

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209886

基于改进 APF-RRT 的机械臂避障路径规划<sup>\*</sup>

田金文 于 镭 李衍照

(青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266061)

**摘要:** 为提高机械臂在复杂环境下的避障路径规划效率,提出一种适用于椭球障碍物的改进人工势场-快速搜索随机树(APF-RRT)算法。首先,使用椭球体包围盒包络障碍物,对椭球体的碰撞检测进行分析;其次,为了加快路径探索速度,引入随机点效应与随机点选择机制对 RRT 算法进行改进,机械臂采用改进后的 RRT 与人工势场法的混合方法进行路径规划;最后,对规划好的路径进行冗余点删除,并使用四次 B-样条曲线对路径进行平滑,提升路径的质量。实验结果表明,相较于经典算法,该算法能够快速完成避障路径规划且规划路径更短。

**关键词:** 避障路径规划;碰撞检测;人工势场法;快速搜索随机树

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6

## Obstacle avoidance path planning of manipulator based on improved APF-RRT

Tian Jinwen Yu Lei Li Yanzhao

(School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of obstacle avoidance path planning of collaborative robot in complex environments, improved artificial potential field & rapidly exploring random tree (APF-RRT) algorithm for ellipsoid obstacles. First of all, enveloped obstacle with ellipsoid bounding box, then the collision detection method was analyzed; In addition, to speed up path exploration Random point effect and random point selection mechanism were introduced to improve the RRT algorithm, then the hybrid method of improved RRT and artificial potential field was used for path planning; Finally, deleted redundant points on the planned path, and four-time B-spline curve was used for path smoothness, improved path quality. The simulation results showed that, in the ellipsoid obstacle environment, the algorithm can complete the obstacle avoidance path planning quickly and the planned path was shorter.

**Keywords:** obstacle avoidance path planning; collision detection; artificial potential field; rapidly exploring random tree

## 0 引 言

随着人工智能技术的迅速发展,自主机器人在工业、航天及科研等领域的应用越来越广泛。例如:使用机械臂进行角磨机的智能装配。由于角磨机的零部件具有大小、形状和个数多样性的特点<sup>[1]</sup>,而机械臂需避免与物体接触并快速运动到目标位置,即进行避障路径规划<sup>[2-3]</sup>。避障路径规划是指在存有障碍物的环境中,机器人找到一条持续、无碰撞路径的过程<sup>[4]</sup>。

快速搜索随机树是基于随机采样的路径规划算法<sup>[5-6]</sup>,在复杂环境下搜索成功率高,但搜索效率较低。相较于 RRT 算法,经典人工势场算法所规划的路径质量较高,但容易陷入局部极小值<sup>[7]</sup>。许多学者就这两种算法进行了改

进,荆泽成等<sup>[8]</sup>、赵惠等<sup>[9]</sup>在 RRT 算法中加入目标偏置来加速算法搜索速度;Kang 等<sup>[10]</sup>提出基于三角不等式的 RRT-Connect 算法,通过重选父节点对路径进行优化。陈满意等<sup>[11]</sup>提出低振荡人工势场 APF-RRT 算法,用于解决 APF 算法进行路径搜索时容易陷入局部极小值的问题。

以上研究中均使用球体代替障碍物,然而当实际环境中存在长宽比例较大的不规则物体时,使用球体包络法会占用较多空间,导致机器人绕行路径较远。因此,使用椭球体对障碍物进行包络具有重要研究价值,经查阅文献,针对 APF 和 RRT 算法在椭球体障碍物环境下的研究较少, Li 等<sup>[12]</sup>使用 RRT 算法在椭球形障碍物环境下进行路径规划,对椭球体用函数求解法进行碰撞检测,但是没有对路径进行优化。祝敬等<sup>[13]</sup>对障碍物进行椭球体包络,在 RRT

收稿日期:2022-05-10

<sup>\*</sup> 基金项目:山东省重大科技创新工程(2021SFGC0601)项目资助

算法中加入 APF 算法加快搜索速度,但是仅考虑了少数障碍物且没有对算法本身进行改进。

本文考虑到障碍物的多样性,对障碍物进行椭球体包络,给出椭球体的两阶段碰撞检测方法;机械臂在路径规划时先使用 APF 算法进行搜索,当发生碰撞或陷入局部极小时采用改进 RRT 算法搜索,两种算法混合使用以提高路径规划的效率。此外,为了提高路径质量,对路径进行冗余点删除,并使用四次 B-样条曲线<sup>[14]</sup>对路径进行平滑。

### 1 算法原理

#### 1.1 碰撞检测方法

受机械臂臂体约束,机械臂在实际工程中运动空间有限,而障碍物占用空间的大小直接影响机械臂的路径规划效率。为使机械臂在障碍物附近绕行较短路径,本文对不规则物体进行椭球体包络并用椭球体代替障碍物。机械臂连杆与障碍物的空间位置简化为直线与椭球体的关系,如图 1 所示。

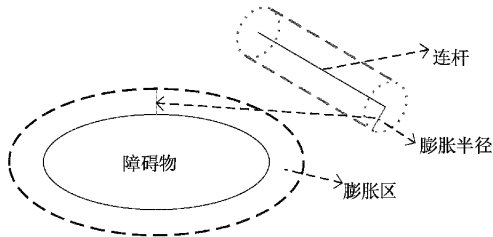


图 1 连杆与障碍物位置关系

设连杆一端(当前点)为  $p$ , 另一端(父节点)为  $p_{parent}$ , 则椭球体的碰撞检测步骤如下:

1)检测点  $p$  是否在椭球区域内部

2)若条件 1)不成立,则判断连杆是否与障碍物发生接触。首先通过点  $p$  与点  $p_{parent}$  形成线段,与椭球体上任意不同两点形成相交的两个平面,求出两点所构成空间直线的一般式方程,此时会得到四个系数  $A、B、C、D$ , 然后与椭球体半径  $a、b、c$  代入计算是否满足碰撞条件。计算方法如下:

$$\begin{cases} Ax + By + Cz + D = 0 \\ A^2a^2 + B^2b^2 + C^2c^2 \leq D^2 \end{cases} \quad (1)$$

碰撞检测方法是提升避障路径规划效率的重要手段,本文所使用的二阶段碰撞检测方法效率高、计算速度快。通过 Matlab 平台验证,该方法每次检测耗时小于 0.002 0 s,而函数求解<sup>[13]</sup>法每次耗时在 0.1 s 以上。使用 RRT 算法在相同环境下对两种碰撞检测方法进行实验,对比数据如表 1 所示。相较于函数求解法,二阶段法能够帮助算法在较短时间内完成路径规划。

#### 1.2 快速搜索随机树

RRT 算法是基于采样的单向路径搜索算法,该算法将机器人的起始点作为根节点,通过随机采样获得新的节点并加入扩展树,以这种方式进行多次迭代来探寻能够达到

表 1 碰撞检测方法对比

算法	碰撞检测方法	时间/s
RRT 算法	函数求解法	23.09
	二阶段法	0.23

目标的路径。RRT 算法采样原理如图 2 所示。

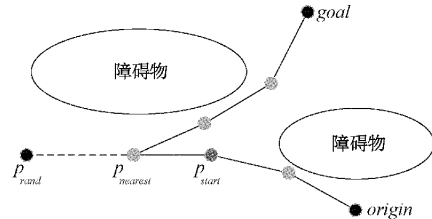


图 2 RRT 算法示意图

#### 1.3 人工势场法

人工势场法通过人工制造虚拟势场的方法,使障碍物与机器人、目标与机器人之间分别成斥力和引力关系,并通过引力与斥力的合力决定机器人的运动方向。APF 算法原理如图 3 所示。

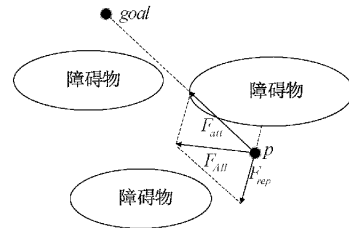


图 3 APF 算法示意图

由于机器人在运动过程中,可能受到多个障碍物的影响,导致算法容易陷入局部极小值,本文仅考虑最近障碍物的影响。最近障碍物判断方法如下:

$$D_{min} = \frac{d - R_{max}}{R_{max}} \quad (2)$$

其中,  $d$  为障碍物与节点的欧式距离,  $R_{max}$  为障碍物斥力影响范围的半径;  $D_{min}$  为影响因子,  $D_{min}$  越大,该障碍物对节点运动状态的影响越小。

当机器人距离目标较远时,目标会对机器人产生较大的引力,为避免引力远大于斥力进而导致机器人直接路过障碍物,本文对引力函数进行修改。首先设置引力临界距离  $D_0$ , 当节点  $p$  与目标  $goal$  的欧式距离  $D < D_0$  时,节点距离目标  $goal$  越远,引力越大;当节点  $p$  与目标  $goal$  的欧式距离  $D > D_0$  时,引力为固定值  $U_{max}$ ; 其次,对于目标点附近可能存在障碍物,导致机器人难以到达目标的问题,设置最小引力值  $U_{min}$ 。对于斥力势场附近的路径易发生抖动的问题,本文在斥力函数中加入影响因子  $D^n$ , 减小机器人所受合力大小的波动,  $D$  为节点  $p$  与目标  $goal$  的相对距离,  $n$  为正整数。

修改后的引力函数与斥力函数为:

$$U_{att} = \begin{cases} \max\left(\frac{1}{2}\omega D^2(P, P_{goal}), U_{min}\right), & D < D_0 \\ U_{max}, & D > D_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}\delta\left(\frac{1}{l} - \frac{1}{R_{max}}\right)^2 D^n(P, P_{goal}), & l < R_{max} \\ 0, & l > R_{max} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $U_{att}$  为引力函数,  $\omega$  为引力系数常量;  $P$  代表当前节点,  $P_{goal}$  代表目标点;  $U_{rep}$  为斥力函数,  $\delta$  为斥力系数常量,  $l$  为节点与障碍物的距离。

## 2 改进 APF-RRT 算法

### 2.1 改进 RRT 算法

#### 1) 随机点效应

RRT 算法在每次探索时以整个工作空间作为采样区域, 导致采样点易偏离目标。针对该问题, 本文引入随机点效应, 对无效采样点进行剔除。以当前节点  $p_{np}$  与目标  $goal$  的中点为圆心, 目标与该节点的欧式距离为直径建立随机点效应区域  $W_O$ , 下一节点总是在该区域内产生, 即  $p_{new} \in W_O$ , 如图 4(b) 所示。通过随机点效应方法能够筛选无效采样点, 减少算法的搜索时间, 使算法收敛速度加快。

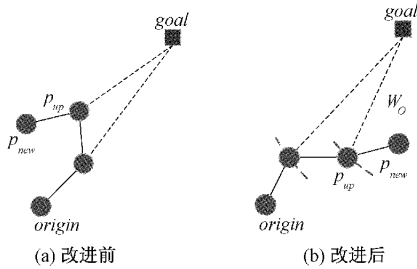


图 4 随机点效应

#### 2) 采样点选择机制

随机效应区域内产生的随机点  $p_{new}$  具有随机点效应强度属性, 本文引入参数  $O_i$  来评价该属性, 若新节点的随机效应强度大于其父节点且无碰撞, 那么该节点满足采样点选择机制, 可作为新节点加入随机树中。  $O_i$  初始值为 0, 当  $O_i$  为 1 时该节点为最优节点  $p_{near}$ 。在不发生碰撞的情况下,  $O_i$  随着采样的进行逐渐变大, 如果发生碰撞则初始化  $O_i$ , 随机效应强度计算方式如下:

$$O_i = O_{i-1} + q \left( \mu \frac{Eu(p_{near}, goal)}{Eu(p_{new}, goal)} + \tau \frac{\varphi}{180} \right) \quad (5)$$

其中,  $q$  为随机效应强度增长速度,  $\mu, \tau$  为正实数, 分别路径长度约束与采样方向约束的大小,  $\mu + \tau = 1$ ;  $Eu$  为欧式距离函数,  $\varphi$  表示该点到目标的方向且具有最小方向阈值。当机器人附近无障碍物时, 方向阈值为  $120^\circ$ ,  $\mu < \tau$ , 生成节点有一定几率为最优节点。当发生碰撞时  $\mu > \tau$ , 减小  $\varphi$  与  $q$  的大小并初始化随机效应强度。采样点的选择是路径规划的关键部分, 该采样点选择机制能够根据机器

人所处区域选取较优节点, 加快算法收敛速度, 采样点选择机制如图 5 所示。

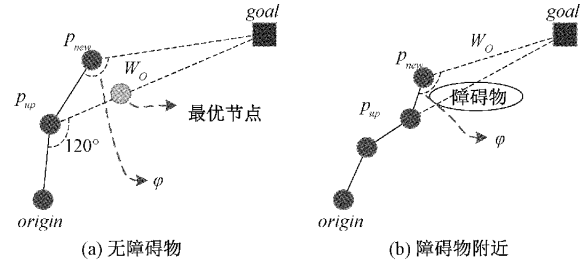


图 5 随机点选择机制

### 2.2 改进 APF-RRT 算法

RRT 算法与 APF 算法的融合能够帮助 APF 算法逃离局部极小值, 加速算法的收敛速度, 改进 APF-RRT 算法的采样原理如图 6 所示。

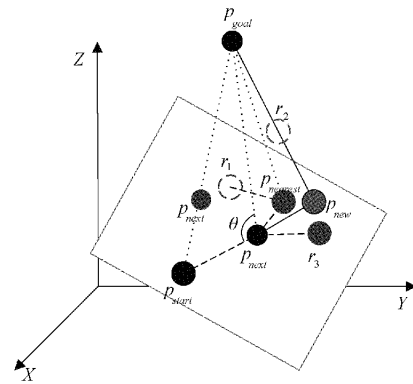


图 6 改进 APF-RRT 算法采样策略

其中, 红色  $p_{newt}$  节点为 APF 算法将生成的下一个节点, 经判断该节点发生碰撞或陷入局部极小值, 因此切换 APF-RRT 算法进行协同规划。协同规划时由改进 RRT 算法生成黑色  $p_{next}$  节点, 并初始化  $O_i$ 。与传统 APF-RRT 算法相比, 传统 RRT 生成的节点  $p_{nearst}, r_1, r_3$  虽然能够帮助逃离局部极小值, 但是逃离速度慢, 且由于 RRT 算法随机性强导致采样点在障碍物附近滞留, 无法形成较优路径。而本文通过改进 RRT 算法进行采样, 生成的  $p_{new}$  节点在路径长度和方向上都较优, 因此能够生成一条趋近最优的无碰撞路径, 算法流程如图 7 所示。

其中预置参数包括起始点、目标点以及步长。将起始点作为根节点, 通过改进 APF-RRT 算法进行路径搜索, 每次采样均对最近障碍物、随机点效应区域和随机效应强度进行计算, 加快算法的收敛速度使算法趋近最优, 且能够利用障碍物附近的空。

### 2.3 路径优化

#### 1) 路径冗余点删除

由于 RRT 算法在空间内无序采样, 且步长固定, 导致生成路径较冗长, 如图 8(a) 所示。针对该问题, 对路径进行冗余点删除, 删除方法如图 8(b) 所示。具体方法为建立

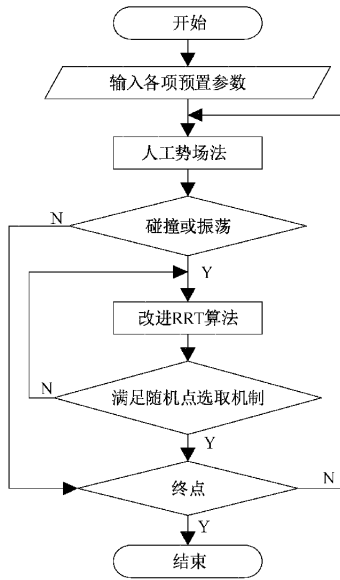


图 7 算法流程

以初始点为起点的新随机树 *Newtree*，从原随机树 *tree* 的起点开始遍历 *tree* 中所有节点，找出距离目标点最近且与起始点无碰撞的树节点，将其作为 *Newtree* 的最新节点。循环遍历，直到最新节点为目标点，并输出 *Newtree*。

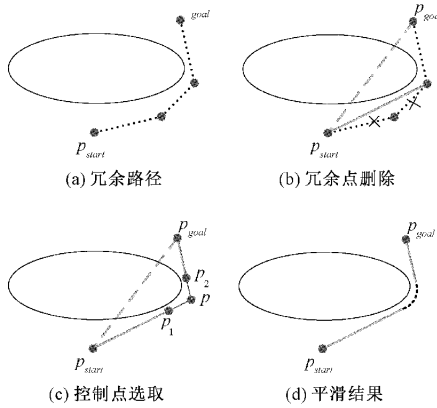


图 8 路径优化方法示意图

2) 四次 B-样条曲线

考虑到优化后的路径为多段路径，障碍物附近的路径

曲率易突变，容易导致机械臂在运动过程中出现抖动等现象。本文使用四次 B 样条曲线对路径进行平滑，B-样条曲线函数表达式如下：

$$B_{curve} = \sum_{i=0}^m N_{i,p}(u) P_i \quad (6)$$

式中： $N_{i,p}(u)$  为  $p$  次 B-样条基函数， $P_i$  为第  $i$  个控制点， $u \in (0, 1)$ 。为了减小路径优化后路径长度发生较大变化，本文仅在路径曲率突变点附近进行平滑操作，控制点选取方法及平滑结果如图 8(c)、(d) 所示。

3 实验仿真与分析

为验证算法的有效性，在 MATLAB2020a 平台上对算法进行实验分析，算法所使用预置参数如表 2 所示。

表 2 预置参数及数值

预置参数	数值
步长/cm	5
引力系数	0.4
斥力系数	0.1
最小引力	0.2
初始固定引力	0.4
引力影响临界距离/cm	80

3.1 避障路径规划仿真

本文将 UR5 机械臂作为机械臂模型，研究笛卡尔空间下机械臂的避障路径规划。通过标准 D-H 方法建立机械臂模型，并使用蒙特卡洛法计算机械臂的运动空间，以此确定机械臂的有效起始位置和目标位置。其次，算法所规划的路径应该满足机械臂与障碍物不发生碰撞，因此采用数值分析法通过逆运动学求解机械臂的各关节角。最终，设置机械臂的起始点为 (0.8, 0, 0.4)、目标点 (0, 0.7, 0.6)，障碍物为椭球体。

在进行避障路径规划仿真时，使用不同障碍物数量的三维环境模拟工作环境的复杂程度，障碍物数量越多环境越复杂。在 3 种环境中分别使用 RRT 算法、未改进 APF-RRT 和改进 APF-RRT 算法进行避障路径规划仿真，实验仿真结果如图 9~11 所示。

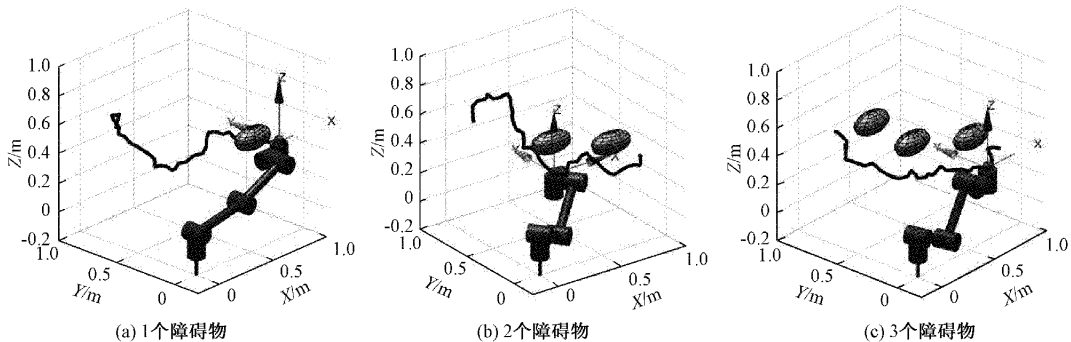


图 9 RRT 算法避障路径规划

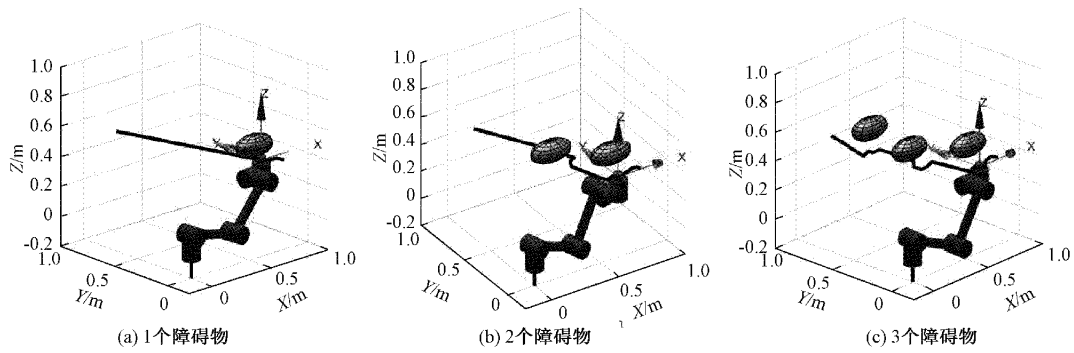


图 10 未改进 APF-RRT 算法避障路径规划

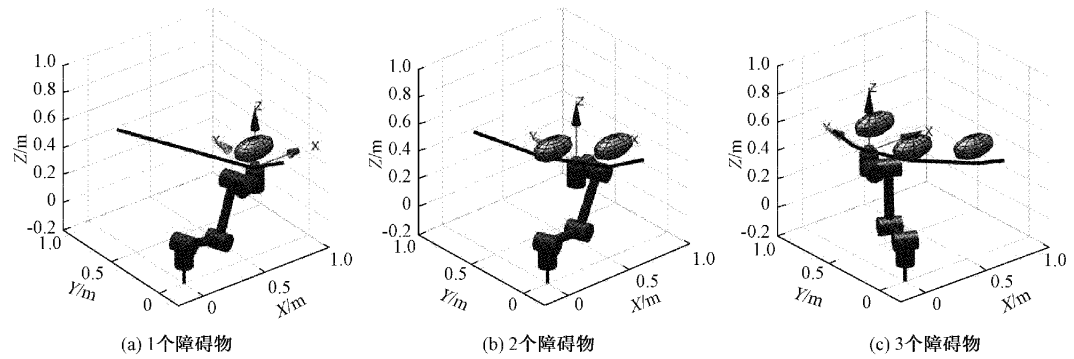


图 11 改进 APF-RRT 算法避障路径规划

由图 9~11 可以看出, RRT 算法所规划路径曲折且路径冗长, 未改进 APF-RRT 算法在障碍物附近容易生成冗余路径, 而改进 APF-RRT 算法能够在障碍物数量不同的环境下生成比较平滑的路径, 完成避障路径规划。

### 3.2 仿真结果分析

在碰撞检测方法、仿真环境相同的前提下, 使用 RRT、APF-RRT 与改进 APF-RRT 三种算法分别进行实验, 每组实验进行 20 次, 对比数据如表 3 所示。

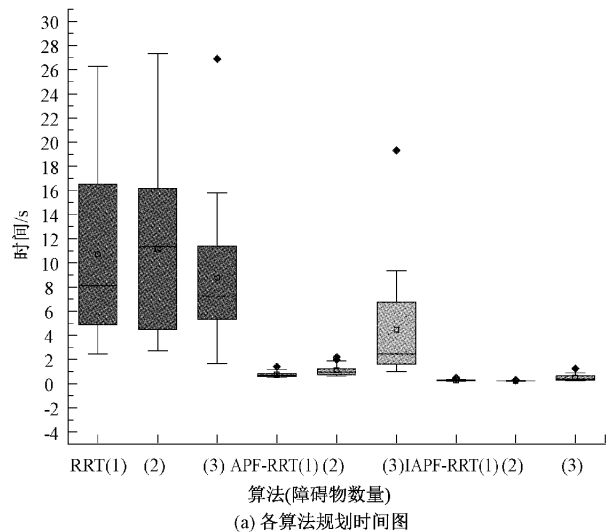
表 3 实验数据

障碍物 个数	RRT		APF-RRT		改进 APF-RRT	
	时间/ s	路径/ cm	时间/ s	路径/ cm	时间/ s	路径/ cm
1	10.7	193	0.73	121	0.26	109
2	11.1	193	1.04	132	0.22	115
3	8.7	202	4.44	159	0.48	121

由表 3 知, 经典 RRT 算法与 APF-RRT 算法能够在所给定实验环境中完成避障路径规划, 且 APF-RRT 算法要明显优于 RRT 算法, 能够在较短时间完成避障路径规划, 表明混合算法的方法能够增加路径规划效率。但是由于 RRT 算法随机性较强, 导致 APF-RRT 算法在障碍物数量增多时, 规划速度明显变慢, 导致算法效率降低。相比之

下, 改进 APF-RRT 算法能够在较短时间内完成规划且所规划的路径较短。另外, 随着障碍物数量的增多, RRT 算法与 APF-RRT 算法完成路径规划的时间与所规划路径的长度波动范围较大, 如图 12 所示, 而改进 APF-RRT (图中为 IAPF-RRT) 算法较为稳定, 表明该算法具有较强的鲁棒性。

综上所述, 本文所提出的改进 APF-RRT 算法能够实现复杂环境下的避障路径规划, 且耗时较少、规划路径较短, 接近最优。



(a) 各算法规划时间图



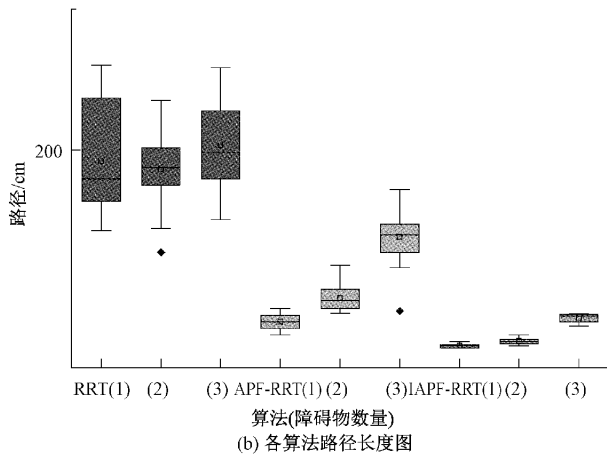


图 12 算法实验结果对比

## 4 结 论

本文提出一种适用于椭球体障碍物的改进 APF-RRT 算法,用来提高机械臂避障路径规划效率。首先,将障碍物包络为椭球体,分析了椭球体障碍物的碰撞检测方法,并对该方法的有效性进行了验证;其次,将改进 RRT 算法与 APF 算法融合,加速了算法的搜索速度。最后,在不同障碍物数量的复杂环境下实现了避障路径规划,验证了算法的有效性。与经典 RRT 算法、APF-RRT 算法的对比实验表明,在复杂环境中,该算法能够实现避障路径规划,且规划速度较快、所规划路径较短。

### 参考文献

- [1] 刘奇,宋凯,张世平,等.基于目标向量的非全向测距机器人路径规划[J].电子测量技术,2012,35(5):73-77.
- [2] 李龙,陈禾炜,汪田鸿,等.基于接近觉的机械臂避障路径规划[J].机器人,2022,44(5):601-612,DOI:10.13973/j.cnki.robot.210302.
- [3] 王刚,张方,严大亮,等.基于改进蚁群算法的机器人三维路径规划[J].国外电子测量技术,2020,39(11):1-6.
- [4] 刘亚秋,赵汉琛,刘勋,等.一种基于改进的快速扩展随机树的工业机器人路径避障规划算法[J].信息与控

制,2021,50(2):235-246,256.

- [5] 林依凡,陈彦杰,何炳蔚,等.无碰撞检测 RRT' 的移动机器人运动规划方法[J].仪器仪表学报,2020,41(10):257-267.
- [6] 陈锦涛,李鸿一,任鸿儒,等.基于 RRT 森林算法的高层消防无人机室内协同路径规划[J/OL].自动化学报:1-12[2022-12-12],DOI:10.16383/j.aas.c210368.
- [7] 刘翰培,王东署,汪宇轩,等.移动机器人路径规划的模糊人工势场法研究[J].控制工程,2021,26(5):33-38.
- [8] 荆泽成,张秋菊,杨瑞.基于改进 RRT 的核退役机器人避障方法[J].现代制造工程,2022(2):46-51.
- [9] 赵惠,李庆党,张明月.基于改进 RRT 算法的机械臂路径规划方法[J].电子测量技术,2021,44(16):45-49.
- [10] KANG J G, LIM D W, CHOI Y S, et al. Improved RRT-connect algorithm based on triangular inequality for robot path planning [J]. Sensors, 2021, 21(2): 333.
- [11] 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.
- [12] LI X. Trajectory planning with real time vision-based obstacle detection[D]. University of British Columbia Vancouver, 2020.
- [13] 祝敬,杨马英.基于改进人工势场法的机械臂避障路径规划[J].计算机测量与控制,2018,26(10):205-210.
- [14] 张建冬,王东,马立东,等.基于改进 RRT 算法的移动机械臂路径规划[J].电子测量技术,2021,44(23):48-53.
- [15] LIANG X, MENG G, XU Y, et al. A geometrical path planning method for unmanned aerial vehicle in 2D/3D complex environment [J]. Intelligent Service Robotics, 2018, 11(3): 301-312.

### 作者简介

田金文,硕士,主要研究方向为自主导航与智能控制、机器人路径规划等。

E-mail: Melodic\_Tian@163.com