



马萧杰, 施新宇, 肖文星, 等. 基于TSP_RRT算法的柑橘多目标连续采摘路径规划[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(2): 490–501.

MA X J, SHI X Y, XIAO W X, et al. Multi-objective continuous picking path planning for citrus based on TSP_RRT algorithm[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(2): 490–501.

基于TSP_RRT算法的柑橘多目标连续采摘 路径规划

马萧杰^{1,2}, 施新宇^{1,2}, 肖文星³, 任梦涛^{1,2}, 鲍秀兰^{1,2*}

(1. 华中农业大学 工学院, 湖北 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要:【目的】柑橘等季节性水果收获约占整个作业量的40%, 耗时耗力, 研发柑橘采摘机器人已成为提高柑橘生产效率的重要途径。为解决柑橘采摘机械臂在果园非结构化环境下的规划效率低、规划路径长等问题, 提出了一种非结构环境下将旅行商问题(TSP)和快速搜索随机树算法(RRT)相结合的柑橘连续采摘最优路径规划方法(TSP_RRT)。【方法】为了在仿真环境中描述真实的柑橘果树, 建立了基于几何包络法的柑橘树模型。将柑橘树的树枝树干等障碍物部分采用分段圆柱体包络, 无需采摘的柑橘采用包围球包络。采用带先决条件的概率性随机采样策略, 通过引入采样阈值与生成的采样随机数进行判断, 可以有效降低采样的盲目性。引入目标引力控制节点生长的最短距离, 实现扩展树的生长方向总是朝着目标点的方向, 引入自适应步长使得扩展树在生长时根据障碍物的密度自动调节步长大小, 目标引力和自适应步长策略提高了采摘机器人路径规划的收敛速度和规划效率。为提高柑橘多目标采摘路径的整体最优规划, 缩短路径长度。基于遗传算法的旅行商问题, 并考虑采摘过程中树枝等障碍物的干扰, 引入障碍物因子来获取多目标采摘顺序的最优解。【结果】仿真结果表明, TSP_RRT算法规划所获得的连续采摘路径长度相比于TSP_RRT-connect算法和TSP_RRT*算法的多目标连续采摘路径分别缩短34.52%、10.19%, 规划时间分别减少约31%、50%, TSP_RRT算法的路径规划成功率约为98.8%。【结论】与多种机械臂路径规划的RRT算法相比, 改进后的TSP_RRT算法可以快速、准确地生成一条机械臂采摘的最优路径, 缩短了路径规划的长度, 减少了路径规划的时间。该算法可为柑橘采摘机器人在多目标连续采摘中提供参考和技术支持。

关键词: 果园; 柑橘采摘机器人; 多目标; 连续采摘; 路径规划; 机械臂避障

中图分类号: S225; S666 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)02-0490-12



Multi-objective continuous picking path planning for citrus based on TSP_RRT algorithm

MA Xiaojie^{1,2}, SHI Xinyu^{1,2}, XIAO Wenxing³, REN Mengtao^{1,2}, BAO Xiulan^{1,2*}

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-02-02

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202219)和国家重点研发计划项目(2020YFD1000101)
Project supported by the Agricultural Machinery Equipment Repair Board Core Technology Application Research of Hubei Province(HBSNYT202219) and the Nation Key Research and Development Program of China (2020YFD1000101)

作者简介: 马萧杰, 硕士生, orcid.org/0009-0008-8418-5378, mxj@webmail.hzau.edu.cn; *通信作者: 鲍秀兰, 副教授, 博士, 主要从事现代农业机器人研究, orcid.org/0000-0003-3545-3619, orchidbaoxl@mail.hzau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Wuhan 430070, China; 3.College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: [Objective] The harvesting of seasonal fruits such as citrus accounts for about 40% of the total workload, which is time-consuming and labor-intensive. The development of citrus picking robots has become an important way to improve production efficiency. In order to solve the problems of low planning efficiency and long planning path of citrus picking manipulators in the unstructured environment of orchards, an optimal path planning algorithm (TSP_RRT) for continuous citrus picking combining the traveling salesman problem (TSP) and the rapid-exploration random tree (RRT) algorithm is proposed. [Method] In order to describe the real citrus fruit tree in the simulation, a citrus tree model based on geometric envelope method was established. The obstacle portion of the citrus tree, such as the branch trunk, was wrapped in a segmented cylinder, and the citrus that did not need to be picked was wrapped in an encircling sphere. Using the probabilistic random sampling strategy with preconditions, the blindness of sampling can be effectively reduced by introducing the sampling threshold and the generated sampling random number. The target gravity was introduced to control the shortest distance for node growth, thus the growth direction of the expanded tree was always toward the target point. The introduction of adaptive step size allowed the expanded tree to automatically adjust the step size according to the density of obstacles when growing. The target gravity and adaptive step size strategy improved the convergence speed and planning efficiency of the picking robot path planning. In order to improve the overall optimal planning of citrus multi-objective picking path and shorten the path length, the obstacle factor was introduced to obtain the optimal solution of multi-objective picking sequence based on the traveling salesman problem of genetic algorithm, and considering the interference of obstacles such as branches in the picking process. [Result] The simulation results showed that the length of the continuous picking path obtained by the TSP_RRT algorithm planning was shortened by 34.52% and 10.19% respectively compared with the multi-target continuous picking path of the TSP_RRT-connect algorithm and TSP_RRT* algorithm, and the planning time was reduced by about 31% and 50% respectively. The path planning success rate of the TSP_RRT algorithm was approximately 98.8%. [Conclusion] Compared with various RRT algorithms for robotic arm path planning, the improved TSP_RRT algorithm can quickly and accurately generate an optimal path for manipulators picking, shorten the length of path planning and reduce path planning time. This algorithm can provide reference and technical support for citrus picking robots in multi-objective continuous picking.

Keywords: orchard; citrus picking robot; multi-target; continuous picking; path planning; manipulator obstacle avoidance

【研究意义】水果已成为我国第三大种植产业^[1],柑橘等季节性水果的收获约占整个作业量的40%,消耗成本大,效率低,依赖人工采摘已经不能满足我国柑橘产业的发展^[2-3]。研发柑橘采摘机器人已成为提高柑橘生产效率的重要途径^[4-6]。然而,在非结构化环境下,果实生长具有随机性,并且大多被树枝和树叶等障碍物遮挡,造成采摘规划难度大、效率低等问题^[7-8],因此机械臂的最优路径规划成为采摘机器人的关键问题之一。【前人研究进展】针对柑橘的多目标连续采摘问题可以归结为路径规划问题和多目标遍历问题。目前常用的路径规划算法有遗传算法^[9]、蚁群算法^[10]、A*算法^[11]、人工势场法^[13-14]、快速扩展随机数法(rapidly-exploring random tree, RRT)^[15-16]等。然而遗传算法和蚁群算法运算量大、耗时长;A*算法和人工势场法对于高维空间的多自由度机械臂不太适用;RRT算法可以适应复杂约束下的路径规划问题,但随机性大。Sepehri等^[17]将RRT算法与人工势场法结合,利用人工势场和梯度下降优化方法对关节构型进行规划,有效防止机械臂与障碍物发生碰撞。Cao等^[18]提出了一种改进的RRT算法,引入目标重力加快路径搜索效率,结果表明该算法能够更好地实现荔枝采摘机器人的路径规划。李洋等^[19]提出

一种适用于双臂机器人协同路径规划的自适应步长 RRT 方法,并通过建立构型空间和工作空间的范数相容不等式实现碰撞检测。改进后的算法效率高、速度快,但在复杂场景下适应性受限。针对多目标遍历问题,Wu 等^[20]提出了一种新的基于正弦余弦搜索策略(GGSC-SSA)的贪婪遗传麻雀搜索算法,用于解决求解旅行商问题时容易陷入局部最优的情况。于宏涛等^[21]为避免人工萤火虫算法在求解 TSP 时陷入局部最优的问题,增加了基于变邻域搜索算法的扰动机制,并在计算距离时引入了交互子和变换序的概念,试验结果证明,改进后的算法拥有较好的求解性能。李涛等^[22]针对多机械臂采摘机器人的协同工作中存在重叠访问域的情况引入多旅行商问题,并提出基于遗传算法的 AOMTSP 求解方法,得到的作业遍历路径明显缩短。【本研究切入点】为解决非结构化环境下,对多障碍包围下的柑橘连续采摘问题进行研究。【拟解决的关键问题】对 RRT 算法在采样策略、生长方向以及生长步长进行改进,提出了一种基于 TSP_RRT 的柑橘多目标连续采摘最优路径规划算法。考虑实际采摘过程中空间障碍物的影响,引入障碍物因子并结合遗传算法获取最优采摘顺序,缩短采摘规划的路径,为柑橘采摘机器人在连续采摘中提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 基于 MATLAB 的柑橘树模型

目前柑橘果园主要以矮化栽培方式居多,标准化种植的柑橘园中行距为 4~6 m,株距为 2.5~3 m,树高为 1.5~2.5 m。移动采摘机器人行驶于柑橘树行间,并驱动机械臂完成采摘工作。实际果园中的柑橘树主要由树枝、树干、果实以及树叶、枝条等部分组成,由于机械臂存在一定的刚度,采摘过程中,待采摘柑橘附近的树叶、枝条对采摘工作的阻碍作用很小,被识别分割为障碍物的主要是树枝树干以及未成熟无需采摘的果实。因此,仅保留枝干部分作为障碍物区域,并在 MATLAB 中采用与其近似的规则形状进行包络建模。

选取开心树形的柑橘树对其进行包络建模,将树枝树干等部分采用圆柱体包络法,每段枝干划分为几个部分,采用多个半径和高度不同的圆柱体分段建模,而未成熟无需采摘的柑橘则使用包围球法,建立球体模型表示。图 1 为柑橘(开心树形)和对应的 MATLAB 模型。

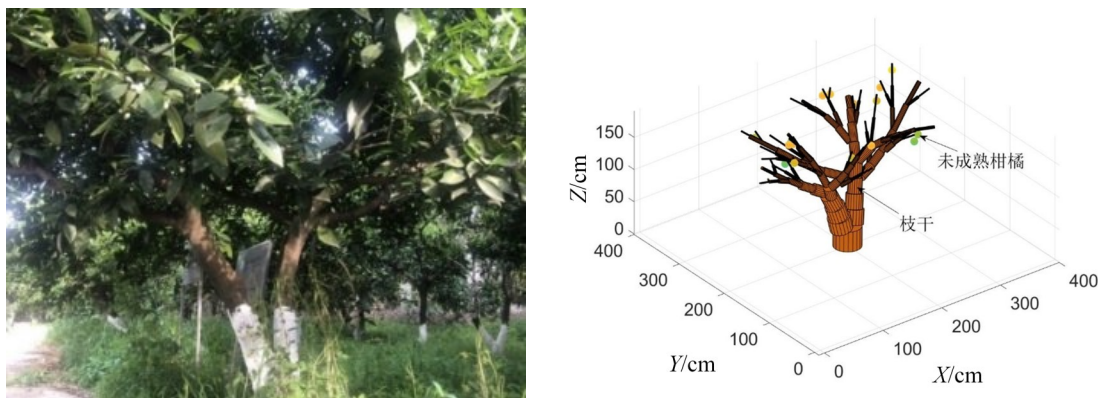


图 1 柑橘(开心树形)和 MATLAB 模型

Fig.1 The open center tree and MATLAB model of citrus

1.2 柑橘树模型简化拟合

对圆柱体形状的障碍物而言,在做碰撞检测时,需要反复计算三维空间中的点到圆柱体的距离,一般方法是对圆柱体表面采集足够多的点并计算这些点到空间中某点的距离,最后选取其中的最小值作为该点到圆柱体表面的距离。假设空间中存在一个圆柱体,在其表面上采取足够的点集合为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$,则计算点 Q_0 到圆柱体的距离为:

$$d = \min(\text{dis}(Q_0, q_i) | i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

然而该方法需要大量的计算时间,对于基于采样的路径规划算法而言不太适用。然而,利用 MATLAB 做球体障碍物的碰撞检测时只需要计算空间中的点到球心的距离是否大于球的半径即可,计算量

小,速度快。因此,本研究采用多个球体拟合的方式简化圆柱体障碍物模型,降低碰撞检测复杂度 and 单次规划所需时长。

图2为一个底面半径 r 、高度 h 的圆柱体横截面图。拟合的方法为:将圆柱体底面圆心作为第一个球体的球心,沿圆柱的中心轴每隔一个长度 r 生成一个半径为 r 的球体,直至球体覆盖圆柱。因此拟合后得到的球体数量为:

$$m = \left\lfloor \frac{h}{r} \right\rfloor + 2 \quad (2)$$

式(2)中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整的计算符号。将圆柱体用 m 个球体拟合后,进行圆柱体的碰撞检测时只需判断空间中的点分别到 m 个球体球心的距离是否均大于球体半径 r 即可。

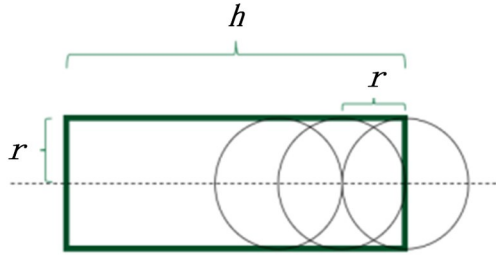


图2 多个球体拟合圆柱体示意

Fig.2 Diagram of multiple spheres fitting cylinders

当采用上述方法对圆柱体进行拟合时,圆柱体内仍然存在部分空间无法被球体覆盖。因此在拟合过程中扩大球体半径,并在碰撞检测时给定了一定余量:

1) 扩大拟合的球体半径。从图2可以看出,当拟合的球体半径选用 R 时,两个相邻球体存在的相交部分与圆柱体对称轴的最大距离为 $\frac{\sqrt{3}}{2}R$,为了拟合的球体可以完全覆盖圆柱体,将拟合的球体半径扩大 $\frac{2}{\sqrt{3}}$ 倍,采用 m 个半径为 $\frac{2}{\sqrt{3}}r$ 的球体拟合圆柱体。图3为半径扩大前后的球体拟合示例。

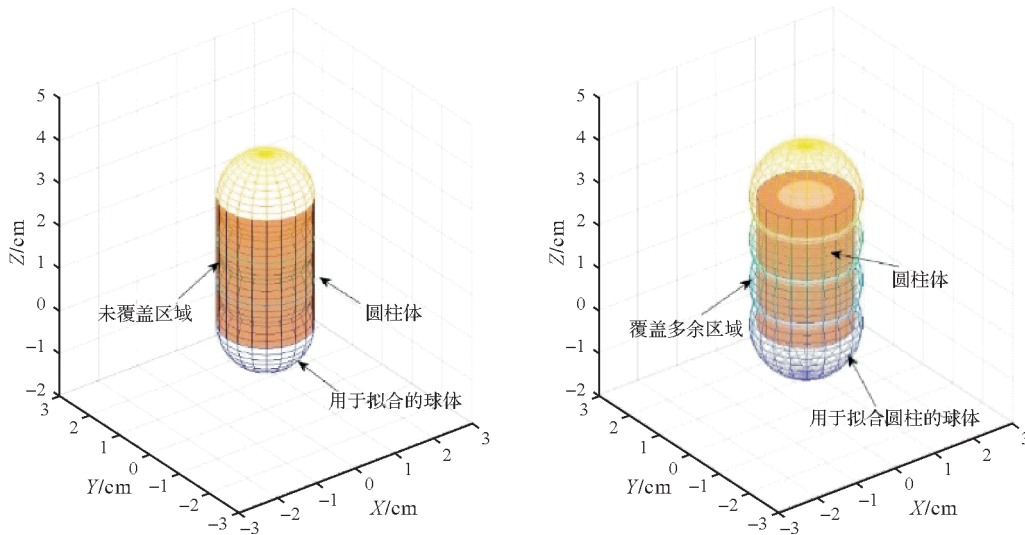


图3 半径 r 的球体拟合(左)与半径 $\frac{2}{\sqrt{3}}r$ 的球体拟合(右)

Fig.3 Fitting a sphere with a radius of r (left) and fitting a sphere with a radius of $\frac{2}{\sqrt{3}}r$

2) 给定碰撞检测的余量:虚拟增大障碍物。进行碰撞检测时,要求空间节点到障碍物表面的距离不得小于一个固定值 δ ,确保生成的路径节点到障碍物还存在一定距离。该方法可以有效防止运动过程中机械臂末端与障碍物的碰撞。

采用上述拟合方法,获取的 MATLAB 柑橘树模型如图 4 所示。

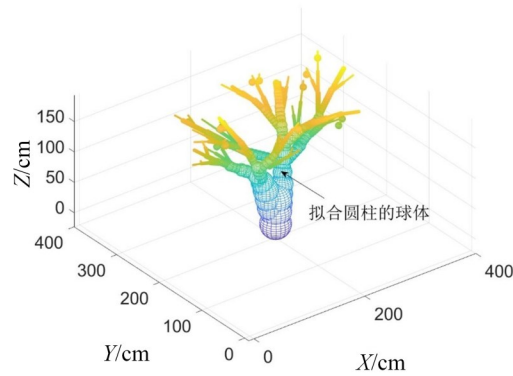


图 4 多球体拟合的柑橘树模型

Fig.4 A citrus tree model with multiple spheres fitting

1.3 RRT 算法及其改进

RRT 算法在进行路径规划时无需对环境进行建模,可快速搜索未知空间,因此在对果园内的采摘路径规划时具有一定优越性。设机器人的构型空间为 C , C_{obs} 为障碍物区域, $C_{free} = C - C_{obs}$ 为自由区域, q_{init} 为初始构型, q_{goal} 为目标构型, RRT 算法就是要找到一条路径 $q(t) \in C_{free}$, 且 $q(0) = q_{init}$, $q(end) = q_{goal}$ 。RRT 算法伪代码如算法 1 所示。

算法 1 RRT 算法

```

RRT( $q_{init}, q_{goal}$ )
Tree.add( $q_{source}$ )
do:
 $q_{rand} = \text{random\_node}(C_{free})$ 
 $q_{near} = \text{Tree.Nearest\_node}(q_{rand})$ 
 $q_{new} = \text{extend}(q_{near}, q_{rand})$ 
if( $q_{near} \rightarrow q_{new} \in C_{free}$ )
 $q_{new}.\text{set\_parent}(q_{near})$ 
Tree.add( $q_{new}$ )
end if
While(Distance(Tree,  $q_{goal}$ ) >  $d_x$ )
Path ← Tree.Trace_Back( $q_{new}$ )
Return Path

```

然而,基于采样的算法在规划中存在采样随机性强、规划效率低、非最优路径等问题。因此,本研究对 RRT 算法的采样策略、生长方式及生长步长进行了改进。

1.3.1 带先决条件的概率性随机采样

传统 RRT 算法采用全局随机采样策略寻找随机节点,选择采样节点的目的性不强,每次规划扩展树的生长方向随机,影响规划效率,为此本研究在采样前进行判断:若当前扩展树中距离目标点最近的节点与目标点之间无障碍物时,直接向目标点采样,否则采用概率性随机采样策略,引入一个采样阈值 Δ ,当生成的采样随机数在阈值内时则向目标点采样,超过阈值则进行全局随机采样。假设当前扩展树 $Tree$ 中的所有节点为 $Tree = (q_1, q_2, \dots, q_N)$, 其中距离目标点 q_{goal} 最近的节点为 $q_{nearest}$, 判断 $q_{nearest}$ 和 q_{goal} 之间是否存在障碍物,若存在则 $q_{rand} = q_{goal}$, 若不存在则进行概率随机采样。最终改进后的采样策略表达为:

$$q_{rand} = \begin{cases} q_{goal}, & 0 \leq rand \leq \Delta \quad \text{or} \quad q_{nearest} \rightarrow q_{goal} \in C_{free} \\ q_{random}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $rand$ 为采样随机数且 $0 \leq rand \leq 1$, q_{random} 代表空间中随机搜索的一个点。

图 5 为改进后的采样策略示意图。黑色区域表示障碍物,第 1 次采样时, q_{init} 与 q_{goal} 的连线上与障碍物存在相交部分,表示两者之间存在障碍物,因此进行概率随机采样,获得采样点 q_{rand1} ,第 2 次采样时,扩展树中 q_{new1} 相距 q_{goal} 最近,且两者之间无障碍物,因此直接向目标点 q_{goal} 采样。改进采样策略前后的算法规划结果如图 6 所示。带先决条件的概率随机采样可以降低采样的盲目性,减少扩展树中的冗余节点,从而提高路径规划速度。

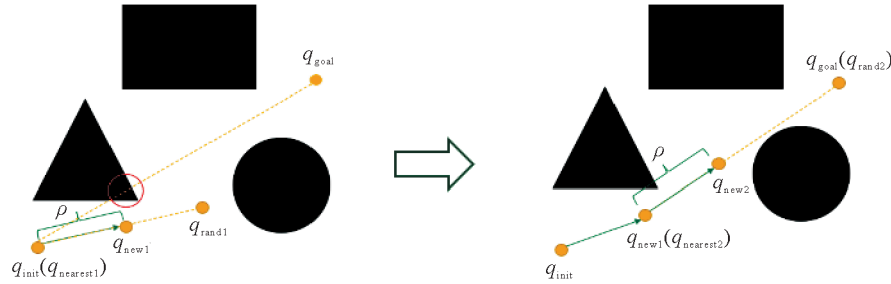


图 5 改进后的采样方式

Fig.5 Improved sampling method

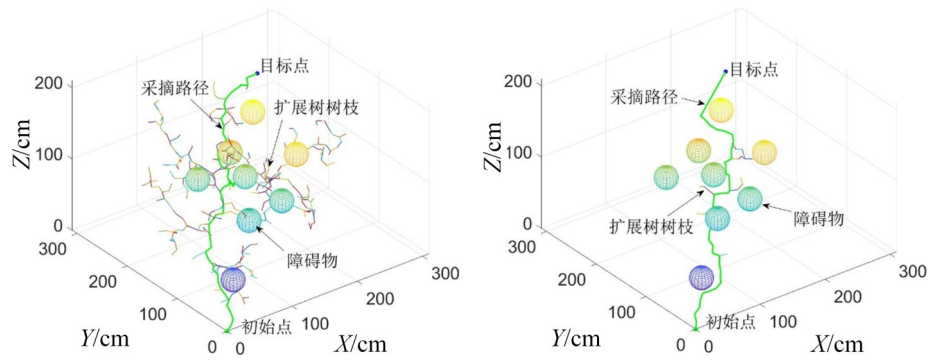


图 6 全局随机采样策略(左)与带先决条件的概率随机采样策略(右)规划结果

Fig.6 Planning results of global random sampling strategy(left)and probability random sample strategy with prerequisite(right)

1.3.2 引入目标引力

为了加快收敛速度,在生长过程中引入目标引力,每次采样得到节点后,扩展树中与其相距最近的节点在向采样点生长的同时向目标点生长,最终得到的新节点位于两者的合成方向。原始 RRT 在扩展时生成的新节点为:

$$q_{new} = q_{near} + \rho \times \frac{q_{rand} - q_{near}}{\|q_{rand} - q_{near}\|} \quad (4)$$

增加目标引力后使其向采样点生长的同时向目标点生长,因此改进后生成的新节点为:

$$q_{new} = q_{near} + \rho \times \frac{q_{rand} - q_{near}}{\|q_{rand} - q_{near}\|} + k \times \rho \times \frac{q_{rand} - q_{near}}{\|q_{rand} - q_{near}\|} \quad (5)$$

式(4)(5)中, ρ 代表步长, k 代表向目标点生长与向采样点生长的比例,且当其为 0 时生长情况与原始 RRT 算法的生长情况相同。引入目标引力后扩展树的生长过程如图 7 所示。

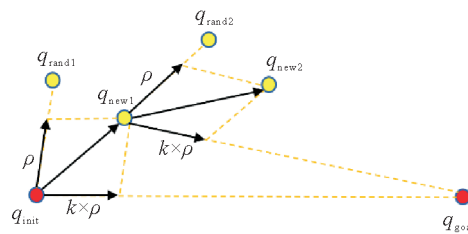


图 7 增加目标引力后的生长过程

Fig.7 Growth process after increasing target gravity

引入目标引力后,通过控制节点生长的最短距离,可以实现扩展树的生长方向总是朝向目标点。规定当前节点与目标点的有向连线与实际扩展方向的夹角小于 90° 时,生长方向是向着目标点的。在向采样节点扩展时,其生长过程一般分为以下 3 种情况,如图 8 所示。

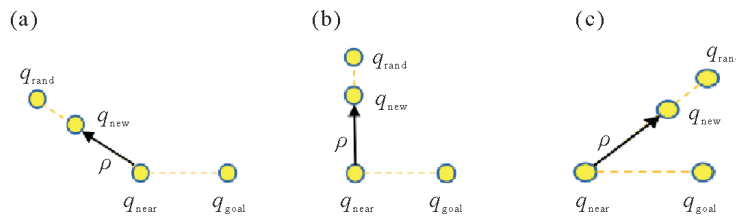


图 8 扩展树中节点生长的 3 种情况

Fig.8 Three situations of node growth in extended tree

图 8 中只有情况(c)的生长方向是朝着目标点的。因此,在增加目标引力后,需要控制新节点最终的生长方向。增加目标引力后的生长情况如图 9 所示。

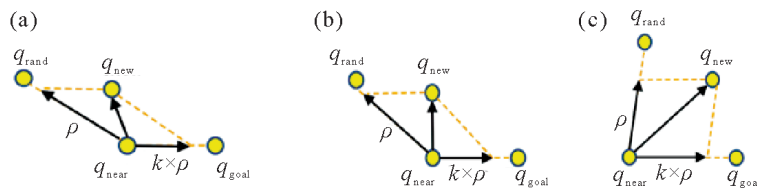


图 9 增加目标引力后的 3 种生长情况

Fig.9 Three situations of node growth after increasing target gravity

从图 9(a-c)可以看出,随着生长方向 $q_{near} \rightarrow q_{new}$ 与向目标方向 $q_{near} \rightarrow q_{goal}$ 两者夹角的减少, $q_{near} \rightarrow q_{new}$ 的生长距离逐渐增大。因此,可以通过限制每次生长距离的最小值使得本次扩展的生长方向是朝着目标点的,边界条件情况如图 9(b)所示,其生长距离的长度为 $\rho \times \sqrt{1 - k^2}$ 。因此可在路径规划的循环中,判断本次规划的生长距离是否大于上述值,当生长距离小于该阈值时,扩展并没有朝着目标点进行,不再进行后续操作,转而进入下一次扩展,寻找新的采样点 q_{rand} 。引入目标引力并限定最小生长距离后的规划效果如图 10 所示。扩展树的每条枝干都趋向于目标点,实现了扩展树的生长始终朝着目标点的方向。同时,改变 $\rho \times \sqrt{1 - k^2}$ 的值,可以控制扩展树生长方向与目标方向的最大夹角。当障碍物密度较大时,若每次生长都朝着目标点,反而会降低规划效率,此时需要减少 $\rho \times \sqrt{1 - k^2}$,以允许扩展树向反方向生长。

1.3.3 自适应步长策略

针对不同的采摘任务、环境和工作要求时需调试合适的步长,步长的大小会直接影响规划的效率和机械臂的运动。因此,本研究引入了一种自适应步长策略,以一个小于扩展树当前所有节点中与目标点相距最近的节点到所有障碍物的最短距离的值作为步长的更新值,并给定一个上下限。假设当前扩展树 Tree 中距离目标点 q_{goal} 最近的节点为 $q_{nearest}$,空间中所有障碍物集合为 $Obs = (obs_1, obs_2, \dots, obs_m)$,则每次扩展成功后更新的步长大小为:

$$\rho = \min(d(q_{nearest}, obs_i)) \times \beta, i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式(6)中 $\beta < \frac{1}{1+k}$,因为在生长过程中增加了目标引力,当采样点是目标点时会向目标方向生长 $(1+k)\rho$,若 $\beta \geq \frac{1}{1+k}$ 且扩展树与目标点之间存在障碍物时,生长距离大于当前

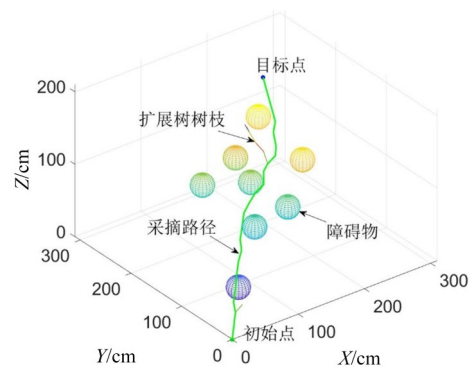


图 10 增加目标引力并限定最小生长距离后的规划结果

Fig.10 Planning result after increasing the target gravity and limiting the minimum growth distance

移动方向上与障碍物的距离,此次扩展会与障碍物发生碰撞导致扩展失败,影响规划效率。

如图11所示,在存在3个障碍物的空间中,当前扩展树共有6个节点。在扩展树中找到距离目标点 q_{goal} 最近的节点为 $q_{nearest}$,并且 $q_{nearest}$ 与3个障碍物的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ,则本次扩展结束后更新的步长为 $\rho = \beta \times \min(d_1, d_2, d_3) = \beta \times d_1$ 。增加自适应步长策略后的规划结果如图12所示。

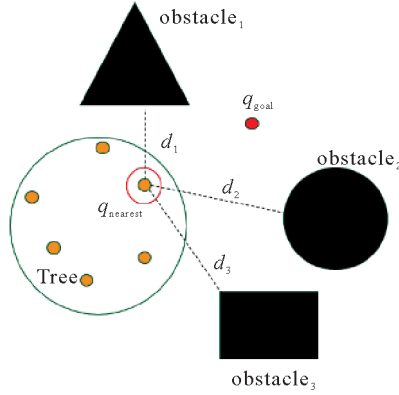


图11 自适应步长

Fig.11 Appropriate step size

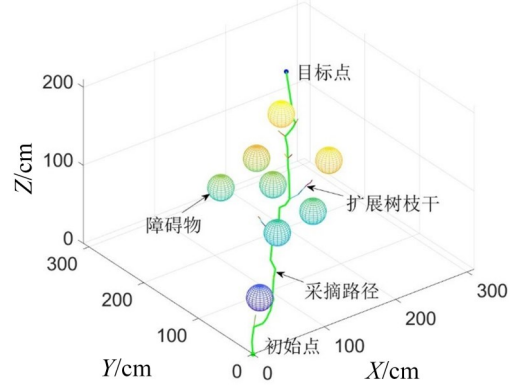


图12 添加自适应步长后的规划结果

Fig.12 Planning result after adding appropriate step size

自适应步长可根据障碍物的密度自动调节步长大小,当扩展树生长到靠近障碍物时,步长自动调小,贴近障碍物运动而不发生碰撞,在避开障碍物后,步长增大,能够以较快的速度向目标点靠近。但是,当障碍物存在凹陷、重叠等情况下时,节点靠近这类障碍物时容易陷入死区,因其步长太小而难以逃逸;当远离障碍物且逐渐靠近目标点时,也会因步长过大而在目标点附近产生振荡现象。因此,对步长给定一个上下限,相当于在靠近或远离障碍物的时候使用固定步长,以避免上述情况发生。

1.4 路径优化

RRT算法形成的路径是由空间中的一系列离散点所组成的连续线段,其路径节点集合中存在大量冗余节点,路径平滑性较差,不利于机械臂平稳运行。假设RRT算法产生的路径节点集合为 $Tree = (q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N)$,选取3个节点:节点 i ,节点 $i+1$,节点 $i+2$,其中 $i \in (1, 2, \dots, N-2)$,对节点 q_i, q_{i+1} 和 q_{i+2} 进行障碍物检测,若节点之间不存在障碍物,则删除节点 q_{i+1} 和与节点 q_{i+1} 相连接的线段,从 q_1 开始遍历所有节点序列,简化后的路径如图13黑色箭头线所示。

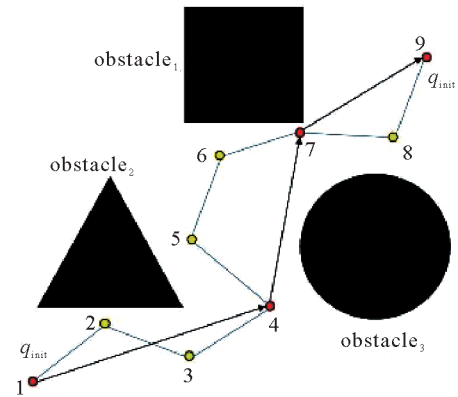


图13 冗余节点删除示意

Fig.13 Schematic diagram for deleting redundant nodes

为了使拐点处的路径趋近平滑,提高机械臂的柔顺性,本研究采用四阶三次B样条曲线路径进行平滑处理。 k 阶B样条曲线定义为:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,k}(u) \quad (7)$$

式(7)中, P_i 表示给定曲线的控制点, $B_{i,k}(u)$ 表示 k 阶B样条基函数。 k 阶B样条基函数的递推式为:

$$B_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u) \quad (9)$$

式(8)(9)中 u_i 表示一系列节点,通过式(9)可以得出四阶三次B样条曲线表达式为:

$$P_i(u) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & u & u^2 & u^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

当给定路径节点后,通过式(10)可以求出一系列满足B样条插值的空间序列点,从而构造出插值曲线,得出机械臂的运动平滑路径。

1.5 柑橘采摘环境下的TSP算法改进

采摘机器人在解决多任务目标的采摘问题时,一般选择的是由外向内、由近及远的采摘方式,没有对所有目标果实的采摘路径做整体最优规划。为了使多目标采摘的总路径更优,高效率地实现机械臂对柑橘的连续采摘,本研究结合基于遗传算法的旅行商问题,考虑空间中的障碍物,引入障碍物因子,对多任务目标的采摘顺序进行规划。

旅行商问题是指给定多个城市的坐标位置或者各个城市之间的距离,求解遍历所有城市并返回出发城市的最短距离。TSP问题模型可以表达为:

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} d(\text{city}_i, \text{city}_{i+1}) + d(\text{city}_n, \text{city}_1) \quad (11)$$

与遍历城市不同的是,机械臂在执行采摘任务时,总是由末端执行器的初始位置出发,采摘作业结束后回到初始位置。假设机械臂末端执行器的初始位置为home,多个柑橘目标为Goals = {Goals₁, Goals₂, ..., Goals_n} ,那么任意一次多任务目标采摘的遍历顺序表示为Visit = {home, Goals₁, Goals₂, ..., Goals_n, home} ,则多目标采摘的TSP问题模型应为:

$$\min (d(\text{home}, \text{Goals}_1) + \sum_{i=1}^{n-1} d(\text{Goals}_i, \text{Goals}_{i+1}) + d(\text{Goals}_n, \text{home})) \quad (12)$$

当需要遍历一定数量的目标时,传统求解的方法计算量非常大,规划时间过长。本研究采用遗传算法(GA)实现单旅行商问题规划,将待采摘的柑橘看成TSP问题中的城市,达到机械臂末端遍历所有柑橘的目的。遗传算法对环境因素的要求很低,且拥有全局搜索能力,在求解TSP时有着较大的优势。

使用TSP算法解决多个目标的遍历问题时,两个目标之间的距离一般采用欧氏距离。然而对于柑橘园中多个柑橘的连续采摘问题,待采摘的柑橘之间可能存在障碍物,此时采摘机器人的末端执行器实际走过的路径一般不是直线形式,导致机械臂末端实际走过的距离大于规划时使用的欧氏距离,以至于求解得到的遍历顺序通常不是最优解,因此本研究在计算目标之间的欧氏距离时引入一个障碍物因子,称为带障碍物因子的欧氏距离,定义为:

$$d_\sigma(i, j) = \begin{cases} d(i, j), & i \rightarrow j \in C_{\text{free}} \\ d(i, j), & i \rightarrow j \in C_{\text{obs}} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中 σ 代表障碍物因子, $\sigma > 1$, $i \rightarrow j$ 表示目标*i*到目标*j*的直线轨迹, C_{free} 为自由区域, C_{obs} 为障碍物区域。

将改进后的TSP与RRT算法结合,对多目标柑橘的连续采摘进行轨迹规划。假设有*n*个待采摘柑橘,机械臂末端的初始位置为home,采用改进后的TSP算法规划得到遍历顺序,则多目标连续采摘的最终轨迹为:

$$\text{RRT}(\text{home}, \text{Goals}_1) + \sum_{i=1}^{n-1} \text{RRT}(\text{Goals}_i, \text{Goals}_{i+1}) + \text{RRT}(\text{Goals}_n, \text{home}) \quad (14)$$

其中, RRT(a, b)表示使用改进RRT算法规划从点a到点b的轨迹。

2 结果与分析

2.1 多目标连续采摘仿真试验

在开心树模型中选取10个枝干的末端并对其标记,代表待采摘的柑橘中心位置。对10个目标点分别采用常规的TSP规划和带障碍物因子的TSP规划得到遍历顺序,其中目标之间存在障碍物时障碍物因子系数 $\sigma = 1.2$,规划的遍历结果如图14所示。前者的遍历顺序为home→2→3→1→9→5→7→8→6→4→10→home,后者的遍历顺序为home→3→10→4→6→8→7→9→5→home,改进前后规划得到的遍历结果并不相同。

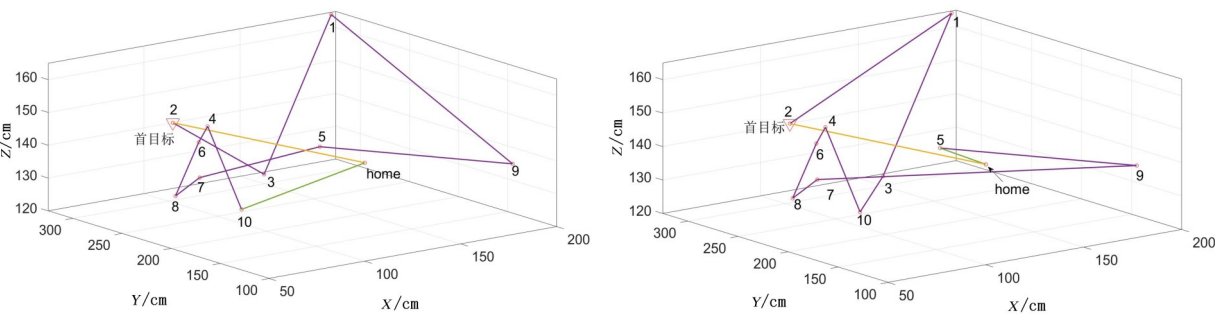
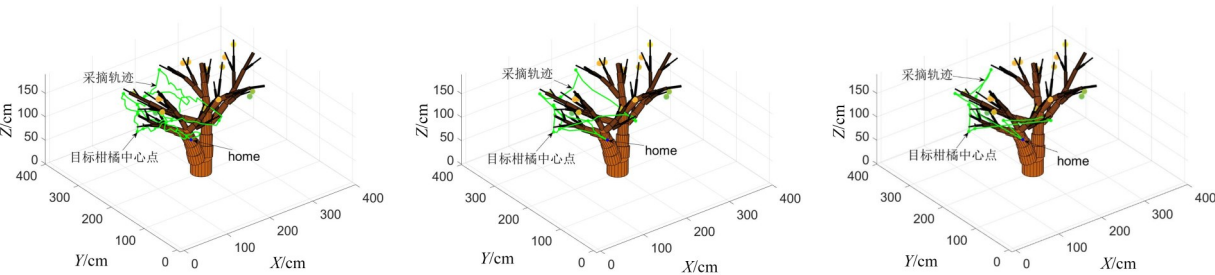


图 14 TSP 规划结果(左)和改进 TSP 规划结果(右)

Fig.14 Planning results of TSP(left)and improved TSP(right)

分别采用 RRT*与 RRT-connect 算法对常规 TSP 的遍历结果进行采摘轨迹规划,并使用改进 RRT 算法对带障碍物因子的 TSP 遍历结果进行采摘轨迹规划。由于 RRT*与 RRT-connect 算法的收敛速度较慢,因此两者都采用随机采样策略,阈值设置为 0.3。而 TSP_RRT 算法的采样策略中的阈值 $\Delta = 0.5$,生长比 $k = 0.8$,步长更新系数 $\beta = 0.5$,冗余节点删除操作中的阈值为 0.5。若每次采摘后机械臂无需回到初始状态,则仿真得到的机械臂末端移动轨迹如图 15 所示。



(a) TSP_RRT-connect 下的多目标连续采摘路径 (b) TSP_RRT*算法下的多目标连续采摘路径 (c) TSP_RRT 算法下的多目标连续采摘路径

(a) The continuous picking path of multi-objective under TSP_RRT-connect (b) The continuous picking path of multi-objective under TSP_RRT* (c) The continuous picking path of multi-objective under TSP_RRT

图 15 各种算法下的机械臂末端移动轨迹

Fig.15 The end movement trajectory of a robotic arm under various algorithms

2.2 仿真结果与算法性能分析

为验证改进后 RRT 算法的性能,在存在球体障碍物的环境中进行单目标采摘仿真实验,初始点坐标为(0,0,0),目标点坐标为(200,200,200),采样策略中的阈值 $\Delta = 0.5$,生长比 $k = 0.8$,步长更新系数 $\beta = 0.5$,冗余节点删除中的阈值为 0.5。100 次仿真实验的平均结果如表 1 所示。

表 1 仿真环境下不同算法的采摘轨迹长度

Tab.1 Picking paths for different algorithms in simulation environment

规划算法	多目标采摘轨迹长度/cm
Planning algorithm	Trajectory length of multi-target picking
RRT-connect	514.486 1
RRT*	393.252 3
改进 RRT Improved RRT	364.488 0

RRT_connect 和 RRT*算法是在 RRT 算法基础上分别引入双数扩展环节和重新连接、优化步骤,RRT_connect 算法可以减少采样次数,加快搜索速度,RRT*算法可以提高路径规划的质量和效率。本研究将改进的 RRT 算法与 RRT_connect、RRT*算法相比较,仿真结果表明,相比于 RRT-connect 与 RRT*算法,改进 RRT 算法规划得到了路径分别缩短了 29.15%、7.31%,验证了改进的 RRT 算法在对单个柑橘进行采摘时,其规划得到的采摘轨迹长度相比 RRT-connect 与 RRT*算法的更短。

为了验证 TSP_RRT 算法的性能,重复采摘仿真试验 120 次,并将其与基于 TSP 多目标规划下的 RRT*、RRT-connect 算法进行对比,得到多目标采摘轨迹的平均结果如表 2 所示:

表 2 仿真环境下不同算法的采摘性能对比

Tab.2 Comparison of picking performance of different algorithms in simulation environment

规划算法 Planning algorithm	多目标采摘轨迹长度/cm Trajectory length of multi-target picking	规划时间/s Planning time
TSP_RRT-connect	1 409.089 0	6.68
TSP_RRT*	1 027.317 5	9.29
TSP_RRT	922.685 1	4.61

仿真实验结果得出,本研究提出的改进 RRT 算法与带障碍物因子的 TSP 算法在对多任务目标进行连续采摘规划中,得到的采摘路径长度相比于基于 TSP 的 RRT-connect 多目标连续采摘路径缩短 34.52%,相比于基于 TSP 的 RRT* 多目标连续采摘路径缩短 10.19%;路径规划时间相比于基于 TSP 的 RRT-connect 的规划时间减少了约 31%,相比于基于 TSP 的 RRT* 的规划时间减少了约 50%。基于 TSP_RRT 的路径规划的成功率约为 98.8%。因此,本研究所提出的基于 TSP 的改进 RRT 算法显著提高了规划时间和效率,缩短了采摘路径,在复杂多障碍环境中具有良好的路径规划能力。

3 结 论

本研究为实现柑橘的连续采摘,对多目标遍历规划算法 TSP 与轨迹规划算法 RRT 进行了一系列改进,并通过仿真验证了改进后算法的优越性。

(1)改进 RRT 算法。针对 RRT 算法进行轨迹规划时采样随机性强、冗余点多、轨迹不平滑等问题,引入采样阈值、目标引力、自适应步长等策略,并结合四阶三次 B 样条曲线提高了收敛速度和规划效率,改善了轨迹平滑性。

(2)引入带障碍物因子的 TSP 算法。考虑空间障碍物的影响,在计算欧氏距离时引入障碍物因子获取遍历顺序的最优解,缩短了采摘规划路径。

仿真结果证明,使用 TSP_RRT 算法规划得到的连续采摘轨迹长度相比于基于 TSP 的 RRT-connect 多目标连续采摘轨迹缩短 34.52%,相比于基于 TSP 的 RRT* 多目标连续采摘轨迹缩短 10.19%。规划时间相比于其他两种算法分别减少了 31%、50%。该方法有效缩短了采摘路径长度,减少了规划时间,提高了规划效率,具有较好的发展应用前景。

参考文献 References:

- [1] 郑永军,陈炳太,吕昊墩,等.中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J].农业工程学报,2020,36(20):110-124.
ZHENG Y J, CHEN B T, LYU H T, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(20): 110-124.
- [2] 马冀桐,王毅,何宇,等.基于构型空间先验知识引导点的柑橘采摘机械臂运动规划[J].农业工程学报,2019,35(8):100-108.
MA J T, WANG Y, HE Y, et al. Motion planning of citrus harvesting manipulator based on informed guidance point of configuration space[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(8): 100-108.
- [3] 郑永军,江世界,陈炳太,等.丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2020,51(11):1-20.
ZHENG Y J, JIANG S J, CHEN B T, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(11): 1-20.
- [4] 熊俊涛,叶敏,邹湘军,等.多类型水果采摘机器人系统设计与性能分析[J].农业机械学报,2013,44(S1):230-235.
XIONG J T, YE M, ZOU X J, et al. Design and performance analysis on multi-type fruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2013, 44(S1): 230-235.
- [5] TANG Z L, XU L J, WANG Y C, et al. Collision-free motion planning of a six-link manipulator used in a citrus picking robot[J]. Applied sciences, 2021, 11: 11336.
- [6] YIN H S, SUN Q X, REN X, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous citrus-harvesting robot

- [J].Journal of field robotics,2023,40(6):1363-1387.
- [7] 熊春源,熊俊涛,杨振刚,等.基于深度强化学习的柑橘采摘机械臂路径规划方法[J].华南农业大学学报,2023,44(3):473-483.
- XIONG C Y, XIONG J T, YANG Z G, et al.Path planning method for citrus picking manipulator based on deep reinforcement learning[J].Journal of south China agricultural university, 2023, 44(3):473-483.
- [8] WANG Y, YANG Y, YANG C H, et al.End-effector with a bite mode for harvesting citrus fruit in random stalk orientation environment[J].Computers and electronics in agriculture, 2019, 157:454-470.
- [9] 祁若龙,周维佳,王铁军.一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法[J].机器人,2014,36(3):263-270.
- QI R L, ZHOU W J, WANG T J.An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm[J].Robot, 2014, 36(3):263-270.
- [10] 苑严伟,张小超,胡小安.苹果采摘路径规划最优化算法与仿真实现[J].农业工程学报,2009,25(4):141-144.
- YUAN Y W, ZHANG X C, HU X A.Algorithm for optimization of apple harvesting path and simulation[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2009, 25(4):141-144.
- [11] LI F, HUANG Z and XU L.Path planning of 6-DOF venipuncture robot arm based on improved a-star and collision detection algorithms[C]//2019 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO), Dali, China: IEEE, 2019:2971-2976.
- [12] VITURINO C, OLIVEIRA D M, CONCEICAO A, et al.6D robotic grasping system using convolutional neural networks and adaptive artificial potential fields with orientation control[C]//2021 Latin American robotics symposium (LARS), 2021 Brazilian symposium on robotics (SBR), and 2021 workshop on robotics in education (WRE), Natal, Brazil: IEEE, 2021:144-149.
- [13] 姬伟,程风仪,赵德安,等.基于改进人工势场的苹果采摘机器人机械手避障方法[J].农业机械学报,2013,44(11):253-259.
- JI W, CHENG F Y, ZHAO D A, et al.Obstacle avoidance method of apple harvesting robot manipulator[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2013, 44(11):253-259.
- [14] 陈满意,张桥,张弓,等.多障碍环境下机械臂避障路径规划[J].计算机集成制造系统,2021,27(4):990-998.
- CHEN M Y, ZHANG Q, ZHANG G, et al.Obstacle avoidance path planning of manipulator in multiple obstacles environment[J].Computer integrated manufacturing systems, 2021, 27(4):990-998.
- [15] 宋勇,张蕾,田荣,等.复杂多场景下机械臂避障运动规划方法研究[J].西北工业大学学报,2023,41(3):500-509.
- SONG Y, ZHANG L, TIAN R, et al.Research on obstacle avoidance motion planning method of manipulator in complex multi scene[J].Journal of northwestern polytechnical university, 2023, 41(3):500-509.
- [16] 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 Y J, WANG Y C, HE Z, 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.
- [17] SEPEHRI A, MOGHADDAM A.A motion planning algorithm for redundant manipulators using rapidly exploring randomized trees and artificial potential fields[J].IEEE access, 2021, 9:26059-26070.
- [18] CAO X M, ZOU X J, JIA C Y, et al.RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J].Computers and electronics in agriculture, 2019, 156:105-118.
- [19] 李洋,徐达,周诚.基于自适应步长RRT的双机器人协同路径规划[J].农业机械学报,2019,50(3):358-367.
- LI Y, XU D, ZHOU C.Cooperation path planning of dual-robot based on self-adaptive stepsize RRT[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(3):358-367.
- [20] WU C, FU X, PEI J, et al.A novel sparrow search algorithm for the traveling salesman problem[J].IEEE access, 2021, 9:153456-153471.
- [21] 于宏涛,高立群,韩希昌.求解旅行商问题的离散人工萤火虫算法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(1):126-131.
- YU H T, GAO L Q, HAN X C.Discrete artificial firefly algorithm for solving traveling salesman problems[J].Journal of south China university of technology (natural science edition), 2015, 43(1):126-131.
- [22] 李涛,邱权,赵春江,等.矮化密植果园多臂采摘机器人任务规划[J].农业工程学报,2021,37:1-10.
- LI T, QIU Q, ZHAO C J, et al.Task planning of multi-arm harvesting robots for high-density dwarf orchards[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(2):1-10.