doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.072

基于改进 RRT 算法的多关节机械臂路径规划方法研究

梁喜凤　陈　坤　姚宝国
（中国计量大学机电工程学院，杭州 310018）

摘要：为了解决 RRT(Rapidly-exploring random tree)算法在机械臂三维路径规划中采样随机性强、搜索范围大、效率低和路径不平滑的问题，提出了一种基于空间引导点并结合目标偏置采样策略的改进 RRT 算法。通过在 RRT 树生成前产生空间引导点，并在采样点选取时，采用目标偏置策略，降低算法搜索的随机性；在生成新节点时，采用自适应调节步长，加快算法在空旷区域搜索的效率，并降低错过障碍物附近更优点的选择；初次生成路径后，通过贪心策略去除路径中多余节点；最后利用 Hermite 插值对路径进行平滑处理，提升路径质量，并进行了仿真与现场试验。仿真试验结果表明，相比 RRT 算法，改进后的算法平均搜索时间减少 70.83%，平均路径长度减少 22.71%。利用 6-DOF 机械臂进行避障试验，结果表明，改进后的 RRT 算法相较于 RRT 算法，平均搜索时间减少 79.95%，平均路径长度减少 30.93%，路径规划成功率为 96.77%。改进后的算法在三维空间中可以快速规划出无碰撞路径，该研究为多关节机械臂运动控制奠定了理论基础。

关键词：机械臂；路径规划；RRT 算法；空间引导点；偏置采样；自适应步长
中图分类号：TP241　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)10-0792-10　　**OSID**：

Path Planning Method of Multi-joint Manipulator Based on Improved RRT Algorithm

LIANG Xifeng　CHEN Kun　YAO Baoguo
(*School of Mechanical and Electrical Engineering*, *China Jiliang University*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of high randomness in sampling, large search space, low efficiency, and non-smooth paths in the rapidly-exploring random tree (RRT) algorithm for 3D path planning of robotic arms, an improved RRT algorithm based on spatial guidance points combined with a goal-biased sampling strategy was proposed. Before generating the RRT tree, spatial guidance points were introduced, and a goal-biased strategy was employed during sampling to reduce the randomness of the algorithm's search. When generating new nodes, adaptive step-size adjustment was used to accelerate the search in open areas and reduce the likelihood of missing better points near obstacles. After the initial path was generated, a greedy strategy was applied to remove redundant nodes from the path. Finally, Hermite interpolation was used to smooth the path, improving path quality. Simulation and experimental results demonstrated that the improved algorithm reduced the average search time by 70.83% and the average path length by 22.71% compared with the RRT algorithm. Using a 6-DOF manipulator for obstacle avoidance experiments showed that the improved RRT algorithm reduced the average search time by 79.95% and the average path length by 30.93%, with a path planning success rate of 96.77%. The improved algorithm can quickly plan collision-free paths in 3D space, laying a theoretical foundation for the motion control of multi-joint robotic arms.

Key words: manipulator; path planning; RRT algorithm; spatial guide points; bias sampling; adaptive step size

0　引言

目前，机器人技术广泛应用工业制造、农业生产等各个领域，它代替人类完成一些重复性强、危险系数高的工作，很大程度上提升了工作效率，降低了工作中的风险。随着生产要求的不断提高，机器人所

收稿日期：2024-10-20　修回日期：2025-01-10
基金项目：国家自然科学基金项目(32372007)
作者简介：梁喜凤(1976—)，女，教授，博士，主要从事农业机器人研究，E-mail：lxfcjlu@163.com

面临的工作环境和场景也更加复杂[1-4]，因此，机器人运动路径规划成为目前研究的一项重要课题。

常见的路径规划算法[5-7]可分为 3 类：基于图搜索的规划方法，如 Dijkstra 算法[8-9]、A* 算法[10-11]；基于智能仿生学路径规划方法，如蚁群算法[12-14]、神经网络算法[15-19]；基于采样的路径规划方法，如快速扩展随机树（Rapidly-exploring random tree，RRT）算法[20-21]、概率路线图（Probabilistic road map，PRM）算法[22-23]。

RRT 算法适用于高维空间中的路径规划，但该算法采样具有随机性，从而导致生成的路径曲折、运算时间长，并且生成大量多余节点。国内外研究人员对 RRT 算法进行了一系列改进，田金文等[24]将 RRT 与人工势场法结合，通过障碍物和目标点产生的力引导 RRT 随机采样点的生成方向；刘紫燕等[25]在 RRT 算法原有的基础上引入目标偏置概念，提高搜索速度和算法的性能；刘天湖等[26]提出的改进 RRT* 算法，在 RRT 生成路径之后重新选择父节点，在新节点附近定义半径范围搜索“近邻”作为备选节点，依次计算这些点到起点的代价进行优化和剪枝；郭自良等[27]提出的 Informed－RRT* 算法，则在 RRT* 算法的基础上，将起始点和目标点作为椭圆焦点，在椭圆空间内进行路径探索；符强等[28]提出的双向 RRT 算法，从起点和目标点进行双向扩展搜索，提升了路径搜索的效率。以上算法可以引导 RRT 算法的采样方向，限制算法生成空间，优化初次生成后的路径。但采样点仍具有较大随机性，步长扩展节点也存在缺陷，使得路径生成效率仍然较慢。

针对上述问题，本文提出一种改进的 RRT 路径规划算法。改进 RRT 算法在随机树生成前，预先生成空间引导点；在扩展新节点方面，采用目标偏置采样策略，并自适应步长；生成初始路径后，使用贪心策略删除路径上冗余节点；最后对路径进行插值。将 RRT 算法、Informed－RRT* 算法、RRT* 算法和改进后的 RRT 算法在相同环境条件下进行对比，以期为多关节机械臂避障运动控制提供可行的目标路径。

1　机器人运动学参数及碰撞模型

1.1　机器人 DH 参数

本文以 ABB 公司的 IRB6700 型机器臂为研究对象建立运动学模型，机器人机构简图如图 1 所示，该机器人由 6 个旋转关节构成，采用改进 D－H 参数法对其进行建模，如图 2 所示，机械臂 D－H 参数如表 1 所示，表中：α_{i-1}（$i=1,2,\cdots,6$）表示相邻两关节轴线的偏移角度，a_{i-1} 表示相邻两个关节轴间的公共法线长度，d_i 表示相邻两个连杆之间沿公共关节轴方向的一个偏移距离，即沿 z 轴的偏移距离，θ_i 表示两相邻连杆绕公共轴线旋转的夹角。

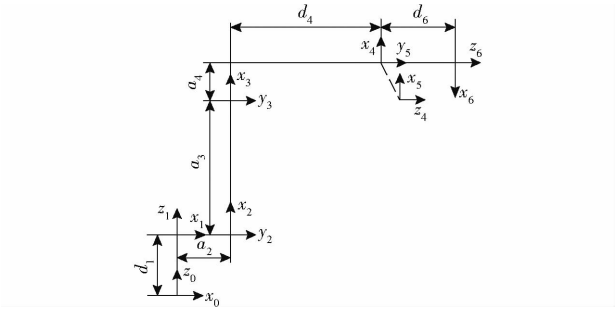


图 1　机械臂机构简图

Fig. 1　Mechanism schematic of the manipulator

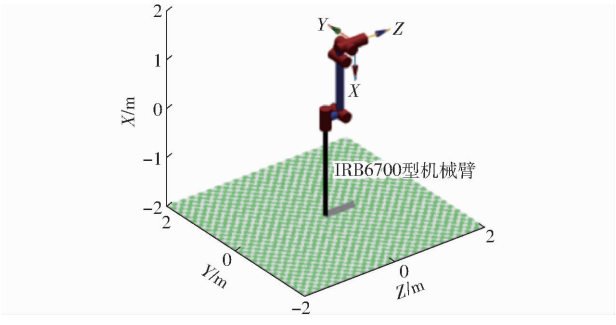


图 2　机械臂仿真模型

Fig. 2　Simulation model of the manipulator

表 1　机器人 D－H 参数

Tab. 1　D－H parameters of the manipulator

连杆	α_{i-1}/rad	a_{i-1}/mm	d_i/mm	θ_i/rad
1	0	0	780	0
2	$-\pi/2$	320	0	0
3	0	1 125	0	0
4	$-\pi/2$	200	1 142.5	0
5	0	0	0	0
6	$-\pi$	0	200	0

1.2　机械臂碰撞检测原理

为避免机械臂与环境中其他障碍物发生碰撞，对机械臂连杆和障碍物进行包裹，采用圆柱包络体[29]对机械臂连杆进行包裹，类球形的障碍物采用球形包围法包裹，其他类型的障碍物则采用轴对齐包围法进行包裹[30]，球形障碍物碰撞检测原理如图 3 所示。

通过变换矩阵将障碍物的球心位置从世界坐标系转换为各个连杆的关节坐标系中，计算每个连杆的中心线到障碍物球心的距离 d，可将碰撞检测简化为点到线段的最小距离。假设 C 为障碍物中心位置，AB 为连杆中心线，可将碰撞检测转换为计算点到直线的最短距离。

无论 C 处于何处，都有

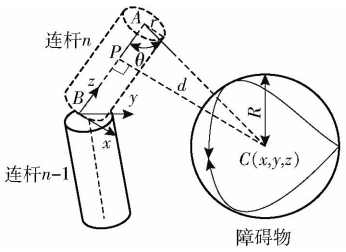


图 3 机械臂球体避障原理图

Fig. 3 Schematic of obstacle avoidance of manipulator

$$\boldsymbol{l}_{AP}=\frac{\boldsymbol{l}_{AC}\cdot\boldsymbol{l}_{AB}}{|\boldsymbol{l}_{AB}|^2}\boldsymbol{l}_{AB} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{l}_{AP}$——A 到 P 的位移向量

$\boldsymbol{l}_{AC}$——A 到 C 的位移向量

$\boldsymbol{l}_{AB}$——A 到 B 的位移向量

令
$$p=\frac{\boldsymbol{l}_{AC}\cdot\boldsymbol{l}_{AB}}{|\boldsymbol{l}_{AB}|^2} \tag{2}$$

由向量的方向性可知,当点 C 投影位于线段 AB 的点 A 外侧时,$p>0$;当点 C 投影位于线段 AB 的点 B 外侧时,$p>1$;当点 C 投影只在线段 AB 内时,$0<p<1$,如图 3 所示。

点到直线的最短距离可分为以下情况

$$l=\begin{cases}|\boldsymbol{l}_{AC}| & (p<0)\\ |\boldsymbol{l}_{PC}| & (0\leqslant p\leqslant 1)\\ |\boldsymbol{l}_{BC}| & (p>1)\end{cases} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{l}_{PC}$——P 到 C 的位移向量

$\boldsymbol{l}_{BC}$——B 到 C 的位移向量

通过比较包络体半径之和与线段 l 的长度,判断是否碰撞。

如图 4 所示,当障碍物为长方体时,采用轴对齐包围法对其包裹,假设障碍物 3 个轴坐标最小值集合为($x_{\min}$,$y_{\min}$,$z_{\min}$),长、宽和高分别为 O_l、O_w 和 O_h,且机械臂连杆的半径为 r,将长方体的长、宽、高分别加上 $2r$。机械臂连杆简化为一条轴线,然后通过检测该轴线是否与放大后的长方体发生接触,从而判断是否发生碰撞。

障碍物放大后的轴坐标最大值为

$$\begin{cases}x_{\max}=x_{\min}+O_l+r\\ y_{\max}=y_{\min}+O_w+r\\ z_{\max}=z_{\min}+O_h+r\end{cases} \tag{4}$$

碰撞检测判断规则为

$$\begin{cases}x_{\min}-r<x<x_{\max}\\ y_{\min}-r<y<y_{\max}\\ z_{\min}-r<z<z_{\max}\end{cases} \tag{5}$$

将机械臂中心线转换为多个点进行碰撞检测,当连杆中心线上的点都不符合式(5)条件时,则机械臂与长方体障碍物没有发生碰撞,否则,机械臂与障碍物发生碰撞。

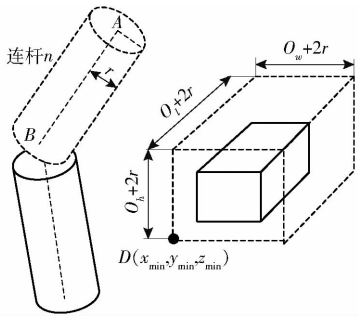


图 4 机械臂长方体避障原理图

Fig. 4 Manipulator rectangular obstacle avoidance principle diagram

2 改进 RRT 路径规划算法

2.1 自适应步长

为解决 RRT 算法移动步长固定的问题,本文根据空间位置自适应调整步长。

如图 5 所示,设置一个步长取值区间范围,在进行随机采样过程中,根据最近点 x_{near}与障碍物中心(o_x, o_y, o_z)和目标点 x_{goal}之间的距离对步长进行调整,步长具体计算过程为:

计算最近点 x_{near}与障碍物中心和目标点之间的距离

$$D_O=\sqrt{(o_x-b_x)^2+(o_y-b_y)^2+(o_z-b_z)^2} \tag{6}$$

$$D_G=\sqrt{(g_x-b_x)^2+(g_y-b_y)^2+(g_z-b_z)^2} \tag{7}$$

$$K=\frac{D_G}{\max(D_G,n)}\,\frac{D_O}{\max(D_O,m)} \tag{8}$$

式中 D_O——障碍物中心到最近点 x_{near}的距离

D_G——x_{goal}到最近点 x_{near}的距离

(o_x,o_y,o_z)——障碍物中心坐标

(b_x,b_y,b_z)——随机点坐标

(g_x,g_y,g_z)——目标点坐标

n、m——距离调节系数

K——步长调节系数

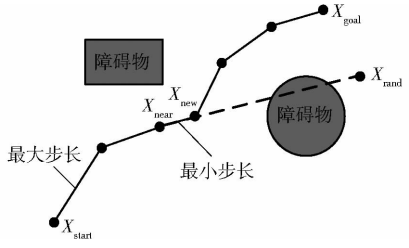


图 5 自适应步长原理图

Fig. 5 Schematic of adaptive step size

设计自适应步长调整公式为

$$S=\max(S_{\min},\min(S_{\max},KS_{\max})) \tag{9}$$

式中 S——步长

2.2　添加空间引导点

为解决 RRT 算法的导向性差、收敛速度慢的问题，如图 6 所示，本文在 RRT 算法中添加空间引导点，将生成的引导点作为临时目标点，缩小空间搜索区域，并根据不同环境条件设置不同数量的引导点，引导点具体生成步骤如下：

按照规则在空间内生成多个随机点，将起始点和目标点之间的 x 轴和 z 轴方向均分为若干段，y 坐标在起点与目标点的 y 值范围内随机生成，即

$$x = x_{\text{start}} + \frac{i'(g_x - x_{\text{start}})}{q} \tag{10}$$

$$z = z_{\text{start}} + \frac{i'(g_z - z_{\text{start}})}{q} \tag{11}$$

$$y = y_{\text{start}} + \frac{i'(g_y - y_{\text{start}})}{q} x_{\text{rand}} \tag{12}$$

式中　x_{start}——起始点 x 轴坐标

z_{start}——起始点 z 轴坐标

y_{start}——起始点 y 轴坐标

q——引导点数量

x_{rand}——[0,1]内的随机数

i'——引导点编号，在[0,q]内

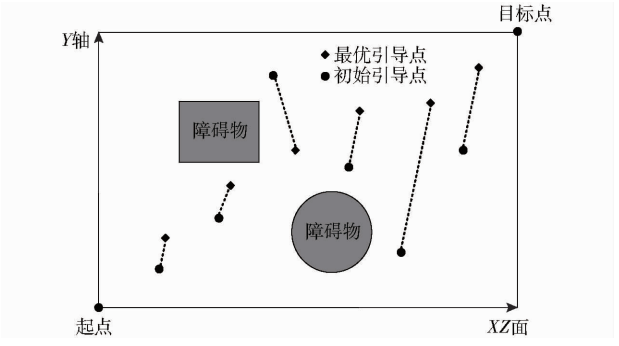


图 6　空间引导点原理图

Fig. 6　Schematic of spatial guide point

设计评估函数对生成的多个初始引导点进行适应度评估，根据相邻引导点之间的距离总和设计距离代价为

$$D = \sum_{i=1}^{q-1} \sqrt{X_i^2 - X_{i+1}^2} \tag{13}$$

根据路径段与障碍物区域交集设计与障碍物相交代价为

$$S_k = \sum_j \frac{r_j}{w}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \cdots + \frac{1}{d_{e-1}} + \frac{1}{d_e}\right) \tag{14}$$

总相交代价为

$$G = \sum_{i=1}^{q-1} S_k \frac{L_k}{e} \tag{15}$$

总体评估函数为

$$M = kD + (1-k)G \tag{16}$$

式中　X——引导点坐标

j——相交障碍物信息

r_j——相交障碍物半径

w——相交代价调节系数

e——总代价调节系数

L_k——相交线段长度

k——距离与相交代价调节系数

更新点的位置，引入随机参数 A_{rand} 和 C_{rand} 调节引导点的位置，并将这些点的适应度与之前的点进行适应度比较，计算式为

$$v = f\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) \tag{17}$$

$$C_{\text{rand}} = 2x_{\text{rand}} \tag{18}$$

$$A_{\text{rand}} = (2x_{\text{rand}} - 1)v \tag{19}$$

$$Z_{\text{rand}} = |C_{\text{rand}} X_{\text{best}}| - X_{\text{now}} \tag{20}$$

$$X_{\text{next}} = X_{\text{best}} - A_{\text{rand}} Z_{\text{rand}} \tag{21}$$

式中　v f——范围调节系数

t——迭代次数

$t_{\max}$——最大迭代次数

X_{best}——最优点

X_{now}——当前点

X_{next}——新节点

重复以上过程直至迭代完成，选出最优引导点。

2.3　偏置采样策略

为解决 RRT 算法采样点生成方向随机性强的问题，本文对随机采样点的方向选取进行调整，在 RRT 算法的基本框架下添加目标偏置采样，引导随机树向空间引导点方向生成。

设置一个目标采样概率 $c(0 < c < 1)$，再生成一个随机数 $p_i(0 < p_i < 1)$，根据 p_i 生成的范围确定采样点生成的方向，即

$$x_{\text{rands}} = \begin{cases} P_{\text{goal}} & (p_i < c) \\ P_{\text{rand}} & (p_i \geqslant c) \end{cases} \tag{22}$$

式中　x_{rands}——采样点

P_{goal}——引导点

P_{rand}——随机采样点

当 $p_i < c$ 时，以目标点作为采样点生成方向，$p_i \geqslant c$ 则进行随机采样。偏置采样策略可以平衡对目标点附近区域的探索和对全局区域的探索。

2.4　去除冗余节点

为解决 RRT 算法生成路径后具有很多的冗余节点，采用贪心策略对生成后的路径进行剪枝处理，以此去除多余的路径点，具体方法如图 7 所示。

图 7 中存在多个冗余点，通过对节点进行剪枝处理可将冗余点从 RRT 路径中去除，以此缩短路径的长度，提升路径的质量，图中实线代表优化后的路

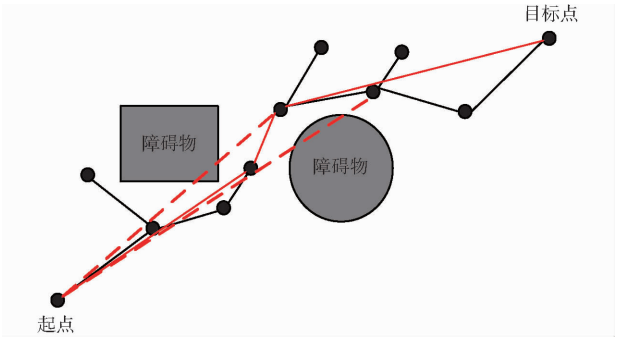


图 7 冗余节点去除方法

Fig. 7 Redundant node removal method

径,虚线代表与障碍物发生碰撞的路径,去除冗余节点的具体实现步骤为:

(1)从起始点开始向路径中的后一个节点进行连接。

(2)判断两节点之间是否与障碍物发生碰撞,若无碰撞,则继续向后一点连接检测,若碰撞,则退回上一个节点,并保存信息。

(3)以碰撞前一点为初始点继续向后连接检测,重复步骤(2),直至到达目标点(终点)。

(4)将所有保存的点连接,形成优化后的路径。

2.5 路径插值

为解决 RRT 算法生成的路径不平滑,本文采用 Hermite 插值法对路径点进行插值,提高路径的光滑度,降低速度发生剧变的可能性。

假设函数 $f(x)$ 在区间 $[a,b]$ 上有 $n+1$ 个互异节点,$a=x_0<x_1<\cdots<x_{n-1}<x_n=b$,定义在 $[a,b]$ 上函数满足 $f(x_i)=y_i, f'(x_j)=y_i'(i=0,1,\cdots,n)$。

其余项为

$$R(x)=f(x)-H(x)=\frac{f^{2n+2}(\xi)}{(2n+2)!}\omega_{2n+2}(x) \quad (23)$$

路径利用 Hermite 插值平滑后的曲线如图 8 所示。相较于原始线段更加平滑,能较好地保证机械臂在移动过程中的平滑性。

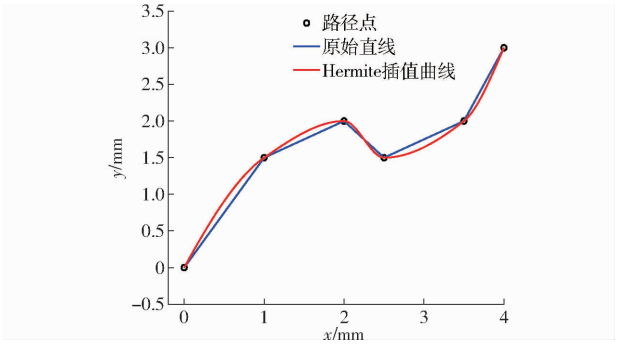


图 8 Hermite 插值原理图

Fig. 8 Hermite interpolation schematic

改进后的 RRT 算法流程图如图 9 所示。

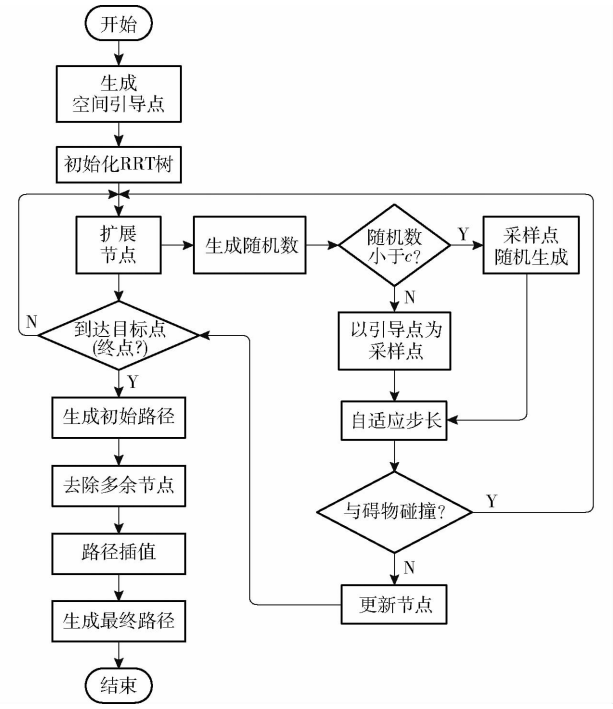


图 9 改进 RRT 算法流程图

Fig. 9 Flowchart of improving RRT algorithm

3 仿真试验

为了验证改进后的 RRT 算法在三维空间内的性能,创建三维空间环境进行机械臂仿真试验,并与 RRT、Informed - RRT*(IRRT*)、RRT* 和改进 RRT 算法在相同空间环境中进行对比。

3.1 三维环境试验

三维试验场景设置在 1 000 mm × 1 000 mm × 1 000 mm 的仿真空间,起始点位置为(0,0,0),目标点位置为(1 000 mm,1 000 mm,1 000 mm),设置多个球形障碍物,球心位置分别为(200 mm,200 mm,650 mm)、(250 mm,750 mm,700 mm)、(380 mm,500 mm,350 mm)、(500 mm,700 mm,600 mm)、(550 mm,150 mm,400 mm)、(750 mm,450 mm,500 mm)、(800 mm,250 mm,400 mm)、(800 mm,800 mm,800 mm),球形半径长度分别为 100、100、80、80、120、110、100、80 mm,长方体障碍物轴坐标最小值分别为(300 mm,200 mm,300 mm)、(700 mm,600 mm,400 mm)、(600 mm,800 mm,500 mm)和(500 mm,450 mm,500 mm),各个障碍物的长宽高为(100 mm,100 mm,100 mm)、(150 mm,50 mm,200 mm)、(100 mm,100 mm,200 mm)和(100 mm,100 mm,100 mm)。RRT 算法固定步长设置为 30 mm,改进 RRT 算法自适应步长区间设置为 20 ~ 40 mm,终止阈值为 20 mm,最大迭代次数为 4 000 次,为了保证试验结果的有效性,4 种算法均在以上三维环境内中运行 50 次,试验结果如图 10

所示，试验数据如表 2 所示。

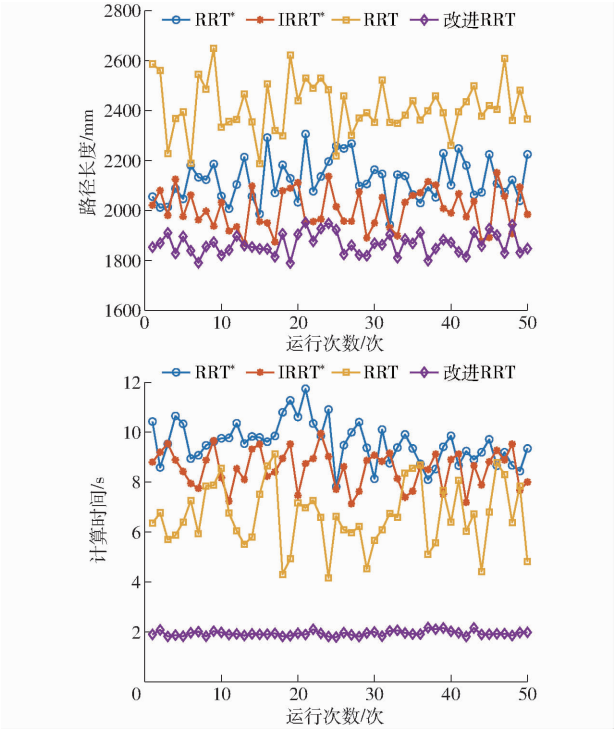


图 10　算法计算时间和路径长度折线图

Fig. 10　Algorithm calculated time and path length line chart

表 2　试验平均数据

Tab. 2　Experimental average data

指标	算法	平均值	最小值	最大值	标准偏差
时间/s	RRT	6.65	4.16	9.13	1.26
	Informed－RRT*	8.54	7.13	9.95	0.72
	RRT*	9.56	7.81	11.74	0.82
	改进 RRT	1.94	1.79	2.17	0.09
路径长度/mm	RRT	2 413.73	2 187.25	2 649.79	106.27
	Informed－RRT*	2 004.60	1 868.82	2 152.26	76.90
	RRT*	2 122.91	1 942.82	2 306.67	84.08
	改进 RRT	1 865.56	1 789.82	1 952.60	41.70
节点数量/个	RRT	2 121.08	894	3 448	555.98
	Informed－RRT*	4 000	4 000	4 000	
	RRT*	4 000	4 000	4 000	
	改进 RRT	151.92	98	387	45.66

从图 10 和表 2 可以看出，改进后的 RRT 算法在计算时间、路径长度和节点生成数量方面均有显著优化。具体来说，改进后的算法平均计算时间为 1.94 s，平均路径长度为 1 865.56 mm，平均生成节点数为 151.92 个。与 RRT、Informed－RRT* 和 RRT* 算法相比，改进后的算法计算时间分别减少 70.83%、77.28% 和 79.71%；路径长度分别减少 22.71%、6.94% 和 12.12%。改进后的 RRT 算法相比 RRT 算法节点数量减少 92.84%。需要注意的是，RRT* 算法和 Informed－RRT* 算法都是在生成初始路径后进行迭代更新，因此这两种算法的采样次数为 4 000 次。

此外，改进后的 RRT 算法在计算时间、路径长度和节点数量上的标准偏差均低于其他 3 种算法，表明其不仅计算速度更快、路径更短，而且在稳定性上优于其他算法。

4 种路径规划算法的三维环境仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知，改进后的 RRT 算法相比于其他 3 种算法路径光滑，并且不存在大量多余的节点。

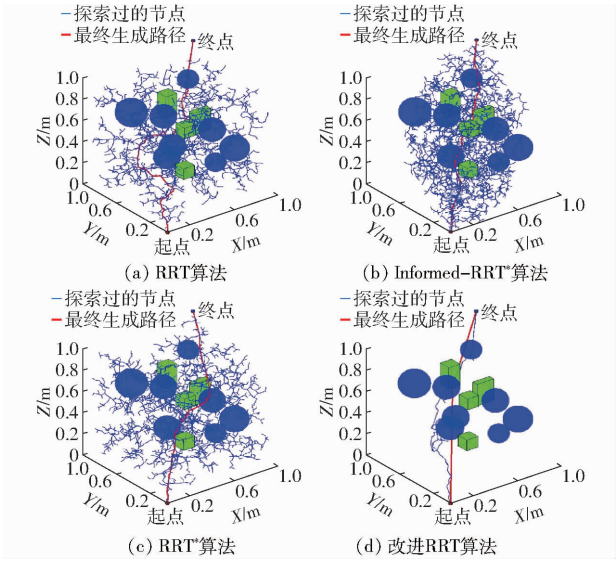


图 11　三维环境中 4 类算法避障仿真结果

Fig. 11　Simulation results of four types of algorithms in 3D environment

3.2　机械臂仿真试验

为了进一步验证本文提出的改进 RRT 算法的有效性，使用 Matlab 中的机器人工具箱建立了一个 6 自由度机械臂的仿真模型。在相同的环境下，分别对 RRT 算法、Informed－RRT* 算法、RRT* 算法和改进 RRT 算法进行了仿真试验。机械臂的末端起始位置为(1 200 mm，－1 000 mm，1 600 mm)，目标位置为(1 400 mm，1 100 mm，1 400 mm)。球形障碍物的球心位置为(1 500 mm，300 mm，1 500 mm)，半径为 150 mm；长方体障碍物轴最小值坐标为(1 100 mm，－500 mm，1 500 mm)和(1 200 mm，400 mm，1 300 mm)，长宽高分别为(200 mm，240 mm，180 mm)和(300 mm，240 mm，300 mm)。在仿真中，RRT 算法的固定步长设置为 30 mm，自适应步长的区间范围为 20～40 mm，最大迭代次数设为 4 000 次。每种算法分别进行了 50 组仿真试验，试验结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出，改进后的 RRT 算法在机械臂路径仿真中表现出显著优势。具体来说，改进后的算法平均计算时间为 0.91 s，平均路径长度为

表 3 机械臂三维路径仿真结果

Tab. 3 3D path simulation data of manipulator

指标	算法	平均值	最小值	最大值	标准偏差
时间/s	RRT	4.65	2.81	6.93	1.06
	Informed－RRT*	5.93	5.60	8.56	0.51
	RRT*	6.85	4.13	8.30	0.84
	改进 RRT	0.91	0.71	1.16	0.11
路径长度/mm	RRT	2 902.91	2 678.48	3 303.55	117.66
	Informed－RRT*	2 554.03	2 409.34	2 738.09	74.12
	RRT*	2 619.71	2 454.41	2 788.88	76.16
	改进 RRT	2 348.86	2 288.34	2 467.45	41.34
节点数量	RRT	2 000.10	387	3 762	879.08
	Informed－RRT*	4 000	4 000	4 000	
	RRT*	4 000	4 000	4 000	
	改进 RRT	168.06	116	238	27.83

2 348.86 mm，平均生成节点数为 168.06 个。与 RRT 算法、Informed－RRT* 算法和 RRT* 算法相比，改进后的算法计算时间分别减少 80.43%、84.65% 和 86.72%；路径长度分别节省 19.09%、8.03% 和 10.34%；改进后的算法相较于 RRT 算法节点数量减少 91.60%。

此外，改进后的 RRT 算法计算时间、路径长度和节点数量标准偏差均低于其他 3 种算法，表明其不仅计算速度更快、路径更短，而且相较于其他算法更加稳定。

将 4 种算法在相同空间环境下规划的路径导入 6 自由度机械臂进行仿真，结果如图 12 所示。由图 12 可知，改进后的 RRT 算法在路径生成过程中产生的节点数量明显少于其他 3 种算法，且生成的路径长度也更短。4 种算法计算出的路径对应的 6 自由度机械臂关节变化曲线如图 13 所示。

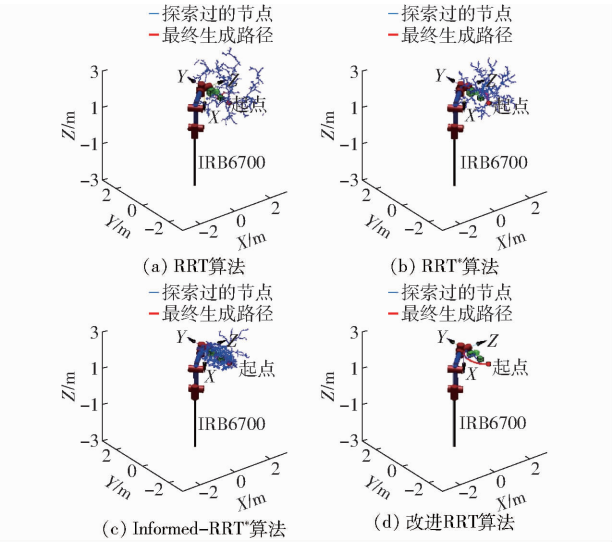


图 12 机械臂三维路径轨迹

Fig. 12 Three-dimensional path trajectory of manipulator

由图 13 可知，改进后的 RRT 算法关节 3 的角度变化幅度为 0.52 rad，而 Informed－RRT* 算法和 RRT* 算法的关节 3 角度变化分别为 0.86 rad 和 0.92 rad，说明改进后的 RRT 算法规划的路径更加合理，从图 13 中也可以看出，改进后的 RRT 算法各个关节角度的变化曲线相比其他 3 种算法更光滑。

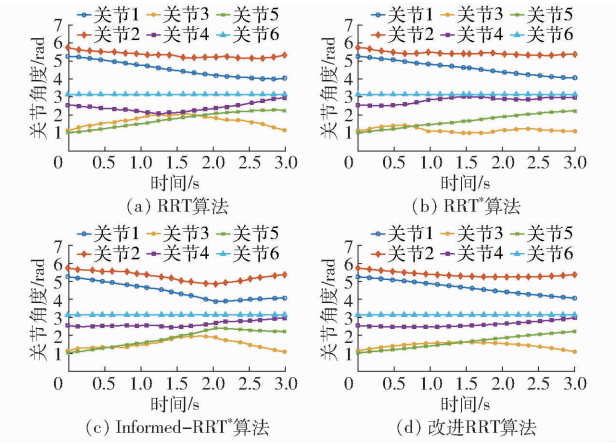


图 13 机械臂三维路径关节角度变化曲线

Fig. 13 Changes in angle of joint of three-dimensional path of manipulator

4 现场试验

以 IRB6700 型工业机械臂为试验平台，验证改进后的路径规划算法的实际效果。使用篮球和纸盒模拟环境中的障碍物，并搭建相应的试验场景。通过 Matlab 建立仿真环境，设置起始点为（1 100 mm，－200 mm，1 300 mm），目标点为（1 200 mm，1 300 mm，1 300 mm），并添加球形障碍物和长方体障碍物，球形中心坐标（1 100 mm，100 mm，1 100 mm），半径为 150 mm，长方体障碍物轴坐标最小值为（800 mm，400 mm，950 mm）、（1 050 mm，800 mm，1 100 mm），长宽高分别为（300 mm，350 mm，400 mm）和（200 mm，200 mm，250 mm），图 14 中线段框架表示轴对齐包围法包围后的障碍物模型。之后，利用网线将计算机与 ABB 机器人控制柜连接，将 Matlab 中计算出的路径位置信息发送到 Robot Studio，利用 Robot Studio 实现对实际机械臂的避障运动控制。相关试验设置及过程如图 14 所示。

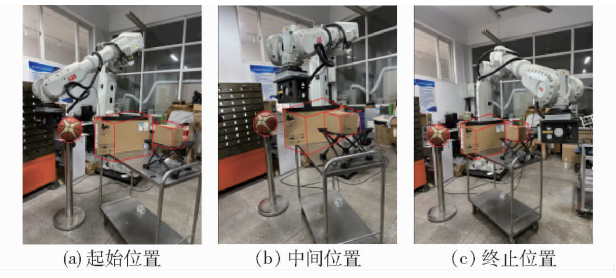


图 14 IRB6700 型机械臂避障试验平台

Fig. 14 Experimental platform for obstacle avoidance of IRB6700 manipulator

通过机械臂现场试验证明机械臂在存在多个障碍物的环境中可以规划出无碰撞的空间路径。将改进后的 RRT 算法与其他 3 种算法在相同环境条件下运行 30 次，试验结果如表 4 所示。

表 4　不同算法现场试验结果

Tab. 4　Field experiment data of different algorithms

算法	计算时间/s	路径长度/mm	成功率/%
RRT	3.69	2 584.87	78.94
Informed－RRT*	5.28	1 985.39	85.71
RRT*	6.34	2 016.88	83.33
改进 RRT	0.74	1 785.27	96.77

由表 4 可知，改进后的 RRT 路径规划算法在计算时间、路径长度和成功率均优于其他 3 种算法，改进后的 RRT 算法相较于 RRT 算法、Informed－RRT* 算法和 RRT* 算法，计算时间分别减少 79.95%、85.98% 和 88.33%，路径长度分别减少 30.93%、10.08% 和 11.48%，路径规划成功率分别提高 17.83、11.06、13.44 个百分点，成功率达到 96.77%。

在试验计算过程中，由于 RRT 算法、Informed－RRT* 算法和 RRT* 算法存在采样方向随机，采样次数和步长受限等因素，容易陷入在局部空间重复搜索，最终达到搜索次数上限。而改进后的 RRT 算法具有引导性，不容易陷入局部空间，所以路径生成成功率高于其他 3 种算法。4 种算法生成的路径如图 15 所示。

由图 15 可知，改进后的 RRT 算法相比于 RRT 算法、Informed－RRT* 算法和 RRT* 算法路径更短，并且轨迹也更平滑。

5　结论

（1）针对 RRT 算法在规划路径时，存在采样随机性强、搜索范围大、效率低和路径不平滑等问题，提出了改进 RRT 算法。改进算法通过预先生成多个空间引导点缩小搜索范围；采用自适应步长根据点的位置调节步长长度；并采用偏置采样加快算法收敛速度；此外，在生成初始路径后使用贪心策略去除多余节点；最后，对路径进行 Hermite 插值，提升路径平滑度。

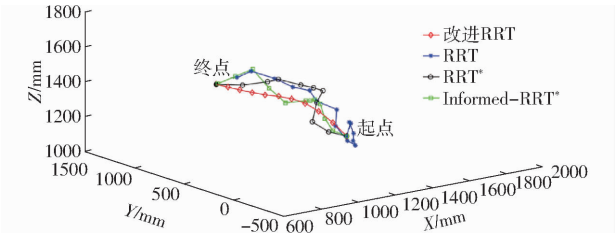


图 15　4 种算法空间轨迹

Fig. 15　Spatial trajectories of four algorithms

（2）在三维环境仿真表明，改进后的 RRT 算法相较于 RRT 算法、Informed－RRT* 和 RRT* 算法在生成路径时具有更强的目标性，不会产生大量多余节点，平均计算时间分别节省 70.83%、77.28% 和 79.71%；平均路径长度分别减少 22.71%、6.94% 和 12.12%。

（3）机械臂仿真试验表明，相较于 RRT 算法、Informed－RRT* 和 RRT* 算法，改进 RRT 算法平均路径长度分别降低 80.43%、84.65% 和 86.72%；算法平均时间分别缩短 19.09%、8.03% 和 10.34%，关节轨迹更平滑，关节变化幅度更小。

（4）通过现场试验的障碍物避障测试，可以看出改进后的 RRT 算法相较于 RRT 算法、Informed－RRT* 和 RRT* 算法，计算时间分别减少 79.95%、85.98% 和 88.33%；路径长度分别减少 30.93%、10.08% 和 11.48%，路径规划成功率分别提高 17.83、11.06、13.44 个百分点。验证了改进后 RRT 算法在实际环境中应用的可行性。

参　考　文　献

[1] 洪道玉，陈巍，陈国军，等. 融合人工势场和 RRT 算法的水下机械臂自适应路径规划[J]. 农业装备与车辆工程，2024，62(8)：1－9.
HONG Daoyu，CHEN Wei，CHEN Guojun，et al. Adaptive path planning of underwater robotic arm based on artificial potential field and RRT algorithm[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering，2024，62(8)：1－9.（in Chinese）

[2] 高明，唐洪，张鹏. 机器人集群路径规划技术研究现状[J]. 国防科技大学学报，2021，43(1)：127－138.
GAO Ming，TANG Hong，ZHANG Peng. Survey of path planning technologies for robots swarm[J]. Journal of National University of Defense Technology，2021，43(1)：127－138.（in Chinese）

[3] 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.
YANG Xuhai，ZHOU Wenhao，LI Yufeng，et al. Review of path planning algorithms for picking manipulator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(5)：161－169.（in Chinese）

[4] 宋勇，张蕾，田荣，等. 复杂多场景下机械臂避障运动规划方法研究[J]. 西北工业大学学报，2023，41(3)：500－509.
SONG Yong，ZHANG Lei，TIAN Rong，et al. Research on obstacle avoidance motion planning method of manipulator in complex multi scene[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University，2023，41(3)：500－509.（in Chinese）

[5] XIAO Z，TONG Z，LEI D，et al. Local path planning of autonomous vehicle based on an improved heuristic Bi－RRT algorithm

in dynamic obstacle avoidance environment[J]. Sensors, 2022, 22(20):7968.

[6] GAN B, DONG Q. An improved optimal algorithm for collision detection of hybrid hierarchical bounding box[J]. Evolutionary Intelligence, 2021, 15(4): 1 - 13.

[7] 叶宁,周登宝,任广安, 等. AGS - RRT 算法机械臂避障路径规划研究[J]. 机械设计与制造,2024(5):332 - 337.
YE Ning, ZHOU Dengbao, REN Guang'an, et al. Research on obstacle avoidance path planning of manipulator with AGS - RRT algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(5):332 - 337. (in Chinese)

[8] NELSON G. A generalization of Dijkstra's calculus[J]. ACM Transactions on Programming Languages & Systems, 1989, 11(4):517 - 561

[9] 冯琳洁,杜树新,裘一. 基于 Dijkstra 算法的工业园区应急疏散路径规划[J]. 工业控制计算机,2024, 37(3):44 - 46.
FENG Linjie, DU Shuxin, QIU Yi. Emergency evacuation path planning for industrial parks based on Dijkstra algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(3):44 - 46. (in Chinese)

[10] TANG Xianxing, ZHOU Haibo, XU Tianying. Obstacle avoidance path planning of 6 - DOF robotic arm based on improved A* algorithm and artificial potential field method[J]. Robotica, 2023, 42(2):457 - 481.

[11] LIU N, MA C, HU Z, et al. Workshop AGV path planning based on improved A* algorithm[J]. Mathematical Biosciences and engineering, 2024, 21(2):2137 - 2162.

[12] 许建民,邓冬冬,宋雷,等. 基于多级视野自适应蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2024,55(11):475 - 485.
XU Jianmin, DENG Dongdong, SONG Lei, et al. Mobile robot path planning based on multi-level field of view adaptive ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11):475 - 485. (in Chinese)

[13] 时维国,宁宁,宋存利,等. 基于蚁群算法与人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2023,54(12):407 - 416.
SHI Weiguo, NING Ning, SONG Cunli, et al. Path planning of mobile robots based on ant colony algorithm and artificial potential field algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12):407 - 416. (in Chinese)

[14] 郝琨,张慧杰,李志圣,等. 基于改进避障策略和双优化蚁群算法的机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2022,53(8):303 - 312,422.
HAO Kun, ZHANG Huijie, LI Zhisheng, et al. Path planning of mobile robot based on improved obstacle avoidance strategy and double optimization ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):303 - 312, 422. (in Chinese)

[15] 郝启润,吴韵哲,吴浩峻,等. 基于改进 A* GBNN 算法的 AUV 路径规化[J]. 船舶工程,2020,42(9):128 - 132.
HAO Qirun, WU Yunzhe, WU Haojun, et al. AUV path planning based on improved GBNN algorithm with A*[J]. Ship Engineering, 2020, 42(9): 128 - 132. (in Chinese)

[16] 袁蒙恩,陈立家,冯子凯. 基于单目视觉的多种群粒子群机械臂路径规划算法[J]. 计算机应用, 2020, 40(10):2863 - 2871.
YUAN Mengen, CHEN Lijia, FENG Zikai. Path planning algorithm of multi-population particle swarm manipulator based on monocular vision[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(10):2863 - 2871. (in Chinese)

[17] 毕松,余鑫. 基于 3D 点云分析的果园行间穿梭机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报,2024,55(10):37 - 50.
BI Song, YU Xin. Path planning method for inter-row shuttle in densely planted orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10):37 - 50. (in Chinese)

[18] 黄林林,李世雄,谭彧, 等. 基于改进卷积神经网络算法的路径导航研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4):146 - 152,159.
HUANG Linlin, LI Shixiong, TAN Yu, et al. Research on farmland route navigation based on an improved convolutional neural network algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4):146 - 152, 159. (in Chinese)

[19] 宋彦,张羊阳,姚琦,等. 基于启发式动态规划的履带机器人路径跟随控制方法[J]. 农业机械学报,2019,50(11):24 - 33.
SONG Yan, ZHANG Yangyang, YAO Qi, et al. Path following control method of tracked mobile robot based on heuristic dynamic programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 24 - 33. (in Chinese)

[20] 李晓娟,陈涛,韩睿春, 等. 不确定采摘环境下改进 RRT 算法的机械臂路径规划研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4):193 - 198, 337.
LI Xiaojuan, CHEN Tao, HAN Ruichun, et al. Research on path planning of robotic arm with improved RRT algorithm in uncertain environment for harvesting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4):193 - 198, 337. (in Chinese)

[21] 刘亚秋,赵汉琛,刘勋, 等. 一种基于改进的快速扩展随机树的工业机器人路径避障规划算法[J]. 信息与控制, 2021, 50(2):235 - 246,256.
LIU Yaqiu, ZHAO Hanchen, LIU Xun, et al. An improved RRT based obstacle avoidance path planning algorithm for industrial robot[J]. Information and Control, 2021, 50(2):235 - 246, 256. (in Chinese)

[22] 陈志勇,吴精华. 基于目标导向采样的机器人改进概率路图法研究[J]. 农业机械学报,2023,54(6):410 - 418,426.

CHEN Zhiyong, WU Jinghua. Improved probability path graph method for robots based on goal-oriented sampling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(6):410 - 418,426. (in Chinese)

[23] 张勤,刘丰溥,蒋先平,等. 番茄串收机械臂运动规划方法与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(9):149 - 156.
ZHANG Qin, LIU Fengpu, JIANG Xianping, et al. Motion planning method and experiments of tomato bunch harvesting manipulator[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(9):149 - 156. (in Chinese)

[24] 田金文,于镭,李衍照. 基于改进 APF - RRT 的机械臂避障路径规划[J]. 电子测量技术, 2022, 45(22):41 - 46.
TIAN Jinwen, YU Lei, LI Yanzhao. Obstacle avoidance path planning of manipulator based on improved APF - RRT[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(22):41 - 46. (in Chinese)

[25] 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.
LIU Ziyan,ZHANG Jie. Path planning using improved RRT algorithm for indoor mobile robot[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(9):190 - 197. (in Chinese)

[26] 刘天湖,张迪,郑琰, 等. 基于改进 RRT* 算法的菠萝采收机导航路径规划[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23):20 - 28.
LIU Tianhu,ZHANG Di,ZHENG Yan, et al. Navigation path planning of the pineapple harvester based on improved RRT* algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23):20 - 28. (in Chinese)

[27] 郭自良,吴玄博,殷程凯, 等. 基于 Informed - RRT* 的苹果采摘机械臂路径规划研究[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(4):59 - 65.
GUO Ziliang,WU Xuanbo,YIN Chengkai, et al. Path planning of apple picking robot arm based on Informed - RRT*[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2024, 52(4):59 - 65. (in Chinese)

[28] 符强,蓝星辉,任风华, 等. 一种双向目标 RRT 路径规划算法研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1):447 - 454,461.
FU Qiang,LAN Xinghui,REN Fenghua, et al. Research on route planning algorithm of bidirectional target RRT and Dijkstra[J]. Computer Simulation, 2023, 40(1):447 - 454,461. (in Chinese)

[29] 马慧丽,鲁照权,王寿庭. 基于改进 RRT 算法的机械臂路径规划研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(4):42 - 46.
MA Huili,LU Zhaoquan,WANG Shouting. Research on manipulator path planning based on improved RRT algorithms[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(4):42 - 46. (in Chinese)

[30] 高嘉材,李丽红,原钢. 机械臂与障碍物的双层次碰撞检测算法仿真[J]. 计算机仿真, 2022,39(6):453 - 458.
GAO Jiacai,LI Lihong,YUAN Gang. Simulation of double level collision detection algorithm between manipulator and obstacle simulation of double level collision detection algorithm between manipulator and obstacle[J]. Computer Simulation, 2022, 39(6): 453 - 458. (in Chinese)

(上接第 769 页)

[21] EBRAHIMI I, CARRETERO A J, BOUDREAU R. 3-PRRR redundant planar parallel manipulator: inverse displacement, workspace and singularity analyses[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007,42(8):1007 - 1016.

[22] ZHANG Chenyang, JIANG Hongzhou. Rigid-flexible modal analysis of the hydraulic 6-DOF parallel mechanism[J]. Energies, 2021,14(6): 1604.

[23] MILLER K. Optimal design and modeling of spatial parallel manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004,23(2):127 - 140.

[24] 祝宏铭. 基于旋量理论的 3-PRS 并联机器人动力学分析与仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2020.
ZHU Hongming. Dynamic analysis and simulation of 3-PRS parallel manipulator based on screw theory[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)

[25] BERNAL J, CAMPA R, SOTO I. Kinematics and dynamics modeling of the 6-3-PUS-type Hexapod parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(10): 4555 - 4570.

[26] 梁栋, 李世友, 畅博彦, 等. 冗余驱动精密定位并联机器人动力学优化[J]. 机械设计与研究, 2022,38(5):79 - 87.
LIANG Dong, LI Shiyou, CHANG Boyan, et al. Dynamics optimization of redundant actuated precision positioning parallel robots[J]. Machine Design and Research, 2022,38(5):79 - 87. (in Chinese)

[27] 梁栋, 刘军, 畅博彦, 等. 末端铰接三平动并联机构设计与性能优化[J]. 农业机械学报, 2022,53(10):446 - 458.
LIANG Dong, LIU Jun, CHANG Boyan, et al. Design analysis and performance optimization of a 3-DOF translational parallel mechanism with end hinged structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(10): 446 - 458. (in Chinese)

[28] 梁栋, 石浩昊, 崔满军, 等. 一种可实现空间三平动或三平一转自由度的多驱动模式并联机器人机构: CN202410399503.4[P]. 2024 - 06 - 25.