

基于改进 RRT* 算法的焊接机器人避障路径规划研究*

陶美良^①, 于功志^①, 王峰^②, 陈小龙^①, 张巧芬^①

(^①大连海洋大学航海与船舶工程学院, 辽宁大连 116023;

^②油特机械工具(大连)有限公司, 辽宁大连 116037)

摘要: 针对快速扩展随机树(rapid-exploration random tree*, RRT*)算法在三维避障路径规划中存在盲目性、低效率和路径不光滑的问题, 提出一种改进的 RRT* 算法, 以提高焊接机器人路径规划的性能。通过采用双向搜索策略, 缩短搜索时间; 结合人工势场(artificial potential field, APF)算法与 RRT* 算法以提升路径平滑性并平衡局部优化与全局最优; 提出一种基于角度与密度的改进 APF 算法策略, 提高避障与路径引导效率; 提出动态目标偏置策略和动态步长策略, 以增强算法在障碍物密集和稀疏区域的自适应性及搜索效率; 采用路径修剪策略缩短和平滑路径。最后, 通过改进的 RRT* 算法与 RRT*、APF-RRT*、Bi-APF-RRT*(bidirectional-APF-RRT*) 3 种算法对比仿真实验以及真机实验, 验证了改进算法的高效性和实用性。

关键词: 焊接机器人; 改进人工势场法; 双向搜索; 改进 RRT* 算法; 避障路径规划

中图分类号: TP242

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.06.003



全文在线

Research on obstacle avoidance path planning for welding robots based on improved RRT* algorithm

TAO Meiliang^①, YU Gongzhi^①, WANG Feng^②, CHEN Xiaolong^①, ZHANG Qiaofen^①

(^①School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, CHN;

^②Youte Machinery Tools (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116037, CHN)

Abstract: In response to the problems of blindness, low efficiency, and uneven path in 3D obstacle avoidance path planning of the rapid-exploration random tree* (RRT*) algorithm. This article proposes an improved RRT* algorithm to enhance the performance of welding robot path planning. This algorithm uses a bidirectional search strategy to shorten search time. Combining artificial potential field (APF) and RRT* algorithms to improve path smoothness and balance local optimization and global optimization; Propose an improved APF strategy based on angle and density to enhance the efficiency of obstacle avoidance and path guidance. Propose a dynamic target bias strategy and a dynamic step size strategy to enhance the algorithm's adaptability and search efficiency in areas with dense and sparse obstacles; Adopt a path pruning strategy to shorten and smooth the path. Finally, the efficiency and practicality of the improved algorithm were verified through comparative simulation experiments and real machine experiments with three algorithms: RRT*, APF-RRT*, and bidirectional-APF-RRT* (Bi-APF-RRT*).

Keywords: welding robot; improved artificial potential field method; bidirectional search; improved RRT* algorithm; obstacle avoidance path planning

* 国家自然科学基金项目(52201354)

工业和信息化部办公厅发布的《智能制造典型场景参考指引（2024年版）》^[1]提到，加快推进制造业数字化转型、智能化升级，并在生产作业项目部分强调了人机协同作业的重要性。计算机与人工智能技术的发展，推动了机器人领域的智能化和多样化，应用领域扩展至工业制造^[2]、环境监测和医疗救援等，提高了效率与质量，降低了人力需求，同时带来了机器人性能和技术挑战^[3]。机器人焊接技术作为实现智能化生产的一项关键性技术，旨在通过人机协同，实现生产效率与质量的提升。为了确保焊接机器人焊接作业时安全移动、防止发生碰撞，并有效缩短移动时间、提高作业效率，焊接机器人避障路径的规划至关重要。

常用的机械臂避障路径算法包括基于图搜索的方法，即A*算法^[4-5]、Dijkstra算法^[6]；基于采样的方法，即RRT算法^[7-8]、概率地图法（probabilistic road map, PRM）^[9]、基于群优化算法、蚁群算法^[10-11]、粒子群优化算法^[12-13]；基于行为的控制方法，即APF算法^[14-15]。图搜索算法具有强搜索能力，可收敛至全局最优，但效率较低，耗时较长^[16]。群优化算法结构简单，易实现与重构，收敛快，但不适用于局部路径规划，易陷入局部最优，尤其在复杂高维环境下表现差。人工势场法的计算量较小，能有效提高机械臂在障碍物较多的环境中避障的实时性，但容易陷入局部最优值^[17]。PRM算法在处理具有复杂障碍物的环境中，其路径搜索效率表现出相对较低的水平。RRT算法参数少，结构简单，搜索能力强，易融合其他算法，然而，该算法节点利用率低，长期搜索导致路径规划不稳定^[18]。单一的算法存在局限性，算法融合策略结合算法的优势，互补各自的不足，从而提升算法的效能。ANHR等^[19]、王杲等^[20]通过APF算法和RRT算法两者结合的避障路径规划方法，解决了APF算法局部最小值问题和RRT算法随机性过强的问题。赵辉等^[21]通过融合RRT与A*算法，利用A*代价函数搜索最佳采样点，优化路径去除路径的冗余点，实现机械臂快速、精确、平稳运动至目标。

本文采用基于APF和RRT*融合算法的改进Bi-APF-RRT*算法进行最优避障路径规划。RRT*算法^[22-23]作为RRT的改进算法，相较于RRT算法，RRT*算法在搜索空间中均匀覆盖，有效逼近最优解。RRT*与APF算法融合后的优势：

（1）避障与路径引导。通过融入APF算法，节点生成路径时能够高效避开障碍物，避免仅依赖随机采样。

（2）提升路径平滑性。RRT*算法生成路径为离散的树结构，非平滑，融合后利用APF算法势场特性使路径更平滑、连续。

（3）在局部优化和全局最优之间取得平衡。RRT*算法基于全局随机采样快速生成路径，局部优化能力较弱。APF算法精于局部优化，通过引力和斥力势场引导路径。融合两者，RRT*算法保持全局采样优势，APF算法增强局部优化，实现路径全局与局部优化均衡。

本文通过融入自适应引力、斥力系数对APF算法改进，采用自适应目标偏置、自适应步长改进RRT*算法，最后通过路径修剪策略优化路径，结合Matlab验证了本文算法的有效性。

1 RRT*算法基本原理

RRT算法是一种基于树状结构构建的路径规划算法，其核心思想在于利用随机采样与树结构扩展相结合的策略，探索并寻找可行路径。RRT算法原理如图1所示。首先是初始化，设起始点 Q_{start} 为树 T 的根节点。其次，随机采样生成节点 Q_{rand} 。再次，在树 T 中，通过欧氏距离度量方法来计算节点之间的距离，从中筛选出距离最近的节点 Q_{near} 。最后，沿 Q_{near} 到 Q_{rand} 方向扩展固定步长 $step$ 生成 Q_{new} ，并进行碰撞检测。若 Q_{new} 在自由空间且与 Q_{near} 连线无碰撞，则将其加入树 T 。重复此过程，直到找到目标点 Q_{goal} 或达到最大迭代次数，最终得到无碰撞路径。

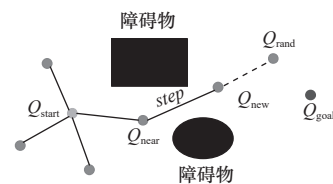


图1 RRT算法原理

Fig. 1 Principle of RRT algorithm

相较于RRT算法，RRT*算法引入了累积成本，能够评估从起点到各个节点的路径成本；增加了选择父节点步骤，遍历以 Q_{new} 为中心、 R 为半径的邻域内的每个节点 Q_{near} ，选择代价最低的节点作为 Q_{new} 的最佳父节点 Q_{min} 。确定 Q_{min} 后，该算法遍历剩余的节点，计算从每个节点到 Q_{new} 和 Q_{start} 的路径

成本。调整连接重新布线，完成更新树步骤。图2所示为父节点优化的策略及其重构回溯过程。

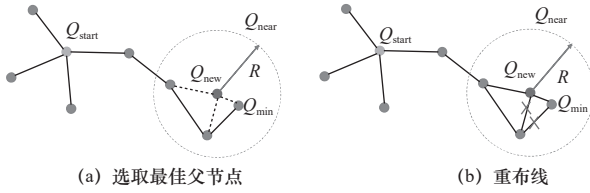


图2 RRT*算法扩展示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of RRT* algorithm expansion

2 APF-RRT*算法基本原理

APF算法基于物理学势场原理，在环境中构建虚拟势场，包括目标引力场和障碍物斥力场。机器人末端视为质点，其在人工势场中的受力如图3所示。受引力 F_{att} 向目标点靠近，引力大小与目标点距离呈正比；同时受斥力 F_{rep} 远离障碍物，斥力大小与障碍物距离在一定范围内呈反比，超出范围斥力为0。最终，机器人末端在合力 F_{total} 作用下沿合力方向运动。

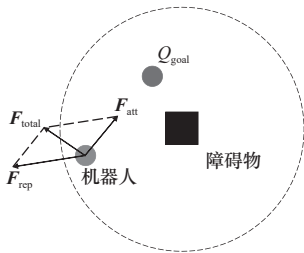


图3 APF算法原理

Fig. 3 Principle of APF algorithm

APF-RRT*算法是在RRT*算法框架下，整合了APF算法，以此实现对目标点的势场引导，过程中障碍物产生斥力 F_{rep} ，而 Q_{goal} 和 Q_{rand} 则产生吸引力 $F_{att_{goal}}$ 和 $F_{att_{rand}}$ ，新节点 Q_{new} 的扩展方向由RRT*的随机扩展变为斥力和吸引力的合力方向，进而提高快速搜索随机树对目标点的搜索效率和速度。初始化，设置起始节点 Q_{start} 为树 T 的根节点，设置目标点 Q_{goal} 并将其设置为吸引点，将障碍物视为排斥点。随机采样，在空间中随机选择一个点 Q_{rand} 。寻找最近节点，在树 T 中找到与 Q_{rand} 最近的节点 Q_{near} 。计算合力并扩展，计算从 Q_{near} 到 Q_{goal} 的吸引力 $F_{att_{goal}}$ 。计算从 Q_{near} 到 Q_{rand} 的吸引力 $F_{att_{rand}}$ 。计算 Q_{near} 周围障碍物施加的排斥力 F_{rep} 。计算合力求得合力 F_{total} 。 Q_{near} 受力分析如图4所示。尝试沿合力方向生成新节点 Q_{new} ，若路径无碰撞则有效；否则，继续随机采样。成功生成 Q_{new} 后，选择到起点 Q_{start} 距离最短

的节点为父节点并连接。重复此过程直至 Q_{new} 与目标 Q_{goal} 距离小于阈值且无碰撞，然后停止并生成路径。

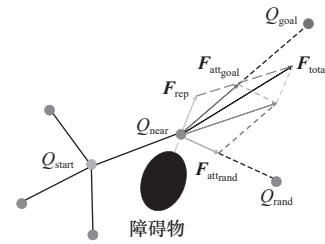


图4 APF-RRT*算法 Q_{near} 受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram of APF-RRT* algorithm Q_{near}

3 Bi-APF-RRT*算法

3.1 双向搜索策略

双向搜索策略如图5所示，其中， Q_{start} 和 Q_{goal} 分别为起始和目标节点，生成虚框中两棵随机搜索树 T_1 和 T_2 ，矩形和椭圆代表障碍物。每次迭代后，若两棵树新生节点 Q_{new} 和 Q'_{new} 的欧式距离小于预设阈值，则连接它们完成路径构建，否则继续迭代。双向搜索有效缩短了算法的执行时长，大幅提升搜索效率。

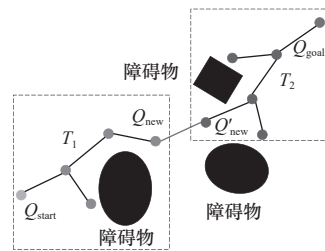


图5 双向搜索原理

Fig. 5 Principle of bi-directional search

3.2 Bi-APF-RRT*算法基本原理

Bi-APF-RRT*算法相对于单向APF-RRT*算法，由构建单向随机搜索树改为双向随机搜索树，提高算法的搜索效率。在Bi-APF-RRT*算法中，两棵树的 Q_{new} 的扩展过程和单向APF-RRT*算法过程相同，通过随机采样点 Q_{rand} 和目标点 Q_{goal} 对 Q_{near} 产生吸引力，障碍物对 Q_{near} 施加排斥力，三者的合力方向，确定 Q_{new} 生长方向。其中 Q_{near} 的受力情况如图6所示，有两棵随机搜索树 T_1 和 T_2 ，椭圆形标记代表图中存在一些障碍物，箭头 $F_{att_{goal}}$ 、 $F'_{att_{start}}$ 代表起始点和目标点 Q_{start} 、 Q_{goal} 对 Q_{near} 、 Q'_{near} 的吸引力， $F_{att_{rand}}$ 、 $F'_{att_{rand}}$ 代表随机采样点 Q_{rand} 、 Q'_{rand} 对 Q_{near} 、 Q'_{near} 的吸引力， F_{rep} 、 F'_{rep} 代表障碍物对 Q_{near} 、 Q'_{near} 的排斥力， F_{total} 、 F'_{total} 为由平行四边形法则计算出的三者矢量

合力,使起点树的新节点和终点树的新节点分别沿着 F_{total} 和 F'_{total} 的方向生长。

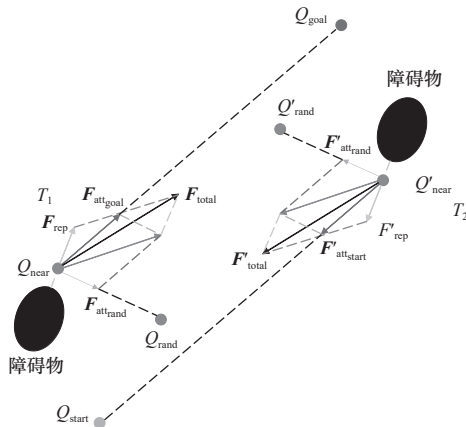


图6 Bi-APF-RRT*算法 Q_{near} 受力分析图

Fig. 6 Force analysis diagrams of Bi-APF-RRT* algorithm Q_{near}

4 改进 Bi-APF-RRT* 算法

4.1 改进人工势场策略

传统的人工势场算法在路径搜索应用时候,能够生成平滑的路径,结合 RRT* 算法,APF 算法可改善路径平滑性,减少机器人抖动,并提升避障能力。然而,该算法也存在引力与斥力之间的失衡问题以及容易陷入局部最优解的情况,这可能导致目标点无法到达。因此,本文提出自适应人工势场算法以优化该缺陷。

本文提出一种基于障碍物密度 $density$ 来调整斥力系数的方法,实现斥力系数 k_{rep} 的自适应调整,引入角度 α 使得 k_{rep} 具有方向敏感性,公式为

$$k_{rep} = (1 - \cos\alpha) k_{rep0} \cdot e^{k \cdot density} \quad (1)$$

式中: k_{rep0} 为初始斥力系数; k 为调整斥力系数比例因子; $density$ 为最近节点周围障碍物密度; α 为机器人与障碍物之间的相对方向角。

总斥力 F_{rep} 由若干斥力分量叠加后形成,公式为

$$F_{rep} = \sum_{c=1}^N (F_{rep1,c} + F_{rep2,c}) \quad (2)$$

式中: $F_{rep1,c}$ 为第 c 个分量的主要斥力,基于距离的主要作用力, $c = 1, 2, \dots, N$, N 为斥力最大范围内障碍物的数量; $F_{rep2,c}$ 为第 c 个分量的辅助斥力,辅助细致控制避让。

主要斥力 $F_{rep1,c}$ 公式为

$$F_{rep1,c} = k_{rep} \cdot \left(\frac{1}{dist} - \frac{1}{rep_{range}} \right) \cdot \frac{\rho_g^2}{dist^2} \cdot \frac{pos - proj_{point}}{dist} \quad (3)$$

式中: $dist$ 为障碍物到当前节点的距离; rep_{range} 为斥力影响的范围; ρ_g 为节点所在空间的密度因子; pos 为当前节点坐标; $proj_{point}$ 为障碍物坐标。

辅助斥力 $F_{rep2,c}$ 公式为

$$F_{rep2,c} = \frac{n}{2} \cdot k_{rep} \cdot \left(\frac{1}{dist} - \frac{1}{rep_{range}} \right)^2 \cdot \rho_g^{n-1} \cdot \frac{pos - goal_{pos}}{\rho_g} \quad (4)$$

式中: n 为控制斥力系数,控制斥力衰减; $goal_{pos}$ 为目标点坐标。

引力系数 k_{att} 的自适应调整公式为

$$k_{att} = (1 - \cos\alpha) k_{att0} \cdot e^{density} \quad (5)$$

式中: k_{att0} 为初始引力系数。

总引力 F_{att} 公式为

$$F_{att} = F_{att_{goal}} + F_{att_{rand}} \quad (6)$$

式中: $F_{att_{goal}}$ 为目标吸引力; $F_{att_{rand}}$ 为随机点吸引力。

目标引力 $F_{att_{goal}}$ 公式为

$$F_{att_{goal}} = -k_{att} \cdot (pos - goal_{pos}) \quad (7)$$

随机点引力 $F_{att_{rand}}$ 公式为

$$F_{att_{rand}} = -k_{rand} \cdot (pos - rand_{point}) \quad (8)$$

式中: k_{rand} 为随机点引力权重; $rand_{point}$ 为随机点坐标。

4.2 动态目标偏置策略

为了提升随机搜索树向目标点搜索的速度,平衡全局搜索和目标导向,本文采用了动态目标偏置策略,以此作为对 RRT* 算法随机采样进行优化。该策略依据式 (9) 来选择随机采样点。

$$P_{bias_{prob}} = \frac{e^{-\beta_1 \cdot density}}{\beta_2} \quad (9)$$

式中: $P_{bias_{prob}}$ 为目标偏置概率; β_1 控制密度对概率的影响; β_2 为比例因子,归一化概率值。

4.3 动态步长策略

在随机树的扩展过程中,环境特征对扩展步长的选择具有显著影响。在障碍物稀疏的环境中,增大扩展步长能够显著缩短算法搜索初始路径的时间。然而,在障碍物密集的环境中,较大的扩展步长会降低扩展的成功率,导致算法在碰撞检测上花费过多时间。因此提出动态步长策略,在稀疏和密集区域动态调整步长,形成自适应步长,以提升路径规划的效率和精度。动态步长公式为

$$step_{size} = step_{size_{max}} \cdot e^{-\beta_3 \cdot density} \quad (10)$$

式中: $step_{size}$ 为动态步长,基于环境障碍物疏密,生成自适应调整步长; $step_{size_{max}}$ 为动态步长最大值; β_3 为比例因子,控制密度对步长的影响。

4.4 路径修剪策略

路径经上述策略优化后，冗余节点大幅度减少，通过修剪策略，对路径进行最后的完善。路径修剪原理如图7所示，从起点或终点遍历搜索树路径，修剪冗余节点，以获得更短路径。

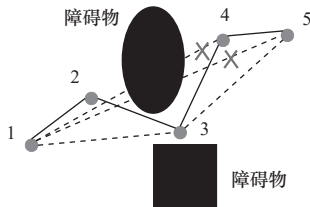


图7 路径修剪原理

Fig. 7 Path trimming principle

如图8所示，原路径为点1~点5，点1到点4发生碰撞，点1到点5发生碰撞，点1连接点3不发生碰撞，同理，点3连接点5通过碰撞检测，路径最后优化后为从点1到点3再到点5，点2和点4为冗余节点。

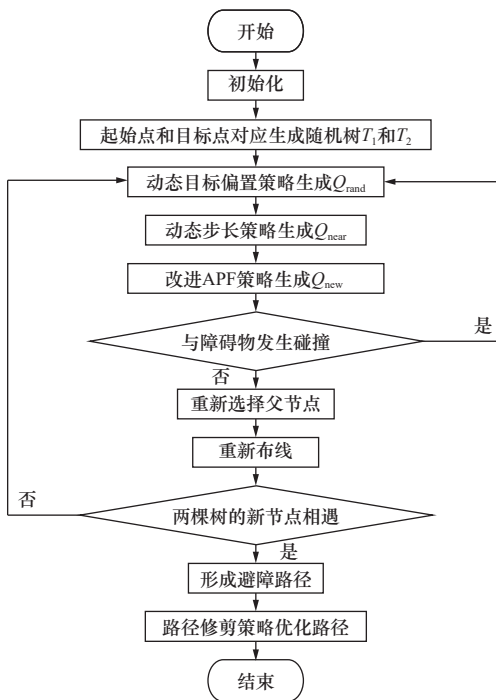


图8 本文算法流程

Fig. 8 Algorithm flow in this article

4.5 算法流程

本文算法流程如图8所示，步骤如下。

步骤1：初始化环境，定义初始参数，分别以起始节点和目标节点为根，同步构建两棵随机搜索树。

步骤2：采用动态目标偏置策略自适应控制采样点生成，节点扩展采用动态步长策略，提升搜索效率和速度。

步骤3：引入改进APF策略，通过自适应计算求得合力向量，确定新节点位置，以此为基础进行重选父节点和重布线。

步骤4：判断碰撞，若发生碰撞则重新迭代；否则进行两个新节点的是否相遇判断，没有相遇，继续迭代，若相遇，则进入下一步。

步骤5：合并路径点，采用路径修剪策略进行路径优化处理，机器人避障路径规划结束。

5 仿真实验与分析

为验证所提出算法的高效性，本研究在 Matlab 环境中搭建三维空间仿真。在实验设计上，选取了 RRT*、APF-RRT*、Bi-APF-RRT* 三种算法与本文改进的算法进行对比分析，实验算法均采用相同的基本参数配置。三维仿真地图尺寸设定为 100 cm×100 cm×100 cm，设置起点坐标为 (10,10,10)，终点坐标为 (90,90,90)。地图布局环境不规则，地图上的障碍物由形态各异、尺寸不等的正方体、球体、圆柱构成。4 种算法在相同的三维环境下的仿真结果如图9所示。图9a中，RRT*算法相较于其他3种算法，其空间随机采样生成的无效节点最多，且避障路径的代价最高。图9b所示的 APF-RRT*算法，采用 APF 策略后无效节点有所减少，路径代价仍相对较高。图9c所示的 Bi-APF-RRT*算法引入了双向搜索策略，相较于前两种算法节点数量较少，但无效节点数量仍较多。图9d所示为本研究提出的改进算法，在4种算法中展现出最少的节点数量和最低的路径代价，路径更平滑，具有显著优势。

4 种算法在同环境仿真实验，记录 30 次实验的平均节点数量、平均路径长度和平均运行时间，如图10所示。本文算法平均路径长度为 170 cm，最终采用路径修剪策略优化后的路径长度为 143 cm，平均运行时间为 1.46 s，平均节点数量为 64 个。与另外 3 种算法相比，本文算法平均运行时间最短，平均节点数量最少，平均路径长度虽不及 APF-RRT* 算法，但是经过路径修剪策略优化后，路径长度值小于 APF-RRT* 算法。结果表明，本文提出的算法性能更优。

6 真机实验

本文采用埃夫特 ARC12-1400 六轴多关节弧焊机器人为研究对象，其尺寸如图11a所示。改进型

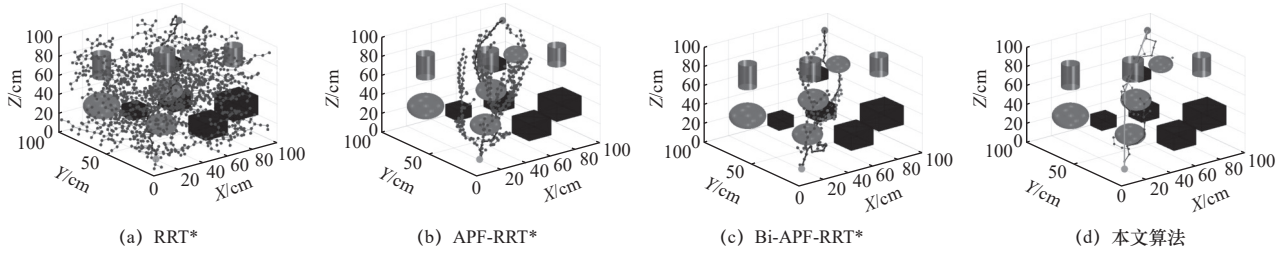


图9 不同算法仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation results of different algorithms

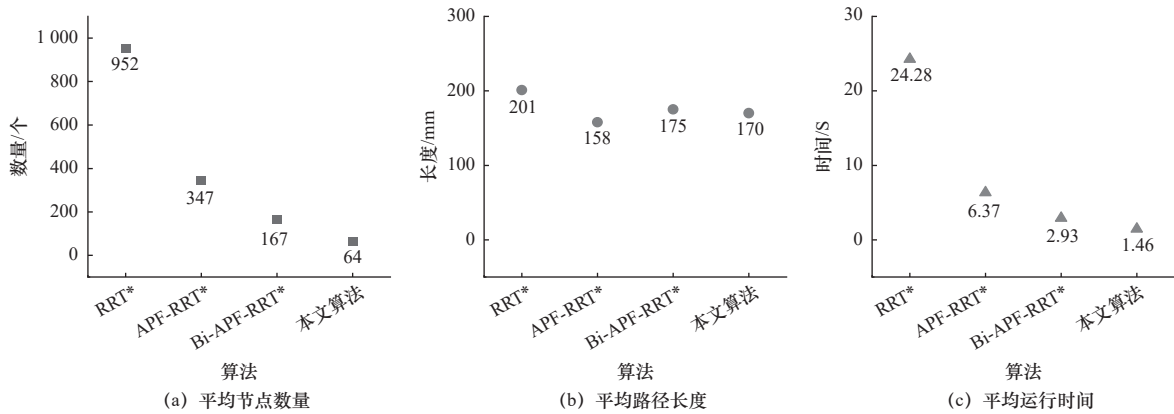


图10 仿真数据对比

Fig. 10 Comparison of simulation data

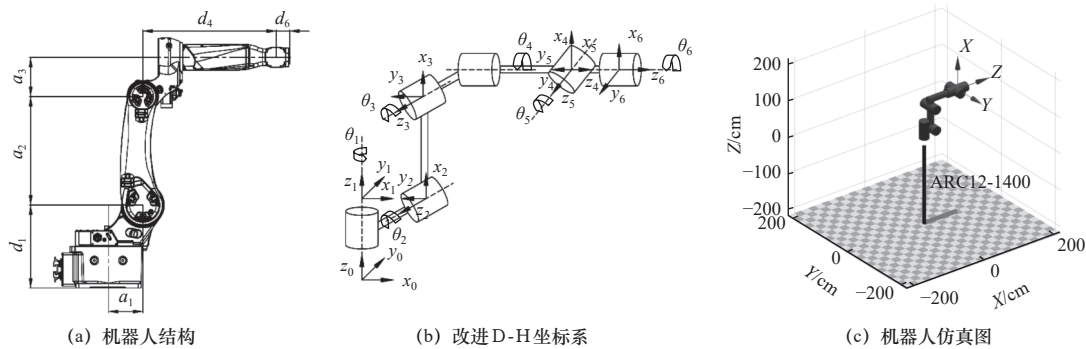


图11 焊接机器人图

Fig. 11 Welding robot diagrams

D-H坐标系如图11b所示。改进D-H参数见表1，其中，连杆长度为 a_{i-1} ，连杆转角为 α_{i-1} ，连杆偏距

为 d_i ，关节角为 θ_i ， $a_1=18\text{ cm}$ 、 $a_2=57\text{ cm}$ 、 $a_3=20.5\text{ cm}$ 、 $d_1=43.7\text{ cm}$ 、 $d_4=70\text{ cm}$ 、 $d_6=7.5\text{ cm}$ 。利用Matlab机器人工具箱可视化处理，生成的仿真模型如图11c所示。

表1 改进D-H参数

Tab. 1 Modified D-H parameters

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1
2	90	a_1	0	$\theta_2 (-90^{\circ})$
3	0	a_2	0	θ_3
4	90	a_3	d_4	θ_4
5	-90	0	0	θ_5
6	90	0	d_6	θ_6

为了验证本文所提出的改进算法在ARC12-1400焊接机器人路径规划中的实际应用效果，根据障碍物的实际尺寸，在Matlab环境中构建了一个针对ARC12-1400焊接机器人的避障模拟场景，并应用本文改进算法进行从 P_1 点到 P_3 点的避障路径规划。路径规划结果如图12所示，得出路径规划节点坐标为 $P_1(60,10,60)$ 、 $P_2(57,-23,101)$ 、 $P_3(60,-30,70)$ 。

在轨迹规划的仿真中，将得到的节点作为轨迹

规划的预设节点，利用 Matlab 中 `ctrj` 函数进行轨迹规划，得到轨迹规划路径，如图 13 所示。输出位移、速度和加速度曲线如图 14 所示，可以看出该轨迹规划路径基本满足使用要求。

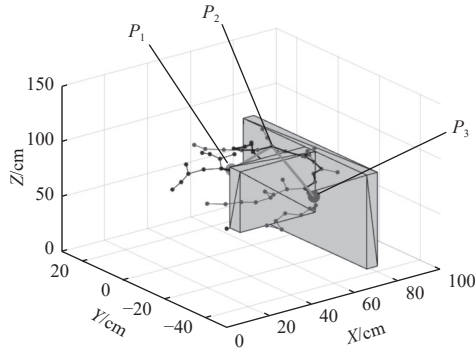


图 12 路径规划结果
Fig. 12 Path planning results

最后，将 Matlab 中经过轨迹规划出的路径输入至焊接机器人的示教器，让焊接机器人沿此路径运动。图 15a 所示为 P_1 点姿态，图 15b 所示为 P_3 点姿态，图 15c 所示为避障轨迹路径。实验结果显示，焊接机器人在实际环境中能够有效地避开障碍物，并顺利达到预定的目标点，证明了本文所提出的改进算法实用价值。

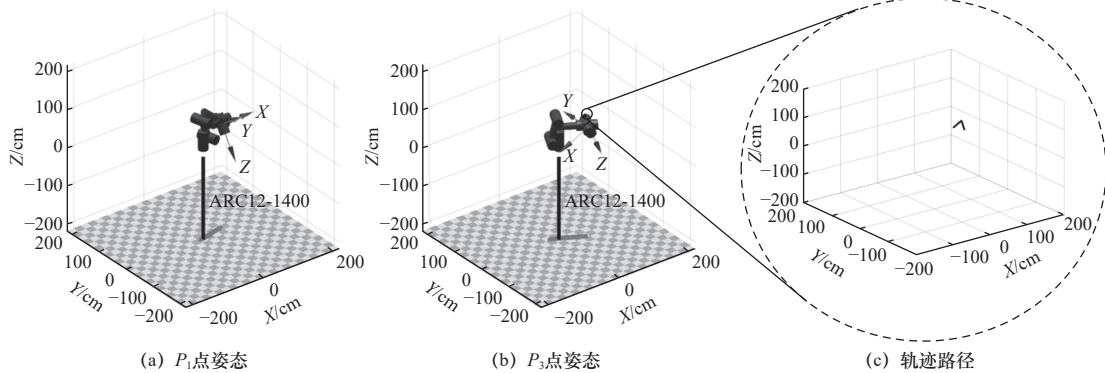


图 13 轨迹规划图

Fig. 13 Trajectory planning diagrams

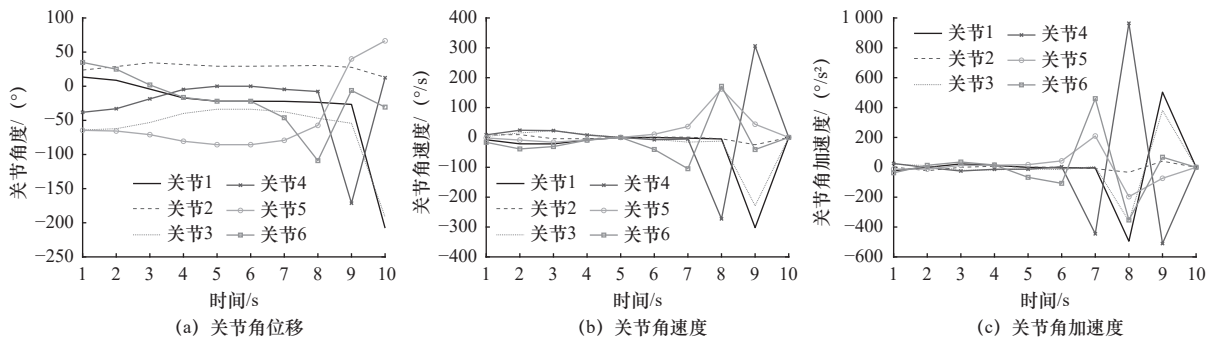


图 14 关节位置曲线

Fig. 14 Joint position curves

7 结语

本文提出一种改进 BI-APF-RRT* 算法，优化了焊接机器人避障的路径规划。本文具体优化路径规划如下：

(1) 引入双向扩展策略，提高扩展效率，缩减搜索耗时。

(2) APF 算法与 RRT* 算法结合相对于 RRT* 算法提升了路径的平滑性，在局部优化和全局最优之间取得平衡，最重要的是对 APF 算法改进，创新性提出一种基于角度与密度的引力系数与斥力系数，相对于传统 APF 算法提升了避障与路径引导的效率。

(3) 创新性提出一种基于障碍物密度的动态目标偏置策略，平衡全局探索和目标导向，提升算法在障碍物密集区域的适应性，增强了环境适应能力。

(4) 创新性提出一种基于障碍物密度的动态步长策略，提高算法在障碍物稀疏区域的搜索效率以及在障碍物密集区域的避障能力，平衡了搜索效率和路径质量。

(5) 通过仿真实验，验证了本文提出算法相

对于其他 3 种算法,能减少无效节点,快速规划出更短路径,显著缩短规划时间,充分证明了本文算法高效生成高质量路径的能力;通过真机实验,验证了该算法在实际应用中的实用性。

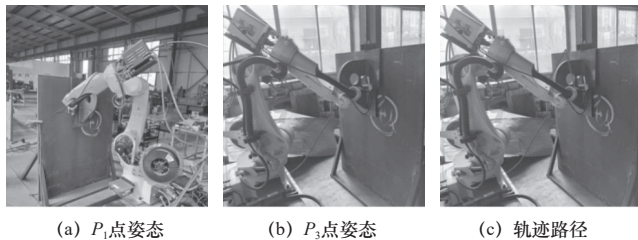


图 15 真机实验图

Fig. 15 Real machine experiment diagrams

后续计划是采用 C++ 编程语言对本文提出的改进算法进行编译,并将该算法嵌入系统软件中,应用到焊接机器人焊接作业中;采用一种优化算法,用于减少焊接机器人运动过程中的冲击,同时提高机器人焊接作业效率,实现时间和冲击的最优化。

参 考 文 献

- [1] 工业和信息化部办公厅. 智能制造典型场景参考指引(2024年版)[EB/OL]. (2024-09-30)[2024-11-05]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbyss/gzdt/art/2024/art_f43bb0c9bdeb459bad94840c64d3bbdd.html.
- [2] 王成军,柳炜,江诚婕. 基于 ROS 的铸件分拣机器人运动规划研究[J]. 制造技术与机床, 2024(7): 12-18.
- [3] 徐岚,商丽,徐紫馨,等. 机器人在制造业中的应用与发展趋势[J]. 科技资讯, 2023, 21(24): 44-48.
- [4] 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.
- [5] ZHUANG M, LI G, DING K X. Obstacle avoidance path planning for apple picking robotic arm incorporating artificial potential field and A* algorithm[J]. IEEE Access, 2023, 11: 100070-100082.
- [6] JI W, LI J L, ZHAO D A, et al. Obstacle avoidance path planning for harvesting robot manipulator based on MAKLINK graph and improved ant colony algorithm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 530/531: 1063-1067.
- [7] CHENG X, ZHOU J M, ZHOU Z, et al. An improved RRT-Connect path planning algorithm of robotic arm for automatic sampling of exhaust emission detection in industry 4.0[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2023, 33: 100436-100436.
- [8] 李扬,张蕾,李鹏飞,等. 基于改进 RRT 结合 B 样条的机械臂运动规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 254-263.
- [9] 张许有,刘有余. 势能代价 PRM 算法的机械臂避障路径规划研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(4): 552-558.
- [10] 周皓. 基于改进蚁群算法的工业机械臂避障路径规划[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [11] ZHAO H D, LI C F, JIANG N. A path planning method of robot arm obstacle avoidance based on dynamic recursive ant colony algorithm[C]//2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems, 2019: 549-552.
- [12] CHEN Y, CHEN L P, DING J W. Adaptive genetic algorithm based particle swarm optimization for industrial robotic arm obstacle avoidance trajectory optimization[C]//2022 International Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering, Chengdu: IEEE, 2022: 1-4.
- [13] 任盼,孟欣佳,丁志杰. 基于改进粒子群算法的双工业机械臂避障路径规划[J]. 技术与市场, 2023, 30(7): 28-31, 36.
- [14] ZHAO H, ZHU Y F, LIU X F, et al. Analysis of obstacle avoidance strategy for dual-arm robot based on speed field with improved artificial potential field algorithm[J]. Electronics, 2021, 10(15): 1850.
- [15] 吴芳,赵云波. 基于轨迹预测与改进人工势场法的机械臂动态避障规划方法[J]. 高技术通讯, 2023, 33(9): 937-946.
- [16] 李佳欣. 随机障碍环境下人机协作技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [17] 纪慧君. 面向数字孪生的工业机械臂抓取系统关键技术的研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [18] 杨旭海,周文皓,李育峰,等. 采摘机械臂路径规划算法研究现状综述[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5): 161-169.
- [19] AN H R, HU J W, LOU P. Obstacle avoidance path planning based on improved APF and RRT[C]//2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, Changsha: IEEE, 2021: 1028-1032.
- [20] 王泉,库祥臣,吴鸿宇,等. 基于改进 APF-RRT 的 6R 机械臂避障路径规划[J]. 机床与液压, 2024, 52(11): 27-32.
- [21] 赵辉,郑绪奕,岳有军,等. 改进 RRT 算法的采摘机械臂路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(1): 338-345.
- [22] 时高建,王欣威,刘强,等. 基于贪心策略改进 RRT* 算法机械臂路径规划[J]. 制造技术与机床, 2024(9): 29-35.
- [23] 孙立新,高建明,高春艳,等. 基于改进 RRT* 算法的七自由度机械臂避障路径规划[J]. 控制工程, 2023, 30(9): 1592-1597, 1615.

第一作者:陶美良,男,1995年生,硕士研究生,研究方向为机械、机器人控制与路径规划。E-mail: 1984999671@qq.com

通信作者:于功志,男,1972年生,硕士,副教授,研究方向为船舶与海洋工程、轮机工程机工程、机器人智能控制、焊接自动化技术。E-mail: 12971733353@qq.com

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2024-12-30)