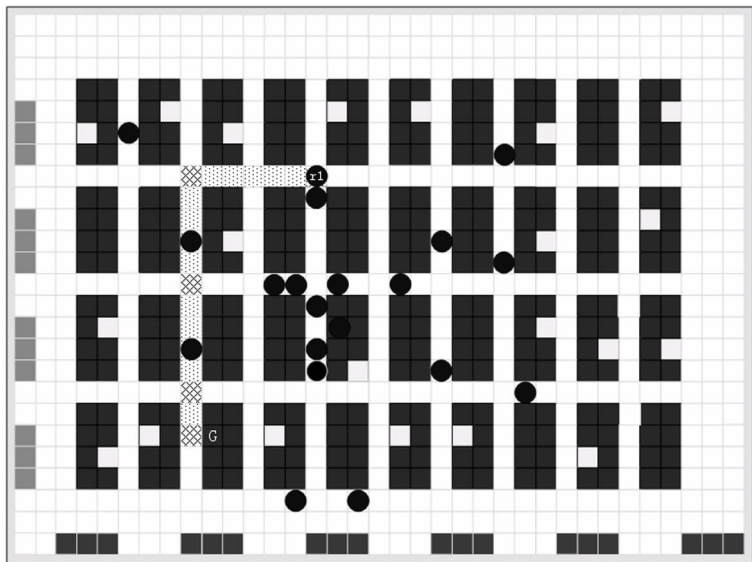


图 13 动态路径规划算法重新规划路径

图 14 给出了不同数量配置的机器人在 2 种路径规划算法下完成 300 个任务所运行总里程,所取数据为 10 次实验的平均值。由于增加机器人数量可以为多机器人系统提供更高的灵活性,系统可以选取离货架更近的机器人完成任务,所以随着机器人数量的增加,多机器人系统完成所有任务的总里程逐渐减少。对于相同数量的机器人,使用动态路径规划方法进行路径规划的机器人系统完成任务运行的总里程比使用传统的 A* 算法要长。随着机器

人数量的增加,系统的交通堵塞情况增加,使用动态路径规划方法进行路径规划的机器人为了避开交通堵塞而选择了绕路的方式减少等待时间,因而增加了里程数。

图 15 给出了不同数量配置的机器人在 2 种路径规划算法下完成 300 个任务所运行总时间,所取数据为 10 次实验的平均值。可以看出随着机器人数量的增加,多机器人系统完成所有任务的总时间逐渐减少。

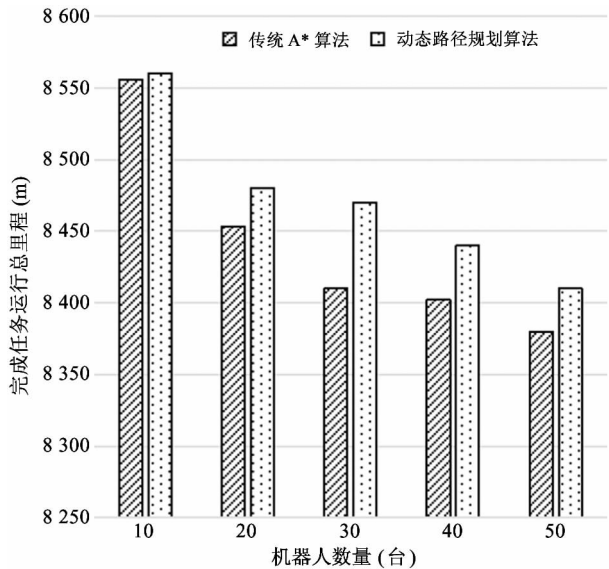


图 14 系统完成任务运行总里程

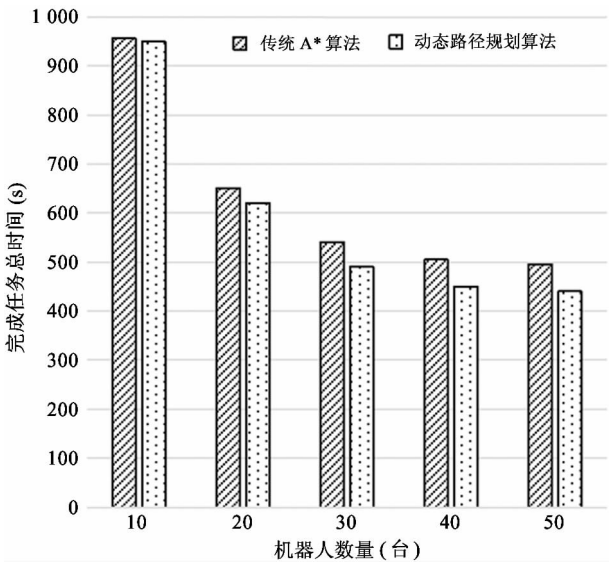


图 15 系统完成任务运行总时间

从表 3 可以直观地看出,当智能仓储系统中的机器人数量大于等于 30 时,本文的动态路径规划方法相对普通的交通规则下的 A* 算法其完成任务总的运行时间有明显的减少。在仓储环境下,本文的动态路径规划方法也不能完全地避免道路拥堵的发

生,当机器人数量增加到一定数目后,系统运行效率明显降低,继续增加机器人的数量并不能明显减少完成相同任务所用的总时间。因此为了提高智能仓储系统运行效率,根据仓储系统大小合理调整机器人的数量十分必要。

表 3 2 种算法运行总时间对比

机器人数量(台)	10	20	30	40	50
传统 A* 算法(算法 1)	956 s	652 s	544 s	505 s	498 s
动态路径规划方法(算法 2)	948 s	621 s	497 s	453 s	446 s
算法 2 比算法 1	减少 0.94%	减少 4.86%	减少 8.74%	减少 10.3%	减少 10.5%

5 结 论

为解决智能仓储系统多机器人路径规划问题,提出了一种预约栅格和交通拥堵地图下多机器人动态路径规划算法。通过对 A* 算法的改进,实现了多机器人的动态协同路径规划,解决了机器人间的交通拥堵问题,提高了系统效率。实验结果表明,相对于传统的 A* 算法,使用动态路径规划方法进行路径规划可以有效减少多机器人系统完成任务所需的时间,但是当机器人达到一定数量后,由于系统的拥堵程度增加,完成任务所需总时间的减少变得缓慢,因此进行多机器人系统规划时需要根据仓库大

小合理配置机器人数量。在多机器人智能仓储系统中,订单任务分配方式也会影响系统工作效率。未来将研究智能仓储系统中的订单任务分配方式,并将其与多机器人的路径规划结合,进一步提升智能仓储系统工作效率。

参考文献

[1] 邹爽心. 仓储机器人的应用现状与发展战略探讨[J]. 物流工程与管理, 2013, 35(6): 171-172

[2] D'Andrea R. Guest editorial: a revolution in the warehouse: a retrospective on Kiva systems and the grand challenges ahead[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2012, 9(4): 638-639

- [3] Qiao Y, Qian X M, Lou P H. Improved time window based conflict-free automated guided vehicle system routing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(12): 2683-2688
- [4] 胡彬, 王冰, 王春香, 等. 一种基于时间窗的自动导引车动态路径规划方法 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(6): 967-971
- [5] 禹鑫焱, 陈浩, 郭永奎, 等. 基于线性时序逻辑理论的仓储机器人路径规划 [J]. 高技术通讯, 2016, 26(1): 16-23
- [6] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. Correction to a formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. *IEEE Transactions on Systems Science & Cybernetics*, 1972, 4(37): 28-29
- [7] 王勇. 智能仓库系统多移动机器人路径规划研究 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2010: 19-30
- [8] Karaboga D, Akay B. A comparative study of artificial bee colony algorithm [J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2009, 214(1): 108-132
- [9] Brand M, Masuda M, Wehner N, et al. Ant colony optimization algorithm for robot path planning [C] // International Conference on Computer Design & Applications, Qinhuangdao, China, 2010: 436-440
- [10] Ferguson D, Stentz A. Using interpolation to improve path planning: the field D* algorithm [J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 23(2): 79-101
- [11] Gonzalez D, Perez J, Milanés V, et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 17(4): 1-11
- [12] 沈博闻, 于宁波, 刘景泰. 仓储物流机器人集群的智能调度和路径规划 [J]. 智能系统学报, 2014, 9(6): 659-664
- [13] Yao J, Lin C, Xie X, et al. Path planning for virtual human motion using improved A* star algorithm [C] // Seventh International Conference on Information Technology: New Generations, Las Vegas, USA, 2010: 1154-1158

Multi-robot dynamic path planning based on improved A* algorithms

Dong Zhaorui, Guo Xin, Li Ning, Shao Xiening

(School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract

To solve the traffic congestion problem caused by multi-robot operation in intelligent warehousing system, a dynamic path planning algorithm for multi-robot based on reservation grids is proposed. Firstly, the collision between robots is prevented by the combination of reservation grids and directed graph; Secondly, traffic congestion maps are generated by reservation tables to show the congestion status of warehouse maps in real time; Finally, by improving the A* algorithm, a multi-robot dynamic path planning method is proposed to solve the problem of traffic congestion between robots and improve the efficiency of the system. Through simulation experiments, the proposed method is compared with the traditional method, and the validity of the multi-robot path planning method is verified.

Key words: multi-robot system, dynamic path planning, intelligent warehousing system, traffic congestion map