

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201805047



有限状态机的多 AGV 路径优化策略

王淑青¹, 毛月祥¹, 袁晓辉²

(1. 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430068;
2. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为解决多自动运输引导车(AGV)在实际物流中易发生冲突、堵塞的问题,提出一种基于有限状态机模型的实时路径规划方法.通过 A* 算法对自动导引运输车系统(AGVS)进行预路径规划,以工作路径长度作为适应度函数,对不同任务的 AGV 进行优先级分配;然后,引入有限状态机的模型,动态地对不同任务的 AGV 进行协同控制.若 AGV 之间存在路径冲突点,通过去交叉法,在优先级低的 AGV 中暂设冲突节点为障碍物状态.对优先级低的 AGV 重新进行路径规划,优先级高的 AGV 继续运行,实现 AGVS 的无冲突发生.仿真结果表明:该方法在保证工作路径是最优的同时,能有效地避免 AGV 在物流运输中的碰撞,实现系统调度过程中无冲突的发生,提高系统的效率.

关键词: 自动导引车; 路径规划; 有限状态机; A* 算法; 无冲突

中图分类号: TP 242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)02-0239-06

Multi-AGV Path Optimization Strategy Based on Finite State Machines

WANG Shuqing¹, MAO Yuexiang¹, YUAN Xiaohui²

(1. Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficiency Utilization of Solar Energy,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. School of Hydropower and Digital Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A real-time path planning method based on finite state machine model was proposed for dealing with automatic guided vehicle (AGV) conflicts and congestion problems in real logistics. A* algorithm of automatic guided vehicle (AGVS) is used to implement pre-path planning. Established path length of the fitness function, through fitness function allocation of priority for the AGV. Finite state machine model has been built for achieving collaborative control of the AGV. When the obstacles are in the path, by using removing cross method, collision node of the low-priority AGV will be temporarily set as an obstacle state, then, planning new path for the higher priority AGV, the non-conflicting operation of the AGVS is achieved. The simulation results show that the proposed strategy ensures that the path is optimal and can effectively avoid AGV collision in logistics transportation, realize non-conflict in system scheduling, and improve the system efficiency.

Keywords: automatic guided vehicle; path planning; finite state machine; A* algorithm; non-conflicting

目前,多自动运输引导车(AGV)系统主要应用在仓储物流系统中,对于工厂自动化建设有重要意义.随着现代工业的快速发展,AGV 优越性更加明显,将在未来广泛流行和应用. AGVS 的工作原理主要是在计算机的控制下,在复杂的工作环境中,将物料通过预规划的路径以一定的精准度传输到指定

收稿日期: 2017-03-29

通信作者: 王淑青(1969),女,教授,博士,主要从事智能控制、计算机控制技术和电力系统自动化的研究. E-mail: 494493276@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379080)

的目的^[1]. 在多 AGV 路径规划问题上, Fazlollahtabar 等^[2] 提出转折点的概念, 解决自动导引运输车系统 (AGVS) 中的死锁问题. Smolic-Rocak 等^[3] 基于时间窗模型动态路径规划的方法, 判断不同的 AGV 之间是否有资源的竞争与碰撞冲突. Han 等^[4] 改进遗传算法, 得到优化的最短路径规划. Alcaidea 等^[5] 提出一种运用 pert-cpm (关键路径模型) 解决机器人调度问题的模型. Draganjac 等^[6] 提出一种基于多 AGV 系统的分散控制算法, 保证 AGVS 的安全运行. 吕太之等^[7] 提出一种 B 样条曲线结合粒子群优化算法, 解决移动机器人局部路径规划的问题. 余婷等^[8] 建立一种染缸资源配置系统的自动机模型, 得到染缸的资源利用率最大的配置方式. 基于此, 本文提出一种基于有限状态机的多 AGV 路径规划方法, 用离散事件的动态系统对 AGV 的每个状态进行建模并响应, 从而消除交叉点, 提高 AGVS 运行效率.

1 多 AGV 路径规划问题

1.1 问题描述

在动态规划物流运输中 AGV 路径时, 为避免 AGV 之间冲突与堵塞的发生. 通过 A* 算法, 得到不同任务目标的 AGV 的最短路径集, 若 AGV 的路径集中存在冲突点, 即路径存在交叉, 对低优先级的 AGV 重新进行路径规划, 从而实现无冲突的发生. 引入 AGV 的选择路径长度作为适应度函数, 对 AGV 分配优先级. 结合有限状态机模型, 优化 AGVS, 提高系统效率. 在实际的多 AGV 的物流运输中, 往往由多台 AGV 协同实现, 即任务的运输路径最短^[9]. 将 AGV 初始状态点和最终状态点作为节点, 将状态的迁移过程作为边. 由于 AGV 的工作环境是一个二维空间静态空间 (有障碍物存在), 不考虑高度, 因此采用栅格法建立栅格地图作为工作环境. 将整个工作环境当作坐标系, 栅格长度与坐标标度一致, 并且每个栅格与其坐标一一映射^[10]. 建立一个 10×10 栅格地图, 随机生成障碍物, 如图 1 所示. 图 1 中: 绿色为起始位置; 红色为目标点. 假设 (1, 10) 为初始位置, (10, 1) 为目标位置, 机器人从初始位置通过 A* 算法找到最优路径. 规定初始位置与目标位置不重合, 基于应用场景, 提出如下 4 个规定. 1) 一个栅格中只允许存在一辆 AGV, 每个栅格同一时刻只允许通过一辆 AGV. 2) AGV 运行时速度恒定, 栅格长度为单位长度. 3) AGV 一次只能完成一个任务, 接到调度指令时不能中途返回. 4) 为防止 AGV 之间意外碰撞, 规定车辆间的最小安全距离, 该距离由车身长度和速度确定.

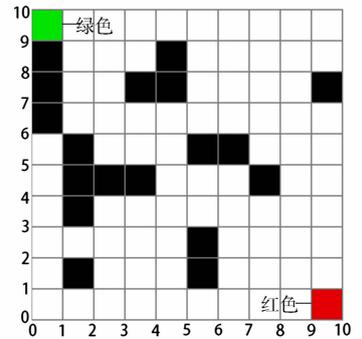


图 1 10×10 栅格地图模型
Fig. 1 10×10 raster map model

1.2 多 AGV 路径规划模型

AGV 的工作路径可以描述为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, l_1 为 AGV 的起点, l_2, \dots, l_n 为 A* 算法规划的路径点. 路径规划的目标函数为

$$\min J = \sum_{i=1}^{n-1} L(l_i, l_{i+1}). \quad (1)$$

式(1)中: $L(\cdot)$ 为路程算子 AGV 路径规划, 即为系统规划一条最短距离的工作路径.

1.3 冲突描述

在物流运输中, 随着车辆的增加, AGVS 中小车的路径规划会变得更加复杂, 在对小车路径规划时, 不可避免地出现 AGV 路径冲突、死锁等问题. 多 AGV 的冲突问题主要分为静止冲突、相向冲突、追击冲突和交叉冲突. 在物流运输中, 小车的速度是恒定的, 小车任务已分配, 且路径只支持单向移动, 因此, 对相向冲突与追击冲突的情景不予讨论.

1.3.1 静止冲突 AGV 静止冲突图, 如图 2 所示. 当 AGV1 在 $(x+1, y+1)$ 栅格故障时, AGV1 向上位机发送 $(x+1, y+1)$ 栅格信号, 上位机将栅格设置为障碍点, 若上位机检测到 AGV2 正在向障碍物栅格移动, 以当前栅格为起点, 重新为 AGV2 规划工作路径.

1.3.2 交叉冲突 AGV 交叉冲突图, 如图 3 所示. 若 AGV1 与 AGV2 在一段路径中存在交叉点, 则表示在某一时刻, AGV1 与 AGV2 存在碰撞的可能. 传统的方法有两种, 一是通过预处理法, 在上位机对分配任务的 AGV 进行路径规划时, 通过检测冲突, 若存在相同的节点, 则重新规划路线; 二是通过分配

优先级, 向优先级低的 AGV2 发出停止信号. 将 AGV2 的停止节点设为障碍点, 重新对 AGV1 的工作路径进行规划, 从而避免重新交叉冲突, 但是该方法效率低, 易发生死循环, 导致 AGVS 停止工作. 基于此, 引入有限状态机模型, 若路径中存在交叉点, 即存在冲突障碍状态, 将交叉点设为低优先级 AGV 的障碍点, 对低优先级 AGV 的工作路径重新规划, 从而消除交叉点, 避免交叉冲突.

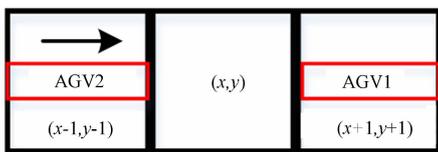


图 2 AGV 静止冲突图
Fig. 2 AGV static conflict

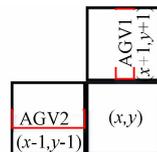


图 3 AGV 交叉冲突图
Fig. 3 AGV cross conflict

2 有限状态机

2.1 有限状态机的特点

在物流运输中, AGV 之间协作策略的选择是一个离散事件的规划问题, 所以 AGVS 中 AGV 之间的调度问题可以看成是一个离散事件的动态系统, 而离散事件动态系统常用的模型一般有两种: 有限状态机和 petri 网^[11]. 由于有限状态机具有以下 4 个特点: 1) 系统必须有几个有限的输入或可以出发状态间的变迁事件; 2) 系统在某个特定的时间点的行为取决于当前的状态和在此时间的输入或发生的事件; 3) 系统的每个可能的状态和行为都有明确的可能的输入或事件; 4) 系统有一个确定的初始状态, 因此, 引入有限状态机对 AGVS 协同控制层进行建模^[12]. 有限状态机的模型为 $M = (K, \Sigma, \sigma, s, A)$. 其中: K 为一个有限的状态机集合; A 为一组接受状态即最终状态, 是属于 K 的其中一个子集; Σ 是系统能接收的所有事件的集合; σ 为状态转换函数, 反映 $K \times \Sigma \rightarrow K$ 上的映射; s 为系统的初始状态.

2.2 有限状态机模型

初始由于自动机 $K = \emptyset$, 所以自动机的状态集合为空, 将其标记为空集 $\sigma(x, \varnothing) = y$. 其中: \varnothing 为每个相关事件的标签, 表示事件 \varnothing 从状态 x 转到 y , 模拟 AGV 从初始状态移动到目标状态的过程. $\varnothing \in \Sigma; y \in K$. 在 AGV 路径状态改变过程模型中^[13], s 集合由 4 初始状态集合组成; A 集合由 2 个最终状态组成. 每个状态提供一个预定义的响应. 6 种状态的信息如下: 1) 离开节点状态 (LVN); 2) 正常行驶状态 (NR); 3) 到达预期节点状态 (REN); 4) 到达目标节点状态 (AD); 5) 遇障状态 (MO); 6) 警告状态 (WA).

2.2.1 模型各状态的响应 1) 处于 LVN 状态时, 接受上位机根据目标点确定的一条路径曲线 (GPC), 开始向下一个期望节点移动; 2) 处于 NR 状态时, 小车向上位机反馈行驶状态, 上传经过站点数量; 3) 处于 REN 状态时, 小车向上位机反馈已到达规划路径节点, 并准备接受离开信号, 到达 LVN 状态; 4) 处于 AD 状态时, AGV 停止输入事件, 并向上位机反馈一个已完成的信号, 准备接受新的工作路径; 5) 处于 MO 状态时, 生成一条新的路径曲线 (GNPC), 使得 AGV 避障; 6) 处于 WA 状态时, AGV 停止输入事件, 并向上位机发生一个请求 (HELP) 帮助信号.

2.2.2 有限状态机模型事件的输入 Σ 的事件输入集合由以下对象表示: 1) 开始; 2) 离开节点; 3) 正常行驶; 4) 期望节点; 5) 目标节点; 6) 障碍物; 7) 运行错误.

2.2.3 有限状态机状态迁移流程 AGV 的起始位置视为一节点, 如果上位机将开始信号发送至 AGV, AGV 准备离开节点, 则有限状态机模型有了第一个初始状态 LVN 状态, 并且存在两个可能的最终状态——AD 或 WA. 当 AGV 到达最终状态时, 有限状态机停止接受事件, AGV 工作任务结束, 并将适当的信号发送到上位机, 等待新的指令. AGV 的状态迁移转换图, 如图 4 所示. 图 4 中: 控制输入标记为开始; 初始状态为最终状态双圈. 在 4 个非最终状态中, 分别输入开始、离开、正常行驶、期

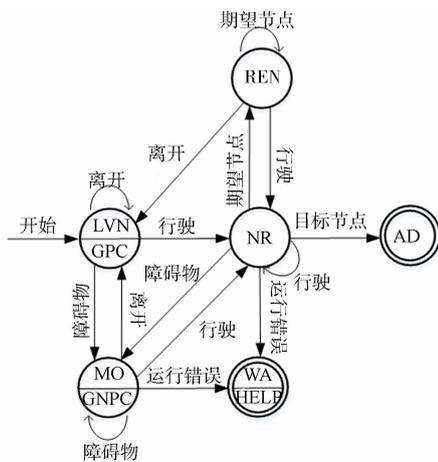


图 4 有限状态机状态迁移图
Fig. 4 Finite state machine state migration

望节点、目标节点、障碍物和运行错误,控制系统将分别控制到 LVN, NR, REN, RDN, MO 和 WA, 默认 AGV 离开访问节点并沿着工作路径移动, 不会返回到已访问节点, 除非它发生错误, 或者被避障系统指示返回. 若发生 AGV1 与 AGV2 发生冲突, 则按照优先级将低优先级的 AGV2 设为障碍物, 并以当前节点为新的起点, 对 AGV1 工作路径重新规划, AGV1 离开后, AGV2 继续行驶.

3 多 AGV 规划路径优化

3.1 AGV 优先级分配

对于所有 AGV, 分配任务后, 根据 A* 算法进行相应任务的路径规划. 通过适应度函数对 AGV 进行优先级的分配, 在行驶过程中, 当上位机检测到交叉点时, 由于三角形的两边之和大于第三边的性质, 因此存在交叉的路径一定不是最优路径, 引入去交叉法, 针对优先级低的 AGV 先运行至与之发生冲突的 AGV 的当前节点, 并以当前节点为新的起点, 低优先级 AGV 将交叉点视为障碍物, 实现交叉^[14].

在 AGVS 中, 为了减少多 AGV 的碰撞与冲突, 对 AGV 进行优先级的分配, 提高系统的效率. 文中的优先级分配的计算方法是以路径长度为适应度函数, 对路径进行约束, 其目标函数为式(1). 按照适应度函数对 AGV 进行优先级的分配, 以满足复杂环境下的路径规划要求. 在 AGV 速度一定的条件下, 保证 AGV 完成任务的效率最高, 即 AGV 工作路径尽可能短, AGV 工作路径的长度为

$$D = \sum_{i=1}^d \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}.$$

上式中: D 为 AGV 的工作路径长度; (x_i, y_i) 为 AGV 当前坐标; (x_{i+1}, y_{i+1}) 为 AGV 即将到达的坐标其适应度函数 F 为路径长度的倒数, D 越小适应度越好, 即 $F = \frac{1}{D}$.

优先级分配具体有如下 3 个步骤. 1) 选择 AGV 工作路径长度评估, 按照适应度函数将任务路径进行优先级的分配. 2) 若存在多辆 AGV 路径长度相等, 则比较 AGV 与其他 AGV 任务路径中的节点个数, 节点个数多的 AGV 为停靠站点最好, 因此将其优先级设为最高; 3) 以此类推, 更新 AGV 的优先级. 通过以上方式, 当 AGV1 与 AGV2 发生碰撞时, 在交叉点位置对优先级低的 AGV2 重新进行新的路径规划, 避免 AGV1 与 AGV2 的碰撞, 减少 AGV 之间冲突的发生.

3.2 多 AGV 工作路径优化流程

多 AGV 的工作路径规划算法的流程, 如图 5 所示. 通过 A* 算法确定 AGV 的工作路径, 以有限状态机模型作为 AGV 的协同控制层, 完成 AGV 的优先级分配, 实现多 AGV 的无碰撞冲突的路径规划^[15-16] 具体有 7 个步骤. 1) 参数初始化, 确定参与 AGV 数量. 2) 确认各 AGV 任务的起点与终点. 3) 通过 A* 算法依次求解各 AGV 的最短路径, 直到任务为空集. 4) 通过上位机, 对 AGV 的优先级进行分配. 5) 当上位机检测到冲突时, 判断冲突类型. 若为静止冲突, 即工作路径出现新的障碍物, 上位机对工作路径存在障碍物的 AGV 重新规划; 若为相向冲突, 将交叉节点判为障碍物节点, 对优先级低的 AGV 重新进行路径规划. 6) 上位机继续检测是否存在冲突, 若无, 则调到步骤 7; 存在, 则返回步骤 5. 7) AGV 到达目标点, 顺利完成目标任务, 等待上位机新的指令并退出算法.

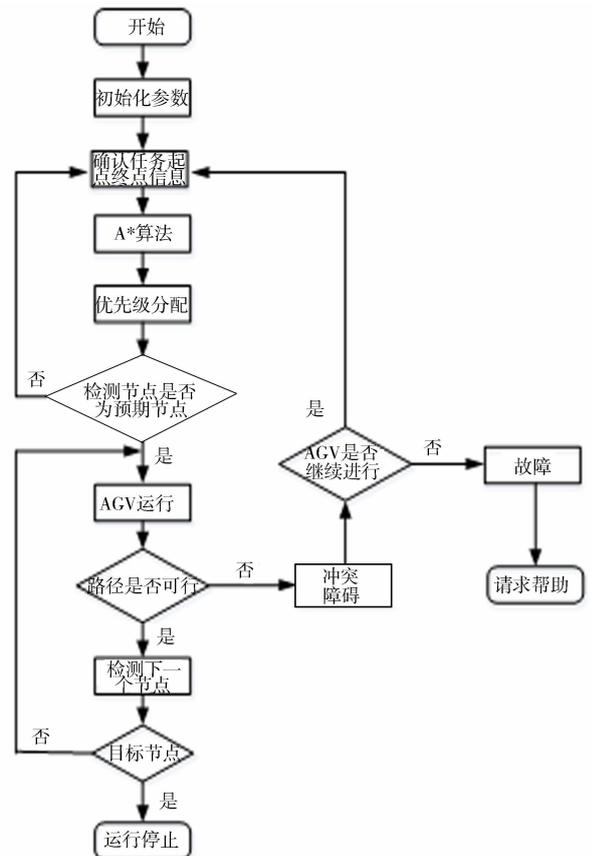


图 5 多 AGV 路径规划流程图

Fig. 5 Multi-AGV path planning process

1) 参数初始化, 确定参与 AGV 数量. 2) 确认各 AGV 任务的起点与终点. 3) 通过 A* 算法依次求解各 AGV 的最短路径, 直到任务为空集. 4) 通过上位机, 对 AGV 的优先级进行分配. 5) 当上位机检测到冲突时, 判断冲突类型. 若为静止冲突, 即工作路径出现新的障碍物, 上位机对工作路径存在障碍物的 AGV 重新规划; 若为相向冲突, 将交叉节点判为障碍物节点, 对优先级低的 AGV 重新进行路径规划. 6) 上位机继续检测是否存在冲突, 若无, 则调到步骤 7; 存在, 则返回步骤 5. 7) AGV 到达目标点, 顺利完成目标任务, 等待上位机新的指令并退出算法.

4 仿真结果分析

4.1 仿真平台

选用 Visual 2017 作为仿真工具, 在仿真平台下, 选择 10×10 的环境模型, 显示 AGV 的路径规划结果, 同时检测在文中调度方法下多 AGV 的适用性. 通过随机生成障碍物检测多 AGV 的动态适应能力, 其栅格地图, 如图 6 所示.

4.2 结果分析

传统多 AGV 工作路径规划, 如图 7 所示. 图 7 中: 黑色方块为障碍物; 红色方块为目标点; 灰色折线为最终生成的工作路径. 以 3 辆小车为一组, 进行试验, 选用两种仿真模型进行验证调度方法的适用性: 第一种, 一般路径规划方法下的多 AGV 路径规划结果图; 第二种, 调度方法下的多 AGV 路径规划结果图. 在 Visual 2017 中, 为了验证其各自路径规划方法的防碰撞、避障的能力, 随机生成任务请求, AGV1, AGV2, AGV3 小车的起点分别为绿色、蓝色、黄色方块.

只采用 A* 算法进行多 AGV 的路径规划时, AGV1 与 AGV2 在坐标 (7, 4) 存在交叉点; AGV1 与 AGV3 在坐标 (4, 9) 存在交叉点. 基于有限状态机的多 AGV 优化调度的路径规划, 如图 8 所示. 通过引入有限状态机模型, 对其调度进行优化, 因为上位机检测到交叉点 (7, 4), 在交叉点 (7, 4) 前, 对低优先级的蓝色小车 AGV2 进行重新规划, 合并蓝色小车和绿色小车的工作路径. 又因为 AGV 速度恒定, 因此在同一条路径中不存在碰撞的问题, 即交叉点已经消失. 按照优先级, 对低优先级的 AGV2 重新进行路径规划, 消除了交叉点, 避免了碰撞、堵塞的发生. 同理, AGV2 与 AGV3 的交叉点 (4, 9) 也已经消失. 由图 7, 8 可知: 当有障碍物存在时, 对各 AGV 进行规划, 通过与有限状态机的调度策略相结合, 在 AGV 遇到障碍物后, 动态地更新运行路径, 实现实时避障.

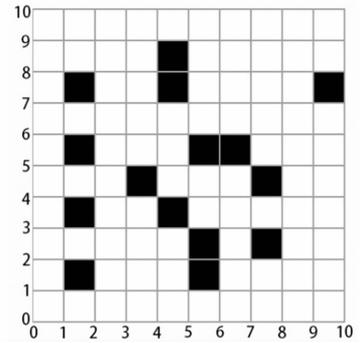


图 6 随机栅格地图
Fig. 6 Random grid map

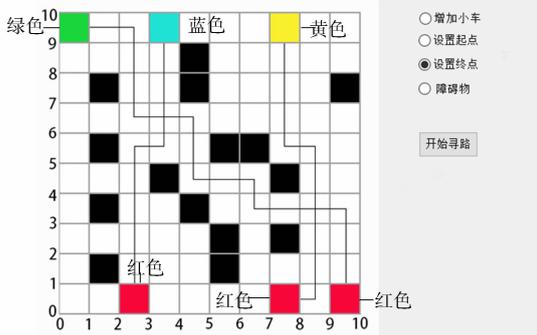


图 7 传统多 AGV 工作路径规划
Fig. 7 Traditional multi-AGV work path planning

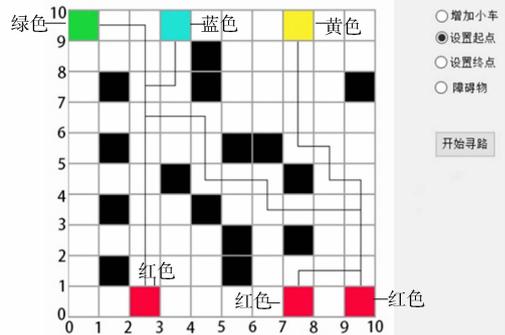


图 8 基于有限状态机的多 AGV 优化调度的路径规划
Fig. 8 Path planning of multi-AGV optimal scheduling based on finite state machine

A* 算法和结合有限状态机模型算法的 AGV 冲突次数与路径搜索时间对比, 如表 1 所示. 由表 1 可知: 在起始点与目标点相同的条件下, 结合有限状态机模型后的 A* 算法的冲突次数消失, 路径搜索时间减少, 降低了多 AGV 路径规划时计算的复杂度, 减少了路径规划时对内存的占据, 提高 AGVS 的工作效率.

表 1 AGV 冲突次数与路径搜索时间对比
Tab. 1 Number of AGV collisions and search time

编号	冲突次数/次		路径搜索时间/ms		路径长度/单元	
	A* 算法	结合有限状态机模型后的算法	A* 算法	结合有限状态机模型后的算法	A* 算法	结合有限状态机模型后的算法
AGV1	2	0	1.950 0	1.200 0	18	18
AGV2	1	0	0.830 0	0.550 0	10	10
AGV3	1	0	0.750 0	0.580 0	10	11

5 结束语

为实现多 AGV 的无碰撞、无堵塞的安全运行,提出基于有限状态机的调度方法对多 AGV 进行动态路径规划,解决了多 AGV 中 AGV 之间的潜在碰撞冲突,并且通过去交叉的方法,将交叉点移除,保证了路径尽可能最优,而且提升系统效率.在 AGV 的工作路径中,若路径中出现障碍物,通过调度方法,为 AGV 提供了新的工作路径,实现其实时避障的目的,增强 AGVS 的适用性.仿真实验结果表明了该调度方法的可行性.

参考文献:

- [1] QIU Ling, HSU W J. Scheduling and routing algorithms for AGVS: A survey[J]. *International Journal of Production Research*, 2002, 40(3): 745-760. DOI:10.1080/00207540110091712.
- [2] FAZLOLLAHTABAR H, SAIDI-MEHRABAD M, MASEHIAN E. Mathematical model for deadlock resolution in multiple AGV scheduling and routing network: A case study[J]. *Industrial Robot*, 2015, 42(3): 252-263. DOI:10.1108/IR-12-2014-0437.
- [3] SMOLIC-ROCAK N, BOGDAN S, KOVACIC Z, *et al.* Time windows based dynamic routing in multi-AGV systems [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(1): 151-155. DOI:10.1109/TASE.2009.2016350
- [4] HAN Zengliang, WANG Dongqing, FENG Liu, *et al.* Multi-AGV path planning with double-path constraints by using an improved genetic algorithm[J]. *Plos One*, 2017, 12(7): e0181747. DOI:10.1371/journal.pone.0181747.
- [5] ALCAIDEA D, CHUB C, KATSC V, *et al.* Cyclic multiple-robot scheduling with time-window constraints using a critical path approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(1): 147-162. DOI:10.1016/j.ejor.2005.11.019.
- [6] DRAGANJAC I, MIKLIĆ D, KOVAČIĆ Z, *et al.* Decentralized control of multi-AGV systems in autonomous warehousing applications[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(4): 1433-1447. DOI:10.1109/TASE.2016.2603781.
- [7] 吕太之, 周武, 赵春霞. 采用粒子群优化和 B 样条曲线的改进可视图路径规划算法[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(1): 103-108. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201702101.
- [8] 余婷, 王飞, 汲洋弘康. 染缸资源的离散事件动态系统建模及优化[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(1): 31-35. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.01.0031.
- [9] 戴志存. AGV 调度系统的设计[J]. *物流技术与应用*, 2015, 20(9): 149-152. DOI:10.3969/j.issn.1007-1059.2015.09.024.
- [10] 王娟娟, 曹凯. 基于栅格法的机器人路径规划[J]. *农业装备与车辆工程*, 2009, 2009(4): 14-17. DOI:10.3969/j.issn.1673-3142.2009.04.004.
- [11] 朱金旺. 离散事件系统的 Petri 网控制器设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [12] 黄子超. 基于有限状态机的车队纵向协作策略建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [13] GIRAULT J, LOISEAU J J, ROUX O H. On-line compositional controller synthesis for AGV[J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2016, 26(4): 583-610. DOI:10.1007/s10626-015-0222-1.
- [14] 伍国华, 马满好. 路径交叉检测与消除方法和邻节点置换方法改进 TSP 的解[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 485-487. DOI:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.02.021.
- [15] 熊光明, 李勇, 王诗源. 基于有限状态机的智能车辆交叉口行为预测与控制[J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(1): 34-38. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2015.01.007.
- [16] 冯海双. AGV 自动运输系统调度及路径规划的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)