

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.040

碳纤维立体织物钢针置换双机器人协同路径规划研究

王开阳, 罗福源, 苏圣霖, 熊峰

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为实现碳纤维立体织物中钢针的自动置换,提出改进的 RRT-PSO 算法,在 Bi-RRT 算法中引入概率因子,使得算法具有一定的导向性,提高算法的收敛速度。在规划完成后使用粒子群算法对路径点进行优化,降低路径的长度。使用贝塞尔曲线进行路径优化,提高路径的平滑度,形成最终的路径。将改进的 RRT-PSO 算法应用于双机器人钢针自动置换环节,双机器人采用主从运动模式,进行主机器人的路径规划,将主机器人当作空间障碍物进行从机器人路径规划。通过仿真分析验证了改进的 RRT-PSO 算法在碳纤维立体织物钢针自动置换环节的有效性。

关键词:立体织物;钢针置换;路径规划;双机器人;快速扩展随机树

中图分类号:TP271;TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0202-06

Research on Collaborative Path Planning of Dual Robots in Steel Needle Replacement in Carbon Fiber Fabric

WANG Kaiyang, LUO Fuyuan, SU Shenglin, XIONG Feng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to realize the automatic replacement of steel needles in three-dimensional fabrics in carbon fiber fabrics, an improved RRT-PSO algorithm is proposed. The probability factor is introduced in the Bi-RRT algorithm, facilitating the algorithm to have orientation and accelerating the convergence speed of the algorithm. After the plan is completed, PSO algorithm is used to optimize path point reducing the path length. With Bezier curve, path optimization is conducted to improve the smoothness of the path and form the final path. The improved RRT-PSO algorithm is applied to the automatic replacement link of the dual robotic steel needle. The dual robot adopts the main movement mode of the main motion, and the path of the host robot is first planned, and then the host robot is used as a space obstacle to plan from the robot path. The algorithm simulation verifies the effectiveness of the improved RRT-PSO algorithm in the automatic replacement link of the carbon fiber three-dimensional fabric steel needle.

Keywords: three-dimensional fabrics; needle replacement; path planning; dual robot; RRT

0 引言

以碳纤维立体织物为增强体的复合材料具有高强度、高抗冲击性能、高温透波等优良特性,在航空航天、军工和高端制造业领域中被广泛应用^[1-2]。但是,碳纤维立体织物制备的工艺过程复杂、技术要求高、操作精细度大,尤其是在钢针置换环节,需要大量依靠人工操作,面临生产效率低、生产质量不稳定、生产成本低、节能环保性差等问题^[3-4]。因此,在碳纤维立体织物的生产过程中亟需进行自动化改造。碳纤维立体织物预制件如图 1 所示。在钢针置换的过程中,需要使用两个机器人,主机器人在一边拔,从机器人在另一边推,双机器人协同配合。双机器人工作空间重叠,从机器人对动态的主机器人无法及时做出反

应,导致路径规划困难。因此,亟需对面向碳纤维立体织物的双机器人进行协同路径规划。

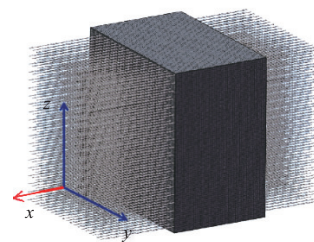


图 1 碳纤维立体织物预制件

基于采样的路径规划算法能够很好地应用于高维的路径规划问题^[5]。RRT 算法是一种常用的基于采样的路径规划算法,由于随机采样,路径随机性大,每次规划的路径点波动较大^[6-7]。针对 RRT 算法的问题,研究人员提出了不同的改进

第一作者简介:王开阳(2000—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为机器人控制技术,2364562357@qq.com。

算法。KARAMAN 等^[8]提出了 RRT* 算法,通过对父节点的重新选择提高了路径的质量,但是算法复杂度较高。周哲等^[9]将融合卷积神经网络 GRU 和 RRT* 算法相结合,利用 GRU 网络预测下一步位置,提高算法导向性。WANG 等^[10]提出了一种改进的双向 RRT* 路径规划算法 (Bi-RRT*),该算法提高了路径的质量,降低了路径长度。GAO 等^[11]提出了一种基于 BP 神经网络和 RRT* 算法的路径规划算法,该算法适用于三维多障碍狭小空间中运动规划。这些改进的 RRT* 算法都提高了路径规划的质量,但是增加了算法的复杂度,无法满足钢针置换路径规划的需求。

针对传统 RRT 算法搜索效率低、导向性差、路径质量低、平滑度差等问题,本文提出基于改进的快速扩展随机树 (RRT) 算法与粒子群优化 (PSO) 算法的 RRT-PSO 算法。将 RRT-PSO 算法应用于双机器人避障路径规划。最终,使用双机器人实现碳纤维立体织物的钢针置换。

1 钢针置换路径规划算法研究

碳纤维立体织物钢针置换环节需要进行双机器人的路径规划,分析现有的路径规划算法,针对钢针置换环节对实时性高、平滑度好的需求提出改进的算法。

1.1 传统 RRT 算法原理

RRT 算法是一种随机采样的搜索算法,其在搜索空间中通过随机采样的方式完成随机树的扩展,从而找到完整路径^[12]。

双向扩展随机树 (Bi-RRT) 算法在 RRT 算法的基础上引入双向扩展的方法。RRT-Connect 算法也是双树扩展的算法,与 Bi-RRT 算法不同的是,RRT-Connect 算法的采样点会优先选择另一棵结构树的 q_{new} ,RRT-Connect 算法更加贪婪^[13]。RRT* 算法在 q_{new} 加入数据结构树时,会进行父节点的重新选择^[14-15]。在选择完 q_{new} 的父节点之后,需要遍历区域内其他点,考察其余点是否因为 q_{new} 的加入而产生新的最短路径,如果存在则需要重新布线^[16]。

传统的 RRT 算法、Bi-RRT 算法、RRT-Connect 算法和 RRT* 算法随机性较大,相邻两次规划出来的路径有较大的不同,且算法规划出来的路径平滑度差,需要进行路径优化。

考虑到上述算法存在的问题,为了提高算法的收敛速度、降低路径长度、提高路径平滑度、提

高实时性,计划将 Bi-RRT 算法与 PSO 算法相结合进行路径规划,然后使用贝塞尔曲线对路径进行优化,以满足双机器人快速置换钢针的需求。

1.2 改进的 RRT-PSO 算法

碳纤维立体织物钢针置换环节对于算法的实时性要求较高,通过以下方法对 Bi-RRT 算法进行改进。

1) Bi-RRT 算法的搜索空间是整个工作空间。在整个工作空间中进行随机采样会降低算法的搜索效率,所以将算法的搜索空间进行限定。在以路径初始点 (x_1, y_1, z_1) 与终点 (x_2, y_2, z_2) 为对角点的长方体中进行采样,降低了无效采样点的产生,提高了算法的效率。

2) Bi-RRT 算法路径点的选择随机性大,算法导向性差^[17]。因此,在采样点的选择上引入随机参数 $\theta, \theta \in [0, 1]$ 。当 $\theta \in [0, 0.5]$ 时,选择路径起点与终点的中心点为采样点;当 $\theta \in (0.5, 1]$ 时,采样点在工作空间中进行随机选择。这样提高了导向性,同时保留了算法探索未知空间的能力。

改进的 Bi-RRT 算法可以快速规划出一条路径,但是路径长度与最优路径长度之间存在较大的差距。Bi-RRT 算法规划出来的路径由一系列折线段组成,这不利于机器人的运动。考虑到这些问题,通过下述方法对路径进行优化。

1) 为了降低路径长度,计划引入 PSO 算法对路径长度进行优化。PSO 算法收敛速度快、参数少、算法简单、高维问题适应度高^[18-19]。在寻找最优解的时候,每个粒子会不断更新自身位置,同时记录个体最优解与群体最优解,在下一次位置更新时参考个体最优解、群体最优解与自身惯性^[20]。

使用 PSO 算法对改进的 Bi-RRT 算法进行优化,以 Bi-RRT 算法规划出来的路径作为 PSO 算法的初始粒子,以路径点的个数作为粒子的维度,以路径长度作为 PSO 算法的适应度函数。

2) 经 PSO 算法优化后的路径仍是一条折线。为了提高路径平滑度,采用贝塞尔曲线进行路径优化。

上述算法规划出来的路径有 k 个路径点,由这些点确定的路径如式 (1) 所示。

$$B(t) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[\frac{(k-1)!}{i! (k-1-i)!} \right] P_i t^i (1-t)^{k-1-i} \quad (1)$$

式中 $t \in [0, 1]$ 。

通过上述各项优化方法可以得到改进的 RRT-PSO 算法,算法的流程如图 2 所示。

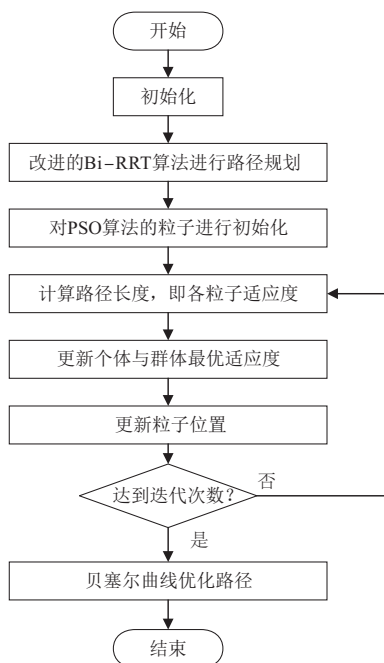


图2 改进的 RRT-PSO 算法流程

1.3 算法分析

将改进的 RRT-PSO 算法与 RRT 算法、RRT-Connect 算法、RRT* 算法进行比较。设置工作空间为以(0,0,0)和(100,100,100)为对角线的三维立方体空间,路径起点为(5,5,5),路径终点为(95,95,95),空间障碍物为4个长方体。RRT* 算法中半径 r 为 20,采样点个数为 1 000。改进的 RRT-PSO 算法粒子群总数为 50,迭代次数为 30,惯性权重 ω 为 1.2,个体学习因子 c_1 为 1.5,群体学习因子 c_2 为 1.5。各算法规划出来的路径如图 3 所示。

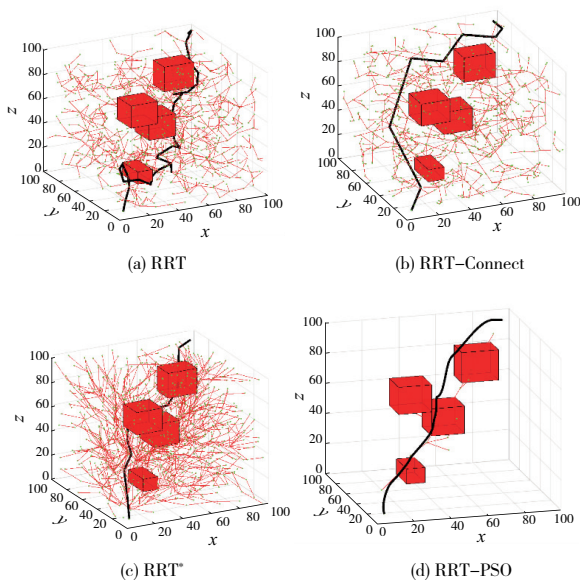


图3 算法对比

对上述算法各进行 20 次实验,对比路径长度、路径规划时间,得出的数据如图 4、图 5 所示。各个算法得出的平均路径规划时间、平均路径长度和路径长度方差如表 1 所示。

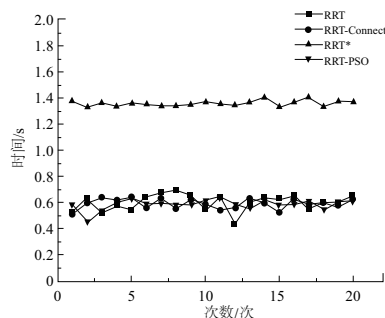


图4 各算法规划时间

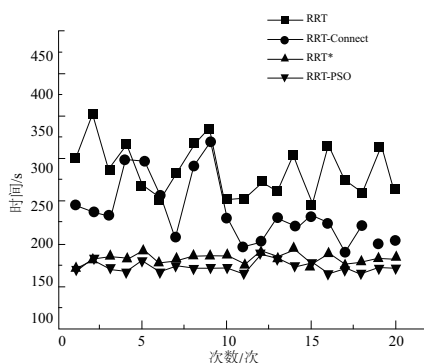


图5 各算法路径长度

表1 各算法实验数据

算法	平均路径 规划时间/s	平均路径 长度/m	路径长度 方差/m ²
RRT	0.602	286.0	30.02
RRT-Connect	0.594	236.8	36.53
RRT*	1.356	183.2	6.51
RRT-PSO	0.583	173.0	6.48

通过上述分析可知,改进的 RRT-PSO 算法在路径规划时间和路径长度方面都有明显改善。在路径规划时间方面,改进的 RRT-PSO 算法相比于 RRT* 算法,规划时间下降了 57%。在路径长度方面,改进的 RRT-PSO 算法相比于 RRT 算法和 RRT-Connect 算法,路径长度分别降低了 39%和 27%,与 RRT* 算法相当。在路径稳定性方面,改进的 RRT-PSO 算法的路径长度方差相比于 RRT 算法和 RRT-Connect 算法分别降低了 78%和 82%,与 RRT* 算法相当。在路径平滑度方面,通过图片可以清晰地看到改进的 RRT-PSO

算法相比于其他算法路径更加平滑。综合来看,改进的 RRT-PSO 算法搜索效率更高、规划的路径长度更短、路径平滑度更高、路径的稳定性更好。

2 双机器人避障路径规划

若两个机器人的工作空间有重叠部分,则可能发生碰撞。因此,需要对双机器人进行避障路径规划,将改进的 RRT-PSO 算法应用于双机器人协同路径规划中,双机器人采用主从运动模式,先进行主机器人的路径规划,再将主机器人当作动态障碍物进行从机器人的路径规划。

2.1 机器人避障方法

机器人三维结构十分复杂,采用机器人实际结构进行避障的计算量巨大。因此,采用 3 个轴线均平行于坐标轴的长方体包围盒(AABB 包围盒)或圆柱模型代替原机器人的模型,使用 AABB 包围盒代替空间障碍物。

采用层次碰撞检测的方法进行碰撞检测。首先用 AABB 包围盒来代替空间中的机器人与障碍物,判断两个包围盒是否碰撞只需要判断两个包围盒在 3 个轴方向上是否有交叠,若存在没有交叠的轴,则不发生碰撞,无需进行下一步碰撞检测。否则,需要进一步判断。

考虑机器人与空间障碍物的碰撞问题时,将机器人各连杆简化为圆柱体,空间障碍物简化为 AABB 包围盒。模型如图 6 所示。

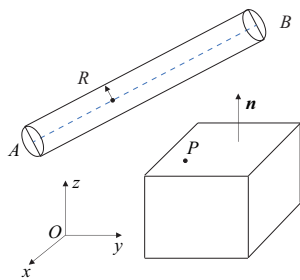


图6 机器人与空间障碍物碰撞分析模型

直线AB上的任意一点Q可以用式(2)表示。平面的法向量为 $\mathbf{n}$,平面上任一点为P,则向量 $\mathbf{OP}$ 在 $\mathbf{n}$ 上的投影长度为常量 d ,如式(3)所示。

$$\mathbf{OQ} = \mathbf{OA} + t \cdot \mathbf{AB} \quad (2)$$

$$\mathbf{OP} \cdot \mathbf{n} = d \quad (3)$$

若Q点在平面上,则如式(4)所示。

$$(\mathbf{OA} + t \cdot \mathbf{AB}) \cdot \mathbf{n} = d \quad (4)$$

解得 $t = (d - \mathbf{OA} \cdot \mathbf{n}) / (\mathbf{AB} \cdot \mathbf{n})$ 。若 $t \notin [0, 1]$,则不发生碰撞。

若 $t \in [0, 1]$,则求出点Q,判断Q点到AABB包围盒对应面的最短距离,若大于 R 则不发生碰撞,否则发生碰撞。对长方体6个面分别判断,确定是否碰撞。

双机器人的连杆之间也可能发生碰撞,两个简化后的机器人连杆的碰撞分析模型如图7所示。两个连杆包围盒中心线的端点为 $M_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $M_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $N_1(x_3, y_3, z_3)$ 和 $N_2(x_4, y_4, z_4)$,包围盒的半径分别为 R_1 和 R_2 ,两个包围盒之间的最短距离为 $d_{\min}$ 。两个包围盒中心轴线上的点分别为 $M_e(x_5, y_5, z_5)$ 和 $N_e(x_6, y_6, z_6)$,则 M_e 和 N_e 可以用 M_1 、 M_2 、 N_1 和 N_2 表示,如式(5)、式(6)所示。

$$\begin{cases} x_5 = (x_2 - x_1)s + x_1 \\ y_5 = (y_2 - y_1)s + y_1 \\ z_5 = (z_2 - z_1)s + z_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_6 = (x_4 - x_3)t + x_3 \\ y_6 = (y_4 - y_3)t + y_3 \\ z_6 = (z_4 - z_3)t + z_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $0 \leq s \leq 1; 0 \leq t \leq 1$ 。

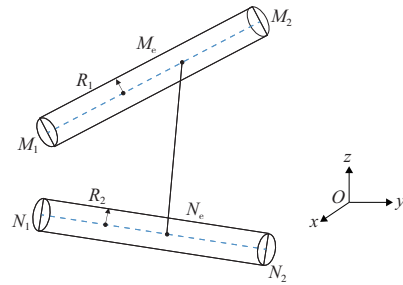


图7 机器人连杆碰撞分析模型

M_e 与 N_e 之间的距离 $d = \sqrt{(x_5 - x_6)^2 + (y_5 - y_6)^2 + (z_5 - z_6)^2}$,即 $d = \sqrt{m_1 s^2 + m_2 t^2 + m_3 s + m_4 t + m_5 st + m_6}$,令 $F(s, t) = d^2$,则求两包围盒之间的最短距离转化为有条件的优化设计问题,即

$$\begin{cases} \min F(s, t) = d^2 \\ \text{s.t. } 0 \leq s \leq 1 \\ \quad 0 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

两个包围盒之间的最短距离 $d_{\min} = d - R_1 - R_2$,若 $d_{\min}$ 大于安全距离 $[d]$,则主从机器人连杆之间不发生碰撞,否则发生碰撞。

2.2 双机器人主从运动规划

双机器人的运动采用主从模式运动。先对主机器人进行避障路径规划,然后,从机器人根据主机器人的位置实时更新障碍物信息,进行路径规划。

主机器人在进行路径规划时,需要考虑到工作空间中的固定障碍物,此时,将从机器人当作固定障碍物。从机器人在路径规划时,不仅要考虑到工作空间中的固定障碍物信息,还要考虑到主机机器人的实时位置信息,将主机器人当作是空间中的动态障碍物。在进行碰撞检测时,需要将主机器人进行简化,使用圆柱模型将主机器人各连杆包裹。由于主机机器人的路径已经完成规划,所以每个时刻主机机器人的关节和连杆位置是确定的,根据关节与连杆的位置实时更新障碍物的位置。从机器人在使用改进的 RRT-PSO 算法进行路径规划时需要不断进行碰撞检测,以确保规划出来的路径与主机器人不发生碰撞。

3 算法仿真

在 CoppeliaSim 中进行仿真环境的搭建如图 8 所示。

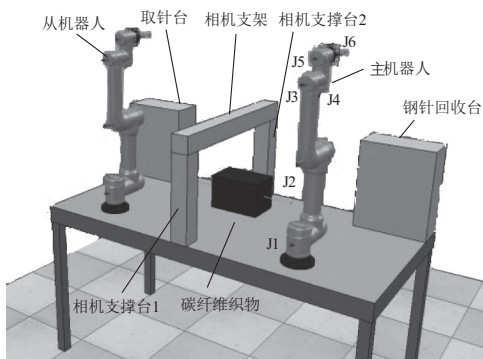


图 8 仿真环境

空间障碍物包围盒设置如表 2 所示。

表 2 包围盒设置		单位:m	
序号	名称	中心点	长,宽,高
1	钢针回收台	(0.250,0.725,1.250)	(0.4,0.2,0.5)
2	取针台	(1.350,-0.725,1.250)	(0.4,0.2,0.5)
3	相机支架	(0.600,-0.325,1.550)	(0.1,1.0,0.1)
4	相机支撑台 1	(0.600,0.125,1.250)	(0.1,0.1,0.5)
5	相机支撑台 2	(0.600,-0.775,1.250)	(0.1,0.1,0.5)
6	碳纤维织物	(0.600,-0.500,1.100)	(0.3,0.2,0.2)

选取拔出待置换钢针这一段双机器人协同运动的路径进行算法仿真验证。在 MATLAB 中设置机器人运动的起点和终点,使用改进的 RRT-PSO 算法进行路径规划,建立 MATLAB 与 CoppeliaSim 的通信,进行算法的验证,得出不同时刻的路径如图 9 所示。

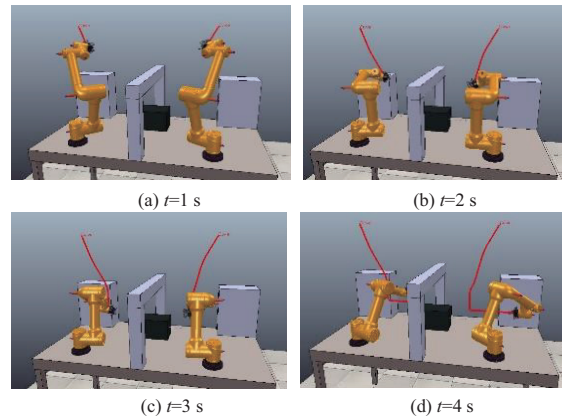


图 9 仿真路径

运动中双机器人各个关节变化曲线如图 10 所示,从图 10 中可以看出各个关节曲线连续且均在活动范围内。机器人各连杆与空间中可能发生碰撞的物体之间的距离如图 11 所示。图 11 中 Mlink i 表示主机器人第 i 个连杆, Slink i 表示从机器人第 i 个连杆,如 Mlink5_1 表示主机器人第 5 个连杆与表 2 中第 1 个障碍物之间的距离。从图 11 中可知,各连杆与障碍物之间的最短距离始终大于安全距离。因此,双机器人在运动过程中不会发生碰撞。

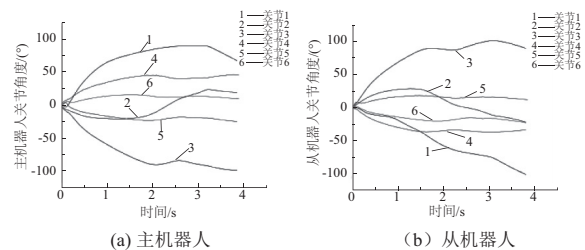
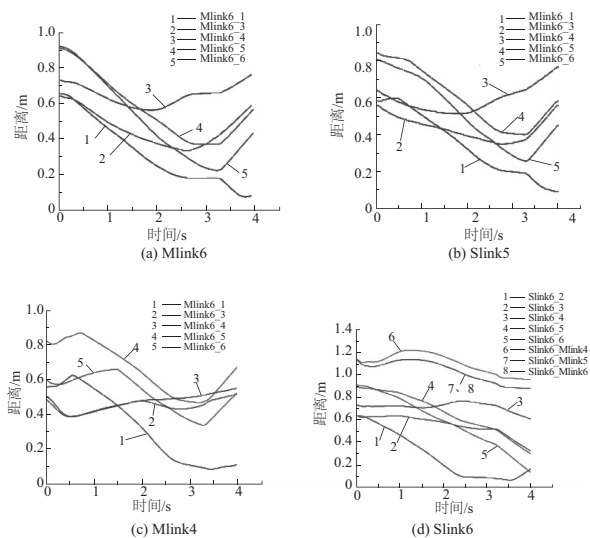


图 10 机器人关节角度变化



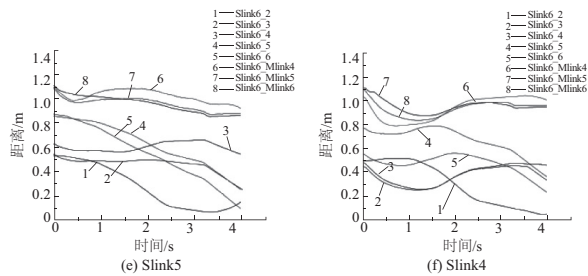


图 11 连杆与障碍物距离

主机器人沿钢针轴向拔钢针,从机器人沿钢针轴向推钢针,共同完成了待置换钢针拔出的动作,机器人各连杆运动平稳、无碰撞,双机器人协同运动,仿真验证了算法的可行性。

4 结语

本文提出了改进的 RRT-PSO 路径规划算法。该算法在 Bi-RRT 算法的基础上提高了导向性,限定了搜索范围,提高了算法的效率;引入 PSO 算法进行路径优化,使得路径长度变短,使用贝塞尔曲线平滑路径。经仿真对比验证了改进的 RRT-PSO 算法具有效率高、路径短、平滑度高的优点;使用主从运动模式,采用改进的 RRT-PSO 算法进行主机器人的运动规划,将主机器人当作动态障碍物进行从机器人的路径规划;改进的 RRT-PSO 算法能够很好地应用于碳纤维立体织物双机器人的协同避障路径规划,规划出来的路径质量高,能很好地满足实际需求。

参考文献:

- [1] 胡方田,朱小颖. 先进复合材料用立体织物研究进展[J]. 宇航材料工艺,2022,52(2):48-58.
- [2] BROWN K R, HARRELL T M, SKRZYPCZAK L, et al. Carbon fibers derived from commodity polymers: a review[J]. Carbon,2022,196:422-439.
- [3] 刘宇峰,李同起,冯志海,等. 薄层化碳布缝合碳/碳复合材料制备与性能[J]. 复合材料学报,2021,38(4):1210-1222.
- [4] 马全胜,李学臻,王玉琳,等. 三维立体织物复合材料研究与进展[J]. 化工新型材料,2021,49(增刊1):279-282.
- [5] 刘雪莲. 连续卸船机取料装置的路径规划研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
- [6] 买智强,辛舟,张雪琪. 基于改进传统 RRT 算法的机器人路径规划研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(6):177-179.
- [7] KANG M L, CHEN Q H, FAN Z M, et al. A RRT based path planning scheme for multi - DOF robots in

unstructured environments [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,218:108707.

- [8] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Incremental sampling - based algorithms for optimal motion planning [J]. Robotics Science and Systems VI, 2010, 104(2):267-274.
- [9] 周哲,欧阳勇. 融合神经网络 GRU 和 RRT 算法的机械臂路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(9):7-10.
- [10] WANG B P, JU D Y, XU F Z, et al. Bi - RRT* : an improved bidirectional RRT* path planner for robot in two - dimensional space [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 18(10):1639-1652.
- [11] GAO Q Y, YUAN Q N, SUN Y, et al. Path planning algorithm of robot arm based on improved RRT* and BP neural network algorithm[J]. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences,2023,35(8):101650.
- [12] LI B H, CHEN B D. An adaptive rapidly - exploring random tree [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2022,9(2):283-294.
- [13] 韩康,程卫东. 基于改进 RRT-Connect 算法的机械臂路径规划[J]. 计算机应用与软件,2022,39(3):260-265.
- [14] 李艳辉,霍琦,李昂,等. 模块化超冗余度空间机械臂的设计与实验[J]. 机器人,2022,44(1):55-65.
- [15] YIN X, DONG W T, WANG X M, et al. Route planning of mobile robot based on improved RRT star and TEB algorithm[J]. Scientific Reports,2024,14(1):8942.
- [16] 刘慧,张世义,段云鹏,等. 基于改进双向 RRT* 的果园机器人运动规划算法[J]. 农业机械学报,2022,53(11):31-39.
- [17] MA G J, DUAN Y L, LI M Z, et al. A probability smoothing Bi - RRT path planning algorithm for indoor robot[J]. Future Generation Computer Systems,2023,143:349-360.
- [18] 康玉祥,姜春英,秦运海,等. 基于改进 PSO 算法的机器人路径规划及实验[J]. 机器人,2020,42(1):71-78.
- [19] ZAINI F A, SULAIMA M F, RAZAK I A W A, et al. A review on the applications of PSO - based algorithm in demand side management:Challenges and opportunities[J]. IEEE Access,2023,11:53373-53400.
- [20] 贾会群,魏仲慧,何昕,等. 基于改进粒子群算法的路径规划[J]. 农业机械学报,2018,49(12):371-377.

收稿日期:2023 - 11 - 21