

面向耐火砖砌筑的改进RRT涂抹机械臂路径规划方法

段梦成^{1,2} 郑正鼎^{1,2} 高全杰^{1,2} 王红霞³

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081)

(2. 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉 430081)

(3. 湖北汽车工业学院 汽车智能制造学院, 十堰 442002)

摘要:【目的】对于耐火砖砌筑中特异性砖体形态复杂、作业空间受限等特殊工况,传统方法在涂抹异形砖体表面时存在规划效率低、轨迹平滑性差及路径代价高等不足。为此,提出一种改进快速探索随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)算法,对涂抹机械臂的路径规划问题进行研究。【方法】通过分区高斯采样,增强对关键区域的搜索导向;采用引力动态调节步长,实现狭窄空间中的自适应探索;并引入三角不等式剪枝与三次B样条优化,去除冗余节点,提升轨迹平滑度。【结果】仿真结果表明,改进RRT算法在规划时间、路径长度、路径节点数及迭代次数方面均优于对比算法。实物试验验证中,该改进RRT算法在砌筑环境下可实现平稳避障与涂抹作业,其规划时间较传统RRT、RRT*、Bias-RRT和RRT-Connect分别缩短70.80%、80.54%、29.12%和22.24%;路径长度分别缩短31.26%、3.52%、22.62%和30.10%,展现了良好的工程适用性。

关键词: 涂抹机械臂; 路径规划; 改进RRT算法; 分区高斯采样; 引力动态调节步长

中图分类号: TP241; TP18 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

目前,耐火砖砌筑工程仍高度依赖传统人工作业模式,不仅面临成本高的问题,还存在作业人员的安全隐患^[1]。随着智能建造技术的发展,机器人逐步应用于砌筑领域,显著提高了施工效率,降低了人力成本^[2]。涂抹机械臂的路径规划作为砌筑任务中的核心环节,直接关系到涂抹质量与系统效率。在针对特异性耐火砖的复杂曲面与狭窄作业空间进行涂抹路径规划时,传统算法,如A*算法^[3]、蚁群算法^[4]和人工势场法^[5]等,常难以在高维构型空间中实现高效探索;而快速探索随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)算法^[6]凭借其在全局探索能力,显示出独特优势。但是,该算法也存在目标导向性弱、收敛效率低的问题,易导致机械臂运动路径发生碰撞、作业质量不稳定及能耗较高^[7]。因此,面向耐火砖砌筑的特殊工况,提升机械臂在复杂场景下的路径规划能力,已成为实现高质量自动化涂抹的关键挑战。

针对RRT算法的低效率问题,许多学者进行了不同程度的改进。YE等^[8]提出改进运动学约束双向RRT算法,通过滚动窗口技术增强人工势场法,以提高路径规划效率和平滑度,但是,在高维空间中其势场力易受到局部极小值干扰。FAN等^[9]采用目标偏向策略结合双向RRT*算法来加速搜索效率,但其节点重连机制在障碍密集区域会产生大量冗余计算。赵广元等^[10]在RRT算法基础上提出通过角度约束采样的方法,虽减少了无效搜索区域,但其动态步长策略仅依赖局部障碍物密度,未考虑全局路径代价。刘亚飞等^[11]提出一种范数自适应步长RRT算法,基于雅可比矩阵建立的步长映射关系可实现关节空间步长的动态优化与碰撞检测有效性的双向兼顾,但其单节点计算负担显著增加。郭北涛等^[12]提出一种基于目标偏置和双向RRT并融合A*算法的改进RRT算法,可加快扩展速度,但初始采样密度不足可能导致路径严重绕行,增大路径代价。

为解决耐火砖砌筑中特异性砖体形态复杂、作

收稿日期: 2025-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52505516); 湖北省自然科学基金科技创新群体项目(2024AFA026)

作者简介: 段梦成,男,2000年生,河南商丘人,硕士; 主要研究方向为机器人智能控制; 1045243192@qq.com。

郑正鼎(通信作者),男,1995年生,湖北大冶人,博士,讲师; 主要研究方向为先进制造装备设计与工艺开发; zdzheng@wust.edu.cn。

引用格式: 段梦成, 郑正鼎, 高全杰, 等. 面向耐火砖砌筑的改进RRT涂抹机械臂路径规划方法 [J]. 机械传动, XXXX, XX (XX): 1-10.

DUAN Mengcheng, ZHENG Zhengding, GAO Quanjie, et al. An improved RRT path planning method for plastering robotic arm manipulation in refractory bricklaying [J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX (XX): 1-10.



免费获取

业空间受限等特殊工况中涂抹机械臂路径规划存在的适应能力不足问题,本文提出一种改进RRT算法。通过分区高斯采样策略,构建联合采样,引导树结构向目标区域高效生长;基于引力势场的动态步长调节机制,根据砌筑空间结构自适应调整步长,缩短找到可行路径的时间;利用三角不等式剪枝删除冗余节点,并利用三次B样条曲线对规划路径进行平滑处理,以提高路径的安全性和适应性,最终得到一条平稳运行的无碰撞涂抹路径。

1 机械臂建模与碰撞检测

1.1 机械臂运动学模型建立

本文以UR10型机械臂为研究对象,该机械臂各关节具有独立的旋转自由度和位置调节能力。机械臂实物模型如图1(a)所示。为精确描述机械臂末端在世界坐标系中的位置与关节角度的关系,采用改进D-H参数化方法建立数学模型^[13],如图1(b)所示。UR10型机械臂D-H参数如表1所示。

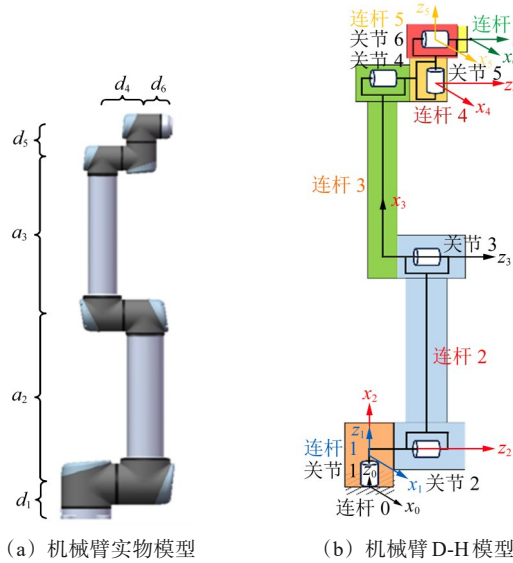


图1 机械臂模型

Fig. 1 Robotic arm model

表1 UR10型机械臂D-H参数

Tab. 1 D-H parameters of the UR10 robotic arm

关节 i	$\alpha_i/(\circ)$	d_i/mm	θ_i	a_i/mm
1	90	127.3	θ_1	0
2	0	0	θ_2	-612
3	0	0	θ_3	-572.3
4	90	163.941	θ_4	0
5	-90	115.7	θ_5	0
6	0	92.2	θ_6	0

从关节 $i-1$ 变换到关节 i 需要经过2次旋转变换和2次平移变换,变换矩阵为

$${}^{i-1}T = R_{\text{Rot1}}(X, \alpha_{i-1})T_{\text{Tran1}}(X, a_{i-1})R_{\text{Rot2}}(Z, \theta_i)T_{\text{Tran2}}(Z, d_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, θ_i 、 d_i 、 a_i 、 α_i 分别为关节 i 的关节角、连杆偏移量、连杆长度、连杆扭转角; $R_{\text{Rot1}}(X, \alpha_{i-1})$ 为绕 X 轴旋转角度 α_{i-1} 的旋转变换矩阵; $T_{\text{Tran1}}(X, a_{i-1})$ 为沿 X 轴平移距离 a_{i-1} 的平移变换矩阵; $R_{\text{Rot2}}(Z, \theta_i)$ 为绕 Z 轴旋转角度 θ_i 的旋转变换矩阵; $T_{\text{Tran2}}(Z, d_i)$ 为沿 Z 轴平移距离 d_i 的平移变换矩阵。

1.2 碰撞检测

本研究针对机械臂涂抹路径规划中的碰撞检测问题,采用一种基于包围体层次结构的高效检测方法^[14]。将障碍物简化为球体模型、机械臂表示为圆柱形包围盒,并对复杂对象进行几何分解,实现场景的快速建模。基于分离轴定理,将模型投影到分离面的垂直面上,通过检测投影区间的重叠性判定碰撞状态。将两平面投影到分离轴的垂线上,若两投影线无重叠,则两平面也不重叠,如图2(a)所示。将两简化模型投影到分离面的垂直面上,若两投影面无重叠,则表明两模型无碰撞,如图2(b)所示。该方法通过降维处理显著提升了检测效率,保证了碰撞检测的准确性。

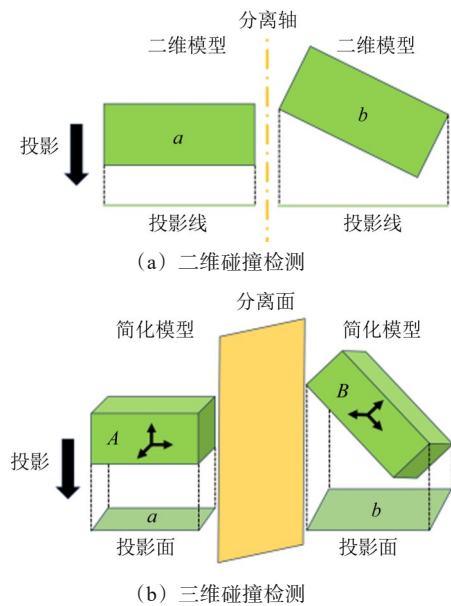


图2 碰撞检测原理图

Fig. 2 Collision detection schematic diagram

2 基于改进RRT算法的路径规划

2.1 传统RRT算法

传统RRT算法的原理是建立一棵随机扩展树,

在复杂的高维空间中找到从起始点到目标点的可行路径。图3为其原理图。随机树从起始点 q_{init} 开始生长, 使用地图自由空间中的随机采样生成随机点 q_{rand} ; 通过该算法找到最接近随机点 q_{rand} 的节点 $q_{nearest}$, 并以固定步长扩展创建新节点 q_{new} 。如果新节点和最近的节点之间没有障碍物, 则新节点作为子节点添加到树中; 否则, 生成新的随机点。当随机树中的子节点到达目标点 q_{goal} 的目标区域或目标点本身时, 扩展停止。最后, 该算法从目标点回溯到起始点, 找到从起始点到目标点的无障碍路径。

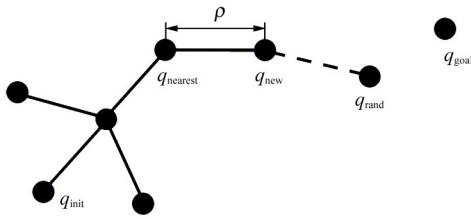


图3 传统RRT算法原理图

Fig. 3 Principle diagram of the traditional RRT algorithm

2.2 改进策略

2.2.1 分区高斯采样策略

在涂抹机械臂的路径规划过程中, 为提高采样效率, 本文提出一种分区高斯采样策略。通过区域划分, 结合高斯分布与均匀分布, 采样点能够更有效地集中在关键区域, 从而优化路径搜索效率。

将任务序列 $T = \{t_0, t_1, \dots, t_N\}$ 区域化为高概率区域和低概率区域, 按照时间顺序对区域进行编号, 以获得任务段序列 $T_s = \{T_0, T_1, \dots, T_n\}$ 及对应的时间段的宽度 Δ_s 。其中, s 为任务段编号, $s=0, 1, \dots, n$ 。

将复杂度较高的区域, 例如拐角区域、狭窄通道区域以及路径终点区域, 设定为高概率区域; 其余区域则设定为低概率区域。图4所示为不同抽样概率区域划分。图5所示为分区高斯采样概率分布。其中, p_{max} 和 p_{min} 分别为最高和最低概率。

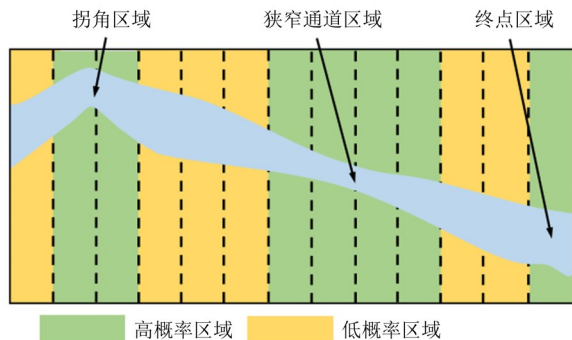


图4 不同的抽样概率区域划分

Fig. 4 Partition of different sampling probability regions

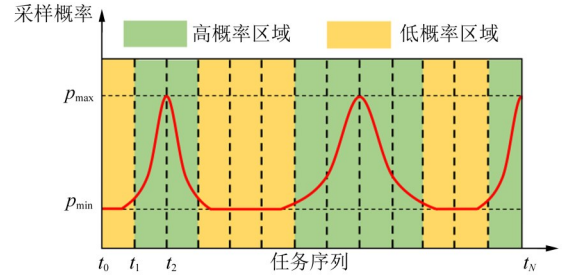


图5 分区高斯采样概率分布

Fig. 5 Probability distribution of the partitioned Gaussian sampling

分区高斯采样的参数设置由区域宽度决定。已知 Δ_s 是任务段 T_s 的宽度, 分布参数 μ_s 、 σ_s 和采样频率 F_s 针对任务分区 $T_s = \{t_i, t_{i+\Delta_s}\}$ 进行设置。其中, t_i 为起始任务。高斯分布的采样概率函数为

$$P_G(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(i - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (2)$$

图6所示为高斯采样策略的采样概率分布。其中, i 为任务序号, 采样范围 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 为高概率区域。若 $T_s = \{t_i, t_{i+\Delta_s}\}$ 为高概率区域, 则其分布参数 $\mu_s = i + \frac{\Delta_s}{2}$, $\sigma_s = \frac{\Delta_s}{2}$ 。

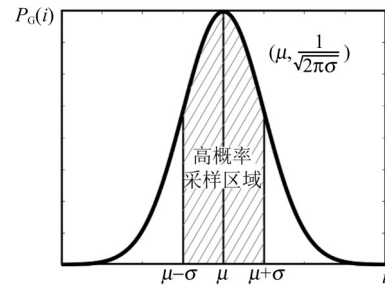


图6 高斯采样策略的采样概率分布

Fig. 6 Sampling probability distribution of the Gaussian sampling strategy

对于低概率区域, 不进行正态分布参数设定, 而是对区域内的任务点均匀采样。采样概率为

$$P_U(i) = \frac{1}{\Delta_s} \quad (3)$$

为了确保整体采样概率分布符合既定曲线, 并兼顾各个分区的采样频率, 每个区域的采样频率 F_s 设置如下所述。

设定比例权重映射, 即最高与最低概率比值 $\sigma_r = p_{max}/p_{min}$, 且权重系数 f_s 满足:

$$f_0 p_0 : f_1 p_1 : \dots : f_s p_s = 1 : \sigma_r : \dots : 1 : \sigma_r \quad (4)$$

式中, p_s 为第 s 个区域的最高采样概率。此关系确保了算法资源能通过权重 f_s 向高概率区域倾斜。

基于上述权重, 为协调不同区域的采样概率并稳定概率比例, 每个区域的采样频率 F_s 可表示为

$$F_s = f_s I_{it,max} \quad (5)$$

式中, $I_{it\max}$ 为算法的最大迭代次数。

通过分区高斯采样方法合理划分任务区域, 采用高斯分布与均匀分布相结合的方式, 有效提升了路径规划的效率, 优化了搜索空间的探索能力。通过逐步推进采样区域, 路径规划树在扩展过程中能够更快地发现最优路径。

2.2.2 引力动态调节步长策略

在传统 RRT 算法中, 步长是影响效率的关键因素。无障碍时, 增大步长可加速搜索; 有障碍时, 步长过大会难以通过狭窄区域, 过小则产生冗余节点。因此, 采用引力动态调节步长策略, 结合引力系数和障碍物分布, 可动态调整步长以优化性能。其具体原理如下所述。

传统 RRT 算法扩展后, 新节点 q_{new} 的位置为

$$q_{\text{new}} = q_{\text{nearest}} + \rho \frac{q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}}{\|q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}\|} \quad (6)$$

式中, ρ 为步长。

改进算法引入目标引力, 扩展后新节点位置为

$$q_{\text{new}} = q_{\text{nearest}} + \rho_1 \frac{q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}}{\|q_{\text{rand}} - q_{\text{nearest}}\|} + \rho_2 \frac{q_{\text{goal}} - q_{\text{nearest}}}{\|q_{\text{goal}} - q_{\text{nearest}}\|} \quad (7)$$

式中, ρ_1 为随机扩展方向的步长; ρ_2 为目标扩展方向的步长。且

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho \\ \rho_2 = k\rho \end{cases} \quad (8)$$

式中, k 为引力系数。

为增强步长策略对障碍环境的响应能力, 设计一个基于双曲正切函数的引力系数 k_p , 其表达式为

$$k_p = 1 + \tanh[\gamma(\min_i \|q_{\text{nearest}} - x_i\| - d_s)] \quad (9)$$

式中, $\min_i \|q_{\text{nearest}} - x_i\|$ 为当前节点与最近障碍物的距离; x_i 为第 i 个障碍物的中心坐标; γ 为环境敏感度调节系数, $\gamma > 0$; d_s 为安全距离, 取机械臂半径大小。

初始步长预设 ρ_0 , 步长的计算式为

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 + \varepsilon\rho_0, k_p > 1 \\ \frac{\rho_0}{1 + \lambda(1 - k_p)}, 0 < k_p \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, ε ($\varepsilon > 0$)、 λ ($\lambda > 0$) 分别为控制步长增长与收缩的比例。该设置可确保在空旷区域采用大步长快速扩展, 在障碍密集区域自动减小步长以实现精细避障, 实现环境响应型步长自适应调节机制, 保障了路径规划的稳定性、避障性与高效性。

图 7 所示为引力动态调节步长策略。由图 7(a) 可知, 当节点 q_{nearest} 离障碍物较远时, $k_p > 1$, 步长根据 $\rho = \rho_0 + \varepsilon\rho_0$ 增长, 可提升搜索速度。由图 7(b) 可知, 当节点靠近障碍物时, 引力系数减小, 即 $0 < k_p \leq 1$, 步长根据 $\rho = \rho_0 / [1 + \lambda(1 - k_p)]$ 收缩, 可确

保避障精度和路径安全。结合引力引导与障碍物分布进行步长调整, 可提高路径规划效率与安全性。

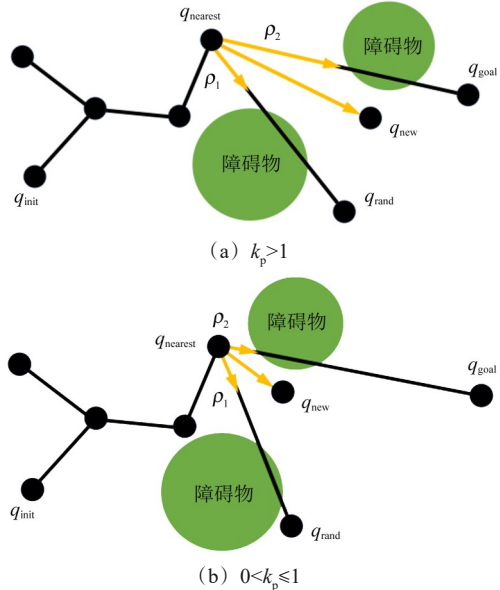


图 7 引力动态调节步长策略

Fig. 7 Dynamic step size adjustment strategy based on the attraction

2.2.3 路径优化策略

在改进 RRT 算法生成的路径中, 冗余节点的存在不可避免地降低了路径的质量。因此, 本文利用三角不等式这一简单而有效的方法对路径进行快速优化。图 8 所示为三角不等式路径剪枝原理。初始路径定义为 $T_{\text{tree}} = \{q_{\text{start}}, \dots, q_{\text{new1}}, q_{\text{new2}}, q_{\text{new3}}, q_{\text{new4}}, q_{\text{new5}}, \dots, q_{\text{goal}}\}$, 中间节点为 $q_{\text{new1}}, q_{\text{new2}}, q_{\text{new3}}, q_{\text{new4}}, q_{\text{new5}}$, 形成中间路径 $T_0 = \{q_{\text{new1}}, q_{\text{new2}}, q_{\text{new3}}, q_{\text{new4}}, q_{\text{new5}}\}$ 。将三角不等式优化应用于 T_0 。由节点 $q_{\text{new1}}, q_{\text{new2}}$ 和 q_{new3} 构成的三角形满足三角不等式, 直接在路径 $L(q_{\text{new1}}, q_{\text{new3}})$ 上执行进一步的碰撞检查。由图 8 可知, 如果直线路径 $L(q_{\text{new1}}, q_{\text{new3}})$ 上没有障碍物, 则基于三角不等式省略线段 $L(q_{\text{new1}}, q_{\text{new2}})$ 和 $L(q_{\text{new2}}, q_{\text{new3}})$, 将 T_0 更新为 $\{q_{\text{new1}}, q_{\text{new3}}, q_{\text{new4}}, q_{\text{new5}}\}$ 。该过程在节点 $q_{\text{new1}}, q_{\text{new3}}$ 和 q_{new4} 处继续; 然而, 如图 8 中的黄色虚线所示, 线段 $L(q_{\text{new1}}, q_{\text{new4}})$ 被障碍物阻挡, 因此, 剪枝失败。随后将优化应用于节点 $q_{\text{new3}}, q_{\text{new4}}$ 和 q_{new5} , 线段 $L(q_{\text{new3}}, q_{\text{new5}})$ 是无障碍的, 因此, 它替换了线段 $L(q_{\text{new3}}, q_{\text{new4}})$ 和 $L(q_{\text{new4}}, q_{\text{new5}})$ 。最终将 T_0 更新为 $\{q_{\text{new1}}, q_{\text{new3}}, q_{\text{new5}}\}$ 。

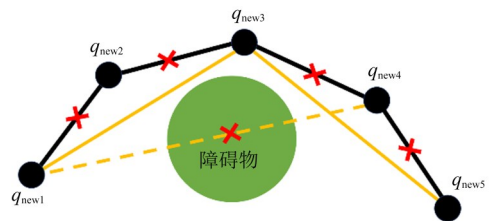


图 8 三角不等式路径剪枝原理

Fig. 8 Principle of the path pruning based on the triangle inequality

去除冗余节点虽然缩短了路径长度, 但得到的路径仍存在转折点。针对这一问题, 采用三次B样条曲线对避障路径进行平滑处理^[15]。三次B样条曲线的方程为

$$C(u) = \sum_{m=0}^M d_m N_{m,3}(u) \quad (11)$$

式中, u 为节点向量; $d_m (m=0, 1, \dots, M)$ 为控制点, 决定B样条的控制多边形; $N_{m,3}(u)$ 为三次B样条基函数。

三次B样条基函数为

$$\begin{bmatrix} N_{0,3}(u) \\ N_{1,3}(u) \\ N_{2,3}(u) \\ N_{3,3}(u) \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} (1-u)^3 \\ (3u^3 - 6u^2 + 4)^3 \\ (-3u^3 + 3u^2 + 3u + 1)^3 \\ u^3 \end{bmatrix}, u \in [0, 1] \quad (12)$$

三次B样条曲线段为

$$C_{0,3}(u) = C_0 \times N_{0,3}(u) + C_1 \times N_{1,3}(u) + C_2 \times N_{2,3}(u) + C_3 \times N_{3,3}(u), u \in [0, 1] \quad (13)$$

式中, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 均为控制点。

2.3 涂抹机械臂路径规划方法

本文采用改进RRT算法进行耐火砖砌筑环境下涂抹机械臂的路径规划, 各个步骤和实现逻辑如图9所示。

3 机械臂仿真与试验

为验证本文提出的改进RRT算法在避障路径规划中的可行性、环境适应性及其规划效率的提升效果, 在二维仿真环境和三维仿真环境中分别对传统RRT算法、RRT*算法、Bias-RRT算法(偏置概率取20%)、RRT-Connect算法和改进RRT算法进行50次路径规划仿真并对比。二维仿真地图尺寸为1 000 mm×1 000 mm, 绿色矩形为障碍物。三维仿真地图尺寸为1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm, 绿色立方体为障碍物。仿真地图中, 蓝色圆点为起始点, 红色圆点为目标点, 粉色线条是各种算法寻找到的路径, 蓝色线条是改进算法中剪枝处理得到的路径, 红色线条是改进算法中平滑处理后的最终路径。仿真环

境配置为Intel(R)Core(TM)i7-8565U CPU@1.80 GHz, 其内存为16 GB。各RRT算法均采用Matlab 2022a软件来实现, 并搭建试验平台进行验证。

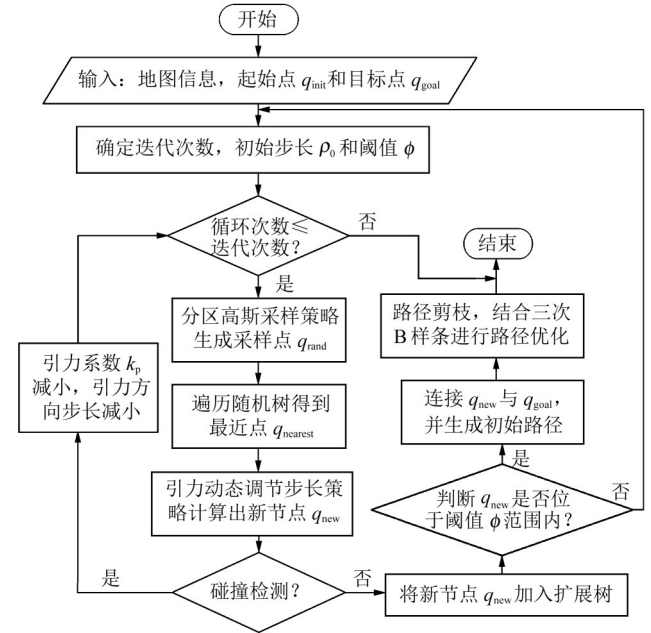


图9 改进RRT算法流程图

Fig. 9 Flow chart of the improved RRT algorithm

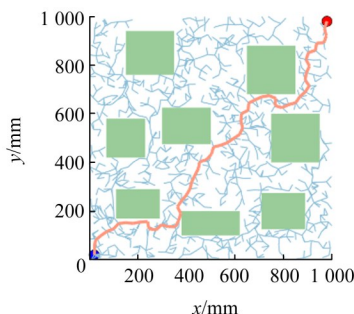
3.1 二维仿真

二维空间中统一各算法的仿真参数为: 起始节点坐标为(20, 20) mm, 目标节点坐标为(980, 980) mm, 扩展步长为30 mm, 最大迭代次数为4 000, 阈值为30。图10所示为二维仿真地图中5种RRT算法的路径规划。表2所示为二维仿真地图中各算法性能。

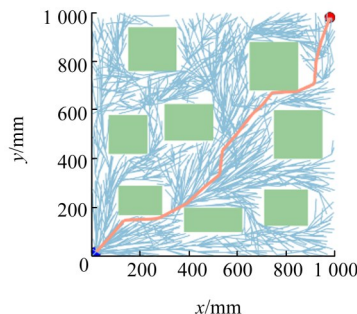
表2 二维仿真地图中各算法性能

Tab. 2 Performance of each algorithm in the 2D simulation map

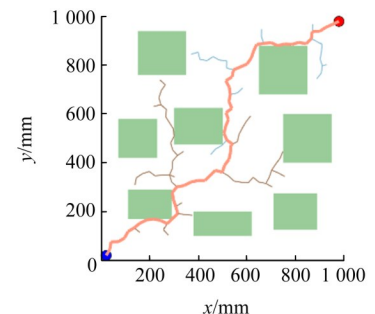
算法	平均路径长度/mm	平均规划时间/s	平均节点数	平均迭代次数
传统RRT	1 772.128	0.965	59.68	1 286.90
RRT*	1 440.937	2.004	19.82	1 256.20
RRT-Connect	1 732.607	0.108	58.76	1 151.54
Bias-RRT	1 629.701	0.316	55.23	436.68
改进RRT	1 396.408	0.068	7.44	329.74



(a) 传统RRT



(b) RRT*



(c) RRT-Connect

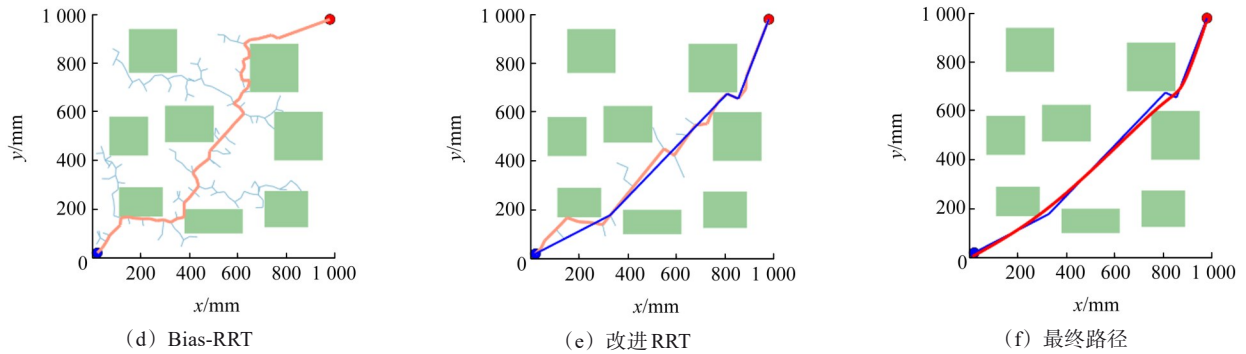


图10 二维仿真地图中5种RRT算法的路径规划

Fig. 10 Path planning of five RRT algorithms in the 2D simulation map

从图10可以明显看出,改进RRT算法路径代价更低,路径节点数更少且路径更平滑。从表2也可以看出,在二维仿真环境中,改进RRT算法相对于传统RRT、RRT*、Bias-RRT和RRT-Connect这4种算法性能更佳。

3.2 三维仿真

三维空间中统一各算法的仿真参数为:起始节点坐标为(20, 20, 20) mm,目标节点坐标为(980, 980, 980) mm,扩展步长为50 mm,最大迭代次数为5 000,阈值为50。图11所示为三维仿真地图中5种RRT算法的路径规划。表3所示为三维仿真地图中各算法性能。

从图11可以看出,传统RRT算法采用完全随机采样,生成大量无效节点,路径存在较多转折点;RRT*算法引入渐近最优策略,略有改善,但仍存在

路径波折问题;Bias-RRT算法通过目标偏置提升扩展方向性,减少无效节点,但路径仍不平滑;RRT-Connect算法通过双向扩展,在开放空间中效率较高,但在狭窄或复杂环境中易产生冗余节点。而改进RRT算法引入分区高斯采样策略和引力动态调节步长策略,有效提升搜索效率,减少无效路径节点,路径最优;进一步通过去除冗余点和B样条优化后,路径更加平滑,整体规划效果显著优于其他算法。从表3可以看出,在三维仿真环境中,改进RRT算法在路径规划时间方面相对于传统RRT、RRT*、Bias-RRT和RRT-Connect这4种算法分别缩短了95.22%、98.35%、37.65%、26.28%;在路径长度方面相对于传统RRT、RRT*、Bias-RRT和RRT-Connect这4种算法分别缩短了30.23%、3.42%、20.50%、27.22%;在路径节点数方面相对于传统RRT、RRT*、Bias-RRT和RRT-Connect这4种算法

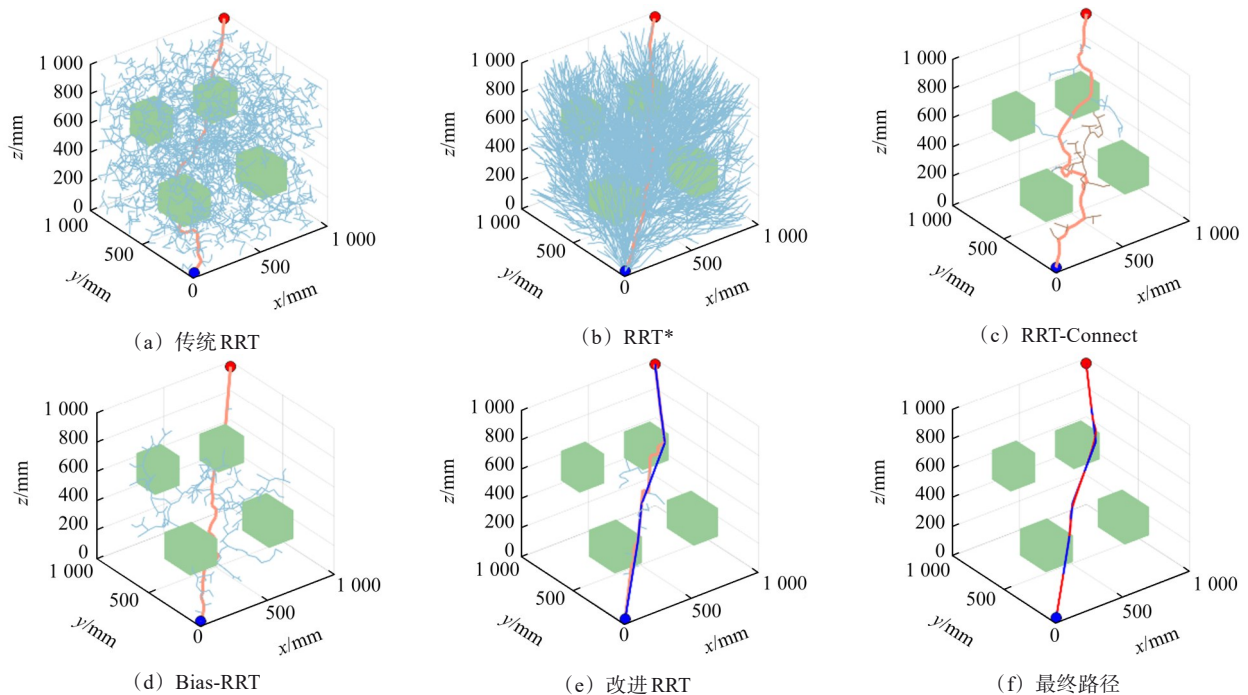


图11 三维仿真地图中5种RRT算法的路径规划

Fig. 11 Path planning of five RRT algorithms in the 3D simulation map

分别减少了 78.65%、42.45%、67.80%、71.84%；在迭代次数方面相对于传统 RRT、RRT*、Bias-RRT 和 RRT-Connect 这 4 种算法分别减少了 82.87%、82.75%、30.55%、76.88%。改进 RRT 算法在三维仿真环境中表现出优越的性能。

表3 三维仿真地图中各算法性能

Tab. 3 Performance of each algorithm in the 3D simulation map

算法	平均路径长度/mm	平均规划时间/s	平均节点数	平均迭代次数
传统 RRT	2 488.717	2.112	65.49	2 491.36
RRT*	1 797.924	6.138	24.29	2 473.92
RRT-Connect	2 386.087	0.137	49.64	1 845.24
Bias-RRT	2 184.332	0.162	43.42	614.34
改进 RRT	1 736.451	0.101	13.98	426.66

3.3 机械臂涂抹路径仿真与试验

为了验证改进 RRT 算法的性能, 根据设计的砌筑平台模拟了真实的工作环境。图 12 为耐火砖砌筑平台示意图。仿真平台主要包括桁架、型号为 UR10 的六轴涂抹机械臂、抓取夹具、型号为 RVC-M2600-ML2 的深度相机、耐火砖输送平台和其他关键构件。其中, 桁架为横向移动的主体框架; 抓取夹具负责抓取输送平台的耐火砖并搬运到指定位置; 深度相机用于收集耐火砖侧面的关键点位信息, 包括定位涂抹面及涂抹的起始点和结束点。根据获取的耐火砖侧面信息, 使用改进 RRT 算法规划无碰撞路径, 进行涂抹路径动作。

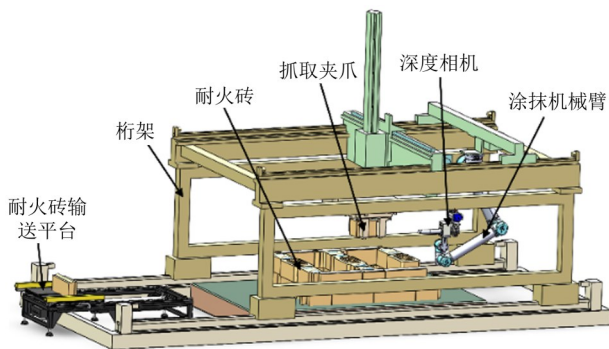


图 12 耐火砖砌筑平台示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the refractory brick masonry platform

通过工具中心点 (Tool Center Point, TCP) 标定和手眼标定, 确定涂抹机械臂末端执行器的空间位姿及其与深度相机的坐标映射关系, 使涂抹机械臂搭载的深度相机能够识别抓取夹具所夹持耐火砖的砖面信息, 机械臂进行路径规划并进行涂抹动作。图 13 为涂抹机械臂作业流程图。

为便于深度相机与末端执行器保持适宜角度, 首先, 将机械臂初始位姿设定为 (24.71, -57.93,

72.13, 77.82, 90.72, 114.74); 其次, 通过深度相机识别耐火砖侧面, 确定涂抹起始点, 并基于角点坐标进行路径规划, 生成无碰撞路径; 再次, 机械臂沿规划路径运动, 同时配合泵送系统完成泥浆涂抹。任务结束后, 机械臂返回初始位置, 为下一次作业做准备。本仿真以某型号耐火砖为例, 在 Matlab 软件环境中实现涂抹路径规划。仿真结果如图 14 所示。

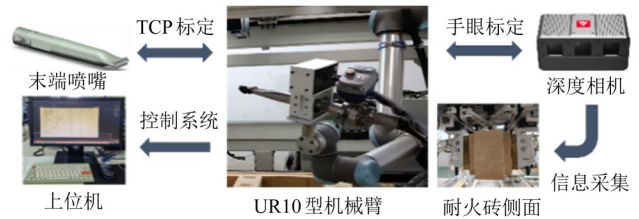


图 13 涂抹机械臂作业流程图

Fig. 13 Workflow of the plastering robotic arm operation

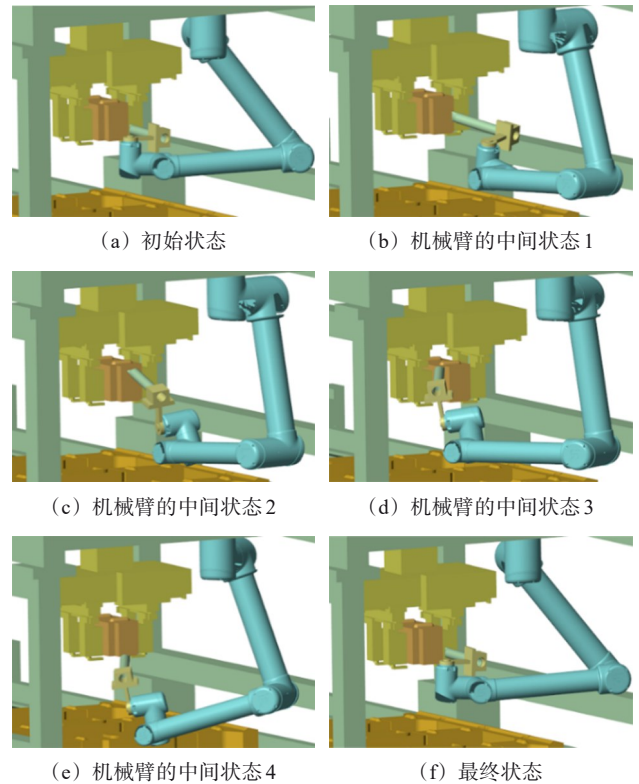


图 14 涂抹机械臂仿真过程

Fig. 14 Simulation process of the plastering robotic arm

图 15 所示为实际环境中涂抹机械臂的无碰撞涂抹过程。首先, 采集耐火砖侧面的三维数据, 计算涂抹点的世界坐标; 其次, 利用机械臂的逆运动学定义手臂的初始位置和目标位置; 最后, 在涂抹机械臂可行的情况下, 将耐火砖和障碍物的三维信息输入 Matlab 算法模块进行路径规划。这个过程产生了一条无碰撞的涂抹路径。机械臂和 Matlab 模块之间的通信通过机械臂的套接字接口实现, 该接口将

规划的无碰撞路径传输到机械臂，使其能够沿指定轨迹移动。

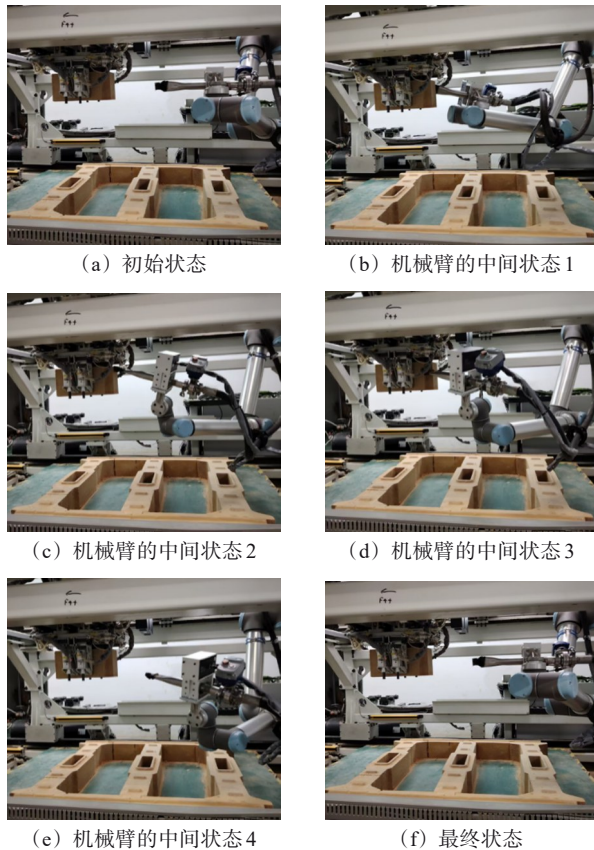


图 15 涂抹机械臂应用过程

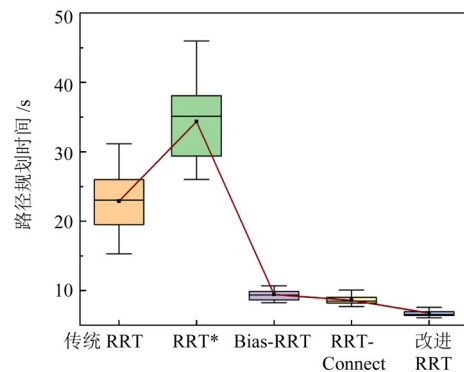
Fig. 15 Application process of the plastering robotic arm

通过 20 次涂抹机械臂路径规划试验验证了，涂抹机械臂在实际环境中能够有效地避开障碍物并进行涂抹动作，顺利到达预定的目标点，证明了本文所提改进 RRT 算法的实用价值。在试验期间，对所规划的路径各性能参数进行记录，表 4 所示为实际环境中各算法的路径搜索数据。在实际耐火砖砌筑环境中，改进 RRT 算法在路径规划时间方面相对于传统 RRT、RRT*、Bias-RRT 和 RRT-Connect 这 4 种算法分别缩短了 70.80%、80.54%、29.12% 和 22.24%；在路径长度方面相对于传统 RRT、RRT*、Bias-RRT 和 RRT-Connect 这 4 种算法分别缩短了 31.26%、3.52%、22.62% 和 30.10%；在路径节点数方面相对于传统 RRT、RRT*、Bias-RRT 和 RRT-Connect 这 4 种算法分别减少了 73.27%、30.74%、54.65% 和 60.88%；在迭代次数方面相对于传统 RRT、RRT*、Bias-RRT 和 RRT-Connect 这 4 种算法分别减少了 85.53%、80.80%、24.54% 和 77.99%。图 16 所示为实际耐火砖砌筑环境中各算法参数对比。通过各算法性能参数的平均数所连成的酒红色折线可以明显看出，改进 RRT 算法的各参数均表现出优越性。

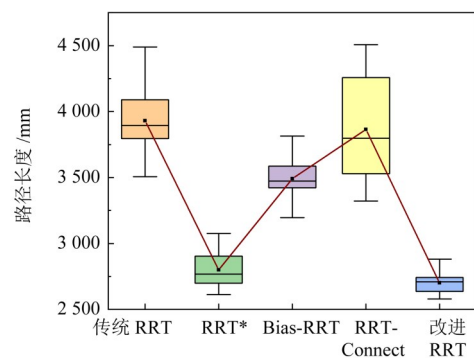
表 4 实际环境中各算法的路径搜索数据
Tab. 4 Path search data of each algorithm in the real environment

算法	平均路径长度/mm	平均规划时间/s	平均节点数	平均迭代次数
传统 RRT	3 929.707	22.885	75.00	3 316.85
RRT*	2 799.846	34.339	28.95	2 500.45
RRT-Connect	3 864.610	8.594	51.25	2 181.05
Bias-RRT	3 491.204	9.429	44.15	636.20
改进 RRT	2 701.336	6.683	20.05	480.05

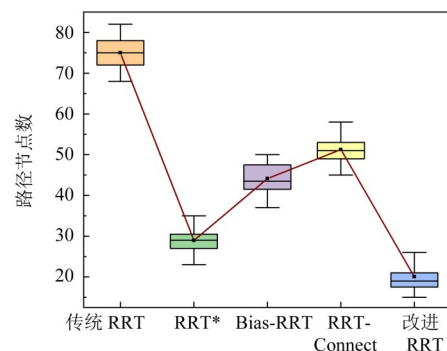
图 17 所示为涂抹机械臂通过改进 RRT 算法得到的各关节的角位移、角速度和角加速度变化情况。由图 17 可知，规划终点时，各关节角速度与角加速度均为 0，符合实际运行特性；同时，关节运动曲线整体连续平滑，无明显突变；经过平滑处理，轨迹有效减小了运行中的抖动与冲击，保证了机械臂在执行规划路径时的稳定性和效率。



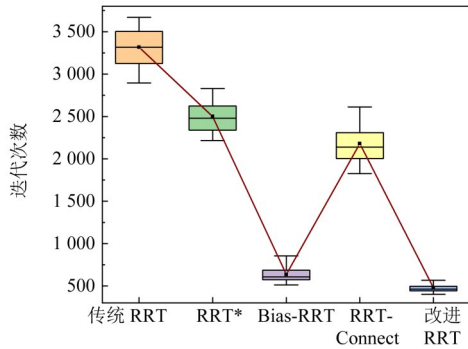
(a) 路径规划时间



(b) 路径长度



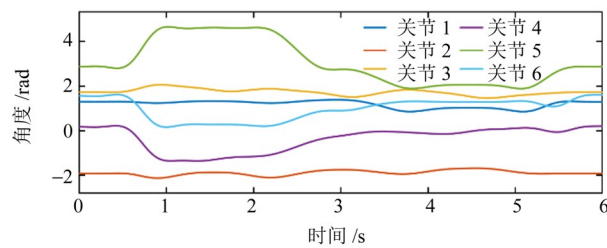
(c) 路径节点数



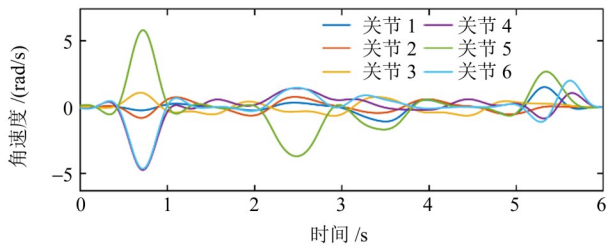
(d) 路径迭代次数

图 16 实际耐火砖砌筑环境中各算法参数对比

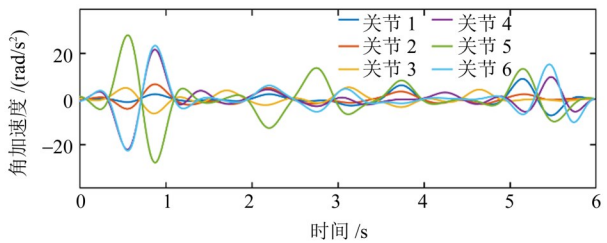
Fig. 16 Comparison of algorithm parameters in the real refractory brick masonry environment



(a) 关节角位移曲线



(b) 关节角速度曲线



(c) 关节角加速度曲线

图 17 各关节拟合后角度、角速度及角加速度曲线

Fig. 17 Fitted joint angle, angular velocity, and angular acceleration curves

4 结论

针对涂抹机械臂在复杂砌筑环境中的避障路径规划问题, 提出一种改进 RRT 算法, 并通过仿真和真实环境下试验验证了其有效性和实用性。得出以下主要结论:

1) 为解决由砌筑环境引起的搜索效率低的问题, 提出分区高斯采样策略。基于分区结果, 可引

导扩展树向安全、可行的缝隙生长, 减少无效探索。

2) 引入引力动态调节步长策略。根据环境特征自适应调整步长, 在开阔区域增大步长加速探索, 在狭窄区域减小步长提升精度, 可平衡全局与局部搜索效率。

3) 采用三角不等式剪枝策略, 剔除冗余节点以优化路径, 并结合 B 样条曲线进行平滑处理, 可确保机械臂运动的连续性和平滑性。

在仿真环境中, 将所提改进 RRT 算法与传统 RRT、RRT*、RRT-Connect 及 Bias-RRT 等算法进行对比。结果表明, 改进 RRT 算法在路径长度、搜索时间与路径节点数等方面均具有显著优势。进一步的, 在实际砌筑场景中开展机械臂涂抹试验。结果表明, 该算法能够有效引导机械臂实现平稳避障与高效涂抹作业, 充分验证了其在砌筑环境中的可行性与工程实用性。

参 考 文 献

- [1] MCFARLAND T C, RYU J, HAAS C, et al. Crafting safe and efficient masonry practices: quantitative assessment of postural characteristics in movement strategies[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2024, 150(2): 04023159.
- [2] 郝冠华. 人工智能在建筑施工中的实践与展望[J/OL]. *城市建设理论研究(电子版)*, 2024(33): 29-31.
HAO Guanhua. Practice and prospect of artificial intelligence in building construction [J/OL]. *Theoretical Research in Urban Construction*, 2024(33): 29-31.
- [3] 王宇斌, 沈振军, 王显宸, 等. 基于 A* 算法的四面体机器人路径规划研究[J]. *机械传动*, 2024, 48(2): 42-47.
WANG Yubin, SHEN Zhenjun, WANG Yuchen, et al. Research on path planning for tetrahedral robots based on A* algorithm [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48(2): 42-47.
- [4] WU L, HUANG X D, CUI J G, et al. Modified adaptive ant colony optimization algorithm and its application for solving path planning of mobile robot[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 215: 119410.
- [5] 马豪男, 张志安, 黎晴亮. 改进人工势场法的双机械臂路径规划算法[J]. *机械传动*, 2021, 45(6): 77-84.
MA Haonan, ZHANG Zhian, LI Qingliang. Improved artificial potential field method for dual-manipulator path planning algorithm [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(6): 77-84.
- [6] 姚博亮, 刘放, 孙腾, 等. 基于无碰撞通道的启发式 RRT 机械臂路径规划算法[J]. *机械传动*, 2025, 49(11): 57-62.
YAO Boliang, LIU Fang, SUN Teng, et al. Heuristic RRT algorithm based on collision-free channels for manipulator path

- planning[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(11): 57-62.
- [7] WANG Y, JIANG W S, LUO Z, et al. Path planning of a 6-DOF measuring robot with a direction guidance RRT method[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122057.
- [8] YE L, WU F Y, ZOU X J, et al. Path planning for mobile robots in unstructured orchard environments: an improved kinematically constrained bi-directional RRT approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108453.
- [9] FAN J M, CHEN X, LIANG X. UAV trajectory planning based on bi-directional APF-RRT* algorithm with goal-biased [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 119137.
- [10] 赵广元, 韩雪松, 黄楠. 基于RRT的机械臂路径规划改进算法[J]. 西安邮电大学学报, 2024, 29(3): 65-74.
ZHAO Guangyuan, HAN Xuesong, HUANG Nan. Improved algorithm for robotic arm path planning based on RRT[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2024, 29(3): 65-74.
- [11] 刘亚飞, 刘放, 董蓉, 等. 基于范数自适应步长RRT算法的机械臂路径规划[J]. 机械传动, 2024, 48(12): 82-86.
- LIU Yafei, LIU Fang, DONG Rong, et al. Path planning of manipulators based on the norm adaptive step-size RRT algorithm [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(12): 82-86.
- [12] 郭北涛, 任天浩. 基于改进RRT算法的机械臂避障路径规划研究[J]. 机械工程师, 2025(3): 19-22.
GUO Beitao, REN Tianhao. Research on obstacle avoidance path planning for robotic arms based on improved RRT algorithm [J]. Mechanical Engineer, 2025(3): 19-22.
- [13] SHI Q Y, WANG Z H, KE X L, et al. Trajectory optimization of wall-building robots using response surface and non-dominated sorting genetic algorithm III [J]. Automation in Construction, 2023, 155: 105035.
- [14] ZHANG B, YIN C H, FU Y X, et al. Harvest motion planning for mango picking robot based on improved RRT-Connect[J]. Biosystems Engineering, 2024, 248: 177-189.
- [15] 杨彦新, 姜香菊. 优化改进RRT*和APF的无人机航迹规划算法[J]. 电光与控制, 2025, 32(10): 34-40.
YANG Yanxin, JIANG Xiangju. Optimization of UAV trajectory planning algorithm with improved RRT* and APF [J]. Electronics Optics & Control, 2025, 32(10): 34-40.

An improved RRT path planning method for plastering robotic arm manipulation in refractory bricklaying

DUAN Mengcheng^{1,2} ZHENG Zhengding^{1,2} GAO Quanjie^{1,2} WANG Hongxia³

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

(2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

(3. School of Automotive Intelligent Manufacturing, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: [Objective] In response to special working conditions such as complex shapes of specific bricks and limited operating space in refractory bricklaying, traditional methods exhibit shortcomings in plastering irregularly shaped brick surfaces, including low planning efficiency, poor trajectory smoothness, and high path cost. To address these issues, an improved rapidly-exploring random tree (RRT) algorithm was proposed to study the path planning problem for plastering robotic arms. [Methods] Partitioned Gaussian sampling was employed to enhance search focus on critical areas. Gravity-based dynamic step size adjustment was adopted to enable adaptive exploration in confined spaces. Triangular inequality pruning and cubic B-spline optimization were introduced to eliminate redundant nodes and improve trajectory smoothness. [Results] Simulation results demonstrate that the improved RRT algorithm outperforms comparison algorithms in planning time, path length, path node count, and iteration count. Physical tests validate the improved RRT algorithm's capability for stable obstacle avoidance and plastering operations in masonry environments. Compared to traditional RRT, RRT*, Bias-RRT, and RRT-Connect, its planning time decreases by 70.80%, 80.54%, 29.12%, and 22.24%, respectively, while reducing path length by 31.26%, 3.52%, 22.62%, and 30.10%, respectively, demonstrating excellent engineering applicability.

Key words: Plastering robotic arm; Path planning; Improved RRT algorithm; Partitioned Gaussian sampling; Gravity-based dynamic step size adjustment

(编辑: 贾文倩)