

doi: 10.7690/bgzdh.2024.10.017

基于元胞自动机的多机器人路径规划方法

夏庆锋¹, 朱佳悦¹, 许可儿²

(1. 无锡学院自动化学院, 江苏 无锡 214105; 2. 南京信息工程大学自动化学院, 江苏 无锡 210044)

摘要: 为将多个智能机器人组合为一个整体来完成更复杂的任务, 提出一种基于元胞自动机 (cellular automata, CA) 模型的多机器人协作路径规划方法。通过构建 CA 模型实现机器鱼的聚类和控制, 寻找最优策略和路径。通过设置合适的初始状态和演化规则, 模拟多机器鱼之间协作顶球的整个过程。通过 Matlab 仿真和国际水中机器人大赛的 2D 仿真平台进行实验验证, 并对未来的研究方向进行探讨。结果表明: 该方法是可行的, 具有较好的鲁棒性。

关键词: CA; 多机器人协作; 路径规划; 障碍物检测

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Research on Multi-robot Path Planning Method Based on Cellular Automata Model

Xia Qingfeng¹, Zhu Jiayue¹, Xu Keer²

(1. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Wuxi 210044, China)

Abstract: In order to combine multiple intelligent robots into a whole to complete more complex tasks, a multi robot collaborative path planning method based on cellular automata (CA) model is proposed here. The cellular automaton model is adopted to achieve the clustering and control of robotic fish, aiming to search for the best control strategies and moving paths. Moreover, with proper initial states and evolution rules, the whole process of ball topping collaborated by multiple robotic fishes is simulated. Then, the precision and the robustness of the proposed method is verified with the homemade Matlab codes, as well as the simulation platform of the International Aquatic Robot Competition. Finally, the future plan on this study is introduced and discussed.

Keywords: CA; multi-robot collaboration; path planning; obstacle detection

0 引言

元胞自动机 (CA) 模型是处理空间离散系统的一种有效方法, 将空间离散化为一组大小相等的小单元, 并对每个格子进行状态转换的过程。在这个过程中, 每个单元格的状态仅与周围相邻单元格的状态有关, 从而形成了简单的局部规则, 而这些局部规则又会形成全局规则。笔者提出一种基于 CA 模型的多机器人协作路径规划方法, 通过构建 CA 模型来实现机器鱼的聚类和控制, 寻找最优策略和路径。

1 相关工作

1.1 多机器人路径规划的问题描述

多机器人路径规划问题是指在一个共享环境下, 多个机器人需要完成一系列任务并到达指定的目的地, 因此比单机器人路径规划问题更为复杂, 需要规划每个机器人的路径, 考虑时间成本的同时还需考虑碰撞检测、协作方式等多个因素^[1]。使得

所有机器人的总耗时最小, 即尽早完成所有任务的同时, 最小化机器人的路径长度或时间成本。

假设有 M 个机器人和 N 个任务需要完成。对于每个机器人 i , 其有初始位置 s_i 和目标位置 t_i , 对于每个任务 j , 其有指定的起始位置 l_j 和目标位置 r_j 。机器人和任务都需要在环境中移动, 在移动过程中避免碰撞和冲突, 同时还要满足时间、边界等约束条件。

1.2 多机器人路径规划的原则

为了使得多机器人路径规划更加高效和可靠, 需要考虑以下方面:

1) 碰撞避免原则: 在路径规划时, 应尽可能避免机器人相互干扰和竞争。为了避免碰撞, 可以采用约束式优化算法, 将碰撞函数作为约束条件, 限制机器人运动的自由度。

2) 路径优化问题: 多机器人路径规划可以转化为路径优化问题, 目标是找到每个机器人的最优路

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-20

基金项目: 辽宁省科技厅联合开放基金机器人学国家重点实验室开放基金资助项目 (2021-KF-22-19); 新一代信息技术创新项目 (2022IT208); 江苏高校青蓝工程

第一作者: 夏庆锋 (1982—), 男, 山东人, 硕士。

径,使得它们完成任务的时间最短。

3) 优先级原则:在多任务并发执行中,应考虑任务执行的优先顺序,尽可能地考虑减少机器人的移动距离和时间,以提高整个系统的效率和性能,合理利用算力资源。

4) 资源共享原则:在多机器人协作中,机器人之间需要共享资源、信息、数据等,以提高整个系统的效率和性能。

5) 环境扰动处理:在实际场景中,环境随时可能发生变化,如机器人故障或者环境干扰等,因此需要实时处理和调整规划路径,以保证系统的稳定性和鲁棒性^[2]。

1.3 多机器人路径规划的应用场景

多机器人路径规划应用场景有很多,如智能制造车间中的多机械臂协作、无人机编队任务、自动化仓储和配送、物流和仓库管理、大规模的农业生产、建筑施工、环境监测数据采集、灾害搜索救援等危险或重复性的工作。

2 元胞自动机模型

CA 是一种离散动态系统,由许多简单同构的计算单元组成,这些计算单元被称为元胞。每个元胞都可以处于有限的状态之一,并且根据其本身和相邻元胞的状态进行演化^[3]。利用元胞自动机模型将水池空间平分为若干小单元格子,每个单元格子代表一个局部区域。在每个时刻,每个机器鱼所在的单元格都会随着时间的推移改变状态,且机器鱼和球之间互相影响,机器鱼可选择传球给另一个机器鱼;因此,通过构建 CA 模型,可以有效地模拟机器鱼之间的协同运动,在最终达到目标的过程中,使它们通过传球等方式实现协同完成任务。

2.1 元胞空间的建立

在使用 CA 算法实现最优路径规划时,首先需要建立元胞空间^[4]。元胞空间可以由一个 2 维或 3 维的网格来表示,每个网格上的位置对应一个元胞。在最优路径规划问题中,起点和终点分别被标识为不同的状态,其他位置则被标记为障碍或通行状态。

根据比赛场地的需要确定元胞空间的大小,创建一个 2 维矩阵,其中每个网格代表一个元胞。初始化元胞状态,规定障碍物的状态值为 1,通路的状态值为 0。采用 Matlab 图形界面的方式将建立的元胞空间可视化,以方便后续的调试和测试。

2.2 邻居定义

邻居是指每个元胞周围的其他元胞。对于邻居关系,一般采用 Von Neumann 邻居模型或 Moore 邻居模型。Von Neumann 邻居模型中,每个元胞只有 4 个邻居,即东、南、西、北 4 个方向。Moore 邻居模型中,则允许每个元胞有 8 个邻居,即东、南、西、北、东南、东北、西南、西北 8 个方向。邻居关系的确定对于后续演化规则的制定非常重要。

本文中采用 Moore 邻居模型。在该模型中,将场地划分为若干个网格,每个机器人都被视为一个元胞,每个时刻只能在相邻的网格中移动。机器人所处的网格以及其八邻域内的网格都作为机器人的邻居。机器人可通过邻居之间的联系来调整自己的位置,从而协作完成任务。

3 多机器人协作路径规划方法

3.1 元胞自动机演化规则

元胞自动机的演化规则指定了每个元胞在未来时刻如何转变其当前状态。它是元胞自动机模型最核心的部分,直接影响模型的时空动态行为。演化规则可以看作是一个函数,它规定了当前时刻所有元胞的状态如何转变到下一个时刻,同时还考虑了元胞之间的相互作用。演化规则可以分为离散和连续 2 种类型。离散型演化规则只考虑元胞的离散状态(如 0/1),在每个时刻按特定的规则将元胞状态从当前时刻转移到下一个时刻。而连续型演化规则涉及到连续变量,它们的值在固定时间步长内连续变化,通过微分方程来描述。

采用离散型演化规则,设置规则如下:

1) 机器人状态:该细胞所代表的机器人当前状态,包括初始、运动中、到达目标点后等。

2) 检测邻居:该细胞检测周围的邻居机器人,获取其位置、速度方向和状态等信息。

3) 路径规划:对于当前处于运动中状态的机器人,计算出当下最短路径,并将路径信息传递给邻居。

4) 防碰撞:机器人需要记录自己到起点的距离及当前的速度方向,并预测接下来邻居的运动方向。若发现邻居的运动轨迹会与自己的轨迹碰撞,则通知其他机器人,以便机器人调整自己的运动轨迹。

5) 更新状态:每个机器人根据收到的路径信息和避障预测结果来更新自己的路径,并且在之后的运动中尽可能地遵循该路径。如果机器人到达了目

标点, 则将状态更新为到达目标点。

6) 状态转移: 在每个时刻, 所有细胞的状态都会根据上述规则进行更新。

3.2 初始状态和边界条件

在执行 CA 算法时, 需要定义初始状态和边界条件。对于路径规划问题, 可将起点作为初始状态, 终点和场地边缘作为边界条件。由防碰撞和避障等方式限制元胞的移动。

1) 初始状态: 需要确定每个机器人的初始位置和方向。通过比赛要求或随机分配机器人位置、初始速度和方向来实现。同时, 还需要将每个机器人的速度和环境限制在一定范围内, 以确保机器人可以平稳移动。

2) 边界条件: 通常是指场地的边缘, 也可视为边缘网络的邻居。通过如下方式进行纠正: 限制机器人的新位置在地图边界内、限制机器人之间的安全距离、限制机器人速度的大小、限制避让向量的大小。

3.3 结束条件

在实现最优路径规划时, 需要考虑算法的结束条件。通常情况下, 搜索到终点即可结束路径规划的过程; 但是由于存在多个终点的情况, 因此需要对终点的判定进行处理。

1) 时间限制: 设置一个固定的时间限制, 如达到比赛时间, 在这段时间内若机器人未能顶球成功, 则任务失败, 程序将自动停止并输出结果。

2) 达到目标位置: 当机器人成功将球顶入指定区域时, 即视为成功完成任务, 则停止机器人的运动。

3) 仿真次数: 设置固定的仿真次数, 如果在该次数内机器人未能完成任务, 则视为任务失败, 并停止机器人的移动。

3.4 算法流程

使用 CA 算法实现最优路径规划需要建立元胞空间, 指定邻居关系和演化规则。其中, 演化规则是最为重要的一步, 它决定了 CA 算法的搜索策略和路径规划能力。通过筛选得到路径上所有元胞的移动成本之和最小的路径, 这条路径就是最优路径。算法流程如图 1 所示。

4 仿真实验

4.1 Matlab 仿真

为验证 CA 模型的有效性, 仿真平台采用 Matlab

R2018b。通过 Matlab 完成多机器人路径规划以及无碰撞路径规划的仿真实验。根据实际的复杂环境进行数学建模, 将这一障碍物环境模型应用在 CA 中, 设置最大迭代次数为 50 次, 障碍物环境为同一障碍物环境的情况下进行 100 次实验。针对以上实验方式对 5 台机器人, 根据上述 A、B 实验场景分别完成 100 次多机器人路径规划, 对路径规划中的完成时间、防碰撞检测、耗费等综合考虑, 寻得多机器人协作的最优路径。

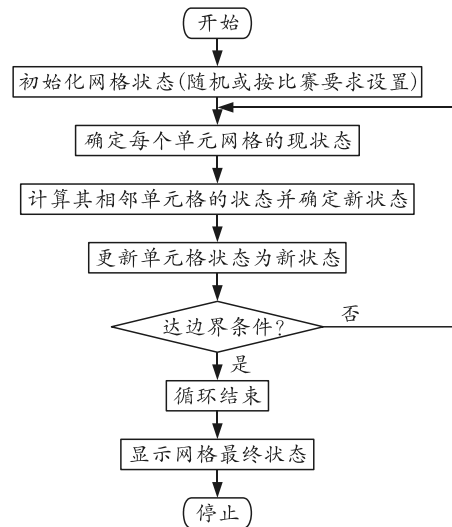


图 1 算法流程

A、B 场景下 CA 算法路径规划图分别如图 2 和 3 所示。元胞空间大小为 300×300。其中黑色的方格代表障碍物, 空白部分为无障碍区, 5 种不同的线条分别为 5 个机器人的最优移动路径。机器人的起始点设为黑色圆点, 目标点设为黑色叉。在障碍物设置为复杂的条件下, CA 分别经过不同障碍物场景即不同起终点后, 机器人搜索到在与其他机器人间和与障碍物间无碰撞情况下的最优路径。通过 2 个仿真图可以看出: 移动机器人在不同环境中, 机器人尽可能的选择自由通路中远离障碍物的路径, 而不是紧靠障碍物, 以减少摩擦与碰撞的发生。

4.2 比赛应用

4.2.1 比赛平台简介

URSim2D 是一款基于 2 维平面环境模型的水中机器人比赛和科研仿真平台, 可以用于开发和测试水下机器人的算法和控制系统。其主要特点包括兼容性强、可扩展性强、环境模拟全面、决策计算准确等, 是一款方便、实用的水下机器人仿真平台, 可满足水下机器人比赛和科研的需求。其服务器端结构框架如图 4 所示。

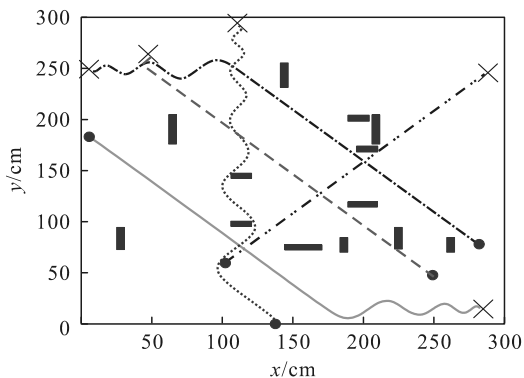


图 2 A 场景元胞自动化机算法路径规划

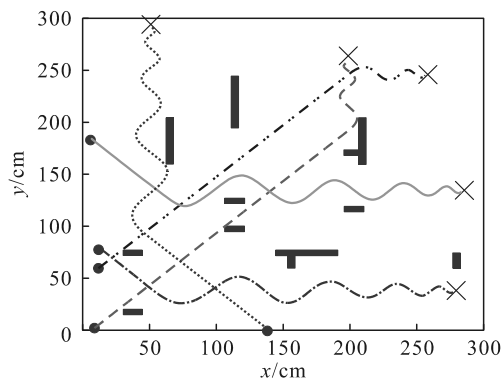


图 3 B 场景元胞自动化机算法路径规划

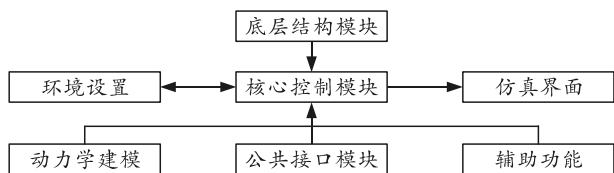


图 4 服务器端结构框架

本文中研究的机器鱼是在国际水中机器人大赛的 2D 仿真平台上开展的。该 2D 仿真平台长度和宽度分别为 4 500 和 3 000 个单位。

4.2.2 比赛规则

比赛时，分为 2 个团队，上下半场。2 支队伍一场比赛总计 10 min，以 5 min 为时进行半场交换。其中，在半场暂停时，比赛双方可以将自己的策略进行更换。比赛中途，比赛双方不能更换新的策略。最后团队得分最高者获胜。

障碍越野：每支队伍 1 条仿真鱼，2 个球，仿真鱼按照给定的路线和流程在避障的情况下完成顶球任务。用时少者获胜。

急速救援：初始状态，1、2 号鱼为进攻方所有，在比赛时充当“警察”角色；3 号鱼为防守方所有，在比赛时充当“恐怖分子”角色，2 个圆形为人质，比赛分上下半场。上半场进攻方解救入质，防守方阻止对方解救入质，下半场反之。

4.3 实验结果

经过设计、调试，得到在比赛平台上的仿真结果。急速救援仿真结果如图 5 所示：本图截取了机器鱼避障后顶球入终点过程中的仿真结果。在 CA 模型下，机器鱼在很好地完成避障任务的同时避免了对对方鱼的干扰，将球顶入目标区域，且用时较短，精准完成了比赛任务，证明了该算法的有效性。

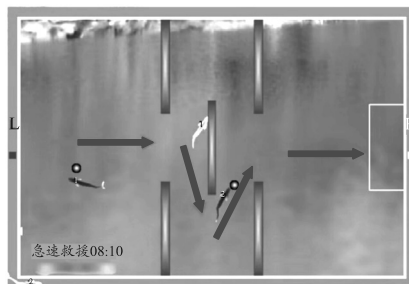


图 5 急速救援

障碍越野仿真结果如图 6 所示：本图截取了机器鱼避障后顶球入终点时的仿真结果。在 CA 模型下，机器鱼很好地按规定完成了避障任务，并将球顶入终点，且用时较短，大大减少了比赛时长，证明了该算法的有效性。

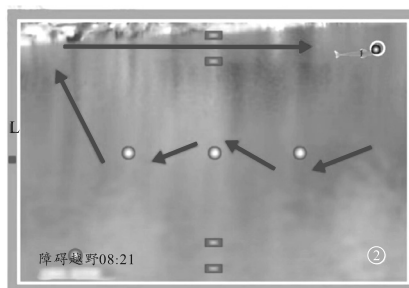


图 6 障碍越野

5 结束语

笔者提出一种基于元胞自动机模型的多机器人路径规划方法，并分别进行了单机和多机实验。单机实验仿真结果表明：元胞自动机算法从路径长度、收敛效果、路径安全性等指标综合分析得出元胞自动机算法优于其他算法。多机实验从路径行驶的总路程与时间、所要修改路径移动机器人的数量以及修改后的路径增长率指标综合分析得出该元胞自动机算法有较高的实际应用价值。通过大量仿真实验，验证了所提算法的有效性和较好的鲁棒性，具有广泛的应用前景。未来，可以考虑在实际场景中验证本文中提出的多机器人协作方法，并进一步完善相关算法和策略，为机器人协作技术的发展作出更大的贡献。

参考文献:

[1] 蒋耀, 夏庆锋, 蒋宁元, 等. 格斗机器人竞赛中的多机器人协作技术研究[J]. 机器人技术与应用, 2021(3): 41-44.

[2] 王子, 林良明, 颜国正. 动态障碍物环境下移动机器人路径规划[J]. 上海交通大学学报, 2002(10):

1430-1434.

[3] 任志国, 郭健, 李爱光, 等. 元胞自动机最短路径算法优化[J]. 遥感学报, 2015, 19(1): 108-115.

[4] 何梦男, 付瑜玲, 陈诚, 等. 基于元胞自动机的应急疏散最短路径优化算法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 51-57.

(上接第 83 页)

表 7 速度控制油门鲁棒性专项对比

着陆性能指标	速度闭环	速度闭环+末端制导算法
触地姿态区间/(°)	[4.0, 5.0]	[4.3, 5.0]
触地下沉率区间/(m/s)	[-1.0, +0.5]	[-0.5, +0.5]
触地空速区间/(m/s)	[-0.5, +0.5]	[-1.5, +1.5]
触地位置区间/m	[-100, +100]	[-50, +50]

5 结束语

笔者以对象无人机浅下滑段油门速度控制触地偏差大的问题为切入口, 深入分析了该控制方案在应对精确着陆问题时存在的不足。笔者肯定了原速度控制方案前期的强一致性特点, 以该方案为基础, 在近地段创新性地引入末端制导控制算法, 形成针对待飞距的位置闭环。基于速度控制的末端制导控制方式, 具有很强的工程实践性, 其理论依据、控制的边界条件均来源于对象无人机本体气动特性及总体相关要求, 在保障着陆基本安全的同时, 有效地提升触地精度达一倍。

通过半物理实时仿真平台和数个架次的外场试飞验证, 已证明了该控制策略的有效性。不论在方舱人员干预操作上还是着陆性能上, 该控制策略较传统方案体现出了很强的稳定性和便利性, 并将作为实验室日后解决首飞着陆问题的主流技术手段。

(上接第 91)

[19] 曲南江. 三维无线传感器网络节点部署与覆盖优化方法研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.

[20] NEMER I A, SHELTAMI T R, MAHMOUD A S. A game theoretic approach of deployment a multiple UAVs for optimal coverage[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 140: 215-230.

[21] CHEN R, LI X, SUN Y, LI S, et al. Multi-UAV coverage scheme for average capacity maximization[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 24(3): 653-657.

[22] 邵长旭, 王茂森, 戴劲松. 基于蚁群算法的无人机最短航路规划[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 93-96.

参考文献:

[1] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 57-61.

[2] 胡兆丰, 何植岱. 飞行动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 23-24.

[3] 段鹏, 郑金豪, 吕健玮. 无人机短距着陆纵向控制策略设计[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2): 186-189, 194.

[4] 贾家宁, 盖科龙, 梁天. 大载荷无人机安全着陆纵向控制策略[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 16-22.

[5] 韩笑, 李春涛, 苏子康, 等. 基于增量动态逆的无人机着舰控制方法[J]. 兵工自动化, 2023, 42(4): 85-92.

[6] 刘军, 黄一敏, 孙春贞. 高超声速飞行器再入段 RCS 姿态控制[J]. 兵工自动化, 2014, 33(3): 47-50.

[7] 张蒙. 大展弦比无人机安全着陆纵向控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

[8] 宋辉. 复杂条件下无人机自动着陆控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[9] 袁铭辉, 贾家宁, 左卓. 某小型高速无人机纵向控制律[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 11-15.

[10] 金伟. 小型双发固定翼无人机飞行控制系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.

[11] FAN Y M, DING M, CAO Y F. Vision algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicle landing system[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(3): 434-443.

[23] MIAO C, CHEN G, YAN C. Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156: 107230.

[24] 魏博文, 邵长旭, 王茂森. 基于人工势场法的无人机群航路自主规划[J]. 兵工自动化, 2018, 37(11): 84-88.

[25] TIAN J, BEI S, LI B, et al. Research on Active Obstacle Avoidance of Intelligent Vehicles Based on Improved Artificial Potential Field Method[J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(6): 97.

[26] XU S. Experimental study on energy consumption of plant protection UAV[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.