

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106980

基于改进 RRT 算法的机械臂路径规划方法*

赵惠¹ 李庆党² 张明月²

(1. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266061; 2. 青岛科技大学 中德科技学院 青岛 266061)

摘要: 针对快速扩展随机树算法(RRT)扩展无方向性且路径冗长曲折的问题,提出了一种改进的 RRT 算法并应用于机械臂的路径规划。该算法首先利用概率目标偏向与双采样点择优原则优化采样点,以增强算法的启发性;然后引入目标引力思想来改变新节点的扩展方向,并在此基础上提出了一种可变步长思想来增强避障的效果。在 MATLAB 中将改进算法与 RRT 算法和概率偏向 RRT 算法进行仿真,结果表明在三维环境中改进算法的执行时间比 RRT 和 P-RRT 分别减少 54.7% 和 33.6%,路径长度也有较大的改善。

关键词: RRT;机械臂;路径规划;机器人工具箱

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

Path planning method of manipulator based on improved RRT algorithm

Zhao Hui¹ Li Qingdang² Zhang Mingyue²

(1. School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;

2. Chinsisch-Deutsche Technische Fakultat, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problem that the rapid expansion of random tree algorithm (RRT) has no directionality and long and tortuous paths, proposes an improved RRT algorithm and applies it to the path planning of manipulators. The principle of probability target bias and double sampling point selection are used to optimize the sampling points to enhance the heuristic of the algorithm; then the idea of target gravity is introduced to change the expansion direction of the new node, and on this basis, a variable step idea is proposed to enhance the effect of obstacle avoidance. The improved algorithm, RRT algorithm and the probability-biased RRT algorithm are simulated in MATLAB, the results show that the execution time of the improved algorithm is 54.7% and 33.6% less than that of RRT and P-RRT in a three-dimensional environment, respectively, and the path length is also greatly improved.

Keywords: RRT; manipulator; path planning; robotic toolbox

0 引言

多自由度机械臂已广泛应用在日常生活中,能够代替人类完成一些重复性强或者复杂特殊的工作任务,极大地改善了人们的生活。在机械臂执行任务的过程中,路径规划显得尤为重要。因此,文献[1-2]以机械臂的路径规划为课题展开了一系列研究。

路径规划的目的即要快速、高效地找到一条从起点到目标点的无障碍路径,为实现这一目的,人工势场法^[3]、蚁群算法^[4]、遗传算法^[5]等已经被用在路径规划中,这些算法在简单的环境中效率尚可,但机械臂的工作环境通常是高维且比较复杂的,此时应用这些算法效果并不理想,人工势场法易陷入局部最优^[6],蚁群算法容易发生死锁现象^[7],遗传算法耗费时间长且效率低^[8]。

Lavalle 教授提出的 RRT 算法,是一种基于随机采样的快速搜索算法,其搜索效率高且在低维环境和高维环境中均适用,因此 RRT 算法已被广泛应用在路径规划领域中。但是,RRT 算法自身也有一些缺点,扩展无方向性,随机性强,进而导致规划出的路径冗长且花费的时间较长^[9]。基于上述问题,许多改进的 RRT 算法被提出^[10]。Lavalle 教授提出双向 RRT 算法,从起点和目标点同时扩展两棵随机树,加快了路径搜索的速度^[11]。文献[12]提出一种概率目标偏向策略,在保留 RRT 算法优点的基础上加快了算法的收敛速度,提高了效率。刘恩海等^[13]将引力思想加入 RRT 算法中,并研究了引力系数对算法的影响,改变了 RRT 算法扩展的无方向性。文献[14]提出一种双采样点的双向 RRT 算法,使得路径能够在一定程度上向着目标点

收稿日期:2021-06-18

* 基金项目:山东省科技厅项目(2017CXGC0607)资助

生长。以上算法能够加快算法的执行速度,但是路径仍然没有得到良好的改善。

在上述文献的基础上,本文提出一种基于改进 RRT 算法的机械臂路径规划方法,用概率目标偏向策略与双采样点择优原则来减小采样点的随机性,并加入引力思想使得新节点能够更偏向于目标进行扩展,最后以 6 轴机械臂作为研究对象,在 MATLAB 上对算法进行仿真,验证了改进算法的有效性,在路径规划时间以及路径长度上比起 RRT 算法以及概率偏向 RRT 算法均有较大的改善。

1 机械臂相关知识

1.1 建模以及正逆运动学

本文采用珞石 XB20 系列 6 轴机械臂来进行研究,机械臂外观如图 1 所示。

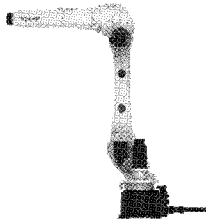


图 1 XB20 机械臂

采用标准 DH 法^[15]建立坐标系并根据 XB20 机械臂的相关参数写出 DH 参数表,如表 1 所示。

表 1 DH 参数表

序号	$\theta/$ ($^{\circ}$)	$d/$ mm	$a/$ mm	$\alpha/$ ($^{\circ}$)	角度 范围/($^{\circ}$)
1	θ_1	160	490	90	-180~180
2	θ_2	0	780	0	-99~156
3	θ_3	0	150	90	-200~75
4	θ_4	860	0	-90	-180~180
5	θ_5	0	0	90	-135~135
6	θ_6	110	0	0	-360~360

θ 表示关节角度, d 表示连杆之间的距离, a 表示连杆长度, α 表示连杆转角。连杆之间的变换矩阵如式(1)所示。

$$T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 $i = 1 : 6$, c 代表余弦 \cos , s 代表正弦 \sin 。根据表 1 的 DH 参数表以及式(1)的连杆变换矩阵可以得到 6 个连杆之间的变换矩阵,将这 6 个矩阵依次相乘,便可以得到机械臂的正运动学方程,即可得到机械臂的末端位姿,如式(2)所示。

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中 T 的前 3 行与前 3 列表示机械臂的末端姿态,最后一列的前 3 行表示机械臂末端的位置^[16]。

逆运动学即是给出机械臂的末端位姿,来求解相应的关节角度。逆运动学求解有几何法、代数法等,本文用代数法来求解,能够得到 8 组逆解,但是这 8 组解并不一定都是可行的,此时要根据转角之和最小以及碰撞检测等原则来筛选出一组最优解^[17]。

1.2 工作空间求解

运用蒙特卡洛法求解出 XB20 机械臂的可行工作空间^[18],如图 2 中离散点包围区域所示,为后续应用算法确定可行区域。

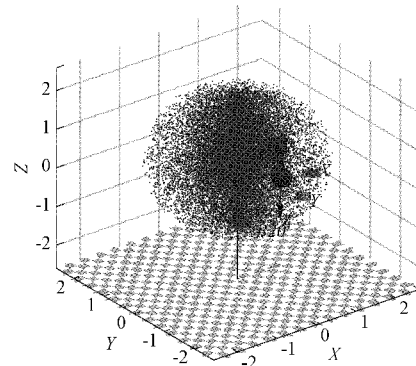


图 2 XB20 工作空间

1.3 碰撞检测

考虑到机械臂连杆的几何形状,本文将机械臂各连杆用圆柱体来包裹,将空间中的障碍物用球来包裹。为简化计算,可以将包裹机械臂连杆的圆柱的半径 R_1 叠加到球的半径 R_2 上,如图 3 所示。 D 为包裹圆柱的中轴线到包裹球的球心的最短距离,碰撞检测的依据如式(3)^[19]:

$$\begin{cases} D > R_1 + R_2, & \text{不碰撞} \\ D < R_1 + R_2, & \text{碰撞} \end{cases} \quad (3)$$

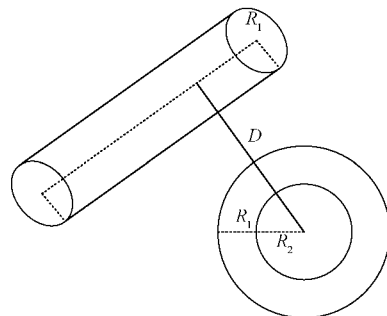


图 3 碰撞检测简化模型

2 RRT 算法原理

RRT 算法是一种基于采样的算法,原理如下:1)确定好起始点 x_{start} 和目标点 x_{goal} ; 2)在工作空间中随机采样得到一个采样点 x_{rand} ; 3)找到随机树中离 x_{rand} 最近的一个节点 x_{near} ; 4)确定新节点扩展的方向: x_{near} 与 x_{rand} 的连线方向; 5)沿上一步得到的方向扩展一定的步长 s 得到新节点 x_{new} ; 6)检测 x_{near} 与 x_{rand} 之间的路径是否可行,若可行,执行下一步; 7)判断新节点与目标点 x_{goal} 之间的距离是否小于设定的阈值,若小于,则说明成功找到路径, RRT 的节点扩展示意图如图 4 所示。

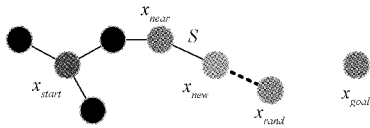


图 4 RRT 节点扩展示意图

新节点的计算公式为式(4):

$$x_{new} = x_{near} + s \frac{x_{rand} - x_{near}}{\|x_{rand} - x_{near}\|} \quad (4)$$

式中: s 是扩展步长, $\|x_{rand} - x_{near}\|$ 代表 x_{rand} 与 x_{near} 之间的欧氏距离。由于采用随机采样, RRT 算法的扩展也是随机的且没有方向性,导致耗费时间长,规划出的路径也偏离最优路径,因此需要对其进行改善。

3 基于改进 RRT 算法的路径规划方法

3.1 采样点的优化

为减小采样点的随机性,本文将概率目标偏向策略与双采样点选择策略联合使用,来对采样点进行控制,增强算法的启发性。具体来说,设置一个概率阈值 $p(p \in [0, 1])$, 当概率小于 p 时,采样点设置为目标点;当概率大于 p 时,采样点仍然为随机点,但是与 RRT 算法不同的是,每次同时生成两个随机点,选择二者中离目标点更近的一个作为采样点。通过使用以上改进策略可随机选取目标点或者随机点为采样点,增加了采样点的目标偏向性。

3.2 新节点的扩展

本文将人工势场的引力思想加入 RRT 算法中,新节点扩展示意图如图 5 所示。

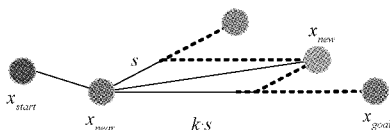


图 5 加入目标引力的新节点扩展示意图

与图 4 的 RRT 算法相比,图 5 新增了一个引力分量,与随机点方向的分量来共同决定新节点的扩展方向,使得机械臂能够更快地朝向目标点运动。此时新节点的计算公式变为:

$$x_{new} = x_{near} + sQ$$

$$Q = \frac{x_{rand} - x_{near}}{\|x_{rand} - x_{near}\|} + k \frac{x_{goal} - x_{near}}{\|x_{goal} - x_{near}\|} \quad (5)$$

式(5)中 s 是随机点方向的步长, $\|x_{rand} - x_{near}\|$ 代表 x_{rand} 与 x_{near} 之间的欧氏距离, $\|x_{goal} - x_{near}\|$ 则代表 x_{goal} 与 x_{near} 之间的欧氏距离, k 是引力系数。

加入引力思想的 RRT 算法仍然采用固定步长进行扩展,当机械臂处在复杂的环境中时,固定的步长不利于避开障碍物,在开阔的环境中扩展的效率也比较低。基于此,本文提出一种基于引力系数 k 的可变步长思想,具体如下: 1)首先初始化一个较大的 k 值; 2)当机械臂遇到障碍物时,减小 k 值以减小小引力方向的步长,使得新节点偏向随机点方向进行扩展以避开障碍物; 3)当机械臂没有遇到障碍物时,增大 k 的值以加快算法的效率。但是 k 的值不能过大或者过小,过大可能会造成局部最优,过小则体现不出引力的作用,因此必须根据实际环境合理设置 k 的值^[20]。

3.3 改进 RRT 算法描述

本文提出的改进 RRT 算法首先确定好起点和目标点,按照采样点筛选原则确定好一个偏向目标的采样点,在随机树中找到最近点然后加入引力分量计算新节点,并根据碰撞检测的结果实时调整引力系数的值,判断新节点是否到达目标点区域,最终找到一条可行的路径。改进算法的流程如图 6 所示。

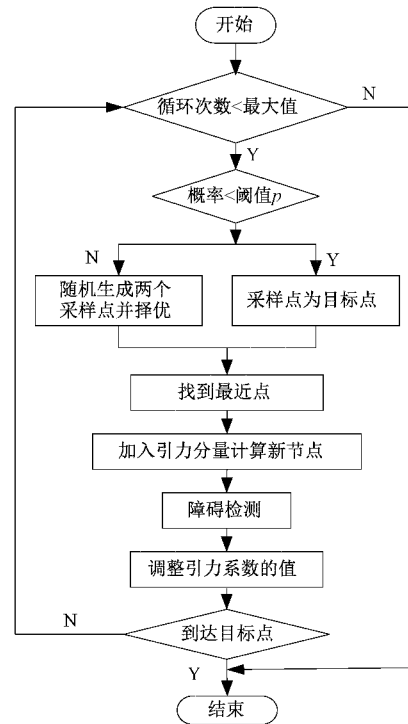


图 6 改进 RRT 算法流程

4 仿真实验与分析

仿真实验是基于 MATLAB2016b 进行的,具体配置为

Intel Core i5-6500, 3.20 GHz 处理器, 内存为 4 GB, 操作系统为 Win10。为测试改进算法的性能, 本文采用二维和三维环境来进行仿真。其中二维环境采用两种环境, 环境 1 为简单环境, 环境 2 为复杂环境。

4.1 二维环境仿真

在二维环境下测试改进算法的性能, 设置相关参数如下: 搜索步长 s 为 25, 最大失败次数为 10 000, 地图大小为 500×500 , 起始点为 (10, 10), 目标点是 (490, 490), 概率阈值 p 设为 0.2, 引力系数 k 初值为 1, 判断机械臂是否到达目标点的阈值为 25。为验证改进算法的性能, 在两种不同的环境下分别将 RRT 算法、概率目标偏向 RRT 算法 (P-RRT) 与改进的 RRT 算法 (I-RRT) 各运 50 次, 记录下对应的时间以及路径长度, 并计算出两种算法的平均运行时间与平均路径长度来比较 3 种算法的性能。

首先在环境 1 中进行测试, 结果如图 7 所示。

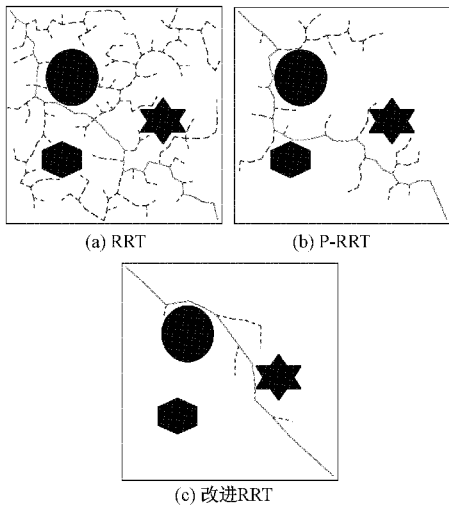


图 7 环境 1 运行结果

图 7 中, 黑色图形代表障碍物, 虚线为随机树的扩展过程, 实线为算法规划出的路径。由图 7 的结果可以看出, RRT 算法与 P-RRT 规划出的路径冗长且比较曲折, 而改进 RRT 算法得到的路径则比较平滑。环境 1 下 3 种算法的规划时间与路径长度对比结果如表 2 所示。

表 2 环境 1 下算法性能对比

算法	时间/s	路径长度/m
RRT	4.785	8.709
P-RRT	1.636	8.344
改进 RRT	0.541	7.649

由表 2 可以看出, 在环境 1 中测试时, I-RRT 大大缩短了算法的运行时间, 在路径长度上也比其他两种算法缩短了 12% 和 8%。

接下来在环境 2 中测试, 运行结果如图 8 所示。

环境 2 的障碍物更多一些, 由图 8 可以看出, 改进

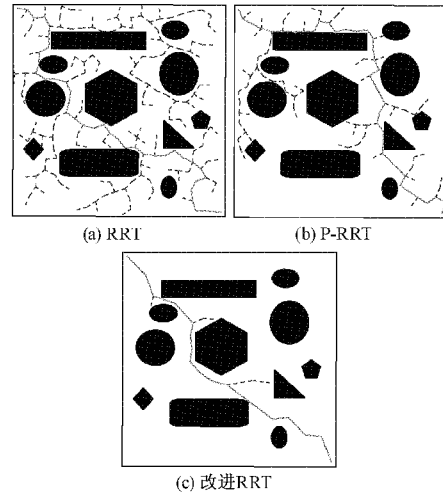


图 8 环境 2 运行结果

RRT 算法扩展的节点最少, 3 种算法的性能指标对比如图 9 所示。

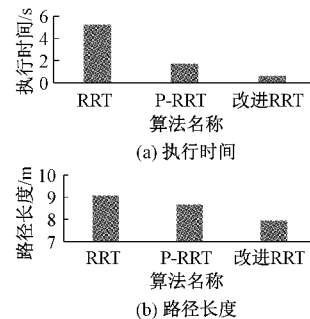


图 9 环境 2 下算法性能对比

由图 9 可以清楚地看出, 在障碍物较多的环境 2 中, P-RRT 比起 RRT 时间有所减短, 路径也有所缩短, 但是改进 RRT 算法比起 P-RRT 在两个指标上更有优势。

由以上仿真结果可知, 无论在障碍物较少的环境 1 还是在障碍物较多的环境 2 中, 本文提出的改进 RRT 算法性能都是最佳的。

4.2 机械臂路径规划仿真

将本文提出的改进算法应用在 XB20 机械臂中, 在三维环境中测试 3 种算法的性能, 仿真结果如图 10 所示。

图 10 所示的三维环境中设置了两个障碍物, 均用球形来包裹, 下方的小球代表起始点, 实线表示规划所得路径。由仿真结果可以看出, RRT 规划出的路径比较曲折且冗长, P-RRT 得到的路径仍然含有一些曲折的拐角, 而改进 RRT 规划出的路径则比较平滑。三维环境下 3 种算法的性能对比如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 改进 RRT 算法在三维环境下的性能也是最佳的, 算法的运行时间比 RRT 和 P-RRT 分别减少 54.7% 和 33.6%, 路径长度也比其他两种算法缩短 25.5% 和 12%。由此可以看出, 改进 RRT 算法在二维环境与三维环境中性能均优于 RRT 算法和 P-RRT 算法。

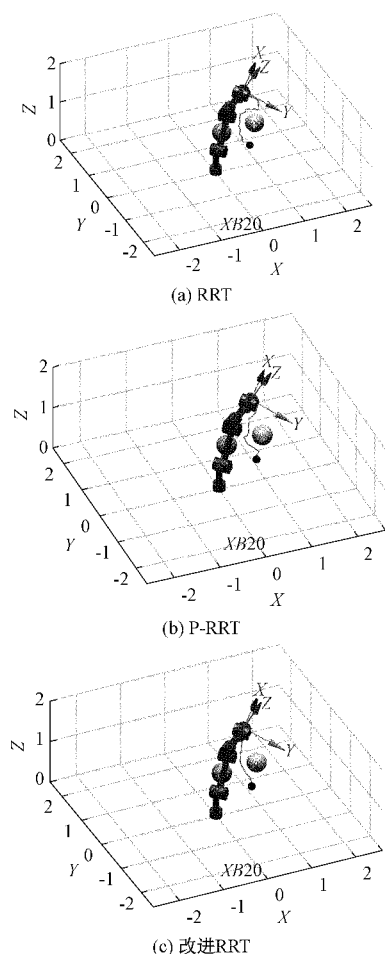


图 10 机械臂路径规划示意图

表 3 三维环境下算法性能对比

算法	时间/s	路径长度/m
RRT	2.878	2.001
P-RRT	1.962	1.692
改进 RRT	1.302	1.489

5 结 论

本文提出了一种改进的 RRT 算法来解决机械臂的路径规划问题,利用概率目标偏向策略与双采样点选优策略优化了采样点,通过加入引力思想与可变步长改变了新节点的扩展方向,令机械臂能够快速地找到一条可行路径。仿真结果表明了改进算法的可行性,能够有效缩短算法的执行时间并且缩短路径长度。目前只用仿真验证了本文改进算法的有效性,下一步将在实际的机械臂上应用该算法来验证其性能。

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] 张宏宏,甘旭升,李双峰,等.复杂低空环境下考虑区域

风险评估的无人机航路规划[J].仪器仪表学报,2021,42(1):257-266.

- [3] 郑米芳,欧阳明华.基于人工势场的风管机器人避障方法[J].电子测量技术,2018,41(19):18-21.
- [4] 李志锟,黄宜庆,徐玉琼.改进变步长蚁群算法的移动机器人路径规划[J].电子测量与仪器学报,2020,34(8):15-21.
- [5] CHEN Z Q, ZHOU J H, SUN R Z, et al. A new evolving mechanism of genetic algorithm for multi-constraint intelligent camera path planning[J]. Soft Computing, 2021(prepublish), DOI: 10.1007/S00500-020-05510-6.
- [6] STEVEN B, WASIF N, STUART F. Improved APF strategies for dualarm local motion planning [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2015, 37(1): 73-90.
- [7] 王猛,邢关生.基于改进蚁群算法的机器人路径规划[J].电子测量技术,2020,43(24):52-56.
- [8] 段建民,陈强龙.基于改进人工势场-遗传算法的路径规划算法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(3):19-24.
- [9] LIAO C, LIAO Y, XIE J. Obstacle avoidance trajectory planning of loading robot based on improved RRT algorithm [J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(5): 209-213.
- [10] 赵燕江,黄磊,杜海艳,等.基于改进 RRT 算法的套管柔性针运动规划[J].仪器仪表学报,2017,38(3):620-628.
- [11] 王坤,曾国辉,鲁敦科,等.基于改进渐进最优的双向快速扩展随机树的移动机器人路径规划算法[J].计算机应用,2019,39(5):72-77.
- [12] 刘紫燕,张杰.改进 RRT 算法的室内移动机器人路径规划[J].计算机工程与应用,2020,56(9):190-197.
- [13] 刘恩海,高文斌,孔瑞平,等.改进的 RRT 路径规划算法[J].计算机工程与设计,2019,40(8):2253-2258.
- [14] 闫明亮,侯光华.基于双采样点的双向 RRT 路径规划算法[J].计算机与网络,2019,45(15):55-58.
- [15] 彭光宇,董洪波,马斌.两种 DH 模型的机器人运动学建模对比研究[J].机械研究与应用,2019,32(6):62-65.
- [16] 赵华东,雷超帆,江南.基于改进蚁群算法的六自由度机械臂路径规划[J].郑州大学学报(理学版),2020,52(1):120-126.
- [17] 党浩明,周亚丽,张奇志.六自由度串联机械臂建模与运动学分析[J].实验室研究与探索,2018,37(10):9-14,23.
- [18] 马慧丽.六自由度机械臂的避障路径规划研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [19] 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.
- [20] 李洋,徐达.基于引力自适应步长 RRT 的双臂机器人协同路径规划[J].机器人,2020,42(5):606-616.

作者简介

赵惠,硕士,主要研究方向为机器人的路径规划等。
E-mail:zh179296@163.com