

基于蚁群算法的多机协同作业任务规划

曹如月¹ 李世超¹ 季宇寒¹ 徐弘祯² 张漫¹ 李民赞¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现对农田动态环境中多机协同导航作业的调度管理,开展了基于蚁群算法的多机协同作业任务规划研究。将多机协同作业任务规划分为2个环节:任务分配和任务序列规划。首先,采用全局与局部相结合的方法,综合考虑路径代价和任务执行能力,建立了多机协同作业任务分配模型;然后,通过对比分析任务序列规划问题和旅行商问题,利用蚁群算法建立了农机作业的任务序列规划模型;最后,利用 Matlab 平台对基于蚁群算法的任务序列规划进行了仿真试验,根据涿州试验农场的实际地块信息,设置多组不同的任务集合,分析蚁群算法优化路径、各代最佳路径长度和平均长度以及适应度进化曲线。仿真结果表明,基于蚁群算法进行任务序列优化可以有效地降低路径代价,提高作业效率,算法运行时间均小于1 s,满足多机协同作业的实时性需求。

关键词: 多机协同; 任务分配; 任务序列规划; 蚁群算法; 仿真

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0034-06

Multi-machine Cooperation Task Planning Based on Ant Colony Algorithm

CAO Ruyue¹ LI Shichao¹ JI Yuhan¹ XU Hongzhen² ZHANG Man¹ LI Minzan¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the dispatching management of multi-machine cooperative navigation operation in dynamic farmland environment, the task planning of multi-machine cooperative navigation operation based on ant colony algorithm was studied. The task planning of multi-machine cooperative operation was divided into two parts: task allocation and task sequence planning. Firstly, a task allocation model of multi-machine cooperative operation was established by combining global and local methods, considering both path cost and task execution ability. Then, by comparing and analyzing the task sequence planning problem and traveling salesman problem, the task sequence planning model of agricultural machinery operation was established by using ant colony algorithm. Finally, the simulation experiment of task sequence planning based on ant colony algorithm was carried out by using Matlab platform. According to the actual land information of Zhuozhou experimental farm, different groups of task sets were set to analyze the optimization path, the shortest and average distance of each generation and the fitness evolution curve of ant colony algorithm. The simulation results showed that the task sequence optimization based on ant colony algorithm can effectively reduce the cost of path and improve the efficiency of operation. The running time of the algorithm was less than 1 s, which preliminarily met the real-time requirements of multi-machine cooperative operation, and provided a basis for further solving the multi-machine cooperative navigation operation in the field environment.

Key words: multi-machine cooperation; task allocation; task sequence planning; ant colony algorithm; simulation

收稿日期: 2019-04-20 修回日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571570)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)

作者简介: 曹如月(1992—),女,博士生,主要从事多机协同导航技术研究,E-mail: 951132967@qq.com

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

0 引言

农机自动驾驶技术是实施精细农业的关键技术之一,可以实现农机高效作业、精准作业,农机自动驾驶已取得了研究成果^[1-2]。随着我国农业集约化、规模化、产业化发展,以及自动驾驶作业需求的增加,多台同种或异种农机在田间协同作业的多机协同导航作业模式成为农机导航研究的重点^[3]。LIDA等^[4]研发了自动跟随车辆系统,跟随车辆以不变的相对位置自动跟随引导车辆行驶作业。NOGUCHI等^[5]提出了协同导航的“GOTO”和“FOLLOW”2种基本操作模式。ZHANG等^[6]提出了一种农业主从机器人系统的路径规划和跟踪算法,主机在完成耕作、种植和收获等工作的同时,从机跟踪主机完成相应的运输和加油等辅助工作。李世超^[7]研究了一种跟随式农机主从导航系统,从机根据位姿信息生成预设路径,并跟踪主机作业,初步实现了主从导航协同作业。

多机协同作业任务规划是多机协同导航领域的关键点之一,合理的任务规划^[8-10]可以提高整个系统的执行效率,同时降低执行代价,实现对农田动态环境中多机协同导航作业的调度管理。近年来,将智能优化算法^[11]用于解决多机协同任务规划问题已成为协同控制领域的热点,但大部分应用在多无人机和多机器人协同领域^[12-15]。何建华等^[16]提出了一种基于矩阵二进制编码的改进多目标混合蛙跳算法的任务分配策略,以保证更新过程中解的可行性及算法的全局收敛能力。刘晓莹^[17]针对多机器人任务规划的动态性和机器人故障等问题,提出了基于多机器人任务规划问题的弹性适应混沌蚁群算法。JIM等^[18]利用分布式粒子群算法控制参数,机器人搜索策略则是模拟细菌运作行为,完成多目标任务。

本研究旨在通过分析多机协同作业任务规划问题,建立任务分配模型,并利用蚁群算法进行任务序列规划,从而为解决农田作业环境下的多机协同作业供需匹配和任务调度问题提供理论基础,以实现区域内多机协同导航作业的远程管理调度^[19]。

1 多机协同作业任务规划

目前区域农田中的作业管理缺乏高效的农机调度、多机协同作业信息获取手段及科学决策方法。农机作业过程中由于调度供需信息不对称、农机管理部门缺乏科学合理的调度管理方案、调度成本高且效率低等,导致农机无法进行及时有效的调度。

多机协同作业任务规划需要在多个农机和多个

作业地块之间建立一种映射关系,综合考虑任务数量、作业能力、路径代价和时间期限等因素,在满足实际作业约束条件的前提下,生成一个最优的任务调度方案,使各个农机有序地为农田地块服务,从而降低整个系统的执行代价,提高作业效率,实现区域农田内的多机协同作业调度管理。

本研究将多机协同作业任务规划分为2个环节^[20]:任务分配和任务序列规划。多机协同作业任务规划的关键是要在具有多个农机、多个任务的农田环境中,将多个任务合理地分配给各个农机,并且各个农机需要通过任务序列规划,寻找一条最优的作业序列,从而建立一个路径短、效率高、资源配置合理的调度模型。

2 任务分配

任务分配是指根据农机性质、用途、执行能力等因素,在满足约束条件下,将多个任务以最佳方案分配给各个农机,使农机资源得到合理配置。

基于农田作业环境的动态特征,多机协同作业任务分配拟采用全局与局部相结合的方法^[21],整体框架如图1所示。在多机协同作业任务分配过程中,首先进行全局任务分配,根据已知环境信息和任务信息,将初始任务合理地分配给各个农机,生成效率高、资源配置合理的全局调度方案;然后各个农机在作业过程中实时获取动态任务信息,根据供需匹配、决策算法和行为检测等规则对全局调度方案进行一定的修正,来避免一些客观因素导致的农机供需不匹配问题,从而实现局部任务分配,使整个系统具有更强的环境适应能力。

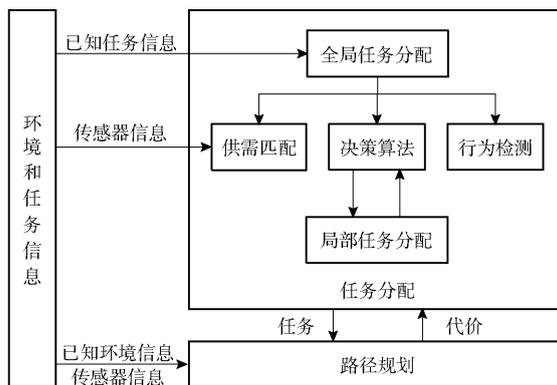


图1 多机协同任务分配整体框架

Fig. 1 Overall framework of multi-machine cooperation task allocation

多机协同任务分配需要从路径规划得到路径代价信息,即从起点到达目标点的路径代价函数。在任务分配期间,路径规划算法会被重复调用,直到完成多机协同导航系统的整个任务分配工作。

在上述基本方案中,只考虑了各个农机到作业

任务之间的距离,从而导致了分配结果出现“就近”问题。因此在进行任务分配时,还需要加入农机任务执行能力的参数,综合考虑路径代价和任务执行能力对任务分配的影响因素,从而避免出现就近分配问题^[22]。

3 任务序列规划

3.1 任务序列规划问题

任务序列规划是指根据任务分配模型得到的分配结果,对各个农机分配的多个任务进行序列规划,解决任务执行顺序问题,寻找一条最优的作业路径,从而降低任务执行代价,提高作业效率。

当任务数量多于农机数量时,会出现多个任务同时分配给一个农机的情况,此时就需要解决任务序列规划问题。本研究是基于涿州试验农场的实际情况而开展的,涿州试验农场的地块数量远多于农机数量,因此开展任务序列规划研究很有必要。

任务序列规划问题可以类比旅行商问题^[23](Traveling salesman problem, TSP),该问题是在寻求单一旅行商由起点出发,通过所有给定的需求点之后,最后再回到起点的最小路径成本。

与 TSP 问题不同的是,本研究中的多机协同作业任务序列规划问题在完成所有任务之后,不需要回到起点,因此,在计算路径代价时,只需要计算起点地块到终点地块之间的路径长度。

3.2 蚁群算法

蚁群算法^[24]是一种用来寻找优化路径的概率型算法。这种算法具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的特征,本质上是进化算法中的一种启发式全局优化算法。

将蚁群算法应用于解决优化问题的基本思路为:用蚂蚁的行走路径表示待优化问题的可行解,整个蚂蚁群体的所有路径构成待优化问题的解空间。路径较短的蚂蚁释放的信息素较多,随着时间的推移,较短的路径上累积的信息素浓度逐渐增高,选择该路径的蚂蚁数量也愈来愈多。最终,整个蚂蚁会在正反馈的作用下集中到最佳路径上,此时对应的便是待优化问题的最优解。

随着科学技术和生产的不断发展,许多实际问题不可能在合理的时间范围内找到全局最优解,这就促使了最优化问题求解方法的产生。目前蚁群算法已经有了非常完整的理论体系,在组合优化、路径规划、任务分配、车间调度等方面都有广泛的应用。

3.3 基于蚁群算法的任务序列规划

3.3.1 算法模型

TSP 问题是典型的组合优化问题,其最优解的

求解代价是指数级的,利用蚁群算法可以在合理的时间范围内找到可接受的最优解。因此,本研究拟采用蚁群算法对任务序列进行优化。

基于蚁群算法的任务序列规划流程如图 2 所示。

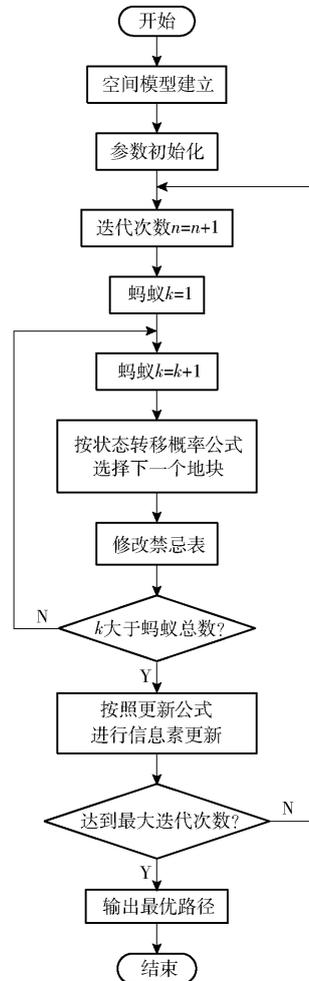


图 2 基于蚁群算法的任务序列规划流程图

Fig. 2 Task sequence planning flow chart based on ant colony algorithm

3.3.2 算法实现

基于蚁群算法的任务序列规划具体实现步骤如下:

(1) 计算地块之间的距离。根据指定的各个作业地块的坐标信息计算地块之间的距离。

(2) 参数初始化。设置蚁群算法相关参数,包括蚂蚁数量 m 、信息素重要程度因子 α 、启发函数重要程度因子 β 、信息素挥发因子 ρ 、信息素常数 Q 以及最大迭代次数 n 等,分别用 $Route_best$ 、 $Length_best$ 和 $Length_ave$ 记录各代最佳路径、各代最佳路径长度和各代路径平均长度。

(3) 迭代寻找最佳路径。①随机产生各个蚂蚁的起点地块。②根据状态转移概率公式进行路径选择,选择下一个地块。③修改禁忌表,即选择路径之后,将该地块放到禁忌表中。④计算各个蚂蚁的路

径距离。⑤计算最佳路径长度 $Length_best$ 、平均长度 $Length_ave$ 以及最佳路径 $Route_best$ 。⑥根据更新规则更新每条路径上的信息素。⑦迭代次数加 1, 清空路径记录表。

(4) 输出最优任务序列结果。输出各代最佳路径长度 $Length_best$ 、各代路径平均长度 $Length_ave$ 以及最佳路径 $Route_best$ 。

4 仿真与分析

4.1 算法仿真

基于以上算法思想, 采用 Matlab 平台对基于蚁群算法的任务序列规划开展仿真试验。

依据实际作业环境设置相关参数, 将涿州试验农场划分为 22 个作业地块, 如图 3 所示, 则仿真试验中的任务总数设置为 22 个。根据涿州试验农场的电子地图信息, 取每个地块边界上的某一点位置坐标作为该地块的任务坐标, 根据实际作业地块设置多组不同的任务集合, 分别开展仿真试验, 分析任

务序列规划结果。

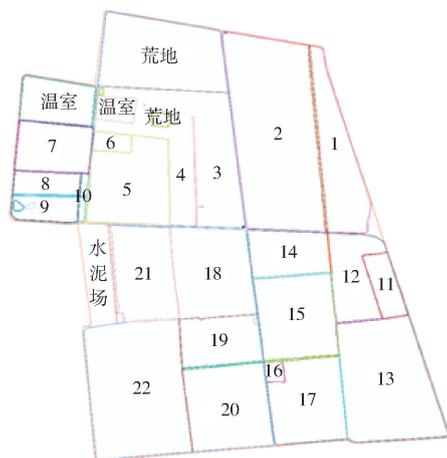
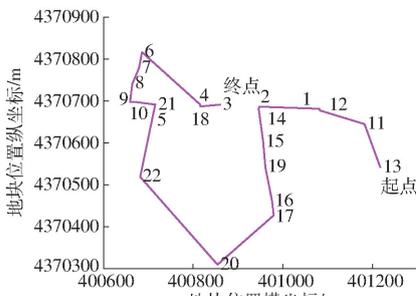


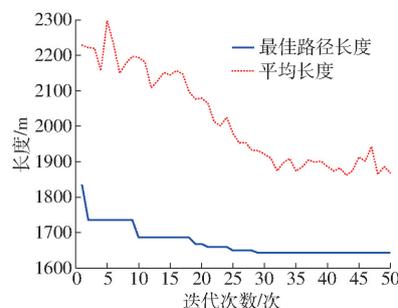
图 3 涿州试验农场电子地图

Fig. 3 Electronic map of Zhuozhou experimental farm

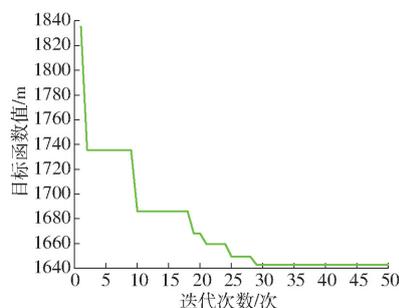
当任务数量为 22 时, 蚁群算法优化路径、各代最佳路径长度与平均长度、适应度进化曲线如图 4 所示, 算法迭代 29 次后, 蚁群算法优化路径长度收敛为 1 642. 835 3 m。



(a) 蚁群算法优化路径



(b) 各代最佳路径长度与平均长度



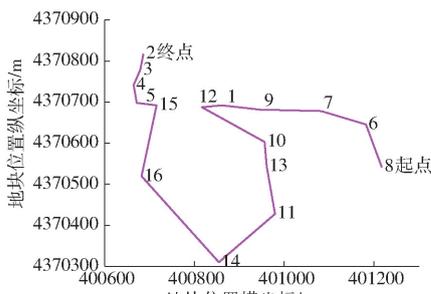
(c) 适应度进化曲线

图 4 任务数量为 22 时的试验结果

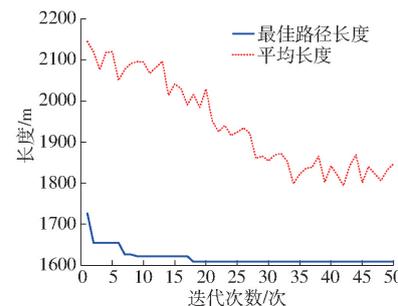
Fig. 4 Test results when quantity of tasks was 22

当任务数量为 16 时, 蚁群算法优化路径、各代最佳路径长度与平均长度、适应度进化曲线如图 5

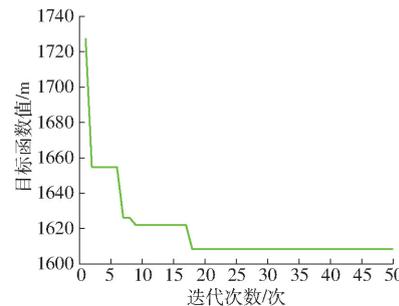
所示, 算法迭代 18 次之后, 蚁群算法优化路径长度收敛为 1 608. 326 4 m。



(a) 蚁群算法优化路径



(b) 各代最佳路径长度与平均长度



(c) 适应度进化曲线

图 5 任务数量为 16 时的试验结果

Fig. 5 Test results when quantity of tasks was 16

当任务数量为 11 时, 蚁群算法优化路径、各代最佳路径长度与平均长度、适应度进化曲线如图 6 所示, 算法迭代 9 次之后, 蚁群算法优化路径长度收敛为 1 074. 396 4 m。

佳路径长度与平均长度、适应度进化曲线如图 7 所示, 算法迭代 1 次之后, 蚁群算法优化路径长度收敛为 984. 509 9 m。

4.2 结果分析

通过以上仿真试验, 当任务数量分别为 22、16、

当任务数量为 5 时, 蚁群算法优化路径、各代最

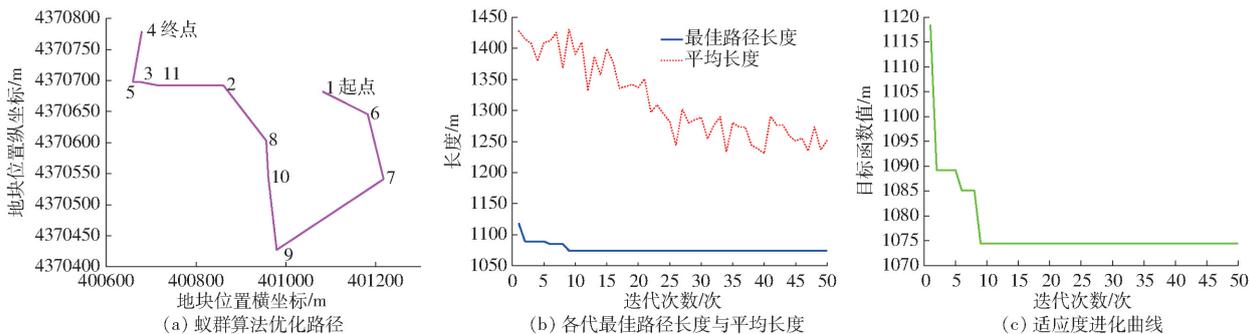


图6 任务数量为11时的试验结果

Fig. 6 Test results when quantity of tasks was 11

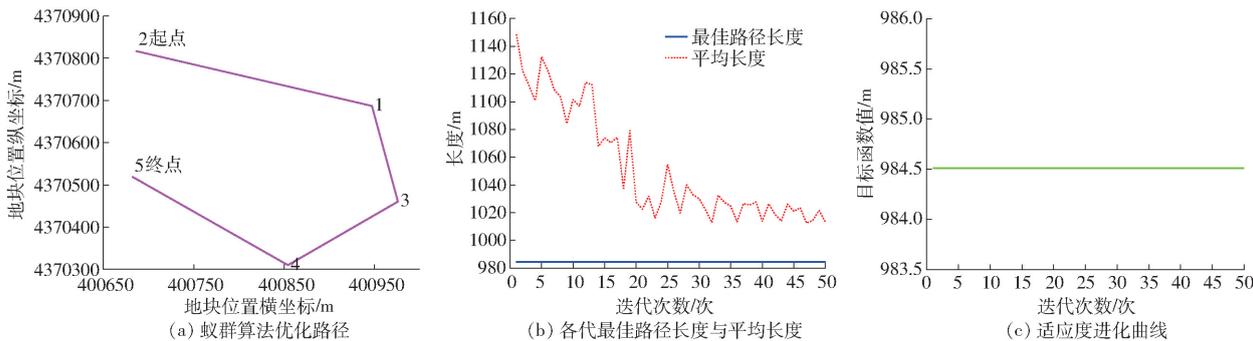


图7 任务数量为5时的试验结果

Fig. 7 Test results when quantity of tasks was 5

11和5时,最大平均长度、最佳路径长度、最少迭代次数以及程序运行时间分别如表1所示。

表1 最大平均长度、最佳路径长度、最少迭代次数和运行时间

Tab. 1 Maximum average distance, minimum distance, minimum iteration number and running time

任务数量/个	最大平均长度/m	最佳路径长度/m	最少迭代次数/次	运行时间/s
22	2 300	1 642. 835 3	29	0. 92
16	2 150	1 608. 326 4	18	0. 62
11	1 430	1 074. 396 4	9	0. 45
5	1 150	984. 509 9	1	0. 22

从表1可以看出,当作业任务数量为22时(即涿州试验农场中的所有任务地块均由同一台农机完成),最大平均长度与最佳路径长度的差值达到了

657. 164 7 m,算法运行时间为0. 92 s,说明利用蚁群算法进行任务序列规划可以有效地降低路径代价,并且可以初步满足多机协同导航作业的实时性需求。

5 结论

(1)分析了农田作业环境下的多机协同作业任务规划问题,采用全局与局部相结合的方法,综合考虑路径代价和任务执行能力,建立了多机协同作业任务分配模型。

(2)提出了基于蚁群算法的任务序列规划方案,并利用Matlab平台开展了算法仿真试验,结果表明,通过蚁群算法进行任务序列优化可以有效地降低路径代价,算法运行时间均小于1 s,满足多机协同作业的实时性需求。

参考文献

- [1] 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):44-54.
JI Changying,ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):44-54. (in Chinese)
- [2] 贾全. 拖拉机自动导航系统关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2013.
JIA Quan. Study on key technology of tractor auto-navigation system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2013. (in Chinese)
- [3] 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报,2015,31(10):1-10.
HU Jingtao,GAO Lei,BAI Xiaoping,et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(10):1-10. (in Chinese)
- [4] LIDA M,KUDOU M,ONO K,et al. Automatic following control for agricultural vehicle[C]//6th International Workshop on Advanced Motion Control Proceedings. Nagoya:Institute of Electrical and Electronics Engineers,2000:158-162.

- [5] NOGUCHI N, WILL J, REID J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 44(1): 1 – 19.
- [6] ZHANG P, QIAO J F, ZHANG H Y. Path planning and tracking for agricultural master-slave robot system [C] // 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering. Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 55 – 58.
- [7] 李世超. 跟随式农机主从导航系统设计与开发 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
LI Shichao. Design of development of a follow agricultural machinery master-slave navigation system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [8] 刘婷. 多机器人任务规划方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
LIU Ting. Research on multi-robot task planning method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [9] 魏铁涛, 屈香菊. 多机协同与多目标分配任务规划方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(8): 917 – 920, 924.
WEI Tietao, QU Xiangju. Route planning method for multiple vehicles coordinated target assignment [J]. *Journal of Beijing University of Aero-nautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 917 – 920, 924. (in Chinese)
- [10] 余伶俐, 焦继乐, 蔡自兴. 一种多机器人任务规划算法及其系统实现 [J]. 计算机学报, 2010, 37(6): 252 – 255.
YU Lingli, JIAO Jile, CAI Zixing. Multi-robot mission planning algorithm and its system implementation [J]. *Computer Science*, 2010, 37(6): 252 – 255. (in Chinese)
- [11] 李智. 智能优化算法研究及应用展望 [J]. 武汉轻工大学学报, 2016, 35(4): 1 – 9, 131.
LI Zhi. Survey on intelligent optimization algorithms [J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2016, 35(4): 1 – 9, 131. (in Chinese)
- [12] EUN Y, BANG H. Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithms [J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(1): 338 – 343.
- [13] HO S Y, LIN H S, LIAUH W H, et al. OPSO: orthogonal particle swarm optimization and its application to task assignment problems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A: System and Humans*, 2008, 38(2): 288 – 298.
- [14] 张磊. 轮式机器人路径规划及任务调度算法研究与设计 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
ZHANG Lei. Research and design in algorithm of path planning and task scheduling for wheeled robot [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] 蔡标. 基于蚁群算法的多机器人任务分配研究 [D]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2015.
CAI Biao. Research of multi-robot task allocation based on ant colony algorithm [D]. Qiqihar: Qiqihar University, 2015. (in Chinese)
- [16] 何建华, 王安龙, 陈松, 等. 基于改进 MOSFLA 的多机协同任务分配 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(4): 630 – 636.
HE Jianhua, WANG Anlong, CHEN Song, et al. Cooperative task assignment for multiple fighters using improved MOSFLA algorithm [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(4): 630 – 636. (in Chinese)
- [17] 刘晓莹. 混沌蚁群算法在多机器人任务规划中的应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
LIU Xiaoying. Application of chaos ant colony algorithm in multi-robots system mission planning [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [18] JIM P, ALCHERIO M. Distributed adaptation in multi-robot seraching particle swarm optimization [C] // The 10th International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 393 – 402.
- [19] 曹如月, 李世超, 魏爽, 等. 基于 Web - GIS 的多机协同作业远程监控平台设计 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 52 – 57, 14.
CAO Ruyue, LI Shichao, WEI Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web - GIS [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.): 52 – 57, 14. (in Chinese)
- [20] 秦新立, 宗群, 李晓瑜, 等. 基于改进蚁群算法的多机器人任务分配 [J]. 空间控制技术与应用, 2018, 44(5): 55 – 59.
QIN Xinli, ZONG Qun, LI Xiaoyu, et al. Task allocation of multi-robot based on improved ant colony algorithm [J]. *Aerospace Control and Application*, 2018, 44(5): 55 – 59. (in Chinese)
- [21] 张衡. 基于蚁群算法的多农业机器人路径规划研究 [J]. 数字技术与应用, 2017(6): 147 – 149.
ZHANG Heng. Research on path planning of multi farm robot based on ant colony algorithm [J]. *Digital Technology and Application*, 2017(6): 147 – 149. (in Chinese)
- [22] 曹宗华, 吴斌, 黄玉清, 等. 基于改进蚁群算法的多机器人任务分配 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(2): 34 – 37.
CAO Zonghua, WU Bin, HUANG Yuqing, et al. The multi-robot task allocation study based on improved ant colony algorithm [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2013(2): 34 – 37. (in Chinese)
- [23] 袁豪. 旅行商问题的研究与应用 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
YUAN Hao. Research and application of traveling salesman problem [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)
- [24] 乔东平, 裴杰, 肖艳秋, 等. 蚁群算法及其应用综述 [J]. 软件导刊, 2017, 16(12): 217 – 221.
QIAO Dongping, PEI Jie, XIAO Yanqiu, et al. A general overview on ant colony algorithm and its application [J]. *Software Guide*, 2017, 16(12): 217 – 221. (in Chinese)