

一种面向突发威胁的多因素 Dubins 航迹规划算法

黄加红¹, 白 丽², 范兼睿¹, 张莉涓¹, 雷 磊¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘 要: 针对传统无人机航迹规划算法应用在突发威胁场景下存在搜索点冗余、路径规划实时性较差等问题, 提出了一种基于多因素 Dubins 路径的无人机动态航迹规划算法。该算法首先根据无人机自身性能约束及突发威胁区域的位置, 并且考虑无人机的起始和最终位置, 利用传统的 Dubins 路径找到有效的路径扩展点。然后结合启发式搜索思想建立基于路径长度和威胁的路径扩展点评估函数。最后通过路径评估函数计算, 比较路径点的代价值, 选取每一步的路径扩展点, 规划出较优路径。仿真结果表明, 在突发威胁场景下利用该算法进行航迹规划时路径长度较短、路径扩展点较少, 并且符合无人机实际飞行过程中航向角变化, 可有效保障无人机的安全性和航迹规划的实时性。

关键词: 无人机; 航迹规划; 突发性威胁区域; Dubins 曲线

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Multi-factor Dubins Path Planning Algorithm for Emergent Threats

HUANG Jiahong¹, BAI Li², FAN Jianrui¹, ZHANG Lijuan¹, LEI Lei¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: As traditional UAV trajectory planning algorithms generate redundant search points and poor real-time path planning in emergent threat scenarios, a dynamic trajectory planning algorithm for UAVs based on multi-factor Dubins path is proposed. First, the algorithm uses the traditional Dubins path to find effective path extension points based on the UAV's own performance constraints and the location of the sudden threat area. Second, a path extension point evaluation function is established based on the path length and threat combined with heuristic search ideas. Finally, the path extension point is selected through the path evaluation function, and a better path is planned. The simulation results show that when the algorithm is used for trajectory planning in sudden threat scenarios, the path length is shorter and the path extension points are fewer, and it conforms to the change of the heading angle of the drone during the actual flight, which can effectively ensure the safety of the drone and real-time trajectory planning.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); path planning; sudden threat area; Dubins curve

引 言

无人机航迹规划^[1]是无人机任务规划中的一项重要任务,它是指无人机在运动学、动力学以及飞行任务的约束下,找到从起始位置到目标位置的较优路径。目前,航迹规划方法大致分为两类:(1)全局路径规划或称为离线路径规划;(2)局部路径规划或称为在线路径规划。全局路径规划方法通常根据已知的环境或过去对环境感知信息生成一条优化的路径,但是这种方法无法应对未知或突发威胁的情况。而局部路径规划算法不需要环境先验信息,在面对突发威胁区域时通过机载传感器提供的信息实现动态的航迹规划与路线调整。其中,突发威胁区域指的是未提前获知的对无人机生存产生威胁的地理区域,例如敌方雷达探测或火力覆盖范围。由于在突发威胁场景下,无人机无法得知全局威胁区域位置分布情况,导致全局路径规划算法无法工作,因此在此情况下只能采用局部路径规划。

在突发威胁环境下,无人机需要实时躲避突发威胁区域。目前,研究人员已经提出了多种航迹规划算法,然而文献[2-6]采用的航迹规划算法一方面搜索点冗余且时间复杂度高,无法满足实时性要求;另一方面,由于在突发威胁环境下,要求规划出的路径长度短并且符合无人机飞行的性能指标,但上述文献中的算法均不满足无人机最小转弯半径或最大转弯角度的限制。为了克服这些不足,一些学者提出了改进的算法。文献[7-9]对A*算法的启发式搜索函数进行了改进,一定程度上减少了搜索点的数量,并且对构造出的路径进行了平滑处理,满足无人机的飞行需求,但是这种需要对整体路径进行平滑处理的方法不符合实时躲避威胁区域的要求。文献[10]通过双层蚁群算法进行路径寻优,并对环境模型进行凸化处理,解决了算法陷入重复路径点搜索的问题,但是时间复杂度仍然随着环境的复杂程度而增加。文献[11]将人工势场法进行了优化,该算法根据建立的势能梯度下降算法寻找实际路径,当出现局部最小值时构造一个新的势能,此时只有一个全局最小值与机器人的最终目标相匹配,从而克服了陷入局部最小值的问题,一定程度上缩短了路径长度。但是该算法需要进行二次迭代,时间复杂度降低不明显。

综上,面对突发威胁情况,上述传统航迹规划算法都存在一些局限性,不能应用于真实场景中无人机的航迹规划。因此,本文提出一种适合突发威胁场景的多因素Dubins算法(Multiple factors Dubins algorithm, MFDA)。该算法通过将无人机所处位置与突发威胁区域圆作Dubins曲线,并建立路径扩展点评估函数进行选择,不需要对威胁外的区域进行大量计算和重复搜索,大大地降低了路径搜索点的冗余,同时也节省了路径规划时间。论文的主要创新点和贡献如下:(1)突发威胁场景中,在满足曲率约束和规定的起始点和终点的切线方向的条件引入Dubins路径规划出适合无人机真实环境下的航迹曲线。(2)建立扩展点评估函数,引入路径长度代价及威胁代价作为路径评估因素,提高路径搜索精度。(3)以Dubins路径与威胁区域相切的点作为待选路径扩展点,在待选扩展点集合中选择最佳扩展点从而降低搜索点冗余性。

1 MFDA算法的路径扩展点选择模型

本文提出的MFDA算法是基于Dubins路径实现的,因此本节对Dubins路径的类型进行了介绍,并在此基础上对路径规划过程中路径扩展点的选择模型进行了分析。

1.1 Dubins路径

Dubins路径是在满足曲率约束和规定的起始点和终点的切线方向的条件,连接两个二维平面

(即X-Y平面)的最短路径^[12],被广泛应用在智能机器人的路径规划上,并且Dubins路径比直线路径更接近无人机的实际飞行轨迹。假设无人机保持恒定的高度和速度,并且受到转弯速度的限制,则Dubins路径是一种为无人机寻找从起始点到目标点最短路径的策略。Dubins路径由3个路径段组成,这些路径段基于给定半径的直线或圆弧。由两条曲线段和一条直线段组成的Dubins路径的4种不同类型如图1所示。Dubins路径的4种情况分别是^[13]:左转-直线-右转(Left straight right, LSR)、左转-直线-左转(Left straight left, LSL)、右转-直线-右转(Right straight right, RSR)、右转-直线-左转(Right straight left, RSL)。

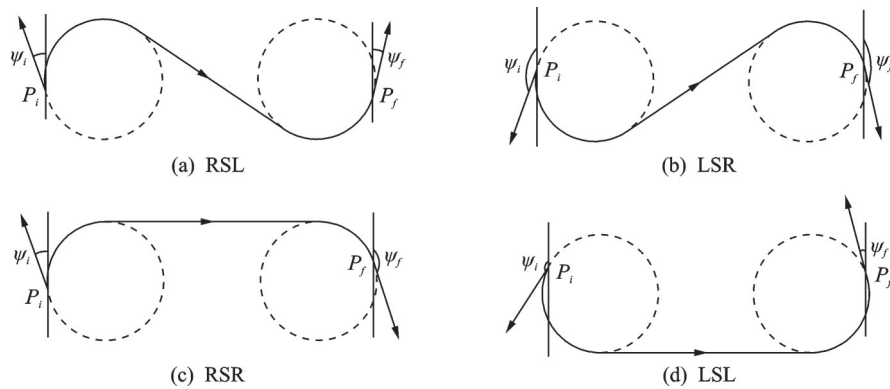


图1 Dubins最短路径

Fig.1 The shortest path of Dubins

本文中节点表示为 (x_i, y_i, ψ_i) ,其中 x_i 表示无人机在X平面映射的横坐标, y_i 表示在Y平面映射的纵坐标, ψ_i 表示无人机的航向。通过对上述4种Dubins路径的分析,可以发现,在航迹规划过程中,除了考虑无人机的起始和目标位置信息,在添加起始位置航向以及目标位置航向的基础上,当无人机跨越威胁区域飞行时,Dubins路径无疑是最短路径^[14-16]。

1.2 路径扩展点的选择

本文提出的MFDA算法将直线航迹与威胁区域圆的切点作为算法的下一步扩展节点,如图2所示。无人机的最小转弯半径为 ρ ,即无人机最小以转弯半径为 ρ 的圆调整航向。起始点位置为 P_i ,航向为 ψ_i ,目标点位置为 P_f ,航向为 ψ_f 。在无人机起始位置和目标位置之间存在一个半径为 r_{threat} 的威胁区域。由前述分析可知,在最小转弯半径和航向的限制条件下,Dubins路径是从起始位置到达目标位置的最短路径。另一方面,将威胁区域表示为 $(x_{threat}, y_{threat}, r_{threat}, G_{threat})$,其中 (x_{threat}, y_{threat}) 代表威胁区域的中心坐标, r_{threat} 代表威胁区域半径, G_{threat} 代表威胁等级,威胁等级越大,表明对无人机可能造成的伤害程度越高,并且无人机距离威胁区域越近,遭遇威胁的可能性越大。从图2可以看出,有两条Dubins路径可以绕过威胁区域到达目标点位置,分别是路径 $P_i P_{n1} P_f$ 和路径 $P_i P_{n2} P_f$,它们分别属于LSR类型和RLS类型。因此将直线路径与威胁区域圆的切点作为A*算法的下一步扩展节点,将节点 P_{n1} 和节点 P_{n2} 均加入OPEN(前向路径曲线节点集合)中,通过评估函数分别计算两个节点的代价值并进行比较,选择出代价值最小的节点作为下一步的路径扩展节点,并把此节点加入到CLOSE(后向完整路径曲线节点集合)中。

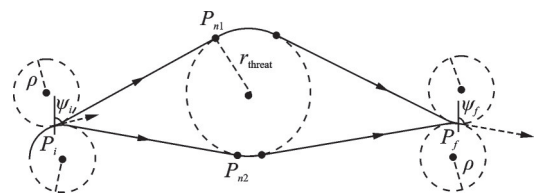


图2 扩展点选择

Fig.2 Extension point selection

2 MFDA 路径规划算法

2.1 传统 A* 算法

A* 算法是最著名的路径规划算法之一,该算法采用启发式搜索和基于最短路径的搜索相结合的方法^[17]。A* 算法被定义为最佳优先搜索算法,因为将空间进行单元格划分后,每个单元格的代价都是由估价函数 $f(n)$ 来计算的。

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中:函数 $g(n)$ 定义为从已知开始节点到任意节点 n 的一条最优路径的代价,函数 $h(n)$ 定义为从节点 n 到目标节点的整个目标节点集合内的最小代价路径的代价。节点 n 到目标节点的随机路径为 $h(n)$,即节点 n 到目标节点的最佳路径。

A* 算法在进行节点扩展的过程中,存在上、下、左、右、左上、右上、左下、右下共 8 个方向的网格点可以作为下一步的待选路径扩展点,会循环地判断待选节点是否在 OPEN 表或者 CLOSE 表中。如果节点不在 OPEN 表中,将其加入 OPEN 表并通过式(1)计算每个节点的代价值,通过比较当前节点周围节点的代价值,从中选择代价值最小的节点作为下一步的扩展节点,并将其加入到 CLOSE 表中,循环上述步骤,直到找到目标节点,形成一条从起始点到目标点的最优路径。由此可以看出,在从起始点到目标点的路径规划过程中,每一步都需要计算 8 个方向的代价值,因此传统的 A* 算法存在搜索点冗余的缺陷,并且较多的计算次数会大大增加路径规划时间。

2.2 人工势场法

人工势场法在 1986 年由 Khatib 提出,主要思想是通过建立目标点的引力场以及障碍物的斥力场,在两个势力场合力的作用下沿着势场函数下降的方向移动,由此形成一条避开障碍物的最优路径。由图 3 可以看出,由目标产生的引力场方向指向目标位置,由障碍物产生的斥力场,方向远离障碍物。

在人工势场法中合力即为势能函数的梯度,联合合力和无人机的运动状态方程即可得到其飞行轨迹,由于人工势场法避免了搜索最优解或非线性参数优化的过程,因此路径规划的速度相比于 A* 算法更快。但是人工势场法也存在明显的缺陷,即局部极值问题。当人工势场的合力指向局部极值点时,无人机的飞行轨迹将会陷入局部震荡,而无其他外力将飞机拉出局部极点,因此会导致路径长度极度增加,更糟糕的情况会直接导致航迹规划失败。

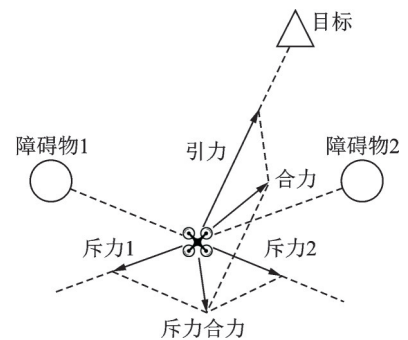


图 3 人工势场法基本原理

Fig.3 Basic principles of artificial potential field method

2.3 MFDA 算法路径规划流程

本文提出一种多因素 Dubins 路径算法,重新建立基于路径长度代价及威胁代价作为路径评估因素的评估函数,通过 1.2 节路径扩展点的选取可以看出,在当前路径扩展点选择下一步路径扩展点的过程中,根据 Dubins 曲线的特性,待选路径扩展点中最多只会存在两个选择,并且 Dubins 路径只作与威胁区域相切的曲线,那么在从起始点到目标点的整个路径规划过程中路径扩展点的数量会大幅度降低,另外 Dubins 曲线是在满足曲率约束和规定的起始点和终点的切线方向的条件下,连接两个二维平面(即 X-Y 平面)的最短路径,那么最终通过 MFDA 算法得到的规划路径长度也会减小。MFDA 算法路径规划过程如图 4 所示。

算法路径规划过程步骤如下:

(1)首先将起始点当作当前路径扩展点,生成到目标点的路径。如果在此方向上不存在威胁区域,则将目标点 P_f 加入到 CLOSE 表中,构建成一条从起始点到目标点的路径曲线,算法运行结束。如果在此方向上存在威胁区域,则生成当成当前路径扩展点到威胁区域的多条 Dubins 曲线。

(2)通过 MFDA 算法估价函数计算并选出代价值最小的点作为下一步的路径扩展点,将此路径扩展点加入到 CLOSE 表中。

(3)将步骤(2)中选取的路径扩展点作为当前的位置,然后重新执行步骤(1)的操作。之后重复上述过程,不断产生新的路径扩展点,直到到达目的点,构建出完整路径。

由上述 MFDA 算法路径规划过程可知,路径搜索的过程也就是通过计算不同 Dubins 路径的代价值从而选取路径扩展点的过程,因此下节着重分析步骤(2)中路径扩展点的代价计算和选取。

2.4 路径扩展点的代价计算与选取

MFDA 算法同时考虑路径代价和威胁代价对无人机轨迹的影响,估价函数建立如下

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2)$$

式中: $g(n) = w_1 \cdot \text{Distance} + w_2 \cdot \text{Hazard}$, w_1 表示距离代价的影响因子, w_2 表示威胁代价的影响因子, $w_1 + w_2 = 1$ 。Distance 距离由两端弧长和一段直线长度构成,由图 5 所示,分别计算 LSR 和 RLS 两种类型的 Dubins 路径距离。

起始节点 (x_i, y_i, ψ_i) , 求解圆 O_i 和圆 O_{threat} 的切线 $Q_i P_n$ 的坐标。

步骤 1 计算圆 O_i 的圆心坐标

$$x_{o_i} = x_i + \rho \cos\left(\psi_i + T_i \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

$$y_{o_i} = y_i + \rho \sin\left(\psi_i + T_i \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

威胁区域 O_{threat} 的圆心坐标已知。

步骤 2 生成直线航迹 $Q_i P_n$

$$L = \sqrt{(x_{o_{\text{threat}}} - x_{o_i})^2 + (y_{o_{\text{threat}}} - y_{o_i})^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\rho + r_{\text{threat}}}{L}\right) \quad (6)$$

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (7)$$

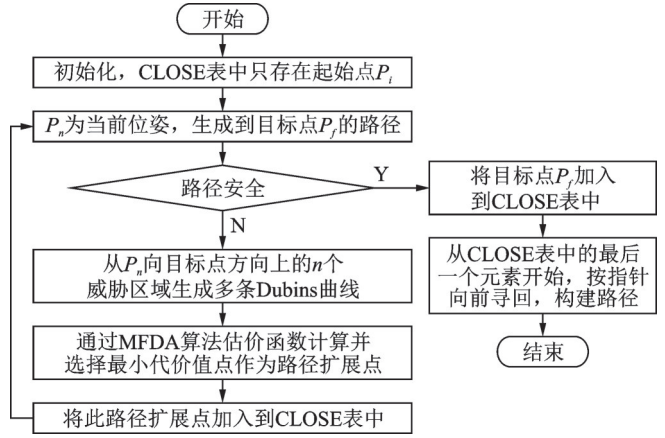


图 4 MFDA 算法路径规划过程
Fig.4 Path planning process of MFDA

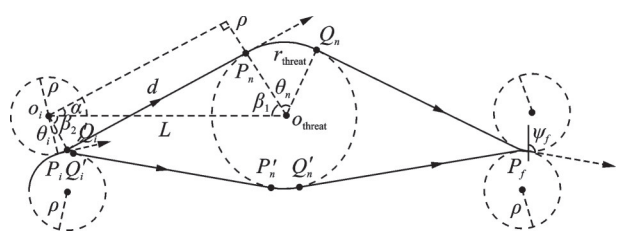


图 5 LSR 路径类型
Fig.5 Path type of LSR

因此, $O_{\text{threat}}O_i$ 逆时针旋转 β_1 角度与 $O_{\text{threat}}P_n$ 重合, $O_{\text{threat}}O_i$ 的模 L 已知, 之后按照比例 $\frac{r_{\text{threat}}}{L}$ 进行缩放可以得到 $O_{\text{threat}}P_n$, 从而计算出切点 P_n 坐标, 同理可得到切点 Q_i 坐标。

当无人机在位置为 P_i , 航向为 ψ_i 准备绕过威胁区域 O_{threat} 时, 选择切点 P_n 或者 P'_n 作为 A* 算法的下一步路径扩展节点, 因此需要对 P_n 和 P'_n 节点的代价值通过估价函数计算。在这里计算 P_n 节点的代价值, P'_n 同理可计算得到。首先计算

$$\text{Distance} = \overline{P_i Q_i} + Q_i P_n \quad (8)$$

式中节点 Q_i, P_n 的位置已有前述步骤计算可知, 因此 $\overline{P_i Q_i}$ 和 $O_i P_n$ 的长度也可计算得到。接下来计算 Hazard, 距离威胁区域越近, 所受到的威胁就越大, 假设把不经过威胁区域的航迹路径所受到的威胁设置为 0, 因此只有绕威胁区域飞行的圆弧段航迹才会受到威胁。从当前节点到下一个扩展节点的威胁代价值为

$$\text{Hazard}(P_{n-1} P_n) = \text{Hazard}(\overline{P_{n-1} Q_{n-1}}) + \text{Hazard}(Q_{n-1} P_n) \quad (9)$$

因此 $\text{Hazard}(Q_{n-1} P_n) = 0$, $\text{Hazard}(P_{n-1} P_n) = \text{Hazard}(\overline{P_{n-1} Q_{n-1}})$, 其中

$$\text{Hazard}(\overline{P_{n-1} Q_{n-1}}) = \int_0^{\theta_i} \frac{G_{\text{threat}}}{r_{\text{threat}}} d\varphi \quad (10)$$

因此

$$g(P_n) = w_1 \cdot (\overline{P_i Q_i} + Q_i P_n) + w_2 \cdot \int_0^{\theta_i} \frac{G_{\text{threat}}}{r_{\text{threat}}} d\varphi \quad (11)$$

计算 $h(n)$, 同样将距离代价和威胁代价的预评估影响因子分别用 w_1, w_2 表示。当无人机以 P_n 或 P'_n 点切入威胁区域, 则无人机分别以 $P_n Q_n P_f$ 路径或 $P'_n Q'_n P_f$ 路径以指定位姿到达目标点, 则 $\overline{P_n Q_n}$ 和 $\overline{P'_n Q'_n}$ 分别预示了无人机绕过威胁区域的飞行轨迹, 所以 $h(P_n)$ 表示为

$$h(P_n) = w_1 \cdot \text{distance}'(P_n P_f) + w_2 \cdot \text{Hazard}'(P_n P_f) \quad (12)$$

式中

$$\text{distance}'(P_n P_f) = \sqrt{(x_f - x_n)^2 + (y_f - y_n)^2} \quad (13)$$

$$\text{Hazard}'(P_n P_f) = \int_0^{\theta_n} \frac{G_{\text{threat}}}{r_{\text{threat}}} d\varphi \quad (14)$$

通过上述代价值的计算与比较, 选择代价值较小的节点作为 MADA 算法的下一步路径扩展点。

因此, 根据 2.3 节和 2.4 节的 MFDA 算法的路径扩展点选取过程, 通过不断的循环计算, 可以规划出一条在突发威胁场景下从起始点到目标点的无人机飞行航迹。

3 仿真与分析

根据前述分析, 对本文设计的航迹规划算法进行了仿真验证, 并与传统的 A* 算法、人工势场法和双层蚁群算法进行仿真性能比较。

3.1 少量突发威胁区域路径规划

图 6、7 分别代表无人机起始点和目标点连线上存在一个或两个障碍物时, 4 种无人机航迹规划算法的仿真曲线。

图 6 区域中只存在一个威胁区域, 其位置、半径和威胁等级表示为 $O_{\text{threat}} = (100, 100, 15, 2)$ 。起始位姿和最终位姿分别表示为: $(2, 2, 0.167\pi), (200, 200, 0.2\pi)$ 。

在此场景下, MFDA 算法所得路径由 2 段 Dubins 曲线组成, 长度为 270.914 6 m, 并且路径光滑。在

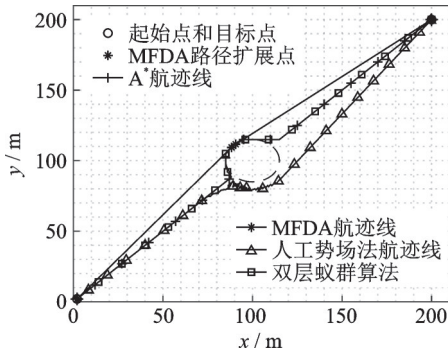


图6 单威胁区域场景下航迹规划结果

Fig.6 Track planning results under single threat area scenario

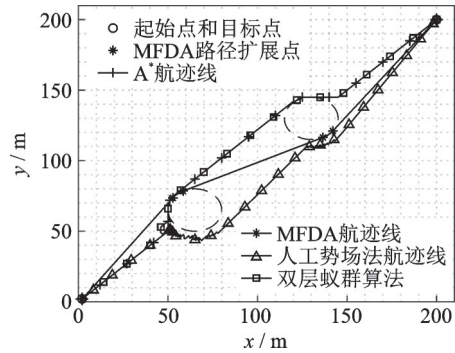


图7 双威胁区域场景下航迹规划结果

Fig.7 Track planning results under two threat zone scenarios

相同条件下,由A*算法、人工势场法、双层蚁群算法计算出路径长度分别为295.386 9、390.261 1、294.871 2 m,均大于本文提出的MFDA算法规划的路径长度,并且路径不光滑,在实际应用中不能直接使用。

图7区域中存在两个威胁区域,其位置、半径和威胁等级分别表示为: $O_{threat1}=(65, 65, 15, 2)$, $O_{threat2}=(130, 130, 15, 1)$,起始位姿和最终位姿不变。在此场景下,MFDA算法规划出的路径由3段Dubins曲线组成,长度为271.377 0 m。相同条件下,A*算法、人工势场法以及双层蚁群算法计算出路径长度分别为296.558 4、462.562 3、295.678 6 m,同样大于MFDA算法规划的路径长度。

3.2 大量突发威胁区域路径规划

区域中共有6个威胁区域 $O_{threat1} \sim O_{threat6}$,其位置、半径和威胁等级表示为: $O_{threat1}=(70, 80, 15, 2)$, $O_{threat2}=(90, 130, 15, 2)$, $O_{threat3}=(110, 180, 15, 2)$, $O_{threat4}=(120, 110, 15, 1)$, $O_{threat5}=(140, 150, 15, 2)$, $O_{threat6}=(190, 140, 15, 4)$ 。无人机起始位姿和最终位姿分别表示为: $(2, 2, 0.167\pi)$, $(200, 200, 0.2\pi)$ 。

图8中MFDA算法、A*算法、人工势场法、双层蚁群算法规划出的路径长度分别为:272.121 2, 298.244 7, 481.427 8, 296.360 1 m,因此MFDA算法具有明显的优势。并且本文提出的MFDA算法计算出的路径曲线满足了无人机航行路径平滑性要求,并且曲线与直线相切,满足路径连续性要求。但是A*算法在此情况下所规划出的路径存在局部路径转角突变的情况,由于无人机存在自身转弯半径和转弯最小角度的限制,因此无法满足实际飞行的需求。同样,人工势场法在此场景下会存在局部极小值点,导致持续震荡,极大地增加路径长度^[18]。

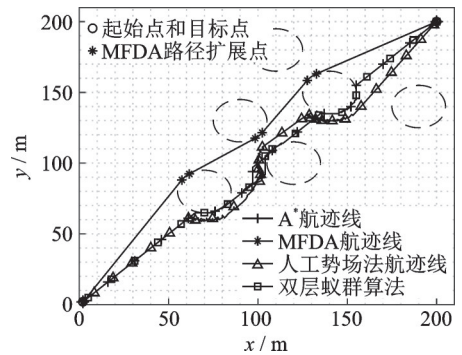


图8 多个威胁区域场景下航迹规划结果

Fig.8 Track planning results under multiple threat area scenarios

3.3 算法性能比较与分析

分别对上述不同场景下航迹规划算法的性能指标进行统计并分析。图9~12分别代表了单威胁区域场景、双威胁区域场景以及多威胁区域场景3种场景下不同航迹规划算法的路径规划长度、路径扩展点数量、路径规划时间和路径航向变化4个性能指标。

从图9中可以看出,在路径规划长度方面,MFDA算法计算出路径最短,A*算法稍差,人工势场法

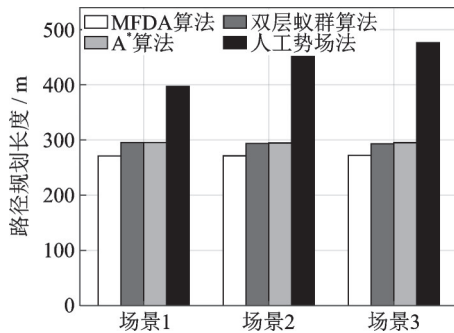


图9 3个场景下路径规划长度

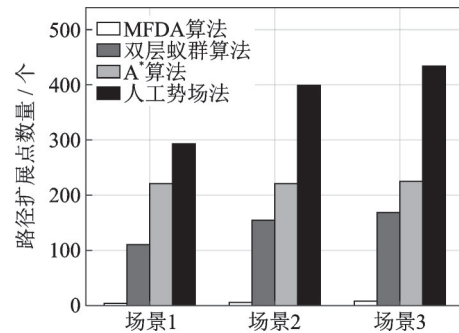


图10 3个场景下路径扩展点数量

Fig.9 Path planning length under three scenarios

Fig.10 Number of path extension points under three scenarios

所规划的路径长度则远大于另外两种算法计算出的路径长度。在3种场景下, MFDA算法路径规划平均长度为271.47 m, A*算法路径规划平均长度为296.73 m, 人工势场法路径规划平均长度为444.750 4 m, MFDA算法相比于A*算法路径长度平均减少了8.4%, 相比于人工势场法平均减少了39%, 双层蚁群算法路径规划平均长度为295.636 6 m, 相比于人工势场法平均减少了8.2%。因此MFDA算法规划的路径可以保证无人机以较短的距离从起始点到达目的点。

从图10路径扩展点指标上可以看出, 本文提出的MFDA算法在路径规划过程中得到的路径扩展点数量远小于其他两种算法。在3种场景下, MFDA算法平均路径扩展点数量为6个, A*算法平均路径扩展点数量为222个, 人工势场法平均路径扩展点数量为384个, 双层蚁群算法平均路径扩展点数量为144个。无人机在实际飞行过程中, 通过路径扩展点确定下一步飞行到达的位置, 并且从前一个路径扩展点到下一个路径扩展点, 由于无人机自身物理条件以及实际环境的限制, 无人机需要频繁地调整飞行姿态及速度, 因此在整个路径规划过程中, 路径扩展点越少越好。可以看出本文提出的MFDA算法相比于另外3种航迹规划算法, 具有明显较少的路径扩展点。

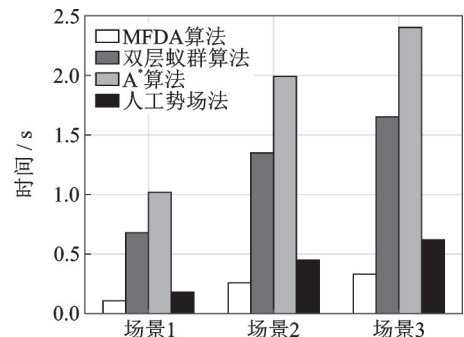


图11 3个场景下路径规划时间

Fig.11 Path planning time under three scenarios

图11表示3种场景下路径规划时间, 可以看出MFDA算法规划出一条从起始点到目标点的完整路径所需要的时间明显少于A*算法和人工势场法。在3种场景下, MFDA算法平均路径规划时间相比于A*算法减少了90%, 相比于人工势场法减少了55%, 相比于双层蚁群算法减少了82%。因此, MFDA算法在路径规划过程中具有较优的实时性。

图12表示4种航迹规划算法在场景3的情况下, 无人机在绕过第一个威胁区域的飞行过程中航向变化(与 O_x 正半轴的夹角)。从图12中可以看出, 在规避威胁区域的整个过程中, MFDA算法规划出的路径航向并没有出现极值即突变情况, 在距离起点105 m附近, MFDA算法规划处的路径通过逐步过渡的情况改变航向, 符合无人机实际飞行过程中航向

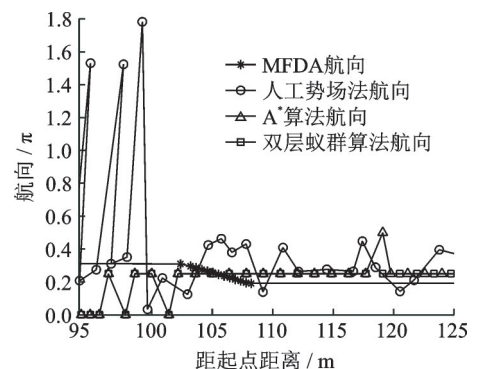


图12 路径航向变化

Fig.12 Change of course heading

角变化。但是人工势场法、A*算法、双层蚁群算法规划的路径均存在航向突变的情况,不符合无人机实际飞行时的航向变化,无法应用在真实飞行环境中。

4 结束语

针对无人机飞行过程中遭遇突发威胁区域的场景,提出了一种多因素Dubins算法,该算法在Dubins路径的基础上建立路径扩展点评估函数,通过引入路径长度评估因子和威胁评估因子对路径扩展点进行选择,从而可以有效地降低路径搜索点的数量。同时结合启发式搜索的思想,对可能出现的路径长度代价和威胁代价进行评估,达到了缩短路径长度的目的。并且增加无人机起始点方向和到达目的点方向限制条件,构建了适用于真实环境中的无人机飞行航迹。仿真表明,MFDA算法在突发威胁区域场景下,可以规划出较短的路径,同时相比于传统的航迹规划算法具有较少的路径搜索点,并且得到的路径符合无人机实际飞行时的航向变化。

本文仅考虑了单架无人机的航迹规划,在下一步的研究中将研究在无人机集群情况下的航迹安全和威胁区域规避等基本问题。

参考文献:

- [1] BORTOFF S A. Path planning for UAVs[C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2000: 364-368.
- [2] EDSGER W D. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische mathematik, 1959, 1: 269-271.
- [3] LAVALLE S M. Planning algorithms[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [4] 姚远, 周兴社, 张凯龙, 等. 基于稀疏A*搜索和改进人工势场的无人机动态航迹规划[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 953-959.
YAO Yuan, ZHOU Xingshe, ZHANG Kailong, et al. Dynamic trajectory planning for unmanned aerial vehicle based on sparse A* search and improved artificial potential field[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(7): 953-959.
- [5] WANG C, WANG L, QIN J, et al. Path planning of automated guided vehicles based on improved A-star algorithm[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation. [S.l.]: IEEE, 2015: 2071-2076.
- [6] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[M]. New York, USA: Springer, 1986: 396-404.
- [7] WEIGUANG L, XIA S. AGV path planning based on improved A* algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015 (10): 9.
- [8] CUI Shigang, WANG Hui, YANG Li. A simulation study of A-star algorithm for robot path planning[C]//Proceedings of 16th International Conference on Mechatronics Technology. [S.l.]: IEEE, 2012: 506-510.
- [9] WANG C, WANG L, QIN J, et al. Path planning of automated guided vehicles based on improved A-Star algorithm[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. [S.l.]: IEEE, 2015: 2071-2076.
- [10] 许凯波, 鲁海燕, 黄洋, 等. 基于双层蚁群算法和动态环境的机器人路径规划方法[J]. 电子学报, 2019, 47(10): 2166-2176.
XU Kaibo, LU Haiyan, HUANG Yang, et al. Robot path planning based on double-layer ant colony optimization algorithm and dynamic environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(10): 2166-2176.
- [11] BOUNINI F, GINGRAS D, POLLART H, et al. Modified artificial potential field method for online path planning applications[C]//Proceedings of 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). [S.l.]: IEEE, 2017: 180-185.
- [12] WU L, ZHA H, XIU C, et al. Local path planning for intelligent vehicle obstacle avoidance based on dubins curve and tentacle algorithm[C]//Intelligent & Connected Vehicles Symposium. [S.l.]: IEEE, 2017: 148-191.
- [13] TUQAN M, DAHER N, SHAMMAS E. A simplified path planning algorithm for surveillance missions of unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. [S.l.]: IEEE, 2019: 1341-1346.
- [14] 韩庆田. 基于Dubins曲线的多UAV协同航迹规划研究[J]. 航空计算技术, 2019, 49(4): 13-16.
HAN Qingtian. Research on cooperate path planning of multiple UAVs based on Dubins curve[J]. Aeronautical Computing

Technique, 2019, 49(4): 13-16.

- [15] ŽIVOJEVIĆ D, VELAGIĆ J. Path planning for mobile robot using Dubins-curve based RRT algorithm with differential constraints[C]//Proceedings of 2019 International Symposium ELMAR. [S.l.]: IEEE, 2019: 139-142.
- [16] GUIMARAES M D, ALVES N A, FIUZA D C N, et al. An evolutionary approach for the dubins' traveling salesman problem with neighborhoods[C]//Proceedings of the 14th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York: [s.n.], 2012: 377-384.
- [17] DUCHOŇ F, BABINEC A, KAJAN M, et al. Path planning with modified A-star algorithm for a mobile robot[J]. Procedia Engineering, 2014, 96: 59-69.
- [18] CHEN Y, LUO G, MEI Y, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory [J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 1407-1420.

作者简介:



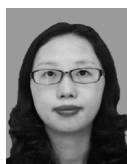
黄加红(1998-),男,硕士研究生,研究方向:无线网络, E-mail: huang_jiahong8023@163.com。



白丽(1980-),女,硕士研究生,工程师,研究方向:航天质量管理与载荷总体设计, E-mail: baili1980@sina.com。



范兼睿(1995-),男,硕士研究生,研究方向:无线网络, E-mail: 1120024468@nuaa.edu.cn。



张莉娟(1987-),女,副教授,硕士生导师,研究方向:RFID 标签识别和定位,物联网感知层接入协议设计, E-mail: lijuan.zhang@nuaa.edu.cn。



雷磊(1981-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:航空平台组网技术、智能无人机集群技术、卫星星座组网技术, E-mail: leilei@nuaa.edu.cn。

(编辑:陈珺)