

引文格式: 赵盼, 杜兆才, 刘江, 等. 基于改进RRT\*算法的超冗余度机器人末端避障路径规划[J]. 航空制造技术, 2023, 66(4): 90-95, 110.  
ZHAO Pan, DU Zhaocai, LIU Jiang, et al. Obstacle avoidance path planning at end of super redundant robot based on improved RRT\* algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(4): 90-95, 110.

# 基于改进 RRT\* 算法的超冗余度机器人末端避障路径规划\*

赵盼<sup>1,2</sup>, 杜兆才<sup>1</sup>, 刘江<sup>2</sup>, 王明阳<sup>1</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;  
2. 北京科技大学, 北京 100083)

[摘要] 针对超冗余度机器人路径跟随运动, 研究了末端避障路径规划方法, 在障碍物建模方面, 对超冗余度机器人关节结构及路径跟随运动状态进行分析, 引入路径约束, 并对障碍物进行膨胀化处理; 在路径规划层面上, 对传统 RRT\* 算法进行了优化, 采用改进路径生成方式、引入转角约束、碰撞后调整等策略, 改进了传统 RRT\* 算法随机路径转角大、路径复杂等缺点, 并在 MATLAB 中进行了试验验证。结果表明, 与传统 RRT\* 算法所规划的路径相比, 该方法能够有效缩短路径长度, 减少节点数量, 提升路径规划的质量。

关键词: 超冗余度机器人; 路径规划; 路径跟随; 改进 RRT\* 算法; 转角约束

## Obstacle Avoidance Path Planning at End of Super Redundant Robot Based on Improved RRT\* Algorithm

ZHAO Pan<sup>1,2</sup>, DU Zhaocai<sup>1</sup>, LIU Jiang<sup>2</sup>, WANG Mingyang<sup>1</sup>

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;  
2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] Aiming at the path following motion of super redundant robot, the end obstacle avoidance path planning method is studied. In the aspect of obstacle modeling, the joint structure and path following motion state of super redundant robot are analyzed, the path constraints are introduced, and the obstacles are inflated; At the level of path planning, the traditional RRT\* algorithm is optimized, and the improved sampling method, the introduction of corner constraint and post collision adjustment are adopted to improve the traditional RRT\* algorithm's disadvantages such as large random path and complex path. Experimental verification is carried out in MATLAB, and the results show that compared with the path planned by the traditional RRT\* algorithm, this method can effectively shorten the path length, reduce the number of nodes, and improve the quality of path planning.

Keywords: Super redundant robot; Path planning; Path following; Improved RRT\* algorithm; Corner constraint

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.04.090

随着科学技术的不断发展, 机器人技术在社会各个领域得到了广泛应用。超冗余度机器人具有长径比大、自由度高等特点, 因此在空间狭窄、运动受限、复杂危险

环境下具有超高的避障能力。在航空航天领域, 航天器、飞机等设施内部结构复杂, 可供作业的区域非常狭小, 因此在进行监测、维护、清理、检测等任务时十分困难。

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1311203); 国防基础科研(JCKY2018205B005)。

超冗余度机器人的灵活性决定了其十分适合这类工作,如代替人工进行飞机油箱的检测<sup>[1]</sup>、狭小空间飞机部件的装配工作等。但由于超冗余度机器人关节数量较多,其逆运动学求解也变得十分困难。为了避免或简化求解过程,目前很多学者专家采用路径跟随运动的方式对超冗余度机器人进行运动规划。路径跟随运动一般指使整个超冗余度机器人机械臂部分能够跟随某个指定的路径,其特点是在运动受限的区域内,超冗余度机器人的连杆和关节沿路径移动,机械臂看起来始终跟随已有路径运动<sup>[2]</sup>。要实现路径跟随运动,则首先要对机器人末端避障路径进行规划。

末端避障路径规划的主要任务是找到一条从起始点到目标点连续的无碰撞路径<sup>[3]</sup>。路径规划问题广泛存在于各个领域,如工业机器人、移动机器人、无人机等,吸引了国内外学者的广泛研究,大量的路径规划算法也因此被提出:基于建立引力斥力场的人工势场法<sup>[4]</sup>在局部避障中具有较好的性能,但在障碍物复杂的场景中容易陷入局部最优;基于计算智能的蚁群算法<sup>[5]</sup>具有较强的鲁棒性,但计算量大,收敛速度慢;基于搜索的A\*算法<sup>[6]</sup>虽然搜索能力强,但不适合高维状态空间的路径规划。

基于随机采样的路径规划方法<sup>[7]</sup>的提出,为解决高维度、复杂环境的路径规划问题提供出了一种很好的解决思路。快速探索随机树(Rapidly exploring random tree, RRT)算法<sup>[8]</sup>搜索能力强,且不需要将搜索空间栅格化,十分适合应用在高维环境下。但RRT算法也具有搜索效率低、路径曲折、产生路径不稳定等缺点。并且RRT算法为单纯的随机采样,没有对所求得解的成本进行考虑,因此不能得到最优路径。为解决这个问题,Karaman等<sup>[9]</sup>将渐进最优的思想引入标准RRT算法中,提出了RRT\*算法。RRT\*算法在RRT的基础上增加了父节点重新选择与剪枝重新布线的操作,利用这个过程来实现渐进最优。虽然RRT\*引入了渐进最优思想,但其仍然具有很多缺点,如收敛速度慢、路径较为曲折等。因此国内外学者在RRT\*算法的基础上,提出了很多改进措施。Jordan等<sup>[10]</sup>根据RRT的改进算法RRT-Connect的双向搜索优势,提出了B-RRT\*算法,利用RRT\*中的父节点重选与重新布线操作来优化两棵树的搜索方式,同时引入了贪婪搜索策略,得到了最优解;张伟民等<sup>[11]</sup>通过在采样上引入目标偏向思想、新点扩展上给采样点和目标点分配权重等策略对RRT\*算法进行改进,加快了收敛速度,提升了规划效率;曹凯等<sup>[12]</sup>将人工势场法与RRT\*算法结合,提出了一种由人工势场(APF)引导RRT\*进行路径规划的方法,利用人工势场引导采样节点进行采样,减少了算法运行时间,加快收敛速度。

上述方法对比标准RRT\*算法而言取得了一定的优化效果,但由于RRT\*算法的随机性,生成的路径仍然存在一定的曲折,路径转角大小随机性较大,因此生成的路径不一定每次都适合超冗余度机器人的路径跟随运动。本文对超冗余度机器人结构及相邻关节跟随运动过程进行分析,对障碍物进行了膨胀化处理,通过引入超冗余度机器人相关约束,对RRT\*算法进行改进。利用改进后的RRT\*算法进行超冗余度机器人的路径规划,能够在三维空间中规划出更加适合超冗余度机器人跟随运动的路径,且能保证一次成功率。

## 1 超冗余度机器人分析及障碍物处理

### 1.1 超冗余度机器人分析

超冗余度机器人结构如图1所示,主要由进给底座、驱动底座、机械臂3部分构成。机械臂部分主要由连杆构成,两个相邻连杆由万向关节进行连接,因此每个关节具有两个旋转自由度。

关节转角的定义,如图2中 $\theta$ 所示。关节的弯曲角度 $\theta$ 受臂段直径 $D$ 和间距 $h_0$ 限制,满足 $\tan(\theta/2) \leq h_0/D$ 。由于关节角度存在限制,因此在进行路径跟随运动时,末端路径的角度也应满足一定限制条件,即最终生成的路径,转角应尽量小于该角度。

针对超冗余度机器人跟随末端路径运动,对两个相邻连杆的路径跟随运动进行分析。由于关节转角受到关节结构的限制,转角具有极限大小 $\theta_{\max}$ ,因此考虑路径转角为极限转角时两臂段的跟随运动。如图3所示,

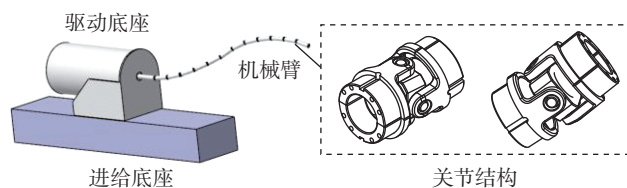


图1 超冗余度机器人结构

Fig.1 Super redundant robot structure

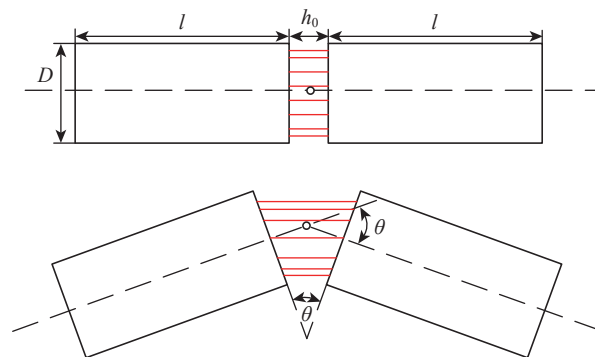


图2 关节转角定义

Fig.2 Joint angle definition

在第1节连杆头部通过路径拐点后,在前进过程中,第1节连杆会扫掠过一个区域。这种情况下,若障碍物在这个扫掠区域内,从路径角度来看没有发生碰撞,但在机械臂路径跟随过程中,由于连杆为刚性,所以在运动过程中,臂段会与路径外的障碍物发生碰撞。因此,在设计避障算法时,需预留安全距离。

由于该扫掠区域在计算时较为复杂,且与路径转角有关,因此将此区域扩大,利用该扫掠区域的最大宽度来设计避障算法,使障碍物距离路径至少为该最大值。对于该值,如图4所示:路径为 $FOH$ ,选取第1段连杆 $AB$ 运动过程中3个阶段进行分析,分别为 $A'B'$ 到 $AB$ 再到 $A''B''$ 。其中,当连杆 $AB$ 运动至路径拐点 $O$ 与连杆 $AB$ 的数学关系为 $OA=OB$ 时,即图4中 $AB$ 处,此时为整个路径跟随运动过程的中间时刻,由 $A'B'$ 和 $A''B''$ 可知,在此中间时刻,之前和之后的运动过程扫掠区域对称,若将路径扩展至 $F'O'H'$ 处后再进行路径规划,则在原路径 $FOH$ 上进行路径跟随运动时,障碍物在任何位置均不会发生碰撞。将路径进行移动扩展,扩展的距离为 $ON$ 。该距离可扩展至障碍物上,再进行路径规划。该距离求解方式为

$$ON' = \frac{(l+h_0/2) \times \cos((\pi-\theta_{\max})/2)}{2} \quad (1)$$

式中, $l$ 为连杆长度; $h_0$ 为连杆间关节间距; $\theta_{\max}$ 为极限转角大小。

### 1.2 障碍物模型处理及碰撞检测

在本研究路径规划算法设计中,障碍物用球体来代

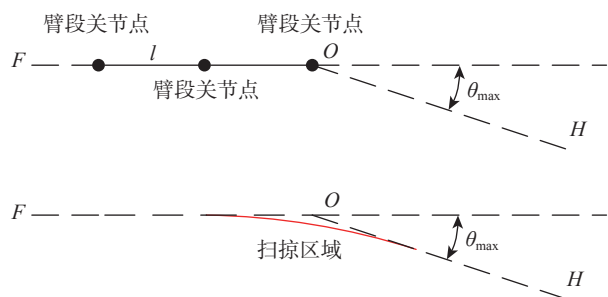


图3 路径跟随运动  
Fig.3 Path following motion

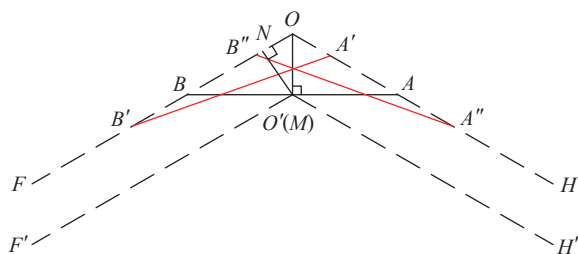


图4 扫掠区域分析  
Fig.4 Analysis of swept area

替。由于该路径用于超冗余度机器人路径跟随运动,因此在规划路径时需考虑超冗余度机器人机械臂部分在该路径上运动时的碰撞问题。

首先由于机器人臂段为圆柱形,对于机器人连杆与障碍物两个实体之间的空间位置关系,可以简化为直线段和实体之间的相对位置关系,将原有球形障碍物沿半径方向扩大与臂段圆柱半径等长距离,在此基础上进行路径规划。

同时,通过上文相邻关节的路径跟随运动分析,在路径跟随运动时会扫掠过一个区域。对于为避免该区域的碰撞而预留的安全距离,同样可以类比至障碍物上,将障碍物沿半径方向扩大该最大值的距离。

针对碰撞检测算法,在进行设计时,不仅要考虑障碍物球心到直线的最小距离,还要考虑线段与球形障碍物的位置关系。设障碍物球心 $O$ 到连杆 $AB$ 的垂直距离为 $d_{\min}$ ,根据连杆 $AB$ 与球形障碍物的位置关系,可分为以下两种情况。

(1)障碍物球心 $O$ 到连杆 $AB$ 的距离大于障碍物的半径,此时机械臂与障碍物不发生碰撞,即 $d_{\min} \geq r$ ,如图5(a)所示。

(2)障碍物球心 $O$ 到连杆 $AB$ 的距离小于障碍物的半径,此时分为以下几种情况进行讨论。

a. 连接障碍物球心与连杆两端点 $AB$ ,若 $\|OA\| < r$ 或 $\|OB\| < r$ ,则发生碰撞,如图5(b)所示。

b. 连接障碍物球心 $O$ 与连杆两端点 $A, B$ ,若 $\|OA\| > r$ 且 $\|OB\| > r$ ,则继续分为以下情况进行讨论。

如图6所示,判断 $A, B$ 两点在同侧还是异侧,只需判断两个角 $\alpha, \beta$ 是否全部小于 $90^\circ$ 。若其中有一角度大于 $90^\circ$ ,则 $A, B$ 两点在 $O$ 点同侧;若均小于 $90^\circ$ ,则 $A, B$ 两点分布于 $O$ 点异侧。根据余弦定理

$$\cos \alpha = \frac{b^2 + o^2 - a^2}{2 \times b \times o}, \cos \beta = \frac{a^2 + o^2 - b^2}{2 \times a \times o} \quad (2)$$

设

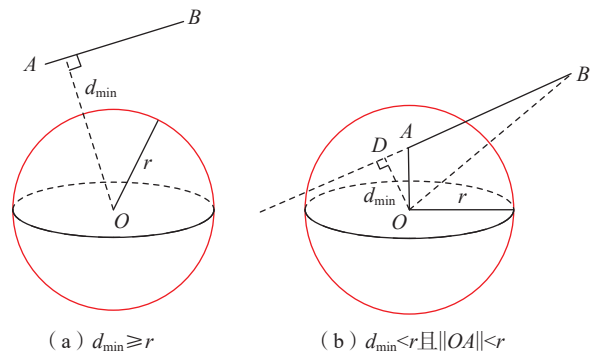


图5 杆与球形障碍物的位置关系  
Fig.5 Position relationship between rod and spherical obstacle

$$f = (b^2 + o^2 - a^2) \times (a^2 + o^2 - b^2) \quad (3)$$

判断两角是否均小于  $90^\circ$ , 则只需判断  $f$  是否大于 0 即可。

若  $f > 0$ , 则  $A$ 、 $B$  两点位于障碍物球心  $O$  两侧, 发生碰撞, 如图 7 (a) 所示; 若  $f \leq 0$ , 则  $A$ 、 $B$  两点位于障碍物球心  $O$  同侧, 不发生碰撞, 如图 7 (b) 所示。

## 2 RRT\* 算法改进

### 2.1 RRT\* 算法

定义整个搜索空间为  $Q$ , 搜索空间  $Q$  由障碍物空间  $Q_{obs}$  和自由空间  $Q_{free}$  组成。在搜索空间中,  $x_{start}$  为起始点,  $x_{goal}$  为目标点。路径规划的定义为, 在自由空间  $Q_{free}$  内寻找出一条连接  $x_{start}$  与  $x_{goal}$  的路径, 使得路径无碰撞且满足以下约束条件: 规划出的路径应尽可能短, 且不与障碍物发生碰撞; 考虑到超冗余度机器人后续路径跟随问题, 规划出的路径不应包含过大转角。

基于随机采样原理的快速搜索随机树方法 (RRT) 具有概率完备性、计算量小、计算难度低等特点, 它对解决高维状态规划问题有着较强的适应性, 这一能力是目前很多规划算法所不具备的, 因此非常适合高维运动

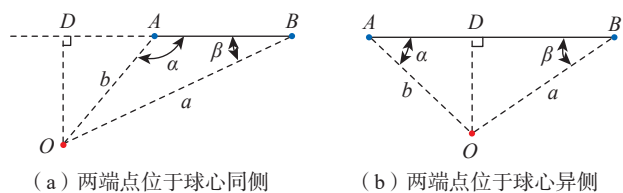


图 6 杆端点相对位置  
Fig.6 Relative position of rod end point

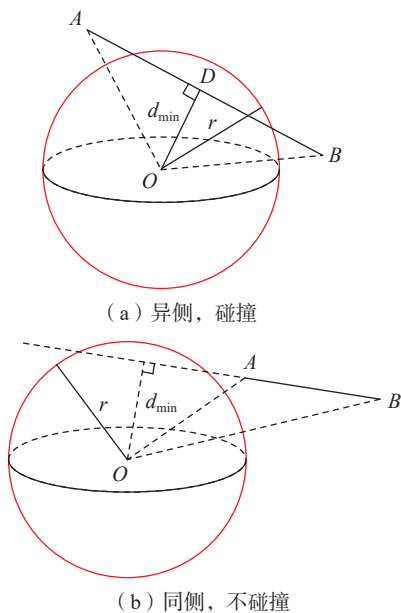


图 7 同侧和异侧碰撞检测结果  
Fig.7 Same side and different side collision detection results

状态规划的实际情况。鉴于 RRT\* 算法不仅加快了原 RRT 算法的收敛速度, 还增强了算法的最优性能, 因此选取 RRT\* 作为路径规划的基础方法。

RRT\* 算法的具体工作流程如下。

(1) 将系统的初始状态 (末端位置) 作为树的第 1 个顶点  $x_{start}$ , 将目标点作为树的最终节点  $x_{goal}$ 。

(2) 在搜索空间  $Q$  内, 按照目标偏向思想, 随机生成一个采样点  $x_{rand}$ , 搜索随机树  $T$  上距离随机点  $x_{rand}$  距离最近的节点  $x_{nearest}$ , 并拓展一个固定步长生成新的节点  $x_{new}$ , 检测节点  $x_{nearest}$  与节点  $x_{new}$  的连线间是否有障碍物, 如没有障碍物则将节点  $x_{new}$  添加到搜索树  $T$  上, 并计算其价值函数。

(3) 重选父节点: 在生成的新节点规定的邻域  $R$  范围内搜索节点集合  $x_{near}$ , 计算将集合内点  $x_{near-i}$  作为  $x_{new}$  父节点  $x_{parent}$  的价值函数, 并与之前以  $x_{nearest}$  作为父节点  $x_{parent}$  的价值函数相比较。如果以  $x_{near-i}$  作为  $x_{new}$  父节点  $x_{parent}$  的价值函数小于原价值函数  $cost$ , 并且检测连线后无碰撞, 则将  $x_{nearest}$  与节点  $x_{new}$  的连线断开, 连接  $x_{near-i}$  与  $x_{new}$ , 并更新价值函数。

(4) 剪枝重新布线: 遍历集合  $x_{near}$  内所有节点  $x_{near-i}$ , 若  $x_{near-i}$  与  $x_{new}$  连线不与障碍物碰撞, 且  $x_{near-i}$  与  $x_{new}$  的价值函数加上  $x_{new}$  到起始节点  $x_{start}$  的价值函数小于  $x_{near-i}$  到  $x_{start}$  的原价值函数, 即断开  $x_{near-i}$  与原父节点  $x_{parent}$  的连接, 并将  $x_{new}$  作为  $x_{near-i}$  的父节点, 连接  $x_{near-i}$  与  $x_{new}$ , 并更新价值函数。

(5) 重复以上过程, 经过有限次迭代优化求解, 直至搜索树  $T$  存在一点与目标点  $x_{goal}$  之间的距离小于所规定的阈值, 停止搜索。

(6) 由目标点向起始点检索, 生成完整的 RRT\* 路径。

### 2.2 改进 RRT\* 算法

标准 RRT\* 算法为随机采样搜索算法, 所以较大概率产生的路径太过曲折、无用节点数过多。因此本文提出以下 4 种改进策略。

(1) 路径生成方式改进。

传统的 RRT\* 算法中引入了目标偏向思想, 具体流程为随机树在随机获取采样点时, 首先按照均匀概率分布获取一个概率值  $p$ , 若  $p$  小于设定的阈值, 则  $x_{rand} = x_{goal}$ ; 若  $p$  大于阈值, 则按照原有的随机采样方式获取随机点。目标偏向思想的引入, 可以减少随机树在扩展时的随机性, 减少损耗。但随机点生成后路径的产生方式上并没有任何改变, 直接按照固定步长向随机点方向扩展。因此本文对路径产生方式进行改进, 将目标点信息进行再次引入: 首先, 在采样空间内随机生成一个点  $x_{rand0}$ , 连接  $x_{near}$  与  $x_{rand0}$  确定单位向量  $a$ , 连接  $x_{near}$  与  $x_{goal}$  确定单位向量  $b$ , 随机生成两个  $0 \sim 1$  之间的随机

数  $p_1$ 、 $p_2$ ，随机点的长度与方向按照式(4)确定。

$$x_{rand} = x_{near} + \sigma \times \frac{(p_1 \times a + p_2 \times b)}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2}} \quad (4)$$

式中， $\sigma$  为拓展步长。

(2) 路径角度约束。

根据前文分析得知，由于超冗余度机器人关节结构特点，生成路径中的转角应小于  $\theta_{max}$ ，因此在生成新节点时引入角度约束。对于图8所示路径中连续的3个节点  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  及夹角角度  $\varphi$ ，计算公式为

$$\varphi = 180^\circ - \arccos \frac{l^2(x_2, x_1) + l^2(x_2, x_3) - l^2(x_1, x_3)}{2 \times l(x_2, x_1) \times l(x_2, x_3)} \quad (5)$$

根据式(5)判断扩展的新节点  $x_{new}$  和  $x_{nearest}$  的连线与  $x_{nearest}$  和其父节点  $x_{near-parent}$  的连线之间的夹角是否超过限定值。若大于限定角度，则放弃节点  $x_{new}$ ；同样的，在重选父节点和剪枝过程中也应遵守此规则。对于重选父节点过程，当选定父节点  $x_{near-i}$  和  $x_{new}$  的连线与  $x_{near-i}$  和其父节点的连线夹角大于限定角度时，放弃  $x_{near-i}$  作为  $x_{new}$  的新父节点。在剪枝过程中，判断  $x_{near-i}$  和  $x_{new}$  连线与  $x_{new}$  和其父节点连线的夹角是否大于限定角度。若大于限定角度，则放弃本次剪枝过程。

(3) 重选父节点及剪枝过程优化。

在重选父节点及剪枝过程中，对于传统的 RRT\* 算法，需在邻域  $R$  的范围内遍历所有节点，对路径进行优化。但该过程随着邻域范围的增大，计算量也会增大。对于该过程，在进行遍历之前，增加一个与起始点  $x_{start}$  连接的过程，然后进行碰撞检测，若无碰撞，则直接将  $x_{start}$  作为新的父节点。若满足无碰撞的条件，则不仅可以大大减少因遍历所有节点而产生的计算量，而且在一定程度上对路径起到优化作用。

(4) 碰撞检测后调整。

在传统 RRT\* 算法中，拓展步长为一个定值  $\sigma$ ，这个定值需在算法中作为初始量给出。若  $\sigma$  过大，则在扩展过程中容易产生碰撞，生成大量无效节点，扩展效率低；若  $\sigma$  过小，则扩展次数将增大，增大了算法收敛的时间。

针对这一问题，本文采用拓展步长调整策略，即随机树通过拓展新节点，当拓展路径与障碍物发生碰撞时，利用二分法进行调整，具体方式为：取新节点  $x_{new}$  与其父节点  $x_{parent}$  连线的中点  $x_{mid}$ ，将  $x_{mid}$  作为新的  $x_{new}$  进

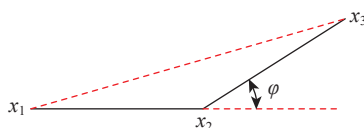


图8 路径转角  
Fig.8 Path corner

行碰撞检测，若仍发生碰撞，则重复进行该过程，重复两次后若仍有碰撞，则放弃该节点。

改进 RRT\* 算法的大体流程如图9所示。

3 试验与分析

为检验改进 RRT\* 算法的性能，在 MATLAB2018a 上进行仿真试验。试验软件环境为：Windows10，硬件配置为：Inter (R) Core (TM) i5-6200UCPU@2.30GHz，内存(RAM)8GB。三维仿真地图尺寸设置为  $2000 \times 2000 \times 2000$ ，起始点为(10,10,10)，终点为(2000,2000,2000)。障碍物设置为球形，具体坐标及大小见表1。设置初始固定步长为400mm，在改进算法中，路径角度约束为  $20^\circ$ 。

本文算法是在 RRT\* 算法的基础上进行改进后提出的，因此设计试验时，采用标准 RRT\* 作为对比算法进行对比试验。由于扩展随机树算法的随机性，因此在进行试验时，每种对比算法进行50次试验，将50次试验的数据取平均值作为对比数据，对比结果数据见表2。

如图10所示，通过对比试验可以看出，改进后的

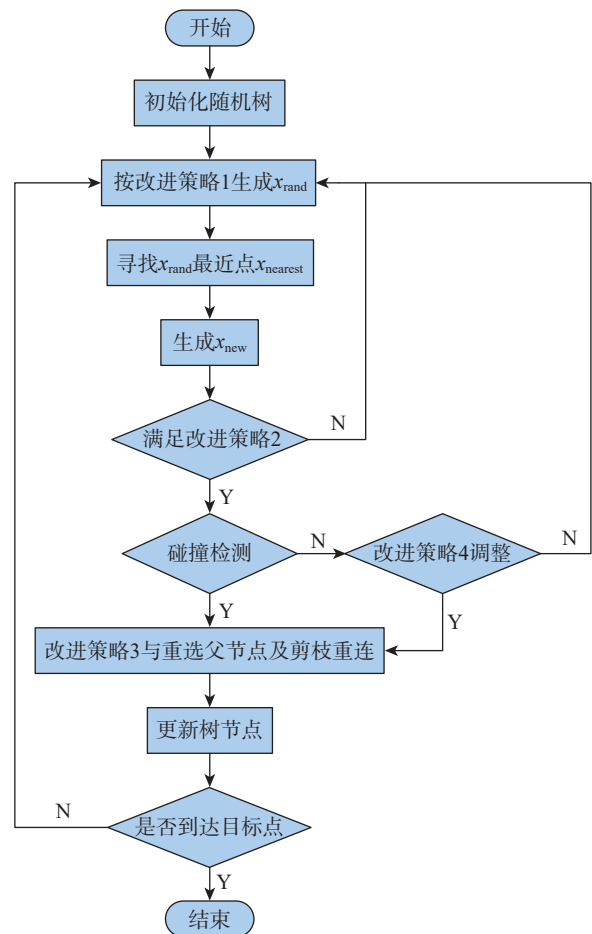


图9 改进 RRT\* 算法流程图  
Fig.9 Flow chart of improved RRT\* algorithm

RRT\* 算法具有以下特点。

(1) 搜索效率方面。改进后的 RRT\* 算法, 搜索平均时间为 0.702 s, 标准 RRT\* 算法的搜索时长为 0.534 s, 在搜索时长上虽有所增加, 但该算法应用于离线轨迹规划, 搜索时长为次要因素, 且每次规划出的路径均能符合超冗余度机器人的路径跟随运动, 无需人工再次进行

表 1 障碍物坐标及大小

Table 1 Obstacle coordinates and size

序号	球心坐标 /mm	半径 /mm
1	(1000, 1000, 1000)	300
2	(500, 500, 500)	200
3	(1000, 400, 600)	300
4	(1500, 1000, 1000)	200
5	(600, 1300, 500)	200
6	(1500, 1500, 1500)	240

表 2 对比试验数据

Table 2 Comparison of experimental data

算法	路径长度 /mm	节点数	时间 /s
标准 RRT*	3951.8089	101	0.534
改进 RRT*	3610.2771	75	0.702

筛选; 标准 RRT\* 算法的平均节点数为 101, 改进后算法的节点数为 75, 在搜索效率上与原算法相比, 平均迭代次数减小, 平均规划时间相差不大。因此可以看出, 改进后的算法在增加多种约束后, 虽然算法的计算量有所增加, 但节点数变少, 内存消耗减小。

(2) 路径长度方面。改进后的 RRT\* 算法, 平均路径长度为 3610.2771 mm, 相比于原算法的平均路径长度 3951.8089 mm 减少了近 9%, 由该数据可知, 改进 RRT\* 算法规划出的路径长度较小, 提高了路径的质量。

(3) 路径优化方面。由于改进 RRT\* 算法中路径转角约束的引入, 所有路径转角均小于  $20^\circ$ , 且由于碰撞后调整策略的引入, 使得路径在空旷区域中以固定步长直接通过; 在障碍物较多区域, 碰撞后进行调整, 路径得到明显优化。

## 4 结论

本文通过对超冗余度机器人的结构和相邻关节跟随运动时臂杆的跟随运动状态进行分析, 一方面对障碍物进行了两次膨胀化处理, 避免了机器人运动过程中潜在的干涉碰撞问题; 另一方面对 RRT\* 算法进行了改进, 提出了 4 种改进策略, 缩短了规划路径的长度, 同时避免了过大关节转角, 符合超冗余度机器人在后续路径跟随运动的路径要求, 实现了在三维空间内的避障路径优化。

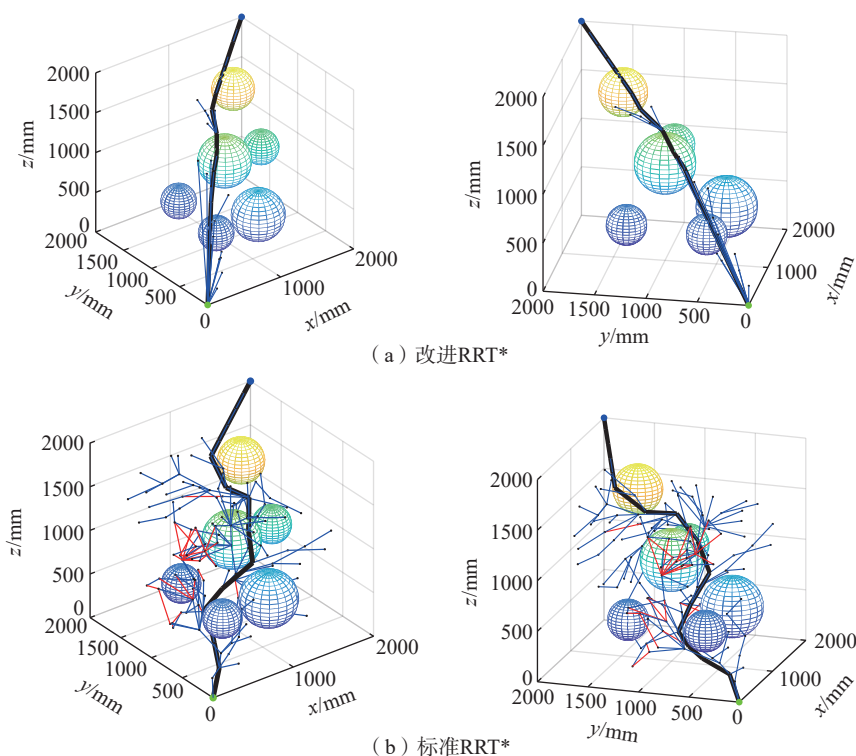


图 10 路径规划结果对比

Fig.10 Comparison of path planning results

(下转第 110 页)

GONG Yuqiang. Process design and application based on digital model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(8): 26–35.

[3] 余志强, 陈嵩, 孙炜, 等. 基于MBD的三维数模在飞机制造过程中的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 52(23/24): 82–85.

YU Zhiqiang, CHEN Song, SUN Wei, et al. Application of MBD-based three-dimensional module in aircraft manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(23/24): 82–85.

[4] 焉嵩, 路骐安, 胡志强, 等. 航天产品三维数字化工艺设计模式探索[J]. 航天制造技术, 2019(3): 64–67.

YAN Song, LU Qian, HU Zhiqiang, et al. Mode exploration of 3D digital process planning for aerospace products[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(3): 64–67.

[5] 沈进, 李长春. 基于UG/WAVE的产品参数化建模技术[J]. 中国制造业信息化, 2008, 37(13): 27–29.

SHEN Jin, LI Changchun. The parameter modeling technology of products based on UG/WAVE[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2008, 37(13): 27–29.

[6] 张贺, 邵晓东, 仇原鹰, 等. 基于体分解的轴类零件工序模型自动生成方法[J/OL]. 计算机集成制造系统, [2021-04-21]. <http://opac.lzlib.org.cn:8080/interlibSSO/goto/4/+jmr9bmjh9mids/kcms/detail/11.5946.TP.20201202.1721.009.html>.

ZHANG He, SHAO Xiaodong, QIU Yuanying, et al. Automatic generation method of shaft parts process model based on volume decomposition[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing System, [2021-04-21]. <http://opac.lzlib.org.cn:8080/interlibSSO/goto/4/+jmr9bmjh9mids/kcms/detail/11.5946.TP.20201202.1721.009.html>.

[7] 林静. 航空发动机机匣构件机械加工工艺优化[J]. 科技创新与应用, 2017(2): 164.

LIN Jing. Optimization of mechanical processing technology of aero-engine casing components[J]. Technology Innovation A, 2017(2): 164.

[8] 徐吉存. 航空发动机机匣加工工艺研讨[J]. 世界制造技术与装备市场, 2018(3): 63–65.

XU Jicun. Process discussion about aviation engine casing processing[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2018(3): 63–65.

[9] 葛永成. 高温合金机匣电解加工技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

GE Yongcheng. Basic research on electrochemical machining for superalloy casing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[10] 张志革, 王敏丰. 航空发动机机匣机械加工过程中变形因素分析及变形控制[J]. 中国设备工程, 2020(15): 214–215.

ZHANG Zhige, WANG Minfeng. Deformation factors analysis and deformation control during machining process of aero engine casing [J]. China Plant Engineering, 2020(15): 214–215.

(上接第95页)

## 参考文献

[1] 高庆吉, 王维娟, 牛国臣, 等. 飞机油箱检查机器人的仿生结构及运动学研究[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1748–1756.

GAO Qingji, WANG Weijuan, NIU Guochen, et al. Study of bionic structure and kinematics of robot for aircraft fuel tank inspection[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7): 1748–1756.

[2] 王俊刚, 汤磊, 谷国迎, 等. 超冗余度机械臂跟随末端轨迹运动算法及其性能分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 18–25.

WANG Jungang, TANG Lei, GU Guoying, et al. Tip-following path planning and its performance analysis for hyper-redundant manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 18–25.

[3] 余卓平, 李奕姗, 熊璐. 无人车运动规划算法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1150–1159.

YU Zhuoping, LI Yishan, XIONG Lu. A review of the motion planning problem of autonomous vehicle[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8): 1150–1159.

[4] HEIDARI H, SASKA M. Collision-free trajectory planning of multi-rotor UAVs in a wind condition based on modified potential field[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156: 104140.

[5] 杨海清, 芦斌. 基于改进蚁群算法的水下无人机路径规划研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(10): 216–220.

YANG Haiqing, LU Bin. Research on path planning of underwater UAV based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(10): 216–220.

[6] WU X L, XU L, ZHEN R, et al. Bi-directional adaptive A\* algorithm toward optimal path planning for large-scale UAV under multi-constraints[J]. IEEE Access, 2020, 8: 85431–85440.

[7] ELBANHAWI M, SIMIC M. Sampling-based robot motion planning: A review[J]. IEEE Access, 2014, 2: 56–77.

[8] LAVALLE S. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning[D]. Ames: Iowa State University, 1998.

[9] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846–894.

[10] JORDAN M, PEREZ A. Optimal bidirectional rapidly-exploring random trees, MIT-CSAIL-TR-2013-021[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2013.

[11] 张伟民, 付仕雄. 基于改进RRT\*算法的机器人路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 31–36.

ZHANG Weimin, FU Shixiong. Mobile robot path planning based on improved RRT\* algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(1): 31–36.

[12] 曹凯, 陈阳泉, 高嵩, 等. 涡流人工势场引导下的RRT\*移动机器人路径规划[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(4): 723–732.

CAO Kai, CHEN Yangquan, GAO Song, et al. Vortex artificial-potential-field guided RRT\* for path planning of mobile robot[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(4): 723–732.

通讯作者: 骆强, 硕士, 主要从事数字化工艺以及工艺信息化建设研究。

(责编 阳光)

通讯作者: 杜兆才, 研究员, 研究方向为飞机数字化柔性装配。

(责编 阳光)