

协作型农业机器人集群作业调度模型构建与仿真分析

刘晓明 苏伟 徐阁 贺强 刘奥
襄阳金美科林农业开发有限公司 湖北 南漳 441500

摘要：随着智慧农业的快速发展，协作型农业机器人集群在农业生产中的应用日益广泛。然而，如何实现高效的作业调度，充分发挥机器人集群的协同优势，成为亟待解决的问题。本文针对协作型农业机器人集群作业调度问题，构建了基于改进遗传算法的作业调度模型，并通过仿真实验对模型进行验证与分析。研究表明，该模型能够有效提高机器人集群的作业效率，降低作业成本，为农业机器人集群在实际农业生产中的应用提供理论支持和技术参考。

关键词：协作型农业机器人；集群作业；调度模型；改进遗传算法；仿真分析

1 引言

1.1 研究背景与意义

近年来，我国农业劳动力短缺问题日益严重，据统计，2023年我国农村劳动力人口较2010年减少了约1.2亿人^[1]。与此同时，智慧农业作为农业现代化的重要发展方向，得到了国家的大力支持。农业机器人的应用能够有效缓解劳动力短缺问题，提高农业生产效率和质量。协作型农业机器人集群通过多台机器人的协同作业，可以完成如大规模农田播种、收获、病虫害防治等复杂农业任务。但目前，由于缺乏高效的作业调度模型，机器人集群在作业过程中常出现任务分配不合理、路径规划混乱等问题，导致作业效率低下。构建合理的作业调度模型，实现农业机器人集群的高效协同作业，对于推动智慧农业发展、保障国家粮食安全具有重要意义^[2]。

1.2 国内外研究现状

国外在农业机器人集群作业调度研究方面起步较早，取得了一系列成果。美国加州大学伯克利分校提出了基于分布式多智能体系统的农业机器人集群调度方法，通过机器人之间的信息交互实现任务分配和路径规划，但该方法在复杂环境下的适应性有待提高。欧盟开展的“Agrobot”项目，研究了果园采摘机器人集群的调度策略，采用启发式算法优化任务分配，提高了采摘效率。在国内，相关研究也逐渐增多，华南农业大学研究团队基于粒子群算法构建了农田作业机器人集群调度模型，在一定程度上改善了作业效率，但算法的收敛速度

较慢。总体来看，现有研究在应对农业生产环境的复杂性和不确定性方面仍存在不足，需要进一步探索更有效的作业调度模型^[3]。

1.3 研究内容与方法

本文主要研究内容为构建协作型农业机器人集群作业调度模型，并通过仿真实验分析模型的性能。研究方法包括：运用运筹学和智能优化算法理论，结合农业机器人作业特点，构建作业调度模型；采用MATLAB软件进行仿真实验，对比不同算法和参数设置下的调度结果，验证模型的有效性和优越性^[4]。

2 协作型农业机器人集群作业调度问题分析

2.1 农业机器人集群作业特点

农业生产环节丰富，不同作业任务对机器人的功能需求差异显著。以果园作业为例，采摘任务要求机器人具备高精度视觉识别与柔性抓取能力，如日本开发的草莓采摘机器人，需在复杂枝叶环境中识别成熟果实，其视觉系统需每秒处理30帧图像，且末端执行器抓取力误差需控制在 $\pm 0.5\text{N}$ 以内^[5]。而除草任务则更侧重机器人的路径规划与障碍物规避能力，德国研发的智能除草机器人，可根据杂草分布动态规划路径，每小时作业面积达1.2-1.5亩。此外，播种、施肥任务还需机器人精确控制播种量、施肥量，如国内某企业推出的变量施肥机器人，可根据土壤养分检测数据，将施肥精度控制在 $\pm 3\%$ 以内。下表展示了常见农业任务对机器人功能的不同要求，如表1所示。

表1 机器人的功能需求

任务类型	功能需求	技术指标
采摘	视觉识别、柔性抓取	果实识别准确率 $\geq 95\%$ ，抓取成功率 $\geq 92\%$
除草	路径规划、障碍物规避	作业覆盖率 $\geq 98\%$ ，误判率 $< 5\%$
播种	精确定量、定位	播种间距误差 $< 2\text{cm}$ ，播种深度误差 $< 1\text{cm}$
施肥	变量控制、均匀喷施	施肥量误差 $\pm 3\%$ ，喷施均匀度 $\geq 90\%$

2.2 作业调度的目标与约束条件

作业调度的核心目标是实现资源优化配置，降低农业生产成本。通过合理调度，减少机器人空驶时间，提高设备利用率。以某万亩麦田收割任务为例，优化调度后可使机器人平均空驶里程减少20%-30%，作业时间缩短15%-20%。同时，降低作业成本，包括能源消耗、设备损耗等。在能源成本方面，通过科学调度，可使机器人整体能耗降低10%-15%；在设备损耗方面，减少频繁启停和不合理路径规划导致的机械磨损，延长设备使用寿命1-2年。机器人工作能力限制体现在多个方面。能源续航上，多数农业机器人的电池续航时间为6-8小时，如常见的电动除草机器人，满电状态下连续作业时长约7小时，超出后需返回充电，这影响了作业连续性。作业速度也存在差异，采摘机器人受视觉识别和抓取动作限制，每小时采摘量约为30-50kg，而播种机器人作业速度可达每小时8-10亩。任务先后顺序约束明确，例如在蔬菜种植中，需先完成整地、起垄，才能进行移栽作业，若顺序颠倒将导致返工，增加成本。机器人避碰约束至关重要，在高密度作业场景下，多台机器人同时作业时，需保持安全间距，如在葡萄园喷雾作业中，机器人间距需保持在2-3米，以避免碰撞^[6]。

2.3 现有调度方法存在的问题

目前常用的调度方法如贪心算法、动态规划算法等，在处理农业机器人集群作业调度问题时存在一定局限性。贪心算法往往只能得到局部最优解，无法保证全局最优；动态规划算法在处理大规模问题时，计算复杂度高，难以满足实时性要求。而传统的智能优化算法，如遗传算法、粒子群算法等，在农业复杂环境下容易出现早熟收敛、搜索效率低等问题，无法有效应对农业生产中的不确定性因素。

3 协作型农业机器人集群作业调度模型构建

3.1 模型假设与参数定义

为简化问题，做出以下假设：所有农业机器人在作业开始时处于初始位置；机器人在作业过程中不会发生故障；任务一旦分配给某台机器人，中途不会重新分配。符号定义如表2所示。

表2 符号表示

iao参数符号	参数含义
$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$	机器人集合， n 为机器人数量
$T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$	任务集合， m 为任务数量
d_{ij}	机器人 R_i 到任务 T_j 的距离
t_{ij}	机器人 R_i 完成任务 T_j 所需的时间
e_i	机器人 R_i 的剩余能量

续表：

iao参数符号	参数含义
s_j	任务 T_j 的开始时间
f_j	任务 T_j 的完成时间

3.2 集群运动的理论模型

集群运动是在自然界中广泛存在的一种运动，它是由大量个体形成的一种有序运动。鸟群的成群飞翔，羊群的集体迁移，蚂蚁的有序爬行，各种微生物的集体运动，以及人类聚集移动都是集群运动的典型表现形式^[7]。这些大量个体如何自主组织形成协调有序的运动，以及如何做到既快速又一致，如此高效地形成集群运动，一直以来都是集群运动研究运所探究的关键问题。集群运动的理论建模研究深入研究了生物种群表现出的各式各样协调有序的集群运动，揭示了个体间遵循的相互作用规则才是集群运动形成的关键。

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i \tag{2-1}$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = -\gamma(v_i)v_i + F_i(r_1, \dots, r_N, v_1, \dots, v_N) + \xi_i(t) \tag{2-2}$$

$$-\gamma(v_i)v_i = (\alpha - \beta v_i^2)v_i \tag{2-3}$$

α 为自推进力的强度， β 为摩擦力的强度，旨在防止个体速度过高。 F_i 是个体之间相互作用的社会力，也可以是作用在个体上的外力。一般情况下，它由两部分组成：一部分是群体中个体因相对位置产生的相互作用，即势梯度引起的位置协同力；另一部分是群体中个体因速度产生的相互作用，即依赖于速度的速度协同力。

3.3 基于改进遗传算法的模型求解

传统遗传算法在处理复杂调度问题时容易出现早熟收敛，为提高算法性能，对遗传算法进行改进。在选择操作中，采用轮盘赌选择与精英保留策略相结合的方式，既保证了种群的多样性，又保留了优秀个体。在交叉操作中，引入部分匹配交叉（PMX）方法，有效避免了非法解的产生^[8]。在变异操作中，采用均匀变异和逆转变异相结合的策略，增加算法的局部搜索能力。具体算法流程为首先随机生成一定数量的初始染色体，每个染色体代表一种任务分配和路径规划方案。根据目标函数计算每个染色体的适应度值。通过轮盘赌选择和精英保留策略选择父代染色体。对父代染色体进行部分匹配交叉，生成子代染色体。对子代染色体进行均匀变异和逆转变异。重复上述步骤，直到满足终止条件（如达到最大迭代次数或适应度值收敛）。

4 仿真实验与结果分析

4.1 实验设计

为验证模型的有效性，设置以下仿真实验场景：假

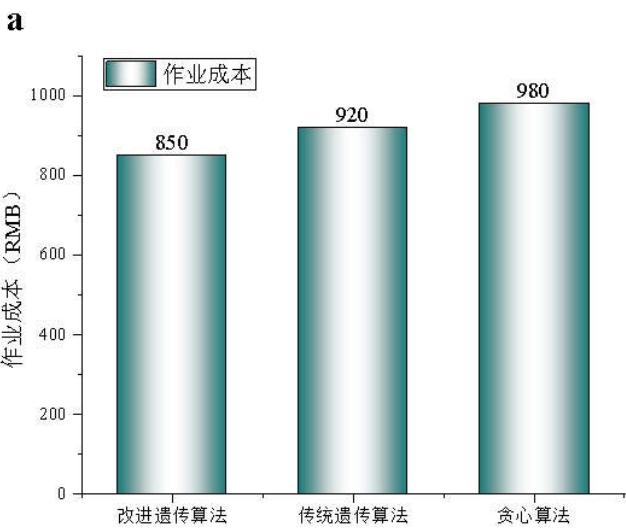
设有4台农业机器人，需要完成4项农业任务，任务的基本信息如下表3所示。

表3 任务基本信息

任务编号	任务类型	作业时间（小时）	作业地点坐标
T1	播种	2	(10, 10)
T2	施肥	1.5	(15, 12)
T3	除草	2.5	(8, 15)
T4	采摘	3	(20, 20)

分别采用改进遗传算法（IGA）、传统遗传算法（GA）和贪心算法（Greedy）进行作业调度，对比三种算法的调度结果。

4.2 实验结果



从图1中数据可以看出，改进遗传算法在总作业时间和作业成本上均优于传统遗传算法和贪心算法，且收敛速度更快。改进遗传算法的总作业时间比传统遗传算法减少了12%，比贪心算法减少了20.9%；作业成本比传统遗传算法降低了7.6%，比贪心算法降低了13.3%。通过对仿真结果的分析，改进遗传算法能够有效提高农业机器人集群的作业效率和降低作业成本，原因在于其改进的选择、交叉和变异操作，增强了算法的全局搜索能力和局部优化能力，避免了早熟收敛，能够在较短时间内找到更优的调度方案。而传统遗传算法由于容易陷入局部最优，导致调度结果较差；贪心算法只能得到局部最优解，无法实现全局最优调度^[9]。

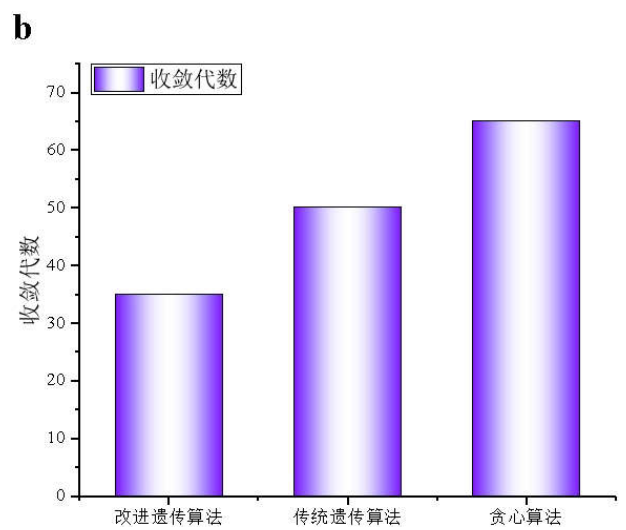


图1 三种算法的对比 (a) 作业成本 (b) 收敛代数

5 结论与展望

本文针对协作型农业机器人集群作业调度问题，构建了基于改进遗传算法的作业调度模型，并通过仿真实验验证了模型的有效性。实验结果表明，改进遗传算法在作业时间、作业成本和收敛速度等方面均优于传统遗传算法和贪心算法，能够为农业机器人集群作业调度提供更优的解决方案。

参考文献

[1]基于人工势场的A*算法的移动机器人路径规划[J].陈继清;谭成志;莫荣现;王志奎;吴家华;赵超阳.计算机科学,2021(11).

[2]RWPSO与马尔科夫链的无人机航路规划[J].胡美富;宁芊;陈炳才;雷印杰.哈尔滨工业大学学报,2019(11).

[3]基于数学建模的集群运动模拟仿真研究[J].韩莉森;

杨中元;耿显亚.数学学习与研究,2019(06).

[4]基于Voronoi图的群体队形控制方法[J].黄东晋;段思文;雷雪;梁景坤.计算机应用,2019(06).

[5]基于图论法的四旋翼三角形结构编队控制[J].赖云晖;李瑞;史莹晶;贺亮.控制理论与应用,2018(10).

[6]无人机自主编队的人工力场控制方法[J].程旗;岳碧波.兵器装备工程学报,2018(08)

[7]Unmanned Aerial Vehicle Formation Inspired by Bird Flocking and Foraging Behavior[J].Tian-Jie Zhang. International Journal of Automation and Computing,2018(04).

[8]强化学习的地-空异构多智能体协作覆盖研究[J].张文旭;马磊;贺荟霖;王晓东.智能系统学报,2018(02).

[9]多机器人协同搜索过程中的队形部署[J].郭莉菲;田玉平.工业控制计算机,2014(05).