

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2021.0006.005

基于多旋翼无人机的输气管道巡检路径规划研究*

刘 凯¹,秦 锋¹,徐 浩²,袁志祥¹

(1. 安徽工业大学 计算机科学与技术学院,安徽 马鞍山 243032;

2. 安徽工业大学 数理科学与工程学院,安徽 马鞍山 243032)

摘 要:为了解决多旋翼无人机在工业输气管道巡检的过程中快速规避障碍物问题,提出了一种基于快速扩展随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)的改进算法,针对传统 RRT 算法的随机性高、收敛速度慢和规划路径长且曲折问题,结合空间环境特点在随机点采样方式和路径优化两个方面做出了改进。首先,设置随机采样点的取值范围;然后引入目标偏向采样策略对随机树的扩展方向进行引导;最后对生成的路径进行裁剪和平滑处理,并通过在不同的数字模拟地图中与传统 RRT 算法、带路径修正的启发式 RRT 算法进行仿真实验比较。实验结果表明:改进后的 RRT 算法在执行输气管道巡检任务时能够快速生成一条路径短且平滑的避障路径。

关键词:无人机;输气管道;RRT;避障

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2021)06-0034-08

0 引 言

工业输气管道作为输送工业气体的主要途径,在其工作期间由于自然环境或者气体压力等各种因素,会出现管体破损、管道接口脱离而导致气体泄漏事故,极易引发环境污染、大规模火灾、人员集体中毒等重大问题,因此输气管道的安全巡检工作变得尤为重要。传统的管道巡检工作主要是由人工来完成,但是依靠人工无法满足管道巡检的需求,一方面不仅工作量大而且效率较低,另一方面工业输气管道一般处于室外,相对位置较高并且比较密集,工作难度大且危险系数高。随着无人机技术的发展,多旋翼无人机的远程遥控性、高机动性以及空中可达性已经能够弥补常规输气管道巡检方法的不足,使巡检工作变得高效便捷^[1]。

多旋翼无人机在实际工程应用中,对于长距离

的飞行任务,通常采用全局静态规划生成航迹点来构建一条完整的航迹,当无人机在执行巡检任务过程中遇到障碍物时,以当前位置的上一个航迹点为起点,下一个航迹点为目标点,进行局部航迹重规划来避开威胁^[2-3]。对于无人机航迹重规划问题,国内外研究者提出多种解决方案,包括蚁群算法^[4]、遗传算法^[5]、粒子群算法^[6-7]、A-star 算法^[8-9]、RRT 算法^[10]等。文献[4]指出蚁群算法易与其他方法相结合、鲁棒性强,但是存在搜索效率低且易于停滞的问题。遗传算法通过模拟自然进化过程搜索最优解,文献[5]指出其搜索性能较好,但是路径规划所需时间较长,难以满足动态复杂环境下算法的实时性。粒子群算法具有显著的特点,处理一些优化问题时能够取得较优结果,但是后期收敛速度慢,容易陷入局部最优解^[11]。A-star 算法是静态路网中求解最短路径最有效的搜索方法,但是在执行路径规划任务时需要建立数学模型,内存需求较大,算法的

收稿日期:2020-10-15;修回日期:2020-11-30.

* 基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFF020440508).

作者简介:刘凯(1995—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,从事计算机应用研究.

实时性较低^[12]。RRT算法通过随机采样在空间寻求路径,不需要建立任务空间信息模型,相对于上述算法,具有实时性强和运算速度快的特点,适合在多维动态环境下快速开拓路径^[13]。

综合上述算法分析和工业输气管道空间环境的特点,RRT算法更适用于输气管道的巡检工作。尽管RRT算法能够满足复杂环境下的路径规划需求,但是由于其随机采样机制,无法得到较优的结果。近些年来,国内外学者提出多种改进RRT算法,虽然都能提高RRT算法的性能,但是未能结合空间环境的特点进行研究,缺乏一定的应用性。

根据RRT算法路径规划效率的影响因素和空间环境特点,在随机点采样方式、路径曲折度两方面做出了优化并进行了仿真实验。实验结果表明,改进后的RRT算法在路径规划时间消耗上以及路径代价上都有了比较明显改善。

1 RRT算法

RRT算法是一种以树形结构存储数据的方法,通过不断在空间中随机采样来增加树的节点,当树的节点到达目标点或者在目标点规定的范围内时停止采样,从目标点反向搜索便可得到一条从起点到目标点的完整路径。RRT构建随机树的具体过程如图1所示。

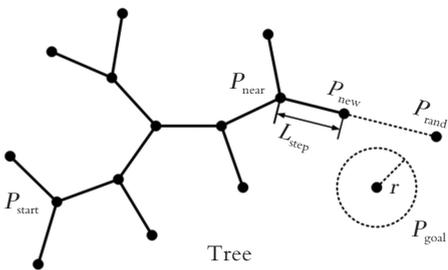


图1 RRT算法

Fig.1 RRT algorithm

假设图1中Tree表示当前空间 S 中的随机树, P_{start} 为无人机的航行起点, P_{goal} 为目标点, r 为目标点一定范围的半径, L_{step} 为扩展步长。以起点 P_{start} 为树的根节点,开始在空间 S 中随机选取采样点 P_{rand} 作为树的扩展方向, $P_{rand} \in S$ 。通过遍历随机树总节点数,计算出离采样点 P_{rand} 最近的节点 P_{near} 。在扩展方向上选取一个距离 P_{near} 为 L_{step} 的 P_{new} 节点, $P_{new} \in S$,将 P_{near} 和 P_{new} 两节点之间进行碰撞检测,若路径

上没有障碍物,则保留新的树节点 P_{new} ,否则删除 P_{new} 节点,重新选取扩展方向 P_{rand} 。直到新产生的节点 P_{new} 在目标点 P_{goal} 范围内且 P_{new} 和 P_{goal} 的连线上没有障碍物或者 $P_{new} = P_{goal}$ 时停止生长。从 P_{goal} 反向搜索,形成从起点到目标点的可行路径,则完成RRT算法路径规划。

基于RRT算法路径规划的无人机不光要考虑障碍物因素,还要将周围空间环境特点、无人机自身的约束条件以及RRT算法扩展方式结合起来,通过一些特殊的改进,降低算法本身缺陷的影响后,将优化后的RRT算法引入到特定的环境中去^[14]。

2 约束条件

多旋翼无人机路径规划目的是搜索一条从起点到目标点的最优或者近似最优的无障碍物路径^[15],其将要执行的飞行任务必须能够满足约束条件,否则无人机无法执行该任务。

2.1 安全飞行距离

无人机能够拥有一个完美的飞行轨迹,最重要的是拥有较强的避障能力,而无人机与障碍物之间的安全距离则是避障能力的保证。假设 A 代表无人机, obs 代表障碍物,无人机与障碍物的安全距离为 D ,则安全飞行距离可以如下:

$$Dis(A, obs) \geq D \quad (1)$$

2.2 机身尺寸

工业输气管道具有错综复杂、输送距离长的特点,利用无人机巡检时可能需要穿越局限性较大的区域,此时无人机的尺寸将会是影响路径规划的重要因素。图2代表水平方向输气管道与桥梁的YOZ截面图,管道和桥梁之间构成一个限制空间,假设 H 为限制空间的高, W 为限制空间的宽,图3中 T 为无人机的高, L 为无人机对角线最大的宽度。结合安全飞行距离,则无人机的机身尺寸约束可以表示为

$$\begin{aligned} H &= Z_2 - Z_1 \\ T &\leq H - 2D \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} W &= Y_2 - Y_1 \\ L &\leq W - 2D \end{aligned} \quad (3)$$

当条件满足式(2)、式(3)则表示无人机可以通过,否则将限制空间视为障碍物。

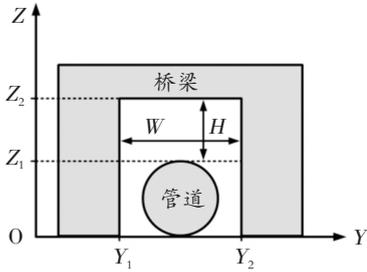


图 2 桥梁与管道

Fig. 2 Bridge and pipeline

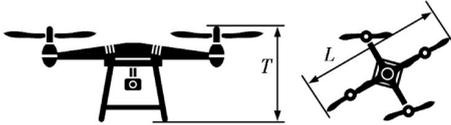


图 3 无人机

Fig. 3 Unmanned Aerial Vehicle

2.3 飞行范围

多旋翼无人机在执行管道巡检任务时,由于任务的特殊性,距离管道的位置必须控制在一定的范围内,距离较远会导致巡检结果出现误差,距离较近会与管道碰撞发生安全事故。图 4 代表水平方向的管道 YOZ 截面图,图 5 代表垂直方向的管道 XOY 截面图,则飞行范围如下:

$$\begin{aligned} Z_1 &\leq H_A \leq Z_2 \\ Y_1 &\leq W_A \leq Y_2 \end{aligned} \quad (4)$$

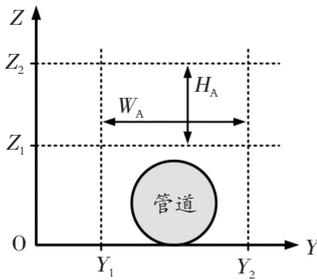


图 4 水平方向

Fig. 4 Horizontal direction

$$\begin{aligned} Y_1 &\leq H_A \leq Y_2 \\ X_1 &\leq W_A \leq X_2 \end{aligned} \quad (5)$$

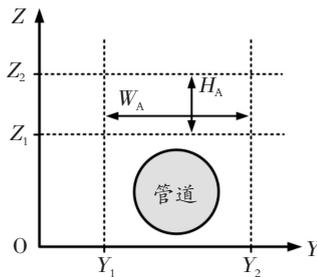


图 5 垂直方向

Fig. 5 Vertical direction

3 三维航迹规划

3.1 目标偏向采样策略

传统 RRT 算法通过不断地在空间中选取随机点 P_{rand} 来达到扩展随机树的目的,并以此找到一条从起点 P_{start} 到目标点 P_{goal} 的可行路径。虽然这种扩展方式能够充分探索空间,保证了算法的成功性,但是由于算法的随机性较高,导致生成的路径较曲折,并且产生许多冗余节点,在一定程度上会增加算法的运算量,降低算法的实时性。

针对算法的随机采样机制,引入了目标偏向采样策略^[13,16],设定一个固定值 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$,算法通过函数随机产生一个 $\theta (0 < \theta < 1)$ 。当 $0 < \theta < \alpha$ 时,随机点 P_{rand} 为空间的任意一点,当 $\alpha \leq \theta < 1$ 时,随机点 $P_{rand} = P_{goal}$,朝着目标点方向扩展随机树。若遇到障碍物,则将固定值 α 设为 1,提高避开障碍物的概率,当在 $\alpha = 1$ 下产生一个新的树节点 P_{new} 时,重新将固定值设定为原来的 α ,重复上述操作。这种优化思想使传统 RRT 算法在工业输气管道的场景中更加具有目标性,降低算法的运算时间,提高算法的实时性和收敛速度,也可降低随机树的节点数。

3.2 随机点选取范围

对于输气管道巡检任务,为了保证巡检结果的正确率,无人机的飞行路径在不碰撞障碍物的前提下,必须尽可能贴近管道,则随机点的取值必然有一个范围,如式(6)、式(7)所示。假设随机点 P_{rand} 在三维空间中坐标为 $(x_{rand}, y_{rand}, z_{rand})$,当管道处于水平方向时,则根据飞行范围约束可知:

$$P_{rand} = (x_{rand}, W_A, H_A) \quad (6)$$

当管道处于垂直方向时,则根据飞行范围约束可知:

$$P_{rand} = (W_A, H_A, z_{rand}) \quad (7)$$

3.3 节点扩展方式

随机树 Tree 的扩展方式是从总节点数中找出距离随机点 P_{rand} 最近的 P_{near} 节点,再以扩展步长 L_{step} 在 P_{rand} 方向上生成一个新的节点 P_{new} ,最近点的计算公式和新节点坐标的计算公式如式(8)、式(9)所示:

$$Dis(P_{near}, P_{rand}) \leq Dis(P_i, P_{rand}) \quad (8)$$

$$P_{new} = P_{near} + L_{step} * \frac{(P_{rand} - P_{near})}{Dis(P_{rand}, P_{near})} \quad (9)$$

其中, P_i 表示 Tree 的第 i 个树节点, 可知随机树 $Tree = \{P_i | i=1, 2, 3, \dots, M\}$, M 为总节点数, L_{step} 为扩展步长, $Dis(P_{rand}, P_{near})$ 为 P_{rand} 和 P_{near} 的欧氏距离。若节点 P_{new} 满足约束条件并且 P_{near} 和 P_{new} 连线上没有障碍物, 则将节点 P_{new} 添加到随机树 Tree 中。

3.4 路径优化

无人机的飞行轨迹无论是基于全局静态规划还是局部重规划, 都是通过航迹点构成的, 因此真正规划的是这些航迹点^[17]。对于传统 RRT 算法, 虽然在其随机点选取上引入了目标偏向采样策略, 但是在最后生成的路径从无人机飞行效率方面考虑, 仍然存在节点多、曲折度大的问题。

文献[18]中提出了一种带路径修正的启发式 RRT, 由终节点开始, 通过逐步迭代的方式对启发式 RRT 生成的路径进行优化, 更新各节点的父节点, 直到父节点无法迭代时结束^[18]。受到文献[18]的启发, 针对工业输气管道巡检工作的特点, 提出一种迭代试探的优化方法, 主要思想是通过路径裁剪和平滑处理, 降低飞行路径代价, 提高飞行效率。

假设图 6 中有 4 个连续的航迹点, 按顺序分别为 P_1, P_2, P_3, P_4 , 其中 B_n 为 $\triangle P_1 P_2 P_3$ 底边 $P_1 P_3$ 的中点, $P_2 B_n$ 为 $\triangle P_1 P_2 P_3$ 的中线, B_j 为中线 $P_2 B_n$ 上的点, $B_1 = P_2$ 。路径优化步骤如下:

Step 1: 首先以 P_1 为起点与 P_2, P_3 组成 $\triangle P_1 P_2 P_3$, 在其中线 $P_2 B_n$ 上取 n 个均匀点, n 的取值与步长 L_{step} 的大小有关, 两者为正比关系。

Step 2: 选取均匀点中的任意点 B_j 依次分别与 P_1, P_3 连接, 其中 j 的取值顺序为 $\{n, n-1, n-2, \dots, 1\}$ 。

Step 3: 对连接线 $P_1 B_j$ 和 $B_j P_3$ 分别进行碰撞检测和约束条件检查, 若有任何一条线不满足条件, 则 $j-1$, 直到第一次两条线同时满足条件时结束, 此时 j 的取值可分为:

(1) 当 $j=n$ 时, 删除 P_2 , 航迹点顺序更新为 P_1, P_3, P_4 , 起点 P_1 不变, 与 P_3, P_4 组成 $\triangle P_1 P_3 P_4$, 进行下一段的优化操作。

(2) 当 $j \neq n$ 时, 则将 P_2 替换成 B_j , 航迹点顺序更新为 P_1, B_j, P_3, P_4 , 接着以 B_j 为起点与 P_3, P_4 组成 $\triangle B_j P_3 P_4$, 进行下一段的优化操作。

在上述步骤中, 步骤 1、步骤 2 的作用是建立优化模型, 步骤 3 主要是对路径的裁剪和平滑处理, 当

裁剪条件不充分时, 通过角度的变化近似达到路径平滑的效果。从路径的第一个节点开始, 不断地重复执行上述操作, 删除多余路径, 增加拐角度数, 直到路径的终点, 则优化处理完成。

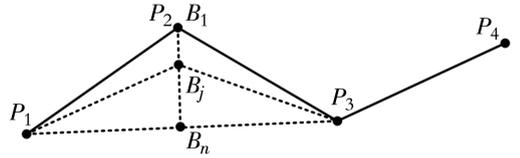


图 6 路径优化

Fig. 6 Path optimization

4 仿真实验

4.1 实验环境搭建

仿真实验环境: 操作系统 Windows 10, 处理器 AMD Ryzen 3 1200, 主频 3.10 GHz, 内存 8 GB, 编译工具 Matlab R2015b。

为了让实验结果更准确, 基于工业输气管道环境特点进行地图建模, 如图 7、图 8 所示。

在图 7 中, 圆柱体表示水平方向的工业输气管道, obs_1 和 obs_3 表示固定障碍物, obs_2 表示突发威胁, $bridge$ 代表需要经过的桥梁, $start$ 和 $goal$ 分别为起点和目标点, 同时也是两个相邻的航迹点, 此时该空间 $S = \{(x, y, z) | 0 \leq x \leq 300, -10 \leq y \leq 160, -10 \leq z \leq 80\}$, 起点和目标点的坐标分别为 $(10, 80, 13)$ 和 $(290, 80, 13)$ 。

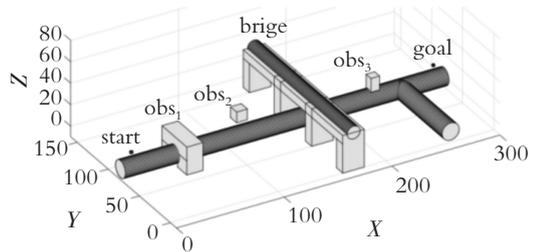


图 7 水平地图模型

Fig. 7 Horizontal map model

在图 8 中, 圆柱体表示垂直方向的工业输气管道, obs 表示突发威胁, $start$ 和 $goal$ 分别起点和目标点, 同时也是两个相邻的航迹点, 此时空间 $S = \{(x, y, z) | 0 \leq x \leq 250, -10 \leq y \leq 160, -10 \leq z \leq 160\}$, 起点和目标点的坐标分别为 $(105, 80, 13)$ 和 $(105, 80, 160)$ 。

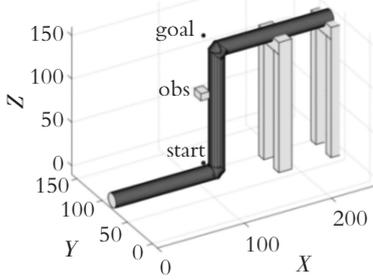
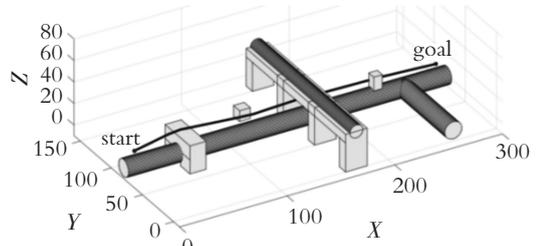


图 8 垂直地图模型

Fig.8 Vertical map model



(c) 改进 RRT 算法

图 9 桥梁可通过

Fig.9 Passable bridge

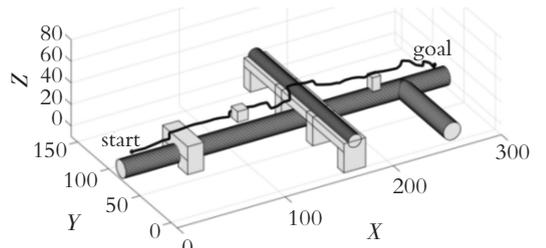
4.2 实验对比与分析

为了验证改进 RRT 算法的性能,按照表 1 中的参数设置与传统 RRT 算法、带路径修正的启发式 RRT 算法^[18]分别在图 7、图 8 所示的地图模型中进行了仿真实验,其中图 7 分为桥梁可通过和不可通过两种实验场景。

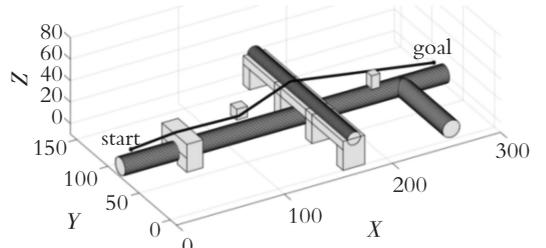
表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

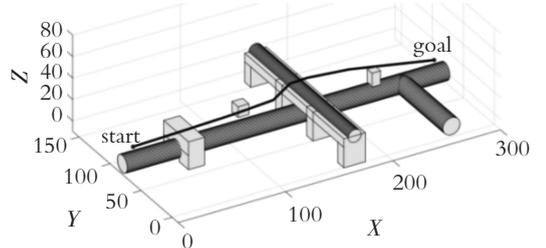
参 数	数 值
步长 L_{step}	6
半径 r	4
固定值 α	0.4
启发概率	0.4



(a) 传统 RRT 算法



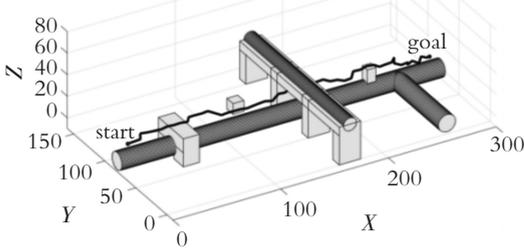
(b) 启发式 RRT 算法



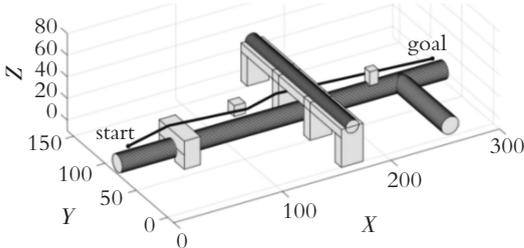
(c) 改进 RRT 算法

图 10 桥梁不可通过

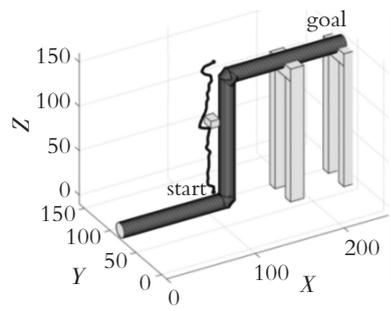
Fig.10 Unpassable bridge



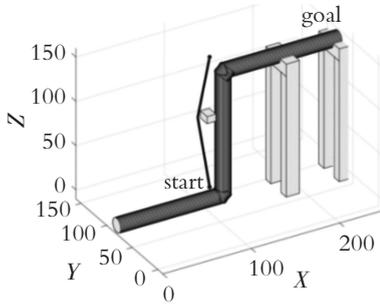
(a) 传统 RRT 算法



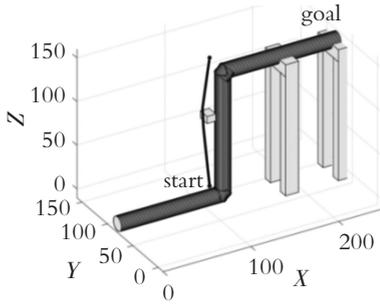
(b) 启发式 RRT 算法



(a) 传统 RRT 算法



(b) 启发式 RRT 算法



(c) 改进 RRT 算法

图 11 垂直管道

Fig. 11 Vertical pipeline

如图 9—图 11 所示,虽然 3 种算法都能找到一条从起点到达目标点的无障碍路径,但是传统 RRT 算法的路径曲折度和长度都要远远的大于启发式 RRT 算法和改进 RRT 算法,并且启发式 RRT 算法和改进 RRT 算法相比较,启发式 RRT 算法的路径存在局部曲折度高的现象。

表 2 桥梁可通过数据

Table 2 Passable bridge data

性能指标	传统 RRT	启发式 RRT	改进 RRT	
规划时间	平均值	3.76	0.51	0.30
	方差	30.79	0.24	0.10
节点数	平均值	60	5	8
	方差	10.99	0.92	1.88
路径长度	平均值	350.21	283.53	282.32
	方差	314.72	3.95	3.19

表 3 桥梁不可通过数据

Table 3 Unpassable bridge data

性能指标	传统 RRT	启发式 RRT	改进 RRT	
规划时间	平均值	3.53	0.54	0.36
	方差	26.55	0.24	0.11
节点数	平均值	59	5	9
	方差	12.84	1.41	2.20
路径长度	平均值	348.14	283.69	283.57
	方差	292.02	4.07	4.19

表 4 垂直管道数据

Table 4 Vertical pipeline data

性能指标	传统 RRT	启发式 RRT	改进 RRT	
规划时间	平均值	3.36	0.08	0.02
	方差	35.74	3.80	0.15
节点数	平均值	34	3	4
	方差	5.98	0.08	0.18
路径长度	平均值	196.07	148.73	148.14
	方差	176.62	0.49	0.21

再结合表 2—表 4 中的实验数据可知,改进 RRT 算法和启发式 RRT 算法在时间消耗、节点数和路径长度上的平均值和方差都要远远小于传统 RRT 算法;改进 RRT 算法和启发式 RRT 算法相比,时间消耗、路径长度平均值和方差在总体上前者要小于后者,但是在表 3 中路径长度的方差前者相对较大,并且在节点数上平均值和方差前者也要大于后者。

构成这种数据现象的原因一方面是改进 RRT 算法和启发式 RRT 算法针对传统 RRT 算法的不足都做出了改进,前者以一定的概率将目标点 goal 选为采样点,引导随机树向目标点 goal 方向扩展,同时在遇到障碍物时修改 α 的值,提高了算法搜索能力,可以快速地找到目标点 goal;后者利用结合目标信息的启发式方法,通过在候选节点中寻找距离目标点 goal 最近的节点作为随机树的采样点,虽然能够避免算法随机性大的问题,但是在候选节点选取上花费了大量的时间且也有一定的随机性。另一方面,改进 RRT 算法和启发式 RRT 算法都加入了路径优化处理,前者通过裁剪和增大角度的方式来优化路径,相比较于后者利用更新父节点的方式优化路径,通过局部角度的变化可以更好地绕开障碍物,虽然节点数较多且受障碍物的大小影响较大,但是路径长度短而平滑。

综上所述,在非特殊空间环境中,改进 RRT 算法和传统 RRT 算法及带路径修正的启发式 RRT 算法相比,能够快速地规划出一条路径短且平滑的路径。

5 结束语

为了多旋翼无人机在执行工业输气管道巡检任

务时,能够快速地规划出一条较优的避障路径,针对传统 RRT 算法存在的问题,提出一种结合了目标偏向采样策略和路径优化的改进 RRT 算法,并在不同的管道地图模型中和传统 RRT 算法、带路径修正的启发式 RRT 算法进行了仿真实验对比。实验结果表明:改进后的算法既降低了传统 RRT 算法随机性,又保留了算法的搜索能力,加快了算法的收敛速度;同时优化了路径,使得路径更短且平滑,能够满足工业输气管道巡检工作的需求。

参考文献(References):

- [1] 罗隆福,李冬,钟杭. 基于改进 RRT 的无人机电力杆塔巡检路径规划[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018,45(10):80—86
LUO L F, LI D, ZHONG H. Path Planning of Unmanned Aircraft Inspection for Electric Towers Based on Advanced RRT Algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2018, 45(10): 80—86(in Chinese)
- [2] AMIN J N, BOSKOVIC J D, MEHRA R K. A Fast and Efficient Approach to Path Planning for Unmanned Vehicles[C]//United States: Guidance, Navigation, and Control Conference, 2006:871—879
- [3] 韩忠华,毕开元,杨丽英,等. 室内复杂环境下多旋翼无人机动态路径规划[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3):366—372+377
HAN Z H, BI K Y, YANG L Y, et al. Dynamic Path Planning of Multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle in Indoor Complex Environment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(3): 366—372 + 377 (in Chinese)
- [4] 朱庆保,杨志军. 基于变异和动态信息素更新的蚁群优化算法[J]. 软件学报, 2004(2):185—192
ZHU Q B, YANG Z J. An Ant Colony Optimization Algorithm Based on Mutation and Dynamic Pheromone Updating[J]. Journal of Software, 2004(2): 185—192 (in Chinese)
- [5] 蔡炯,汪小志. 基于粗糙集与遗传算法的采摘机器人路径规划[J]. 农机化研究, 2016,38(8):189—193
CAI J, WANG X Z. Path Planning of Picking Robot Based on Rough Set and Genetic Algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(8): 189—193(in Chinese)
- [6] LI S B, SUN X X, XU Y J. Particle Swarm Optimization for Route Planning of Unmanned Aerial Vehicles[C]//Proceedings of the 2006 IEEE. 2006:1213—1218
- [7] 刘慧卓,杨金孝,王泰然,等. 改进粒子群算法在三维航路规划中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(11):141—143
LIU H Z, YANG J X, WANG T R, et al. Route Planning in the Three - Dimensional Space Using Improved Adaptive PSO [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(11):141—143(in Chinese)
- [8] 许卫卫,张启钱,邹依原,等. 改进 A* 算法的物流无人机运输路径规划[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6):39—46
XU W W, ZHANG Q Q, ZOU Y Y, et al. Research on Transportation Path Planning for Logistics UAV Based on Improved A* Algorithm [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(6):39—46(in Chinese)
- [9] 陆佳依,金晓怡,朱天宝,等. 基于改进 A* 算法的 AGV 路径研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(1):49—52
LU J Y, JIN X Y, ZHU T B, et al. Research on AGV Path Based on Improved A* Algorithm [J]. Machine Design and Research, 2020, 36(1):49—52(in Chinese)
- [10] LI D C, LI Q, CHENG N, et al. Extended RRT-based Path Planning for Flying Robots in Complex 3D Environments with Narrow Passages [C]//2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. [v. 2]. 2012:1169—1174
- [11] 王琼,刘美万,任伟建,等. 无人机航迹规划常用算法综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2019, 37(1):58—67
WANG Q, LIU M W, REN W J, et al. Overview of Common Algorithms for UAV Path Planning [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2019, 37(1):58—67(in Chinese)
- [12] GURUJI A K, AGARWAL H, PARSEDIYA D K. Time-Efficient A* Algorithm for Robot Path Planning [J]. Procedia Technology, 2016(23):144—149
- [13] 成怡,王贇,修春波. 一种改进 RRT 算法在路径规划中的应用研究[J]. 控制工程, 2020, 27(3):567—571
CHENG Y, WANG Y, XIU C B. Application of an Improved RRT Algorithm in Path Planning [J]. Control Engineering of China, 2020, 27(3): 567—571 (in Chinese)
- [14] 王凯,张维,周德新. 基于四旋翼飞行器的飞行航迹规划方法研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(5):84—88
WANG K, ZHANG W, ZHOU D X. Research on Flight Path Planning Algorithms Based on Four-rotor Air

- Vehicle[J]. Computer Simulation, 2014, 31(5):84—88 (in Chinese)
- [15] 李磊,叶涛,谭民,等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002(5):475—480
LI L, YE T, TAN M, et al. Present State and Future Development of Mobile Robot Technology Research[J]. Robot, 2002(5):475—480(in Chinese)
- [16] 徐娜,陈雄,孔庆生,等. 非完整约束下的机器人运动规划算法[J]. 机器人, 2011, 33(6):666—672
XU N, CHENG X, KONG Q S, et al. Motion Planning for Robot with Nonholonomic Constraints[J]. Robot, 2011, 33(6):666—672(in Chinese)
- [17] 王明明,夏学知. 复杂环境下无人飞行器航路规划技术研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(7):32—37+136
WANG M M, XIA X Z. UAV Path Planning Technology in Complex Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(7):32—37+136(in Chinese)
- [18] 高晓燕,韩庆田. 基于改进RRT算法的UAV航迹规划与优化研究[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(1):256—261
GAO X Y, HAN Q T. Path Planning and Optimization of UAV Based on Improved RRT Algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(1):256—261(in Chinese)

Research on Path Planning of Gas Pipeline Inspection Based on Multi-rotor UAV

LIU Kai¹, QIN Feng¹, XU Hao², YUAN Zhi-xiang¹

(1. School of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, Anhui Ma'anshan 243032, China;

2. School of Mathematics & Physics, Anhui University of Technology, Anhui Ma'anshan 243032, China)

Abstract: In order to solve the problem of multi-rotor UAV quickly avoiding obstacles during the inspection process of industrial gas pipelines, an improved algorithm based on Rapidly-exploring Random Tree (RRT) is proposed, aiming at the problems of high randomness, slow convergence speed and long and tortuous planning paths of traditional RRT algorithms, combined with the characteristics of the space environment. Two aspects including random point sampling and path optimization have been improved. First, this paper sets the value range of random sampling points, then introduces the target bias sampling strategy to guide the expansion direction of the random tree, and finally cuts and smoothes the generated path. The simulation experiment is compared with traditional RRT algorithm and heuristic RRT algorithm with path correction in different digital analog maps. The experimental result shows that the improved RRT algorithm can quickly generate a short and smooth obstacle avoidance path when performing gas pipeline inspection tasks.

Key words: UAV; gas pipeline; RRT; obstacle avoidance

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

刘凯,秦锋,徐浩,等. 基于多旋翼无人机的输气管道巡检路径规划研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(6):34—41

LIU K, QIN F, XU H, et al. Research on Path Planning of Gas Pipeline Inspection Based on Multi-rotor UAV[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(6):34—41