

# 基于强化 RRT 算法的机械臂路径规划

王雨<sup>1,2,3</sup>, 刘延俊<sup>1,2,3,4\*</sup>, 贾华<sup>1,2,3</sup>, 薛钢<sup>2,3,4</sup>

(1.山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061; 2.山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 3.山东大学机械工程专业国家级实验教学示范中心, 山东 济南 250061; 4.山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237)

**摘要:**针对快速拓展随机树算法(rapidly-exploring random trees, RRT)存在采样随机、重复搜索、偏离目标点和节点冗余等问题,提出一种强化快速拓展随机树算法(intensity-guide rapidly-exploring random trees, IG-RRT)。采用覆盖剔除机制强化算法搜索能力,将已搜索区域进行覆盖,覆盖后不再进行搜索和产生新节点,避免重复搜索,提高搜索能力和搜索效率。后续加入目标引导概率,根据地图难度对目标引导概率进行调整,强化算法目标趋向性,对末端节点采用贪婪思想,强化算法收敛性。通过简化路径,去除冗余点,利用三次B样条曲线平滑拐点,提高路径质量。仿真试验表明,IG-RRT算法性能优于传统RRT算法及其相关衍生算法。IG-RRT算法可以增强对复杂约束空间的搜索能力,加快算法的收敛速度,提高路径规划的成功率。

**关键词:**路径规划;RRT算法;机械臂;趋势强化;路径平滑

**中图分类号:**TP242

**文献标志码:**A

**引用格式:**王雨,刘延俊,贾华,等.基于强化RRT算法的机械臂路径规划[J].山东大学学报(工学版),2022,52(4):0-00.

WANG Yu, LIU Yanjun, JIA Hua, et al. Path planning of mechanical arm based on intensified RRT algorithm[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 52(4):0-00.

## Path planning of mechanical arm based on intensified RRT algorithm

WANG Yu<sup>1,2,3</sup>, LIU Yanjun<sup>1,2,3,4\*</sup>, JIA Hua<sup>1,2,3</sup>, XUE Gang<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 4. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of random sampling, repeated search, deviation from target points and node redundancy in rapidly-exploring random trees (RRT) algorithm, an intensified rapidly-exploring random trees (IG-RRT) algorithm was proposed. The coverage elimination mechanism was used to intensify the search ability of the algorithm and cover the searched area. No search and new nodes were generated after coverage to avoid repeated search and improve search ability and search efficiency. The target guidance probability that was adjusted according to the map difficulty was added to intensify the target tendency of the algorithm. The greedy idea was added at the end nodes to intensify the convergence of the algorithm. Simplifying the path, removing redundant points, and cubic B-spline curve were used to smooth the inflection points and improve the path quality. Simulation result showed that the performance of the IG-RRT algorithm was better than the traditional RRT algorithm and its related derivative algorithms. The IG-RRT algorithm could enhance the search ability of complex constraint space, speed up the convergence speed of the algorithm and improve the success rate of path planning.

**Key words:** path planning; RRT algorithm; mechanical arm; intensify tend; path smoothing

收稿日期:2022-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52001186);山东省自然科学基金项目(ZR2020QE292)

第一作者简介:王雨(1998—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为机械臂路径规划算法。E-mail:yu5723@163.com

\*通信作者简介:刘延俊(1965—),男,山东济南人,教授,博士生导师,主要研究方向为自动化机械系统、流体动力控制、波浪能发电技术、深海探测技术与装备。E-mail:lyj111ky@163.com

0 引言

随着工业机器人的迅速发展,制造业趋向于自动化和无人化,工业机械臂具有工作空间大、操作简便、灵活性和自由度高等优点<sup>[1]</sup>,近年来被大量应用于制造加工、拆卸装配、焊接、喷漆和码垛等领域<sup>[2-5]</sup>,减少安全事故的发生,提高了安全性与可靠性。在工业机器人的发展过程中,路径规划问题尤为重要,路径规划的目的是在复杂的工作环境中,找到一条可以从初始位置避开所有空间障碍物和自身碰撞到达目标位置的无碰撞路径<sup>[6]</sup>。为实现路径规划,研究人员提出了多种路径规划算法,已经应用的算法有:(1)势场法<sup>[7]</sup>,在环境中构建一个虚拟势场,计算难度较小,但搜索过程中容易陷入局部最小值,全局性较差。(2)基于栅格分割的算法,如 A\*、D\* 算法<sup>[8]</sup>,算法需要对于空间进行栅格划分,随着空间复杂程度增大,计算量将大大增加。(3)智能规划算法,如粒子群算法<sup>[9]</sup>、遗传算法<sup>[10]</sup>和蚁群算法<sup>[11]</sup>,此类算法对路径进行优化时需要大量的参数进行调节和迭代,计算速度较慢。

快速拓展随机树算法 (rapidly-exploring random trees, RRT) 是由文献[12]提出的一种基于随机采样的快速路径规划算法,算法采样速度快且具有概率完备性,可用于解决复杂的高维空间的路径规划问题。由于其随机采样的特性,RRT 算法存在拓展无方向性、随机性高、偏离最优解等问题。针对 RRT 算法存在的问题,许多专家和学者提出了基于 RRT 算法的改进算法<sup>[13]</sup>。文献[14]提出了 RRT-Connect 算法,算法采用双向拓展和贪婪思想,提高了搜索速度,但在复杂环境中,仍然存在随机性高的问题。之后文献[15]提出了 RRT\* 算法,采用重新计算父节点和重新布线的方法进行迭代从而获取更优的路径,但收敛速度慢,且未能提高搜索能力。在 RRT\* 的基础上,文献[16]提出了 IB-RRT\* 算法,文献[17]提出 RRT\*-AB 算法<sup>[17]</sup>,前者采用双向搜索算法与 RRT\* 算法结合,后者采用快速定位目标区域的策略,致力于搜索最优路径的同时,增加算法的收敛速度,但是二者都是在 RRT\* 算法的基础上进行改进的,仍然存在实时性较差的问题。文献[18]在 RRT 算法的基础上,加入强化学习,提出一种基于学习的多 RRT 路径规划方法 LM-RRT,提高了局部空间的搜索能力。文献[19]

提出了适用于复杂配置空间的模糊贪婪 RRT 路径规划算法 FG-RRT,通过加入模糊推理系统减少初始路径中的节点数量来降低搜索时间和计算复杂度。文献[20]将人工势场与 RRT 算法进行结合,使路径规划过程中可以有效避开障碍物,且不会陷入局部最小,提高 RRT 算法搜索效率。

本研究针对 RRT 及其相关算法存在的问题,首先引入覆盖剔除机制,说明覆盖剔除机制的工作原理,其次加入目标引导概率强化 RRT 算法向目标点搜索的趋向性,同时利用末端强化快速结束搜索,后续简化路径,用三次 B 样条曲线平滑路径,最后利用 Matlab 软件进行试验仿真,验证强化后算法的有效性和优越性。

1 碰撞模型

1.1 运动学模型

本研究采用 KUKA 公司的 R540 系列机械臂作为研究对象,机械臂外观如图 1 所示。

图 1 KUKA R540 机械臂外观示意图

Fig.1 Appearance diagram of KUKA R540 manipulator

R540 为六自由度机械臂,本研究采用改进的 DH 参数法<sup>[21]</sup>对其建立坐标系,根据机械臂相关参数和工作空间写出的 DH 参数表,如表 1 所示。

表 1 R540 机械臂 DH 参数表

Table 1 DH parameter table of R540 manipulator

$i$	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/\text{mm}$	$d_i/(\text{mm})$	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	0	$\pm 170$
2	90	20	0	$-170 \sim 50$
3	0	260	0	$-110 \sim 155$
4	90	20	260	$\pm 175$
5	90	0	0	$\pm 120$
6	-90	0	0	$\pm 350$

其中, $i$  表示关节连杆的序号, $\alpha$  表示连杆扭转角, $a$  表示连杆长度, $d$  表示连杆偏距, $\theta$  表示关节角,机械臂连杆之间的变换矩阵如

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表1中各个关节的参数代入式(1),并按照连杆顺序将连杆变换矩阵依次相乘得到机械臂的正运动学方程,从而得到机械臂的末端位姿

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $n, o, a$ 表示机械臂末端的姿态, $p$ 表示机械臂末端的空间位置。

逆运动学是指在已知机械臂末端位姿的情况下求出相应的各关节角度,采用代数法<sup>[22]</sup>求解逆运动学,计算后得到8组逆解,根据关节角度范围以及碰撞检测的关系,最终在8组逆解中找到最优解。

### 1.2 碰撞检测

空间中的碰撞检测包含机械臂连杆自身的碰撞检测以及连杆与空间障碍物之间的碰撞检测,根据R540机械臂的连杆形状,对机械臂连杆采用圆柱体包络,对空间中的球形障碍物采用球体包络,长方体障碍物采用AABB包围盒进行包络<sup>[23]</sup>。处理后,机械臂连杆自身的碰撞检测简化为求解两个圆柱体中心线距离与半径关系的问题,机械臂与空间障碍物的碰撞检测简化为求解圆柱中心线与球体半径关系的问题以及圆柱中心线与AABB包围盒各平面的距离问题<sup>[24]</sup>,检测过程中限制机械臂关节角,避免机械臂自身碰撞,包络后的障碍物加上机械臂圆柱包络的半径,对障碍物边缘放大,在机械臂和障碍物之间产生一个安全距离,避免碰撞。将规划后的路径通过逆运动学进行求解,每个对应的位置可以得到8组逆解,在这8组逆解中取1组与障碍物无碰撞的关节角。

## 2 基础 RRT 算法

RRT算法是一种基于采样的路径规划算法,通过采样在工作空间全局搜索,以给定的起点为根节点,利用随机取点生成新的子节点使拓展树不断生长,具有出色的空间搜索能力,对高维空间的路径规划也有出色的性能。但由于其随机采样的特性,RRT算法存在随机性强、重复搜索和路径不平滑等问题。

基础RRT算法拓展原理如图2所示。

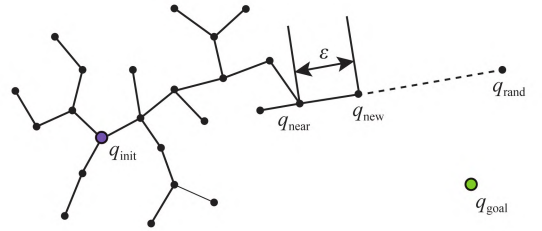


图2 RRT算法基本原理图

Fig.2 Schematic diagram of RRT algorithm expansion

基础RRT算法主要步骤如:(1)在空间中定义起点 $q_{init}$ 和目标点 $q_{goal}$ ,以 $q_{init}$ 为根节点建立快速拓展随机树 $T$ 。(2)在空间中随机获取一个随机点 $q_{rand}$ 。(3)历经拓展树全部节点,找到距离 $q_{rand}$ 最近的节点 $q_{near}$ 。(4)检测 $q_{near}$ 和 $q_{rand}$ 之间的可行性,若不可行则丢弃,重新取点;若可行则进行下一步的判断。(5)当 $q_{near}$ 和 $q_{rand}$ 之间的距离小于步长 $\epsilon$ ,将 $q_{near}$ 和 $q_{rand}$ 直接相连,此时新节点 $q_{new} = q_{rand}$ ,将 $q_{rand}$ 添加到拓展树 $T$ 中;当 $q_{near}$ 和 $q_{rand}$ 之间的距离大于或等于步长 $\epsilon$ 时,由 $q_{near}$ 向 $q_{rand}$ 所在方向拓展一个步长 $\epsilon$ ,生成新节点 $q_{new}$ ,将 $q_{new}$ 添加到拓展树 $T$ 中。(6)循环上述过程,直至 $q_{new} = q_{goal}$ 或 $q_{new}$ 和 $q_{goal}$ 的距离小于步长 $\epsilon$ ,完成路径规划,结束循环。(7)由 $q_{goal}$ 进行回溯找到规划的路径。

## 3 强化 RRT 算法

### 3.1 覆盖剔除机制

针对RRT算法出现重复搜索和节点密度过大的问题,本研究提出覆盖剔除机制强化RRT算法(Intensity RRT, I-RRT),对于未搜索区域的拓展趋势,减少重复搜索,原理如图3所示。

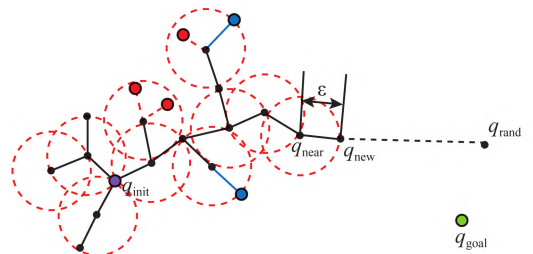


图3 覆盖剔除机制原理图

Fig.3 Schematic diagram of coverage elimination mechanism

首先以根节点 $q_{init}$ 为圆心,步长 $\epsilon$ 为半径画圆覆盖已搜索区域,对新节点 $q_{new}$ 采用剔除机制:如果 $q_{new}$ 位于区域内部则丢弃;如果新节点位于圆形区域的边上,则将 $q_{init}$ 与 $q_{new}$ 相连,将 $q_{new}$ 加入到拓展树 $T$ 中,完成一次拓展。后续过程中,重复此操作,以将要拓展的最近节点 $q_{near}$ 作为圆心进行后续



的拓展。图中的红色虚线为拓展树搜索的覆盖区域,在此区域内,不产生新节点,图中所示的红色节点表示被剔除的节点,蓝色节点表示符合要求的新节点,加入拓展树并作为下一步拓展新节点的父节点。

本研究采用迷宫地图进行仿真分析,验证覆盖剔除机制的合理性。地图大小为 500 像素×500 像素,起点坐标为 (10,10),目标点坐标为 (490,490),根据地图尺寸取合适的步长,本研究取拓展步长  $\varepsilon=20$ 。RRT 算法和 I-RRT 算法在地图中进行 100 次仿真,对比数据的平均值,图 4 和表 2 给出了仿真结果。

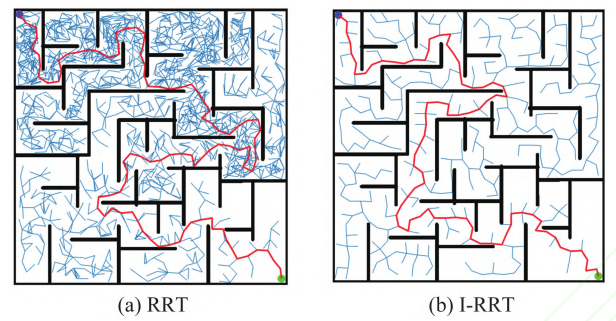


图 4 RRT 算法与 I-RRT 算法在迷宫空间下的比较示意图  
Fig.4 Comparison of RRT algorithm and I-RRT algorithm in maze space

表 2 迷宫地图下 RRT 与 I-RRT 仿真数据对比 Table 2 Comparison of RRT and I-RRT simulation data under maze map			
算法	节点/个	时间/s	成功率/%
RRT	1 664.86	103.66	28
I-RRT	432.80	15.48	100

由图 4 可知,随着迭代次数增加,RRT 算法在复杂约束区域出现重复搜索,导致该区域节点密度大,搜索凌乱。加入覆盖剔除机制后,空间节点密度平均,无重复搜索和拓展树交叉的现象。对比表 2 的仿真数据,RRT 算法加入覆盖剔除机制以后,减少了拓展树的节点数量,缩短搜索时间,提高迷宫空间路径规划的成功率。

3.2 加入目标引导概率

针对基础 RRT 算法随机性强和对偏离目标的区域出现无效搜索的问题,在覆盖剔除机制的基础上,对 I-RRT 算法加入目标引导概率,提出 IG-RRT。

引入概率阈值  $p_{\text{guide}}$ ,拓展树在拓展新节点时利用均匀随机分布函数产生一个随机概率  $p$ ,将  $p$  与概率阈值比较,若  $p < p_{\text{guide}}$ ,则  $q_{\text{rand}}$  取目标点  $q_{\text{goal}}$ ;若  $p > p_{\text{guide}}$ ,则  $q_{\text{rand}}$  随机取点。图 5 是 I-RRT 算法加入目标引导概率前后的拓展示意图,对比图

5(a)(b),加入目标引导概率后,IG-RRT 算法目标性更强,收敛速度加快,提升了算法的搜索效率和搜索速度,解决了 RRT 算法随机性强,无方向生长的问题。

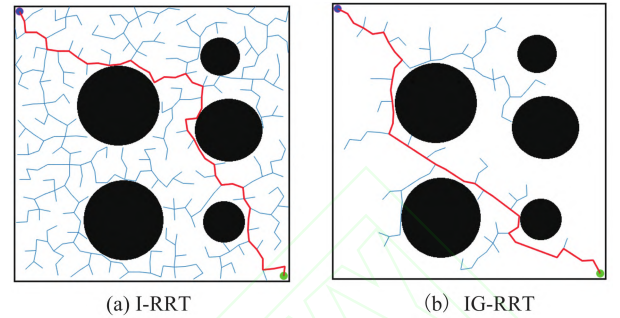


图 5 I-RRT 与 IG-RRT 在路径规划中的比较  
Fig.5 Comparison of I-RRT and IG-RRT in path planning

目标引导概率使 IG-RRT 算法保留了随机搜索特性,又有一定的概率向目标方向搜索,目标搜索的趋向性强弱与  $p_{\text{guide}}$  的大小有关, $p_{\text{guide}}$  越大,趋势越强。对图 5 所示的地图,IG-RRT 算法选取不同的目标引导概率  $p_{\text{guide}}$  进行仿真试验,找到当前地图类型下的最优目标引导概率。以  $p_{\text{guide}}=0.05$  作为第一个目标引导概率,后续以 0.05 进行递增,最大  $p_{\text{guide}}=0.95$ ,共 20 个组。对于每个概率在地图中的路径规划进行 100 次试验仿真,试验得到搜索时间的平均值如图 6 所示。

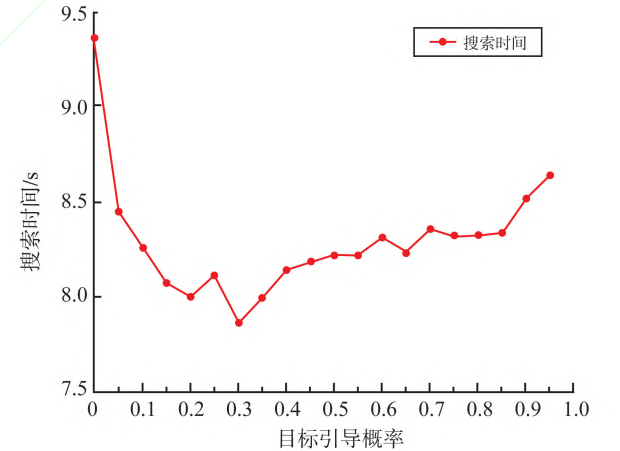


图 6 最优目标引导概率求解示意图  
Fig.6 Schematic diagram of optimal target guidance probability solution

I-RRT 算法的强化是为了增加搜索速度,减少搜索时间,因此根据搜索时间选取最优目标引导概率。由图 6 可知,搜索时间随目标引导概率的增加呈现先降低后增加的趋势,在  $p_{\text{guide}}=0.30$  时搜索时间最短。随着目标引导概率的增加,搜索时间会再次变长,是因为目标引导概率越大,算法需要花费越多的时间对障碍物进行避障检测,趋向性越强,检测次数越多。因此选取最优目标引

导概率时,应考虑算法避障花费时间对于整体搜索时间的影响。

3.3 末端节点的强化

RRT 算法在拓展树到达目标区域附近时,即使新节点与目标点之间没有障碍物,由于步长一定,拓展树无法直接到达目标点,会产生无效搜索。图 7 针对此问题,加入对末端节点的强化,采用贪婪思想,对最新节点尝试与目标点直接相连。

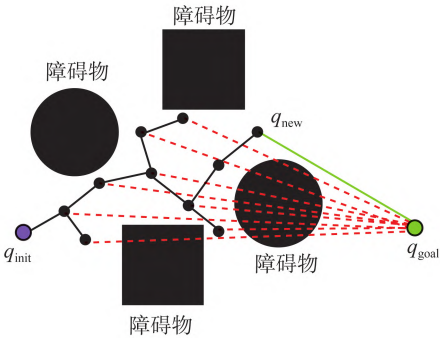


图 7 末端强化原理图  
Fig.7 Schematic diagram of end intensifying

拓展树生成新节点后,判断末端节点到目标点的可行性,即检测末端节点与目标点之间有无障碍物,如果没有,则不计步长,将末端节点直接与目标点相连,停止节点拓展,完成路径规划。

3.4 路径简化

初始路径中存在大量无效节点,导致初始路径与最优路径相差较大,图 8 对路径简化处理,将路径中的多余节点进行剔除,缩短路径长度。

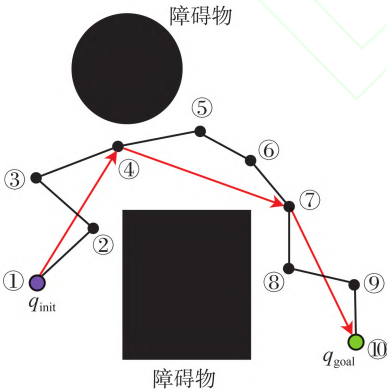


图 8 路径简化原理图  
Fig.8 Schematic diagram of path simplification

具体步骤:(1)从初始节点  $q_{init}$ ,对每个节点按顺序编号,储存节点的编号信息。(2)从初始节点  $q_{init}$  开始,尝试对后续每个节点进行尝试连接,记录可连接节点序号。(3)对可连接后续节点按序号从小到大排序整理,取序号最大的节点相连。(4)以上一步相连的节点为新的出发点重复上述操作,直至到达目标点。

路径简化后,图 8 中的节点由原来的连接顺序变为了①→④→⑦→⑩,去除了路径中的多余节点,缩短了路径的长度。

3.5 路径平滑处理

RRT 算法规划出的路径中存在许多拐点,会使机械臂在路径规划时出现抖动,降低机械臂的平稳性,因此需要对路径进行平滑处理。为防止平滑后的路线与障碍物碰撞,期望采用对直线部分影响不大,只对拐点部分进行局部处理的方法进行路径平滑处理。

B 样条曲线具有局部可控的特点,符合路径规划中只对拐点部分进行平滑的要求,B 样条次数的选取对于曲线的平滑程度具有很大的影响,次数越高,处理后的曲线就越平滑,但复杂程度越高,计算难度加大。出于对轨迹处理的平滑度与计算难度的综合考虑,选取三次 B 样条曲线对路径进行平滑处理,三次 B 样条曲线具有良好的局部修改特性、凸包性和对称性,且控制点容易选取,计算简单。三次 B 样条曲线的基函数

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{6}(-u^3 + 3u^2 - 3u + 1) \\ b_1 = \frac{1}{6}(3u^2 - 6u + 4) \\ b_2 = \frac{1}{6}(-3u^3 + 6u^2 + 3u + 1) \\ b_3 = \frac{1}{6}u^3 \end{cases},$$

式中: $u$  表示节点, $b_0 \sim b_3$  表示基函数。

图 9 展示了路径简化以及平滑处理的过程。

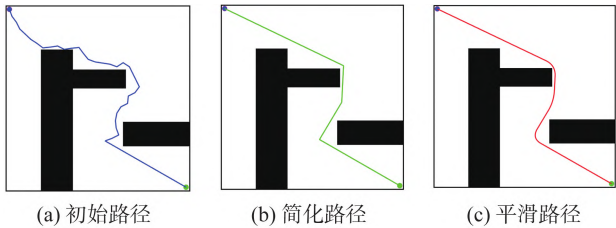


图 9 路径简化平滑处理示意图  
Fig.9 Schematic diagram of path simplification and smoothing

3.6 强化 RRT 算法描述

图 10 是强化后 IG-RRT 算法的算法流程图,确定起始点与目标点后,在目标引导概率的引导下,向目标所在方向搜索,搜索过程中剔除已搜索区域产生的多余节点,每拓展一个节点,都会尝试与目标点进行连接,如果新节点与目标点之间没有障碍物,则直接相连结束搜索,生成初始路径。之后对初始路径简化,减少冗余点并进行平滑处理,去除拐点后得到一条平滑的路径。

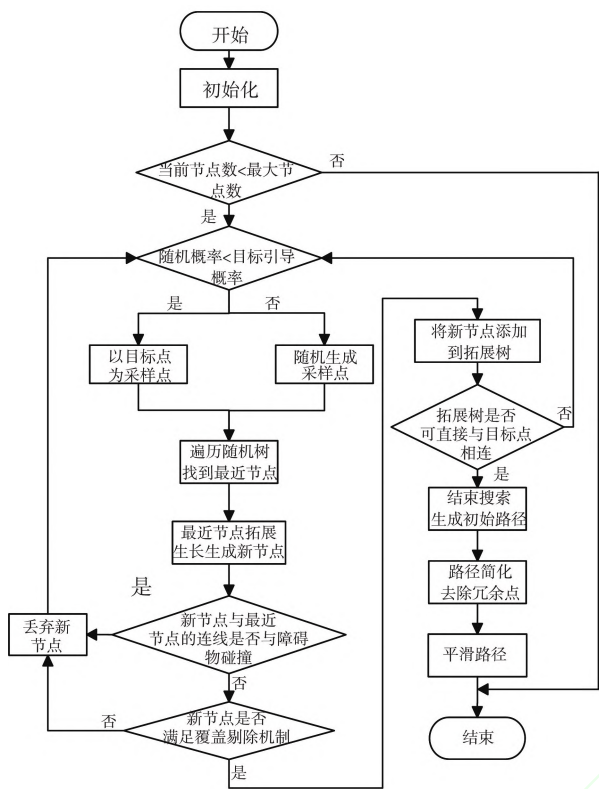


图 10 IG-RRT 算法流程图  
Fig.10 IG-RRT algorithm flow chart

4 仿真与验证

为验证强化后的 IG-RRT 算法的有效性和可行性,通过仿真对于强化前后以及相关 RRT 算法进行参数的比较。仿真试验硬件为戴尔 OptiPlex 7050 台式机,计算机配置为 Windows 10 操作系统,处理器为 i7-7700,主频 3.60 GHz,运行内存为 16 GB。

4.1 二维仿真试验

对算法的搜索时间、路径长度、产生节点数量和成功率进行分析,建立 3 种地图类型,将强化后的 IG-RRT 算法与应用范围最广的基础 RRT 算法、RRT \* 算法和 RRT-Connect 算法进行比较,其中 RRT \* 算法是在基础 RRT 算法基础上加入重新布线的方式进行迭代优化,RRT-Connect 算法则是采用双向拓展和贪婪思想进行搜索,IG-RRT 算法加入覆盖剔除机制和目标引导概率并进行优化。地图大小为 500 像素×500 像素,拓展步长  $\varepsilon=20$ ,最大节点数量为 2000 个,目标引导概率根据地图难度选取,即简单地图类型,目标引导概率适当取较大值,复杂地图类型取较小值。对于每种算法在每种类型的地图下的路径规划进行 100 次仿真运算,取平均值作为最终的结果进行比较,得到的仿真试验数据如图 11~13 所示。

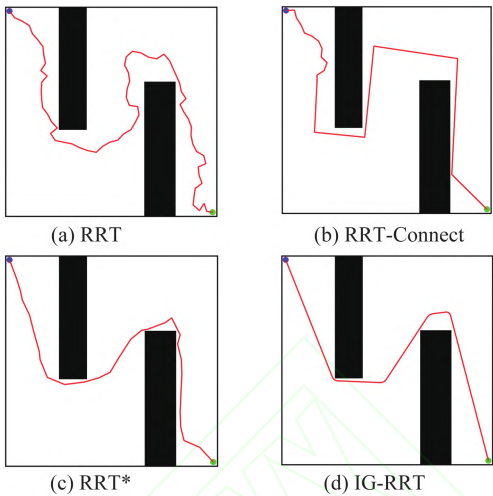


图 11 地图 1 中 4 种算法路径规划结果对比图  
Fig.11 Comparison of path planning results of four algorithms in Map 1

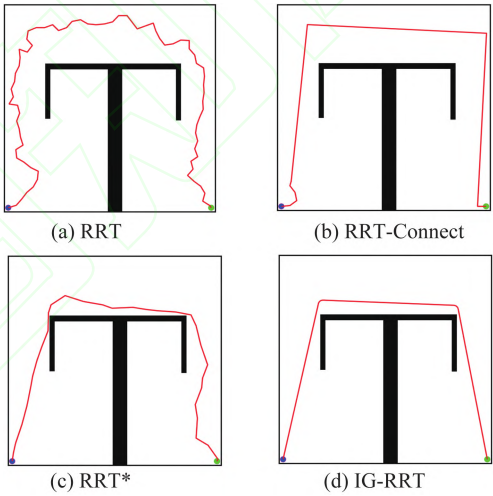


图 12 地图 2 中 4 种算法路径规划结果对比图  
Fig.12 Comparison of path planning results of four algorithms in Map 2

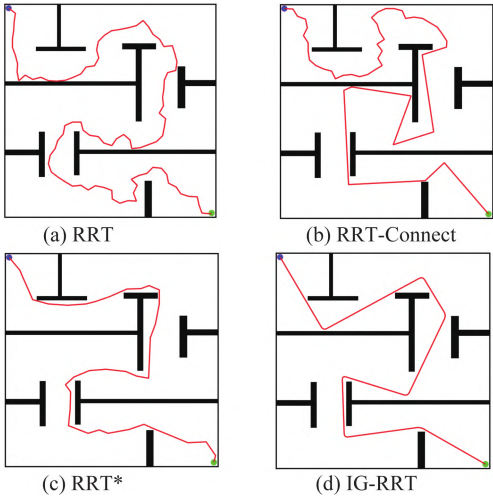


图 13 地图 3 中 4 种算法路径规划结果对比图  
Fig.13 Comparison of path planning results of four algorithms in Map 3

地图 1 比较简单,设置起始点坐标为 (10,10),目标点坐标为 (490,490),目标引导概率取 0.5,表 3



为 4 种算法的对比结果。

表 3 地图 1 中 4 种算法路径规划数据对比  
Table 3 Comparison of path planning data of four algorithms in Map 1

算法	节点/个	长度/DPI	时间/s	成功率/%
基础 RRT	859.3	1 340.8	40.0	100
RRT-Connect	187.1	1800.9	4.6	100
RRT *	842.6	1093.5	72.5	100
IG-RRT	113.7	1 088.8	2.5	100

地图 2 中存在陷阱空间,即封闭或半封闭空间,陷阱空间容易导致算法搜索路径时陷入局部最小。设置起始点坐标为(10,490),目标点坐标为(490,490),目标引导概率取 0.20。表 4 为 4 种算法的对比结果。

表 4 地图 2 中 4 种算法路径规划数据对比  
Table 4 Comparison of path planning data of four algorithms in Map 2

算法	节点/个	长度/DPI	时间/s	成功率/%
基础 RRT	1 000.8	1 499.1	44.1	99.1
RRT-Connect	255.9	1 796.1	6.9	100
RRT *	1 001.6	1 204.2	102.8	100
IG-RRT	184.4	1 156.3	4.2	100

地图 3 最复杂,空间中存在多个陷阱空间以及复杂约束区域,设置起始点坐标为(10,10),目标点坐标为(490,490),目标引导概率取 0.15,表 5 为 4 种算法的对比结果。

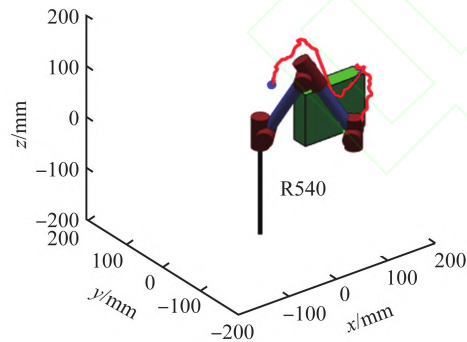
表 5 地图 3 中 4 种算法路径规划数据对比  
Table 5 Comparison of path planning data of four algorithms in Map 3

算法	节点/个	长度/DPI	时间/s	成功率/%
基础 RRT	1477.6	1 927.4	78.3	81.3
RRT-Connect	636.8	1 989.6	22.7	100
RRT *	1 496.5	1448.7	241.4	88.2
IG-RRT	356.3	1 378.8	11.7	100

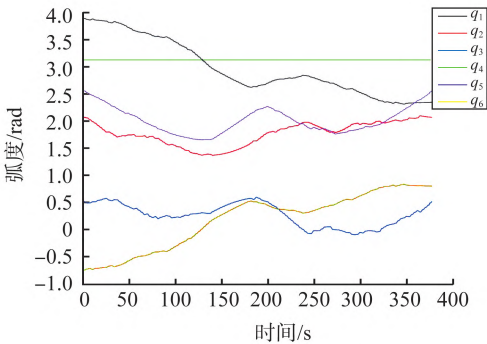
从上述的仿真结果中可以看出,3 种类型的地图中,相较于前 3 种算法,IG-RRT 算法减少了节点数量,覆盖剔除机制在搜索过程中对避免重复搜索有显著的作用,可以得到更短的路径。从搜索时间和成功率来看,对 3 种类型的地图,IG-RRT 算法都达到 100%的成功率,且搜索时间在 3 种类型的地图中都是最短的。通过上述的数据对比,可以证明 IG-RRT 算法相较于其他 3 种算法,极大地提高了算法的速度和效率,成功率高且得到的路径更为平滑,改善了路径质量,证明了强化后的 IG-RRT 算法在路径规划方面有着很强的优越性和实用性。

4.2 三维机械臂路径规划仿真

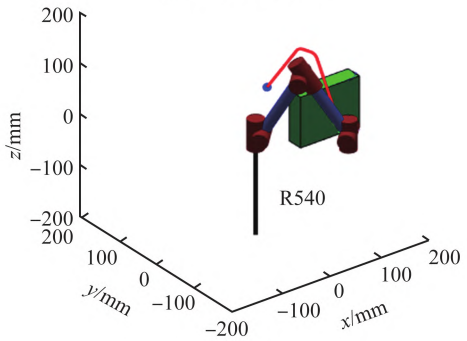
为了进一步验证 IG-RRT 算法在机械臂路径规划中的可行性和对路径平滑的优化效果,利用 Matlab 软件中的机器人工具箱对 IG-RRT 算法进行三维机械臂路径规划,分别采用基础的 RRT 算法和强化以后的 IG-RRT 算法进行空间内的路径规划,并比较关节角度变化。图 14 给出了三维环境下的仿真结果。



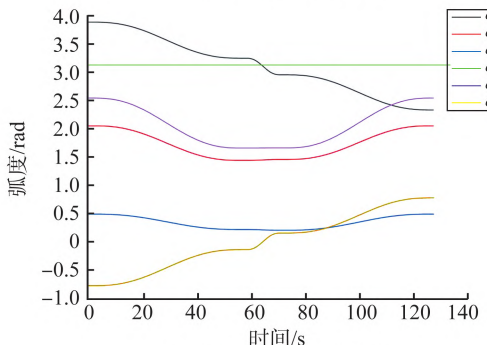
(a) RRT算法仿真



(b) RRT关节角度变化



(c) IG-RRT算法仿真



(d) IG-RRT关节角度变化

图 14 三维环境下路径规划结果对比图

Fig.14 Comparison of path planning results in three-dimensional environment

从图 14 可以看出,基础 RRT 算法规划的路径拐点较多,机械臂关节角度变化存在大量的锯齿状波动,且规划时间更长。改进以后,IG-RRT 算法得到的路径更短且更平滑,规划时间减少,可以有效解决基础 RRT 算法路径规划过程中存在的问题。无论是规划时间还是路径平滑程度,IG-RRT 算法相较于基础 RRT 算法都具有更加出色的性能。

## 5 结语

本研究针对机械臂路径规划的基础 RRT 算法进行强化,提出一种性能更优的 IG-RRT 算法。建立机械臂的运动学方程,简化模型,便于碰撞检测的计算。在 RRT 算法的基础上,提出了覆盖剔除机制,强化搜索趋势,减少重复搜索。引入目标引导概率,求解出最优目标引导概率,强化算法搜索的目标趋向性。采用末端强化加快收敛速度,通过剔除冗余节点简化路径,采用基于三次 B 样条曲线的路径平滑方法对于简化后的路径进行再次优化,最终提出一种强化的 IG-RRT 算法。二维仿真数据表明,与基础 RRT 算法、RRT-Connect 和 RRT\* 算法相比,IG-RRT 算法具有更强的搜索能力和搜索效率,规划出的路径更短,花费时间最少。三维机械臂路径仿真试验也证明,IG-RRT 算法在机械臂路径规划中,得到的路径更为平滑,减少了机械臂各关节角的抖动,具有优良的性能。

### 参考文献:

- [1] KIM S H, NAM E, HA T I, et al. Robot machining: a review of recent progress[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(9): 1629-1642.
- [2] RODRIGUEZ G D, SORROSAL G, CABANES I, et al. Human-robot interaction review: challenges and solutions for modern industrial environments[J]. IEEE Access, 2021, 9: 108557-108578.
- [3] FANG H C, ONG S K, NEE A Y C. Robot path planning optimization for welding complex joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9): 3829-3839.
- [4] CHEN Y, CHEN W Z, LI B, et al. Paint thickness simulation for painting robot trajectory planning: a review[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2017, 44(5): 629-638.
- [5] LIM G H, LAU N, PEDROSA E, et al. Precise and efficient pose estimation of stacked objects for mobile manipulation in industrial robotics challenges[J]. Advanced Robotics, 2019, 33(13): 636-646.
- [6] 魏坤. 机械臂混杂场景动态路径规划与多目标识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- WEI Kun. Research on dynamic path planning and multi-objective recognition of the manipulator in cluttered scenes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [7] 郭泉鹏. 基于改进人工势场法的路径规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- GUO Xiaopeng. Research on improved artificial potential field path planning algorithm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] FU Bing, CHEN Lin, ZHOU Yuntao, et al. An improved A\* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 106: 26-37.
- [9] LIU Xiaohuan, ZHANG Degan, ZHANG Jie, et al. A path planning method based on the particle swarm optimization trained fuzzy neural network algorithm[J]. Cluster Computing, 2021, 24(3): 1901-1915.
- [10] ELHOSENY M, THARWAT A, HASSANIEN A E. Bezier curve based path planning in a dynamic field using modified genetic algorithm[J]. Journal of Computational Science, 2018, 25: 339-350.
- [11] WANG Lanfei, KAN Jiangming, GUO Jun, et al. 3D path planning for the ground robot with improved ant colony optimization[J]. Sensors, 2019, 19(4): 815-836.
- [12] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning[R]. Iowa, USA: Computer Science Department, Iowa State University, 1998.
- [13] LAVALLE S M, KUFFNER J. Rapidly-exploring random trees: progress and prospects[C]//Proceedings of 4th International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR). Hanover, USA: Sandia Natl Labs, 2000: 293-308.
- [14] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT-connect: an efficient approach to single-query path planning[C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA: IEEE, 2000: 995-1001.
- [15] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 5326-5332.
- [16] QURESHI A H, AYAZ Y. Intelligent bidirectional rapidly-exploring random trees for optimal motion planning in complex cluttered environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 68: 1-11.
- [17] NOREEN I, KHAN A, RYU H, et al. Optimal path planning in cluttered environment using RRT\* -AB[J]. Intelligent Service Robotics, 2018, 11(1): 41-52.



[ 18 ] WANG Wei, ZUO Lei, XU Xin. A learning-based multi-RRT approach for robot path planning in narrow passages[ J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 90( 1 ): 81-100.

[ 19 ] TAHERI E, FERDOWSI M H, DANESH M. Fuzzy greedy RRT path planning algorithm in a complex configuration space[ J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16( 6 ): 3026-3035.

[ 20 ] 司徒华杰,雷海波,庄春刚. 动态环境下基于人工势场引导的 RRT 路径规划算法[ J]. 计算机应用研究, 2021, 38( 3 ): 714-717.

SITU Huajie, LEI Haibo, ZHUANG Chungang. Artificial potential field based RRT algorithm for path planning in dynamic environment[ J]. Computer Application Research, 2021, 38( 3 ): 714-717.

[ 21 ] 王兆光. 六自由度机械臂避障路径规划研究[ D]. 成都:西南交通大学, 2018.

WANG Zhaoguang. Research on obstacle avoidance path planning of 6-DOF manipulator [ D ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[ 22 ] XIAO Fan, LI Gongfa, JIANG Du, et al. An effective and unified method to derive the inverse kinematics formulas of general six-DOF manipulator with simple geometry[ J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 159: 1-14.

[ 23 ] 马慧丽,鲁照权,王寿庭. 基于改进 RRT \* 算法的机械臂路径规划研究[ J]. 机械设计与研究, 2020, 36( 4 ): 42-46.

MA Huili, LU Zhaoquan, WANG shouting. Research on manipulator path planning based on improved RRT \* algorithm[ J]. Mechanical Design and Research, 2020, 36 ( 4 ): 42-46.

[ 24 ] ZHANG Tie, HONG Jingdong. Collision detection method for industrial robot based on envelope-like lines [ J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 46 ( 4 ): 510-517.

( 编辑:李骏)