

仿生扑翼微型飞行器动态避障策略

郑皓¹, 余立均¹, 智鹏鹏^{1,2}, 汪忠来^{1,2}

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院, 成都 611731; 2. 电子科技大学长三角研究院(湖州), 浙江湖州 313099)

摘要: 针对仿生扑翼微型飞行器飞行过程中的动态避障问题, 提出了一种全局静态路径规划与局部动态路径规划相结合的避障路径规划策略。首先, 综合考虑仿生扑翼微型飞行器的性能及其飞行环境, 定义了路径规划的约束条件和代价函数, 构建了全局静态避障的综合代价模型; 其次, 在此基础上考虑了动态障碍对其飞行性能的影响, 提出基于时间窗口的碰撞约束, 建立了融合局部动态避障规划的综合代价模型; 最后, 提出了改进蚁群算法, 对综合全局静态路径规划与局部动态路径规划的避障路径规划进行优化求解。结果表明: 本文综合动态避障路径规划策略可以有效地解决仿生扑翼微型飞行器在先验地图下的动态避障问题, 一定程度上改进了动态障碍物下的避障路径寻优的不足; 本文改进蚁群算法提升了动态路径寻优效率, 保证了仿生扑翼微型飞行器避障控制的实时性要求。

关键词: 扑翼微型飞行器; 代价模型; 避障策略; 动态规划

中图分类号: V276 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2732-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211187

Dynamic obstacle avoidance strategy for flapping-wing micro air vehicles

ZHENG Hao¹, YU Li-jun¹, ZHI Peng-peng^{1,2}, WANG Zhong-lai^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313099, China)

Abstract: Aiming at the dynamic obstacle avoidance problem during the flying process of the Flapping-wing Micro Air Vehicle (FWMAV), a novel obstacle avoidance scheduling strategy integrating the global path planning and the locally dynamic path planning is proposed in this paper. The static comprehensive cost model is first built by considering both the performance constraints of the FWMAV and its threat constraints during the flight environment. Based on the static cost model, a time-varying collision constraint between the FWMAV and dynamic obstacles is defined and then the dynamic comprehensive

收稿日期: 2021-11-14.

基金项目: 四川省杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0036).

作者简介: 郑皓(1996-), 男, 博士研究生. 研究方向: 仿生扑翼微型飞行器轨迹规划、结构设计.

E-mail: 201821040136@std.uestc.edu.cn

通信作者: 汪忠来(1980-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 仿生扑翼微型飞行器, 复杂系统可靠性设计, 人工智能算法.

E-mail: wzhonglai@uestc.edu.cn

cost model for the local obstacle avoidance is established. The improved ant colony algorithm is proposed for the obstacle avoidance scheduling strategy optimization. The results show that the proposed method can effectively handle the dynamic obstacle avoidance scheduling problem of the FWMAV under the known map and improve the dynamic obstacle avoidance scheduling strategy under the dynamic obstacles; meanwhile the improved ant colony algorithm can promote the efficiency of the dynamic path optimization to ensure the real-time requirement of the obstacle avoidance control of the FWMAV.

Key words: flapping-wing micro air vehicle; cost model; obstacle avoidance strategy; dynamic path planning

0 引言

仿生扑翼微型飞行器(Flapping-wing micro air vehicle, FWMAV)作为特种无人飞行器,鉴于其仿生性能优势,在民用领域及军用领域均存在广泛应用前景,并成为近年来飞行器领域的研究热点^[1-3]。路径规划作为飞行器自主功能的一项关键技术,对FWMAV实施自主飞行决策和智能导航具有至关重要的作用。

目前,路径规划方法大致分为3个方向:基于图形的算法、启发式搜索算法和现代智能算法^[4,5]。基于图形的算法以概率路线图(Probabilistic roadmap, PRM)法为代表,根据算法的路径搜索方法,随机搜索环境空间中下一步可能的路径^[6]。启发式搜索算法以A*算法为典型代表,以从初始位置到终点位置间的最小代价为目标,搜索解空间内的最优路径^[7]。现代智能算法大部分属于进化式搜索算法^[8-12],包括:遗传算法、蚁群优化算法、人工神经网络、即时定位与地图构建(Simultaneous localization and mapping, SLAM)等,通过迭代搜索寻找最优路径,其简单、高效且收敛速度快。当前的路径规划算法较为普遍地应用于静态避障,在处理动态避障时,会因效率低而出现实时性问题。因此,现有路径规划算法常用于速度较慢的地面移动机器人、四旋翼飞行器等静态路径规划和避障中。

针对FWMAV的避障问题,代尔夫特理工大学结合机载立体视觉系统,运用“液滴算法”、“光流算法”,以观测目标表面或边缘的相对运动实现静态障碍物的视觉检测,通过简单启停、转弯等动作实现FWMAV对障碍物的规避^[13,14]。普渡大学微飞行器团队^[15]通过FWMAV柔性翅翼对障碍物边缘的触碰,感知周围障碍物,使得FWMAV在狭窄通道内飞行。从现有文献看:针对

FWMAV路径规划和避障的研究较少,研究环境一般是确定的室内环境,且避障是通过实时检测信号实现的。另外,FWMAV主要在续航能力、机动性能方面有别于其他传统式飞行器,因此,如何结合FWMAV的性能特点,构建FWMAV的避障模型,保证在动态障碍物下避障策略的有效性和实时性,是实现FWMAV动态避障的重要问题之一。

针对FWMAV避障路径规划中可能存在动态障碍物的情形,本文提出了基于避障模型的静态全局规划与动态局部规划相结合的FWMAV避障路径规划策略。根据FWMAV的机动性能特点定义了动态路径规划的约束函数和威胁函数;针对存在动态障碍物的情况,提出了基于时间窗口的碰撞约束,在动态时间下建立了FWMAV局部动态路径规划的动态综合代价模型;采用改进蚁群算法,研究了全局路径规划与局部动态路径规划相结合的FWMAV动态避障路径规划策略。

1 FWMAV动态避障模型

研究FWMAV的动态飞行避障问题,将障碍物划分为两大类:静态已知障碍物和环境中随机出现的动态障碍物。根据避障路径规划的优先顺序,分别建立静态障碍物下的全局避障路径规划模型,以及动态障碍物下的局部动态避障路径规划模型。

1.1 FWMAV全局避障路径规划模型

本文将结合FWMAV的环境威胁及其性能约束,建立动态避障情况下的全局避障路径规划模型。

(1) 路径规划约束

FWMAV在已知环境中存在的避障路径规划约束主要来自地貌约束以及自身性能约束两个

方面。

首先,地貌约束主要针对相应的地貌环境,包括地理地形、地物约束以及大气约束等,此区域为 FWMAV 不可通过区域。

地貌约束区域以高度表征的坐标函数可表示为:

$$h(x, y) = \sin(y + a) + b \cdot \sin(x) + \cos(c \cdot \sqrt{x^2 + y^2}) + (d + f) \cdot \cos(y) + e \cdot \sin(e \cdot \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (1)$$

式中: h 为水平坐标对应的高度; x, y 为水平面的横纵坐标; a, b, c, d, e, f 均为常数。

其次,FWMAV 的避障路径规划需要将自身机动性能考虑在内。根据 FWMAV 的具体飞行情况,建立的性能约束函数主要包含飞行距离约束、转弯半径约束、飞行高度约束以及最小步长约束。

①飞行距离约束

FWMAV 的自主路径规划需要考虑能源、时间配给上的限制以及返航等问题,因此存在一个最远飞行距离,记为 L_{\max} 。假设某条飞行路径存在 N 个节点,第 i 到第 $i+1$ 节点间的距离为 l_i ,则最远飞行距离满足:

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^{N-1} l_i \\ L \leq L_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

②转弯半径约束

FWMAV 的转弯能力是一项极其重要的机动性能指标,一定程度上体现了 FWMAV 的灵活性。FWMAV 在实际飞行中,应用路径规划算法求解最优路径时,若规划路径的转弯半径小于 FWMAV 最小转弯半径时,FWMAV 将无法进行实际飞行,因此 FWMAV 在转弯时需要满足最小半径约束。FWMAV 最小转弯半径为 R_{\min} ,FWMAV 在转弯时任意转弯半径 R_i 必须满足:

$$\begin{cases} R_i \geq R_{\min} \\ R_{\min} = V_{\min} / \left(g \times \left| \sqrt{m_{y\max}^2 - 1} \right| \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度; V_{\min} 为 FWMAV 的最小飞行速度; $m_{y\max}$ 为 FWMAV 的最大法向过载。

③飞行高度约束

FWMAV 在实际飞行过程中,受到气动性能的限制以及抵抗环境干扰能力等因素的影响,其飞行高度有一定的范围要求。设 FWMAV 最高

可飞行高度为 H_{\max} ,最低可飞行高度为 H_{\min} ,其当前飞行高度 H_i 需满足约束:

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \quad (4)$$

④最小步长约束

FWMAV 在实际飞行过程中需要随时调整姿态,并控制飞行器前飞、后飞、爬升、转弯等动作,这一系列指令的执行需要花费一定时间。为了确保 FWMAV 的稳定飞行以及避免飞行途中的碰撞,必须要预留一个缓冲飞行距离,这一段距离定义为最小步长。一般情况选取研究对象 1 s 的飞行距离作为最小步长。设最小步长为 S_{\min} ,则 FWMAV 在飞行过程中任意步长 S_i 需要满足:

$$S_i \geq S_{\min} \quad (5)$$

(2)武器装备威胁

武器装备威胁包括:具有毁坏机体作用的杀伤力武器、具有探测功能的雷达威胁等。FWMAV 可处于此区域,但可能因受到人为干预而导致飞行器功能丧失。因此,飞行过程中应尽量规避。

假设区域 A 为武器装备威胁区域,仍然以式(1)中的坐标函数表达,当 FWMAV 处于区域 A 时,将有几率被击落或侦查,否则不会受到威胁。定义包含武器装备威胁的代价函数 T_D 为:

$$T_D = \begin{cases} 1, & \text{FWMAV} \in A \\ 0, & \text{FWMAV} \notin A \end{cases} \quad (6)$$

根据 FWMAV 的避障路径规划约束和武器装备威胁,建立实施全局避障路径规划的综合代价模型:

$$\begin{cases} \min_p C(p) \\ \text{s.t. } g(p) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: p 为从起点到终点的一条飞行路径,该路径由先验地图中一系列可选节点组成(见图1)。

$$p = \{r_0, r_1, \dots, r_i, \dots, r_N\} \quad (8)$$

$g(p)$ 为约束函数,包含 FWMAV 定义的性能约束函数; $C(p)$ 为飞行路径的总代价函数:

$$C(p) = \sum_{i=1}^{N-1} (w_1 D(r_i) + w_2 H(r_i) + w_3 T_D(r_i)) \quad (9)$$

式中: $D(r_i)$ 为从节点 r_i 到下一节点 r_{i+1} 的距离代价函数; $H(r_i)$ 为飞行高度代价函数,以相邻节点的高度差表征规划路径的飞行高度波动程度; $T_D(r_i)$ 为威胁代价函数,表示节点 r_i 受到武器威胁的代价; w_1, w_2, w_3 分别为距离代价函数、飞行高度代价函数以及威胁代价函数的权重系数。

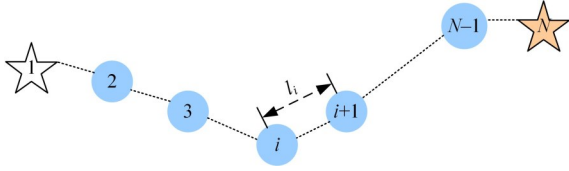


图 1 飞行路径表达

Fig. 1 Description of the flight trajectory

$$D(r_i) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (10)$$

$$H(r_i) = |z_{i+1} - z_i| \quad (11)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (12)$$

$$\omega_1, \omega_2, \omega_3 \in [0, 1]$$

对上述建立的综合代价模型寻优,可获得 FWMAV 在已知先验地图和武器威胁下的全局最优避障路径。

1.2 FWMAV 局部动态避障路径规划模型

在全局先验地图中根据静态已知障碍物建立的 FWMAV 路径规划约束已在 1.1 节讨论, FWMAV 实施动态避障的重点是对环境中动态障碍物的运动路径进行规避,因此需要建立动态障碍物的运动模型。

如图 2 所示,综合代价模型寻优的 FWMAV 的初始规划路径用已知函数 X^{FWMAV} 表示。假设 FWMAV 沿预定轨迹飞行过程中可以探测周围动态障碍物并预测动态障碍物的运动轨迹,用已知函数 $X^{obstacle}$ 表示。

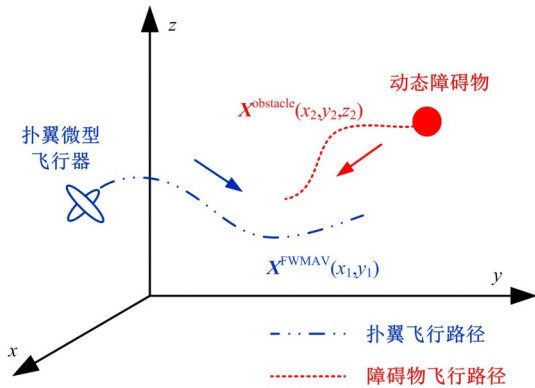


图 2 FWMAV 和运动障碍物轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the trajectories of the FWMAV and the obstacles

假设 FWMAV 和动态障碍物的运动是与时间 t 相关的函数,将其离散为一系列时间上的点,则可以将 FWMAV 和障碍物的运动轨迹分别表示为与时间相关的离散变量 $X^{FWMAV}(nT)$ 和 $X^{obstacle}(nT)$,其表达式分别为:

$$X^{FWMAV}(t) \Big|_{t=nT} = X^{FWMAV}(nT) \quad (13)$$

$$X^{obstacle}(t) \Big|_{t=nT} = X^{obstacle}(nT) \quad (14)$$

式中: $n \in R$, 且 n 为正整数。

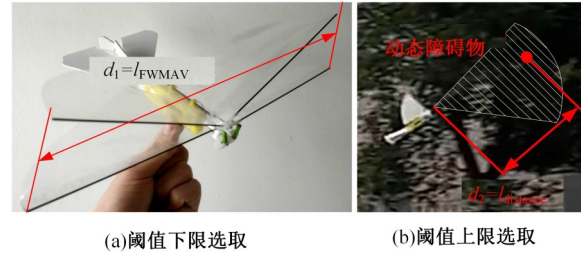
根据 FWMAV 和障碍物运动轨迹的离散表达式,可以建立 FWMAV 的碰撞模型为:

$$|X^{FWMAV}(iT) - X^{obstacle}(iT)| \leq \epsilon \quad (15)$$

式中: $X^{FWMAV}(iT)$ 、 $X^{obstacle}(iT)$ 分别为在 iT 时刻 FWMAV 和障碍物的预测位置; ϵ 为碰撞的安全阈值。

当 FWMAV 与障碍物之间的位置阈值小于等于 ϵ 时,预测 FWMAV 将会与动态障碍物发生碰撞。

碰撞阈值下限选取 FWMAV 的翼展宽度 d_1 , 如图 3(a) 所示; 阈值上限选取当前位置下 FWMAV 与动态障碍物的直线距离 d_2 , 如图 3(b) 所示。



(a) 阈值下限选取

(b) 阈值上限选取

图 3 碰撞安全阈值 ϵ 选取

Fig. 3 Collision threshold ϵ selection

碰撞模型的安全阈值 ϵ 需满足:

$$d_1 < \epsilon \leq d_2 \quad (16)$$

根据碰撞模型,定义时间窗口 $[0, nT]$ 上的 FWMAV 动态碰撞约束 $h(p(t))$ 为:

$$h(p(t)) = |p(t) - X^{obstacle}(t)| - \epsilon \quad (17)$$

式中: $t = 0, T, 2T, \dots, nT$ 。

碰撞约束表明,从 FWMAV 开始实施局部路径规划的时刻 $t = 0$ 起,至未来时刻 $t = nT$ 的时间窗口内,局部规划路径和预测的动态障碍物的路径需要避免在同一时刻发生交叉。

综上所述,引入基于时间窗口的碰撞约束,定义 FWMAV 局部动态路径规划的动态综合代价模型为:

$$\begin{cases} \min_p C(p(t)) \\ \text{s.t. } g(p(t)) \geq 0 \\ h(p(t)) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $t = 0, T, 2T, \dots, nT$ 。

1.3 改进蚁群算法

本文采用蚁群(Ant colony optimization, ACO)算法对上述FWMAV避障模型实施路径寻优。为减少算法的搜索时间,加速FWMAV对避障路径实时更新的过程,需提升传统蚁群算法的计算效率。

改进蚁群算法主要是对信息素更新方式的改进,得到改进后信息素 τ_{ij} 的更新公式:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k + (\Delta E \cdot \tau_{ij}^k - \Delta R \cdot \tau_{ij}^k) \quad (19)$$

$$\Delta E = \begin{cases} m_b(Q/L_b), & \text{最优路径经过} ij \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$\Delta R = \begin{cases} m_o(Q/L_o), & \text{其他} \\ 0, & \text{最优路径经过} ij \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\rho \in [0, 1]$ 为信息素挥发系数; m 为蚁群总量; ΔE 为信息素增量因子; ΔR 为信息素衰减因子; m_b 、 m_o 分别为最优路径和非最优路径上的蚁群数量; L_b 、 L_o 分别为当前寻找到的最优路径和非最优路径长度; Q 为信息素总量。

本文对蚁群算法改进采用精英策略,增强精英蚁群单次搜索得到的最优路径上的信息素,削弱非最优路径对下一次蚁群路径搜索的影响。因此,最优解对于蚁群的路径选择有指导作用,精英蚁群将加速最优路径搜索的收敛能力;另外,信息素表达中,增量因子 ΔE 和衰减因子 ΔR 的引入,保留了精英蚁群跳出局部最优路径搜索的概率,增强了蚁群对全局最优路径搜索的能力。综上所述,本文采用的改进蚁群算法,在保留原有搜索模式的情况下,增强了精英个体的指导作用,可有效提升算法搜索效率,同时避免算法陷入局部最优。

1.4 FWMAV避障路径规划策略

FWMAV的避障策略主要分为2个步骤:①全局静态避障路径规划:在已知的先验全局地图内,根据FWMAV自身性能和飞行环境约束,建立综合代价模型,优先规划出一条初始的静态飞行路径;②局部动态避障路径规划:建立FWMAV动态避障的碰撞约束,更新动态综合代价模型。动态综合代价模型所实施的路径规划将更新FWMAV的当前位置到设定终点的局部路径。

全局静态路径规划与局部动态路径规划所建

立的综合代价模型和动态综合代价模型均使用改进蚁群算法寻优,FWMAV避障路径规划算法的总体流程如图4所示。

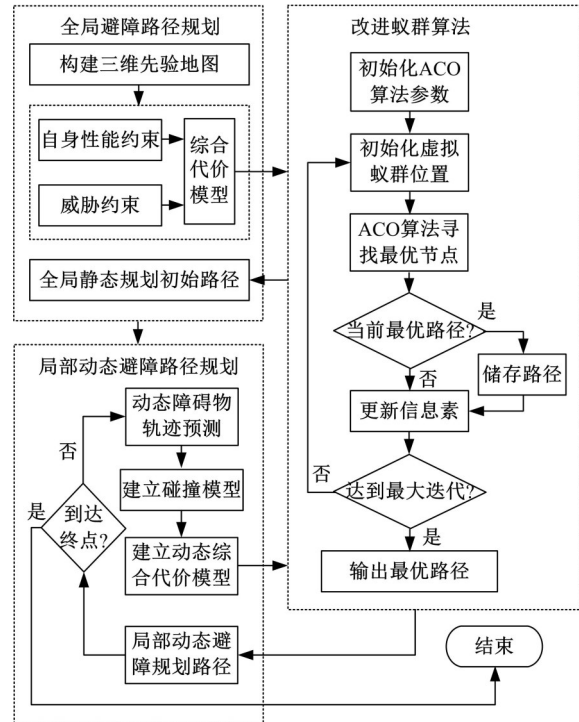


图4 FWMAV避障路径规划算法流程

Fig. 4 Flow chart of the path planning algorithm for FWMAV

2 仿真实验验证

为验证本文FWMAV避障策略的有效性和计算效率,选取自主研发的FWMAV样机的性能参数定义性能约束,如表1所示,进行全局避障路径规划和局部动态避障路径规划仿真验证。

表1 FWMAV样机性能参数

Table 1 Performance parameters of the FWMAV prototype

参数	取值
翼展/cm	26
机身重量/g	30
额外负载/g	20
飞行速度/(m·s ⁻¹)	2
最远飞行距离/km	2
最小转弯半径/m	0.41
飞行高度范围/m	[0, 50]

(1) 全局避障路径规划

对FWMAV所处的三维环境空间进行建模,图5为某模拟三维环境空间转化的数字地图。地图中的威胁约束,如自然环境威胁、武器威胁和雷

达威胁等,均建立了覆盖范围,该范围认定为 FWMAV 不可通过空间。该数字地图空间大小为 $1000 \times 1000 \times 150 \text{ m}^3$,则搜索区域共计 1.5×10^8 个位置点。

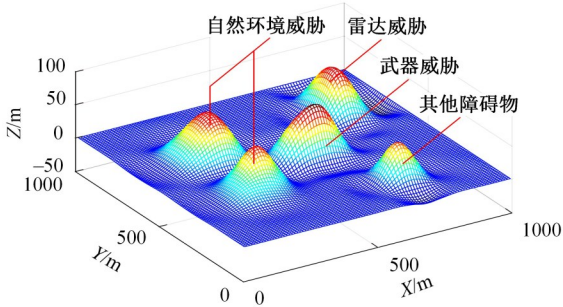


图 5 三维环境空间的先验数字地图

Fig. 5 Digital map of three-dimensional environment space

根据图 4 所示 FWMAV 的全局避障路径规划算法流程,使用相同的计算平台,分别采用蚁群算法和改进蚁群算法,从规划起点 $(0, 490, 33)$ 至规划终点 $(1000, 400, 40)$,进行全局避障飞行路径规划。相关参数如下: $S_{\min}=2 \text{ m}$; $\omega_1=0.7$; $\omega_2=0.2$; $\omega_3=0.1$; $\rho=0.5$; $Q=1000$ 。蚁群算法其他参数设置参见文献[16]。

FWMAV 在先验地图下的全局避障路径规划路线如图 6 所示,算法搜索得到的避障路径并

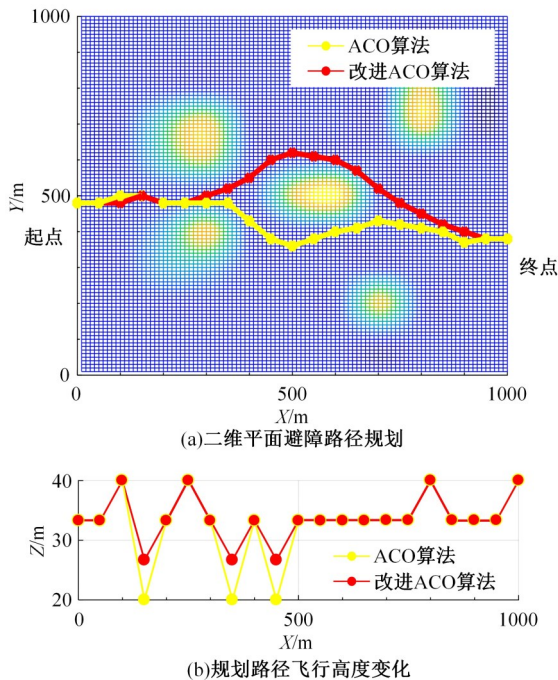


图 6 FWMAV 全局避障路径规划结果

Fig. 6 Results of the global obstacle avoidance path planning for FWMAV

非是距离最短路径,而是包含距离指标在内的综合代价指标最小的最优路径。二维平面的避障路径规划结果如图 6(a)所示,在先验地图下的避障路径将规避环境中的静态障碍物区域。同时,基于 FWMAV 自身的性能约束,规划模型在路径的寻优将尽可能平滑。改进蚁群算法相较于传统蚁群算法的规划路径不同,但改进蚁群算法所规划的避障路径显得更为平滑。FWMAV 规划路径飞行高度变化如图 6(b)所示,在飞行的前期,改进蚁群算法规划的飞行高度变化范围明显小于传统蚁群算法,飞行高度范围的优化将降低 FWMAV 的能量损耗。

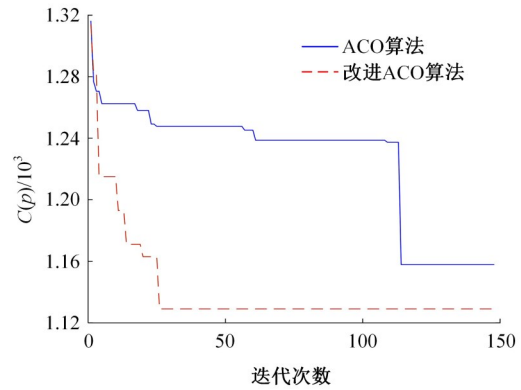


图 7 算法迭代次数与代价函数值关系

Fig. 7 Correlation between the iteration time and the fitness value

算法迭代次数与代价函数值的关系如图 7 所示。迭代计算结果表明,改进蚁群算法能够有效地减少迭代计算次数,加快最优路径搜索速率。传统蚁群算法在迭代次数达到约 120 次时达到收敛,而改进蚁群算法在 30 次迭代计算后即达到收敛。其次,从优化结果进行比较,改进蚁群算法所优化的代价函数值小于传统蚁群算法的优化值,表明传统蚁群算法易陷入局部最优解,从而获得全局规划的次优路径,而改进蚁群算法能够有效避免陷入局部最优的情况,以获得更好的优化结果。

蚁群算法和改进蚁群算法规划路径的性能对比结果如表 2 所示。表 2 中,Len 为规划路径的长度;Hgt 为规划路径上 FWMAV 的飞行高度代价;Tim 为算法迭代计算时间;Rate 为算法的个体收敛率,即处于最优结果个体与全体的比例。结果表明:改进蚁群算法相比于传统蚁群算法,有效降低了距离消耗;改进蚁群算法所规划路径的飞行高度更低,减少了飞行高度的波动;改进蚁群算

表 2 改进 ACO 算法与传统 ACO 算法避障路径规划结果对比

Table 2 Path planning result comparison between the improved ACO and the conventional ACO algorithm

传统 ACO				改进 ACO 算法				改进提升		
Len/m	Hgt/m	Tim/s	Rate/%	Len/m	Hgt/m	Tim/s	Rate/%	Len/m	Tim/s	Rate/%
1626	127	23.65	42.7	1587	85	6.80	61.3	39	16.85	18.6

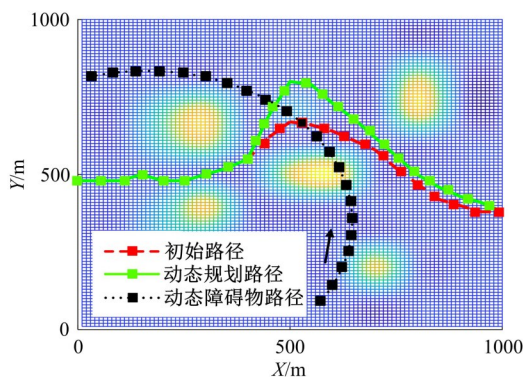
法的搜索时间将节约 16.85 s, 计算效率约提升了 71.2%; 改进蚁群算法的个体收敛性能明显好于传统蚁群算法。综上所述, 从算法的规划精度、迭代效率、收敛性能的综合指标评价, 改进蚁群算法对路径规划的效果提升明显, 对路径规划问题的综合适应性程度更高。

(2) 局部动态避障路径规划

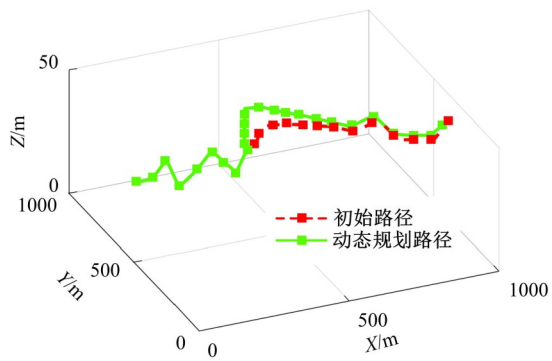
先验地图中存在动态障碍物情况的 FWMAV 避障路径规划仿真实验, 主要考虑两种情况: ① FWMAV 与动态障碍物相遇发生碰撞; ② 动态障碍物沿 FWMAV 飞行的路线, 且速度大于 FWMAV 速度时发生追及碰撞。

局部动态避障路径规划的初始飞行路线均以改进蚁群算法所规划的路径为标准, 设定 FWMAV 从起点沿初始路径以 2 m/s 的速度匀速飞行。根据图 3 中局部动态避障路径规划流程实施仿真, 算法设定: FWMAV 在 200 m 范围内检测障碍物并预测其运动轨迹, 碰撞安全阈值 $\epsilon = 50$ m。

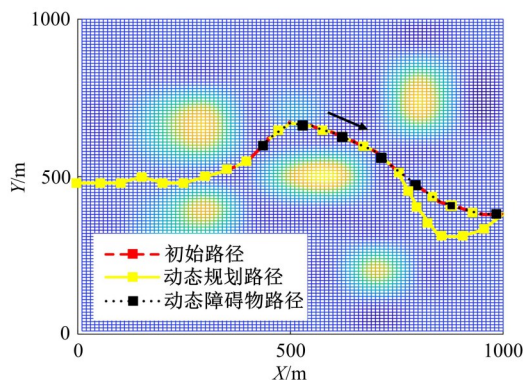
FWMAV 在动态障碍物存在于环境中的局部动态避障路径规划结果如图 8 所示, 图 8 中所标注各节点分别为处于初始路径和动态规划路径上的 FWMAV、处于运动轨迹上的动态障碍物在各时刻所处的空间位置。



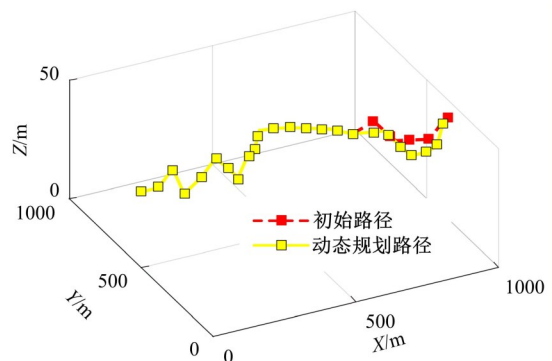
(a) 二维视图下的相遇碰撞局部路径规划结果



(b) 三维视图下的相遇碰撞局部路径规划结果



(c) 二维视图下的追及碰撞局部路径规划结果



(d) 三维视图下的追及碰撞局部路径规划结果

图 8 FWMAV 局部动态避障路径规划

Fig. 8 Local dynamic path planning results of FWMAV

相遇碰撞的仿真结果如图 8(a)(b) 所示, 动态障碍物在某一等高平面内沿圆弧线从地图下部出发, 障碍物运动速度为 2 m/s, 障碍物路径将与 FWMAV 的初始规划路径在第 12 个节点位置发

生重叠, 而发生侧面碰撞。FWMAV 局部动态路径规划结果表明: 动态障碍物未出现在 FWMAV 检测范围内时, 或检测到与动态障碍物不会发生碰撞, FWMAV 不需要调整飞行路径, 前期飞行

路径将暂时与初始飞行路径一致。当FWMAV初始飞行轨迹与障碍物轨迹将要发生重叠,将在当前位置至飞行终点的局部范围内重新规划动态避障路径,在下一次动态规划的时间间隔内,FWMAV按照当前修正的路径继续飞行。

追及碰撞的仿真结果如图8(c)(d)所示。为保证参数设置满足障碍物运动速度大于FWMAV速度的碰撞条件,障碍物沿初始规划路径运动,以4 m/s的速度匀速运动,当FWMAV沿初始路径运动到第15个节点处,障碍物从第10个节点处出发并展开追逐,动态障碍物与FWMAV将在第20个节点位置发生碰撞。结果表明:FWMAV的前段飞行路径与初始规划路径相同,当障碍物进入FWMAV的检测范围内时,FWMAV会在即将发生碰撞前更新局部路径,从而让障碍物优先通过。

3 结 论

(1)在静态先验地图下实施全局路径规划时,建立了FWMAV的综合代价模型。该模型更符合FWMAV的性能要求,规划的全局避障路径更为平滑。

(2)在动态障碍物存在于先验地图的情况下,考虑FWMAV与动态障碍物的碰撞因素,提出了基于时间窗口的动态碰撞约束,建立了FWMAV的动态综合代价模型。该模型增加了动态障碍物轨迹对避障路径寻优的约束,从而达到FWMAV在动态障碍物下进行路径规划的目的。

(3)提出了全局路径规划与局部动态路径规划结合的FWMAV避障路径规划策略,该策略能够适应先验地图和存在动态障碍物的综合情况,FWMAV将结合动态障碍物的运动形式,实时规划避障路线。本文采用的改进蚁群算法提升了71.2%的计算效率,寻优结果更加准确。

参考文献:

- [1] Phan H V, Aurecianus S, Au T K L, et al. Towards long-endurance flight of an insect-inspired, tailless, two-winged, flapping-wing flying robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5059-5066.
- [2] Zhi P, Xu Y, Chen B. Time-dependent reliability analysis of the motor hanger for EMU based on stochastic process[J]. International Journal of Structural Integrity, 2020, 11(3): 453-469.
- [3] Li Y H, Sheng Z, Zhi P, et al. Multi-objective optimization design of anti-rolling torsion bar based on modified NSGA-III algorithm[J]. International Journal of Structural Integrity, 2021, 12(1): 17-30.
- [4] 霍凤财,迟金,黄梓健,等. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 吉林大学学报:工学版, 2018, 36(6): 639-647.
Huo Feng-cai, Chi Jin, Huang Zi-jian, et al. Review of path planning for mobile robots[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 36(6): 639-647.
- [5] Triharminto H H, Prabuwo A S, Adji T B, et al. UAV dynamic path planning for intercepting of a moving target: a review[J]. Communications in Computer & Information Science, 2013, 376: 206-219.
- [6] 程谦,高嵩,曹凯,等. 基于PRM优化算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(12): 254-259.
Cheng qian, Gao song, Cao kai, et al. Path planning of mobile robot based on PRM optimization algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(12): 254-259.
- [7] Kong X D, Pan B, Cherkashin E, et al. Multi-constraint UAV fast path planning based on improved A* algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1624(4): No. 042009.
- [8] 林韩熙,向丹,欧阳剑,等. 移动机器人路径规划算法的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(18): 38-48.
Lin Han-xi, Xiang Dan, Ouyang Jian, et al. Review of path planning algorithms for mobile robots[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(18): 38-48.
- [9] 戴健,许菲,陈琪锋. 多无人机协同搜索区域划分与路径规划[J]. 航空学报, 2020, 41(增刊1): 149-156.
Dai Jian, Xu Fei, Chen Qi-feng. Multi-UAV cooperative search on region division and path planning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(Sup. 1): 149-156.
- [10] 李波,杨志鹏,贾卓然,等. 一种无监督学习型神经网络的无人机全区域侦察路径规划[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 77-84.
Li Bo, Yang Zhi-peng, Jia Zhuo-ran. An unsupervised learning neural network for planning UAV full-area reconnaissance path[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 77-84.
- [11] 王巍,梁桥. 基于单目视觉和惯性测量的飞行器自

- 定位研究[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 34(6): 774-780.
- Wang Wei, Liang Qiao. Research of ego-positioning for micro air vehicles based on monocular vision and inertial measurement[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 34(6): 774-780.
- [12] 王晓东, 张永强, 薛红. 基于改进蚁群算法对 VRP 线路优化[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 35(2): 198-203.
- Wang Xiao-dong, Zhang Yong-qiang, Xue Hong. Improved ant colony algorithm for VRP[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 35(2): 198-203.
- [13] Ho H W, Wagter C D, Remes B D W, et al. Optical-flow based self-supervised learning of obstacle appearance applied to MAV landing[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 100: 78-94.
- [14] Tijmons S, Croon D G C H E, Remes B D W, et al. Obstacle avoidance strategy using onboard stereo vision on a flapping wing MAV[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(4): 858-874.
- [15] Tu Z, Fei F, Zhang J, et al. Acting is seeing: navigating tight space using flapping wings[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation, Montreal, Canada, 2019: 95-101.
- [16] 余立均. 仿生扑翼微型飞行器路径规划研究[D]. 成都: 电子科技大学航空学院, 2021.
- Yu Li-jun. Study on path planning of bio-inspired flapping-wing micro aerial vehicles[D]. Chengdu: College of Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, 2021.