

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.04.028

李晓娟, 陈涛, 韩睿春, 等. 不确定采摘环境下改进 RRT 算法的机械臂路径规划研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 193-198

Li Xiaojuan, Chen Tao, Han Ruichun, et al. Research on path planning of robotic arm with improved RRT algorithm in uncertain environment for harvesting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 193-198

不确定采摘环境下改进 RRT 算法的 机械臂路径规划研究*

李晓娟, 陈涛, 韩睿春, 刘建璇

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐市, 830000)

摘要: 由于果蔬采摘环境的不确定性和复杂性, 机械臂在复杂环境中完成采摘, 其路径规划需考虑实时避障。为实现采摘机械臂在不确定环境下安全采摘, 提出一种改进 RRT 的动态避障算法, 以提升机械臂在不确定采摘环境的适应性。针对基本快速扩展随机树算法 (Rapidly-exploring Random Trees, RRT) 在动态环境下迭代时间长、路径长、适应性差等问题, 在 RRT 算法的基础上, 引入目标导向策略, 把终点以一定概率作为随机采样点的采样方向, 提高算法的迭代效率; 引入动态检测机制, 对已完成规划的初始路径进行实时检测, 使算法适应动态变化的环境。通过仿真分析改进 RRT 算法, 结果表明: 改进 RRT 算法的路径减少 16%, 迭代时间缩短 86.5%; 同时, 动态检测机制使算法适应动态环境。

关键词: 果蔬采摘; 机械臂; 快速扩展随机树; 动态避障; 目标导向; 动态检测; 路径规划

中图分类号: S23; TP241 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 04-0193-06

Research on path planning of robotic arm with improved RRT algorithm in uncertain environment for harvesting

Li Xiaojuan, Chen Tao, Han Ruichun, Liu Jianxuan

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, 830000, China)

Abstract: Due to the uncertainty and complexity of the harvesting environment for fruits and vegetables, the manipulator needs to consider real-time obstacle avoidance in completing harvesting tasks in complex environments. In order to achieve safe harvesting of manipulator in uncertain environments, an improved dynamic obstacle avoidance algorithm based on the rapidly-exploring random trees (RRT) algorithm is proposed to enhance the adaptability of manipulator in uncertain harvesting environments. In order to address the issues of long iteration time, long path length, and poor adaptability in dynamic environments of the basic RRT algorithm, this study first introduces a target-oriented strategy to increase the iteration efficiency of the algorithm by randomly sampling points with a certain probability towards the endpoint. Secondly, a dynamic detection mechanism is introduced to dynamically detect the initial path that has been planned, making the algorithm adaptable to changes in the environment. Simulation analysis shows that the improved RRT algorithm reduces path length by 16% and shortens iteration time by 86.5% compared to the basic RRT algorithm. Furthermore, the dynamic detection mechanism allows the algorithm to adapt to dynamic environments.

Keywords: pick fruits and vegetables; robotic arm; rapidly-exploring random trees; dynamic obstacle avoidance; goal orientation; dynamic detection; path planning

0 引言

果蔬采摘作为农业生产中最耗时耗力的一个环

节^[1], 随着城镇化进程的加快, 大量农业劳动力流失, 并受到人口老龄化加剧的影响^[2], 传统的依靠大量劳动力的果蔬采摘模式已经不能满足未来农业发展的需

收稿日期: 2023 年 3 月 6 日 修回日期: 2023 年 7 月 12 日

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52265003); 机械制造系统工程国家重点实验室开放课题基金项目 (sklms2022023); 新疆维吾尔自治区创新团队机器人及智能装备技术科技创新团队 (2022D14002)

第一作者、通讯作者: 李晓娟, 女, 1987 年生, 乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 硕士; 研究方向农牧特种机器人。E-mail: lxj_xj903@163.com

求^[3]。随着机器人技术的迅速发展及乡村振兴战略的持续推进,为提高农业生产效率,利用机械臂实现无人化果蔬高效、无损采摘成为一个重要的研究方向^[4],而采摘机械臂路径规划是实现精确采摘的重要前提。

常见的路径规划算法有:Dijkstra^[5]、A*^[6]、人工势场^[7]等算法,这些算法都需对空间进行网格化处理,在高维空间中会因计算的提升导致搜索性能严重下降。为解决在高维环境中机械臂路径规划问题,文献^[8,9]提出了快速搜索随机树(Rapidly-exploring Random Trees,RRT)算法,有效解决了高维空间路径规划问题。针对基本RRT算法存在随机性强、冗余节点多、搜索效率低等不足^[10],国内外的学者进行了研究,并取得了大量成果。例如,为提高搜索速度、效率,文献^[11]提出双向搜索树RRT_Connect,从初始点和目标点两棵随机树同时进行搜索;为保证路径的最优,文献^[12]提出了RRT*算法,通过代价函数选取扩展节点邻域内最小代价的方式,改进父节点的选择,每次搜索都重新选择树上的节点连接;为提高收敛速度,文献^[13]提出渐近最优Informed RRT*算法,对RRT*的采样过程进行优化,采用一个椭圆采样方式来代替全局均匀采样,减少冗余的分支,提高了搜索效率;文献^[14]提出批量处理Batch Informed Trees(BIT*)算法,BIT*对采样空间进行多批次多样本的采样,提高了采样的效率进而提高了搜索效率。同时,国内的学者针对具体的工作环境提出了具有目的性的改进算法,例如,文献^[15]针对荔枝采摘环境,提出了改进RRT的荔枝采摘机械臂运动规划算法,在RRT算法中引入目标重力概念,以加快路径搜索速度,并采用遗传算法对生成的路径进行优化,然后用一种路径平滑方法对路径进行平滑处理,极大地缩短了路径长度。文献^[16]针对柑橘的采摘环境,提出了基于Informed-RRT*改进的柑橘采摘机械臂运动规划算法,在起始点和目标点之间选取第三点作为预采摘引导点,并在算法中引入了启发性的节点采样策略,提高了最优路径的收敛速度。文献^[17]针对多设施农业果蔬采摘,提出了柯西目标引力双向RRT*算法,通过柯西分布的方法进行启发式采样,降低采样的盲目性,引入目标引力,提高搜索速度,引入节点拒绝策略,提高计算效率。

综合国内外目前的研究现状来看,虽然大量的学者们对机械臂的路径规划都进行了广泛的研究,但都未考虑到规划完成后环境中障碍物位置信息的变化对已完成规划路径的影响,这可能会导致机械臂在运动过程中发生碰撞^[18]。因此,本文提出一种改进的动态RRT路径规划算法,该算法在采样过程中结合目标导向策略,将随机采样点以一定概率把终点作为随机采

样方向,减少冗余迭代节点的产生,提高算法的迭代效率。当算法完成迭代时引入动态检测机制,实时检测已完成规划的路径是否有阻碍,满足机械臂适应不确定的动态采摘环境的要求。

1 RRT 算法研究及改进

1.1 RRT 算法原理

RRT算法是基于一颗随机采样并扩展成一颗有无碰撞路径的树,其扩展本质是与树生长类似^[19,20]。以起点作为树的树根,通过对状态空间进行随机采样并经过碰撞检测后,若无碰撞则将采样点加入树中,以此往复进行树扩展,当随机采样点与终点重合或采样点距离终点值小于设定的阈值时,完成扩展并找到规划的路径,其扩展示意图如图1所示。

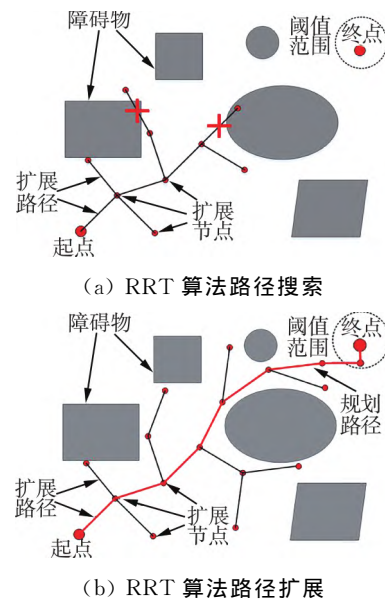


图1 RRT算法扩展示意图

Fig. 1 RRT algorithm extension schematic diagram

在非结构化的采摘环境中,由于初始信息可能是不完整或者采摘环境本身就存在动态障碍物,当障碍物对已规划完成的路径发生碰撞时,将导致已规划完成的初始路径无效,如图2所示,若算法未及时重新进行路径规划,将会导致机械臂在路径追踪过程中发生碰撞甚至是采摘设备的损坏。

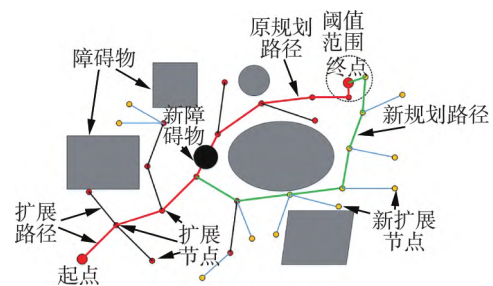


图2 动态障碍物碰撞示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic obstacle diagram

1.2 改进 RRT 算法

为使采摘机械臂在动态环境的采摘过程安全,针对基本 RRT 算法在动态环境中的不足进行如下改进。1) 针对随机性强的缺点,引入目标导向策略,对采样点进行目标导向,减少冗余节点的产生。2) 针对 RRT 算法在动态环境中的不足,引入动态检测机制,检测已规划完成路径情况,使算法适应不确定的动态环境。改进 RRT 算法流程图如图 3 所示。

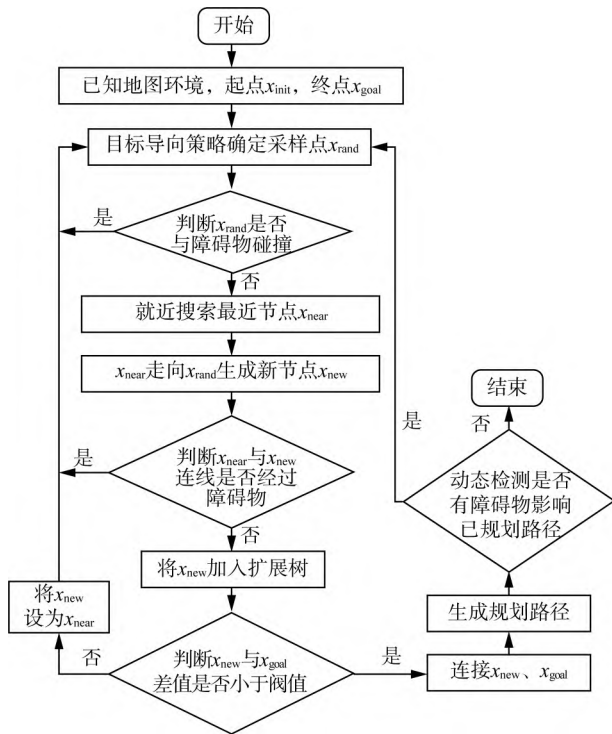


图 3 改进 RRT 算法流程

Fig. 3 Flow chart of improved RRT algorithm

1.2.1 目标导向策略

基本 RRT 算法在工作区域内采样具有随机性,在扩展过程中方向不明确,具有一定的盲目性^[21]。因此,在基本 RRT 算法中引入目标导向策略,在随机采样过程中以一定概率 P 进行目标采样进行扩展,其余进行随机采样,有效地提高采样方向的导向性,提高了迭代效率。其目标导向策略如式(1)所示。

$$x_{new} = x_{near} + l \frac{x_{rand} - x_{near}}{\|x_{rand} - x_{near}\|} \quad (1)$$

$$x_{rand} = \begin{cases} x_{goal} & \text{if } P > P_{rand} \\ \text{Sample} & \text{else} \end{cases}$$

式中: l —— 扩展步长;

x_{new} —— 新扩展节点;

x_{near} —— 上一扩展节点;

x_{rand} —— 随机扩展节点;

$\|x_{rand} - x_{near}\|$ —— x_{rand} 与 x_{near} 之间的欧氏距离。

1.2.2 动态检测机制

采摘机械臂路径规划的目的是在已知环境中规划出一条无碰撞的路径^[22],为轨迹追踪提供依据,路径规划的结果严重影响跟踪控制的精度。在采摘环境中,随着机械臂的运动,可以及时的更新已知环境,但可能会在已规划完成的路径出现新障碍物,从而导致轨迹追踪失效,在这种情况下就需重新规划路径。对重新规划路径,一般有两种处理方法:一种是放弃前期所有的路径规划,从起点重新开始规划,这种方法使在运动中的机械臂受到影响且搜索过程耗时,尤其在复杂环境中;另外一种是在保留原有无障碍物的路径,在障碍物前端处继续向目标搜索,进行新的路径规划,这种方法不需要从起点开始搜索,可以根据障碍物的位置及时调整规划的路径,从而保证运动的稳定性,非常适合采摘环境的路径规划。因此,本文选用第二种方法,其扩展示意如图 4 所示。

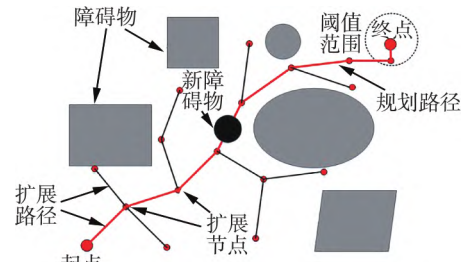


图 4 动态检测机制扩展示意图

Fig. 4 Extended schematic diagram of dynamic detection mechanism

2 仿真试验与验证

2.1 目标导向策略路径规划仿真

仿真试验电脑配置为: Windows11 系统,处理器 Intel i5 - 11400H, CPU 主频 2.5 GHz, 显卡 RTX3050Ti, 机带 RAM 16 GB。

为了验证本文算法在搜索中目标导向性,将在无障碍与有障碍二维仿真环境下对基本 RRT 算法及本文改进算法进行对比验证。为模拟采摘环境中障碍物位置的不确定及简化仿真环境,本文将障碍物设置为随机的圆形。设定地图大小为 $[20, 20]$, 搜索步长为 0.5, 最大迭代次数为 5 000 次, 阈值为 0.5, 目标导向概率为 50%, 设置起点为 $[0, 0]$, 目标点为 $[15, 12]$ 。由于算法在采样过程有一定随机性,为减少试验误差,所以试验次数定为 30。对不同算法在不同地图中进行算法仿真与验证,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,未经过改进的 RRT 算法出现了较多分支,这不仅会产生冗余节点,使迭代次数增加,还会导致规划时间长、路径长。在引入目标导向策

略后,采样目标性得到了极大的改善。

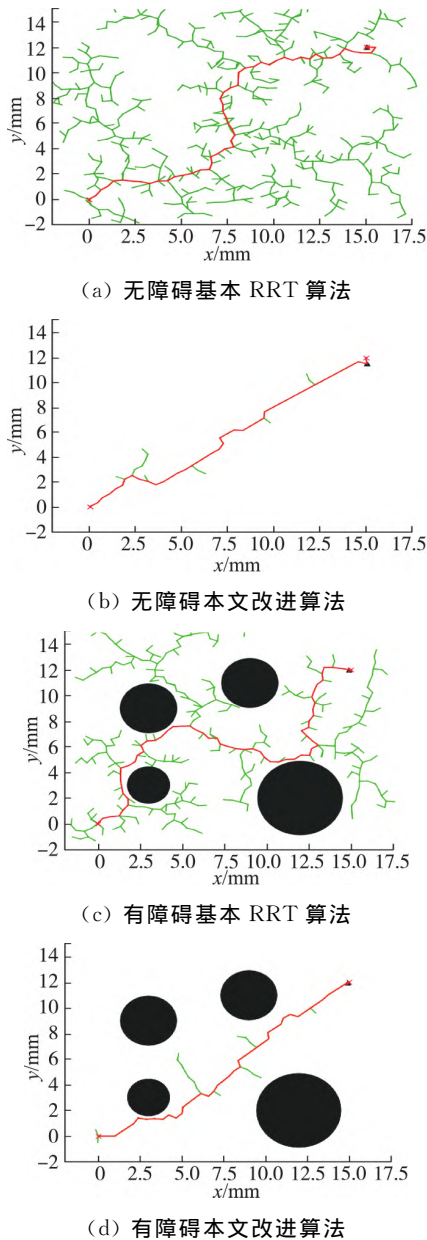


图 5 2 种算法路径规划图

Fig. 5 2 Algorithm path planning diagram

本文采用 30 组仿真来减少采样随机性试验的误差,在仿真中均成功找到规划路径。并根据仿真试验数据绘出搜索时间与路径长度对比图,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,无论是在无障碍地图中还是在有障碍地图中,本文改进算法的时间整体优于基本 RRT 算法,在路径长度方面也整体优于基本 RRT 算法,具体算法仿真数据如表 1 所示。

由表 1 可知基本 RRT 算法在有无障碍的两种环境中平均路径长度为 25.1 mm,而本文算法在有无障碍的两种环境中平均路径长度为 21.1 mm,路径长度减少了 16%;同时,基本 RRT 算法在有无障碍的两种环境中平均迭代时间为 30 s,而本文算法在有无障碍

的两种环境中平均迭代时间为 4.05 s,迭代时间缩短了 86.5%。因此,本文改进算法的迭代速度更快,可以更快地规划出更短无碰撞路径。

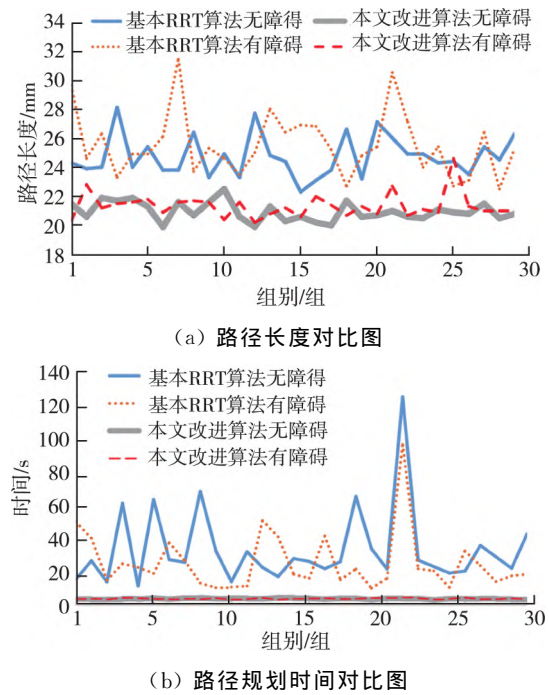


图 6 2 种算法效果对比图

Fig. 6 2 comparison of the effects of algorithms

表 1 不同算法在不同地图性能对比

Tab. 1 performance comparison of different algorithms on different maps

仿真环境	种类	平均路径长度/mm	平均规划时间/s
无障碍	基本 RRT 算法	24.7	33.9
	本文算法	20.9	4
有障碍	基本 RRT 算法	25.5	26.1
	本文算法	21.3	4.1

2.2 动态检测路径规划仿真

对完成规划的路径进行动态检测,以确保路径的可行性,若规划完成的路径有新的障碍物出现,则在新障碍物前方进行重新路径规划,其思路主要可以分为三个步骤:第一步是检测初始路径。为了提高路径的重复使用率,应对初始路径进行动态检测。第二步是碰撞检测。当新增障碍物与初始路径发成碰撞时,应立即进行重新路径规划。第三步是重新规划路径。删除障碍物后的路径,同时利用障碍物之前的初始路径进行重新搜索,规划出新路径。具体规划过程如图 7 所示。

通过动态 RRT 算法扩展示意图,可以看出动态检测机制对已规划完成的路径进行实时检测,当有障碍物阻碍初始路径时,立刻进行新的路径规划,以保证

RRT 算法适应动态变化的环境,提高算法的实时性。

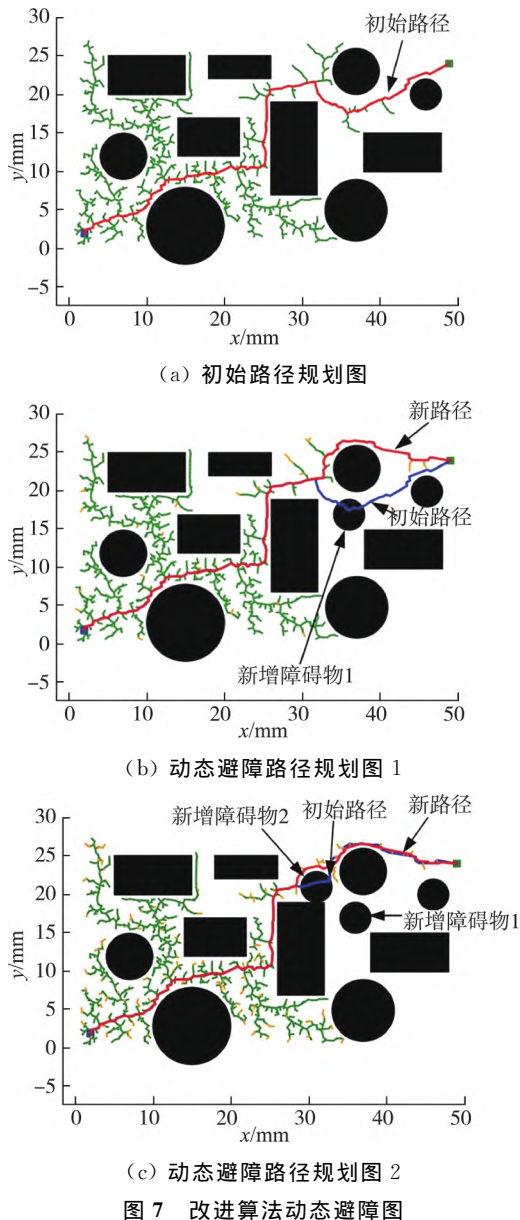


Fig. 7 Dynamic obstacle avoidance diagram of improved algorithm

3 结论

1) 针对 RRT 算法存在随机性强、搜索效率等不足,引入了目标导向策略,通过一定概率进行采样,在一定程度上降低算法搜索的随机性,保证算法向目标点快速搜索,提高搜索效率;同时为使机械臂适应动态采摘环境,引入动态检测机制,实时检测动态环境,能有效地避开动态障碍物,增强算法动态环境的适应性,提高算法的实时性。

2) 根据试验结果,与 RRT 算法相比,改进算法规划路径长度减少了 16%。改进算法规划迭代的时间缩短了 86.5%。改进算法能够适应不确定的运动环境,为机械臂在不确定环境中采摘提供依据。

参 考 文 献

- [1] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1-18.
Liu Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1-18.
- [2] 张文翔, 张兵园, 贡宇, 等. 果蔬采摘机器人机械臂研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 232-237, 244.
Zhang Wenxiang, Zhang Bingyuan, Gong Yu, et al. Research status and prospect of fruit and vegetable picking robot manipulator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 232-237, 244.
- [3] 张洁, 李艳文. 果蔬采摘机器人的研究现状、问题及对策[J]. 机械设计, 2010, 27(6): 1-5.
Zhang Jie, Li Yanwen. Research situation, problems and solutions of fruit-vegetable picking robots [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(6): 1-5.
- [4] 张勤, 刘丰涛, 蒋先平, 等. 番茄串收机械臂运动规划方法与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 149-156.
Zhang Qin, Liu Fengpu, Jiang Xianping, et al. Motion planning method and experiments of tomato bunch harvesting manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 149-156.
- [5] 林韩熙, 向丹, 欧阳剑, 等. 移动机器人路径规划算法的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(18): 38-48.
Lin Hanxi, Xiang Dan, Ouyang Jian, et al. Review of path planning algorithms for mobile robots [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(18): 38-48.
- [6] 代玉梅, 张瑞玲, 马黎. 改进 A* 算法的采摘机器人路径规划与跟踪控制[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 138-145.
Dai Yumei, Zhang Ruiling, Ma Li. Path planning and tracking control of picking robot based on improved A* algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 138-145.
- [7] 李廷珍, 招启军, 张夏阳, 等. 基于改进人工势场法的无人直升机三维航迹规划[J]. 飞行力学, 2022, 40(1): 69-75.
Li Tingzhen, Zhao Qijun, Zhang Xiayang, et al. Three-dimensional path planning of unmanned helicopter based on improved artificial potential field method [J]. Flight Dynamics, 2022, 40(1): 69-75.
- [8] LaValle S M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning [J]. Research Report, 1999.
- [9] LaValle S M, Kuffner Jr J J. Randomized kinodynamic planning [J]. International Journal of Robotics & Research, 2001, 20(5): 378-400.
- [10] 王硕, 段睿凯, 廖与禾. 机器人路径规划中快速扩展随机树算法的改进研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 1-8.
Wang Shuo, Duan Rongkai, Liao Yuhe. Research

- on improvement of rapidly exploring random tree in algorithm robot path planning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 1-8.
- [11] Kuffner J J, Lavelle S M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning [C]. Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065). IEEE, 2000, 2: 995-1001.
- [12] Karaman S, Walter M R, Perez A, et al. Anytime motion planning using the RRT [C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2011: 1478-1483.
- [13] Gammell J D, Srinivasa S S, Barfoot T D. Informed RRT* optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic [C]. WIProc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 2997-3004.
- [14] Gammell J D, Barfoot T D, Srinivasa S S. Batch informed trees (BIT*): Informed asymptotically optimal anytime search [J]. International Journal of Robotics Research, 2017, 39(5): 543-567.
- [15] Cao X, Zou X, Jia C, et al. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 105-118.
- [16] 刘顿, 王毅. 改进 Informed-RRT* 算法的柑橘采摘机械臂运动路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 158-165.
Liu Dun, Wang Yi. Motion path planning of citrus picking robot arm based on improved Informed-RRT* algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(11): 158-165.
- [17] 张勤, 乐晓亮, 李彬, 等. 基于 CTB-RRT* 的果蔬采摘机械臂运动路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 129-136.
- Zhang Qin, Yue Xiaoliang, Li Bin, et al. Motion planning of picking manipulator based on CTB-RRT* algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 129-136.
- [18] 马宇豪, 梁雁冰. 一种基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障算法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(2): 392-400.
Ma Yuhao, Liang Yanbing. An obstacle avoidance algorithm for manipulators based on six-order polynomial trajectory planning [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(2): 392-400.
- [19] 崔永杰, 王寅初, 何智, 等. 基于改进 RRT 算法的猕猴桃采摘机器人全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 151-158.
Cui Yongjie, Wang Yinchu, He Zhi, et al. Global path planning of kiwifruit harvesting robot based on improved RRT algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 151-158.
- [20] 陈秋莲, 蒋环宇, 郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(16): 10-17.
Chen Qiulian, Jiang Huanyu, Zheng Yijun. Summary of rapidly-exploring random tree algorithm in robot path planning [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(16): 10-17.
- [21] Li B, Chen B. An adaptive rapidly-exploring random tree [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 9(2): 283-294.
- [22] 王怀震, 高明, 王建华, 等. 基于改进 RRT*-Connect 算法的机械臂多场景运动规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 432-440.
Wang Huaizhen, Gao Ming, Wang Jianhua, et al. Multi-scene fast motion planning of manipulator based on improved RRT*-Connect algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 432-440.

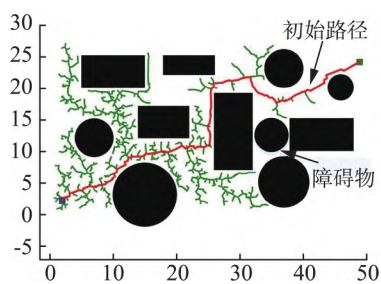
论文精选：不确定采摘环境下改进 RRT 算法的机械臂路径规划研究

成果简介

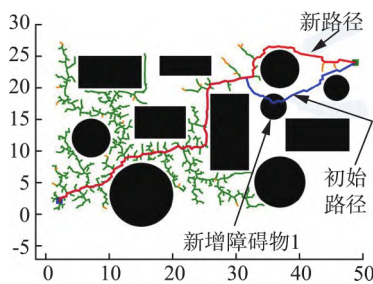
由于果蔬采摘环境的不确定性和复杂性,机械臂在复杂环境中完成采摘,其路径规划需考虑实时避障。为实现采摘机械臂在不确定环境下安全采摘,提出一种改进 RRT 的动态避障算法,以提升机械臂在不确定环境采摘环境的适应性。针对基本快速扩展随机树算法(Rapidly-exploring Random Trees, RRT)在动态环境下迭代时间长、路径长、适应性差等问题,在 RRT 算法的基础上,首先引入目标导向策略,把终点以一定概率作为随机采样点的采样方向,提高算法的迭代效率;其次引入动态检测机制,对已完成规划完成的初始路径进行实时检测,使算法适应动态变化的环境。通过仿真分析改进 RRT 算法,结果表明:改进 RRT 算法的路径减少了 16%,迭代时间缩短了 86.5%,有效地提高了规划效率;同时,动态检测机制使算法适应动态环境。该研究由国家自然科学基金(52265003)、机械制造系统工程国家重点实验室开放课题基金项目(sklms2022023)、自治区创新团队机器人及智能装备技术科技创新团队(2022D14002)资助。

主要技术指标

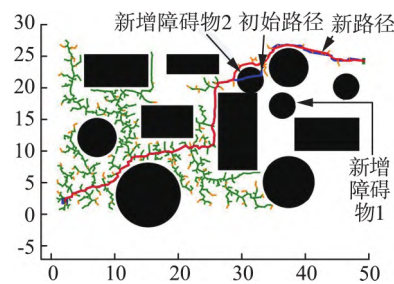
仿真环境	种类	平均路径长度/mm	平均规划时间/s
无障碍	基本 RRT 算法	24.7	33.9
	改进 RRT 的动态避障算法	20.9	4
有障碍	基本 RRT 算法	25.5	26.1
	改进 RRT 的动态避障算法	21.3	4.1



(a) 初始路径规划图



(b) 动态避障路径规划图 1



(c) 动态避障路径规划图 2

团队介绍

该成果由新疆大学智能制造现代产业学院(机械工程学院)农牧机器人及智能装备技术团队研发,团队负责人为李晓娟副教授。团队主要致力于农牧特种机器人理论与应用研究(机器人感知、控制及结构设计),承担科研项目 20 余项,主持科研项目 12 项,发表高水平学术论文 20 余篇,申请专利 8 项,软件著作权 5 项。

联系方式

联系人:李晓娟,电话:13659949858,邮箱:lxj_xj903@163.com