

周康乾, 姜树海, 李 存. 农林业机器人轨迹规划研究进展[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9):1758-1767.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.09.020

## 农林业机器人轨迹规划研究进展

周康乾<sup>1,2</sup>, 姜树海<sup>1,2</sup>, 李 存<sup>1,2</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学智能控制与机器人技术研究所, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 农林业机器人凭借良好的灵活性、环境适应性被广泛应用于农林业现代化领域中。轨迹规划是农林业机器人完成作业任务的关键。本文介绍了基本轨迹规划和最优轨迹规划, 针对轨迹规划在农林业机器人中的应用, 本文从采摘机器人、移栽机器人、喷药机器人、农林业监测机器人等方面进行详细论述, 指出了农林业机器人轨迹规划研究中所存在的问题, 并展望了农林业机器人轨迹规划的未来发展趋势。

**关键词:** 农林业; 机器人; 轨迹规划

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)09-1758-10

## Research progress on trajectory planning of agroforestry robots

ZHOU Kangqian<sup>1,2</sup>, JIANG Shuhai<sup>1,2</sup>, LI Cun<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Institute of Intelligent Control and Robotics, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Agroforestry robots are widely applied in the field of agricultural and forestry modernization due to their good flexibility and environmental adaptability. Trajectory planning is crucial for agroforestry robots to complete the tasks. This paper introduced basic trajectory planning and optimal trajectory planning. Aiming at the application of trajectory planning in agroforestry robots, this paper discussed in detail from the aspects of picking robots, transplanting robots, spraying robots and agroforestry monitoring robots. The problems existing in the research of trajectory planning of agricultural and forestry robots were pointed out, and the future development trend of trajectory planning of agricultural and forestry robots was prospected.

**Key words:** agroforestry; robot; trajectory planning

自机器人诞生以来, 人们对机器人的研究从未停止, 机器人技术迅速发展, 不仅被用于传统的工业制造领域, 还被广泛地应用于医疗、生物、航天、教育、林业、农业等领域<sup>[1-3]</sup>。林业工作环境恶劣、工作强度大, 农业劳动力越来越匮乏, 且劳动力成本高, 大多数

发达国家通过发展农林业机器人来缓解社会压力。日本早在 20 世纪 70 年代后期就开始致力于对农林业机器人的研究, 如林木修剪机器人<sup>[4-5]</sup>、果蔬采摘机器人<sup>[6-7]</sup>。近 50 年来, 随着计算机与人工智能等技术的快速发展, 农林业机器人技术得到飞速发展。目前, 农林业机器人在采摘、种苗、移栽、喷药、森林消防、灾害防治等农林业领域中的应用均已被研究<sup>[8]</sup>。

轨迹规划是农林业机器人运动控制的重要环节之一, 其目的在于控制机器人的末端位姿。轨迹规划是否合理对机器人的工作效率、平稳性和能量消耗有着重大的影响, 也影响着农林业的经济效益<sup>[9-10]</sup>。

目前, 关于工业机器人轨迹规划和农林业机器人

收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 国家公益性行业科研专项(201404402-03); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX23\_1140)

作者简介: 周康乾(1996-), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为机器人控制与机器人路径规划。(E-mail) 15261862617@163.com

通讯作者: 姜树海, (E-mail) shuhaijiang@njfu.edu.cn

发展现状的研究综述较多,而针对农林业机器人轨迹规划的研究综述相对较少。本文对近年来轨迹规划在各种农林业机器人中的应用研究进行综述,可为后续的研究提供参考。本文主要包括3个部分,第一部分简单介绍基于规划空间和基于轨迹优化目标的轨迹规划方法分类;第二部分围绕轨迹规划方法在各种农林业机器人中的应用进行详细综述;第三部分针对农林业机器人轨迹规划过程中存在的问题进行讨论与分析,并展望机器人轨迹规划的未来发展趋势。

## 1 轨迹规划概述

机器人轨迹规划是指在考虑机器人的性能、工

作环境和任务要求的基础上,规划机器人关节或末端执行器的运动轨迹<sup>[11]</sup>,并准确描述其在任意给定时刻的姿态和位置信息<sup>[12-13]</sup>。

轨迹规划基于不同的规划空间(笛卡尔空间和关节空间)进行<sup>[14]</sup>。笛卡尔空间轨迹规划在机器人的工作空间坐标系中进行,规划对象是机器人末端执行器的运动变量,如位移、速度、加速度等<sup>[15]</sup>。关节空间轨迹规划在机器人的关节空间中进行,规划对象是机器人关节运动参数,如角度、速度、加速度及关节角度<sup>[16]</sup>。笛卡尔空间与关节空间轨迹规划的特点如表1所示。

表1 笛卡尔空间与关节空间轨迹规划的特点

Table 1 Characteristics of trajectory planning in Cartesian space and joint space

规划空间	优点	缺点	适用场合
笛卡尔空间	结果直观 <sup>[17]</sup> ,末端轨迹精度高 <sup>[18]</sup>	计算复杂,可能存在奇异点 <sup>[19]</sup>	对机器人末端运动轨迹有特殊要求且精度要求较高的场景,如水果采摘机器人 <sup>[20]</sup>
关节空间	计算简单 <sup>[21]</sup> ,不会发生奇异现象 <sup>[22]</sup>	机器人末端执行器会存在误差,所得轨迹不够直观 <sup>[23]</sup>	对机器人关节运动精度要求高,且对末端运动轨迹无特殊要求的场景,如木材码垛机器人 <sup>[24]</sup>

根据轨迹规划是否采用最优算法可分为基本轨迹规划和最优轨迹规划<sup>[25]</sup>。

基本轨迹规划通常包括直线、圆弧、多项式插值、Bezier曲线、B样条曲线等方式。直线和圆弧轨迹规划是轨迹规划中常见的元素,通过它们可以实现由简单到复杂的运动路径规划,从而满足不同任务的运动需求<sup>[26]</sup>。多项式轨迹规划常使用三次、五次和多段组合多项式插值法,简单并且容易实现,但使用高阶(如四次及以上)多项式插值法进行轨迹规划时容易

出现龙格现象<sup>[27]</sup>。使用Bezier曲线进行轨迹规划时,Bezier曲线的阶数越高,可描述的路径形状越复杂,但同时也增加了曲线的计算复杂度和控制点的数量。B样条曲线包括均匀B样条曲线和非均匀B样条曲线,B样条曲线构造简单,但起始点和终止点存在突变问题。其中,非均匀B样条曲线中的非均匀有理B样条曲线(NURBS)因其强大的灵活性和高精度被广泛应用。NURBS曲线在拟合复杂曲线方面表现得更出色。基本轨迹规划性能特点比较如表2所示。

表2 基本轨迹规划特点比较

Table 2 Comparison of basic trajectory planning characteristics

基本轨迹规划	优点	缺点	适用场合
直线和圆弧	方法简单直观,计算量小	后期灵活性较低	简单的基本运动 <sup>[28-29]</sup> ,如沿直线或曲线路径移动
三次多项式插值	计算简单,容易实现	未保证加速度、加加速度连续,加速度曲线也不一定是连续的 <sup>[30]</sup>	点到点的简单运动
五次多项式插值	引入加速度约束,确保了加速度连续性,轨迹连续平滑 <sup>[31]</sup>	计算量较大	点到点的高速、高性能运动
多段组合多项式插值	易于实现,灵活性强,可以拟合复杂的路径	连接处可能不平滑	多点连续运动
低阶Bezier曲线	计算简单,轨迹直观	缺乏灵活性,平滑性不足	简单的直线、线段或弧线运动
高阶Bezier曲线	灵活性较高,曲线平滑性较好	复杂性增加	沿复杂曲线路径移动的运动,特别适用于需要精细控制的场合
B样条曲线	导数连续性、局部支撑性和几何不变性较好 <sup>[32]</sup>	计算量大	对机器人进行高精度的轨迹规划,特别适用于经过多个路径点的复杂轨迹规划 <sup>[33]</sup>

在机器人的实际应用中,不仅需要综合考虑任务要求和运动效果,还要关注机器人的能耗、工作效率和平稳性等多方面因素<sup>[34]</sup>。国内外学者针对时间、能量、冲击对最优轨迹规划展开了研究。最优轨迹规划分类如图 1 所示。

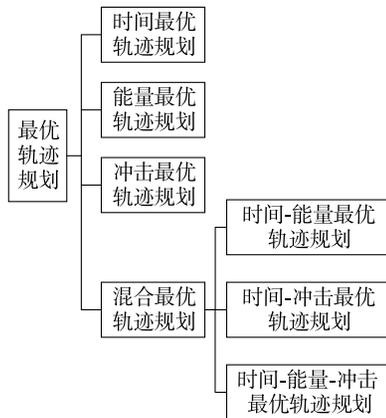


图 1 最优轨迹规划分类

Fig.1 Classification of optimal trajectory planning

时间最优轨迹规划以时间最短作为轨迹优化目标,旨在寻找最短的路径或完成相同路径所用时间最短的轨迹。时间最优轨迹规划可以在受到运动约束的条件下,寻找最大速度或最大加速度,缩短时间,也可以利用优化算法,如粒子群算法<sup>[35]</sup>、遗传算法<sup>[36]</sup>进行全局搜索。此外,也可以将时间最优轨迹规划转化为更易处理的模型,如使用动态规划等寻找最优解,实现时间最短目标。时间最优轨迹规划适用于自动驾驶中尽快到达目的地的场景<sup>[37]</sup>。能量最优轨迹规划以最少能量作为轨迹优化目标,旨在尽可能减少机器人或系统在执行任务时的能量损耗。能量最优轨迹规划通过考虑机器人动力学和关节特性,寻找最平滑的轨迹以减少关节运动的能耗;也可以对整个动力系统进行优化,实现整体能量最优化,在无人机飞行或移动机器人等领域非常重要<sup>[38-39]</sup>。冲击最优轨迹规划以最小冲击作为轨迹优化目标,旨在使机器人在运动过程中受到的冲击力或损失最小化,避免共振、使用寿命缩减等问题,确保机器人能够平稳运行<sup>[40]</sup>。混合最优轨迹规划是在综合考虑多个因素(如时间、能量、冲击等)的条件下,对轨迹进行全面优化。通常将多目标优化问题转化为单目标优化问题,通过引入权重系数,可以对不同目标的重要性进行调整,从而在单一目标函数的框架下进行综合优化<sup>[41]</sup>。最优轨迹规划方法

取决于具体的应用场景和需要解决的问题,需根据不同的优化目标与约束条件进行选择。

## 2 农林机器人轨迹规划

纵观农林业机器人的发展历史,学者们关注植物的各个部分(如根、茎、叶和果实),并研究机器人在植物不同生育期的作业应用<sup>[42]</sup>。根据农林业机器人的应用领域可将其划分为采摘机器人、移栽机器人、喷药机器人、农林业监测机器人等<sup>[43-44]</sup>,常见的农林业机器人如图 2 所示。下面主要介绍轨迹规划在各种农林业机器人中的应用。

### 2.1 采摘机器人轨迹规划

采摘机器人轨迹规划近年来在农业领域得到广泛应用,其主要目的是实现作物的自动化采摘。

为了在任务空间中有效进行棉花收获机械臂的平滑姿态规划,Wang 等<sup>[45]</sup>采用四元数描述机械手的姿态,使用四元数三维球面插值方法对关键方向进行插值,实现三维旋转方向的平滑性和角速度的连续性,然后基于五次 B 样条的插值法得到具有稳定的启动和停止运动以及连续加加速度的平滑关节轨迹。结果表明,所提出的轨迹规划方法为机械手提供了平滑的方向调整和稳定的关节运动,有效解决了棉花收获机械手的方向规划问题。

由于番茄生长环境相对于工业环境的复杂性,Wang 等<sup>[46]</sup>提出一种基于遗传算法(GA)的自适应末端执行器姿态控制方法,利用五次插值多项式对番茄收割机器人的末端执行器进行规划轨迹,所用方法可使末端执行器平稳运行,避免因速度过快而对番茄造成损害,末端执行器不与番茄发生碰撞,番茄抓取成功。

有学者为解决柑橘采摘机器人机械臂采摘效率较低、易发生晃动产生机械磨损等问题进行了轨迹规划研究。Xu 等<sup>[47]</sup>在关节空间采用五次多项式插值法对柑橘采摘机械臂进行轨迹规划,柑橘采摘机械手关节角位移、角速度和角加速度变化平滑,能够准确、快速地到达目标,末端执行器运行平稳,避免了惯性力的突然变化。经过多次试验,Tang 等<sup>[48]</sup>通过改进基本免疫算法(BIA)的邻域结构,并利用禁忌搜索策略对当前最优解的邻域结构进行密集搜索,利用改进免疫算法(IIA)对采摘柑橘类水果的机械臂进行路径规划。结果表明,采摘 6 个、20 个、31



图 2 常见的农林业机器人

Fig.2 Common agroforestry robots

个柑橘类水果时, IIA 的平均规划时间分别比 BIA 短 13.33%、21.49% 和 23.96%, 平均采摘距离分别比 BIA 短 0、0.66% 和 0.67%, 该方法可以实现在树冠表面空间采摘柑橘时快速规划末端执行器的采摘路径, 可有效缩短轨迹规划的时间, 解决机械臂采摘柑橘效率低下的问题。

有学者为解决农业机器人受环境限制问题, 以及农业机器人对运动参数的限制要求高的问题, 进行了大量研究。范子彦等<sup>[49]</sup>采用五次多项式插值曲线对推搡式油果果采摘机械臂在关节空间进行轨迹规划, 并采用改进的灰狼算法对机械臂运动轨迹进行优化, 实现时间最短的目标。将改进灰狼算法优化试验与不同算法进行对比, 改进的灰狼算法表现出更好的稳定性和收敛性, 轨迹连续、平滑, 速度、加速度没有突变, 提高了运动的平稳性。针对油茶花粉采摘机械臂运行不稳定的问题, 李骏等<sup>[50]</sup>使用 5-5-5 多项式插值算法对机械臂进行轨迹规划, 并采用改进粒子群算法对其运动轨迹进行优化, 实现机械臂运行时间最优。将该方法与传统遗传算法、粒子群算法进行对比, 发现该方法使得油茶花粉采摘机械臂运行过程中的振动和冲击更小, 运动轨迹平滑、连续。

为实现名优茶的精准采摘, 杨化林等<sup>[51]</sup>基于时间与急动度最优对并联式采茶机器人进行轨迹规划, 利用适用于采茶特殊性的粒子群优化算法, 寻找调和急动模型中最优的时间间隔参数。结果表明, 该方法能够缩短采摘茶叶的时间, 保持轨迹的平滑度, 提高采摘效率。

为解决双滚筒式红花采摘机器人运行过程中路径的自动规划问题, Zhang 等<sup>[52]</sup>提出了一种改进的蚁群算法 (ACA), 用来规划红花采摘点的三维路径。以最短时间和最短距离作为路径规划的总体目

标, 对拾取路径进行二次优化, 缩短拾取路径的长度和拾取时间。仿真结果表明, 与传统蚁群算法相比, 改进后的 ACA 规划的路径总长度缩短了 74.32%, 拾取时间缩短了 0.957 s, 提高了双滚筒式红花采摘机器人的采摘效率。

为解决机械手机械结构的局限性等非线性因素导致机械手在跟踪采摘路径时时间长、颠簸大、能耗高等问题, Li 等<sup>[53]</sup>将轨迹规划问题转化为多目标优化求解问题, 采用非支配排序遗传算法-第三版 (NSGA-III) 技术解决多目标优化约束问题。基于 NSGA-III 技术, 采用三次样条算法成功将机械臂终端位置的均方根误差控制在 0.006 m 以内, 即该位置的均方根误差小于 3%。综合考虑时间、能耗和冲击 3 个因素, 所提融合方案能够使采摘机械手更快、更顺畅地跟踪采摘路径, 能够缩短时间, 提高猕猴采摘效率。

采摘机器人的轨迹规划可以控制机器人或机械臂的运动轨迹, 保持稳定性, 优化采摘速度和效率, 减少能量消耗和磨损, 综合考虑环境、植物生长以及机器人自身特性, 实现高效、精准采摘。

## 2.2 移栽机器人轨迹规划

移栽机器人用于农田或园艺场地中的种植作业, 其轨迹规划的主要目的是实现高效、精准地种植作物, 提高作业效率, 减少人力成本。

2008 年, 针对不同输送和抓取植株的工作过程, Yang 等<sup>[54]</sup>采用关节空间五次多项式和笛卡尔坐标空间直线法对五自由度组培植株移栽机器人进行轨迹规划, 对机器人的运动轨迹进行了仿真, 仿真结果表明, 机器人轨迹曲线平滑连续, 运动平稳。实际测试结果表明, 机器人基本可以按照轨迹规划运行, 平均翘曲小于 0.5 mm。机器人可以从培养瓶中快速取出小植株, 实现精准运苗。

2013 年, Ma 等<sup>[55]</sup>研制了以二自由度并联机构为移栽机构, 以气动机械手为末端执行器的高速托盘式秧苗移栽机器人。根据秧苗的特点和从高密度盘到低密度盘的路径, 提出了“升、平、降”3 级移栽路径。选用五次多项式插值法对移栽机器人进行轨迹规划, 根据移栽路径和运动函数的规划, 在研制的样机上进行移栽试验, 移栽合格率可达 92.71%, 1 min 可移植 60 株以上。在此基础上, 为了提高温室插秧的自动化程度和效率, 2014 年 Hu 等<sup>[56]</sup>提出了一种全局综合性能指标, 以保证整个工作空间的良好动态性能。同样采用五次多项式插值法对移栽机器人机械手进行轨迹规划, 机械手可以在一定的移栽路径下获得更短的移栽周期。以从 128 孔托盘移栽到 50 孔托盘为例, 最大工作空间的移栽周期为 1.08 s, 单机械手的移栽能力可达 1 min 55 株, 验证了轨迹规划的合理性, 满足高速移栽需求。2017 年, Hu 等<sup>[57]</sup>采用 Delta 并联机构配合气动机械手设计了高速钵苗移栽机器人, 根据插秧平移机器人的运动需求, 采用五次多项式插值法对运动平台进行轨迹规划。研究结果表明, 钵苗移栽成功率高达 95.5%, 插秧移栽成功率高达 92.0%, 证明了采用五次多项式插值法对 Delta 平行机构进行轨迹规划的实用性和合理性。

2016 年, Quan 等<sup>[58]</sup>提出了一种利用物流搬运机器人进行窄空间育苗盘搬运的方法, 利用三次样条插值拟合机械手关节变量的时变函数曲线, 规划了满足垂直栽培特性的滑动处理最优轨迹, 节省植物工厂成本。

2023 年, Wang 等<sup>[59]</sup>以植树机器人 (TPR) 为分析对象, 讨论了直角坐标系和联合坐标系下 TPR 的轨迹规划策略, 并利用该策略进行抛物线过渡线性规划优化。数值模拟结果表明, TPR 轨迹与预期值的偏差明显减小。

移栽机器人的轨迹规划可以精准定位植物的种植位置, 规划最佳的种植路径, 提高种植效率, 使运动轨迹平滑、连续, 并减少对植物的伤害。

### 2.3 喷药机器人轨迹规划

喷药机器人是农业领域中常见的自动化设备, 喷药机器人轨迹规划的主要目的是实现高效、精准地喷洒农药或其他化学物质, 以保护农作物免受病虫害侵害。

基于西部地区作物种植的安排和单次小面积种

植的特点, Ma 等<sup>[60]</sup>提出应用小型农业植保机器人实现农药喷洒工作, 研究了西部干旱地区植保机器人的工作轨迹规划方法。根据农作物种植的布置形式确定机器人的运动路径, 利用蚁群算法求解最优喷洒路径, 简化喷雾机器人的工作路径。

为解决路径搜索的盲目性和收敛速度慢等问题, 庄丽阳等<sup>[61]</sup>提出一种改进蚁群算法搜索农用喷药移动机器人的最优路径。仿真试验结果表明, 喷药机器人可以在不同的障碍模型下搜索到最短的避障路径, 缩短喷药移动机器人的作业时间。

为解决多机器人路径规划的问题, Lal 等<sup>[62]</sup>研究了自动生成时间最优轨迹的问题, 提出了基于多旅行推销员的时间最优轨迹生成和基于聚类的分解时间最优轨迹生成, 以便使用 1 组四旋翼机器人向农田中不同感染程度的疫区喷洒杀虫剂。第一种方法提供了最优策略, 第二种方法提供了次优策略, 第二种方法在计算上效率更高, 最优性损失最小, 在计算复杂度和最优性约束之间提供了更好的权衡。

为实现在葡萄园中对植物保护产品进行精确的空中喷洒, Becce 等<sup>[63]</sup>提出了旅行推销员问题求解器与 Theta 算法的组合, 研究最佳的多旋翼无人机系统轨迹, 旨在节省无人机在葡萄园中喷洒植物保护产品的成本和时间。

为了提高果园喷雾机器人的自主安全性和效率, 2022 年, Liu 等<sup>[64]</sup>提出了一种改进的双向快速扩展随机树优化 (RRT\*) 算法搜索路径, 采用了三次准均匀 B 样条曲线对果园喷雾机器人进行轨迹优化, 优化过程中主要考虑喷雾机器人的碰撞检测和曲率约束。结果表明, 经三次准均匀 B 样条曲线优化后所得轨迹满足喷雾机器人在有障碍物和无障碍环境下的最大曲率约束, 仅在换行以及障碍物处存在转弯行为, 符合喷雾机器人作业轨迹条件。为进一步解决果园喷雾机器人在运动过程中的不平稳等问题, 2023 年, 沈跃等<sup>[65]</sup>提出基于最小转弯半径等多约束条件, 采用三次非均匀 B 样条曲线对喷雾机器人的运动轨迹进行规划, 明显减小了轨迹曲率, 实现全局路径优化。

为解决番茄果园移动喷药机器人作业时存在效率低、运动不平滑和不安全性等问题, 高兴旺等<sup>[66]</sup>提出了一种优化 A\* 算法的融合动态窗口算法 (DWA), 可以使喷药机器人躲避路径上突现的障碍物, 通过三次 B 样条曲线对喷药机器人进行路径规划, 确保其平

滑性。仿真结果表明,优化后的算法规划的路径更加平滑、安全,可以满足喷药机器人在复杂作业环境中的需求。

喷药机器人的轨迹规划是通过智能算法或运动学约束规划最优的喷洒轨迹,以最大程度地覆盖农作物,并减少重复喷洒,有助于提高农业喷洒作业的效率、精准度,减少对人力的依赖。

#### 2.4 农林业监测机器人轨迹规划

农林业监测机器人轨迹规划的目的是高效、全面地监测农田或林区作物的生长状况和健康状况等,及时发现问题,并进行调整和管理。

丘华兰等<sup>[67]</sup>在基于栅格法的工作空间模型上,采用蚁群算法对森林火源探测机器人进行局部路径规划,该方法可以实现机器人的最优轨迹规划,节省机器人的运动时间。该机器人具有良好的避障功能,尤其适合结合户外复杂森林环境进行路径规划。

为了提高电动多旋翼无人机的飞行续航能力,并在给定有限电池电量的情况下,使每次无人机飞行覆盖的农田面积最大化,Pradeep 等<sup>[68]</sup>提出以场区覆盖最大化和能量最小化为 2 个独立的性能指标,对无人机进行轨迹优化。采用数值方法求解固定时间多相最优控制问题。为了在固定持续飞行期间将能量消耗降到最低,无人机需要以 12.089 m/s 的速度巡航。Munoz 等<sup>[69]</sup>通过监测大规模作物自主无人机的最佳路径规划来增加遥感自主性,最大限度地减少作物监测任务中的无人机电池消耗。

为了解决在大规模无线传感网络(WSN)中采用多架无人机进行数据采集时电池寿命有限和管理复杂性的问题,Betalo 等<sup>[70]</sup>通过选择汇聚节点和规划所有无人机的飞行轨迹,提出了无人机-WSN 系统整体能耗最小化问题。利用遗传算法(GA)确定 WSN 中连接到不同微小节点的汇聚节点的数量,基于多代理深度强化学习(MADRL)的方法提供了马尔可夫决策策略来构建所有轨迹路径,实现无人机以最短的轨迹和最少的能源成本收集数据。

针对传统驱鸟方法应用效率较低,以及鸟类对水果的损害较大等问题,Mesquita 等<sup>[71]</sup>提出了一种基于粒子群优化(PSO)的驱赶鸟类无人机路径规划优化算法,该路径规划优化算法旨在管理无人机的飞行距离和飞行时间,所获得的路径规划的总距离平均误差显著降低,执行时间短,适用于无人机驱赶鸟类。

由于地形复杂、障碍物众多以及外部环境的影响,传统的启发式算法可能会遇到飞行路径重叠和局部最优等问题,Peng 等<sup>[72]</sup>提出一种基于遗传算法和模拟退火算法(GA-SA)规划农用无人机三维飞行路径的方法,可以提高搜索效率。研究表明,GA-SA 克服了传统 SA 在节点搜索效率和轨迹平滑方面的局限性,能够在三维环境中规划出真实、最优的飞行路径。GA-SA 的收敛时间减少,并缩短了最优轨迹距离,成功应用于农用无人机的巡检轨迹规划。

为了使机器人能够尽快移动到火灾现场,Panahi 等<sup>[73]</sup>提出了一种使用无线传感器和参与者网络的森林火灾探测和扑灭机制,并提出一种机器人路由机制,每个配备车载处理的消防机器人都使用模糊 Q-学习(FQL)的轨迹机制,可在最短的时间内学习到达火灾区的最短路径。与传统的 Q 学习相比,当使用基于 FQL 的策略时,到火点的总接近率更高。

对农林业监测机器人进行轨迹规划可以实现机器人运动覆盖整个农田或林区,确保全面监测植被、土壤等,利用强化学习或智能算法优化轨迹,减少重复检测,提高农林业的智能化水平,提供及时、精准的数据支持。

#### 2.5 其他农林业机器人轨迹规划

除了采摘、移栽、喷药和监测等领域,农林业机器人的轨迹规划还被广泛应用于其他领域,如林地作业、林业攀爬等。

为了获得最小的移动时间,从而节省能量,提高爬树效率,Yao 等<sup>[74]</sup>采用 3-5-3 型多项式插值函数对爬树机器人进行运动轨迹规划,该算法使得类尺蠖的攀爬机器人的加速度变化更平稳。为了使机器人爬越树枝所需的爬越时间最小化,建立了一个具有爬越速度约束的最小时间优化模型,采用量子行为粒子群优化(QPSO)算法进行优化求解,得到最优的插补时间。通过仿真验证了所建立的轨迹规划,并将运用 QPSO 算法得到的最优结果与运用粒子群优化和遗传算法得到的最优解进行了对比,QPSO 算法实现了时间最优和平滑的轨迹。针对林业攀爬机器人,Zhou 等<sup>[75]</sup>提出了一种同时考虑运动学约束和动力学约束的能量最优运动规划方法,为了降低计算复杂度,设计了一种基于空间连续曲线的加速度连续轨迹规划器和路径规划器,结果表

明,该方法能够有效搜索能量最优路径。

针对林木联合采育机运用 RRT 算法计算时间长的问题,杨英浩等<sup>[76]</sup>在改进人工势场思想的基础上,提出利用 A-RRT 算法进行路径搜索,并且采用 B 样条曲线对机械臂运动轨迹进行优化,实现能量最小化,机械臂关节角度变化连续,运动平稳。

为缩短田间农业机器人在自主导航中路径节点位置定义和配置的时间,Chien 等<sup>[77]</sup>提出一种基于三次样条插值的路径规划方法,通过在直线路径和转弯路径之间插值起点、控制点和地标点的路径,合并折线段的完整路径。该方法可以减少路径节点位置定义的数量,并保持农业机器人转向控制的稳定性,使机器人能够平稳移动。

Feng 等<sup>[78]</sup>提出了一种基于免疫算法、蚁群算法和三次 B 样条插值算法的农业机器人路径规划融合方法,该方法结合了 3 种算法的优点,明显提高了路径规划的灵活性和多样性,在进行路径规划时,该算法运行时间相对较小,与其他算法相比,最小时间消耗减少 38%,最大时间消耗减少 54%。轨迹进行了平滑处理,路径拐点明显减少,降低了机器人行走的能量消耗,提高了鲁棒性。

为提高木结构加工效率,Gao 等<sup>[79]</sup>开发了一种适用于胶合层积木装卸的码垛机器人,采用高阶五次、六次多项式曲线插值方法,对木结构构件在停留和不停留 2 种条件下进行装卸作业过程中的轨迹进行规划,该方法可以保证轨迹的跟踪精度。同时,该方法还可以提供连续稳定的运动,并且不会受到冲击、振动或其他不利条件的影响。

针对林地作业车工作效率低的问题,庄徐等<sup>[80]</sup>采用 3-5-3 分段多项式插值对车辆轨迹进行规划,并且采用改进粒子群算法优化轨迹运行时间,改进后算法的收敛速度更快,各关节的速度和加速度曲线得到了优化,运行时间缩短了 13%,提高了工作效率。

针对农业信息采集机器人路径规划效果不佳等问题,Wu 等<sup>[81]</sup>提出了一种融合蚁群算法(ACA)和粒子群优化算法(PSO)的路径规划算法。首先利用模拟退火算法进一步优化全局路径规划,然后利用 PSO 在寻找最优路径方面的全局搜索能力和 ACA 在避障方面的局部搜索优势,优化了机器人在农业环境中的运动路径。结果表明,该方法缩短了全局路径规划的距离和时间,缩短了混合路径规划的时

间,提高了机器人的避障能力,同时提高了农业信息采集机器人的作业效率。

针对农田农产品搬运机器人移动轨道与工作轨道相对独立且耗时长等问题,Guo 等<sup>[82]</sup>提出了一种针对所设计的物料搬运机器人协同工作的时间最优轨迹规划方法,该方法能够获得机器人的时间最优轨迹。仿真结果表明,所提方法能够使机器人在农产品搬运过程中获得平滑且时间最优的运动轨迹。

农林业机器人轨迹规划的主要考虑因素有机器人精确的位置控制、最优轨迹规划、自主性和智能化以及作业对象的质量保证。各种农林业机器人都有独特的任务和特点,其轨迹规划需要根据具体任务需求和环境特点进行设计,以实现高效、精准的作业。

### 3 结论与展望

经过多年的发展,目前国内外对农林业机器人轨迹规划方法的应用已经比较成熟。轨迹规划为农林作业机器人设计合理的移动路径和轨迹,以实现高效、精准的作业,轨迹规划成为农林业机器人研究中最重要领域之一。虽然对农林业机器人轨迹规划的研究取得了许多成果,但仍存在一些问题,尚待进一步深入探究。

(1)人工智能的应用。随着人工智能技术的不断发展,农林业机器人轨迹规划将更加智能化。通过引入机器学习和深度学习算法,农林业机器人可以从地形数据、植被数据、天气数据和传感器数据等大量数据中学习,优化作业路径,提高作业效率和精确度。

(2)不同环境多目标优化的应用。目前,农林业机器人因其特殊复杂的工作环境,主要是单目标的最优轨迹规划侧重于时间或能量的优化,但农林业机器人在实际作业时还需要考虑成本、作业质量、安全性等因素。未来的发展应该朝着扩大多目标函数应用范围的方向迈进,在时间、能量、成本、作业质量和安全性等目标之间进行权衡,以找到最优平衡点,实现更为全面的优化。

(3)多机器人协同作业的应用。随着农业和林业生产规模的扩大,单一机器人往往不能满足作业需求,未来农林业机器人轨迹规划将涉及多机器人之间的协同作业问题。通过对多机器人的轨迹规划和分配,可以提高作业效率和生产能力。

(4) 避障轨迹规划的应用。未来农林业机器人避障轨迹规划将侧重于感知技术的提升,如激光雷达等传感器的应用。结合人工势场、蚁群、粒子群等智能算法和实时路径规划实现对障碍物的精确识别,以应对复杂的农林业作业环境中的挑战。

(5) 农机与农艺相结合的应用。随着现代农业的发展,农机与农艺的结合已成为提高农业生产效率和质量的重要手段。通过机器人轨迹规划与农艺的结合,农林业机器人可以选择最佳的作业路径和方式,实现智能施肥与喷洒、播种与收割,并优化作物生长环境,提高农业生产效率和可持续性。

总之,农林业机器人轨迹规划的未来发展方向包括人工智能、不同环境多目标优化、多机器人协同作业、避障轨迹规划、农机与农艺相结合的应用。这些发展方向将为农林生产提供更高效和精确的解决方案,并推动农林业向智能化和数字化方向迈进。

#### 参考文献:

- [1] 谭民,王 硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,39(7):963-972.
- [2] STEPHAN K D, MICHAEL K, MICHAEL M G, et al. Social implications of technology: the past, the present, and the future [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100: 1752-1781.
- [3] HUANG Y A, XIONG C H, XIONG Y L. Research status and development trends of intelligent robot and application [J]. International Academic Developments, 2009(4):38-39.
- [4] CHONNAPARAMUTT W, KAWASAKI H, UEKI S, et al. Development of a timberjack-like pruning robot: climbing experiment and fuzzy velocity control [C]//IEEE. 2009 ICCAS-SICE. Fukuoka: IEEE, 2009: 1195-1199.
- [5] UEKI S, KAWASAKI H, ISHIGURE Y, et al. Development and experimental study of a novel pruning robot [J]. Artificial Life and Robotics, 2011, 16(1):86-89.
- [6] MONTA M, KONDO N, TING K C. End-effectors for tomato harvesting robot [J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1):11-25.
- [7] TANIGAKI K, FUJIURA T, AKASE A, et al. Cherry-harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1):65-72.
- [8] 徐海燕,姜树海. 森林作业机器人研究动态 [J]. 世界林业研究, 2017, 30(2):51-55.
- [9] CUI L L, WANG H S, CHEN W D. Trajectory planning of a spatial flexible manipulator for vibration suppression [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 123: 103316.
- [10] TANG L W, TANG X Q, JIANG X L, et al. Dynamic trajectory planning study of planar two-dof redundantly actuated cable-suspended parallel robots [J]. Mechatronics, 2015, 30: 187-197.
- [11] 李 尉,邓朝晖,葛吉民,等. 机器人关节空间轨迹规划研究进展 [J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(10):15-23.
- [12] 李 黎,尚俊云,冯艳丽,等. 关节型工业机器人轨迹规划研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(5):36-50.
- [13] 梁子龙,丁毓峰. 一种自由曲面抛光机器人轨迹规划方法 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(10):1489-1495.
- [14] HOFFMANN W, SAUER T. A spline optimization problem from robotics [J]. Rediconti di Matematica, 2006, 26: 221-230.
- [15] 董 理,杨 东,鹿建森. 工业机器人轨迹规划方法综述 [J]. 控制工程, 2022, 29(12):2365-2374.
- [16] PAYANDEH S, GOLDENBERG A A. Formulation of the kinematic model of a general (6 DOF) robot manipulator using a screw operator [J]. Journal of Robotic Systems, 1987, 4(6):771-797.
- [17] ZHU D C, HE Y L, YU X Z, et al. Trajectory smoothing planning of delta parallel robot combining cartesian and joint space [J]. Mathematics, 2023, 11(21):4509.
- [18] VALERO F, MATA V, BESA A. Trajectory planning in workspaces with obstacles taking into account the dynamic robot behaviour [J]. Mechanism & Machine Theory, 2006, 41(5):525-536.
- [19] 张 鹏,龚 俊,曾 勇,等. 面向大曲率曲面的喷涂机器人喷枪轨迹规划研究 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34(11):1670-1674.
- [20] XIONG Z C, FENG Q C, LI T, et al. Dual-manipulator optimal design for apple robotic harvesting [J]. Agronomy, 2022, 12(12):3128.
- [21] GARRIDO J, YU W, LI X O. Robot trajectory generation using modified hidden Markov model and Lloyd's algorithm in joint space [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 53:32-40.
- [22] LUO L, GUO T B, CUI K K, et al. Trajectory planning in robot joint space based on improved quantum particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Sciences, 2023, 13(12):7031.
- [23] 温贻芳,孙立宁,徐 朋. 表面改性冗余机器人关节空间的轨迹优化算法 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(12):1870-1874.
- [24] 张 玲. 基于三次样条曲线的码垛机器人平滑轨迹规划方法 [J]. 高技术通讯, 2018, 28(1):78-82.
- [25] 牛启臣,张 弓,张功学,等. 多机器人轨迹规划研究综述及发展趋势 [J]. 机床与液压, 2021, 49(12):184-189.
- [26] 李珺茹,齐立群,韩文波. 六自由度机械臂运动学分析与轨迹优化 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1):68-73.
- [27] HU X P, PENG T, ZUO F Y. A trajectory planning method based on newton interpolation and polynomial for manipulator [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(24):2946-2949.
- [28] 吴镇炜,谈大龙. 机械手空间圆弧运动的一种有效轨迹规划方法 [J]. 机器人, 1999(1):9-12, 46.
- [29] WANG H, WANG H, HUANG J H, et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve [J]. Mechanism and Ma-

- chine Theory, 2019, 139: 284-293.
- [30] 赵相博, 潘松峰, 赵加龙. 搬运机器人关节空间轨迹规划研究[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(11): 86-90.
- [31] 孙 玥, 魏 欣. 基于五次多项式的码垛机器人轨迹规划[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 159-163.
- [32] 王晓明, 宋 吉, 郑继新, 等. 改进 B 样条曲线的机器人轨迹拟合研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(2): 41-43.
- [33] 龙 樟, 李显涛, 帅 涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(6): 853-862.
- [34] HUANG J S, HU P F, WU K Y, et al. Optimal time-jerk trajectory planning for industrial robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121: 530-544.
- [35] LIU C, CAO G H, QU Y Y, et al. An improved PSO algorithm for time-optimal trajectory planning of Delta robot in intelligent packaging[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3): 1091-1099.
- [36] LIU Y, GUO C, WENG Y P. Online time-optimal trajectory planning for robotic manipulators using adaptive elite genetic algorithm with singularity avoidance [J]. IEEE Access, 2019, 7: 146301-146308.
- [37] 葛 超, 张嘉滨, 王 蕾, 等. 基于模型预测控制的自动驾驶车辆轨迹规划[J]. 计算机应用, 2024, 44(6): 1959-1964.
- [38] CHEN J, SHI Z W, GENG X, et al. Optimal trajectory planning of a small UAV using solar energy and wind energy[J]. AIP Advances, 2023, 13(5): 055134.
- [39] 高志伟, 代学武, 郑志达. 基于运动控制和频域分析的移动机器人能耗最优轨迹规划[J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 934-945.
- [40] GASPARETTO A, LANZUTTI A, VIDONI R, et al. Experimental validation and comparative analysis of optimal time-jerk algorithms for trajectory planning[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(2): 164-181.
- [41] CHETTIBI T, LEHTIHET H E, HADDAD M, et al. Minimum cost trajectory planning for industrial robots [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2004, 23(4): 703-715.
- [42] 姜树海. 林业机器人的发展现状[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(12): 95-97.
- [43] 白 杉, 周 洁. 农林业机器人[J]. 现代化农业, 2002(10): 35-37.
- [44] 白 杉, 周 洁. 农林业机器人(续)[J]. 现代化农业, 2002(11): 37-39.
- [45] WANG M L, LI X X, XU K Y, et al. Smooth trajectory planning for manipulator of cotton harvesting machinery based on quaternion and B-spline [C]//IEEE. 2012 International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation. Sanya: IEEE, 2012: 134-137.
- [46] WANG D, DONG Y X, LIAN J, et al. Adaptive end-effector pose control for tomato harvesting robots[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(3): 535-551.
- [47] XU L J, LIANG Y, KANG Z L. Kinematic analysis and trajectory planning simulation of citrus picking manipulator[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1637(1): 012111.
- [48] TANG Z L, XU L J, XIE H. Picking trajectory planning of citrus based on improved immune algorithm and binocular vision [C]//IEEE. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications. Dalian: IEEE, 2020: 6-10.
- [49] 范子彦, 李立君, 李宇航, 等. 基于改进灰狼算法的油茶果采摘机械臂轨迹规划[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(1): 195-201.
- [50] 李 骏, 赵 青, 李立君, 等. 基于改进粒子群算法的油茶花粉采摘机械臂轨迹规划[J]. 机械传动, 2023, 47(2): 86-92.
- [51] 杨化林, 钟 岩, 姜沅政, 等. 基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 62-70.
- [52] ZHANG H, GE Y, SUN C, et al. Picking path planning method of dual rollers type safflower picking robot based on improved ant colony algorithm[J]. Processes, 2022, 10(6): 1213.
- [53] LI X, LYU H L, ZENG D T, et al. An improved multi-objective trajectory planning algorithm for kiwifruit harvesting manipulator [J]. IEEE Access, 2023, 11: 65689-65699.
- [54] YANG L, ZHANG T Z, ZHANG K L. Trajectory planning of tissue culture plantlet transplanting robot in transporting seedling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 112-117.
- [55] MA J, HU J P, YAN X Y, et al. Transplanting path planning and motion functions research of the high-speed tray seedling transplanting robot[J]. Advanced Materials Research, 2013, 694/695/696/697: 1747-1752.
- [56] HU J P, YAN X Y, MA J, et al. Dimensional synthesis and kinematics simulation of a high-speed plug seedling transplanting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 107: 64-72.
- [57] HU J P, JIN H Q, CHANG Y C, et al. Dimensional synthesis and trajectory planning of plug seedling transplanting robot based on delta parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 28-35.
- [58] QUAN L Z, SHEN J C, XI D J, et al. Motion planning and test of robot for seedling tray handling in narrow space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 51-59.
- [59] WANG X J, ZHANG Z Q, MENG X J. Kinematic analysis and trajectory planning for a tree planting robot in forest environment [J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25(3): 630-640.
- [60] MA J Y, SUN B G. The exploration of the trajectory planning of plant protection robot for small planting crops in western mountainous areas [C]//IEEE. 2018 IEEE International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering. Lanzhou: IEEE, 2018: 42-45.
- [61] 庄丽阳, 陈树林, 朱龙彪, 等. 基于改进蚁群算法的农用喷药机器人路径规划[J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 15-19, 6.
- [62] LAL R, PRABHAKAR P. Time-Optimal multi-quadrotor trajectory planning for pesticide spraying [C]//IEEE. 2021 IEEE International

- al Conference on Robotics and Automation. Xi'an; IEEE, 2021; 7965-7971.
- [63] BECCE L, BLOISE N, GUGLIERI G. Optimal path planning for autonomous spraying UAS framework in precision agriculture [C]//IEEE. 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Athens; IEEE, 2021; 698-707.
- [64] LIU H, ZHANG S Y, DUAN Y P, et al. Orchard robot motion planning algorithm based on improved bidirectional RRT\* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 31-39.
- [65] 沈跃, 刘子涵, 刘慧, 等. 基于多约束条件的果园喷雾机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 56-67.
- [66] 高兴旺, 任力生, 王芳. 番茄温室移动喷药机器人的路径规划研究[J/OL]. 计算机工程与应用, 2023; 1-8[2023-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20230920.1203.040.html>.
- [67] 丘华兰, 张认成, 杜建华, 等. 林区火源探测机器人的路径规划仿真研究[J]. 农机化研究, 2008(5): 32-34, 37.
- [68] PRADEEP P, PARK S G, WEI P. Trajectory optimization of multirotor agricultural UAVs [C]//IEEE. 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky; IEEE, 2018; 1-7.
- [69] MUNOZ C S, CORREDOR J S, PATINO D A, et al. UAV trajectory optimization for precision agriculture [C]//IEEE. 2020 Virtual Symposium in Plant Omics Sciences. Bogotá; IEEE, 2020; 1-6.
- [70] BETALO M L, LENG S, ABISHU H N, et al. Multi-agent deep reinforcement learning-based task scheduling and resource sharing for O-RAN-empowered multi-UAV-assisted wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(7): 9247-9261.
- [71] MESQUITA R, GASPAR P D. A novel path planning optimization algorithm based on particle swarm optimization for UAVs for bird monitoring and repelling [J]. Processes, 2022, 10(1): 62.
- [72] PENG Y S, WANG L, LI Q X. 3D trajectory planning of agricultural unmanned aerial vehicles based on GA-SA algorithm [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2023, 16(3): 191-198.
- [73] PANAH F H, PANAH F H, OHTSUKI T. An intelligent path planning mechanism for firefighting in wireless sensor and actor networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(11): 9646-9661.
- [74] YAO J J, HUANG Y X, WAN Z S, et al. Minimum-time trajectory planning for an inchworm-like climbing robot based on quantum-behaved particle swarm optimization [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(18): 3443-3454.
- [75] ZHOU X F, JIANG L, GUAN Y S, et al. Energy-optimal motion planning of a biped pole-climbing robot with kinodynamic constraints [J]. Industrial Robot, 2018, 45(3): 343-353.
- [76] 杨英浩, 刘晋浩, 郑一力, 等. 林木联合采育机械臂避障路径规划 [J]. 林业科学, 2021, 57(2): 179-192.
- [77] CHIEN J C, CHANG C L, YU C C. Fast path planning method for agricultural robot automatic guidance based on cubic spline interpolation in strip farmland [C]//IEEE. 2022 International Conference on System Science and Engineering. Taiwan; IEEE, 2022; 64-67.
- [78] FENG K, HE X N, WANG M L, et al. Path optimization of agricultural robot based on immune ant colony; B-spline interpolation algorithm [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022(1): 2585910.
- [79] GAO R, ZHANG W, WANG G F, et al. Experimental research on motion analysis model and trajectory planning of GLT palletizing robot [J]. Buildings, 2023, 13(4): 966.
- [80] 庄徐, 郑哲文, 李科军, 等. 基于改进 PSO 算法的林地作业车轨迹优化 [J]. 森林工程, 2023, 39(1): 107-113, 122.
- [81] WU Q, CHEN H, LIU B L. Path planning of agricultural information collection robot integrating ant colony algorithm and particle swarm algorithm [J]. IEEE Access, 2024, 12: 50821-50833.
- [82] GUO W J, LI R, HAO Q L, et al. Time-optimal trajectory planning method for cooperative working of agriculture material handling robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 22-38.

(责任编辑: 王妮)