

农业机器人全覆盖作业规划研究进展

王 宁^{1,2} 韩雨晓^{1,2} 王雅萱² 王天海² 张 漫¹ 李 寒¹

(1. 中国农业大学智慧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: 随着自动导航技术的发展,农业机器人已经应用到农业生产的各个方面。农业机器人可以代替人类从事喷药、施肥、收获等活动,减轻了劳动强度,提高了作业效率。全覆盖作业是智能机器人研究的核心内容之一,涉及农业、军事、生产制造和民用等多个应用领域。全覆盖作业规划作为农业生产作业的关键技术,有助于提高作业质量和资源利用率。但在全覆盖作业中,仍然存在障碍物识别不准确,阻碍农机工作路径;工作区域面积遗漏,路径重复问题,造成资源浪费;单机器人工作效率较低,无法处理复杂的全覆盖作业问题。本文从全覆盖作业规划中存在的问题入手,从环境模型构建、机器人路径规划、多机器人协作任务分配3方面进行综述。其中,准确可靠的环境地图信息有助于规避静态障碍物、提高作业可靠性;高效优化路径信息有助于减少遗漏面积,提高作业效率;最佳的任务分配方案有助于减少作业时间和资源浪费。首先对环境建模方法进行了分析和对比,揭示其局限性并提出优化方法;在环境建模方法的基础之上,对国内外全覆盖路径规划算法现状进行综述,指出相关算法的特点;然后,针对多机器人协作全覆盖任务规划的研究,探讨了相关任务分配算法的研究进展;最后对移动机器人全覆盖作业规划未来的发展方向进行了展望。该研究将有助于进一步提高农业生产中全覆盖环节的工作效率和农业作业质量,减少资源浪费,为我国实现农业规模化生产提供重要依据。

关键词: 农业机器人; 全覆盖; 环境建模; 路径规划; 任务分配

中图分类号: TP242.6; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0001-19

Research Progress of Agricultural Robot Full Coverage Operation Planning

WANG Ning^{1,2} HAN Yuxiao^{1,2} WANG Yaxuan² WANG Tianhai² ZHANG Man¹ LI Han¹

(1. Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration, 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: With the development of automatic navigation technology, agricultural robots have been applied to all aspects of agricultural production. Agricultural robots can replace humans in activities such as spraying, fertilizing, and harvesting, reducing labor intensity and improving operational efficiency. Full coverage operation is one of the core contents of intelligent robot research, which involves many application fields such as agriculture, military, manufacturing, and civil. As a key technology in agricultural production operations, full coverage operation planning can help improve operation quality and resource utilization. However, in the full coverage operation, there are several challenges unresolved: obstacles identification is not accurate, hindering the working path of agricultural machinery; the area of the working area is omitted and the path is repeated, resulting in a waste of resources; the work efficiency of the single robot is low and it is unable to deal with complex full coverage problems. Starting with the problems existing in the full coverage operation planning, the construction of the environment model, robot path planning, and multi-robot cooperative task allocation was reviewed. Among them, accurate and reliable environmental map information helped to avoid static obstacles and improve operational reliability. Efficient optimization of path information helped to reduce missed areas

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000600-2021YFD200604)、中央高校基本科研业务费专项资金和中国农业大学研究生自主创新研究基金项目(2022TC161)

作者简介: 王宁(1996—),男,博士生,主要从事多机协同导航技术研究,E-mail: wn9619@cau.edu.cn

通信作者: 李寒(1986—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cau_lihan@cau.edu.cn

and improve operational efficiency. The optimal task allocation scheme helped to reduce work time and waste of resources. Firstly, the environmental modeling methods were analyzed and compared with their limitations revealed, and optimization methods were put forward. Based on environmental modeling methods, the present situation of full coverage path planning algorithms at home and abroad was summarized, and the characteristics of related algorithms were pointed out. Then, the research progress of task assignment algorithms was discussed for multi-robot cooperative full coverage task allocation. Finally, the future development direction of the mobile robot full coverage task allocation was discussed. This research would help further improve the work efficiency and quality of the full coverage operation in agricultural production, and reduce the waste of resources. The research result provided an important basis for the realization of large-scale agricultural production in China.

Key words: agricultural robot; full coverage; environment modeling; path planning; task allocation

0 引言

随着自动驾驶技术的发展,机器人、无人农机、无人机应用到农业生产的各个方面^[1]。农业机器人代替人类从事耕作、喷药、施肥、收获等农业生产活动,可以有效减轻劳动强度,提高作业效率。对比传统驾驶员主观判断的作业方式,全覆盖作业有助于降低作业期间的路径重复率,提高农机作业效率和质量、减少能源消耗^[2],因此全覆盖作业成为农业生产的关键技术,为实施发展精准农业提供保障。作业规划作为农业机器人全覆盖作业的焦点问题,成为实现农事作业智能化的关键技术之一。

刘佳晖等^[3]将全覆盖作业应用在植保无人机的喷洒作业上,提高了无人机喷洒效率;罗承铭等^[4]提出全覆盖作业路径规划算法对油菜联合收获机作业路径进行规划,减少了非作业路径长度;陈凯等^[5]提出一种混合规则路径规划方法针对自动驾驶农机进行全覆盖路径规划,提高了路径作业覆盖率。但在农业机器人全覆盖作业规划方面仍然存在一些问题^[6-8]:①全覆盖工作区域内的障碍物等会影响阻碍农机的工作路径,进而影响现场工作效率,因此工作区域内环境地图的建模显得十分重要。环境建模将识别障碍物等信息并在环境地图中进行表示,有利于规避静态障碍物,提高作业可靠性;后续只需针对不含障碍物区进行路径规划,减少路径规划的区域,提高规划效率。②全覆盖作业中,存在工作区域的面积遗漏,工作路径重复的问题,进而影响工作质量,造成资源浪费。机器人的路径规划可以避免路径重复,缩短移动距离,提高工作效率。③面对复杂任务时,单机器人工作效率较低,许多任务无法完成,为了处理复杂问题,提高工作效率,多个机器人合作是一种有效的方式,多机器人合作作业的核心问题是解决机器人之间的任务分配问题。

针对机器人全覆盖作业规划中存在的问题,其主要研究包括环境模型构建、机器人路径规划、多机

器人协作任务分配3方面。准确、可靠的环境地图有利于后续路径规划,在已知环境地图的情况下,可以规避静态障碍物,提高作业可靠性;机器人路径规划可有效减少地头转弯次数,减少遗漏面积,提高作业效率;优化的任务分配方案有利于处理复杂的全覆盖作业问题,能够更快、更有效地执行任务,减少作业时间,提高工作效率。

本文从农业机器人全覆盖作业规划相关研究现状进行综述,对目前机器人全覆盖作业进行分析。将从现阶段作业规划存在问题的角度,对环境建模方法、路径规划方法和多机器人任务分配方法进行总结分析,并对未来关于农业机器人全覆盖作业规划的研究方向进行展望。

1 环境建模方法

全覆盖作业规划是一个复杂的系统,涉及信息的获取、处理、利用等过程,全覆盖作业规划示意图如图1所示。其中包括信息获取:利用高精度传感器感知、采集环境信息;信息处理:建立处理环境信息的模型,对采集的农田环境信息进行处理,将现实环境转换为计算机可以识别存储的地图特征信息;信息利用:利用处理后的环境信息地图进行全覆盖路径规划;信息再利用:针对多机器人协作覆盖时,依据环境地图、规划的路径等信息,进行多机器人任务分配。

环境地图建模是全覆盖路径规划的重要部分,即采用一定的数学模型来表示机器人的工作环境^[9]。根据已知的环境地图信息,将机器人全覆盖区域的现实环境转换为自身可以识别并且方便存储的地图特征信息的过程。建模方法的选择直接决定了全覆盖算法的性能以及难易程度,每种环境建模方法都有其自身独特的优点和局限性^[10]。农业机器人环境地图模型的准确性会对后续路径规划和任务分配都有着非常重要的影响。目前在全覆盖路径规划研究领域中,环境建模方法主要包括拓扑图法^[11]、

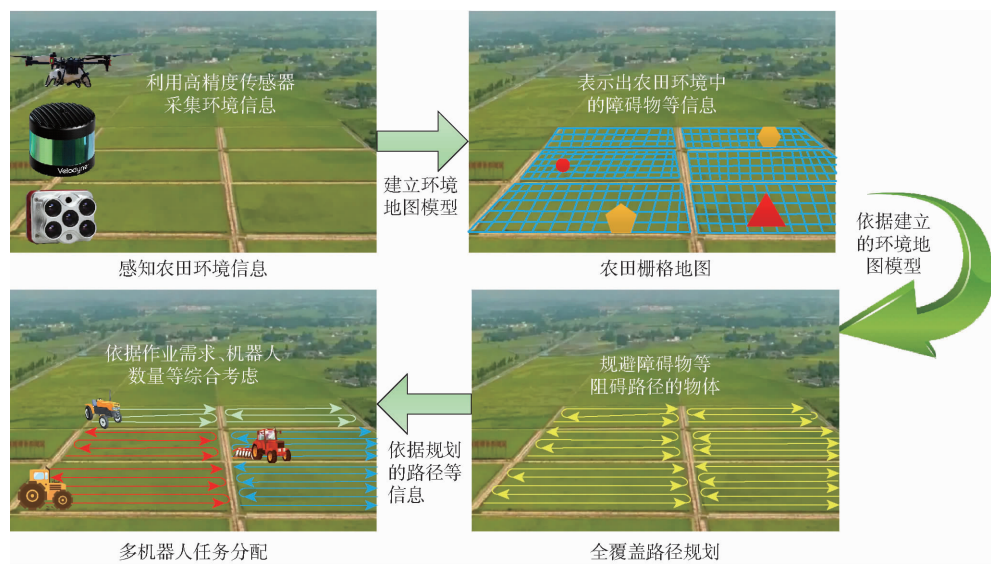


图 1 全覆盖作业规划示意图

Fig. 1 Schematic of full coverage operation planning

栅格法^[12]、几何图法^[13]和单元分解法^[14]等。

不同的环境建模方法各有优缺点,不同的环境建模方法会直接影响路径规划效果。环境建模一般从环境信息准确性、数据存储便利性、环境数据可塑性、路径搜索快速性等方面综合考虑。不同的应用场景具有不同的环境特点,因此结合具体的环境信息分析,灵活选择最恰当的建模方法。总结归纳了不同环境建模方法的优缺点,如表 1 所示。

表 1 环境建模方法对比
Tab. 1 Comparison of environmental modeling methods

建模方法		优点	缺点	优化	文献序号
拓扑图法		直观灵活,存储量少,降低工作量和复杂度	地图信息直接获取难度大,对传感器系统要求高;对环境适应性较差	与高精度传感器结合实现大规模环境地图的构建	[11,15 – 19]
栅格地图法		建模简单、精度较高,降低路径规划难度	会使机器人陷入死区,计算性能与栅格大小有关	合理选择栅格大小,与其他算法结合进行路径规划	[12,21 – 23]
几何图法	可视图法	利用多边形表示环境中障碍物等,构建区域连通图	复杂环境中,搜索算法搜索难度大;当环境变化,需重新构建地图,实时性较差	结合传感器,实现未知环境信息的构建,简化复杂环境的连通图	[24,29]
	维诺图法 (Voronoi)	适用于障碍物较多环境,计算速度快	路径长度有所增加	与其他算法结合,减少路径规划长度	[25,28,30]
单元分解法	梯形分解法	最简单,易于实现	产生大量的子区域,造成了大量的路径冗余	进行算法优化,减少子区域的数量;结合其他算法优化遍历子区域顺序	[31,38]
	布式分解法	减少纵向分割,生成更少的子区域	相邻子区域边界重复覆盖		[32,35]
	莫尔斯分解法	有效处理非多边形障碍物	不同莫尔斯函数会产生不同的单元分解图案		[33,36]

1.1 拓扑图法

拓扑图法^[15]是一种紧凑的环境表示方法,以图的形式表达环境的连通性,适合应用在大规模的结构化环境中。该方法以工作空间的几何信息为基础,采用降维的思想将高维几何空间的路径规划降为低维几何空间的路径规划。将工作空间分割成拓扑特性一致的子空间,利用特征点与连接特征点之间的线段构建拓扑网络,拓扑地图构建完成后,启发式算法可以在节点之间进行有效搜索,最终确定移

动机器人的行走路径^[16]。

拓扑图法可以准确地表示出位置关系信息,包琳等^[17]采用拓扑方法对地图进行预处理,准确表示出障碍物位置关系信息,并依据栅格图生成现场环境模型。

拓扑图法将复杂的几何计算问题转换为简单的图形计算问题,将问题变得更直观灵活,减少了几何路径规划的基本工作量和复杂度。郭洪月等^[18]采用拓扑法建立停车场环境模型,用节点代表环境空

间的特殊位置,用节点连接线表示运行路径,有效减少了路径规划的复杂度。

建模复杂度仅取决于环境中障碍物数量,在拓扑特征明显且障碍稀疏的环境中,建模时间更少,占据存储空间更小。任成龙^[19]采用拓扑图法在障碍稀疏环境中建立环境地图模型,保证环境信息较高的建模精度和较低的存储量。但当拓扑特征不明显且障碍物较多时,建立整个拓扑网络过程会较为复杂,占用空间更大。

当环境中出现相似拓扑结构的连通区域时,很难进行辨别,而且采用该方法建模过程相当复杂。如果局部障碍物发生变化,整个拓扑空间需要重新构造,费时费力。

1.2 栅格地图法

栅格地图法是一种二值信息表示环境的方法,将机器人工作空间的环境信息利用相同尺寸的栅格进行分割,以栅格单元为单位表达该区域环境信息,然后在环境地图上使用路径规划算法进行路径规划,目前多种路径规划算法均采用栅格地图的建模方式。

栅格地图法建立环境模型多数为二维建模,栅格地图建模方式简单,精度较高,便于存储和使用。商高高等^[20]在采用传统二维栅格环境模型的基础上考虑农田地势变化,构建拖拉机作业环境模型,提高了建模精度。

栅格单元以二进制信息表示环境信,如果栅格范围内,存在障碍物,则称其为障碍栅格,值为1;反之是自由栅格,值为0。曹翔等^[21]基于动态栅格法的环境建模,对栅格地图进行赋值,依据每个栅格的性质赋不同的信度函数值,表示出每个栅格的状态信息。实现动态障碍物工作区域的全覆盖,提高了覆盖效率。

环境建模中障碍物表示方式、处理结果会影响机器人运动安全性,障碍物表示精度不高,可能会出现摩擦甚至碰撞障碍物的情况。针对这个问题宫金良等^[22]根据农场实际工作环境建立分区概念,对一级分区的农田利用栅格法对单片农田建模并对不规则障碍物进行膨胀处理,提高了系统的安全性;并在此基础上,在一级分区内部建立二级分区的栅格分区和分区合并规则,简化了农田复杂的工作环境。

栅格地图法将环境量化成具有一定分辨率的栅格,栅格尺寸将影响环境建模精度,通常情况下,栅格的划分是以机器人的作业尺寸为基准。栅格小,则精度高,但信息存储量较大;栅格大,则信息存储量小,但精度低。MA等^[23]利用栅格地图法进行环境建模,采用高分辨率栅格定位、低分辨率栅格路径

规划的策略,提高了算法执行效率。

栅格地图法也存在一些缺点,例如模型和算法性能取决于栅格尺寸,栅格越小,环境信息越准确,路径决策速度变慢,算法实时性差;栅格越大,搜索时间变短,但规划路径偏差较大,降低了系统安全性。因此在选择栅格尺寸时,应考虑到机器人作业尺寸、工作环境、障碍物信息等多个要素。

1.3 几何图法

几何图法是采用点、线、面表示已知环境信息中物体(如拐角、障碍物等)的几何特征的一种建模方法。常用的几何建模方法主要有可视图法^[24]、维诺图法(Voronoi)^[25]和概率图法^[26]等。

几何图法抽取环境信息的几何特征,完成从物理空间到几何空间的映射,然后采用图搜索算法获取问题的最短路径。SCHULZ等^[27]提出了一种基于节点连接图的不确定网络可视化技术。依据边的潜在概率分布,将概率图布局中的节点在空间上扩展,利用蒙特卡洛过程将概率图分解,该方法将边缘的概率分布映射到视觉上可感知的碎片和形状,有助于分析图形布局技术参数的影响。

该方法可以准确地表示地图中的各个位置信息,精度高,结构紧凑,可以采用多种图搜索算法求取最优解,在简单环境下能够得到较高的精度。CANDELORO等^[28]提出一种基于维诺图的环境建模方法,将障碍物(例如海岸线、深度等高线或其他车辆)表示为多边形,将复杂环境表示为简单的几何结构,顶点数量决定了环境信息的详细程度,数量越多,环境信息越详细。采用迪杰斯特拉(Dijkstra)搜索算法的生成初始路径,可以同时满足陆地和浅水的间隙约束,减少船舶因浅水深度而搁浅的风险。李善寿等^[29]采用一种改进的可视图法建立环境模型和确定自动引导车(Automated guided vehicle, AGV)向目标点运动的有效路径。与传统的可视图法相比,这种改进的方法把障碍物顶点连线的中点作为节点,把这些节点间的某些边线作为弧,减少了路径长度,可以避免碰撞障碍物。

为了提高环境模型的准确性,将维诺图和二分图结合,夏娜等^[30]提出一种基于维诺图和二分图的水面移动基站路径规划方法,首先利用维诺图理论生成数据点,然后以二分图描述候选点对网络中传感器节点的支配关系,该方法规划的路径较短且规划效率高。

几何图法也存在一定的弊端,在建立详细的几何信息地图需要高精度的传感器,采集到的数据量多,表示方式复杂,存储量大。当环境中障碍物密集,构成的连通图也较繁琐,几何模型不能有效表征

环境信息,导致搜索算法不易实现,在复杂环境中应用性较差;当环境中存在动态障碍物时,地图必须重新构建,更新过程复杂且慢。因此该方法一般应用于高度结构化的环境,对于复杂的环境不太适用。

1.4 单元分解法

单元分解法(区域分解法)是根据不同的障碍物形状,对整个空间区域进行分割,把整个待覆盖区域分割成若干形状较为简单的无障碍物、无重叠部分的子区域。常用单元分解法有梯形分解法^[31]、布氏(Boustrophedon)单元分解法^[32]、莫尔斯(Morse)分解方法^[33]等。

对于每个子区域的覆盖采用简单的往复运动,然后确定子区域的遍历顺序,优化子区域间的连通路线,通过对各子区域的遍历实现对整个区域的遍历。马正华等^[34]利用单元分解法将环境地图划分为不同大小的区域,区域内部采用螺旋收缩算法实现遍历,区域之间通过图的深度优先搜索算法实现全局遍历排序,最终达到全覆盖路径规划目的。汪芸^[35]使用 Boustrophedon 单元分解法在矿区检测应用中分解矿区地图后再利用神经网络进行路径规划,实现全覆盖路径规划。

单元分解可以处理多边形障碍物的环境地图划分问题,且分解后子区域数目较少,可以有效减少路径的冗余。GUATELLA 等^[36]采用 Morse 分解对作业区域进行划分,针对多边形障碍物进行分解,而且分解后子区域较少。

单元分解法构建的环境模型对环境内部障碍物的描述更为准确清晰,环境模型中只有障碍物区域和作业子区域,分解后的作业子区域内部没有障碍物,只需进行小区域的覆盖,而无需盲目地探索环境,降低搜索过程的复杂性。李桑^[37]提出一种基于单元分解法的全覆盖路径规划算法。将地图无障碍物的工作区域划分成若干子区域,在子区域内机器人沿着已生成的平行路线往复运动,子区域之间根据最短距离原则进行遍历,有效提高了覆盖率。

梯形分解法只进行竖直方向的分解,在一定程度上会造成子区域过多的问题。HUANG^[38]提出了针对不同的地块采用不同分解方向,通过延长边界将地图划分为多个子区域,通过不同子区域结合判断最佳的分组方式和分解方向,消除了梯形分解法只能竖向分解的局限性。单元分解法这种仅对无障碍子区域遍历的思想,在很大程度上降低了全局覆盖实现的难度。在静态环境中采取简单的往复策略即可完成子区域覆盖,且分解后的子区域集合可以使用多机器人协作完成覆盖,但在动态环境中需要

单独设计子区域内部的覆盖方式。

2 全覆盖路径规划方法

机器人路径规划是全覆盖作业规划的一个重要问题^[39-40],路径规划就是在已建立好的环境地图模型上选择合适的路径规划算法,实现不同需求的路径规划^[41]。路径规划包括:点对点路径规划和全覆盖路径规划^[42]。传统意义上的路径规划是指点对点路径规划,即机器人在无碰撞条件下,规划出一条从起点出发到达终点的最短路径。但点对点路径规划不适于某些作业环境,例如收获机收获作业、无人机喷药作业、农机耕作施肥作业等^[43]。相关作业需采用全覆盖路径规划,即工作路径需扫描遍历整个工作区域,最终形成一条在工作区域内从起始位置经过所有区域的连续路径^[44]。

全覆盖路径规划中的关键问题在于如何最大程度遍历工作区域内除障碍物以外的部分,并有效规避所有障碍物。在已知环境地图模型时,选择何种路径规划算法成为重点。路径规划领域中算法繁多,常用的简单路径规划方法主要是往复式覆盖法^[45]和螺旋式覆盖法^[46]。由于简单路径规划重复率高、遗漏率高等原因,又提出了优化路径规划算法包括遗传算法^[47]、蚁群算法^[48-49]、粒子群算法^[50]、A*算法^[51-52]和神经网络算法^[53]等。后续国内外的研究人员结合多种路径规划算法,提出混合式路径规划算法。

2.1 简单路径规划方法

简单全覆盖路径规划中最常用的是往复式覆盖和螺旋式覆盖。往复式覆盖方式如图 2a 所示,是指机器人从作业区域边界依据某个角度以直线行驶至对面边界,再转弯反向直线折回,如此往复直至覆盖整个区域。

郭典新等^[54]针对割草机器人全覆盖路径规划问题,在完成单元分割创建环境模型后,采用改进的往复式和螺旋式覆盖法,依据地块形状规划其覆盖路径。谢逢博等^[55]采用区域化往复式全覆盖路径规划方法,建立果园割草机器人的作业路径,与传统往复式路径规划相比,克服了在果树附近出现漏割区域的缺陷,提高覆盖率的同时降低重复率。

往复式覆盖易实现且具有作业覆盖率高的优势,但转弯次数多且需要进行 180°转弯,转弯难度大,造成转弯区域面积大的问题,对于体积较大的机器人实现起来较困难。

螺旋式又分为内螺旋与外螺旋,内螺旋式覆盖方式如图 2b 所示,是指机器人从作业区域某一边开始作业,直到区域边界转向 90°到另一边继续作

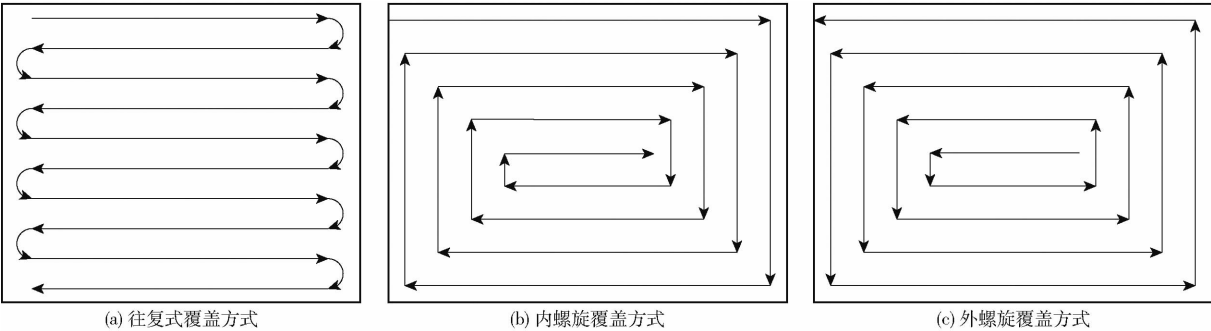


图 2 简单路径规划方法

Fig.2 Simple path planning methods

业,慢慢向区域中心作业。刘玉娟等^[56]采用内螺旋式覆盖法,实现保洁机器人清扫房间的全覆盖路径规划,该方法有利于机器人在区域间的衔接行走,有效地提高了清洁效率。周欣沅等^[57]利用栅格法建立环境地图模型,采用沿边行走的内螺旋式覆盖算法,进行室内清洁机器人无障碍与避障路径规划,结果表明,在静态环境中,机器人作业面积覆盖率高,重复率低,且能成功避开所设置的障碍物和边界。

外螺旋覆盖方式与内螺旋相反,如图 2c 所示,从区域中心开始,沿着平行与边界的直线行走,不断转向 90°逐渐向外作业。单正娅等^[58]设计了一款低成本、性价比高的清扫机器人,应用随机行走加圆形外螺旋的算法,实现高覆盖率、低重复的清扫活动,

能有效避障及检测台阶,并且具备自主找寻充电站自主充电等能力。

螺旋式覆盖方式作业覆盖率较高、转向角度小、对行精度高,无需预留地头转弯区域;但内外螺旋都会增加非作业路径成本,降低作业效率,且转向次数多,增加能量消耗。

2.2 优化路径规划方法

全覆盖简单路径规划方法对于子区域遍历简单易实行,但是仍会出现路径冗余,重复覆盖某些区域的问题。因此提出许多优化的路径规划算法,这些算法在一定程度上提高了覆盖率、缩短路径长度、提高作业效率,但部分算法也存在计算量大、收敛速度慢,易陷入局部最优解的问题^[59]。表 2 归纳总结了不同优化路径算法的优缺点。

表 2 路径规划方法对比

Tab.2 Comparison of path planning methods

名称	全局/局部	动态/静态	优点	缺点	文献序号
蚁群算法	全局	动态	并行性、鲁棒性、可扩展性强	随机性强、计算量大、效率低,易偏离最优解	[48-49,60-62]
粒子群算法	全局	动态	并行能力、通用性强,收敛速度快	易陷入局部最优	[50,63-65]
模拟退火算法	全局	动态	全局寻优能力较强,有概率跳出局部最优解	易陷入局部最优,运算效率不高	[5,66-67]
遗传算法	全局	动态	能够求出全局最优解、鲁棒性强、并行性高	收敛速度慢、局部搜索能力差	[47,68-70]
A* 算法	全局	静态	简单高效,全局最优	可能会造成死锁	[51-52,71-73]
神经网络	局部	动态	自学能力、容错能力、鲁棒性强,适应性	计算量大、收敛速度慢,存在学习滞后性	[53,74-76]
贪心算法	局部	动态	做决策所需的计算复杂度较低	最终得到的解不一定是最优解	[80]

蚁群算法^[60]是一种用来寻找优化路径的概率型算法,其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。目前已有研究将蚁群算法应用到移动机器人的路径规划问题中^[61],提出了一种新的基于粒子群的改进蚁群算法,该算法采用全局异步与精英策略相结合方法更新信息素,减少了路径规划时间。针对多个障碍物的复杂的现场操作环境,相关研究提出一种基于蚁群算法的路径规划方法^[62],将

农田内部划分为不包含障碍物的块,应用蚁群算法进行求解,该方法可以用于决策支持系统,并取得了较好的效果。

粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)又称粒子群算法^[63]是一种进化计算技术,通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法。由于粒子群算法易陷入局部最优,ZENG 等^[64]提出一种基于随机干扰自适应粒子

群优化算法,应用在复杂工作环境下的移动机器人的全局路径规划中,取得了较好的效果。赵慧南等^[65]结合栅格地图和改进粒子群算法,将其应用于移动机器人全覆盖路径规划,将栅格法的输出路径作为粒子的初始种群,根据粒子之间的相互协作实现对粒子位置和速度的不断更新,利用障碍物斥力势场构造高安全性适应度函数,从而得到机器人从初始位置到目标的最优路径,最优路径可以有效地避开障碍物,实现工作区域的全覆盖。

模拟退火算法(Simulated annealing, SA)最早的思想是由 KIRKPATRICK 等^[66]于 1983 年提出,来源于固体退火原理,是一种随机搜索算法。在作物行的最优遍历顺序求解的问题上,经典的模拟退火算法因为规模效应很容易陷入局部最优解,有研究提出了基于模拟退火算法的规则优化算法^[5],该方法利用模拟退火算法求解得到最优路径集,然后通过单元拆解及合成的方式求解全覆盖遍历顺序,该方法适应性强且优化高效稳定,解决了传统规则遍历方法适应性差的问题。在路径规划搜索过程中规划结果往往受到障碍物尺寸、地理位置差异等不定因素的影响。王星童等^[67]提出了粒子群-快速模拟退火算法,将传统粒子群算法中的惯性权重改变为正弦自适应的形式,同时采用快速退火的模式解决模拟退火过程中迭代速度过慢问题,从而得到最优路径。该方法增强粒子群搜索过程中跳出局部最优解的能力,提高了算法的收敛精度。

遗传算法(Genetic algorithm, GA)^[68]最早是由美国的 JOHN HOLLAND 于 20 世纪 70 年代提出,是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。在全覆盖路径规划中,完成环境建模和区域分割后,针对子区域内部的覆盖路径规划,LUO 等^[69]提出了一种头脑风暴-遗传融合算法,提高了子区域的覆盖率。针对园艺电动拖拉机全覆盖作业,商高高等^[20]提出了一种基于遗传算法路径规划方法,通过栅格法建立作业环境空间模型,建立了遗传算法的多目标适应度函数、改进交叉、变异算子,提高算法执行效率,降低路径重复率。针对多机器人的全覆盖作业, KAPANOGLU 等^[70]提出一种利用基于模板的遗传算法,实现路径规划,通过遗传算法的寻优能力来寻找每个机器人最合适的模板,缩短了覆盖时间,减少了能量消耗。

A* 算法^[71]是一种静态路网中求解最短路径最有效的直接搜索方法,也是解决许多搜索问题的有效算法。算法中的距离估算值与实际值越接近,最终搜索速度越快。A* 算法作为启发式搜索算法重

要的一种,主要是用于在两点之间选择一个最优路径,常用于移动机器人覆盖过程中陷入死区后的逃离路径规划。刘晶等^[72]采用 A* 搜索算法,让机器人以最优的路径逃离死区。刘淑华等^[73]采用野火法搜索周边离机器人最近的未覆盖点,然后采用 A* 算法规划出一条路径到达新的覆盖起点,使机器人快速逃离死区。

神经网络算法^[74]是以人脑中的神经网络作为启发,根据逻辑规则进行推理的过程,它先将信息化成概念,并用符号表示,然后,根据符号运算按串行模式进行逻辑推理的过程。针对除草机器人的全覆盖作业,邓燕^[75]提出基于反向传播(Back propagation, BP)神经网络的局部路径规划算法和改进型基于细胞神经网络的路径规划算法相结合的全覆盖路径规划方法,该方法可以实时地路径规划,并且对动态环境具有更好的适应能力。针对机器人覆盖过程中需要避障和逃离死区的问题, RASHID 等^[76]将需要全覆盖的二维栅格地图单元与生物启发神经网络的神经元一一对应起来,利用神经元的活性值和机器人的上一位置信息进行实时路径规划,该算法不存在神经网络学习过程,算法实时性好。

有关于机器人路径规划的算法很多,应用也比较广泛。针对区域内全覆盖作业单元的路径规划问题,BOCHTIS 等^[77]使用 Clarke-Wright 节约算法优化农机路径,并提供了最佳路径序列,减少了非作业路径,提高了作业效率。EDWARDS 等^[78]采用丹麦奥胡斯大学开发的优化内场路线规划器进行路径规划,缩短了路径长度,降低了交通强度。SANTORO 等^[79]以甘蔗收获问题为研究对象,以收获机操作时间最小化为目标,采用整数规划模型对收割机的路径进行优化,缩短了作业时间,节约了机械收割的燃油和劳动力等成本费用。

针对田间运输单元的路径规划问题, JENSEN 等^[80]提出了一种涉及使用图论方法,生成“度量地图”,采用 Dijkstra 贪心算法解决单源路径规划问题,该方法提出的模型较理想,求解速度较快。BOCHTIS 等^[81]利用栅格法将一个抽象的区域作为一个二维网格,从网格状态的作用空间出发,创建离散转移图的节点,采用图搜索算法生成最优路径,该方法提高了农机协同作业效率,且算法计算效率高。

2.3 混合式路径规划方法

单一的优化算法在某些程度上都存在一定的局限性,随着农业机器人广泛应用,对任务需求也越来越高,单一的方法已经无法解决某些全覆盖路径规划问题。因此许多学者开始结合多种算法进行融合,以求达到更高的任务需求。

采用简单路径规划方法或改进算法进行子区域遍历,后结合优化算法(如蚁群算法、A*算法、深度优先搜索等)进行子区域的连接优化,以实现全覆盖路径规划。采用这种方式进行全覆盖路径规划的研究较多,也取得了一定的效果。张赤斌等^[82]采用 Boustrophedon 分解进行区域分割,各子区域内部采用往复式覆盖,后利用蚁群算法进行区域遍历顺序优化。胡馨丹等^[83]建立栅格地图并进行区域划分,采用往复式覆盖方式实现子区域的覆盖,后利用 A*算法求解子区域连接顺序,得到子区域间的最优路径,缩短了路径长度,降低了路径重复率。周利坤等^[84]运用区域分割法进行环境建模,各子区域内部采用内螺旋法覆盖,最后以邻接矩阵和深度优先搜索(Depth first search, DFS)确定油泥区的衔接顺序和最短路径,完成油泥区的覆盖。LI 等^[85]利用 West - Move First 算法实现局部子区域覆盖,建立了完善的回溯机制,结合改进的 A*算法规划出一条从死点到回溯点的光滑无障碍路径,该算法具有更高的运行效率和更低的重叠率。

先采用搜索算法确定最优的转移行走顺序,后采用优化算法确定转移路径。这种方式在一定程度上优化了子区域间的转移路径,提高了工作效率。马全坤等^[86]用矩形分割创建环境模型后,通过记忆模拟退火算法搜索出任务最优目标点行走顺序,然后使用 A*算法进行跨区域衔接路径规划。周林娜等^[87]采用牛耕式单元分解法对矿区废弃地环境做出区域分解;然后,采用深度优先搜索算法确定子区域间的转移顺序;最后,采用生物激励神经网络算法确定子区域内部行走方式以及子区域间路径转移。该算法在解决机器人路径转移问题方面比其他路径规划算法更高效,能够处理复杂的非结构化环境。

为了克服单一算法其自身局限性,加入其他优化算法,进行算法的融合以达到更好的效果。进行算法融合克服算法自身局限性的这种方式,使算法性能得到提高,求解结果更加优异。李学洋等^[88]提出了一种改进的蚁群算法,利用遗传算法加入了变异因子使最优路径产生变异,解决蚁群算法在路径规划中容易陷入局部最优的问题,加快了收敛速度,增加了最优解的多样性。DAS 等^[89]提出了一种基于改进粒子群算法(Improved particle swarm optimization, IPSO)和改进引力搜索算法(Improved gravitational search algorithm, IGSA)相融合的机器人路径优化方法,该方法将 IPSO 的社会本质与 IGSA 的运动机制相结合,采用协同进化技术同时更新 IGSA 的加速度、粒子位置与 IPSO 的速度。优化机器人从初始位置到指定位置的路径长度、转弯次

数和到达时间等方面的性能。

结合建立的环境网络图,采用多算法融合进行求解,通过这种方式进行路径优化,缩短了路径长度,提高了作业效率。邱雪娜等^[90]将生物激励神经网络、滚动窗口^[91]、启发式规划等概念与方法集成,通过生物神经元之间的互联构成平面拓扑结构的 shunting 网络;利用 shunting 网络进行可视窗口的局部环境建模,应用优先级启发式规划产生子目标,再通过窗口滚进,完成全局覆盖。MO 等^[92]提出了一种在静态环境下结合生物地理的优化算法(Biogeography-based optimization, BBO)、粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)和近似维诺边界网络(Approximate voronoi boundary network, AVBN)进行全局路径规划的新方法。该方法利用 PSO 的位置更新策略来增加 BBO 中种群的多样性,然后利用得到的生物地理粒子群优化算法对 AVBN 建模的路径网络中的路径进行优化。

3 多机器人任务分配方法

在全覆盖路径规划方面,多机器人协作研究日趋重要,其比单机器人研究涉及更多因素,其中多机器人任务(路径)分配是最关键问题,也是提高多机器人协作性能的核心。多机器人任务分配是指为多机器人设定一个评价指标,将一系列作业任务分配给特定机器人,在任务能够被全部完成的同时使机器人的收益最高^[93]。在全覆盖作业中每个机器人的任务是物理环境中所划分出来的一个独立的作业区域,所有机器人完成分配的任务,也就实现了工作区域的全覆盖。

随着单机器人全覆盖路径规划算法日趋成熟,许多学者尝试将这些算法移植到多机器人协作研究中^[94]。由于作业环境的非线性,任务需求的多样性,机器人系统和任务执行过程的不同,多机器人系统中的任务分配可能非常复杂,因此国内外学者针对多机器人任务分配的解决方案,采取了各种各样的方法^[95],但相关研究多处于理论研究阶段,应用于实际生产较少。

目前,有关于任务分配算法的实时性及计算量等问题已进行了大量研究,最新研究已涉及动态环境下任务分配和多目标的任务优化等^[96]。分析对比了不同分配方法的任务规模、计算速度以及优缺点等,如表 3 所示。

3.1 基于数学规划的任务分配方法

该类方法指能够求出问题最优解的算法,是基于数学理论计算的分配方法。该类方法需确立数学模型,依据该模型,运用适当的数学方法求解出最优

表 3 任务分配算法对比

Tab.3 Comparison of task allocation methods

任务分配方法	精确性	规模	计算速度	优点	缺点	文献序号
动态规划法	高	小	快	减少时间复杂度,全局最优解	变量维数增大,计算量陡增大,不能解决较大规模问题	[99,101,106]
分支定界方法	高	小	快	可以求得全局最优解、平均速度快	占用很多内存空间,存储叶子结点的限界和对应的耗费矩阵	[98,104]
整数线性规划法	高	中	较快	有统一算法,整数线性规划问题都能求解	数据的准确性要求高,计算量大	[100,102,105]
禁忌搜索算法	较高	小	快	能够跳出局部最优解取优良解的概率大	对初始解依赖性较强,搜索过程是串行的	[108,111,114 – 118]
模拟退火算法	较高	小	快	鲁棒性好,有概率跳出局部最优解	容易陷入局部最优解,解受冷却速率影响	[109,111 – 112,121]
遗传算法	较高	中	慢	易于扩展、实现、计算复杂度低	易陷入早熟收敛,可能会导致“死锁”现象	[110,113,119]
蚁群算法	较高	中	快	稳定性、适应性强,易找到全局最优解	隐式通信,效率低;计算量大,收敛速度慢	[125,128 – 129]
粒子群算法	较高	大	快	原理简单、易于实现、通用性强、收敛速度快	收敛速度快时容易陷入局部最优解	[126,130,132]
鱼群算法	较高	中	快	鲁棒性强,备并行处理能力;较好的全局寻优能力	收敛速度较慢,参数设置复杂,容易偏离优质解	[127,131]
合同网算法	较高	中	快	简单直观、易于实现,执行效率高	适用于子任务之间不存在相互作用的问题,解可能不是最优解	[134,136 – 137]
拍卖算法	较高	大	快	计算速度快、执行效率高	需要先验知识,局部最优解	[135,141]
神经网络	较高	中	较快	稳定性、鲁棒性强,对动态环境适应性强	网络收敛速度慢,局部最优解	[145 – 146]

解,主要应用于对边界值确定、各因子之间的关系明确、结构清晰问题的求解^[97]。常见的基于数学规划的任务分配方法有分支定界法^[98]、动态规划法^[99]、整数线性规划法^[100]等。

这类方法对求解问题的边界值、结构等要求较高,其算法计算复杂性一般很大,在解决简单小规模的任务分配问题时效果较好,但是随着问题复杂性的增加,计算量和消耗时间会急剧增加,所以可以结合其他算法以实现大型问题的求解。D’URSO等^[101]在农业经营的背景下,提出基于动态规划的精确算法用于解决小问题实例,提出基于分支定界的随时近似算法用于解决许多机器人的大型问题实例,算法的模拟结果应用于涵盖一系列操作的农业工作如:点喷、散喷和浆液施用等。动态规划算法用于小型问题的求解具有较好的效果,随时分支定界算法可以快速、近似地求解现实实例,产生高质量近似最优的解决方案。分支定界算法与贪婪算法相结合,能很好地对于不确定的情况进行估计,具有很好的效果。

随着种植大户、农业合作社等规模化经营主体的出现,区域内农机装备调度使用成为研究的一个重点问题。潘迪等^[102]提出了改进型整数线性规划的数学模型,综合考虑农机装备工作效率、人工配

备、燃油消耗等影响参数,以解决农机装备结构优化问题。吴才聪等^[103]针对农田与农机资源的匹配与调度应用需求,建立了农机调度模型,采用动态规划方法进行求解,开发了农机资源时空调度原型系统,该模型可实现农机的快速、自动调度,有利于提高农机管理和利用率。胡志文^[104]为提高农机调度效率和可靠性,提出了一种绿色收割农机调度模型。采用整数规划的分支定界算法成功取得最优农机组合方案,该方法可以在较大解空间范围内求解,调度过程中农机油耗最优,实现收割作业中农机调度的科学化、合理化。

目前研究也不仅仅局限于机器人、车辆农机的任务分配,对于农事作业任务分配的研究也逐渐出现。FERRER等^[105]根据智利的葡萄采摘问题建立了混合整数线性规划模型,以支持收获调度、劳动力分配和路径决策。该模型考虑了成本最小化的目标以及收获葡萄的质量最大化目标,通过质量损失函数,将葡萄的质量纳入模型,采用了智能启发式算法进行求解,有效降低了运营成本和劳动力成本。BROWN等^[106]提出了一种创新的农田灌溉调度决策支持方法,称为坎特伯雷灌溉调度。该方法改进了随机动态规划,使用农场的时序序列模拟模型计算,农田灌溉策略由一组决策变量定义,并使用模拟

退火优化决策变量,使预期的未来农场利润最大化,提高了牧草产量。

对于难解的组合优化问题,当问题的规模较小时,此类算法能够在可接受的时间内找到最优解;当问题的规模较大时,此类算法可以提供问题的可行解,可以为启发式方法提供初始解,以便能搜索到更好的解。在复杂环境下一般不采用此类方法解决多机器人任务分配问题,不仅计算上消耗时间过多,而且结果也不一定是最优,有可能须在付出一定代价才能求解出最优解,对于某些并不存在严格上的最优解的问题,不能再采用此类方法来解决。

3.2 基于启发式搜索的任务分配方法

启发式算法是相对于最优化算法而提出的,指基于某种直观判断或经验构造的算法,在可接受的成本代价(计算时间、占用空间等)下给出待解决问题的可行解,在一定概率下可以求得最优解。该方法首先依据数学模型,根据所求问题的约束条件,利用数学收敛性,对于问题的答案在该问题的整个解集上进行搜索,最终收敛得到的一个次优解^[107]。常用的基于启发式搜索的任务分配方法有禁忌搜索算法^[108]、模拟退火算法^[109]、遗传算法^[110]等。

针对于多机器人、多农机的调度规划问题, CERDEIRA-PENA 等^[111]以牧草收获的收割机为对象,采用模拟退火算法和禁忌搜索算法进行优化求解。结果表明,在复杂的实例中,模拟退火方法也表现出了良好的、可靠的性能,而禁忌搜索算法则随着复杂性而恶化;但与禁忌搜索算法相比,模拟退火算法计算速度较慢。 CONESA-MUÑOZ 等^[112]以特定地点喷洒除草剂为研究对象,提出一种基于模拟退火算法的农机调度算法,模型同时考虑了不同的标准、不同的车辆特征、田地的可变性、油箱容量约束、罐箱加农化产品等条件,解决了同质车辆和异质车辆的农机调度规划问题,确定了农田最佳覆盖顺序、农机的轨迹和加注农化产品的最佳过渡时间。马梅琼^[113]以联合收获机为对象,提出带精英策略的非支配排序遗传算法对联合收获机跨区调度模型进行求解,针对模型的特点,设计了种群编码方式,并改进了交叉、变异等多种遗传算子。最后将成果应用于水稻收获作业,对模型及算法进行了验证。上述研究采用启发式搜索的方法进行相关问题求解,进行了算法的对比,也取得了一定的效果。针对空间分布比较分散随机的农机作业调度问题, ORFANO 等^[114]提出基于简单贪心策略和元启发式过程“禁忌搜索”的启发式算法,建立了一套较完整的农机连续作业调度模型,用于调度机械团队执行的生物质收获和处理操作中涉及的顺序任务。该方法根据

每种任务类型的可用机器数量,可以处理不同复杂性的调度问题,较为系统地解决了农机连续作业调度问题。

针对多农机、多车辆的田间路径分配和排序问题, SEYYEDHASANI 等^[115-116]采用 Clarke - Wright 改进节约算法和禁忌搜索算法对农机路径进行优化,禁忌搜索算法在路径优化程度上相对较好,能给出更优的调度方案,但求解速度慢;而 Clarke - Wright 改进算法求解速度更快,适合作为初始可行解生成算法。 SEYYEDHASANI 等^[117]针对农业田间作业时,发生的意外情况,可能需要重新分配和安排路径的问题进行研究,采用改进的 Clarke - Wright 节约算法作为启发式过程生成初始解;采用禁忌搜索算法作为元启发式过程,得到最优解。该方法可以动态更新机群的工作路线,但如果动态偏差不显著,可能无法提供任何改进,甚至产生更糟糕的解决方案。

为克服单一启发式算法的自身缺陷,采用多启发式算法的融合和改进进行问题的求解。 GRACIA 等^[118]研究农业物料运输的多农业车辆运输调度问题,以车辆转移距离最短为优化目标,提出一种基于遗传算法和局部搜索启发式的算法结合的混合算法。该算法路径优化效果明显,提升了运输的效率。 EDWARDS 等^[119]采用前瞻算法改进禁忌搜索算法 (Tabu search algorithm, TSA),为多农机创建单独的工作计划。改进后的 TSA 通常能够提供更接近场景的最佳解决方案,但增加了计算时间。王伟等^[120]将遗传算法变异操作的思想,引入模拟退火算法,建立基于贪婪机制的模拟退火算法;建立解集多样性的概念,设计基于自适应升温的模拟退火算法的改进方法,以此求解子区域的最佳遍历顺序问题,该方法减少了路径规划的长度。 GUAN 等^[121-122]提出基于模拟退火 (SA)、遗传算法 (GA) 和混合 Petri 网模型的两阶段元启发式算法,对资源分配和农机调度进行优化。该方法很好地处理了农田资源的初始和渐进状态、农机的移动顺序、协同工作和僵局消除,具有较高的资源利用率。

该类启发式算法没有严谨的数学公式推导保证算法一定可以达到全局最优解,但是可以通过启发搜索快速找到一组局部最优解 (近似最优解)。相对于数学规划方法,该类启发式算法的优势体现在对大规模问题的求解方面,在可接受的范围内求得一个近似全局最优解,该近似最优解在实际问题也是一个可选的解决方案。该类启发式算法通常较为简单,运算速度较快,适合大规模问题求解,但是容易陷入局部最优,缺乏全局性等。

3.3 基于群体智能的任务分配方法

基于群体智能的多机器人任务分配方法也是启发式搜索方法中的一种。群体智能算法思想起源于生物界种群的群体行为,通过模拟昆虫、兽群、鸟群和鱼群的群体行为所产生的一系列对于多机器人任务分配问题的新的解决方法。

这些群体按照一定的合作方式寻找食物,群体中每个成员通过学习其自身经验和其他成员的经验来不断改变搜索的方向,任何一种由昆虫群体或者其他动物社会行为为机制而激发设计出的算法或者分布式解释问题的策略均属于群体智能。群体智能算法通过群体内部个体之间的消息传播、种群优化、群体划分等方式使群体在较短的时间内得到一个接近最优解的分配方案^[123]。经典的基于群体智能的任务分配方法有:蚁群算法^[124]、粒子群算法^[125]、鱼群算法^[126]等。

基于群体智能的任务分配方法中,直接采用经典算法的研究较少,大部分都对经典算法进行了改进和融合。有关于经典算法的改进,ALAIISO等^[127]基于蚁群优化算法,对蚂蚁的图遍历规则进行改进,针对芬兰农业任务作业承包的组合优化问题,建立了农机调度模型,实现求解最优完成任务时间表。该算法非常适合并行执行,提高了计算效率。LI等^[128]提出一种基于云模型的改进蚁群算法,用于多农业机器人的调度问题。该算法的改进主要包括:自适应控制机制、信息素更新机制和任务点选择机制的构建,并设计一些优化算子。该算法能够快速收敛并获得高质量的解,效果显著。SETHANAN等^[129]研究甘蔗机械收割路线的规划问题。以收获距离最小化和甘蔗产量最大化为目标函数,提出一种改进多目标粒子群优化算法,设计了一种新的粒子编码/解码方案,用于将路径规划的可访问性和分散收获约束相结合。该方法在实际应用中效果较好。杨尚君等^[130]针对多无人机协同任务分配问题进行研究,以最大航程和最长任务执行时间作为目标函数,建立了协同任务分配多目标优化模型,采用改进的鱼群算法进行优化求解。该算法有效解决多无人机任务分配问题,并且算法具有较好的收敛性和有效性。

关于群体智能经典算法的融合,马军岩等^[131]设计融合模拟退火和粒子群优化的混合智能算法,对多区域的棉花、玉米及小麦联合收割机的作业调度进行模拟。该方法提高了区域总效益、订单响应率及农机效用比。

蚁群算法、粒子群算法等为了解决优化问题提供了新的思路,众多研究者纷纷通过模拟自然界生物

的群体生活行为,开发改进适应于不同应用场景的群体智能算法,使之得到了扩展和完善。此类算法在解决某些问题方面表现出比传统优化算法更好的性能,但是也存在早熟收敛、陷入局部最优解等问题,值得进一步探索和优化。

3.4 基于市场机制的任务分配方法

市场机制法是一种基于协商主义的任务分配方法,其模拟人类拍卖活动的过程,通过拍卖机制将任务分配到具体的机器人^[132]。常见的基于市场机制的任务分配方法有:合同网算法^[133]、拍卖算法^[134]等。

在拍卖机制中机器人会对任务进行投标和协商,出价最低者将中标。王猛等^[135]参考合同网算法中的招-投标过程,建立农机对任务进行投标的代价函数,通过选择招标者、设定招标阈值、中标者任务再分配和农机间任务交换等方式,提出一种基于改进合同网算法的同种农机机群动态作业任务分配方法。该方法能够满足农业生产中同种农机机群动态作业任务分配需求。针对异种性质任务的分配,宫金良等^[136]针对农场中多Agent的任务分配问题,将蚁群算法的刺激响应模型应用于传统合同网算法中,建立农业Agent异质性任务分配的效能模型,以实现团队整体效能的最优,改进的合同网算法比传统合同网算法的整体效能提高了14.1%。

基于市场机制方法采用公开拍卖机制,每个机器人都可以作为拍卖买家或卖家,通过多机器人系统中的协商过程,可以实现系统架构的分布式设计^[137-138]。TRIGUI等^[139]针对农业机器人的任务分配问题,提出了两种基于分布式市场的算法,基于分布式市场(Distributed market-based, DMB)算法和改进分布式市场(Improved distributed market-based, IDMB)算法。DMB算法中每个机器人为每个任务出价,IDMB算法包括在机器人之间交换任务以降低分配成本。结果表明,IDMB算法产生了接近最优的解。针对农田环境中多机器人协同作业的问题,赵辉等^[140]考虑了资源的影响,提出一种基于拍卖算法的任务分配方法,充分考虑机器人数量、时间、距离、执行能力,以及机器人资源消耗量等问题,使各个农机有序地为农田地块服务,降低整个系统的执行代价,提高任务完成量。该算法可以有效地提高作业效率,在相同条件下使资源消耗量及任务完成量达到最优,计算结果与实际作业完成量更接近。

该类算法中,合同网算法最具代表,利用机器人作为合同网中的结点相互传递信息,以招-投-中的机制进行任务分配,但传统的合同网络模型在评估

方法以及再拍卖方面存在缺陷。近年来国内外众多学者研究各种基于合同网的方法,其中以拍卖算法最多。拍卖算法具有良好的鲁棒性、可拓展性以及高适应性,适合用于分布式多机器人系统的任务分配;其缺点是资源消耗大,收敛时间长,受通信质量影响。

3.5 其他任务分配方法

BOCHTIS 等^[141-142]针对农业领域的带时间窗车辆调度问题,提出服务单元(Service units, SU)和主单元(Primary units, PU)的概念,采用一种理论方法来表示服务单元(SU)的规划和调度任务,在涉及协作农机的现场操作的情况下,需要一个 SU 或一组 SU,满足来自 PU 的现场服务请求,PU 被认为是方法论中的“客户”。用该方法来解决田间作业的规划和调度问题,并在取得了很好的效果。

MAOUDJ 等^[143]提出了一种用于机器人任务分配和调度的方法,在满足所有任务约束,以任务的总执行时间最小化为目标。该方法在多代理架构中实现,由控制机器人的代理协调工作并合作完成分配的任务,用于远程控制异构多机器人系统。

江楠等^[144]针对农机作业信息发布滞后和农机资源调度不合理,会造成农机作业效率低下的问题,采用粒子群优化的神经网络算法对农机调度网络的数据进行安全评价。该算法有效提高了网络安全评价的效率,可以满足网络安全态势评价的需要。刘雨等^[145]根据 AUV 的水下工作环境建立二维生物启发神经网络(Glasius bio-inspired neural networks, GBNN)模型,神经网络中每一个神经元的活性值与水下栅格地图中的位置单元一一对应;实现了在二维静态障碍物与动态障碍物环境下的多任务分配与路径规划。

黎萍等^[146]针对多机器人系统中机器人决策之间的相互依存的问题,提出一种基于博弈论的多机器人系统任务分配算法。该算法复杂度较低,计算量较小,鲁棒性较好,获得的任务分配方案质量较高。

对于多农业机器人全覆盖的研究,主要应用于同种机器人协作的全覆盖作业上,针对同种机器人进行任务的分配。对于大面积农田进行分割后,将任务分配给多个作业机器人;对于多零星小面积农田,按任务量分配给机器人,以求达到可接受成本的最大效率。国内外有关于任务分配的研究较多,各种任务分配算法也层出不穷,任务分配是实现多机器人协作的关键。不同任务分配算法的效果性能也各有差别,算法的优缺点也各不相同,可针对不同应用环境、任务需求,选择适当的分配方式,结合不

同的算法,优化其性能,以实现高效合理的任务分配。

4 结论与展望

随着传感器技术、机器人技术、人工智能算法等相关技术的发展,农业机器人全覆盖技术在农业生产中应用越来越普遍,成为农业生产的关键技术之一。本文介绍了近年来国内外农业机器人全覆盖作业规划的相关研究,较为详细地分析总结了环境建模技术、全覆盖路径规划技术和多机器人任务分配技术的相关研究进展。同时归纳相关算法的优点及其局限性,也阐述了相关算法的改进、融合等方面的研究,从目前相关研究来看,农业机器人全覆盖的路径规划的技术尚未成熟,多机器人的任务分配研究成果多是理论研究,与实际应用还存在一定的差距,理论、技术和应用还有待完善。为缩小理论与实际应用的差距,综合过去研究进展和未来发展需求,在未来工作中需要对以下几个方面作进一步地研究。

4.1 环境模型优化

在路径规划和任务分配前,都需要一个适当的环境信息表示方法,能够实时合理地表征环境信息,因此需建立环境模型。无论是路径规划方法,还是任务分配方法,一般都依赖于确定的环境模型,但由于农业作业环境的非线性、约束条件的复杂性,环境信息地图不是一成不变,需要随环境产生变化。

若环境模型可以随环境信息变化实时提供环境地图,需要实现以下 3 个方面研究:①利用高精度传感器可以实时感知动态的环境信息。②环境感知系统可以实时处理识别环境信息,当环境信息发生改变时可以快速识别出物障信息。③环境模型可以依靠环境感知系统实时构建新的环境信息地图。环境地图的准确性直接影响了后续路径规划和多机器人任务分配的效果,因此优化环境模型,提高模型的精度、动态响应能力显得尤为重要。

4.2 全覆盖路径规划算法创新

国内外学者对于全覆盖路径规划算法的研究较多,并取得了一定成果。从相关研究来看,单一路径规划算法都存在一定的局限性,为了提高算法性能,部分学者将优化改进现有算法或融合多种算法的优点,取长补短从而改善算法性能,形成新的算法以达到更好的效果。

目前,很多路径规划算法都只考虑定点目标或者静态环境,在未知环境或动态环境中不能达到很好的预期效果,因此可以对动态环境响应的路径规划算法是今后研究重点之一。机器人全覆盖路径规

划本身是一个学科交叉性较强的课题,因此可以借鉴其他学科的研究成果,例如针对生物群体研究,产生新的基于生物群体行为的算法模型。可以从生物学甚至社会学的角度出发,去发现和提炼新的行为、交互模式,实现全覆盖路径规划算法的创新。

4.3 动态实时任务分配

多机器人任务分配的研究主要集中在对于静态环境的研究,在实际农业作业环境中由于地形、转向控制、导航偏离、障碍物等外部环境发生改变时,就很难保证任务分配效果,所以进行实时动态任务分配的研究就显得尤为重要。对于动态任务分配的研究主要集中在以下 2 个方面:①提高环境信息的感知能力,环境信息是部分可观的,所以任务分配时所依赖的环境信息等是不确定的,需利用传感器实时感知环境信息的变化,为动态任务分配提供实时环境信息。②提高任务分配算法的性能,动态的任务分配要求系统在有限的时间及计算资源的条件下给出合理有效的规划结果,因此对于算法系统的时效

性和计算性能提出了更高的要求,也使得该问题具有非常高的复杂性和求解难度。

在动态任务规划中,环境信息的动态性和不确定性以及任务分配实施结果的准确性,都会对作业任务的成败造成影响。所以在实时的动态任务规划中,需要综合考虑环境信息和分配过程不确定性因素,应用场景的真实模型,实施结果存在的误差以及局部或全局最优解等各个方面,进行复杂环境下的高精度的任务分配的研究,以求解出合理、有效的最优解。

4.4 机器人底层控制优化

目前,国内外的研究集中于路径规划和任务分配算法,注重于理论仿真,而与实际的应用还有一定的差距。因此,开展机器人底层控制的优化,有助于提高机器人的控制精度,减小移动误差;有助于提高工作环境的适应性,减少随机误差。机器人底层控制与路径规划算法、任务分配算法的有效结合将有助于提高作业精度,保证全覆盖作业的有效实施。

参 考 文 献

- [1] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(4):1-18.
ZHANG Man, JI Yuhao, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):1-18. (in Chinese)
- [2] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G C, BUSATO P. Advances in agricultural machinery management: a review[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126(39): 69-81.
- [3] 刘佳晖,祖家奎,陶德臣,等. 基于最小喷洒单元的植保无人机作业航线优化分割方法[J]. 计算机系统应用,2022,31(3):340-344.
LIU Jiahui, ZU Jiakui, TAO Dechen, et al. Optimizing method of operating routes for plant protection drone based on the minimum spraying unit[J]. Computer Systems & Applications,2022,31(3):340-344. (in Chinese)
- [4] 罗承铭,熊陈文,黄小毛,等. 四边形田块下油菜联合收获机全覆盖作业路径规划算法[J]. 农业工程学报,2021,37(9): 140-148.
LUO Chengming, XIONG Chenwen, HUANG Xiaomao, et al. Coverage operation path planning algorithms for the rape combine harvester in quadrilateral fields[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(9): 140-148. (in Chinese)
- [5] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报,2022,53(5):17-26,43.
CHEN Kai, XIE Yinshan, LI Yanming, et al. Full Coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):17-26,43. (in Chinese)
- [6] LI Yan, CHEN Hai, ER MENG J, et al. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method[J]. Mechatronics,2011,21(5):876-885.
- [7] 蒲兴成,赵红全,张毅. 细菌趋化行为的移动机器人路径规划[J]. 智能系统学报,2014,9(1): 69-75.
PU Xingcheng, ZHAO Hongquan, ZHANG Yi. Mobile robot path planning research based on bacterial chemotaxis[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems,2014,9(1):69-75. (in Chinese)
- [8] 杜鹏桢,唐振民,陆建峰,等. 不确定环境下基于改进萤火虫算法的地面自主车辆全局路径规划方法[J]. 电子学报, 2014,42(3): 616-624.
DU Pengzhen, TANG Zhenmin, LU Jianfeng, et al. Global path planning for ALV based on improved glowworm swarm optimization under uncertain environment[J]. Acta Electronica Sinica,2014,42(3):616-624. (in Chinese)
- [9] 邵敏. 面向智能农机作业的全覆盖路径规划研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.
SHAO Min. Research on complete coverage path planning for intelligent agricultural machinery[D]. Heifei: Anhui Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [10] 李文超. 移动机器人环境建模与路径规划方法研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
LI Wenchao. Research on environmental modeling and path planning of mobile robots[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese)
- [11] CHOI J, LEE Y, KIM T, et al. Hierarchical topological modeling of marine environment[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 2016: 877-880.
- [12] EDWARDS G T C, HINGE J, SKOU-NIELSEN N, et al. Route planning evaluation of a prototype optimised infield route

- planner for neutral material flow agricultural operations[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 153: 149 – 157.
- [13] 郑利君, 胡旭东. 基于几何算法的静态环境中移动机器人路径规划的研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2007, 24(4): 439 – 443.
ZHENG Lijun, HU Xudong. The research of robot's path planning based on geometry algorithm in a static environment[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition)*, 2007, 24(4): 439 – 443. (in Chinese)
- [14] SEYYEDHASANI H, DVORAK J S. Using the vehicle routing problem to reduce field completion times with multiple machines [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 134: 142 – 150.
- [15] 郭丽晓. 基于拓扑地图的 AGV 智能路径规划技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
GUO Lixiao. Intelligent path planning for automated guided vehicles based on topological map [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [16] CHEN R T, ZHANG L, ZHANG B. Planning collision-free path for robotic arm among obstacles[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, 1(6): 91 – 96.
- [17] 包琳, 高巍. 救援机器人搜索目标路径环境快速建模仿真[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(4): 272 – 275, 347.
BAO Lin, GAO Wei. Rapid modeling and simulation of rescue robot searching target path environment [J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(4): 272 – 275, 347. (in Chinese)
- [18] 郭洪月, 王元新, 孙晨曦. 自动泊车系统中 AGV 路径规划及碰撞规避问题分析[J]. *装备制造技术*, 2020(4): 258 – 261, 267.
GUO Hongyue, WANG Yuanxin, SUN Chenxi. AGV path in automatic parking system planning and collision avoidance analysis[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2020(4): 258 – 261, 267. (in Chinese)
- [19] 任成龙. AGV 自动物料搬运调度系统的研发[D]. 南京: 东南大学, 2018.
REN Chenglong. Research of AGV automatic material handling system [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [20] 商高高, 刘刚, 韩江义, 等. 园艺电动拖拉机作业全覆盖路径规划算法研究[J]. *农机化研究*, 2022, 44(9): 35 – 40.
SHANG Gaogao, LIU Gang, HAN Jiangyi, et al. Research on complete coverage path planning of gardening electric tractor operation[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(9): 35 – 40. (in Chinese)
- [21] 曹翔, 俞阿龙. 移动机器人全覆盖信念函数路径规划算法[J]. *智能系统学报*, 2018, 13(2): 315 – 321.
CAO Xiang, YU Along. Complete-coverage path planning algorithm of mobile robot based on belief function [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2018, 13(2): 315 – 321. (in Chinese)
- [22] 宫金良, 王伟, 张彦斐, 等. 基于农田环境的农业机器人协同作业策略[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 11 – 19.
GONG Jinliang, WANG Wei, ZHANG Yanfei, et al. Cooperative working strategy for agricultural robot groups based on farmland environment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(2): 11 – 19. (in Chinese)
- [23] MA Y F, SUN H, YE P, et al. Mobile robot multi-resolution full coverage path planning algorithm [C] // *Proceedings of the 2018 5th International Conference on Systems and Informatics*, 2018: 120 – 125.
- [24] 李小君, 潘丽君. 基于可视图和几何逼近算法的避障路径动态规划研究[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2007, 21(2): 29 – 32.
LI Xiaojun, PAN Lijun. Research on obstacle-avoiding path dynamic planning based on visual graph and geometry approximation algorithm [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2007, 21(2): 29 – 32. (in Chinese)
- [25] BHATTACHARYA P, GAVRILOVA M L. Road map-based path planning-using the voronoi diagram for a clearance-based shortest path [J]. *Robotics & Automation Magazine IEEE*, 2008, 15(2): 58 – 66.
- [26] 蔡健荣, 赵杰文, THOMAS Rath, 等. 水果收获机器人避障路径规划[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3): 102 – 105, 135.
CAI Jianrong, ZHAO Jiewen, THOMAS Rath, et al. Path planning of fruits harvesting robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(3): 102 – 105, 135. (in Chinese)
- [27] SCHULZ C, NOCAJ A, GOERTLER J, et al. Probabilistic graph layout for uncertain network visualization [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 23(1): 531 – 540.
- [28] CANDELORO M, LEKKAS A M, SORENSEN A J. A voronoi-diagram based dynamic path-planning system for under actuated marine vessels [J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 61: 41 – 54.
- [29] 李善寿, 方潜生, 肖本贤, 等. 全局路径规划中基于改进可视图法的环境建模[J]. *华东交通大学学报*, 2008, 25(6): 73 – 77.
LI Shanshou, FANG Qiansheng, XIAO Benxian, et al. Environment modeling in global path planning based on modified visibility graph [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2008, 25(6): 73 – 77. (in Chinese)
- [30] 夏娜, 束强, 赵青, 等. 基于维诺图和二分图的水面移动基站路径规划方法[J]. *自动化学报*, 2016, 42(8): 1185 – 1197.
XIA Na, SHU Qiang, ZHAO Qing, et al. A path planning method for water surface mobile sink based on Voronoi diagram and bipartite graph [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(8): 1185 – 1197. (in Chinese)
- [31] 王凤阳, 罗予频. 平面多边形的广义梯形分解算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(12): 2636 – 2641.
WANG Fengyang, LUO Yupin. Generalized-trapezoidal decomposition algorithm for planar polygons [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(12): 2636 – 2641. (in Chinese)
- [32] GAJJAR S, BHADANI J, DUTTA P, et al. Complete coverage path planning algorithm for known 2D environment [C] // *Proceedings of the 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology*, 2017: 963 – 967.
- [33] HABIB M K, ASAMA H. Efficient method to generate collision free paths for an autonomous mobile robot based on new free space structuring approach [C] // *Proceedings IROS 91: IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, 1991: 563 – 567.
- [34] 马正华, 李敏, 章明, 等. 智能吸尘器全覆盖遍历路径规划及仿真实现[J]. *测控技术*, 2012, 31(2): 99 – 102.
MA Zhenghua, LI Min, ZHANG Ming, et al. Full coverage traversed path planning and simulation of intelligence cleaning

- robot[J]. *Measurement & Control Technology*, 2012,31(2): 99 – 102. (in Chinese)
- [35] 汪芸. 矿区废弃地移动机器人全覆盖路径规划[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
WANG Yun. Complete coverage path planning of mobile robot for abandoned mine land[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [36] GUASTELLA D C, CANTELLI L, GIAMMELLO G, et al. Complete coverage path planning for aerial vehicle flocks deployed in outdoor environments[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2019,75:189 – 201.
- [37] 李荣. 一种基于新的单元分解法的全覆盖路径规划算法[J]. *新型工业化*, 2021,11(2):58 – 60.
- [38] HUANG W H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms [C] // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001:27 – 32.
- [39] 龙卓群, 雷日兴. 移动机器人全覆盖路径规划算法研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2018(9): 15 – 17.
LONG Zhuoqun, LEI Rixing. Research on full coverage path planning algorithm for mobile robot [J]. *Automation & Instrumentation*, 2018(9): 15 – 17. (in Chinese)
- [40] 刘洋成, 耿端阳, 兰玉彬, 等. 基于自动导航的农业装备全覆盖路径规划研究进展[J]. *中国农机化学报*, 2020,41(11): 185 – 192.
LIU Yangcheng, GENG Duanyang, LAN Yubin, et al. Research progress of agriculture equipment full coverage path planning based on automatic navigation[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanism*, 2020, 41(11): 185 – 192. (in Chinese)
- [41] 张成, 凌有铸, 陈孟元. 改进蚁群算法求解移动机器人路径规划[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016,30(11):1758 – 1764.
ZHANG Cheng, LING Youzhu, CHEN Mengyuan. Path planning of mobile robot based on an improved ant colony algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016,30(11):1758 – 1764. (in Chinese)
- [42] 贺利乐, 刘小罗, 黄天柱, 等. 移动机器人全覆盖路径规划算法研究[J]. *机械设计与制造*, 2021(3):280 – 284.
HE Lile, LIU Xiaoluo, HUANG Tianzhu, et al. Research on the complete-coverage path planning algorithm of mobile robot [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021(3):280 – 284. (in Chinese)
- [43] 姚竞发. 智能农机协同作业路径优化技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
YAO Jingfa. Study on path optimization technology of intelligent agricultural machinery cooperative operation[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [44] 温志文, 杨春武, 蔡卫军. 复杂环境下 UUV 完全遍历路径规划方法[J]. *鱼雷技术*, 2017,25(1): 22 – 26.
WEN Zhiwen, YANG Chunwu, CAI Weijun. A complete coverage path planning method of UUV under complex environment [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017,25(1): 22 – 26. (in Chinese)
- [45] 许兴军. 智能割草机的区域全覆盖算法设计与仿真[J]. *机电工程*, 2012,29(3):302 – 306.
XU Xingjun. Design and simulation on regional all-covered algorithm of intelligent mower [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2012,29(3):302 – 306. (in Chinese)
- [46] 高天兰, 周颖华. 矩形区域内清扫机器人的运动学分析[J]. *数字技术与应用*, 2018,36(3): 108 – 111.
GAO Tianlan, ZHOU Yinghua. Kinematics analysis of cleaning robot in rectangular area [J]. *Digital Technology & Application*, 2018,36(3): 108 – 111. (in Chinese)
- [47] 贺磊盈, 杨太玮, 武传宇, 等. 基于贪心遗传算法的穴盘苗补栽路径优化[J]. *农业机械学报*, 2017,48(5):36 – 43.
HE Leiying, YANG Taiwei, WU Chuanyu, et al. Optimization of replugging tour planning based on greedy genetic algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(5):36 – 43. (in Chinese)
- [48] RASHID R, PERUMAL N, ELAMVAZUTHI I, et al. Mobile robot path planning using ant colony optimization [C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation*, 2016: 1 – 6.
- [49] 张超, 李擎, 陈鹏, 等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法及其应用[J]. *北京科技大学学报*, 2013,35(7):955 – 960.
ZHANG Chao, LI Qing, CHEN Peng, et al. Improved ant colony optimization based on particle swarm optimization and its application[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013,35(7):955 – 960. (in Chinese)
- [50] MASEHIAN E, SEDIGHIZADEH D. A multi-objective PSO-based algorithm for robot path planning [C] // *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010:465 – 470.
- [51] 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012,52(8):1085 – 1089.
WANG Dianjun. Indoor mobile-robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012,52(8):1085 – 1089. (in Chinese)
- [52] ZUO L, GUO Q, XU X, et al. A hierarchical path planning approach based on A* and least-squares policy iteration for mobile robots[J]. *Neurocomputing*, 2015,170:257 – 266.
- [53] 宋彦, 张羊阳, 姚琦, 等. 基于启发式动态规划的履带机器人路径跟随控制方法[J]. *农业机械学报*, 2019,50(11):24 – 33.
SONG Yan, ZHANG Yangyang, YAO Qi, et al. Path following control method of tracked mobile robot based on heuristic dynamic programming[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(11):24 – 33. (in Chinese)
- [54] 郭典新, 高龙琴, 李志昂, 等. 割草机器人全覆盖式路径规划平台设计与实现[J]. *现代制造工程*, 2018(11):50 – 53.
GUO Dianxin, GAO Longqin, LI Zhiang, et al. Mowing robot full coverage path planning platform design and implementation [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018(11):50 – 53. (in Chinese)
- [55] 谢逢博, 李君, 李振伟, 等. 果园割草机器人路径规划与轨迹跟踪控制研究[J]. *中国热带农业*, 2021(1):17 – 24, 16.
XIE Fengbo, LI Jun, LI Zhenwei, et al. Study on path planning and trajectory tracking control off orchard mowing robot [J]. *China Tropical Agriculture*, 2021(1):17 – 24, 16. (in Chinese)
- [56] 刘玉娟, 黄敦华, 李勇. 路径规划在移动(保洁)机器人装置中的应用[J]. *机电产品开发与创新*, 2012,25(5):4 – 6.
LIU Yujuan, HUANG Dunhua, LI Yong. The application of path planning in intelligent mobile (cleaning) robotic devices

- [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2012,25(5):4-6. (in Chinese)
- [57] 周欣沅,张玲,马永帅. 基于栅格地图的环境建模在清扫机器人路径规划中的应用[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2021(7):183-184.
ZHOU Xinyuan, ZHANG Ling, MA Yongshuai. The application of environment modeling based on grid map in path planning of cleaning robot[J]. Management & Technology of SME, 2021(7):183-184. (in Chinese)
- [58] 单正娅,黄大荣. 基于圆形外螺旋算法的清扫机器人研发[J]. 制造业自动化,2012,34(13):106-108,140.
SHAN Zhengya, HUANG Darong. Design of cleaning robot based on circular outer spiral algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2012,34(13):106-108,140. (in Chinese)
- [59] 张迎雪,陈萌,陈金宝,等. 多机器人智能化协同技术研究进展[J]. 载人航天,2021,27(6):767-778.
ZHANG Yingxue, CHEN Meng, CHEN Jinbao, et al. Research progress of intelligent cooperating technology for multiple robots[J]. Manned Spaceflight, 2021,27(6):767-778. (in Chinese)
- [60] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1996,26(1):29-41.
- [61] LI S S, ZHAO G H, YUE W X. Research on path planning for mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,2026:012049.
- [62] ZHOU K, JENSEN A L, SØRENSEN C G, et al. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014,109:12-22.
- [63] 秦元庆,孙德宝,李宁,等. 基于粒子群算法的移动机器人路径规划[J]. 机器人,2004,26(3):222-225.
QIN Yuanqing, SUN Debao, LI Ning, et al. Path planning for mobile robot based on particle swarm optimization[J]. Robot, 2004,26(3):222-225. (in Chinese)
- [64] ZENG N, ZHANG H, CHEN Y, et al. Path planning for intelligent robot based on switching local evolutionary PSO algorithm[J]. Assembly Automation, 2016,36(2):120-126.
- [65] 赵慧南,牟磊,孙慧,等. 关于移动机器人全覆盖路径规划研究[J]. 计算机仿真,2019,36(3):298-301.
ZHAO Huinan, MOU Lei, SUN Hui, et al. Research on full coverage path planning of mobile robot[J]. Computer Simulation, 2019,36(3):298-301. (in Chinese)
- [66] KIRKPATRICK S, GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983,220(4598):671-680.
- [67] 王星童,吴林鸿,赵启宇,等. 粒子群-快速模拟退火算法在路径规划中的应用[J]. 信息技术与信息化,2021(6):13-16.
- [68] 郑树泉. 工业智能技术与应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,2019:250-251.
- [69] LUO C M, YANG S X. A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environments[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008,19(7):1279-1298.
- [70] KAPANOGLU M, ALIKALFA M, OZKAN M, et al. A pattern-based genetic algorithm for multi-robot coverage path planning minimizing completion time[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012,23(4):1035-1045.
- [71] 汪四新,谭功全,蒋沁,等. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机仿真,2021,38(9):386-389,404.
WANG Sixin, TAN Gongquan, JIANG Qin, et al. Path planning for mobile robot based on improved A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2021,38(9):386-389,404. (in Chinese)
- [72] 刘晶,姚维,章玮. 移动机器人全覆盖路径规划算法研究[J]. 工业控制计算机, 2019,32(12):52-54.
LIU Jing, YAO Wei, ZHANG Wei. Research on complete coverage path planning algorithm of mobile robots[J]. Industrial Control Computer, 2019,32(12):52-54. (in Chinese)
- [73] 刘淑华,夏菁,孙学敏,等. 已知环境下一种高效全覆盖路径规划算法[J]. 东北师大学报(自然科学版),2011,43(4):39-43.
LIU Shuhua, XIA Jing, SUN Xuemin, et al. An efficient complete coverage path planning in known environments[J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 2011,43(4):39-43. (in Chinese)
- [74] 梁瑾,宋科璞. 神经网络在移动机器人路径规划中的应用[J]. 系统仿真学报,2010,22(增刊):269-272.
LIANG Jin, SONG Kepu. The application of neural network in mobile robot path planning[J]. Journal of System Simulation, 2010,22(Supp.):269-272. (in Chinese)
- [75] 邓燕. 智能除草机器人的路径规划的研究[D]. 青岛:青岛大学,2015.
DENG Yan. Research on path planning of intelligent weeding robot[D]. Qingdao: Qingdao University, 2015. (in Chinese)
- [76] RASHID R, PERUMAL N, ELAMVAZUTHI I, et al. Mobile robot path planning using ant colony optimization[C] // Proceedings of the 2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA), 2016:1-6.
- [77] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G, BUSATO P, et al. Benefits from optimal route planning based on B-patterns[J]. Biosystems Engineering, 2013,115(4):389-395.
- [78] EDWARDS G T C, HINGE J, SKOU-NIELSEN N, et al. Route planning evaluation of a prototype optimised infield route planner for neutral material flow agricultural operations[J]. Biosystems Engineering, 2017,153:149-157.
- [79] SANTORO E, SOLER E M, CHERRI A C. Route optimization in mechanized sugarcane harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017,141:140-146.
- [80] JENSEN M A F, BOCHTIS D, SØRENSEN C G, et al. In-field and inter-field path planning for agricultural transport units[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012,63(4):1054-1061.
- [81] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G, VOUGIOUKAS S G. Path planning for in-field navigation-aiding of service units[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,74(1):80-90.
- [82] 张赤斌,王兴松. 基于蚁群算法的完全遍历路径规划研究[J]. 中国机械工程,2008,19(16):1945-1949.
ZHANG Chibin, WANG Xingsong. Complete coverage path planning based on ant colony algorithm[J]. China Mechanical

- Engineering, 2008, 19(16): 1945 – 1949. (in Chinese)
- [83] 胡馨丹, 杨盛毅, 朱力, 等. 基于栅格分区的覆盖路径规划方法[J]. 机械与电子, 2022, 40(5): 13 – 16.
HU Xindan, YANG Shengyi, ZHU Li, et al. Coverage path planning method based on grid region decomposition[J]. Machinery & Electronics, 2022, 40(5): 13 – 16. (in Chinese)
- [84] 周利坤, 李悦. 油罐清洗机器人全覆盖遍历路径规划方法[J]. 机械设计与制造, 2014(7): 175 – 178.
ZHOU Likun, LI Yue. A full coverage traversed path planning of oil tank cleaning robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(7): 175 – 178. (in Chinese)
- [85] LI K, CHEN Y F, JIN Z Y, et al. A complete coverage path planning algorithm based on backtracking method[J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41: 1227 – 1235.
- [86] 马全坤, 张彦斐, 宫金良. 基于记忆模拟退火和 A* 算法的农业机器人遍历路径规划[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(4): 127 – 132.
MA Quankun, ZHANG Yanfei, GONG Jinliang. Traversal path planning of agricultural robot based on memory simulated annealing and A* algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(4): 127 – 132. (in Chinese)
- [87] 周林娜, 汪芸, 张鑫, 等. 矿区废弃地移动机器人全覆盖路径规划[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1220 – 1228.
ZHOU Linna, WANG Yun, ZHANG Xin, et al. Complete coverage path planning of mobile robot on abandoned mine land[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(9): 1220 – 1228. (in Chinese)
- [88] 李学洋, 李悦, 张亚伟. 基于遗传变异蚁群算法的机器人路径规划的改进[J]. 电子设计工程, 2012, 20(15): 38 – 40, 43.
LI Xueyang, LI Yue, ZHANG Yawei. Improved ant colony algorithm based on genetic variation apply in robots path planning[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(15): 38 – 40, 43. (in Chinese)
- [89] DAS P K, BEHERA H S, PANIGRAHI B K. A hybridization of an improved particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-robot path planning[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2016, 28: 14 – 28.
- [90] 邱雪娜, 刘士荣, 宋加涛. 不确定动态环境下移动机器人的完全遍历路径规划[J]. 机器人, 2006, 28(6): 586 – 592.
QIU Xuena, LIU Shirong, SONG Jiatao. A complete coverage path planning method for mobile robots in uncertain dynamic environments[J]. Robot, 2006, 28(6): 586 – 592. (in Chinese)
- [91] 张纯刚, 席裕庚. 动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划[J]. 机器人, 2002, 24(1): 71 – 75.
ZHANG Chungang, XI Yugeng. Rolling path planning of mobile robot in dynamic unknown environment[J]. Robot, 2002, 24(1): 71 – 75. (in Chinese)
- [92] MO H W, XU L F. Research of biogeography particle swarm optimization for robot path planning[J]. Neurocomputing, 2015, 148: 91 – 99.
- [93] KORSAH G A, STENTZ A, DIAS M B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(12): 1495 – 1512.
- [94] 王文权. 带时间窗农机调度问题模型及算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WANG Wenquan. Research on models and algorithms for agricultural machinery scheduling problem with time window[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [95] 周星. 多机器人全覆盖问题的任务分配算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
ZHOU Xing. Research on task allocation algorithms of multi-robot complete coverage problems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [96] 严浙平, 刘祥玲. 多 UUV 协调控制技术研究现状及发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 226 – 231.
YAN Zheping, LIU Xiangling. Research status and development trend of multi-UUV coordinated control technology: a review[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(3): 226 – 231. (in Chinese)
- [97] 谢婷婷. 基于 GA 的农机作业调度研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
XIE Tingting. Research and application of the agricultural machinery scheduling based on GA[J]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [98] 乔瑞. 利用分支定界法解决 MPS 任务分配问题[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1998(2): 23 – 26.
QIAO Rui. The utilization of branch-and-bound method to solve the problem of MPS task distribution[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 1998(2): 23 – 26. (in Chinese)
- [99] 刁培松, 仪垂杰, 吴文权, 等. 基于结构模块化方法的小麦联合收获机方案设计[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 94 – 97.
DIAO Peisong, YI Chuijie, WU Wenquan, et al. Scheme design of wheat combine harvester based on structural module method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 94 – 97. (in Chinese)
- [100] 聂明泓, 杨丽英, 聂义勇. 任务分配问题的建模与求解[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(4): 710 – 715.
NIE Minghong, YANG Liying, NIE Yiyong. Modelling and solution for assignment problem[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(4): 710 – 715. (in Chinese)
- [101] D'URSO G, SMITH S L, METTU R, et al. Multi-vehicle refill scheduling with queueing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 44 – 57.
- [102] 潘迪, 陈聪. 基于整数线性规划的农机装备优化配置决策支持系统研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(2): 35 – 37, 29.
PAN Di, CHEN Cong. Based on integer linear programming, research of decision support system for optimization of agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(2): 35 – 37, 29. (in Chinese)
- [103] 吴才聪, 蔡亚平, 罗梦佳, 等. 基于时间窗的农机资源时空调度模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 237 – 241.
WU Caicong, CAI Yaping, LUO Mengjia, et al. Time-windows based temporal and spatial scheduling model for agricultural machinery resources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 237 – 241. (in Chinese)

- [104] 胡志文. 绿色收割农机调度模型[J]. 上海农业学报, 2014, 30(6): 133 – 135.
HU Zhiwen. A green reaping farm machine scheduling model[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2014, 30(6): 133 – 135. (in Chinese)
- [105] FERRER J C, CAWLEY A M, MATURANA S, et al. An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations [J]. International Journal of Production Economics, 2008, 112(2): 985 – 999.
- [106] BROWN P D, COCHRANE T A, KROM T D. Optimal on-farm irrigation scheduling with a seasonal water limit using simulated annealing[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(6): 892 – 900.
- [107] 南风. 小麦机收任务分配与收运协同调度优化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
NAN Feng. Research on task allocation optimization of wheat harvest orders and cooperative optimization of harvesters and grain trucks[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)
- [108] 戴庆, 赵艳玲. 基于遗传禁忌算法的任务分配与调度的研究[J]. 河北科技大学学报, 2007, 28(4): 269 – 271.
DAI Qing, ZHAO Yanling. Research for task matching and scheduling based on genetic tabu algorithm[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2007, 28(4): 269 – 271. (in Chinese)
- [109] 戴上平, 高丽, 朱长武. 基于遗传模拟退火算法的任务分配与调度[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2006(4): 151 – 154.
DAI Shangping, GAO Li, ZHU Changwu. Task matching and scheduling based on global genetic simulated annealing algorithm[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition), 2006(4): 151 – 154. (in Chinese)
- [110] 韦韞, 李东波, 童一飞. 面向服务的网络化协同制造资源多目标重组优化调度[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 193 – 199.
WEI Yun, LI Dongbo, TONG Yifei. Multi-objective reconfiguration and optimal scheduling of service-oriented networked collaborative manufacturing resource[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 193 – 199. (in Chinese)
- [111] CERDEIRA-PENA A, CARPENTE L, AMIAMA C. Optimised forage harvester routes as solutions to a traveling salesman problem with clusters and time windows[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 110 – 123.
- [112] CONESA-MUÑOZ J, BENGOCHEA-GUEVARA J M, ANDUJAR D, et al. Route planning for agricultural tasks: a general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 204 – 220.
- [113] 马梅琼. 联合收割机跨区作业调度研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
MA Meiqiong. Research on combine trans-regional operation scheduling [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [114] ORFANOU A, BUSATO P, BOCHTIS D D, et al. Scheduling for machinery fleets in biomass multiple-field operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 94: 12 – 19.
- [115] SEYYEDHASANI H, DVORAK J S. Using the vehicle routing problem to reduce field completion times with multiple machines[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134: 142 – 150.
- [116] SEYYEDHASANI H, DVORAK J S, ROEMMELE E. Routing algorithm selection for field coverage planning based on field shape and fleet size[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 523 – 529.
- [117] SEYYEDHASANI H, DVORAK J S. Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a Dynamic Multiple Depot Vehicle Routing Problem representation[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 63 – 77.
- [118] GRACIA C, VELAZQUEZ-MARTI B, ESTORNELL J. An application of the vehicle routing problem to biomass transportation [J]. Biosystems Engineering, 2014, 124: 40 – 52.
- [119] EDWARDS G, SORENSEN C G, BOCHTIS D D, et al. Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tube Search method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 102 – 113.
- [120] 王伟, 张彦斐, 宫金良, 等. 基于自适应升温模拟退火算法的农业机器人全区域覆盖策略[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 126 – 132.
WANG Wei, ZHANG Yanfei, GONG Jinliang, et al. Whole area coverage strategy of agricultural robot based on adaptive heating simulated annealing algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 126 – 132. (in Chinese)
- [121] GUAN S, NAKAMURA M, SHIKANAI T, et al. A two-phase metaheuristic for farm work scheduling[C] // Proceedings of the 2009 2nd IFIP International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2009: 1999 – 2009.
- [122] GUAN S, NAKAMURA M, SHIKANAI T, et al. Resource assignment and scheduling based on a two-phase metaheuristic for cropping system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(2): 181 – 190.
- [123] 陈云飞. 基于强化学习的多机器人任务分配方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
CHEN Yunfei. Research on multi-robot task assignment method based on reinforcement learning [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [124] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34 – 39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhuan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 34 – 39. (in Chinese)
- [125] 李智, 姜兆亮, 刘文平. 基于 NSPSO 算法的混合装配线平衡问题多目标优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 248 – 252.
LI Zhi, JIANG Zhaoliang, LIU Wenping. Multi-objective optimization of mixed assembly lines balancing problem based on non-dominated sorting particle swarm optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 248 – 252. (in Chinese)
- [126] 王艳春, 尚晓丽, 李会. FCM – DAFSA 的无线传感器网络多目标跟踪节点任务分配方法[J]. 计算机工程与科学,

- 2014,36(7):1262–1267.
- WANG Yanchun, SHANG Xiaoli, LI Hui. FCM-DAFSA based multi-target tracking node task allocation method for wireless sensor network[J]. Computer Engineering & Science, 2014,36(7):1262–1267. (in Chinese)
- [127] ALAISO S, BACKMAN J, VISALA A. Ant colony optimization for scheduling of agricultural contracting work[J]. IFAC Proceedings Volumes,2013,46(18):133–137.
- [128] LI X, LIU Z Y, TAN F X. Multi-robot task allocation based on cloud ant colony algorithm[C]//Proceeding of the 2017 24th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP), 2017:14–18.
- [129] SETHANAN K, NEUNGATCHA W. Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field operations[J]. European Journal of Operational Research,2016,252(3):969–984.
- [130] 杨尚君,孙永维,庞宇. 基于改进鱼群算法的多无人机任务分配研究[J]. 计算机仿真,2015,32(1):69–72,102.
- YANG Shangjun, SUN Yongwei, PANG Yu. Research on multi-UAV cooperative task allocation based on improved fish swarm algorithm[J]. Computer Simulation, 2015,32(1):69–72,102. (in Chinese)
- [131] 马军岩,袁逸萍,任年鲁,等. 多区域协调调度架构下的农机服务资源优化配置方法[J]. 中国农业大学学报,2020,25(4):113–122.
- MA Junyan, YUAN Yiping, REN Nianlu, et al. Optimal allocation of agricultural machinery service resources under multi-regional coordinated scheduling architecture[J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(4):113–122. (in Chinese)
- [132] 王猛. 农机多机协同作业任务分配关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2021.
- WANG Meng. Research on key technologies on farm task allocation for multi-machine cooperative operation[J]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2021. (in Chinese)
- [133] 张奇松. 基于任务分配协作机制的多机器人协作机制研究[J]. 科技创新导报,2013(3):45–46.
- ZHANG Qisong. The research of multi-robot cooperation mechanism based on the task allocation collaboration mechanism [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(3):45–46. (in Chinese)
- [134] 张崙,刘淑华. 多机器人任务分配的研究与进展[J]. 智能系统学报,2008,3(2):115–120.
- ZHANG Yu, LIU Shuhua. Survey of multi-robot task allocation[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008,3(2):115–120. (in Chinese)
- [135] 王猛,赵博,刘阳春,等. 同种农机机群动态作业任务分配方法[J]. 农业工程学报,2021,37(9):199–210.
- WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):199–210. (in Chinese)
- [136] 宫金良,王伟,张彦斐,等. 基于动态刺激响应模型的异质农业 Agent 群任务分配策略[J]. 农业机械学报,2021,52(5):142–150.
- GONG Jinliang, WANG Wei, ZHANG Yanfei, et al. Task assignment strategy of heterogeneous agricultural Agent groups based on dynamic stimulus response model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(5):142–150. (in Chinese)
- [137] GAUTAM A, THAKUR A, DHANANIA G, et al. A distributed algorithm for balanced multi-robot task allocation[C]//Proceedings of the 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS),2016:622–627.
- [138] LI N, LI M, WANG Y, et al. Fault-tolerant and self-adaptive market-based coordination using hoplites framework for multi-robot patrolling tasks[C]//Proceedings of the 2018 IBEB International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), 2018:514–519.
- [139] TRIGUI S, KOUBAA A, CHEIKHROUHO O, et al. A distributed market-based algorithm for the multi-robot assignment problem[J]. Procedia Computer Science, 2014,32(12):1108–1114.
- [140] 赵辉,郝梦雅,王红君,等. 基于资源拍卖的农业多机器人任务分配[J]. 计算机应用与软件,2021,38(12):286–290,313.
- ZHAO Hui, HAO Mengya, WANG Hongjun, et al. Cooperative task allocation of agricultural multi-robot based on resource auction[J]. Computer Applications and Software, 2021,38(12):286–290,313. (in Chinese)
- [141] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G. The vehicle routing problem in field logistics: part I [J]. Biosystems Engineering,2009,104(4):447–457.
- [142] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G. The vehicle routing problem in field logistics: part II [J]. Biosystems Engineering,2010,105(2):180–188.
- [143] MAOUDJ A, BOUZOUIA B, HENTOUT A, et al. Multi-agent approach for task allocation and scheduling in cooperative heterogeneous multi-robot team: simulation results [C]//Proceedings of the 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2015:179–184.
- [144] 江楠,蔡增玉,张建伟. 基于粒子群神经网络的农机调度网络安全态势评价[J]. 农机化研究,2020,42(1):222–226.
- JIANG Nan, CAI Zengyu, ZHANG Jianwei. Safety situation assessment of agricultural machinery dispatching network based on POS neural network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(1):222–226. (in Chinese)
- [145] 刘雨,朱大奇. 基于生物启发自组织神经网络的任务分配与路径规划[J]. 系统仿真技术,2017,13(3):230–234,240.
- LIU Yu, ZHU Daqi. Task assignment and path planning of AUV system based on gladius bio-inspired self-organizing map neural network algorithm[J]. System Simulation Technology, 2017,13(3):230–234,240. (in Chinese)
- [146] 黎萍,杨宜民. 基于博弈论的多机器人系统任务分配算法[J]. 计算机应用研究,2013,30(2):392–395.
- LI Ping, YANG Yimin. Game theory based task allocation algorithm for multi-robot systems[J]. Application Research of Computers, 2013,30(2):392–395. (in Chinese)