

改进 RRT-人工势场法的机械臂堆垛运动方法

王鑫,袁庆霓,江涛,施辉城,孙睿彤,白欢,衣君辉

(现代制造技术教育部重点实验室,贵州 贵阳 550025)

摘要:快速拓展随机树算法(RRT)在机械臂路径规划中存在随机性强、搜索效率低、规划路径长等问题,不能在货柜堆垛场景中取得相对最优的光滑路径。对此,该文提出了一种改进 RRT-人工势场法混合算法进行货柜堆垛机械臂运动规划。首先,对传统快速拓展随机树算法进行改进,在传统快速拓展随机树算法的全局搜索的基础上引入目标搜索,增强了随机树的搜索效率,并使用改进后的算法进行全局路径规划;其次,对人工势场法进行改进,通过使用斥力势场范围大小作为阈值修正引力函数,使用机械臂末端执行器至末位置点影响修正斥力函数,并使用改进的人工势场法对局部路径进行优化;再次,使用三次非均匀 B 样条曲线对路径进行平滑处理,并将处理后的光滑路径作为机械臂末端执行器运动的最终路径。最后,在 Python 模拟场景中对改进算法进行可行性分析,并在 ROS 系统对机械臂堆垛运动进行应用仿真,验证了该方法的有效性和可行性。

关键词:RRT;人工势场法;运动规划;避障策略;非均匀 B 样条;机械臂

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2022)02-0026-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2022.02.004

Improved RRT-Artificial Potential Field Method for Robotic Arm Stacking Movement Method

WANG Xin, YUAN Qing-ni, JIANG Tao, SHI Hui-cheng, SUN Rui-tong, BAI Huan, YI Jun-hui

(Key Laboratory of Modern Manufacturing Technology, Ministry of Education, Guizhou University,
Guiyang 550025, China)

Abstract: The rapidly exploring random tree (RRT) has some problems in the path planning of the robot arm, such as strong randomness, low search efficiency and long planning path, which cannot obtain the relatively optimal smooth path in the container stacking scene. For this, we propose an improved RRT-artificial potential field method, a hybrid algorithm, for the motion planning of the container stacking manipulator. Firstly, the traditional RRT is improved. The target search is introduced on the basis of the global search of the traditional RRT to enhance the search efficiency of the random tree, and the improved algorithm is used for global path planning. Secondly, the artificial potential field method is improved. The gravity function is modified by using the range of repulsive potential field as the threshold, the repulsive force function is modified by using the influence of the manipulator end-effector to the last position point, and the local path is optimized by using the improved artificial potential field method. Thirdly, a cubic non-uniform B-spline curve is used to smooth the path, which is used as the final path of the end effector of the robot arm. Finally, the reliability analysis of the improved algorithm is carried out in Python simulation scene, and the application simulation of the robotic arm stacking movement in the ROS system verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: rapidly exploring random tree; artificial potential field method; motion planning; obstacle avoidance strategy; non-uniform B-spline; robotic arm

0 引言

电子商务的高速发展带动了中国物流业的自动化和智能化。随着互联网电商平台订单量的大幅增长以

及产品种类的多元化,对仓库中货物的拣选、货柜堆垛的时效及工作量的要求越来越高。而传统的仓储系统中,人工货柜堆垛和分拣货柜中物品已经成为仓储自

收稿日期:2021-02-19

修回日期:2021-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51865004);贵州省教育厅科技拔尖人才支持项目(黔教合 KY 字[2017]062);横向课题(K19-0204-001)

作者简介:王鑫(1993-),男,硕士研究生,研究方向为机器人的运动规划、智能制造;通讯作者:袁庆霓(1976-),女,教授,博士,研究方向为智能机器人、智能制造、数字化设计及制造。

动化的瓶颈,亟待解决的问题,其中货柜物品的自动货柜堆垛首先需解决机械臂的运动规划问题。

在机械臂的运动规划领域中, Mashayekhi R 等人^[1]提出混合 RRT、Informed RRT*–Connect 等算法,在算法中引入双树模型。Khan A T 等人^[2]提出使用称为加权雅可比快速探索随机树(WJRRT)的智能算法对硬性和软性机械手的路径进行规划。Kai Mi 等人^[3]提出了一种结合运动学控制和快速探索随机采样方法的运动规划算法。Sertac Karaman 等人^[4]提出一种基于 RRT* 的随时算法。Gitae Kang 等人^[5]提出了一种机械手运动规划的目标导向(GO)采样方法。陈波芝等人^[6]提出基于改进 RRT 算法利用剪枝择优和设置目标区域的方式使算法快速收敛。王怀江等人^[7]提出基于遗传算法的机械臂优化方法为机械臂规划抓取的最短路径。李洋等人^[8]提出协同路径规划的引力自适应步长 RRT 算法,并在随机树的节点处引入引力函数提升算法的融合速度。丛明等人^[9]使用改进的遗传算法求解,为机械臂双臂传接过程选择最佳的传接位置。马慧丽等人^[10]在 RRT* 的基础上引入目标引力,同时提出自适应步长避免路径算法陷入局部最优。刘建宇等人^[11]在目标偏向策略引入采样的基础上,采用梯度下降法优化搜索出的路径。周恒旭等人^[12]利用 Dubins 曲线策略处理 Informed RRT* 算法,解决了轨迹不稳定和尖锐的两个缺点。

上述算法虽能有效解决路径规划问题,但对于双臂机器人或者特定场景,并不能有效地为机械臂堆垛场景规划最优路径。因此,该文提出一种改进 RRT-人工势场法的路径规划方法,为机械臂末端执行器规划出一条无碰撞的货柜自动堆垛运动轨迹,并在 Python 和 ROS 对该方法进行验证。

1 算法原理

1.1 RRT 算法基本原理

快速拓展随机树算法(RRT)是由 La-Valle 教授提出^[13]。其基本原理是将始位置点作为随机树的根位置点,然后,在工作空间内随机采样并找到随机树上距离采样点最近的节点,由最近节点沿采样点方向拓展一个步长生成新的枝叶节点,直到末位置点成为随机树枝叶节点。最后,连接随机树枝叶节点生成一条连接始、末位置点的无规则路径。

1.2 人工势场法基本原理

人工势场法是 Khatib 首次提出的理论^[14],最早是针对移动机器人避障规划。其基本思想是将机器人转化为一个质点,将整个环境转化为一个人造势场,该势场包含末位置点对机器人的引力势场和障碍物对机器人的斥力势场,机器人受引力势场产生的引力和斥力

势场产生的叠加斥力,沿引力和斥力的合力方向运动。

2 改进算法

2.1 障碍物建模

该文使用 AABB 包围盒和球体包围障碍物分别在改进 RRT 和改进人工势场法下进行障碍物建模,当路径点存在于障碍物模型内则表示规划路径与障碍物发生碰撞。

AABB 包围盒数学描述为^[15]:

$$q_{obstacles} = [x_{min}, y_{min}, z_{min}, x_{max}, y_{max}, z_{max}] \quad (1)$$

AABB 包围盒表示为每一边都平行于坐标面的长方体。

球体包围盒数学描述为^[15]:

$$q_{obstacles} = [X, Y, Z, R] \quad (2)$$

人工势场法需要考虑当前路径点与障碍物距离因素,因此,在 AABB 包围盒的基础上引入球体包围盒对障碍物作进一步描述。(X, Y, Z)为障碍物中心的世界坐标, R 为球形半径,分别表示为:

$$\begin{cases} X = \frac{X_{min} + X_{max}}{2} \\ Y = \frac{Y_{min} + Y_{max}}{2} \\ Z = \frac{Z_{min} + Z_{max}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (4)$$

2.2 改进 RRT 算法原理

针对传统随机树生长方向具有无向性,随着路径采样点的增加,冗余路径也随之增加,该文引入目标搜索。该方法能够有效减少随机树无用生长,减小冗余路径,提高算法规划效率(如图1)。

具体算法描述如下:

(1)将始位置点 q_{init} 设置为随机树根节点 T_{init} ;

(2)令 $q_{new} = q_{init}$;

(3)生成随机采样点 q_{rand} ;

(4)遍历随机树,搜索随机树距离 q_{rand} 最近的随机树节点,将其命名为 $q_{nearest}$;

(5)由 q_{rand} 沿 $q_{nearest}$ 方向拓展生成新的枝叶节点 q_{new} , 且连接 q_{rand} 和 q_{new} 并进行碰撞检测,若碰撞,返回步骤(2),若无碰撞,令 q_{new} 为 $q_{nearest}$ 子节点,并进入下一步;

(6)连接 q_{new} 和末位置点 q_{goal} 。并进行碰撞检测,若碰撞,返回步骤(2),若无碰撞,进入下一步;

(7)连接 q_{new} 和 q_{goal} , 令 q_{goal} 为 q_{new} 子节点,由末位置点 q_{goal} 开始,根据随机树中父子关系搜索路径节点,生成路径 PATH。

其中 q_{init} 是随机树始位置点, q_{goal} 是随机树的末位

置点, q_{new} 是随机树新增枝叶节点, q_{nearest} 是随机树上距离随机采样点 q_{rand} 的最近节点, S 是步长。 q_{new} 的计算如式(5)~式(7)所示。

$$q_{\text{new}} = q_{\text{nearest}} + \frac{q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}}{\|q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}\|} \times S \quad (5)$$

$$q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}} = [(x_{\text{rand}} - x_{\text{nearest}}), (y_{\text{rand}} - y_{\text{nearest}}), (z_{\text{rand}} - z_{\text{nearest}})] \quad (6)$$

$$\|q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}\| = \sqrt{(x_{\text{rand}} - x_{\text{nearest}})^2 + (y_{\text{rand}} - y_{\text{nearest}})^2 + (z_{\text{rand}} - z_{\text{nearest}})^2} \quad (7)$$

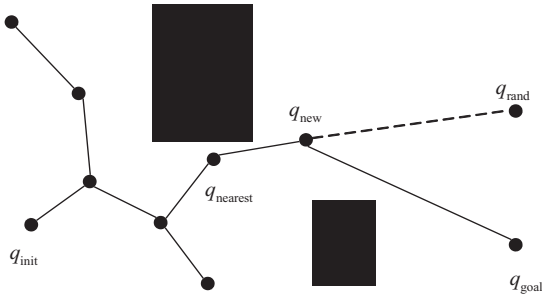


图 1 随机树生长图

图 1 是随机树生长图,其中黑点是 RRT 随机树节点和随机采样点; q_{init} 是随机树始位置点; q_{goal} 是随机树的末位置点; q_{new} 是随机树新增枝叶节点; q_{nearest} 是随机树上距离随机采样点 q_{rand} 的最近节点; S 是步长。改进 RRT 算法伪代码如算法 1 所示:

算法 1: 改进 RRT 算法。

Input: 始、末位置: q_{init} 、 q_{goal} ;

工作空间(障碍空间): X ;

步长: S ;

Output: 路径 PATH。

Initialize all Parameters;

1. Add_vertex(tree, q_{init})

2. While Connect=0 do;

3. For 1 To N;

4. $q_{\text{rand}} \leftarrow \text{Sample_free}(X)$;

5. $q_{\text{new}}, q_{\text{nearest}} \leftarrow \text{Get_nearest}(\text{tree}, q_{\text{rand}})$;

6. if Collision_free($q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}}$) then;

7. Connect_to_point(tree, $q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}}, S$);

8. End if

9. if Collision_free($q_{\text{new}}, q_{\text{goal}}$) then;

10. PATH \leftarrow Get_path();

11. Connect=1;

12. End if

13. End For

14. End While

15. Final

16. Return PATH

2.3 改进人工势场法原理

人工势场法全部信息来源引力势场和斥力势场,

当机械臂远离末位置点时:引力远大于斥力,规划路径易与障碍物发生碰撞;当障碍物靠近末位置点时:斥力远大于引力,易发生目标不可达。针对上述问题,对人工势场法进行改进,解决路径与障碍碰撞和目标不可达等问题。

人工势场主要由末位置点对机械臂末端执行器产生的引力势场和障碍物产生的斥力势场组成。故人工势场 U_{rec} 可定义为:

$$U_{\text{rec}}(q) = U_{\text{att}}(q) + U_{\text{rep}}(q) \quad (8)$$

其中, q 为机械臂末端执行器当前位置点, $U_{\text{att}}(q)$ 表示引力势场, $U_{\text{rep}}(q)$ 表示斥力势场。

相应的合力 F_{vec} 为:

$$F_{\text{vec}}(q) = F_{\text{att}}(q) + F_{\text{rep}}(q) \quad (9)$$

针对当前位置与末位置距离过大而导致受力不平衡的问题,以障碍物斥力范围作为标准给定阈值 D ,用于修正引力函数,防止引力远大于斥力而导致路径与障碍物发生碰撞。将 $U_{\text{att}}(q)$ 表示为:

$$U_{\text{att}}(q) = \begin{cases} \frac{\xi \rho(q, q_{\text{goal}})}{2}, \rho(q, q_{\text{goal}}) \leq D \\ \frac{\xi \rho^2(q, q_{\text{goal}})}{2D}, \rho(q, q_{\text{goal}}) > D \end{cases} \quad (10)$$

其中, ξ 为常量; $\rho(q, q_{\text{goal}})$ 为当前位置到末位置的距离; D 为给定的当前位置与末位置距离的阈值。

算法 2:改进人工势场法。

Input: 始、末位置: q_{init} 、 q_{goal} ;

工作空间(障碍空间): X ;

步长: S ;

Output: 路径 Path。

Initialize all Parameters;

1. Path = [q_{init}];

2. $q_{\text{new}} = q_{\text{init}}$;

3. While Dis($q_{\text{new}}, q_{\text{goal}}$) > S do;

4. $F_{\text{vec}} \leftarrow \text{Attractive}() + \text{Repulsion}()$;

5. $q_{\text{new}} \leftarrow F_{\text{vec}} \cdot \text{direction}() * S$;

6. path \leftarrow Get_path(q_{new});

7. if Dis($q_{\text{new}}, q_{\text{goal}}$) < S then;

8. path \leftarrow Get_path(q_{goal});

9. End if

10. End While

11. Final

12. Return path

由引力势场引发的引力相应表示为:

$$F_{\text{att}}(q) = \begin{cases} \xi \rho(q, q_{\text{goal}}), \rho(q, q_{\text{goal}}) \leq D \\ \frac{\xi \rho^2(q, q_{\text{goal}})}{D}, \rho(q, q_{\text{goal}}) > D \end{cases} \quad (11)$$

针对目标不可达的问题,在原有斥力场的基础上加强机械臂末端执行器与末位置距离的影响,机械臂末端执行器靠近末位置时,斥力随着位置靠近而相应

减小,避免斥力远大于引力而导致目标不可达。

$U_{\text{rep}}(q)$ 表示为:

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho^0} \right)^2 \rho^n(q, q_{\text{obs}}), \text{num} \leq \rho^0 \\ 0, \text{num} > \rho^0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\text{num} = \rho(q, q_{\text{obs}})$ 。

由斥力势场引发的斥力相应表示为:

$$F_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} F_{\text{rep1}}(q) + F_{\text{rep2}}(q), \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho^0 \\ 0, \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho^0 \end{cases} \quad (13)$$

$F_{\text{rep1}}(q)$ 、 $F_{\text{rep2}}(q)$ 分别为:

$$F_{\text{rep1}}(q) = \eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho^0} \right) \frac{\rho^2(q, q_{\text{goal}})}{\rho^2(q, q_{\text{obs}})} \quad (14)$$

$$F_{\text{rep2}}(q) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho^0} \right) \rho^2(q, q_{\text{goal}}) \quad (15)$$

其中, η 为斥力场常量; $\rho(q, q_{\text{obs}})$ 为当前位置到障碍物的距离; ρ^0 为斥力势场范围; 人工势场法伪代码如算法 2 所示。

2.4 非均匀 B 样条曲线

机械臂工作空间出现数目较多的随机障碍物时,为满足避障需求,规划路径往往会出现路径转折。在此情况下,机械臂会因为加速度突变而引起机体振动,对机体造成伤害。因此,该文引入非均匀 B 样条曲线平滑路径^[16],为机械臂在复杂的障碍环境中提供有效

解决方案。

B 样条曲线方程为:

$$p(t) = \sum_{i=0}^m p_i N_{j,n}(t), t \in [0, 1] \quad (16)$$

其中, p_i 为控制点; $N_{j,n}$ 为 n 次 B 样条的基函数; M 为区间数; n 为样条曲线的次数。

B 样条的基本函数 Cox-deBoor 递归公式定义为:

$$\begin{cases} N_{j,0} = \begin{cases} 1, t_j < t < t_{j+1} \\ 0, \text{other} \end{cases} \\ N_{j,n} = \frac{t - t_j}{t_{j+n} - t_j} N_{j,n-1}(t) + \frac{t_{j+n+1} - t}{t_{j+n+1} - t_{j+1}} N_{j+1,n-1}(t) \\ \frac{0}{0} = 0 \text{ and } 0 \times \infty = 0 \end{cases} \quad (17)$$

从式(17)可知,第 j 个控制点对应的 n 次 B 样条基数只与 $[t_i, t_{i+n+1}]$ 个参数域有关。

该文定义的是 3 次 4 阶非均匀 B 样条曲线,即当路劲节点为 m 时,该样条曲线共有 $m + 3$ 个参数区间,其合法的定义区域为 $[U_3, U_m]$ 。

2.5 改进 RRT-人工势场法混合算法

该文提出的改进 RRT-人工势场法混合算法,是利用改进 RRT 算法对全局路径进行规划,当 RRT 规划存在冗余路径时,使用人工势场法对局部进行优化,并用优化路径取代冗余路径。其具体流程如图 2 所示。

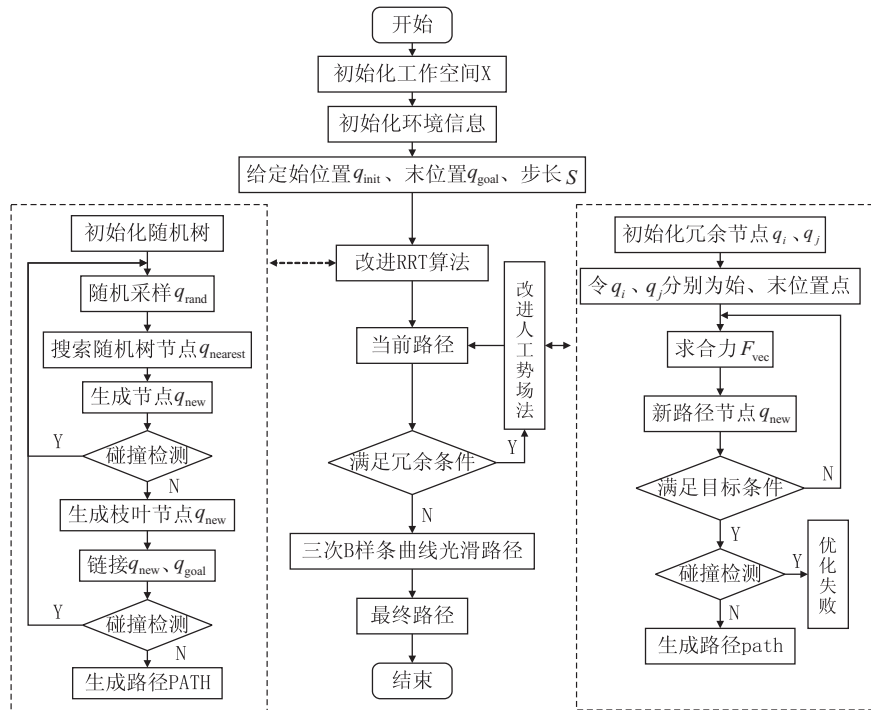


图2 改进 RRT-人工势场法流程图

算法描述如下:

(1) 初始化机械臂工作空间及工作空间中环境信

息,给定机械臂移动的始、末位置点 q_{init} 、 q_{goal} 和机械臂移动步长 S ;

(2) 利用改进 RRT 算法为机械臂规划全局路径, 其具体流程如改进 RRT 算法描述;

(3) 将改进 RRT 规划全局路径 PATH 设为当前路径, 并对当前路径进行判断。若存在冗余路径, 将冗余节点设为人工势场法始、末位置点 q_i 、 q_j , 开始改进人工势场法局部路径规划; 否则执行改进 RRT 算法步骤 6;

(4) 将始、末位置点 q_i 、 q_j 为当前位置点和末位置点代入式(11)计算引力, 式(13)计算斥力, 并根据式(9)求得当前位置点合力大小及方向。由当前位置点沿合力方向拓展步长 S 生成新节点 q_{new} 。同理, 重复上述步骤直到 $Dis(q_{new}, q_{goal}) < S?$, 令 q_{goal} 为 q_{new} ; 使用三次 B 样条曲线光滑路径并生成最终路径;

3 实验

3.1 实验任务

为了验证改进 RRT-人工势场法混合算法的有效性和可行性, 分别在 Python 和 ROS 上对改进算法进行比较和仿真实验。所有实验均在 16 G 内存的 Intel i7-9750H DELL Y7000 计算机上进行。

3.2 Python 实验

为验证文中所提算法是否具有改进意义, 将改进 RRT-人工势场法同人工势场法、RRT 和 Bi-RRT 算法进行对比分析。实验在地图大小为 $100 \times 100 \times 100$, 障碍物数目 N 为 30 的随机障碍场景中进行, 始位置点为 $(0, 0, 0)$, 末位置点为 $(100, 100, 100)$ 。

图 3 是四种算法对比实验。细线为随机树, 粗线为算法规划的路径曲线。通过对比分析可知, RRT 与 Bi-RRT 规划路径时不能有效解决因随机策略产生的随机树生长无向性问题, 人工势场法在规划路径时能够有效地靠近末位置点, 改进 RRT-人工势场法混合算法能够有效地将两种算法的优点进行融合, 规划出一条逐渐靠近末位置点的无碰光滑路径。

当 $N = 30, 40, 50$ 时, 对该算法实验 50 次, 结果如表 1 所示。随着环境复杂程度的增加, 其平均路径长度无明显变化。由此可知, 改进 RRT-人工势场法混合算法不受复杂程度影响, 且该算法能够稳定有效地为机械臂规划出一条无碰撞的光滑路径。为验证该算

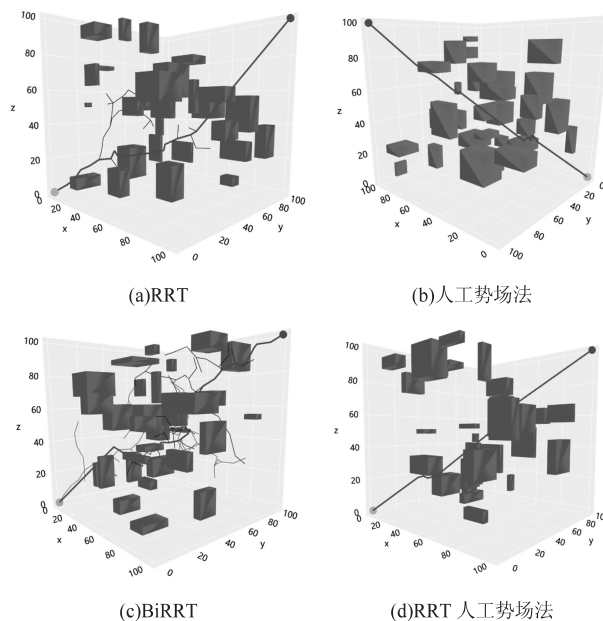


图 3 算法对比实验

法是否能够有效为机械臂在工作空间中规划路径, 故使用 Python 中模拟机械臂实验场景。该场景包含一个模拟传送带 AABB 包围盒和由若干 AABB 包围盒组成的立式货架, 具体如图 4 所示。

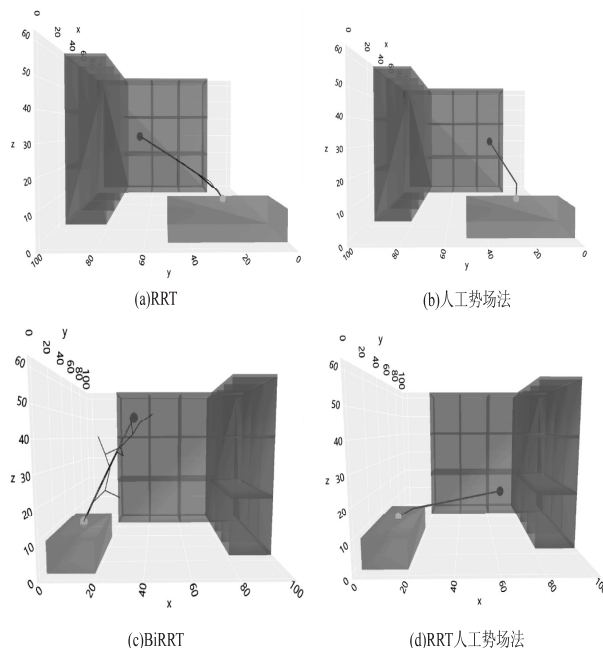


图 4 路径规划场景模拟实验

表 1 障碍物数量不同时各算法数据分析

障碍物 (N)	平均采样数/ 个	最大采样数/ 个	平均路径长度 (欧氏距离)	路径最大距离 (欧氏距离)	时间/s	成功率/%
$N = 30$	103.833 333 3	216	180.208 505 8	211.897 890 4	8.470 104 118	100
$N = 40$	100.25	169	178.999 517 5	195.253 271 7	8.003 825 247	100
$N = 50$	111.833 333 3	194	179.757 219 8	192.825 510 7	8.470 104 118	100

图 4(a) ~ 图 4(d) 为不同末位置点路径规划图, 始位置位于传送带上, 且坐标为 $(10, 25, 11)$ 。结果

表明, 提出的改进 RRT-人工势场法混合算法能够为机械臂规划出由传送带至货架任意格子的无碰光滑

路径。

3.3 ROS 实验仿真

在 Ubuntu16.04 LTS、ROS Kinetic 平台中使用 Gazebo 模拟现实仿真,如图 5 所示,主要包含:传送带、块状物、UR5 机械臂、货架。要求 UR5 机械臂在运

动状态下传送带上,抓取块状物放置在货架的指定位置,实现机械臂由抓取的初始位置,避开货架边缘侧壁,为机械臂抓取至放置运动规划出一条至指定目标位置的无碰撞路径。

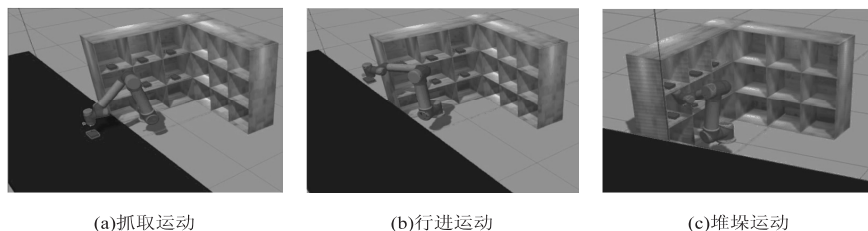


图5 货柜堆垛运动

图 5(a) 为机械臂在运动状态的传送带上抓取块状物;图 5(b) 为机械臂将块状物送至货架指定位置的行进运动;图 5(c) 为机械臂将块状物放置指定位置的货柜堆垛运动。由图可知,该算可以完成货柜堆垛场景下的机械臂运动仿真,实现为机械臂抓取、货柜堆垛运动,验证了改进 RRT-人工势场法的有效性与可靠性。

4 结束语

该文提出改进 RRT-人工势场法混合算法对机械臂堆垛进行运动规划,其主要改进点如下:

(1) 针对传统 RRT 算法存在的路径节点多、冗余路径长等问题,引入目标搜索。该方法能够有效探索空间,减少随机树无效生长,提高算法规划效率;

(2) 针对人工势场法受力不平衡和目标不可达等问题,分别利用斥力范围作为阈值修正引力函数、当前位置点和末位置点距离作为影响参数修正斥力函数。

(3) 利用 RRT 算法的概率完备性规划全局路径,利用人工势场法的有向性对 RRT 算法进行了补充。同时,RRT 算法也为改进算法的避障能力提供了有效保证。

最后,将改进 RRT-人工势场法混合算法分别在 Python 和 ROS 系统中对机械臂货柜堆垛运动进行了模拟仿真。验证结果表明,该算法能够为机械臂堆垛运动提供有效支持。

参考文献:

- [1] MASHAYEKHI R, IDRIS M Y I, ANISI M H, et al. Hybrid RRT: a semi-dual-tree RRT-based motion planner [J]. IEEE Access, 2020, 8: 18658-18668.
- [2] KHAN A T, LI S, KADRY S, et al. Control framework for trajectory planning of soft manipulator using optimized RRT algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 171730-171743.
- [3] MI K, ZHANG H, ZHENG J, et al. A sampling-based optimized algorithm for task-constrained motion planning [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16 (3): 15.
- [4] KARAMAN S, WALTER M R, PEREZ A, et al. Anytime motion planning using the RRT* [C]//2011 IEEE international conference on robotics and automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 1478-1483.
- [5] KANG G, KIM Y B, LEE Y H, et al. Sampling-based motion planning of manipulator with goal-oriented sampling [J]. Intelligent Service Robotics, 2019, 12 (3): 265-273.
- [6] 陈波芝, 陆亮, 雷新宇, 等. 基于改进快速扩展随机树算法的双机械臂协同避障规划方法 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (10): 1220-1226.
- [7] 王怀江, 刘晓平, 王刚, 等. 基于改进遗传算法的移动机械臂拣选路径优化 [J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43 (5): 34-40.
- [8] 李洋, 徐达. 基于引力自适应步长 RRT 的双臂机械臂协同路径规划 [J]. 机器人, 2020, 42 (5): 606-616.
- [9] 丛明, 赵申申, 刘冬, 等. 双臂机器人传接位置选取与路径规划方法 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48 (9): 1-6.
- [10] 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.
- [11] 刘建宇, 范平清. 基于改进的 RRT* -connect 算法机械臂路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (6): 274-278.
- [12] 周恒旭, 程勇, 刘伟才. Dubins-Informed RRT* 算法规划的机械臂运动 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (10): 67-74.
- [13] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning [J]. Algorithmic & Computational Robotics New Directions, 1999, 1 (1): 293-308.
- [14] 赵明, 郑泽宇, 么庆丰, 等. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划方法 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (S2): 66-68.
- [15] 芦鸿雁. 基于层次包围盒的碰撞检测算法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2008, (2): 23-25.
- [16] YUAN C, ZHANG W, LIU G, et al. A heuristic rapidly-exploring random trees method for manipulator motion planning [J]. IEEE Access, 2019, 8: 900-910.