

复杂车间环境下并行式多机器人解耦式冲突避免轨迹规划

赵桂清¹ 崔传辉¹ 王 宁¹
ZHAO Guiqing CUI Chuanhui WANG Ning

摘 要

多机器人在包含大量的静态障碍物的复杂车间环境工作时,需要频繁交互和协作,以确保任务的顺利完成。但在没有解耦的情况下,机器人路径规划算法需要同时考虑全局路径的优化和冲突的检测与处理,增加了不必要的绕行路径长度和等待时间。因此,开展并行式多机器人解耦式冲突避免轨迹规划研究。采用分布式控制架构,采集多机器人之间的协作状态数据。根据获取的多机器人协同作业数据,采用Dijkstra算法为每个机器人生成从起点到终点的最短路径,并利用动态窗口法评估不同路径的可行性,提高路径规划效率。根据最短路径,设计解耦式冲突避免设计,解耦过程为将冲突检测与处理过程从全局路径规划中分离出来,以快速响应冲突风险,当检测到冲突风险时,预警机制立即发出预警信号,以便机器人有足够的时间采取避让措施,降低算法复杂度,实现并行式多机器人解耦式冲突避免轨迹规划。通过实例应用证明,该方法能够有效避免多机器人运行中的冲突问题,提高机器人整体运行效率和安全性,为复杂车间环境下的多机器人协同作业提供有力支持。

关键词

复杂车间环境;多机器人;冲突避免;解耦式;并行式

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.010

0 引言

在复杂环境下,多机器人系统的路径规划与冲突避免成为一个亟待解决的关键问题。复杂车间环境中存在多种多样的不确定性因素,如地形、障碍物、新的物体等,这些都给机器人的路径规划和避障带来了特殊的挑战。冲突不仅可能发生在机器人与障碍物之间,更容易发生在机器人与机器人之间。因此,如何在复杂车间环境下实现并行式多机器人的解耦式冲突避免轨迹规划,成为当前研究的热点和难点。

田国富等人^[1]提出了一种基于改进人工蜂鸟算法的取样机器人轨迹规划方法。该方法通过模拟蜂鸟的飞行特性,结合改进的搜索策略,实现了对复杂环境下取样机器人轨迹的优化。然而,该方法主要聚焦于单个机器人的轨迹规划,对于多机器人系统中的冲突避免问题考虑不足,难以直接应用于并行式多机器人系统。杜娟等人^[2]则采用IPSO(改进粒子群优化)算法对3次样条曲线进行拟合,以实现机器人的平滑轨迹规划。该方法在提高轨迹平滑度和缩短规划时间方面表现出色,但在处理多机器人系统的轨迹规划时,同样存在冲突避免机制缺失的问题。此外,IPSO算法在处理高维、复杂约束的轨迹规划问题时,可能存在收敛速度慢、易陷入

局部最优等不足,限制了其在多机器人系统中的应用。

基于上述研究,本文提出一种复杂车间环境下并行式多机器人解耦式冲突避免轨迹规划方法。

1 多机器人协作状态数据采集

为实现多机器人系统的有效协作,需要采集多机器人协作状态数据,根据数据信息,使每个机器人在后续的路径规划过程中,能够根据全局任务和局部环境信息自主决策,同时与邻近机器人保持同步,以减少冲突。机器人之间通过无线网络进行信息交换,包括位置、速度、目标点等关键数据。协作机制基于分布式控制架构,每个机器人根据全局任务和局部环境信息自主决策,同时与邻近机器人保持同步,以减少冲突^[3]。通信协议设计需考虑数据包的格式、发送频率以及丢失包的处理策略。多机器人协作状态数据采集结果为:

$$C(t) = f(S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t), G) \quad (1)$$

式中: $C(t)$ 表示 t 时刻的协作状态; $S_i(t)$ 表示第 i 个机器人在 t 时刻的状态(包括位置、速度等); G 表示全局任务目标。该函数 f 描述了机器人如何根据各自状态和全局目标进行协作。

2 并行式轨迹规划最短路径设计

本小节旨在构建一个并行式轨迹规划框架,以支持多个

1. 聊城大学东昌学院 山东聊城 252000

[基金项目] 聊城市重点研发计划政策引导类项目(2023YD09)

机器人规划生成的路径为最短路径,通过合理的任务分配和并行处理机制实现,显著提高了规划效率。在初步规划阶段,采用 Dijkstra 算法在已知车间布局和障碍物信息的情况下,结合采集到的多机器人协作状态数据,为每个机器人生成从起点到终点的最短路径。设车间环境为图 $G=(V,E)$, 其中 V 为节点集合(代表车间中的位置点), E 为边集合(代表路径段)。全局路径搜索可表示为:

$$P_i = w(u, v) \arg \min P(s_i, g_i) \quad (2)$$

式中: P_i 表示第 i 个机器人的最优路径; $P(s_i, g_i)$ 表示从起点 s_i 到终点 g_i 的所有可能路径集合; $w(u, v)$ 表示边 (u, v) 的权重(代表路径长度或通行成本)。

在全局路径搜索初步规划完成后,机器人需要进入局部动态调整与避障阶段,以适应实时环境变化和机器人间的相对位置变化^[4]。这一阶段的目标是确保机器人在遵循全局最优路径的同时,能够灵活避开动态障碍物(如其他机器人、突然出现的工人或设备)和静态障碍物(如墙壁、固定设备等),同时保持路径的连续性和可行性。首先,机器人需要实时感知周围环境,包括其他机器人的位置、速度、方向等动态信息,以及静态障碍物的位置和形状等静态信息^[5]。这些信息通过传感器获取,并通过数据融合算法进行整合,形成对环境的完整理解。基于实时感知的环境信息,机器人需要采用局部路径规划算法来生成或调整其当前路径。本文选用动态窗口法(dynamic window approach, DWA),该算法通过考虑机器人在未来一段时间内的可能速度和加速度范围(即动态窗口),来评估不同路径的可行性。对于每个可能的路径,计算其代价函数,该代价函数通常包括路径与目标的距离、路径与障碍物的距离、路径对应的速度变化等因素的加权和^[6]。然后,算法选择代价最小的路径作为当前的最优路径。其代价函数可以表示为:

$$J(v, a) = \alpha \cdot h(v, a) + \beta \cdot d(v, a) + \gamma \cdot c(v, a) \quad (3)$$

式中: v 和 a 分别表示机器人的速度和加速度; α 、 β 、 γ 表示权重系数,用于平衡不同因素的重要性; $h(v, a)$ 表示机器人当前朝向与目标朝向之间的误差; $d(v, a)$ 表示机器人与最近障碍物之间的距离; $c(v, a)$ 表示机器人速度的变化量。

在避障策略中,如果预测到即将发生碰撞,机器人可以采取减速或转向等动作^[7]。以减速为例,其加速度为:

$$a_d = \frac{v}{\Delta t} \quad (4)$$

式中: a_d 表示加速度; v 表示机器人当前的速度; Δt 表示减速所需的时间。通过局部动态调整与避障阶段的设计,机器人能够在复杂环境中灵活地规划并执行其路径,同时确保安全性和效率。

3 解耦式冲突避免设计

本小节旨在构建一个解耦式冲突避免策略框架,将冲突检测与处理过程从全局路径规划中分离出来^[8],实现冲突的快速响应和高效解决。该框架包括冲突预测与预警机制、冲突区域划分与独立处理策略以及路径恢复与优化阶段。基于冲突预测与预警机制,包括定义时空占用区域、计算预测位置、判断冲突风险等步骤,以准确预测潜在的碰撞事件,并在冲突发生前提前发出预警,为机器人提供足够的时间采取避让措施。采用基于时空占用的冲突模型用于描述机器人在车间环境中的动态行为^[9],设机器人 i 在 t 时刻的位置为 $p_i(t)$,速度为 $v_i(t)$,则其在未来时间窗口 ΔT 内的时空占用区域可表示为:

$$R_i(t+\Delta T) = \{p | p = p_i(t) + \lambda v_i(t), 0 \leq \lambda \leq \Delta T\} \quad (5)$$

在复杂车间环境下,多机器人系统的冲突预测与预警机制是确保系统安全、高效运行的关键。该机制通过比较不同机器人的时空占用区域,预测潜在的碰撞事件,并在冲突发生前提前发出预警,从而允许机器人有足够的时间采取避让措施。首先,需要为每个机器人定义一个时空占用区域,该区域表示机器人在未来一段时间内的可能位置范围。这个区域可以是一个以机器人当前位置为中心,根据机器人的速度、加速度以及预测时间窗口确定的几何形状(如圆形、椭圆形或矩形等)。设机器人 i 在 t 时刻的位置为 $p_i(t)$,速度为 $v_i(t)$,加速度为 $a_i(t)$,预测时间窗口为 ΔT ,则机器人 i 在 $t+\Delta T$ 时刻的预测位置可以表示为:

$$p_i(t+\Delta T) = p_i(t) + v_i(t) \cdot \Delta T + \frac{1}{2} a_i(t) \cdot (\Delta T)^2 \quad (6)$$

机器人的时空占用区域 $R_i(t+\Delta T)$ 可以定义为以 $p_i(t+\Delta T)$ 为中心,根据机器人的尺寸、速度、加速度等因素确定的一个区域。如果采用圆形区域,则半径 r_i 表示为:

$$r_i = r_b + k_v \|v_i(t)\| + k_a \|a_i(t)\| \quad (7)$$

式中: r_b 表示机器人的基础半径; k_v 表示速度缩放因子; k_a 表示加速度缩放因子。

在定义了时空占用区域后,可以通过比较不同机器人的时空占用区域来判断是否存在冲突风险。如果两个机器人的时空占用区域存在交集,则认为存在冲突风险。设机器人 i 和机器人 j 的时空占用区域分别为 $R_i(t+\Delta T)$ 和 $R_j(t+\Delta T)$,则冲突判断条件可以表示为:

$$R_i(t+\Delta T) \cap R_j(t+\Delta T) \neq \emptyset \quad (8)$$

当检测到冲突风险时,预警机制需要立即发出预警信号,以便机器人有足够的时间采取避让措施。预警信号可以包括冲突的类型(如相向碰撞、追尾碰撞等)、冲突的严重程度(如距离碰撞发生的时间、预计的碰撞速度等)以及建议的避让措施(如减速、转向等)。预警机制的实现可以基

于事件驱动或时间驱动的方式^[10]。事件驱动方式是在检测到冲突风险时立即触发预警；时间驱动方式则是按照一定的时间间隔定期检查是否存在冲突风险，并在检测到风险时发出预警。

冲突区域划分与独立处理策略将冲突区域划分为若干子区域，每个子区域内的冲突由负责该区域的机器人独立处理。这种划分减少了全局规划的复杂性和计算负担，提高了冲突解决的效率。设冲突区域为 A ，将其划分为 M 个子区域 $\{A_1, A_2, \dots, A_M\}$ ，则每个子区域内的冲突处理可表示为：

$$R(A_j) = g_j(R_1(t+\Delta T) \cap A_j, R_2(t+\Delta T) \cap A_j, \dots) \quad (9)$$

式中： $R(A_j)$ 表示解决子区域 A_j 内冲突的策略； g_j 表示该策略的具体实现函数。

冲突解决后的路径恢复与优化阶段，根据冲突处理结果，对受影响的机器人路径进行调整，确保路径的连续性和最优性。同时，利用局部动态调整与避障策略，进一步优化路径，减少不必要的绕行和等待。

4 实例应用

4.1 测试环境

为了验证前文所述轨迹规划方案的实际应用可行性，在实验室内构建了一个模拟复杂车间环境，并部署了 6 台采用全向轮结构的移动机器人进行测试。这种全向轮设计使机器人能够在平面上实现任意方向的灵活移动。此外，每台机器人都配备了先进的激光测距传感器，用于精确地定位以及实时获取周围环境的位置信息，从而确保实验数据的准确性和可靠性。图 1 为构建的测试环境。

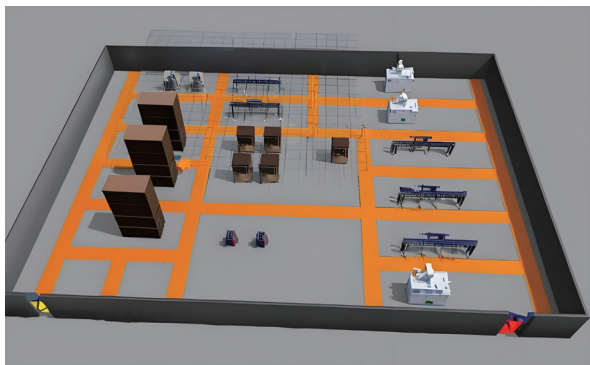


图 1 测试环境

在此基础上，各机器人能够从上级任务分配系统接收相应的作业指令，并据此前往目标地点。接受任务指令后，机器人会根据当前的全局交通状况进行全局路径规划，计算出一条无碰撞的路径及其时间顺序信息。随后，这些信息以 Topic 的形式，具体命名为“cdvel”，被发送至本地规划器，并遵循 ROS (robot operating system) 通信标准发布。

该 Topic 的数据类型设定为 `geometry_msgs/Twist`，消息类型包含线性 (linear) 和角速度 (angular) 两部分。线性部分包含 x 、 y 、 z 三个方向的线速度数据，数据类型均为 `float64`，分别代表在三个方向上的移动速率；角速度部分同样包含 x 、 y 、 z 三个方向的旋转速率数据，数据类型也均为 `float64`，表示绕着 3 个轴的旋转速度。最终，在接收到这些速度指令后，机器人的控制模块会驱动其按照预定轨迹行进，直至精确抵达指定位置。

4.2 测试环境

将上述构建的测试环境放置在二维坐标中，并将初始位置和目标位置绘制成如图 2 所示。

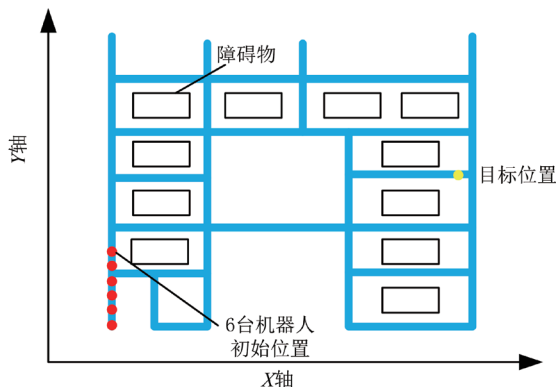


图 2 初始位置与目标位置示意图

对含有 6 台移动机器人的环境进行规划效果的验证。在图 2 中，移动机器人的起始布局被明确标识。随后，在环境内的道路网络上随机挑选目标点，并将该点的精确坐标作为各自移动机器人的目标指令发送出去。6 台机器人按照本文规划的轨迹运行。

4.3 机器人并行轨迹规划测试结果

在上述实验环境中，设置 1、2、3 号机器人首先出发，4、5、6 号机器人 10 s 后出发，并分析本文方法规划方案的有效性，规划结果如图 3 所示。

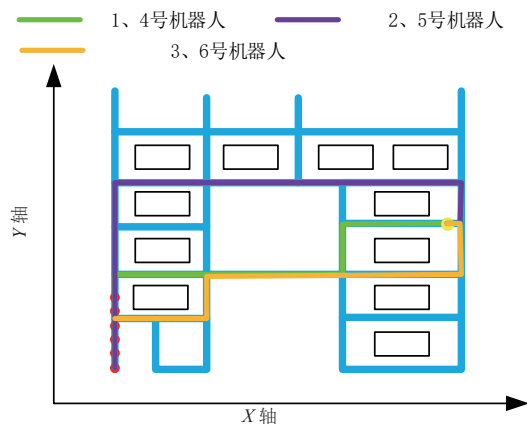


图 3 规划轨迹对比图

从图3所示的轨迹规划对比结果可以看出,本文规划方法应用下,6台机器人在复杂车间环境中按照规划轨迹行进的过程,且在整个运行过程中未碰撞任何障碍物,这充分证明了该规划方法能够有效避免多机器人间的冲突,实现路径规划。具体而言,每台机器人均严格遵循了事先通过算法计算得出的最优路径行进。这些路径不仅确保了机器人之间以及机器人与障碍物之间的安全距离,同时还尽可能规划最短路径。路径长度的优化对于提升机器人系统的整体运行效率至关重要,因为其直接关系到机器人完成任务所需的总时间和能耗。

4.4 规划效果分析

为进一步验证该规划方法的适应性,设置多组不同障碍物数量条件,比较3种规划方法的适应度。适应度是衡量规划算法解决特定问题能力的直接指标,其反映了规划算法在给定的环境或条件下,能否有效地找到最优或接近最优的解决方案。在路径规划问题中,适应度高的方法意味着方法能够更高效地避开障碍物,找到最短或最安全的路径。测试结果如图4所示。

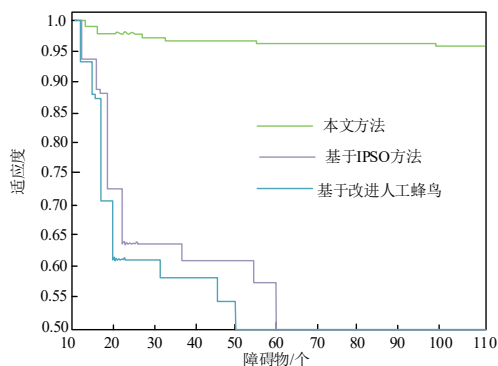


图4 三种规划方法适应度对比

由图4可知,随着障碍物数量的递增,3种规划方法的适应度均展现出逐步降低的趋势。相比之下,本文所提出的规划方法在适应度下降幅度上表现最为平缓。具体而言,当障碍物数量从10个增加至110个时,本文方法的适应度值持续保持在0.95以上,而其余两种规划方法则未达到这一水平。这一实验结果有力地验证了本文方法在实际应用场景中具有更高的适应性和优越性。

5 结语

本文深入探讨了复杂车间环境下并行式多机器人解耦式冲突避免轨迹规划的问题,并提出了一种具有前瞻性的解决方案。本文的研究工作为实现多机器人在复杂车间环境下的高效协同作业提供了有益的参考和借鉴,未来研究将在此基础上,进一步探索更为高效、灵活的路径规划与避障技术,以满足不同应用场景的实际需求。

参考文献:

- [1] 田国富,项敏,林泽利.基于改进人工蜂鸟算法的取样机器人轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2024(8):17-21.
- [2] 杜娟,宋易奇,陈峙,等.基于IPSO算法的改进三次样条机器人轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2023(11):6-10.
- [3] 贾思雨,毕凌滔,曹扬,等.基于改进MADDPG的多机器人路径规划方法研究[J].计算机仿真,2024,41(8):458-465.
- [4] 陶冶同,陶建峰,覃程锦,等.基于时间冲击最优的TBM换刀机器人轨迹规划[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(1):1-9.
- [5] 刘杰,卞新宇,王晓勇,等.改进鲸鱼优化算法的机器人时间最优轨迹规划[J].机械设计与制造,2023(2):270-275.
- [6] 封燕芳,吴必瑞,赵倩.基于改进门字形轨迹的番茄生产线DELTA分选机器人轨迹规划[J].食品与机械,2023,39(8):71-75.
- [7] 訾斌,徐铎,唐锴,等.基于机器视觉的喷涂机器人轨迹规划与涂装质量检测研究综述[J].控制与决策,2023,38(1):1-21.
- [8] 刘翔,王开科,李菲.改进RBF神经网络在智能机器人轨迹规划中的研究[J].机械设计与制造,2024(4):90-94.
- [9] 黄德启,吴健辉.基于原子轨道搜索算法的6自由度装配机器人轨迹规划[J].机械传动,2023,47(12):34-39.
- [10] 来海滨,汪满新,刘松涛,等.基于345-修正梯形运动规律的4-RR(SS)₂并联机器人运动轨迹规划[J/OL].农业机械学报,1-12[2024-06-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20240130.1719.022.html>.

【作者简介】

赵桂清(1977—),女,山东聊城人,硕士,教授,研究方向:电子信息、计算机仿真。

崔传辉(1984—),男,山东聊城人,硕士,副教授,研究方向:机械工程。

王宁(1989—),女,山东聊城人,硕士,副教授,研究方向:电气工程。

(收稿日期:2025-02-14 修回日期:2025-06-05)