

控制与决策

Control and Decision

城市低空环境中多旋翼无人机在线航线规划方法

吴宇, 胡莘婷

引用本文:

吴宇, 胡莘婷. 城市低空环境中多旋翼无人机在线航线规划方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 2851–2860.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0557>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于滚动时域粒子群优化的视频去雾算法

Receding horizon particle swarm optimization based video defogging algorithm

控制与决策. 2021, 36(9): 2218–2224 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1183>

面向多目标侦察任务的无人机航线规划

UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions

控制与决策. 2021, 36(5): 1191–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1284>

输入受限的多旋翼无人机轨迹跟踪鲁棒正定不变集设计

Design of robust positively invariant set for trajectory tracking of multi-rotor UAV with input saturation

控制与决策. 2021, 36(4): 857–866 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0880>

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

基于深度学习的四旋翼无人机地面效应补偿降落控制设计

Robust landing controller design for quadrotor unmanned aerial vehicle ground effects compensation via deep learning

控制与决策. 2021, 36(11): 2637–2646 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0184>

城市低空环境中多旋翼无人机在线航线规划方法

吴宇^{1†}, 胡莘婷²

(1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 2. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要: 为无人机规划一条从起点出发到达指定目标点的航线是实现无人机各种应用的重要前提. 飞行过程中, 无人机应具备对于各种动态变化快速响应并重新规划航线的能力. 针对多旋翼无人机在飞行过程中可能遇到的各种动态变化, 研究其在离散城市环境下的在线航线规划问题. 首先, 建立离散环境模型, 并基于此模型定义无人机飞行规则; 随后, 建立无人机航线规划模型, 包括对航点的约束条件及航线规划的指标; 其次, 将各种动态变化按照其对无人机的不同影响进行分类, 分为固定禁飞区、合作无人机、非合作无人机 3 类, 并针对不同种类动态变化特点, 分别提出重新规划三维航线、改变飞行速度、滚动优化三维航线 3 种在线航线规划策略及综合应对策略; 然后, 改进快速随机扩展生成树算法(RRT), 使其适合于离散城市环境. 仿真实验中分别验证了所提出的在线航线规划策略在应对单一动态变化及组合动态变化时的有效性.

关键词: 多旋翼无人机; 城市环境; 动态变化; 在线航线规划; 快速随机扩展生成树算法

中图分类号: V355.1

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0557

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 吴宇, 胡莘婷. 城市低空环境中多旋翼无人机在线航线规划方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2851-2860.

An online route planning method for multi-rotor drone in urban environments

WU Yu^{1†}, HU Xin-ting²

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A safe and efficient route from the start point to destination is a precondition for drone to realize its various applications. During the flight, the drone must be able to respond to various dynamic changes quickly and replan its route. For this purpose, the online route planning problem of multi-rotor drone is studied in the discrete urban environments in this paper. The model of discrete urban environments is established, based on which the flight rules of multi-rotor drone are defined. The route planning model is developed, and the constraints on path points and the index of evaluating the route planning are designed. According to the different influences of dynamic changes on multi-rotor drone's flight, the dynamic changes are classified into three groups, i.e., fixed no-fly zone, cooperative drone and non-cooperative drone. Three strategies (replanning 3D route, changing flight velocity and roll optimization of 3D route) are proposed to cope with different types of dynamic changes. The proposed strategies are also valid when addressing the combined types of dynamic changes. The rapid-exploring random tree (RRT) algorithm is used to generate the route, and some modifications are carried out to make it suitable for the discrete urban environments. The validity of the proposed three online route planning strategies are verified in simulations, and it is also effective when the multi-rotor drone is facing more than one type of dynamic change. Simulation results demonstrate that the route generated online can avoid the bad effects brought by the dynamic changes.

Keywords: multi-rotor drone; urban environments; dynamic change; online route planning; RRT algorithm

0 引言

由于重量轻、操作方便、对起降场地要求少等特点, 小型无人机, 特别是多旋翼机已被广泛应用于

各行各业. 农业上, 无人机可用于播种、喷洒农药等任务^[1]; 工业上无人机可用于故障排查、检测等, 保证设备等安全运行^[2]; 无人机航拍、自拍的成熟应用也

收稿日期: 2020-05-12; 修回日期: 2020-11-10.

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2020jcyj-msxmX0602); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020 CDJ-LHZZ-066).

[†]通讯作者. E-mail: cqwu@cqqu.edu.cn.

为人们带来了新的娱乐方式^[3]. 在应对抗震救灾、疫情防护等公共事件方面,与地面交通相比,无人机对基础设施要求低、调度灵活、精确到达等优点使其越来越多地被应用于治安维护^[4]、物资运送、疫情检测等任务. 无人机的普及使用和其带来的便利使得未来低空空域开放成为可能,世界各发达国家也在积极探索低空空域开放的合理性,制定相应的政策法规以实现低空空域的科学管理,保证无人机飞行安全^[5]. 城市环境作为小型无人机的重要应用场景,可有效减轻地面交通压力和环境污染,提高任务完成效率,在部分地区已得到推广.

然而,飞行无人机数量骤增、城市建筑物密集、环境与任务动态变化等因素会影响无人机的安全高效运行,使得为无人机提前规划的离线航线不可用. 因此,设计城市环境下无人机在线航线规划方法,使其对飞行过程中出现的各种动态变化作出快速有效的响应,对于提高无人机的自主飞行能力具有重要意义.

城市低空环境具有空间狭小、障碍密集且不规则等特点,无人机在城市环境中飞行需要规避障碍物. 文献[6-7]将城市建筑障碍物简化为高低不一的多边形棱柱、长方体、椭圆柱体,给出了表征障碍物外形特点的方程组表达式,文献[8]则将各种形状的障碍物用栅格表示,并将障碍物信息储存在数字地图中. 对于已知障碍物,只需检测无人机是否被障碍物所在空间包围^[9-10]. 对于未知障碍物,则需要提前对其进行探测和预测^[11]. 文献[12]基于高斯过程建立了地图,用于探测未知密集环境,随后生成了包含碰撞概率信息的航迹以实现避障. 障碍物概率地图也可以通过部分先验知识来建立,文献[13]基于混合可观测的马尔可夫决策过程提出了一个规划模型,将概率地图信息传播至未来一段航迹以辅助当前的决策.

城市低空环境空间狭小和障碍密布的特点对航线规划效率提出了较高的要求,否则会降低无人机飞行安全,造成严重后果. 文献[7]提出一种城市环境中的小型无人机快速航迹规划方法,用螺旋线与直线组合构建近似最优航迹. 文献[8-9]针对城市低空密集不规则环境对无人机飞行安全的挑战,分别提出了基于局部回溯-广度优先和快速扩展随机树的航迹规划算法. 为提高搜索效率,缩短航迹规划时间,文献[14]提出了同步双向A*搜索算法,实现了双向A*算法正向搜索和反向搜索同步进行. 针对环境信息未知的

城市空域,文献[15]提出了一种实时避障与航迹规划方法:首先基于拉盖尔图的基本原理找到多条拟定的在两个建筑物间的飞行通道,随后通过分析各条航迹的安全程度找到最安全的拉盖尔路径作为飞行航迹.

无人机在线航线规划问题的研究重点在于减小运算量. 文献[16]提出了一种顶层的航迹切换算法来减小运算量. 此方法中,首先生成航迹点,然后通过解两点边值问题获得平滑航迹. 文献[17]提出了一种防摆非迭代算法用于求解四旋翼无人机挂载系统的飞行航迹. 元启发式算法已被广泛应用于无人机航迹规划问题中,而此类算法的运算速度决定其是否能够胜任在线规划. 文献[18]对遗传算法和粒子群算法在无人机航迹规划问题中的性能进行了比较,通过并行计算减少程序运行时间. 经过严格的统计方法比较,表明遗传算法能够生成更优的航迹. 另外,滚动优化^[19]也是一种常见的在线航迹规划策略,有时滚动优化也与模型预测控制相结合,为无人机生成未来一段时间内的航迹^[20].

以上研究中,在设计避障策略方面,缺少对各种动态变化的综合考虑,提出的在线航线规划算法大多只针对环境或任务单一变化情形,缺乏能应对复杂动态变化的航线在线规划方法. 在规划效率方面,虽然采用滚动优化策略能够应对各种动态变化,但是却未能针对动态变化的特点,就计算效率和对原航线的更改程度方面而言未必是最高效的策略. 因此,有必要提出面向城市环境的无人机在线航线规划方法,使得无人机能够根据动态变化对其飞行的不同影响作出快速响应,保证其安全高效完成指定任务. 本文的主要创新点如下:

- 1) 基于城市低空环境与无人机飞行规则,建立离散城市环境下无人机航线规划数学模型,包括单机航线规划的约束条件、多机防撞判断准则以及任务指标.

- 2) 将无人机飞行过程中可能遇到的各种动态变化提炼为3类,针对每一类动态变化分别设计在线航线规划策略;并且考虑到多种动态变化同时出现的复杂情况,提出综合应对策略.

- 3) 提出改进的快速随机扩展生成树算法(improved rapid-exploring random tree, IRRT),使其适用于离散城市环境,且满足在线航线规划对计算速度的要求.

1 无人机在线航线规划数学模型

本节首先描述城市低空环境与无人机飞行规则,然后提出航线规划问题中需要考虑的约束条件及评价航线质量的指标,最后对无人机在飞行过程中遇到的各种动态变化进行提炼和分类,体现其对无人机飞行影响的本质。

1.1 城市低空环境及无人机飞行规则描述

整个低空城市环境被分为多个尺寸相同的小正方体^[21],如图1所示。

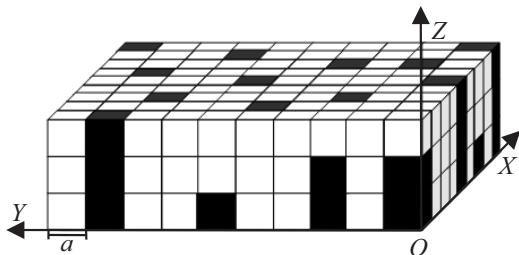


图1 离散城市环境

图1中, a 为小正方体的边长,黑色方块表示不同高度建筑物占据的空间. 为避免与建筑物发生碰撞,无人机只能在白色的空间内飞行. 另外,借鉴民航空管系统中设置飞机离散航点的做法,无人机的航点也设置为离散形式,且只能在图1中白色小正方体的顶点中进行选取,并规定在相邻两航点间无人机只能以直线飞行. 无人机可以选择正方体的一条边、一条面对角线或一条体对角线作为下一航段。

1.2 无人机航线规划约束条件与评价指标

在离散城市环境下,无人机航线规划问题中需要进行优化的是各个航点的位置. 设航点的个数为 N_{max} ,则航点必须满足以下约束条件,才能保证无人机安全飞行:

1) 所有航点必须与建筑物间保持一定距离

$$\sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \geq a. \quad (1)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N_{max}$ 表示航点的编号, $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 是从建筑物占据空间中任意选取的一个点. 规定无人机与建筑物之间的距离应不小于小正方体的边长。

2) 无人机必须能到达指定目标点

$$\begin{aligned} & ((x_{N_{max}} - x_{tar})^2 + (y_{N_{max}} - y_{tar})^2 + \\ & (z_{N_{max}} - z_{tar})^2)^{1/2} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $(x_{tar}, y_{tar}, z_{tar})$ 为目标点位置。

3) 为避免与其他飞行无人机发生碰撞,两架无人机经过相同航点的时间间隔必须大于指定值,即

$$|T_u(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) - T_v(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})| > \Delta t. \quad (3)$$

其中: u 和 v 分别表示两架不同的无人机, $T_u(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 与 $T_v(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 分别为无人机 u 与 v 经过相同航点 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 的时间点, Δt 为定义的安全时间间隔。

4) 两架无人机应避免“交叉相撞”情况的发生。

设 (x_1, y_1, z_1, t_1) 与 (x_2, y_2, z_2, t_2) 为无人机 u 的两个航点的四维航迹信息, (x_3, y_3, z_3, t_3) 与 (x_4, y_4, z_4, t_4) 为无人机 v 的两个航点的四维航迹信息. 虽然两架无人机在其航点处均安全,但是在两航点之间的飞行过程中会发生交叉相撞的情况,此种情况未能包含在式(3)中. 当下式成立时,则认为无人机 u 与 v 交叉相撞:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = x_3 + x_4, \\ y_1 + y_2 = y_3 + y_4, \\ z_1 + z_2 = z_3 + z_4, \\ t_1 < t_4 \text{ or } t_3 < t_2. \end{cases} \quad (4)$$

以上为无人机进行航线规划时必须满足的约束条件. 评价航线规划质量的指标由无人机飞行距离与途径航点个数给出,如下所示:

$$J_{path} = \sum_{i=1}^{N_{max}-1} \|P_{i+1} - P_i\| + \alpha(N_{max} - 1). \quad (5)$$

其中: $\|P_{i+1} - P_i\|$ 表示点 P_i 与点 P_{i+1} 之间的距离,与第2项表示较少的航点个数可减少无人机的转弯次数,有利于其飞行,引入系数 α 使式(5)中的两项具有相同的量纲。

1.3 动态变化的建模

动态变化是指影响无人机沿预定航线飞行的各种外界因素. 引起动态变化的原因可总结为两类:一是环境变化,包括新增的已知或未知禁飞区,以及合作或非合作的其他无人机;二是无人机本身的任务变更. 本文对各种动态变化的概括如图2所示。

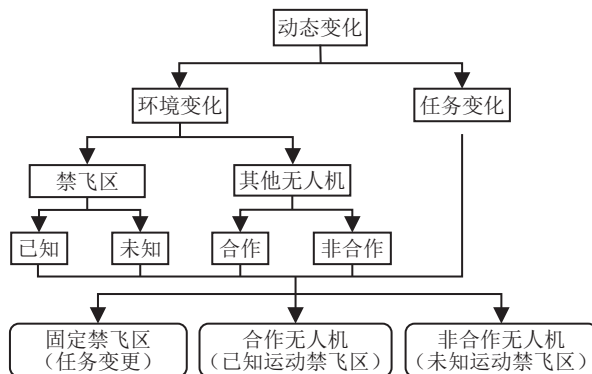


图2 影响无人机飞行的动态变化分类

3)非合作无人机.

非合作无人机通常是指运动规律未知的无人机. 由于其未来的运动状态未知,不能像对待固定禁飞区一样一次性规划完从当前位置到目标点的完整航线. 此时引入滚动优化策略,每次只生成下一个航点. 当当前无人机所在飞行航段的端点与非合作无人机的距离小于预设值 d_{th} 时,启动滚动优化策略,只生成下一个航点. 由于备选航点数量有限,采用枚举法检测备选航点是否可行即可. 非合作无人机的飞行轨迹不遵从离散环境下无人机的飞行规则,为确保当前无人机的飞行安全,引入以下策略检测备选航点是否可行. 以某备选航点为例,无人机备选航点所在的航段被平均分成若干段,需要检测每个等分点与非合作无人机当前位置之间的距离是否大于 d_{safe} 来确保整个飞行过程的安全. 如果任意一个等分点与非合作无人机之间的距离小于 d_{safe} ,则认为此备选航点不可行,应当被舍弃. 在所有的可行备选航点中,对应代价函数值最小的点将会被选中,作为无人机的下一航点,代价函数的设置如下所示:

$$J_{sp} = |x_{sp} - x_{tar}| + |y_{sp} - y_{tar}| + |z_{sp} - z_{tar}|. \quad (6)$$

其中: (x_{sp}, y_{sp}, z_{sp}) 为备选航点的位置, J_{sp} 表示备选航点与目标点在 OX 、 OY 和 OZ 三个方向上的位置差之和. 如果所有的备选航点均不可行,则无人机将在原地悬停等待,直至下一采样时刻再次进行航线规划.

当前无人机成功避开非合作无人机后(两架飞机间的距离大于 d_{th} 时),再考虑建筑物与固定禁飞区的约束,一次性生成从当前位置到目标点的路径.

2.3 组合动态变化下在线航线规划策略

无人机在实际的飞行过程中可能会遇到多类动态变化同时出现的情况,会使得在线航线规划算法变得复杂. 本节研究组合动态变化下的在线航线规划策略. 根据2.2节中的描述,在线航线规划策略可根据不同的标准进行划分:

1)根据策略作用的范围,可分为一次性规划和滚动优化两种方式. 当在某一时刻,无人机同时探测到固定禁飞区与非合作无人机时,只需用滚动优化方式生成无人机下一航点.

2)根据在线航线规划对原航线的改变程度进行划分,即改变飞行速度和改变三维航线. 改变三维航线比改变飞行速度对原飞行计划的影响更大. 当在

某一时刻,无人机同时探测到固定禁飞区与合作无人机时,只需改变其三维航线便可保证飞行安全,无需再改变飞行速度.

综合以上分析,设计出组合动态变化下无人机在线航线规划策略,如图4所示. 图4中,2.2节设计的3种在线航线规划策略分别被简写为策略1、策略2和策略3. 图5包含了2.2节中3类动态变化的所有组合形式,并给出了每种组合形式下的在线航线规划策略. 注意到原地等待至下一决策时刻这一策略只在改变速度或三维航线无效时才采用.

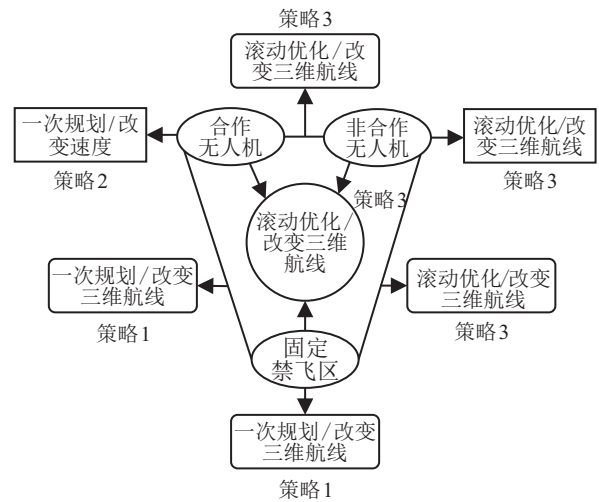


图4 无人机在线航线规划策略总结

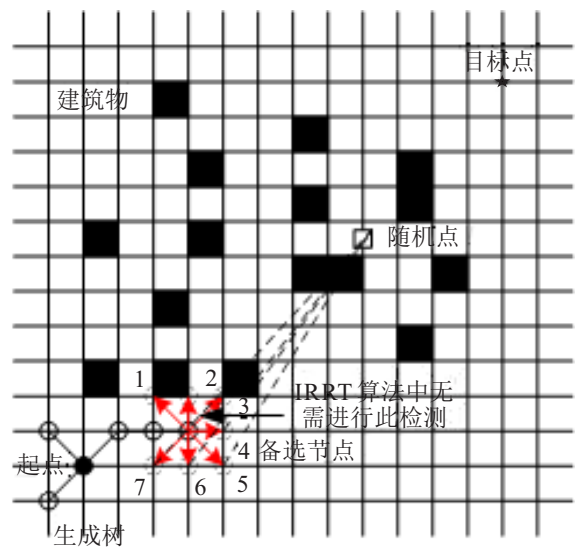


图5 改进RRT算法

2.4 基于改进RRT算法的一次航线生成策略

在3种在线航线规划策略中,由于策略2与策略3中备选飞行速度和下一备选航点数目不多,可采用枚举法得出最优解. 而策略1中需要一次性生成从无人机当前位置到目标点的三维航线,必须设计航线规划算法才能完成. 鉴于RRT算法能够在较短时间内生

成可行航线的特点,其非常适合于在线计算.但RRT算法的标准形式适用于求解连续空间内的航线规划问题,本文对其进行改进,使其适合于离散的城市低空环境,具体描述如图5所示.

假设与随机点距离最近的树节点为 T_N ,所有树节点构成的集合为 T_U ,目标点为 T_D ,则改进RRT算法的伪代码可表示如下.

算法1 无人机在线航线规划的改进RRT算法.

- 1) while $\|T_{\text{new}} - T_D\| > \sqrt{3}a$
- 2) mark = 0
- 3: while mark = 0
- 4) 在空间中生成随机点 T_R
- 5) for $n = 1: \text{length}(T_U)$
- 6) $d(n) = \|T_U(n) - T_R\|$
- 7) end
- 8) $T_N = \text{argmin}(d)$; 设与 T_N 相邻的所有点组成的集合为 T_{sp}
- 9) if $T_{\text{sp}} \neq \emptyset$
- 10) mark = 1
- 11) end
- 12) end
- 13) for $s = 1: \text{length}(T_{\text{sp}})$
- 14) $r(s) = \|T_{\text{sp}}(s) - T_R\|$
- 15) end
- 16) $T_{\text{new}} = \text{arg}\{\min(r)\}$
- 17) end

T_{new} 为新增的树节点,运算符 $\|\cdot\|$ 用于计算两点之间的距离.为加快可行航线的生成速度,每次搜索过程中,以一定概率选取目标点作为随机点进行扩展.随机点的选取可不受离散型框架的约束,在低空空域范围内随机生成.在扩展生成树的过程中,分别计算各可行备选节点(图5中点4、5、6、7为可行备选节点)与随机点之间的距离,选取最小距离对应的备选节点加入生成树,完成一次扩展生成树过程.需要注意的是,在标准RRT算法中,当前节点与备选节点之间需满足无障碍物遮挡的条件才能将备选节点加入到生成树中.而在改进RRT算法中,以上约束已通过定义的无人机飞行规则自动满足.当此次扩展生成树的过程无法添加可行节点时,则重新生成随机点,并重复以上过程,直到将目标点加入到生成树中为止,搜索过程结束,即搜索到由生成树根节点到目标点的一条可行航线,作为无人机在线航线规划的结果输出.

果输出.

2.5 无人机在线航线规划算法流程

以上各节对无人机在线航线规划策略进行了详细介绍,现用伪代码将算法总结如下.

算法2 无人机在线航线规划算法.

输入: 预定的四维航迹信息, $t = 0$, 无人机当前位置信息 P_C .

- 1) while $\|P_C - T_D\| \neq 0$
- 2) if 环境动态变化
- 3) 根据动态变化类型选择在线航线规划策略
- 4) 在线生成航线
- 5) else
- 6) 无人机沿原航线飞行
- 7) end
- 8) 更新 P_C
- 9) $t = t + \Delta T$
- 10) end;
- 11) 无人机已成功到达目标点

无人机起飞后,在每个采样时刻,首先判断其是否已到达目标点.若到达,则任务结束;否则根据周围环境与任务需求确定当前时刻是否需进行在线航线规划以及自主确定应采取的在线航线规划策略.

3 仿真实验与结果分析

为验证所提出无人机在线航线规划算法的有效性与优势,分别设计了3组仿真算例.首先通过与A*算法、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)比较,说明所提出的IRRT算法适用于本问题.第2组仿真中分别验证了所设计的3种在线航线规划策略的有效性.最后设计一个综合仿真实验,将多种动态变化同时加入到无人机飞行过程中,表明所提出的算法能处理复杂动态变化的情况.以上仿真算例中,所考虑的城市低空环境在OX、OY和OZ三个方向上的范围分别为 $[0, 1800]$ m, $[0, 1800]$ m和 $[0, 90]$ m.仿真中涉及到的参数取值如表1所示.

表1 仿真算例中的参数设置

参数	值	参数	值
a	30 m	d_{th}	100 m
Δt	5 s	V_H	15 m/s
ΔT	1 s	V_M	10 m/s
d_{safe}	20 m	V_L	5 m/s

以上所有的仿真算例都是通过配置为Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1630 3.70 GHz的台式机上

运行软件Matlab 2016b编写的程序上得到的结果.

3.1 几种离散航线规划算法的比较

为说明2.4节提出的IRRT算法在求解在线航线规划问题中的优势,引入几种可用于离散环境航线规划的算法(A*算法和ACO算法)进行对比. ACO算法中,种群数量、算法迭代次数均设置为100,启发因子 α 与 β 分别为0.5与1. 信息素蒸发系数 $\rho = 0.7$,信息素增加强度系数 Q 的值设置为起点与终点间的曼哈顿距离,ACO算法的具体步骤可参考文献[22]. 指定起点与目标点分别为(210, 60, 0)与(1 680, 1 710, 90),采用以上3种算法,得到航线规划结果如图6所示.

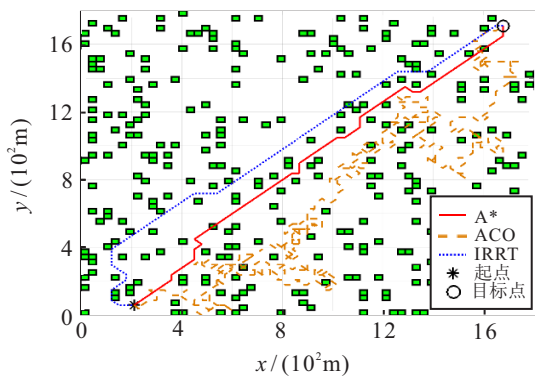


图6 几种在线航线规划算法结果(二维视图)

由图6可以看出,采用ACO算法生成的航线使无人机在飞行过程出现折返,相比于其他两种算法生成的航线质量更差. 表2列出了这3种算法的航线规划结果.

表2 3种算法结果对比

算法	A*	ACO	IRRT
航线长度/m	2 589.2	17 060.0	2 706.1
运算时间/s	20.87	958.55	0.15

由于IRRT算法中有随机因素,每次运行的结果不一定相同,表2中关于IRRT算法的数据是经过10次运算后得到的平均值. 而图6中用IRRT算法生成的航线则是取的这10次运算中的最好结果. 虽然ACO算法中也有随机数存在,但因其生成航线质量与其他两种算法相比相差太多,故无需运行多次再分析其结果. 由表2中的数据可以看出,ACO算法运算时间长,且生成航线长度长,不适合求解城市密集建筑物环境下的无人机在线航线规划问题. 下面重点对A*与IRRT这两种算法的性能进行比较.

A*是一种完备性算法,即搜索空间中只要存在可行航线,则一定能搜索出最优解. 因此,表2中由A*算法生成的航线长度小于IRRT算法. 但A*算法也是一种全局搜索算法,与IRRT算法相比运算时间较

长,不能满足本问题中对在线航线规划采样时间间隔的要求. 因此,综合以上考虑,尽管IRRT算法不能生成最优航线,但与A*算法得到的航线相比质量相差不大,且运算时间仅为0.15 s,能够满足在线航线规划对算法运算速度的要求,因此更适合于本文中的航线规划任务.

3.2 3种在线航线规划策略的验证

本节将对所提出的3种在线航线规划策略分别验证. 因为A*算法能够生成最优航线,故采用3.1节中由A*算法生成的航线作为无人机的预定飞行航线. 为使无人机的原定航线受到动态变化的影响,选取预定飞行航线上的某个点,使固定禁飞区、合作无人机、非合作无人机分别经过此点. 采用以上设置,当加入固定禁飞区后,无人机的飞行航线变化如图7所示.

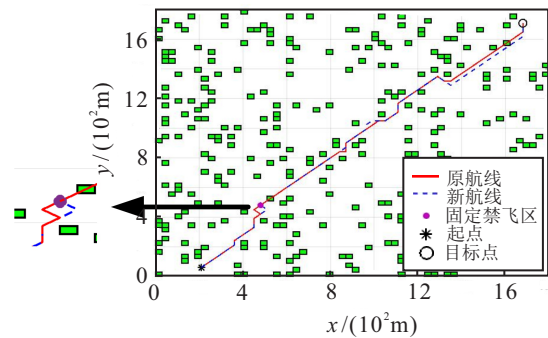


图7 新增固定禁飞区情形下无人机在线航线规划结果(二维视图)

当无人机探测到新增固定禁飞区会与预定飞行航线发生冲突时,其将会放弃预定飞行航线,并采用IRRT算法生成从当前位置到目标点的剩余航线,并避免与固定禁飞区和建筑物碰撞. 而且可以看出,在线航线规划算法在无人机离固定禁飞区距离较近时才启动,使得预定飞行航线能够最大限度地被执行,同时减小了在线航线规划的计算量.

下面对策略2的有效性进行验证. 由于在规避合作无人机时,当前无人机只改变其飞行速度,三维航线保持不变,此处只展示无人机飞行速度随时间的变化曲线,如图8所示.

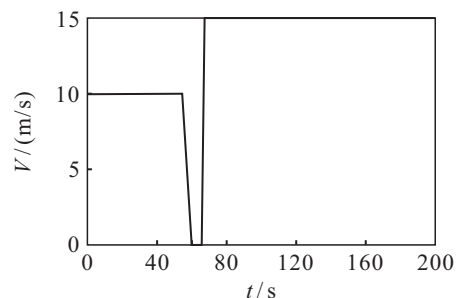


图8 规避合作无人机时当前无人机飞行速度变化

任务开始时,无人机以 10 m/s 的速度飞行,当探测到合作无人机的飞行轨迹将影响其预定飞行航线后,当前无人机在 $t = 60\text{ s}$ 时进行在线航线规划,通过改变飞行速度的方式规避合作无人机.但是在可选的几个飞行速度档位中找不到能够规避合作无人机的飞行速度,故只能在原地等待,直至下一决策时刻再进行在线航线规划.以上过程一直持续到 $t = 64\text{ s}$,此时无人机将飞行速度调至 15 m/s ,成功避开合作无人机,并保持该飞行速度完成剩余飞行航线.

当无人机的飞行受到非合作无人机的影响时,情况将更加复杂,图9展示了此种情形下当前无人机与非合作无人机的飞行航线.

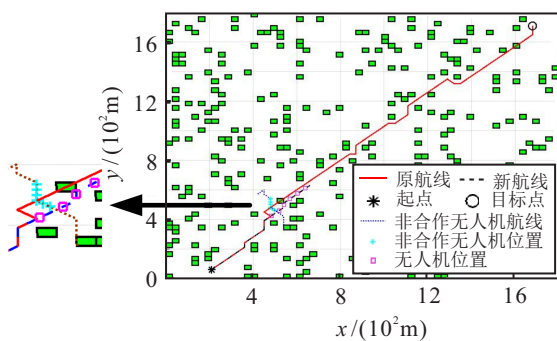


图9 规避非合作无人机时航线变化(二维细节图)

图9中,当前无人机的飞行航线不完整,这是因为图中只展示了采用策略3时的对应航线.当当前无人机与非合作无人机之间的距离大于 d_{th} 时,需要采用 IRRT 算法生成从无人机当前位置到目标点的三维航线.为更加直观地表明两架无人机的相对位置关系,图10给出了在采用策略3期间,两架无人机之间的距离随时间的变化曲线.

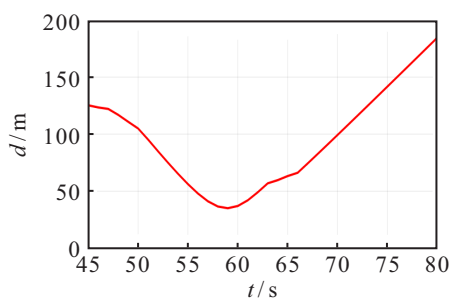


图10 两架无人机间距离随时间变化曲线

由图10可以看出,在采用策略3期间,当前无人机与非合作无人机之间的距离始终大于 20 m (即本文所设定的安全距离 d_{safe}),保证了当前无人机的飞行安全,也验证了策略3在规避非合作无人机时的有效性.

总结以上3种无人机在线航线规划策略,它们都

能够有效应对相应的单一动态变化,并且能生成飞行航线保证无人机安全高效到达目标点.

3.3 复杂动态变化下无人机在线航线规划算法验证

为了进一步说明所提出在线航线规划算法能够应对复杂动态变化情况,本节同时考虑各种类型的动态变化及其组合情况,并综合调用3种策略完成在线航线规划.算例中,在当前环境下,随机生成了100个固定禁飞区,并分别设置10架合作无人机与10架非合作无人机干扰当前无人机沿预定航线飞行.根据以上设置,采用本文提出的方法,得到无人机飞行航线如图11和图12所示.

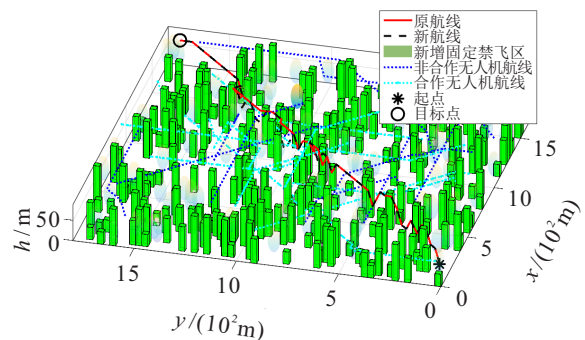


图11 复杂动态变化下无人机飞行航线(三维视图)

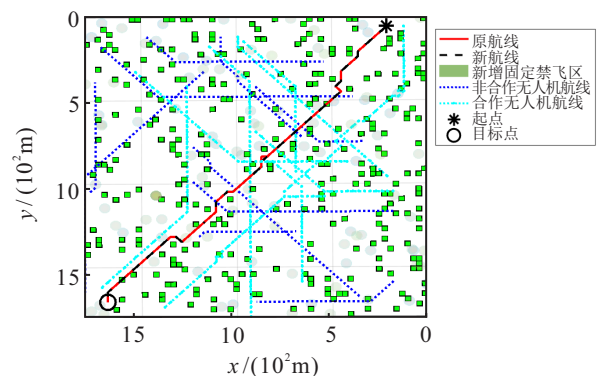


图12 复杂动态变化下无人机飞行航线(二维视图)

在图11和图12中,无人机在飞行过程中的不同时刻,分别受到不同种类动态变化的影响.无人机能够根据当前动态变化种类快速响应,在线规划航线,使其安全高效到达目标点,顺利完成任务.为进一步说明无人机在整个飞行过程中各时刻所处的状态,令在当前时刻,无人机无需作出判断,只需沿预定航线飞行的情形为‘0’(对应图3中无人机在点 P_1 或 P_2 处的情形);无人机检测到有合作无人机对其原定飞行航线产生影响的情形为‘1’;固定禁飞区对无人机原定飞行航线产生影响的情形为‘2’;非合作无人机对原定飞行航线产生影响的情形为‘3’;无人机需在当前时刻作出决策是否需进行在线航线规划,但结果为继续沿预定航线飞行的情形为‘6’(对应图3中无人

机在点 P_3 处的情形). 根据以上定义,将无人机在飞行过程中的状态变化进行展示,结果如图13所示.

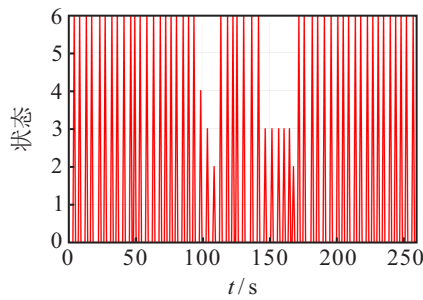


图13 无人机飞行过程中状态变化

图13中,无人机在整个飞行过程中分别在两个时间段受到非合作无人机的干扰,在图13中表现为纵坐标值在‘3’和‘0’之间进行切换.当避开非合作无人机后,纵坐标值变为‘2’,表明调用了IRRT算法生成剩余航线.另外需要注意的是在 $t = 96$ s时,纵坐标的值为‘4’($4 = 1+3$),表示此时无人机同时检测到合作无人机与非合作无人机均会影响其预定航线,此时采用滚动优化应对策略.图12与图13的仿真结果表明,本文提出的在线航线规划方法能够使无人机在离散城市低空环境中飞行时对各种动态变化作出快速响应,重新生成安全到达目标点的可行航线.

4 结论

1)建立了离散城市环境模型、无人机飞行规则模型与无人机航线规划模型.

2)描述了由环境与任务引起的各种动态变化,并对其进行分类;提出了针对各类动态变化的在线航线规划策略,此规划策略也适用于组合动态变化情形.

3)改进了RRT算法,使其适合求解离散环境下的航线规划问题;并根据城市环境特点,减少生成树扩展过程中的约束条件,使其能够求解出到达目标点的完整航线.

4)仿真结果表明,本文所提出的无人机在线航线规划方法能够处理各种动态变化,并在线生成航线,具有响应速度快、使用能力强、对预定航线修改程度小等优点.

参考文献(References)

[1] 陈鹏飞. 无人机在农业中的应用现状与展望[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 399-406.
(Chen P F. Applications and trends of unmanned aerial vehicle in agriculture[J]. Journal of Zhejiang University Agriculture and Life Sciences, 2018, 44(4): 399-406.)

[2] 徐华东. 无人机电力巡线智能避障方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
(Xu H D. Research on intelligent obstacle avoidance methods for power lines inspection with UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)

[3] 胡智银, 李英成, 王凤, 等. 轻小型无人机城市三维建模精度分析与评价[J]. 遥感信息, 2017, 32(6): 38-44.
(Hu Z Y, Li Y C, Wang F, et al. Precision Analysis and Evaluation for 3D city model based on light and small UAV[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(6): 38-44.)

[4] 张毅, 孟启源, 杨秀霞. 基于双旋Lyapunov矢量场的无人机避障算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(8): 1514-1522.
(Zhang Y, Meng Q Y, Yang X X. Obstacle avoidance algorithm for UAV based on bi-rotation Lyapunov vector fields[J]. Control and Decision, 2018, 33(8): 1514-1522.)

[5] Balakrishnan K, Polastre J, Mooberry J, et al. Blueprint for the sky: The roadmap for the safe integration of autonomous aircraft[R]. San Francisco: Airbus UTM, 2018.

[6] 李俨, 王重, 齐延军, 等. 城市风场环境中的无人机快速航迹规划方法[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 949-959.
(Li Y, Wang Z, Qi Y J, et al. A rapid trajectory planning algorithm for UAV in urban areas with wind fields[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 949-959.)

[7] 张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1407-1413.
(Zhang Q R, Wei R X, He R K, et al. Path planning for unmanned aerial vehicle in urban space crowded with irregular obstacles[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1407-1413.)

[8] Kothari M, Postlethwaite I, Gu D W. UAV path following in windy urban environments[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(3/4): 1013-1028.

[9] Hu H, Wu Y, Xu J, et al. Cuckoo search-based method for trajectory planning of quadrotor in an urban environment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(12): 4571-4582.

[10] 成浩浩, 杨森, 齐晓慧. 面向城市环境的四旋翼无人机在线避障航迹规划方法[J]. 计算机科学, 2019, 46(4): 241-246.
(Cheng H H, Yang S, Qi X H. Online obstacle avoidance and path planning of quadrotor oriented to urban environment[J]. Computer Science, 2019, 46(4):

- 241-246.)
- [11] 魏铂淞, 张启瑞, 许卓凡, 等. 一种陌生环境的无人机在线 Laguerre 航路规划方法[J]. 飞行力学, 2017, 35(1): 57-60.
(Wei B S, Zhang Q R, Xu Z F, et al. A method of online Laguerre route planning for UAVs flying in an unknown regions[J]. *Flight Dynamics*, 2017, 35(1): 57-60.)
- [12] Yang K, Keat Gan S, Sukkarieh S. A Gaussian process-based RRT planner for the exploration of an unknown and cluttered environment with a UAV[J]. *Advanced Robotics*, 2013, 27(6): 431-443.
- [13] Delamer J A, Watanabe Y, Ponzoni Carvalho Chanel C. Towards a MOMDP model for UAV safe path planning in urban environment[C]. *The 9th International Micro Air Vehicle Conference and Competition*. Toulouse, 2017: 1-8.
- [14] 林娜, 李天啸. 基于双向A*算法的城市无人机航路规划[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(4): 55-60.
(Lin N, Li T X. Based on bidirectional A* algorithm for urban UAVs route planning[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2016, 33(4): 55-60.)
- [15] Wei B, Zhang Q, Xu Z, et al. Study on real-time safe route planning method for quad-rotor UAV among buildings[C]. *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*. Nanjing: IEEE, 2016: 1067-1071.
- [16] Lai S P, Wang K L, Qin H L, et al. A robust online path planning approach in cluttered environments for micro rotorcraft drones[J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(1): 83-96.
- [17] Xian B, Wang S Z, Yang S. An online trajectory planning approach for a quadrotor UAV with a slung payload[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(8): 6669-6678.
- [18] Roberge V, Tarbouchi M, Labonté G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 132-141.
- [19] 朱波, 吴迪, 张农, 等. 基于滚动优化和能量回收的V2I电动汽车决策[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 956-964.
(Zhu B, Wu D, Zhang N, et al. Decision-making research of V2I electric vehicle based on rolling optimization and energy recovery[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 956-964.)
- [20] Huang Y, Wang H L, Yao P. Energy-optimal path planning for Solar-powered UAV with tracking moving ground target[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 53: 241-251.
- [21] Tan Q, Wang Z, Ong Y S, et al. Evolutionary optimization-based mission planning for UAS traffic management (UTM)[C]. *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Atlanta: IEEE, 2019: 952-958.
- [22] 胡莘婷, 吴宇. 面向城市飞行安全的无人机离散型多路径规划方法[J/OL]. 航空学报, DOI: 10.7527/S1000-6893.2020.24383.
(Hu X T, Wu Y. A risk-based UAV discrete path planning method in urban environments[J]. *Acta Aer-onautica et Astronautica Sinica*, DOI: 10.7527/S1000-6893.2020.24383.)

作者简介

吴宇(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事飞行器任务规划等研究, E-mail: cqwuuyu@cqu.edu.cn;

胡莘婷(1994—), 女, 硕士生, 从事空中交通管理的研究, E-mail: hshenting@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)