



计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目：多障碍环境下机械臂避障路径规划的研究
作者：陈满意，张桥，张弓，梁济民，侯至丞，杨文林，徐征，王建
收稿日期：2019-07-05
网络首发日期：2019-11-04
引用格式：陈满意，张桥，张弓，梁济民，侯至丞，杨文林，徐征，王建. 多障碍环境下机械臂避障路径规划的研究. 计算机集成制造系统.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20191104.1056.008.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

多障碍环境下机械臂避障路径规划的研究

陈满意¹, 张 桥^{1,2}, 张 弓²⁺, 梁济民³, 侯至丞², 杨文林², 徐 征², 王 建²

(1. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 广州中国科学院先进技术研究所, 广东 广州 511458; 3. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

摘 要: 为了提高协作机器人在多障碍环境下的避障路径规划的成功率和效率, 针对机械臂和障碍物提出碰撞检测方法, 并提出低振荡人工势场-自适应快速扩展随机树 (ARRT) 混合算法进行路径规划, 机械臂先采用低振荡人工势场法进行搜索, 当遇到局部极小、碰撞等情况时切换成 ARRT 进行逃离, 直至到达目标点。另外, 为了在每个步长都取得最优的逆运动学关节角, 保证前后步长对应关节角度值变化连续性, 提出最短行程逆解算法。为了提高规划后的路径质量, 提出一种冗余路径节点删除策略并使用四次贝塞尔曲线对路径进行拟合。经过仿真分析, 机械臂在多障碍环境下对于环境复杂度的适应性强, 路径搜索成功率高于经典算法, 其平均路径搜索时间相比于经典 RRT 算法从 26.1 s 下降到 3.6 s, 算法搜索成功率和效率都得到显著改善。

关键词: 协作机器人; 机械臂; 避障路径规划; 低振荡人工势场法; 自适应快速扩展随机树法

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Research on Obstacle Avoidance Path Planning of Manipulator in Multiple Obstacles Environment

CHEN Manyi¹, ZHANG Qiao^{1,2}, ZHANG Gong²⁺, LIANG Jimin³, HOU Zhicheng², YANG Wenlin², XU Zheng², WANG Jian²

(1.School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Guangzhou Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China; 3.Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to improve the success rate and efficiency of the obstacle avoidance path planning of the cooperative robot in multiple obstacles environment, a collision detection method and a low-oscillation-artificial-potential-field & adaptive-rapidly-exploring-random-tree method (ARRT) hybrid algorithm are proposed. Low-oscillation-artificial-potential-field method is firstly used to search, and when there is a local minimum situation, collision, etc. it switches to ARRT to escape. By this way, the manipulator can reaches the target point. In addition, to ensure the continuity of the joint angle between the two continuously step, the shortest stroke algorithm is proposed to obtain the optimal inverse kinematic joint angle. In order to improve the quality of the planned path, a redundant path node deletion strategy is proposed and the path is fitted by four-time Bessel curve. Through simulation analysis, the manipulator has strong adaptability to adapt multiple obstacles environment, and the success rate of path search is

higher than the traditional algorithm. The average time of path search is reduced from 26.1 s to 3.6 s compared with the classical RRT algorithm. Therefore, the algorithm search success rate and efficiency have been significantly improved.

Keywords : Collaborative robots; Manipulator; Obstacle avoidance path planning; Low-oscillation-artificial-potential-field method; Adaptive-rapidly-exploring-random-tree method

0 引言

如今,协作机器人发展迅速,在手机等 3C 行业发挥的作用越来越大,如图 1 所示是多机器人协作进行手机配件装盒,由于机器人布置密集,工作的时候存在很多干涉碰撞问题,因此协作机器人避障路径规划成为了一大关键突破点,众多学者都对其进行了研究。避障路径规划是指在工作空间存在障碍物的情况下,机器人在有限的时间内规划出一条无碰撞的路径^[3-9],由于工业机械臂的应用环境越来越复杂,避障路径规划的作用也越来越重要。

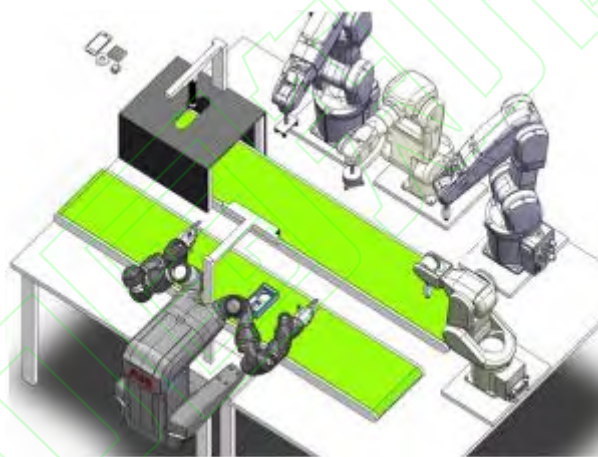


图 1 协作机器人

人工势场法由 O. Khatib 于 1985 年提出^[1],其规划的路径质量高,但是容易陷入局部极小而发生振荡。RRT 算法由 Lavelle 于 1998 年正式提出^[2],其在多障碍物环境下搜索成功率很高,但是其搜索随机性大,效率低。很多学者对这两种算法分别进行过改进,姬伟等提出一种基于虚拟目标点的人工势场法用于机械臂逃离局部极小值^[5]。Wang, W. R.等提出了一种基于改进吸引力势函数的人工势场法实现机械臂关节角速度的平滑过渡^[6]。Seyyed,M.H. R 等提出了一种基于代价函数的人工势场法用于解决路径搜索容易陷入局部极小值和目标不可达的问题^[7]。陈晋音等提出改进的 EB_RRT 算法解决障碍物附近路径搜索迭代次数过高的问题^[8]。Wei Kun 等提出了一种 S-RRT 路径规划算法提高路径节点扩展效率^[9]。何兆楚等提出人工势场-RRT 算法解决路径搜索容易陷入局部极小值的问题^[10]。

根据以上分析,前人都是在机械臂的关节空间进行规划,需要将障碍物转换到关节空间,计算复杂,为此,

本文在笛卡尔坐标空间进行机械臂避障路径规划，为了在每个步长都取得最优的逆运动学关节角，保证前后步长对应关节角度值变化连续性，提出最短行程逆解算法^[11]，使用包围球和圆柱包络法对障碍物和机械臂连杆进行近似模拟^[12]，检测机械臂连杆和障碍物的碰撞。提出一种低振荡人工势场-ARRT 混合算法，先采用低振荡人工势场法进行搜索，当遇到局部极小、碰撞等情况时切换到 ARRT 算法进行搜索，两种算法结合使用，直至到达目标点。低振荡人工势场法降低了路径的振荡程度，ARRT 算法则在经典 RRT 算法基础上加入自适应避障策略，提高搜索效率。另外，提出冗余路径节点删除策略并使用四次贝塞尔曲线对路径进行拟合^[13]，提高路径质量。

1 算法原理

1.1 碰撞检测方法

本文研究对象为六自由度机械臂，碰撞检测指的是障碍物与机械臂连杆的碰撞检测，而实际工程应用中障碍物的外形一般不规则，很难通过精确的数学公式进行表达，因此，本文采用包围球对障碍物进行近似的模拟，采用圆柱包络法对机械臂连杆进行简化，该方法虽然增加了障碍物和机器人本体的区域，但是大大简化了计算量，如图 2 所示。

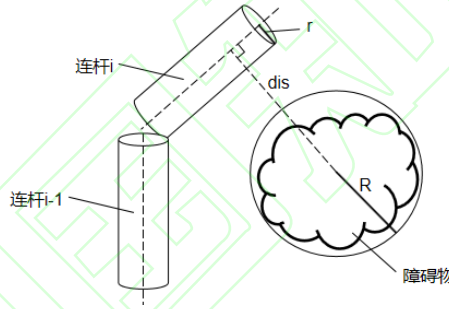


图 2 障碍物和机器人碰撞检测模型

在三维空间内计算障碍物中心点和每根连杆所在直线的距离 dis ，比较 dis 和 $R+r$ 的大小，若 $dis \geq R+r$ ，则障碍物和连杆没有发生碰撞，若障碍物与机器人各连杆都满足无碰撞条件，则机器人当前状态满足无碰撞条件。

1.2 最短行程解算法

本次路径规划研究是在笛卡尔空间完成的，根据机械臂末端位姿采用逆运动学求解最多可求得八组解，为了在每个步长都取得最优的逆运动学关节角，保证前后步长对应关节角度值变化连续性，所以提出了最短行程逆解算法，因此两个步长之间每个关节的角度变化需尽可能小，即实现“最短行程”。机械臂空间搜索每移动一个步长的最短行程解就是使得每一个关节角度变化最小，求出关节角变量的 L_1 范数最小值即可，又由于机械臂六个连杆中靠近末端的连杆主要决定机械臂末端执行器的姿态，远离末端的连杆主要决定机械臂末端执行器的位置，所以求最短行程解时需要加权，满足式 (1) 的各关节角度值即为最短行程解：

$$\min \sum_{i=1}^6 |\omega_i \Delta \theta_i| \quad (1)$$

上式中， $\Delta \theta_i$ 为每个关节角度值的变化量， ω_i 为每个关节角度值变化量的加权系数。

1.3 低振荡人工势场法

人工势场法是局部路径规划方法，目标点对机械臂产生引力作用，障碍物对机械臂产生排斥力作用，引力和斥力的合力方向决定机器人运动方向，如图 3 所示。

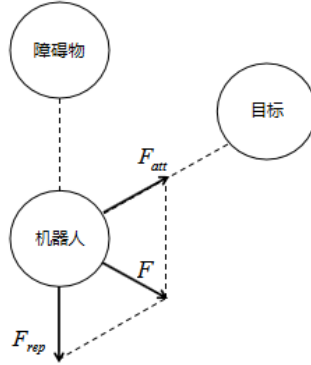


图 3 人工势场法

机器人在路径搜索过程中，由于目标点附近可能存在障碍物，导致机器人很难到达目标点，本文对人工势场法的引力势函数进行修改，添加最小引力势能 $U_{att}(\min)$ 。对于斥力势函数，斥力场作用范围半径为 l_0 ，故在斥力场边缘处会存在斥力突变的情况，路径规划容易发生振荡，因此本文对斥力场势函数添加了一个加权系数 $\left(\frac{l_0-l}{l_0}\right)^3$ ，使得斥力场从边缘向着中心位置逐渐以三次增长趋势过渡，减缓路径振荡，如下式 (2) 和 (3) 是改进的引力场和斥力场势函数：

$$U_{att} = \max\left(\frac{1}{2}k_a|P_{robot}-P_g|^2, U_{att}(\min)\right) \quad (2)$$

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_r\left(\frac{l_0-l}{l_0}\right)^3\left(\frac{1}{l}-\frac{1}{l_0}\right)^2, & l \leq l_0 \\ 0, & l > l_0 \end{cases} \quad (3)$$

上式中， U_{att} 表示引力势函数， k_a 为引力系数， P_{robot} 表示机器人当前位置， P_g 为目标点位置。 U_{rep} 表示斥力势函数， k_r 代表斥力系数， l 代表机器人与障碍物之间的距离， l_0 代表斥力场作用范围，对于如何选择其中的常量值，文献[14]进行了详细的论述。

机器人的势能总和如式 (4)：

$$U = U_{att} + U_{rep} \quad (4)$$

如下图 4 是经典人工势场法和低振荡人工势场法的仿真效果对比，在障碍物、步长等其他条件均相同的情况下，低振荡人工势场法的路径相比于经典人工势场法的路径，粗线代表低振荡人工势场法规划的路径，其振荡幅度明显降低。

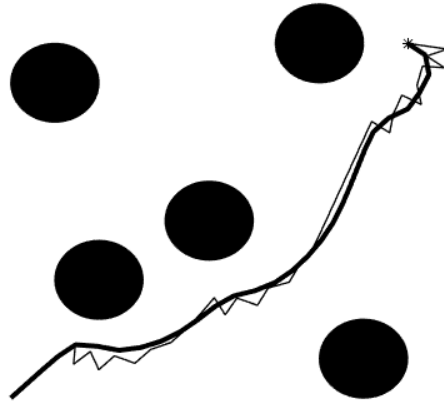


图 4 经典人工势场法和低振荡人工势场法对比

1.4 ARRT 算法

经典 RRT 算法的原理如图 5 所示，机器人每一次路径搜索都需要寻找一个随机点 x_{rand} ，在已经存在的路径节点中选取距离 x_{rand} 最近的点 x_{near} 并以步长 $step$ 朝着随机点 x_{rand} 的方向进行扩展，以此方式搜索路径直至到达终点。

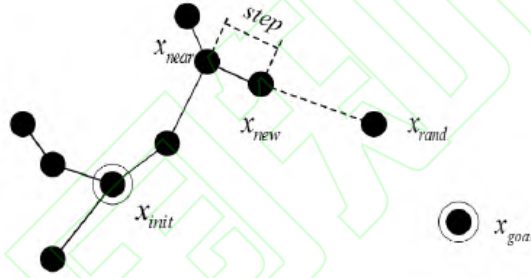


图 5 快速扩展随机树法

由于快速扩展随机树法的路径搜索方向始终是 $\overrightarrow{x_{near}x_{rand}}$ ，具有很强的随机性，当路径延伸到障碍物附近时，新生成的节点可能与障碍物发生干涉而被舍弃，使这次迭代未插入新的节点，这种情况在多障碍物环境下比较容易发生，因此本文提出自适应避障策略，如图 6 所示。RRT 算法在三维直角坐标空间进行规划，当前节点为 q_{end} ， q_{new1} 为当前确定的新的路径节点，但是由于 q_{new1} 与障碍物碰撞（此处为了使得示意图便于理解，障碍物并未画出），因此 q_{new1} 被舍弃，算法需重新寻找新的节点。图中， q_{end-1} 为 q_{end} 的上一个节点，即父节点， S 为过 q_{end} 节点且与 $\overrightarrow{q_{end}q_{new1}}$ 垂直的平面， O_0 为 S 平面上以 q_{end} 为中心的椭圆， O_1 为 O_0 在 XOY 面上的投影且为单位圆，直线 X' 为过 O_1 圆心且与 X 轴平行的直线， q'_{init} 为路径规划的起始点在 XOY 面上的投影点， q'_{goal} 为路径规划的终点在 XOY 面上的投影点，直线 AB 为过两点的直线， CD 为过 O_1 圆心且垂直于直线 AB 的直线，垂足为 D 。

自适应 RRT 的原理是在单位圆 O_1 上取点 E ，点 E 的选择原则是在圆 O_1 上被直线 CD 分割的且靠近 q'_{goal} 的那一半圆弧上选择，已知 q_{end} 坐标为 (x_0, y_0, z_0) ，则 O_1 坐标为 $(x_0, y_0, 0)$ ， E 点的坐标是 $(x_0 + \cos\theta, y_0 + \sin\theta, 0)$ ，点 E' 为圆 O_0 上对应于 E 点的点，则 E' 点的坐标是 $(x_0 + \cos\theta, y_0 + \sin\theta, z_E)$ ， z_E 未知。已知 q_{new1} 的坐标为 (x_1, y_1, z_1) ，因为平面 S 过 q_{end} 节点且与 $\overrightarrow{q_{end}q_{new1}}$ 垂直，因此平面 S 的方程如下：

$$(x_1 - x_0)(x - x_0) + (y_1 - y_0)(y - y_0) + (z_1 - z_0)(z - z_0) = 0 \quad (5)$$

则通过式 (5) 可以计算出 z_E :

$$z_E = \frac{(x_1 - x_0)(x_0 + \cos\theta - x_0) + (y_1 - y_0)(y + \sin\theta - y_0)}{z_1 - z_0} + z_0 \quad (6)$$

已知算法搜索的步长为 d , 则采用 ARRT 算法计算的新节点 q_{new2} 位于直线 $\overrightarrow{q_{end}E'}$ 方向上, 且距离 q_{end} 的距离为一个步长 d , 设 q_{new2} 的坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 如下式 (7) 所示:

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + \left(\frac{x_E - x_0}{\sqrt{(x_E - x_0)^2 + (y_E - y_0)^2 + (z_E - z_0)^2}} \right) \times d \\ y_2 = y_0 + \left(\frac{y_E - y_0}{\sqrt{(x_E - x_0)^2 + (y_E - y_0)^2 + (z_E - z_0)^2}} \right) \times d \\ z_2 = z_0 + \left(\frac{z_E - z_0}{\sqrt{(x_E - x_0)^2 + (y_E - y_0)^2 + (z_E - z_0)^2}} \right) \times d \end{cases} \quad (7)$$

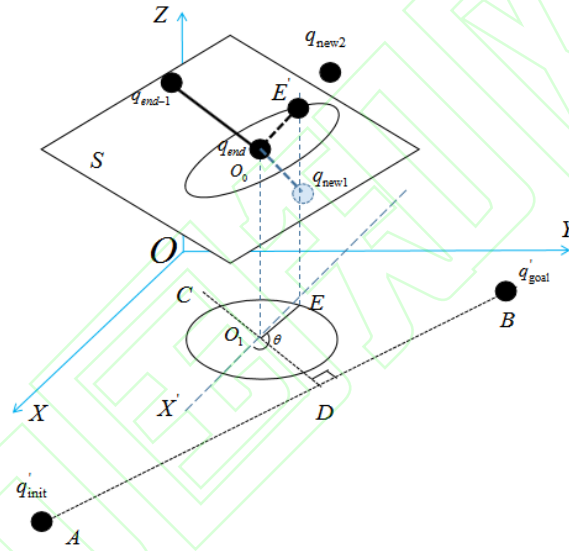


图 6 ARRT 算法的自适应策略

如下表 1 是经典 RRT 算法和 ARRT 算法经过 MATLAB 仿真分析之后的迭代次数对比, 在障碍物、步长等其他条件均相同的情况下仿真分析 20 次, ARRT 算法的平均迭代次数相比于经典的 RRT 算法的平均迭代次数从 143.8 次降低到了 89.8 次, 有效地提高了障碍物附近机器人避障路径搜索的效率。

表 1 经典 RRT 和 ARRT 平均迭代次数对比

	经典 RRT	ARRT
20 次试验平均迭代次数	143.8	89.8

2 低振荡人工势场-ARRT 混合算法

2.1 人工势场法和 RRT 算法的结合

利用一种算法的优点来弥补另外一种算法的缺点是学术研究的重要思路^[15-16], 本文提出低振荡人工势场-ARRT 混合算法, 机器人先采用低振荡人工势场法进行搜索, 当遇到局部极小、碰撞等情况时切换成 ARRT 算

法进行搜索，两种方法结合使用，直至到达目标点。判断碰撞的方法已经在前文叙述，判断机器人由于局部极小值点等引起的振荡则采用如下策略进行判断。

当前节点为 q_{end} ，当前节点的前一个节点为 q_{end-1} ， q_{new} 为当前确定的新的路径节点，从图 7 可以看出， q_{end-1} 、 q_{end} 、 q_{new} 这三个节点已经有出现振荡的趋势，从夹角 θ 即可看出，因此判断夹角 θ 的大小即可判断人工势场法是否出现振荡，在平面内和三维空间都适用，设 q_{end} 坐标为 $A(x_0, y_0, z_0)$ ， q_{end-1} 坐标为 $B(x_1, y_1, z_1)$ ， q_{new} 坐标为 $C(x_2, y_2, z_2)$ ，则由余弦定理：

$$\theta = \arccos \frac{|AB|^2 + |AC|^2 - |BC|^2}{2 \times |AB| \times |AC|} \quad (8)$$

具体阈值取 $\theta \leq \pi/6$ 时，判定人工势场法可能出现振荡，此时切换为 ARRT 算法进行搜索，逃离之后再切换回低振荡人工势场法进行搜索。

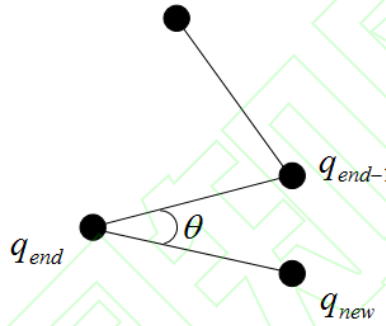


图 7 路径振荡判断

算法伪代码如下：

```
low - oscillation artificial potentialfield - ARRT hybrid
1.  $T \leftarrow \text{init}(q_{init})$ ;
2.  $q_{new} \leftarrow \text{Low - Oscillation\_Artificial\_Potential}(x)$ ;
3. if Collision\_detection( $q_{new}$ ) or Oscillation\_detection( $q_{new}, q_{end}, q_{end-1}$ ) then
4.  $q_{new} \leftarrow \emptyset$ 
5.  $q_{new} \leftarrow \text{ARRT}(x)$ ;
6. If Collision\_detection( $q_{new}$ )
7. Return advanced;
8. Else
9. If  $q_{new} = q_{end}$  then
10. Return Reached;
11. Else
12. Extend( $T, q_{new}$ )
13. Return Low - Oscillation\_Artificial\_Potential( $x$ );
14. Else
15. If  $q_{new} = q_{end}$  then
16. Return Reached;
17. Else
18. Extend( $T, q_{new}$ );
```

算法流程图如图 8 所示。使用最短行程解算法来保证机械臂在笛卡尔空间规划的关节角度变化连续性，规划过程在笛卡尔空间进行，不需要将障碍物转化到关节空间，可节省很大的计算量。

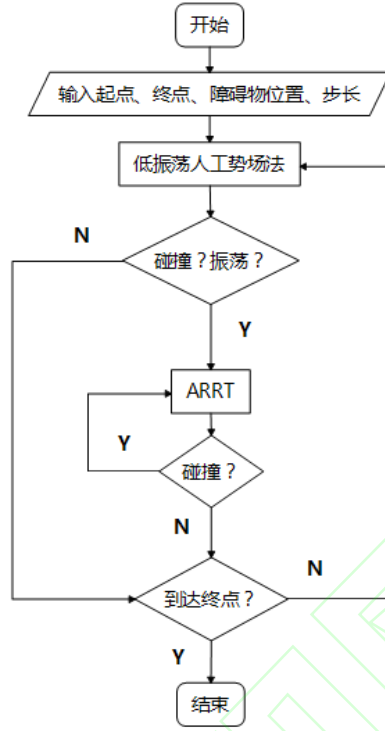


图 8 低振荡人工势场-ARRT 混合算法流程图

2.2 路径优化

2.2.1 冗余路径节点删除策略

由于 RRT 算法的随机性，有学者提出 RRT* 算法进行节点路径的优化^[17]，但是 RRT* 的算法所使用的路径优化策略只针对于单独使用 RRT 算法的情况，因此本文提出了一种冗余路径节点删除策略，其步骤描述如下：

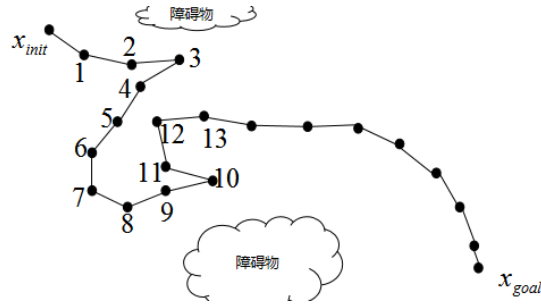
- (1) 低振荡人工势场法切换到 ARRT 算法；
- (2) 定义 *Tree* 数组，*Tree* 相当于一个节点容器用来收集低振荡人工势场-ARRT 混合算法的节点，定义 *RRTtree* 数组，*RRTtree* 数组用来收集 ARRT 算法的节点，确定本次 ARRT 扩展的新节点 q_{new} ；
- (3) 新增节点 q_{new} 到 *Tree* 数组， q_{new} 的前一个节点，也就是当前节点为 q_{end} ，将 q_{end} 和 q_{new} 到 *RRTtree* 数组；
- (4) 按照节点添加的时间先后顺序，在 *RRTtree* 数组中从第一个节点开始计算和 q_{new} 的距离 *distance*，已知步长 d ，假设满足如下条件：

$$distance < d \quad (9)$$

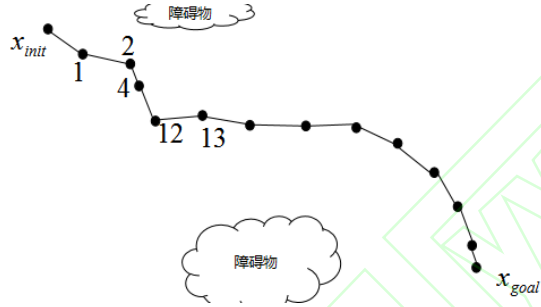
则定义该节点为 q_{inter} ，并直接连接 q_{new} 和 q_{inter} ，若没有节点和 q_{new} 的距离小于一个步长，则直接转到步骤 (6)；

- (5) 删除 *Tree* 数组和 *RRTtree* 数组中 q_{inter} 和 q_{new} 之间的所有节点；
- (6) 切换回人工势场法。删除振荡中间点，也就是当前节点 q_{end} 的前一个节点 q_{end-1} 。

如图 9 所示，由节点 2、3、4 等可判断路径出现振荡，因此删除节点 3，并连接节点 2 和节点 4。又节点 4 和 12 之间无碰撞且距离接近一个步长，因此连接节点 4 和 12，并删除它们之间的节点 5、6、7、8、9、10、11。



(a) 冗余路径节点删除前



(b) 冗余路径节点删除后

图 9 冗余路径节点删除策略

如图 10 是在低振荡人工势场-ARRT 混合算法的基础上使用冗余路径节点删除策略与否的仿真效果对比，在障碍物、步长等其他条件均相同的情况下，使用冗余路径节点删除策略，路径明显得到优化。

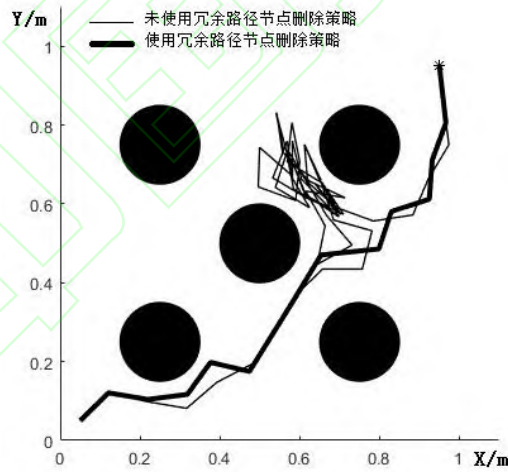


图 10 冗余路径节点删除策略 MATLAB 仿真效果

2.2.2 四次贝塞尔曲线拟合

为了使得路径在节点转折点处变得光滑，使用四次贝塞尔曲线对路径进行拟合，包含 $n+1$ 个顶点的 n 次贝塞尔曲线方程如式 (5)：

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t) \quad , t \in [0,1] \quad (10)$$

其中 P_i 为控制多边形的顶点， $B_{i,n}(t)$ 为伯恩斯坦基函数。

为了降低路径的波动性，但又尽量需要保证拟合的曲线和原轨迹曲线的一致性，选用四次贝塞尔曲线进行拟合，四次贝塞尔曲线最多只能拟合五个点，所以需要使用多段贝塞尔曲线进行拼接，为了保证几何连续性，在起点 x_{init} 与节点 1 中间取过渡点 1-2，之后每隔三个节点取一个过渡点，每两个过渡点和它们之间的三个节点一共五个点拟合一条四次贝塞尔曲线，以此类推，如图 11 所示。

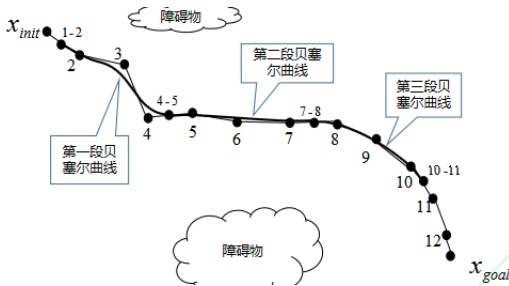


图 11 四次贝塞尔曲线拟合

2.3 技术路线流程图

已知起点、终点和步长，采用低振荡人工势场-ARRT 算法进行搜索，每搜索一个步长，则采用最短行程逆解算法计算机械臂的最优关节角，再进行碰撞检测，规划出一条无碰撞路径之后，采用冗余路径节点删除策略和贝塞尔曲线拟合提高路径质量，如图 12 是技术路线流程图。

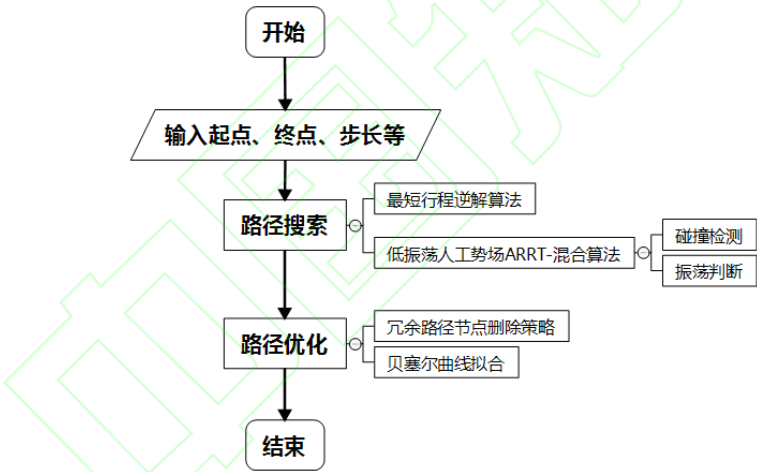


图 12 技术路线流程图

3 仿真分析

为验证算法的有效性，采用丹麦优傲公司的 UR5 机器人模型作为研究对象，使用 MATLAB 进行仿真分析，在空间中设置起点和终点，在有限的时间规划出一条从起点到终点的无碰撞路径，则避障路径规划成功。

该机器人为六自由度机械臂，如图 13 所示。



图 13 UR5 机器人模型

表 2 为机器人的运动控制参数，其中起点、终点根据机器人工作空间范围进行选择，搜索步长、斥力场作用范围根据机器人和障碍物外形尺寸进行设定。

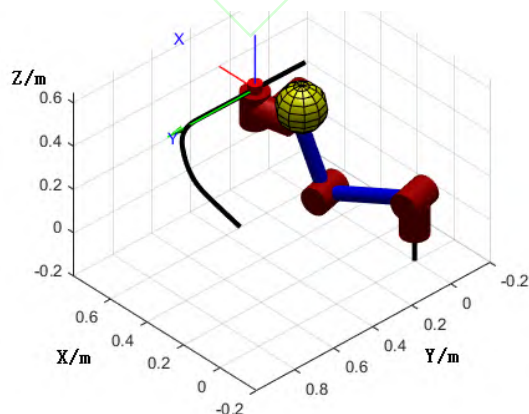
表 2 机械臂运动控制参数表

参数	值
起点/m	(0.1,0.8,0.3)
终点/m	(0.6,0,0.4)
搜索步长/m	0.05
障碍物最大半径/m	0.1
机械臂连杆最大半径/m	0.05
引力系数	10
斥力系数	10
最小引力势能	0.1
斥力场作用范围 d_0 /m	0.3
加权系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$	3
加权系数 $\omega_4, \omega_5, \omega_6$	1

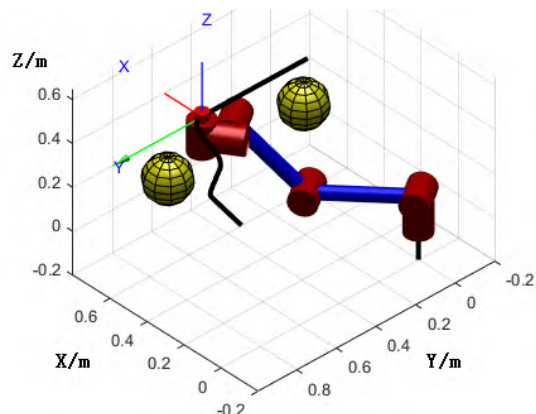
仿真分析一 算法对环境复杂程度的适应性实验。

经过四次分析对比，每次相比前一次多增加一个障碍物，模拟环境复杂程度。

由下图 14 可以看出，随着障碍物数量增加，低振荡人工势场-ARRT 混合算法仍然能够指引机械臂成功避障。



(a) 一个障碍物



(b) 二个障碍物

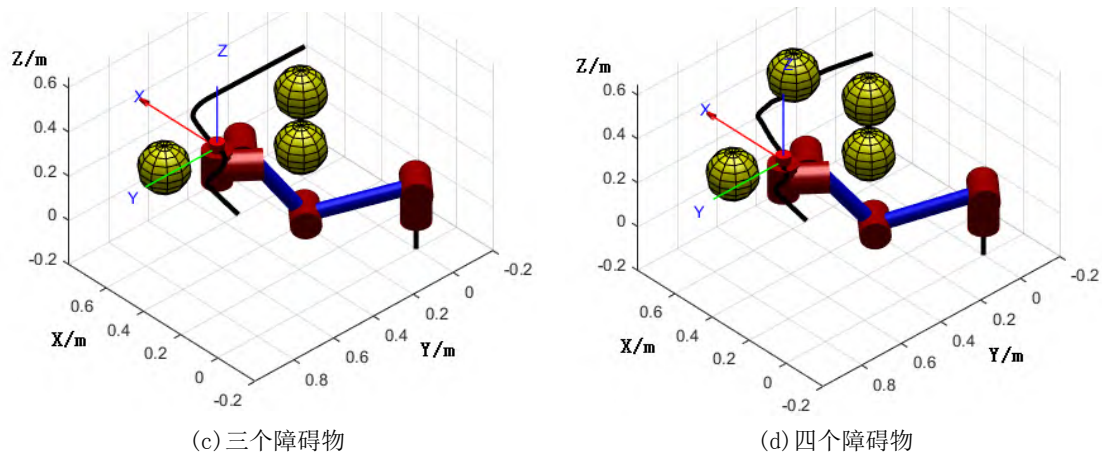


图 14 低振荡人工势场-ARRT 混合算法对环境复杂程度的适应性实验

仿真分析二 算法搜索效率验证。

在障碍物、步长等其他条件均相同的情况下，比较低振荡人工势场-ARRT 混合算法与经典人工势场法、经典 RRT 算法的路径搜索成功率和搜索时间，实验环境为 MATLAB2016a，计算机处理器为 intel core i3，每组仿真分析均进行 20 次，结果取平均值，如表 3 所示，经典人工势场法虽然在障碍物比较少的环境下路径搜索时间短，但是障碍物数量一旦增加，路径搜索成功率低；经典 RRT 算法搜索时间长，而且随着障碍物数量的增加，其路径搜索成功率降低到 60%；低振荡人工势场-ARRT 混合算法随着障碍物数量增加能保证路径搜索成功，满足避障要求，相比于经典 RRT 算法，在多障碍物环境下的平均路径搜索时间从 26.1s 下降到 3.6s，避障路径规划效果得到显著改善。

表 3 低振荡人工势场-RRT 混合算法路径搜索成功率和搜索时间与经典算法的比较

障碍物数量	人工势场法		RRT 算法		低振荡人工势场-RRT 混合算法	
	搜索成功 率	搜索时 间	搜索成功 率	搜索时间	搜索成功率	搜索时间
1	100%	0.76s	100%	21.48s	100%	0.71s
2	100%	0.71s	100%	20.04s	100%	1.34s
3	0%		80%	11.32s	100%	1.39s
4	0%		60%	26.04s	100%	3.64s

4 结束语

本文通过分析机械臂在工业生产以及协调作业的方面的需求，对机械臂在工作空间中避障的能力进行了研究，在机械臂的正逆运动学的基础上提出了最短行程逆解算法，在经典人工势场法和快速扩展随机树法（RRT）的基础上提出了低振荡人工势场法和自适应快速扩展随机树法（ARRT），并将两种算法结合成低振荡人工势场-ARRT 混合算法，完成了对算法在多障碍物环境下的适应能力的提升，提高了算法的搜索成功率和搜索效率，通过仿真分析验证了算法的效果，实现了在多障碍物环境下避障路径搜索，满足避障要求，相比于经典 RRT 算法，算法在多障碍物环境下的平均路径搜索时间从 26.1s 下降到 3.6s，避障路径规划效果得到显著改善。

参考文献:

- [1] Khatib,O.Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C].1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation,1985:25-28.
- [2] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning[J]. Algorithmic & Computational Robotics New Directions, 1999, 1(1): 293-308.
- [3] WANG Zheng,ZHAO Xiao,SHE Hongjie,et al.Detection and obstacle avoidance of AGV obstacles based on binocular vision[J].Computer integrated manufacturing system,2018,24(02):400-409 (in Chinese) .[王铮,赵晓,余宏杰,刘洪海,等.基于双目视觉的 AGV 障碍物检测与避障[J].计算机集成制造系统,2018,24(02):400-409.]
- [4]LI Junjun,XU Bowei,YANG Yongsheng,et al.Induced ant colony particle swarm optimization for multi-automatc guided vehicle path planning[J].Computer integrated manufacturing system,2017,23(12):2758-2767 (in Chinese) .[李军军,许波桅,杨勇生等.多自动导引车路径规划的诱导蚁群粒子群算法[J].计算机集成制造系统, 2017,23(12):2758-2767.]
- [5]JI Wei, CHENG Fengyi, ZHAO Dean,et al. Obstacle avoidance method of apple picking robot manipulator based on improved artificial potential field[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013,44(11): 253-259 (i n Chinese) . [姬伟,程凤仪,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.]
- [6]WANG W R., ZHU M C., WANG X M,et al.An improved artificial potential field method of trajectory planning and obstacle avoidance for redundant manipulators[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2018,15(5).
- [7]SEYYED M H R, ARUN K S, WANG J,et al.Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial p otential field algorithm,2019.
- [8]CHEN Jinyin, LI Yuwei, DU Wenyao. Research on UAV route planning algorithm based on EB-RRT*[J].Compu ter Science,2017,44(S2):72-79 (in Chinese) .[陈晋音,李玉玮,杜文耀.基于 EB-RRT~*的无人机航迹规划算法研究[J].计算机科学,2017,44(S2):72-79.]
- [9]WEI K, REN B Y. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoi dance based on an improved RRT algorithm[J]. Sensors, 2018(2): 571.
- [10]HE Zhaochu, HE Yuanlie, ZENG Bi.Obstacle avoidance path planning of manipulator based on RRT algorithm and artificial potential field method. [J].Industrial Engineering,2017,20(02):56-63 (in Chinese) .[何兆楚,何元烈,曾碧.RRT 与人工势场法结合的机械臂避障规划[J].工业工程,2017,20(02):56-63.]
- [11]JOHN J C.Introduction to Robotics:Mechanics and Control[M].Pearson Educaion:2005:102-104.
- [12]KETCHEL J, LAROCHELLE P. Collision detection of cylindrical rigid bodies for motion planning[J].Proceedin gs 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation,2006.
- [13]CHEN L, QIN D F, XU X, CAI Y F, XIE J. A path and velocity planning method for lane changing collisio n avoidance of intelligent vehicle based on cubic 3-D Bezier curve[J]. Advances in Engineering Software, 2019,132.
- [14]ZHANG Jianying, LIU Dun. Optimal path planning of mobile robot based on artificial potential field met hod[J].Journal of Aviation,2007(S1):183-188 (in Chinese) .[张建英,刘瞰.基于人工势场法的移动机器人最优 路径规划[J].航空学报,2007(S1):183-188.]
- [15]JIA Qingxuan, CHEN Gang, SUN Hanxu, et al.Path planning for space manipulator to avoid obstacle base d on A*algorithm[J].Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (13) :109-115 (in Chinese).[贾庆轩, 陈 钢, 孙汉旭, 等.基于 A*算法的空间机械臂避障路径规划[J].机械工程学报, 2010, 46 (13) :109-115.]
- [16]LI Aiping, LI Yuanzong.Research on path planning method of robot[J].Mechanical Engineering and Autom ation, 2009 (10) :194-197 (in Chinese).[李爱萍, 李元宗.机器人路径规划方法的研究[J].机械工程与自动化, 2009 (10) :194-197.]

[17]PRIYANKA S, VELAPPA G, KARTHIKA S. Optimal trajectory planning based on bidirectional spline-RRT* for wheeled mobile robot[J].2017 Third International Conference on Sensing, Signal Processing and Security (ICSSS),2017:65-68.

