

基于改进A*算法的仓储物流移动机器人 任务调度和路径优化研究

王秀红, 刘雪豪, 王永成

(郑州航空工业管理学院 管理工程学院, 河南 郑州 450015)

摘要: 为解决仓储物流中移动机器人执行订单任务过程中, 调度系统难以快速准确地进行任务分配, 且搬运路线并非最短最优路线的问题, 根据移动机器人的运动方式和订单任务要求, 构建具有可重构性的仓库空间模型和栅格地图模型, 通过建立数学模型求解订单任务最短完工时间分配问题, 改进传统A*算法中3种常用距离算法的不足, 并提出复杂对角线距离算法进行路径规划仿真。仿真结果表明, 上述方法实现总任务完工时间最短的任务分配, 使路径规划搜索节点数减少30%, 路径长度缩短20%。

关键词: 移动机器人; 仓储物流; A*算法; 任务调度; 路径规划

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2019)06-0034-06

A Research on Task Scheduling and Path Planning of Mobile Robot in Warehouse Logistics Based on Improved A* algorithm

WANG Xiuhong, LIU Xuehao, WANG Yongcheng

(School of Management Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In executing the order task of the mobile robot in the warehouse logistics, the dispatching system is difficult to perform task assignment quickly and accurately, and the handling route is not the shortest optimal route. According to the mobile robot's movement mode and the requirement of order task, a reconfigurable warehouse space model and a grid map model are constructed, solving the shortest completion time allocation problem of order task by establishing a mathematical model, and improving the insufficiency of three common distance algorithms in traditional A* algorithm, and a complex diagonal distance algorithm is proposed for path planning simulation. The simulation results show that the above method achieves the task assignment with the shortest task completion time, which reduces the number of path planning search nodes by 30% and the path length by 20%.

Key words: mobile robot; warehousing logistics; A* algorithm; task scheduling; path planning

随着我国电子商务规模的扩大, 以集中式配送为特点的仓储物流成为降低物流运输成本, 缩短运输时间、提高运输效率的主要配送服务模式^[1]。由于电子商务货物订单具有“品种多、批量小、批次多、周期短”的特点^[2], 对仓储物流的自动化水平要求较高。目前, 仓储物流中移动机器人已逐步开始替代人工进行分拣和搬运, 但在任务调度过程

中, 移动机器人易出现任务匹配错误、响应速度过慢、规划路径距离过长等问题。因此, 保证移动机器人在自动化仓储物流中高效、准确地进行工作成为当前迫切需要解决的问题。

目前, 国内有些学者针对上述问题作了相关研究。如金芳等^[3]运用排队论方法解决自动化立体仓库中AGV的调度问题。张伟等^[4]运用Dijkstra算法解

收稿日期: 2019-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1404702); 河南省哲学社会科学规划资助项目(2016BZH010); 河南省科技厅资助项目(182102310951); 河南省高等学校重点科研项目(19A413012); 河南省高等学校重点科研项目(20A630035)

作者简介: 王秀红(1974-), 女, 河北省人, 教授, 硕士, 主要研究方向为技术创新。

决了仓储配送系统中AGV与任务的匹配问题。但以上研究仅针对任务匹配和调度问题,并未对AGV路径规划问题进行研究。方华等^[5]运用A*算法对仓储物流中单个机器人的三维路径规划研究。刘敬一等^[6]提出路径寻优算法解决AGV在自动化仓储中的路径规划问题。但未对移动机器人的任务分配问题进行研究。本文通过建立最短完工时间最大化的任务调度模型对订单任务进行任务分配,对传统A*算法中3种常用启发函数距离算法的不足进行改进,提出复杂对角线启发函数距离算法,并运用改进A*算法对移动机器人进行路径优化,有效解决仓储物流中移动机器人任务调度和路径规划问题。

1 仓储物流的仓库布局 and 任务分析

仓库作为仓储物流中货物的转运中心,其布局设置影响着移动机器人的路径规划及工作效率。为保证移动机器人能够高效率工作,建立适合移动机器人移动特征的模拟仓库,如图1所示。模拟仓库内货架间通道采用十字交叉设计,货架和通道排列整齐,在每条横向通道和每两条纵向通道的两端都有出口口,有效地提高了移动机器人的工作效率,而且模拟仓库具有良好的可重构性,仓库规模大小、货架和通道数量及宽度、仓库内货物出入口和移动机器人数量及位置等参数,均可根据具体需求进行设定^[7]。

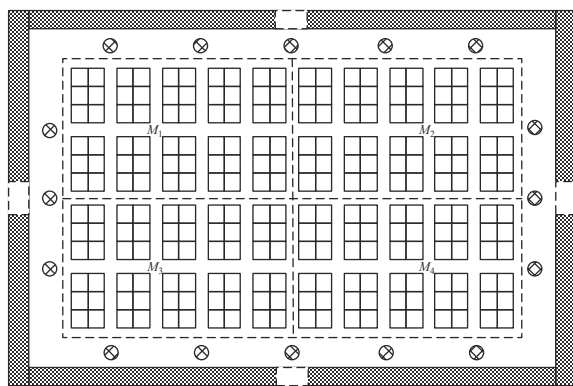


图1 模拟仓库平面布局

Figure 1 Simulates the warehouse layout

为缩短移动机器人执行订单任务的搬运时间,避免多个移动机器人同时工作发生碰撞,保障自动化仓储物流系统能正常运行,模拟仓库将搬运区域划分为 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 4个区域,每个区域内有固定编号移动机器人进行工作,不允许跨区域作

业,同时将仓库货架间的横向通道和纵向通道设计为双向道,规定移动机器人在通道内靠右行驶。

仓储物流中移动机器人的任务主要为分拣和搬运任务,根据任务作业流程可分为3个步骤。首先,确定订单所需货物存放于仓库中的货架位置;然后,调度系统根据移动机器人位置和货架位置规划一条到达出口位置的最短路径;最后,按照规划路线将货物运送到出口位置,完成订单任务,如图2所示。

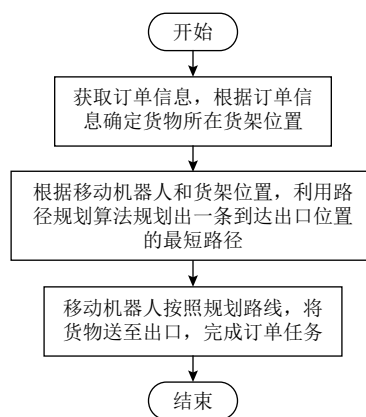


图2 任务作业流程

Figure 2 Task flow chart

假设某仓库内移动机器人的初始位置为 W_1 , 订单所需货物存放于仓库中货架位置为 L_1 和 L_2 , 仓库出口位置为 U_1 。根据图2中任务作业流程对物流任务进行模拟,得出任务模拟路线图,如图3所示。

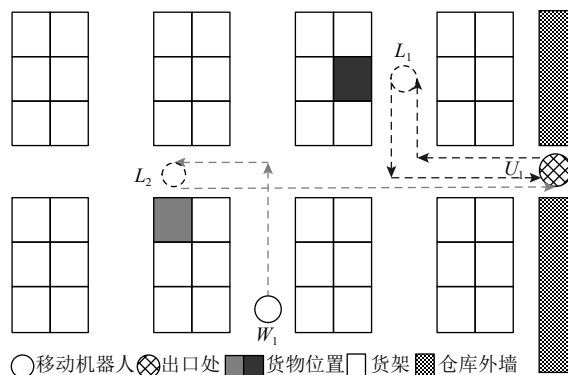


图3 任务模拟路线

Figure 3 Task simulation roadmap

2 移动机器人任务调度和路径规划模型构建

2.1 任务调度模型

仓储物流中移动机器人的订单任务由调度系统

进行分配处理, 即当订单任务下达后, 调度系统根据订单信息分配合适移动机器人执行订单任务, 通过制定移动机器人与订单任务的分配规则, 建立一个总任务最短完工时间最大化的混合整数规划模型, 解决仓储物流中移动机器人与订单任务分配问题, 实现调度系统中移动机器人总任务完工时间最短。

在构建任务调度模型前, 为便于对仓储物流中移动机器人任务调度问题进行分析求解, 假设以下条件成立:

- 1) 移动机器人从货架上取货和出口处卸货时所需时间固定;
- 2) 移动机器人每次只能接收一个订单任务, 不能同时执行多个任务;
- 3) 在同一时间段内, 不考虑订单下达时间先后顺序, 即每个订单任务的优先级相同;
- 4) 移动机器人在执行订单任务时不考虑启动和制动过程且不发生碰撞, 即运行时按固定速度匀速行驶。

任务调度模型中模型参数与决策变量表示含义如下所示: 订单任务集合 $K_i (i=1, \dots, k)$; 移动机器人集合 $W_j (j=1, \dots, w)$; 仓库出口集合 $B_v (v=1, \dots, b)$; 移动机器人 W_j 执行订单任务 K_i 所用时间 T_{ij} ; 移动机器人 W_j 从起始点到完成取货所用时间 ST_{ij} ; 移动机器人 W_j 从取货点到仓库出口完成卸货所用时间 FT_{ij} ; 移动机器人 W_j 到订单任务 K_i 间距离 D_{st} ; 订单任务 K_i 到仓库出口 B_v 间距离 D_{ft} ; 判别能否在 t 时刻分配订单任务 K_i 给移动机器人 W_j 的决策变量 X_{ijt} ; 取货消耗时间 Q ; 卸货消耗时间 P ; 移动机器人移动速度 V 。

$$T = \max \left\{ \sum_{j=1}^w \min T_{ij}, i \in k \right\}. \quad (1)$$

$$\text{s.t. } T_{ij} = \sum_{i \in k, j \in w} (ST_{ij} + FT_{ij}); \quad (2)$$

$$ST_{ij} = \frac{D_{st}}{V} + Q; \quad (3)$$

$$FT_{ij} = \frac{D_{ft}}{V} + P; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^w X_{ijt} = 1, \forall i, \forall t; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k X_{ijt} = 1, \forall j, \forall t; \quad (6)$$

$$T_{ij} > 0, ST_{ij} > 0, FT_{ij} > 0. \quad (7)$$

其中, 式(1)为任务调度模型目标函数, 表示调度系统中移动机器人执行订单任务最大化最短完工时间; 式(2)表示单个移动机器人执行订单任务所需时间; 式(3)和式(4)分别表示移动机器人完成取货所需时间和完成卸货所需时间; 式(5)表示移动机器人在任意时刻只能执行一个订单任务; 式(6)表示任意时刻订单任务只能分配给一个移动机器人; 式(7)是为保证任务调度模型各个参数为非负数。

2.2 改进A*算法的路径规划

目前, 常见的移动机器人路径规划算法有人工势场法^[8-9]、模糊逻辑法^[10]、A*算法^[11]、Floy算法、Dijkstra算法等, 其中, A*算法已经得到广泛的应用, 能够找出最优规划路径。A*算法在进行路径搜索时, 通过不断计算Open表和Close表中节点的F值, 找出Open表中F值最小的节点, 作为下一次搜索的起始节点, 循环更新直到搜索到目标节点停止, 找出所有路径节点。其中, Open表用来存储搜索过程中的扩展节点; Close表用来存储搜索过程中代价值最小的节点。

移动机器人路径规划是在仓库环境已知情况下进行的全局路径规划, 需要建立准确的环境模型对仓库进行描述, 常见的环境模型构建方法有可视图法、Voronoi图法、拓扑地图法、栅格图法等^[12]。其中, 栅格图法具有图示清晰、易于创建和修改等优点, 在二维平面内规划路径时, 通常采用栅格图法构建环境模型, 如图4所示。

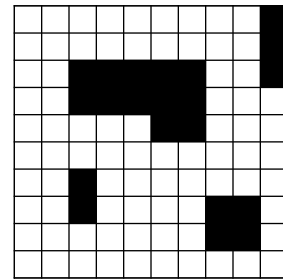


图4 栅格图环境模型

Figure 4 Grid environment model

A*算法作为启发式搜索算法进行路径搜索时, 主要依据搜索节点的代价值大小选取路径节点, 从而找出最优搜索路径, 其代价函数表示为

$$F(n) = G(n) + H(n). \quad (8)$$

式(8)中, $F(n)$ 表示当前节点 n 的代价值; $G(n)$

表示从起始节点 s 到当前节点 n 的实际代价值; $H(n)$ 表示从当前节点 n 到目标节点 g 的估计代价值。

估计代价函数 $H(n)$ 常用的启发函数距离算法有曼哈顿距离、欧几里得距离及切比雪夫距离^[13]。

曼哈顿距离算法是计算当前节点 n 到目标节点 g 的移动距离, 为两点间横纵坐标差的绝对值之和, 其启发函数表示为

$$H(n) = |x(n) - x(g)| + |y(n) - y(g)|。 \quad (9)$$

欧几里得距离算法是计算当前节点 n 与目标节点 g 两点间的真实距离, 为两点间横纵坐标的算术平方和, 其启发函数表示为

$$H(n) = \sqrt{[x(n) - x(g)]^2 + [y(n) - y(g)]^2}。 \quad (10)$$

切比雪夫距离算法是计算从当前节点 n 到目标节点 g 的移动步数, 为两点间横纵坐标之差绝对值的最大值, 其启发函数表示为

$$H(n) = \max \{|x(n) - x(g)|, |y(n) - y(g)|\}。 \quad (11)$$

其中, $x(n)$ 和 $y(n)$ 表示当前节点横坐标和纵坐标; $x(g)$ 和 $y(g)$ 表示目标节点横坐标和纵坐标。

移动机器人运用传统A*算法的曼哈顿距离、欧几里得距离及切比雪夫距离进行路径规划时常出现搜索节点过多、计算时间过长等问题^[13]。本文为减少路径规划时的搜索节点数量, 缩小搜索范围, 快速找出最优规划路径, 针对上述3种距离算法进行改进, 提出一种新的距离算法, 记为复杂对角线距离算法。该算法同时考虑当前节点 n 到目标节点 g 的移动距离和移动步数, 并进行加权计算, 其启发函数表示为

$$\begin{aligned} H(n) &= \sqrt{2} \times H_diagonal + (H_straight - 2 \times H_diagonal), \\ H_diagonal &= \min \{|x(n) - x(g)|, |y(n) - y(g)|\}, \\ H_straight &= |x(n) - x(g)| + |y(n) - y(g)|。 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $H_diagonal$ 表示当前节点与目标节点间水平方向和竖直方向的最小距离; $H_straight$ 表示当前节点与目标节点间水平方向和竖直方向的距离和。

改进A*算法路径规划搜索过程的具体步骤如下所示。

Step 1 初始化Open表和Close表, 将障碍点添加到Close表, 起始节点 s 加入到Open表, 此时 $F(s) = G(s)$ 。

Step 2 选取Open表中 F 值最小的节点 p 添加到Close表中, 记作父节点, 作为下次搜索的起始节点, 并将该节点从Open表中删除。

Step 3 找出下一次搜索的起始节点 s 全部可达的扩展节点, 记为 R_i , 并计算 $F(R_i)$ 、 $G(R_i)$ 、 $H(R_i)$ 。若扩展节点中有目标节点 g , 且 F 值最小, 搜索结束; 反之, 则重复Step 2。

Step 4 搜索结束后, 通过父节点从目标节点 g 返回起始节点 s , 顺次连接经过的所有节点, 即为搜索路径。

在图4所示的栅格图环境模型中, 假设具有相同起始点和目标点, 将启发函数距离算法按照曼哈顿距离、欧几里得距离、切比雪夫距离及改进后的复杂对角线距离进行路径规划仿真。仿真结果如图5所示, 其中, 栅格图中浅绿色填充部分表示路径规划的搜索节点。

由表1仿真数据可知, 在同一栅格图环境模型, 相同起始点和目标点条件下, 复杂对角线距离算法相比其他3种距离算法的路径长度缩短20%, 计算时间降低45%, 搜索节点数和路径节点数减少30%, 路径规划仿真结果最优。因此, 移动机器人运用复杂对角线距离的改进A*算法进行路径规划仿真, 能够达到缩小搜索范围、减少路径节点个数、缩短路径长度和提高计算速率的理想效果。

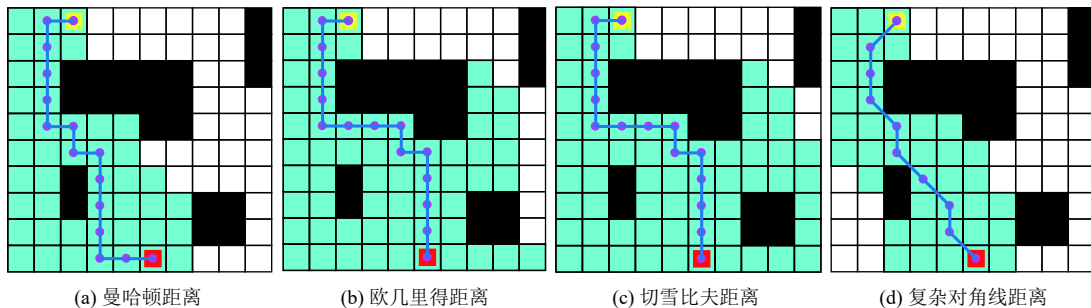


图5 移动机器人路径规划仿真
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
Figure 5 Simulation diagram of mobile robot path planning

表1 移动机器人路径规划仿真数据

Table 1 Simulation data of mobile robot path planning

距离算法	搜索节点数/个	路径节点数/个	路径长度(F值)	计算时间/s
曼哈顿距离	45	15	14	18.94
欧几里得距离	60	15	14	26.71
切比雪夫距离	64	15	14	28.67
复杂对角线距离	39	10	11	12.48

3 案例应用分析

某仓库内摆放着16组货架, 每组货架由8个长为1 m的小货架组成, 货架间有宽为2 m的交叉通道, 仓库左右两端各有1个出口, 仓库内有2台移动机器人和4个未被执行的订单任务。其中, 移动机器人、订单任务和仓库出口的具体位置, 如图6所示。订单任务记为 $K_i (i=1, \dots, k)$, 移动机器人记为 $W_j (j=1, \dots, w)$, 仓库出口记为 $B_v (v=1, \dots, b)$, 同时运用任务调度模型和改进A*算法对仓储物流中移动机器人任务调度和路径规划进行仿真验证。

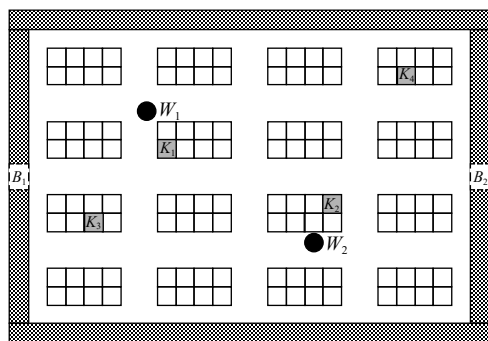


图6 仓库平面布局

Figure 6 Warehouse layout

以仓库左下角为坐标原点建立平面直角坐标系, 单位间隔距离为1 m。根据仓库内货架和通道长度可知, 仓库出口位置坐标为 $B_1 = (1, 9)$, $B_2 = (26, 9)$; 移动机器人位置坐标为 $W_1 = (8, 13)$, $W_2 = (17, 6)$; 订单任务位置坐标为 $K_1 = (9, 11)$, $K_2 = (18, 8)$, $K_3 = (5, 7)$, $K_4 = (22, 15)$ 。若不考虑订单货物大小影响搬运时间和移动机器人运行时发生减速, 仓储物流中仓库设备运行参数如表2所示。假设移动机器人沿水平和竖直方向运动, 依据上述仓库出口、移动机器人、订单任务位置坐标可计算出相互间的曼哈顿距离, 如表3所示。

根据表3中订单任务与移动机器人、仓库出口之间距离, 得到仓库订单任务完成时间, 如表4所示。任务调度系统为实现移动机器人总任务完工时

表2 仓库设备运行参数

Table 2 Warehouse equipment operation parameters

参数名称	参数值
移动机器人取货所需时间/s	7.5
移动机器人卸货所需时间/s	6.0
移动机器人执行任务的运行速度/(m·s ⁻¹)	1.5

表3 订单任务与移动机器人、仓库出口之间距离

Table 3 The distance between the order task and the mobile robot and the warehouse exit m

距离	订单任务 K_1	订单任务 K_2	订单任务 K_3	订单任务 K_4
机器人 W_1	2	16	10	17
机器人 W_2	14	4	12	15
仓库出口 B_1	9	19	7	28
仓库出口 B_2	20	8	24	11

表4 仓库订单任务完成时间

Table 4 Warehouse order task completion time s

移动机器人→订单任务	完成时间	订单任务→仓库出口	完成时间
$W_1 \rightarrow K_1$	8.8	$K_1 \rightarrow B_1$	12.0
$W_1 \rightarrow K_2$	18.2	$K_2 \rightarrow B_1$	18.6
$W_1 \rightarrow K_3$	14.2	$K_3 \rightarrow B_1$	10.7
$W_1 \rightarrow K_4$	18.8	$K_4 \rightarrow B_1$	24.6
$W_2 \rightarrow K_1$	16.8	$K_1 \rightarrow B_2$	19.3
$W_2 \rightarrow K_2$	10.2	$K_2 \rightarrow B_2$	11.3
$W_2 \rightarrow K_3$	15.5	$K_3 \rightarrow B_2$	22.0
$W_2 \rightarrow K_4$	17.5	$K_4 \rightarrow B_2$	13.3

间最短的任务分配目的, 以移动机器人 W_1 任务分配为例, 具体分配规则如下。由表4可知, 移动机器人 W_1 执行订单任务 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 完成时间为8.8 s、18.2 s、14.2 s、18.8 s, 选择最短完成时间8.8 s, 即分配任务为 $W_1 \rightarrow K_1$, 订单任务 K_1 到达仓库出口 B_1 、 B_2 完成时间为12.0 s、19.3 s, 选择最短完成时间12.0 s, 即分配任务为 $K_1 \rightarrow B_1$, 调度方案为 $W_1 \rightarrow K_1 \rightarrow B_1$ 。

根据上述任务分配规则, 任务调度系统中移动机器人 W_1 的调度方案为: 订单任务 K_1 的货物由移动机器人 W_1 运送到仓库出口 B_1 , 然后移动机器人 W_1 从仓库出口 B_1 执行订单任务 K_3 运送到仓库出口 B_1 , 即 $W_1 \rightarrow K_1 \rightarrow B_1 \rightarrow K_3 \rightarrow B_1$; 移动机器人 W_2 的调度方案为: 订单任务 K_2 由移动机器人 W_2 运送到仓库出口 B_2 , 然后再执行订单任务 K_4 返回至仓库出口 B_2 , 即 $W_2 \rightarrow K_2 \rightarrow B_2 \rightarrow K_4 \rightarrow B_2$ 。

在仓库栅格环境地图中, 根据调度系统中移动机器人 W_1 和 W_2 的调度方案, 运用改进A*算法对移动

机器人进行路径规划得到仿真路线图, 如图7所示。从仿真结果可知, 调度系统中移动机器人规划路径与订单任务完成时间均为最优。其中, 移动机器人 W_1 执行订单任务 K_1 和 K_3 的规划路径长度 $F_1 = 21.0$ m, 订单任务完成时间 $T_1 = 42.2$ s, 移动机器人 W_2 执行订单任务 K_2 和 K_4 的规划路径长度 $F_2 = 23.3$ m, 订单任务完成时间 $T_2 = 48.1$ s, 而调度系统中移动机器人总订单任务完成时间 $T = \max\{T_1, T_2\} = 48.1$ s。

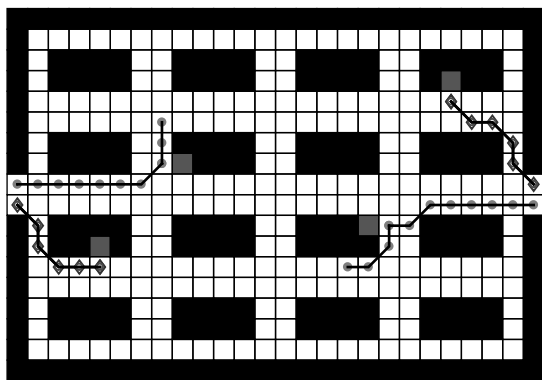


图7 移动机器人仿真路线

Figure 7 Mobile robot simulation roadmap

4 结论

本文针对仓储物流中移动机器人任务调度和路径规划问题进行优化研究, 通过对仓库内搬运区域有效划分和仓库布局的合理布置, 构建总任务最短完工时间最大化的任务调度模型, 解决仓储物流中移动机器人与订单任务的分配问题, 实现调度系统中移动机器人总任务完工时间最短。同时, 分析传统A*算法3种常用启发函数距离算法的不足, 提出复杂对角线距离的改进A*算法, 并在栅格地图中对移动机器人进行路径规划仿真。由仿真结果可知, 改进A*算法能够缩小搜索范围、减少路径节点个数、缩短路径长度, 解决路径规划过程中搜索节点过多、计算时间过长等问题, 且规划路径为最优路径。

参考文献:

- [1] 汪洋, 邱红星. 供应链仓储物流金融服务定价模型研究[J]. 华南理工大学学报(社会科学版), 2012, 14(3): 21-28.
WANG Yang, QIU Hongxing. Research on pricing model of supply chain warehousing and mobile financial services[J]. Journal of South China University of Technology (Social Science Edition), 2012, 14(3): 21-28.
- [2] 潘成浩, 郭敏. 仓储物流机器人批量拣选路径规划仿真[J]. 计算机与现代化, 2017(2): 12-16.
PAN Chenghao, GUO Min. Batch picking path planning simulation of warehouse mobile robot[J]. Computer and Modernization, 2017(2): 12-16.
- [3] 金芳, 方凯, 王京林. 基于排队论的AGV调度研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 844-846, 874.
JIN Fang, FANG Kai, WANG Jinglin. Research on AGV's scheduling based on queuing theory[J]. Acta Instrumentation sinica, 2004, 25(4): 844-846, 874.
- [4] 张伟, 张秋菊. Dijkstra算法在AGV调度系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(5): 61-64.
ZHANG Wei, ZHANG Qiuju. Application of Dijkstra algorithm in AGV scheduling system[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2015, 44(5): 61-64.
- [5] 方华, 周奇才, 熊肖磊, 等. 基于A*算法的通用仓储物流三维路径规划研究[J]. 制造业自动化, 2008, 40(7): 26-30, 53.
FANG Hua, ZHOU Qicai, XIONG Xiaolei, et al. Research on three-dimensional path planning of general warehouse logistics based on A* algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2008, 40(7): 26-30, 53.
- [6] 刘敬一, 孙维堂, 刘闽, 等. 仓储物流中自动导引车的路径规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(12): 150-154.
LIU Jingyi, SUN Weitang, LIU Min, et al. Research of route planning about automated guided vehicles in warehouse logistics System[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2018(12): 150-154.
- [7] 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.
SHEN Bowen, YU Ningbo, LIU Jingtai. Intelligent scheduling and path planning of warehouse logistics robot cluster[J]. Journal of Intelligent Systems, 2014, 9(6): 659-664.
- [8] 杨雅洁, 裴道方, 余芳. 考虑AGV避碰的自动化码头多资源协同调度[J/OL]. (2019-02-26). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20190225.1629.012.html>.
- [9] 于振中, 闫继宏, 赵杰, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 50-55.
YU Zhenzhong, YAN Jihong, ZHAO Jie, et al. Path planning of mobile robot with improved artificial potential field method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(1): 50-55.
- [10] 苏治宝, 陆际联. 用模糊逻辑法对移动机器人进行路径规划的研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(3): 290-293, 297.
SU Zhibao, LU Jilian. A study on the path planning of mobile robot with the fuzzy logic method[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(3): 290-293, 297.
- [11] 王殿君. 基于改进A*算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1085-1089.
WANG Dianjun. Indoor mobile robot path planning based on improved A* algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(8): 1085-1089.
- [12] 黎萍, 朱军燕, 彭芳, 等. 基于可视图与A*算法的路径规划[J]. 计算机工程, 2014, 40(3): 193-195, 200.
LI Ping, ZHU Junyan, PENG Fang, et al. Path planning based on viewable and A* algorithm[J]. Computer Engineering, 2014, 40(3): 193-195, 200.
- [13] 周粉粉, 高述勇, 刘阔. 移动机器人路径规划的仿真研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2008, 33(3): 47-51.
ZHOU Fenfen, GAO Shuyong, LIU Kuo. Research on optimal path planning of mobile robot based on simulation[J]. Journal of Qingdao University (Engineering and Technology Edition), 2008, 33(3): 47-51.