



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 基于RRT的无人机动态航路规划算法

顾子侣, 刘宇, 孙文邦, 岳广, 孙商文

引用本文

顾子侣, 刘宇, 孙文邦, 岳广, 孙商文 [基于RRT的无人机动态航路规划算法](#) [J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 220700127-5.

GU Zilyu, LIU Yu, SUN Wenbang, YUE Guang, SUN Shangwen. [UAV Dynamic Route Planning Algorithm Based on RRT](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 220700127-5.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

**Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)**

### [融合内容相似度与多特征计算的个性化微博推荐模型](#)

Personalized Microblog Recommendation Model Integrating Content Similarity and Multi-feature Computing

计算机科学, 2020, 47(10): 97-101. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190700073>

### [基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型及其应用](#)

Three-way Decision Models Based on Intuitionistic Hesitant Fuzzy Sets and Its Applications

计算机科学, 2020, 47(8): 144-150. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190800041>

### [基于分支定界法的机场终端区单一进离场程序设计优化](#)

Single Departure and Arrival Procedure Optimization in Airport Terminal Area Based on Branch and Bound Method

计算机科学, 2020, 47(6A): 552-555. <https://doi.org/10.11896/JsJcx.190600018>

### [基于词向量融合的遥感场景零样本分类算法](#)

Word Vectors Fusion Based Remote Sensing Scenes Zero-shot Classification Algorithm

计算机科学, 2019, 46(12): 286-291. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.181202257>

### [基于PG-RRT算法的机器人路径规划](#)

Path Planning of Mobile Robot Based on PG-RRT Algorithm

计算机科学, 2019, 46(4): 247-253. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.039>

# 基于 RRT 的无人机动态航路规划算法

顾子偲<sup>1</sup> 刘宇<sup>1</sup> 孙文邦<sup>1</sup> 岳广<sup>2</sup> 孙商文<sup>3</sup>

1 中国人民解放军空军航空大学 长春 130022

2 78102 部队 成都 610000

3 32072 部队 北京 100089

(3222608143@qq.com)

**摘要** 针对传统航路规划算法存在速度慢、航路可飞性差、动态调整能力不足的问题,提出一种基于改进快速扩展随机树(Rapidly Exploring Random Tree, RRT)的无人机动态航路规划算法。首先,引入 RRT 方法进行全局航路规划,同时为加快算法收敛,在随机树待扩展节点的选取上引入目标启发信息,并在新节点生成和添加过程中融入无人机动力学约束,确保生成的航路具有现实可飞性;其次,为了应对突发威胁情况,提出一种动态扩展随机树的方法来对原有随机树进行剪枝和重构,进而快速避开威胁,生成一条安全航路。实验结果表明,相较于传统 RRT 算法,改进算法的规划速度提升约 20%,节点扩展数减少 32%,且规划所得航路符合无人机基本动力学约束条件;当面对突发威胁时,其可以快速进行航路动态调整,实现航路重规划。

**关键词**: 航路规划;快速扩展随机树;目标启发函数;无人机动力学约束

**中图分类号** V279+.2

## UAV Dynamic Route Planning Algorithm Based on RRT

GU Ziyu<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, SUN Wenbang<sup>1</sup>, YUE Guang<sup>2</sup> and SUN Shangwen<sup>3</sup>

1 Aviation University of PLA Air Force, Changchun 130022, China

2 78102 Troops, Chengdu 610000, China

3 32072 Troops, Beijing 100089, China

**Abstract** Aiming at the problems of slow speed, poor flight ability and insufficient dynamic adjustment ability in traditional route planning algorithms, a dynamic route planning algorithm for UAV based on improved rapidly exploring random tree (RRT) is proposed. Firstly, when the RRT method is introduced for global route planning, in order to accelerate the convergence speed of the algorithm, target heuristic information is introduced in the selection of random tree nodes to be expanded, and UAV dynamic constraints are incorporated in the generation and addition of new nodes to ensure that the generated route has realistic flight ability. Secondly, considering the emergent threat, a method of dynamically expanding random tree is proposed to prune and reconstruct the original random tree, so as to avoid the threat quickly and generate a safe route. Experimental results show that compared with the traditional RRT algorithm, the improved algorithm can improve the planning speed by about 20% and reduce the number of nodes by 32%, and the planned route conforms to the basic dynamics constraints of UAV. In addition, when facing emergent threats, the route can be dynamically adjusted quickly to achieve route re-planning.

**Keywords** Route planning, Rapidly exploring random tree, Objective heuristic function, UAV dynamic constraints

## 1 引言

随着战争节奏的加快以及航空军事行动时效性要求的提高,无人机必须具备应对突发任务的紧急出动以及根据实时环境信息进行航迹重规划的能力,这对航路规划算法的速度和实时性提出了很高的要求。学者们对此做了大量的研究工作,提出了不少解决方案<sup>[1-2]</sup>。Tang 等<sup>[3]</sup>将众多复杂环境约束与无人机能约束结合,构建出三维航路规划模型,之后设计多层扩展 A\* 算法实现全局静态规划,并提出基于最优引导点的动态航路规划,实现了三维地理场景的无人机航迹动态规划。然而该算法计算量仍很大,且网格单元的大小及

垂直方向的分层高度大小影响算法的精度。Liao 等<sup>[4]</sup>根据无人机自身约束对真实地形环境采用均化网格的方法进行地形建模,再采用航路点交叉和网格搜索代替航路点搜索的方法来对蚁群算法进行改进,最后完成了真实地形下救援航路的规划。然而由于实际规划效果较为依赖代价函数,因此当环境较为复杂时,算法收敛时间长且容易陷入局部最优。

RRT 算法是 Lavelle 教授于 1998 年提出的一种采用增量方式增长的随机采样算法<sup>[5]</sup>。该算法具有以下优点:1)通过随机采样点,可搜索整个状态空间,具有概率完备性;2)扩展速度较快,空间搜索效率高;3)通过碰撞检测的方式来避开障碍物威胁,避免了对复杂环境空间的建模;4)算法参数少、

基金项目:全军军事类研究生课题(DSSQ910252018010)

This work was supported by the Military Postgraduate Projects of the Army of China(DSSQ910252018010).

通信作者:刘宇(3222608143@qq.com)

结构简单,容易添加非完整约束条件。因此,不少学者将其引入具有非完整约束和多维状态空间的航路规划问题中<sup>[6-7]</sup>。如 Zhang 等<sup>[8]</sup>根据预警机的技战术特性,对经典 RRT 算法进行综合改进,实现航路实时规划。然而,该算法针对的飞行环境较为简单,仅在二维空间进行规划。Li 等<sup>[9]</sup>在全球航迹的基础上,根据突发威胁,重新确定局部航迹起点和终点,进而在局部利用 RRT 算法进行航路重规划,有效避开了突发威胁。然而,算法未结合无人机动力学特点,使得生成的航路可飞性不高。Yin 等<sup>[10]</sup>通过高斯函数模拟生成的山峰模型作为主要威胁因素,并结合无人机动力学约束和最短航迹约束来对 RRT 算法中节点的扩展方式进行改进,实现了无人机在三维环境中的快速航路规划,但对航路面临的威胁因素考虑不足,未针对突发威胁因素作进一步分析。

结合已有研究成果,本文首先在 RRT 算法中待扩展节点的选取方式上引入目标启发信息,改进随机树生长的盲目性,提高规划速度;之后,将无人机动力学约束融入新节点的生成和添加中,增强航路的现实可飞性。针对出现突发威胁的情况,提出动态扩展随机树的思想,通过随机树进行剪枝和重构的方式,使航路有效避开突发威胁。

## 2 任务空间建模

无人机航路规划问题可以看作在满足无人机机动性能约束的前提下,从给定规划空间内探索得到一条连接起点和终点的无威胁路径<sup>[11]</sup>。起伏的地形环境是规划空间的主要构成,为真实反映航路飞行时的地形起伏状况,可通过对飞行区域经纬度及高程数据信息进行建模仿真来实现。各大官方数据库提供了各区域内的地形数据文件下载,下载得到的地形数据文件可以根据文件编码格式通过 matlab 编程或者直接通过 Google Earth 等商业软件来提取出其中的经纬度和高程数据信息,构成大地坐标系。在大地坐标系下,不同纬度处的相同经度间隔距离不固定,且不同经度处的相同纬度间隔的距离亦是如此。可以在保证能反映实际地形起伏的情况下,对地形数据进行坐标变换,将其转换成空间直角坐标系下的航路规划问题,如图 1 所示。

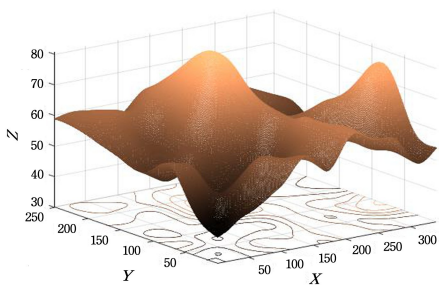


图 1 三维地形建模  
Fig. 1 3D terrain modeling

另外,无人机航路飞行中常面临来自诸多方面的威胁,其中敌方探测雷达是最常见的威胁因素之一<sup>[12]</sup>。雷达最大探测距离  $R_{\max}$  可表示为:

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_r L_t F_r k T B D_d} \right]^{1/4} \quad (1)$$

其中,  $P_t$  为雷达发射功率,  $G_t$  和  $G_r$  表示雷达发射和接收天线的增益,  $\lambda$  为发射波波长,  $\sigma$  为探测目标平均截面积;  $L_r$  和  $L_t$  为馈线损耗,  $F_r$  为接收机噪声系数,  $K$  为波尔茨曼常数,  $T$  为

绝对温度,  $B_r$  为接收机带宽,  $D_d$  为检测端识别常数。对于一部特定的雷达,其最大探测距离一般为定值,以其最大探测距离(需要根据地形建模时的坐标转换关系进行相应折算)为半径建立雷达威胁模型,如图 2 所示。

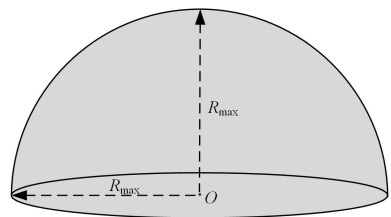


图 2 雷达威胁建模  
Fig. 2 Radar threat modeling

## 3 基本 RRT 算法

RRT 算法的基本思想是通过不断扩展叶节点的方式来搜索整个规划空间,直至随机树中的叶节点到达目标区域时,扩展停止,然后通过节点回溯便可找到一条由起始点到目标点的可行路径。如图 3 所示,该算法具体实施步骤如下:

- (1) 将起点  $q_{\text{start}}$  加入到随机树  $T$ ;
- (2) 在规划空间中随机产生采样点  $q_{\text{rand}}$ ;
- (3) 在随机树  $T$  中找出距离  $q_{\text{rand}}$  最近的子节点,并将其作为待扩展节点  $q_{\text{near}}$ ;
- (4) 从  $q_{\text{near}}$  向  $q_{\text{rand}}$  方向延伸一定步长  $\epsilon$ , 得到节点  $q_{\text{new}}$ ;
- (5) 检测路径段  $q_{\text{near}}q_{\text{new}}$  是否存在障碍物威胁,若存在,返回到步骤(2),否则将  $q_{\text{new}}$  添加到随机树  $T$  中,随机树完成一次搜索拓展。

重复步骤(2)–(5),直至随机树扩展到目标点或目标点附近,跳出循环,回溯得到可行路径。

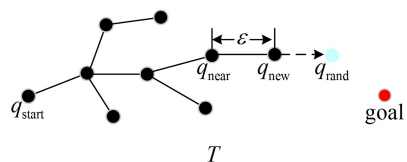


图 3 RRT 算法节点扩展示意图

Fig. 3 Schematic diagram of RRT algorithm node expansion

## 4 基于 RRT 的无人机航路规划

RRT 算法较为强大的空间探索能力以及无需进行系统建模和搜索区域几何划分的优点,使其具备解决复杂高维空间中航路规划问题的潜质。然而传统 RRT 算法在节点扩展时较为盲目,不仅影响算法收敛速度,还导致生成的路径过于弯曲曲折,不具备航路可飞性。因此,本文在随机树扩展方式上融入目标启发信息和无人机动力学约束来对算法进行适当改进,以提高算法的规划速度;另外,针对突发威胁情况,提出一种动态扩展随机树的思想,进行局部路径重规划。

### 4.1 引入目标启发信息

传统 RRT 算法,将扩展随机树中距离采样点距离最小的节点作为待扩展节点,即待扩展节点完全由采样点所处的空间位置来决定。由于每轮循环中,采样点都是随机产生的,因此待扩展节点的选取也具有非常大的随机性;甚至当扩展随机树已经快接近目标点时,待扩展节点选取的随机性,也会导致树中各个节点被选取作为待扩展节点的概率相同。这会

使得树向四周等概率进行扩展,导致生成大量无效节点。由于每次需要计算扩展树中所有节点与采样点的距离来确定待扩展节点,因此这进一步增加了算法的内存计算量。

通过借鉴 A\* 算法中启发距离函数的思想<sup>[13]</sup>,提出了一种目标启发的待扩展节点选取策略。首先,设随机树  $T$  上一节点  $q$  与采样点  $q_{rand}$  的距离为  $H(i)$ ,与目标点的距离为  $G(i)$ ,并令  $F(i)$  为两者距离之和,则:

$$H(i) = \text{dist}(q_{rand}, q_i) \quad (2)$$

$$G(i) = \text{dist}(q_{goal}, q_i) \quad (3)$$

$$F(i) = H(i) + G(i) \quad (4)$$

最后,将具有复合距离  $F(i)$  最小值的节点作为待扩展节点,记为  $q_{near}$ 。图 4 给出了两种方法选取待扩展节点的原理示意图,可以看出,启发距离函数  $F(i)$  的引进,既能保证随机树扩展具有一定的随机性,又可以增大距离终点较近节点被选取作为带扩展节点的概率,减少无效节点的数量,进而达到降低搜索盲目性和提高算法计算速度的目的。

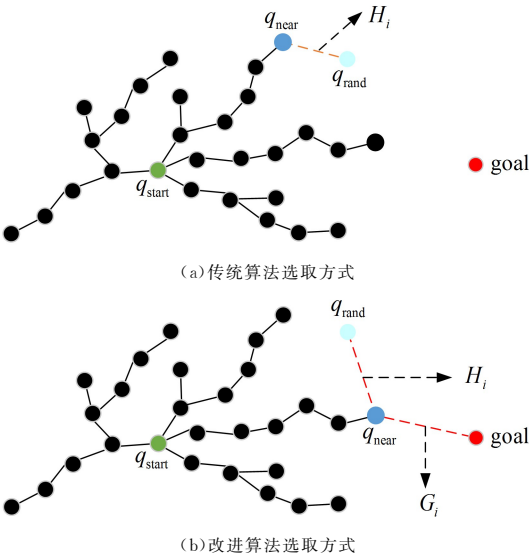


图 4 待扩展节点选取方式

Fig. 4 Method for selecting nodes to be expanded

## 4.2 引入约束条件

为使航路具有可飞性,须保证各航路段满足基本的动力学约束,其中包括最小惯性距离、最大拐弯角、最大爬升(俯冲)角、最低飞行高度等<sup>[14]</sup>。下面将基本约束融入到新节点生成和添加过程中。

### 4.2.1 最小惯性距离约束

最小惯性距离  $L$  是指无人机在开始改变飞行姿态前必须保持原有方向飞行的最短距离。为满足该约束,在扩展产生新节点时,将无人机最小惯性距离作为节点的扩展步长。另外,受文献<sup>[15]</sup>提出的目标偏置采样思想的启发,对待扩展节点的生长方向作如下改进:设置目标偏置概率为  $p$  ( $0 < p < 1$ ),另外产生一个  $0 \sim 1$  的随机数,若值大于  $p$  则选择目标点作为生长方向,反之选择  $q_{rand}$  作为生长方向。

$$q_{new} = \begin{cases} q_{near} + L \cdot \frac{(q_{goal} - q_{near})}{\|q_{goal} - q_{near}\|}, & \text{rand}(1) \geq p \\ q_{near} + L \cdot \frac{(q_{rand} - q_{near})}{\|q_{rand} - q_{near}\|}, & \text{rand}(1) < p \end{cases} \quad (5)$$

设  $q_{near}$  坐标为  $(x_{near}, y_{near}, z_{near})$ ,  $q_{near}$  的父节点  $q_{near-parent}$  坐标为  $(x_{near-parent}, y_{near-parent}, z_{near-parent})$ ,  $q_{new}$  坐标为  $(x_{new}, y_{new},$

$z_{new}$ )。在得到  $q_{new}$  后,需满足以下约束条件才可以将新节点  $q_{new}$  添加到随机树  $T$  中。

### 4.2.2 最低飞行高度约束

最低飞行高度  $H_{min}$  指允许无人机飞行的最低离地高度。如图 5 所示,通过新节点的横纵坐标可得到该点正下方对应的地形高度为  $map(x_{new}, y_{new})$ ,因此该约束可表示为:

$$\Delta H = z_{new} - \text{map}(x_{new}, y_{new}) \geq H_{min} \quad (6)$$

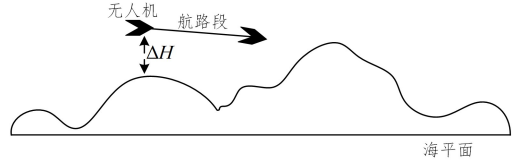


图 5 飞行高度约束

Fig. 5 Flight height constraint

### 4.2.3 最大转弯角约束

如图 6 所示,设航路段  $q_{near-parent} q_{near}$  和  $q_{near} q_{new}$  在水平面的投影向量分别为  $b_1, b_2$ ,则:

$$b_1 = (x_{near} - x_{near-parent}, y_{near} - y_{near-parent}) \quad (7)$$

$$b_2 = (x_{new} - x_{near}, y_{new} - y_{near}) \quad (8)$$

无人机从当前航路段进入下一航路段的转弯角  $\beta$  应小于其允许的最大转弯角  $\beta_{max}$ ,即:

$$\cos \beta = \frac{b_1 \cdot b_2}{\|b_1\| \cdot \|b_2\|} \geq \cos \beta_{max} \quad (9)$$

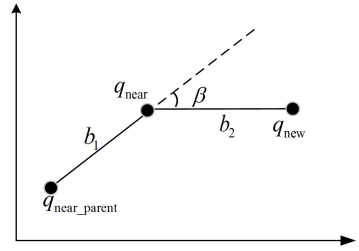


图 6 转弯角约束

Fig. 6 Turnangle constraint

### 4.2.4 最大爬升(俯冲)角

爬升(俯冲)角  $\varphi$  是无人机在飞行航路的垂直平面内上升(下滑)的角度。如图 7 所示,根据最大爬升角  $\varphi_{max}$  约束,有:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{|z_{new} - z_{near}|}{\sqrt{(x_{new} - x_{near})^2 + (y_{new} - y_{near})^2}} \right] \leq \varphi_{max} \quad (10)$$

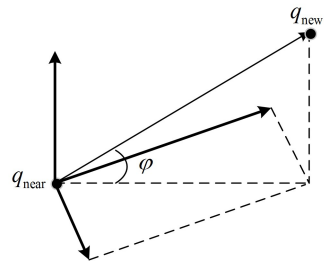


图 7 爬升(俯冲)角约束

Fig. 7 Angle of climb(dive) constraint

## 4.3 动态扩展随机树

动态扩展随机树是指当产生突发威胁,与已有随机树发生碰撞,并影响原有航路安全时,对随机树进行修剪,重新搜索路径的过程。图 8 显示了航路在二维平面投影下的剪枝及动态重规划过程。

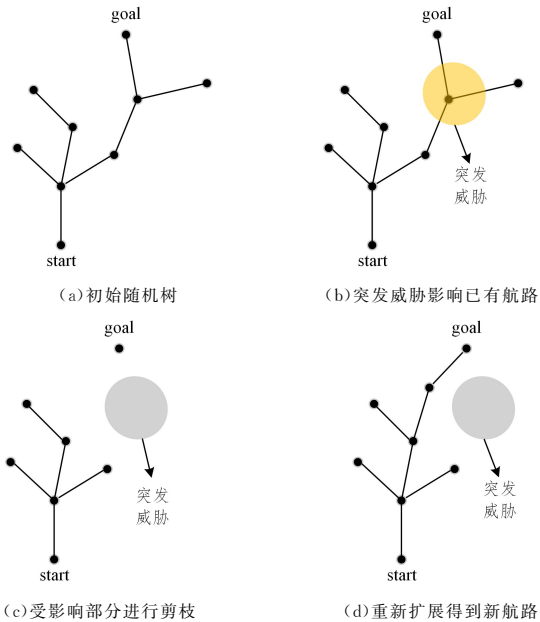


图 8 动态扩展随机树构造示意图

Fig. 8 Schematic diagram of dynamically expanded random tree construction

图 8(a)为按照改进 RRT 算法搜索得到的初始路径示意图。当搜索空间出现突发威胁,并且影响初始航路安全时,如图 8(b)所示。根据突发威胁的位置和影响范围确定出所有受威胁的枝和节点,对随机树进行修剪,去除受威胁影响的部分,如图 8(c)所示。此时剩下的节点和边保证是安全的,但是随机树不一定能够到达目标点。使随机树继续生长,直到安全地扩展到达目标点,回溯得到一条避开突发威胁的安全航路,如图 8(d)所示。动态扩展随机树充分利用历史节点扩展信息的优点,同时又可以根据突发威胁对随机树的具体影响情况进行合理的剪枝操作,保留有效部分,大大减少了重规划时搜索节点的资源消耗,有利于提高航路规划速度。

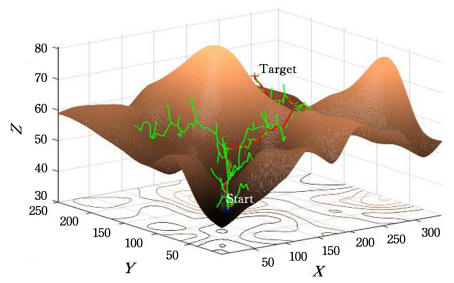
## 5 实验结果及分析

### 5.1 仿真环境及实验参数设置

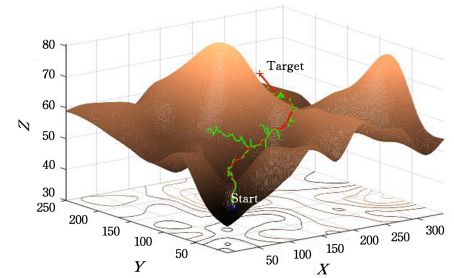
为验证算法可行性,在 MATLAB R2016b 中进行实验。实验所用计算机配置如下:处理器为 Intel Core-i5-7200U,主频为 2.71GHz,内存为 12GB,操作系统为 64 位 Windows 10。另外,突发威胁半径为 2000m 无人机最小惯性距离设置为 150m,最低飞行高度为 150m(大地坐标系下),最大转弯角和最大爬升(俯冲)角均为  $45^\circ$ ,  $p$  为 0.5。

### 5.2 结果分析

图 9 为利用基本 RRT 算法和改进算法得到的初始航路对比图,其中,Start 和 Target 分别为航路起点和目标点,绿色实线为随机树的生长树枝,红色实线表示最终经节点回溯所得的航路。从图中可以看出,相较于基本 RRT 算法而言,改进算法随机树的扩展分支较少,即产生的无效节点较少。这是因为本文算法摒弃了传统 RRT 算法只根据随机采样点来确定待扩展节点的方式,而是将节点距目标点以及距随机采样点这两者距离之和的最小值作为待扩展节点的选取依据,使得树上越靠近目标的节点被选取作为待扩展节点进行生长的概率越大;另外,以概率  $p$  选取目标点作为生长方向的方式,同样也保证了算法在具有一定概率完备性的同时,大大减少了随机树生长的盲目性,有利于提高规划速度。



(a)传统 RRT 算法



(b)改进算法

图 9 航路搜索示意图

Fig. 9 Schematic diagram of route search

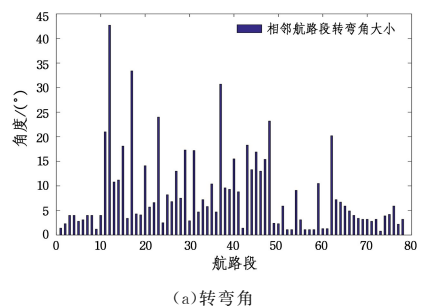
表 1 列出了两种算法在同等环境下运行 100 次所得到的部分参数统计数据。从中可看出,相比于基本 RRT 算法,改进算法规划时间减少 20%左右,节点扩展数减少 32%左右。

表 1 规划性能对比

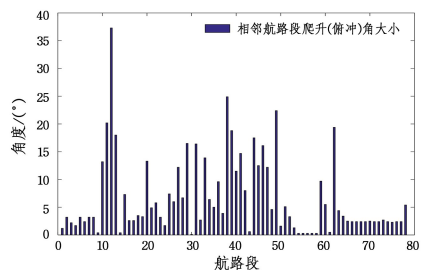
Table 1 Planning performance comparison

算法	时间/s	扩展节点数
基本 RRT 算法	6.1	269
改进算法	4.8	181

图 10 显示了各航路点距地面高度、各航路点之间转弯角以及俯仰角的大小(数据皆为 100 次实验的平均值)。



(a)转弯角



(b)爬升(俯冲)角

图 10 相邻航路段间角度变化示意图

Fig. 10 Diagram of angle changes between adjacent route segments

从统计图中可以看出,规划所得航路点所在高度均大于最低飞行高度,各航路点之间的俯仰角、转弯角均在最大角度

约束范围之内,满足基本的无人机动力学约束,具有一定的现实可飞性。

图 11 为原有航路出现突发威胁时,应用动态扩展随机树的方式进行航路动态调整来避开威胁区域,重新规划得到安全

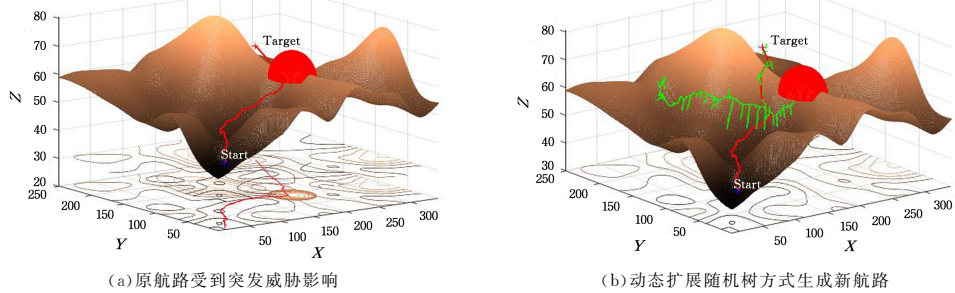


图 11 突发威胁下航路动态调整示意图

Fig. 11 Schematic diagram of route dynamic adjustment under emergent threat

**结束语** 本文针对无人机航路规划的实时性问题,提出了一种基于 RRT 方法的无人机动态航路规划算法。该算法一方面继承了 RRT 方法较强的空间探索及环境适应能力,并融入目标启发和无人机动力学约束信息来改善随机树中待扩展节点选取、新节点生成以及新节点添加的方式,既能提高算法收敛速度,又使生成的航路现实可飞;另一方面,针对航路出现突发威胁的情况,提出动态扩展随机树的思想对已有随机树进行剪枝和重构,重新生成安全航路。仿真结果表明本文算法在规划速度及得到的航路可飞性方面均具有较好优势,并在原有航路受威胁影响时能进行动态航路规划。

## 参考文献

- [1] BAO SH T, LU Y G. Research on path planning of UAV based on ant colony algorithm with angle factor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1627(1): 1-8.
- [2] YANG Y, WANG S C, NAN Y. Optimal algorithm of searching route for large amphibious aircraft[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 963-971.
- [3] TANG J. UAV flight path dynamic planning of southwest traffic based on 3D geographical scene[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [4] LIANG X, WANG H L, MENG G L, et al. Path planning for UAV under three-dimensional real terrain in rescue mission[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 21-26.
- [5] LAVALLE S M. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning[R]. Computer Science Department, Iowa State University, 1998.
- [6] GAO S, AI J L, WANG Z H. Mixed population RRT algorithm for UAV path planning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(1): 101-107.
- [7] YANG H, JIA Q, ZHANG W. An environment potential field based RRT algorithm for UAV path planning[C]//Proc. of the 37th Chinese Control Conference. 2018: 9922-9927.
- [8] ZHANG Y, REN B A, CHEN J. An Modified RRT-Based Real-Time Route Planning Algorithm for Early Warning Airplane[J]. Computer Simulation, 2016, 33(9): 106-112.

航路的示意图。从图中可以看出,重新生成的航路有效避开了突发威胁,且大部分航路段与原航路没有产生过大差异,减少了航路的变化频次和算法的计算量。这是由于动态扩展随机树的剪枝和重构思想,充分保留了随机树的历史扩展信息。

- [9] LI W G, SUN S Y, LI J Z, et al. UAV dynamic path planning algorithm based on segmented optimization RRT[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(8): 1786-1793.
- [10] YIN G Y, ZHOU S L, WU Q P. Efficient Path Planning Algorithm in Three Dimensions for UAV[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(4): 563-569.
- [11] ROBERGE V, TARBOUCHI M, LABONTE G. Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(5): 2105-2117.
- [12] YAN S K, PAN F. Research on Route Planning of AUV Based on Genetic Algorithms[C]//IEEE International Conference on Un-manned Systems and Artificial Intelligence(ICUSAD). 2019: 184-187.
- [13] ZHANG Z, WU J, DAI J Y, et al. Fast penetration path planning for stealth UAV based on improved A-Star algorithm[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 248-258.
- [14] GUO C. Research on 3D Flight path Planning Algorithm of UAV Based on RRT[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2015.
- [15] ZHANG W M, FU S X. Mobile robot path planning based on improved RRT\* algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2021, 49(1): 31-36.



**GU Zilyu**, born in 1997, postgraduate. His main research interests include route planning and so on.



**LIU Yu**, born in 1968, postgraduate, professor. His main research interests include route planning and so on.