

基于 Dubins 路径的无人机避障规划算法

关震宇¹, 杨东晓¹, 李杰¹, 尚雅玲², 江志清¹

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 海军工程大学 机电学院, 山东, 烟台 264000)

摘 要: 研究了一种基于 Dubins 路径的无人机的避障规划算法. 通过采用遗传算法, 结合无人机的飞行性能和最小转弯半径, 提出了一种在已知障碍空间位置前提下的无人机路径规划方法, 并通过算法改进, 将其推广成为在未知情障位置等先验知识的前提下的无人机实时避障算法. 仿真结果表明, 该算法原理正确, 对于多障碍环境下无人机避障策略的获取具有较好效果.

关键词: Dubins 路径; 无人机; 多障碍实时避障; 遗传算法

中图分类号: TJ 85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2014)06-0570-06

Obstacle Avoidance Planning Algorithm for UAV Based on Dubins Path

GUAN Zhen-yu¹, YANG Dong-xiao¹, LI Jie¹, SHANG Ya-ling², JIANG Zhi-qing¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Naval Aviation Engineering Academy, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: A new obstacle avoidance algorithm based on Dubins path was presented for unmanned aerial vehicle (UAV). Considering the aviation performances and the least swerve radius of UAV, adopting genetic algorithm (GA), a path planning method was established to get the optimal path while all the obstacles' positions were known. The algorithm was improved so as to solve the problems that the obstacles' positions were still unknown, and made the UAV have the ability of real-time obstacle avoidance. The simulation results showed that the principles of these algorithms are correct, and UAV can be guided to the intended target reliably with these methods shown in this article.

Key words: Dubins path; unmanned aerial vehicle (UAV); real-time multi-obstacles avoidance; genetic algorithm

长期以来,低空无人机的自主飞行都是无人机系统技术的研究热点,其自主飞行的一个核心技术是避障技术,即在飞行过程中根据障碍信息调整航迹,做出规避动作的技术。

目前,传统进行无人机避障规划的算法包括有梯度法、样条插值法、非线性规划法、最优控制法、A*算法、神经网络法、模拟退火法、遗传算法、蚁群算法、动态规划算法等^[1-5],但上述方法把无人机当

做质点,未考虑其自身飞行性能以及由于最小转弯半径对于避障模型建立带来的影响。Dubins L E^[6]考虑到了转弯半径对于车辆(飞行器)运动的影响,使用几何方法首先讨论了运动初始状态和终止状态之间的最短曲线问题,第一次提出了 Dubins 路径的概念;Yeol J W 等^[7]则给出了适用 Dubins 路径概念获取二维最短路径的方法,Thomaschewski B^[8]将 Dubins 路径应用到飞行器的研究中,使得飞行器

收稿日期: 2013-01-18

基金项目: 国家部委基础科研项目(B222XXXXXX)

作者简介: 关震宇(1987—),男,博士生, E-mail: guanzhenyu@bit.edu.cn.

通信作者: 李杰(1969—),男,教授,博士生导师, E-mail: lijie@bit.edu.cn.

的航路规划可以更加接近真正的飞行过程. 英国 Cranfield 大学的 Shanmugavel 等^[9]采用 Dubins 曲线方法实现了多无人机协同航路的规划,用欧几里得和微分几何的方法计算 Dubins 路径,但并未对于该路径在障碍情况下的获取进行研究. Florida 大学的 Joseph J. Kehoe^[10]采用微分方程的方法获得了离散的 Dubins 路径,并采用随机搜索树算法对无人机避障问题进行了研究,但是其获得是一系列的路点而不是连续的 Dubins 路径. 本文首先分析了在单障碍情况下 Dubins 路径的形态与计算方法,之后将多障碍避障问题抽象为一个最短路径问题,并使用遗传算法加以解决,最后在多障碍避障的基础上,通过改进模型,解决了无人机实时避障的问题.

1 无人机避障路径规划模型建立

1.1 模型假设与符号说明

为方便计算,本文将障碍抽象为圆形模型,即以障碍是其中以中心点为圆心的圆形区域,障碍区域半径 R_D 为

$$R_D = \max(R, R_0), \quad (1)$$

式中: R 为无人机最小转弯半径; R_0 为障碍物最远端到中心点距离. 采用如下符号定义: $P_s(x_s, y_s)$ 为无人机起始点坐标; \mathbf{v}_s 为无人机起始速度向量; $P_f(x_f, y_f)$ 为无人机终点坐标; \mathbf{v}_f 为无人机终点速度向量.

1.2 单障碍环境下避障路径规划模型

在单障碍环境下避障路径规划问题的求解可以归纳为下面这个问题:

在已知无人机出发点 $P_s(x_s, y_s)$ 、初始速度向量 \mathbf{v}_s 、终点 $P_f(x_f, y_f)$ 、终点速度向量 \mathbf{v}_f 、最小转弯半径 R 和障碍圆模型 D 的位置情况下,求解从 $P_s(x_s, y_s)$ 到 $P_f(x_f, y_f)$ 点,满足无人机飞行最小转弯半径约束的可避开障碍的安全最短飞行路径.

该问题的求解算法描述如下.

步骤 1 由 P_s, \mathbf{v}_s 和 R 确定起始圆 C_s 的位置和大小,由 P_f, \mathbf{v}_f 和 R 确定目标圆 C_f 的位置和大小,这样,在初始点和结束点可以分别按顺时针和逆时针方向生成的两个起始圆 C_{s1}, C_{s2} 和两个目标圆 C_{f1}, C_{f2} (见图 1).

步骤 2 选取起始圆 C_{s1} 和目标圆 C_{f1} ,作为第一组计算对象. 首先计算从起始圆 C_{s1} 到目标圆 C_{f1} 间的 Dubins 路径,若其不经过障碍圆 D ,则跳转到步骤 5,并将该路径作为其有效 Dubins 路径;

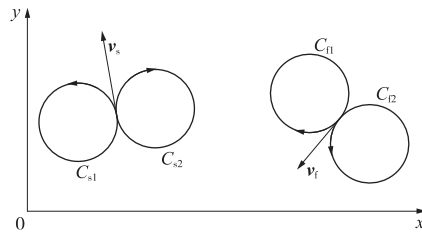


图 1 生成的 Dubins 路径的起始圆和目标圆
Fig. 1 Start circle and final circle of the Dubins path

否则,计算起始圆 C_{s1} 和障碍圆 D 之间的 Dubins 路径. 由于从障碍圆 D 驶出的速度方向不确定,故在起始圆 C_{s1} 和障碍圆 D 的 4 条 Dubins 路径中,根据判断公切线及 \mathbf{v}_s 相对于起始圆 C_{s1} 的方向,可以排除掉其中 2 条,还保留下有效 Dubins 路径为 S_1D-1 和 S_1D-2 ,如图 2 所示.

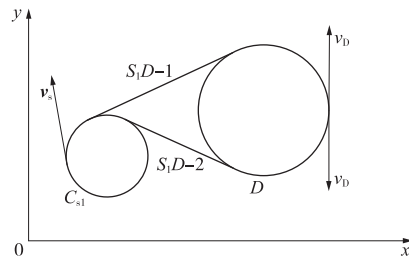


图 2 起始圆和障碍圆间 Dubins 路径
Fig. 2 Dubins path between the start circle and the obstacle

步骤 3 对障碍圆 D 和目标圆 C_{f1} 做 Dubins 路径,仿照第 3 步的算法,可以获得 2 条有效 Dubins 路径. 此时,根据运动连续性可知,从起始圆 C_{s1} 到目标圆 C_{f1} 、避开障碍圆 D 的 Dubins 路径中 2 条有效路径,即 S_1Df_1-1 和 S_1Df_1-2 (图 3),其中:

$$(S_1Df_1-1) = (S_1D-1) + (Df_1-1), \quad (2)$$

$$(S_1Df_1-2) = (S_1D-2) + (Df_1-2). \quad (3)$$

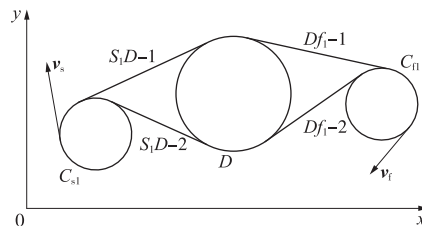


图 3 起始圆 C_{s1} 和目标圆 C_{f1} 之间的 Dubins 路径
Fig. 3 Dubins path between the start circle C_{s1} and the final circle C_{f1}

步骤 4 起始圆和目标圆之间共有 4 种组合,即 (C_{s1}, C_{f1}) , (C_{s1}, C_{f2}) , (C_{s2}, C_{f1}) 和 (C_{s2}, C_{f2}) . 返回步骤 2,若均与障碍圆相交,则依次计算其他几组. 从起始圆通过障碍圆到目标圆的有效 Dubins 路径共有 8 条,除了 S_1Df_1-1 和 S_1Df_1-2 外,其他

6 条是:

- ① 从起始圆 C_{s1} 到达目标圆 C_{t2} , 避开障碍圆 D 的 Dubins 路径 S_1Df_2-1 和 S_1Df_2-2 ;
- ② 从起始圆 C_{s2} 到达目标圆 C_{t1} , 避开障碍圆 D 的 Dubins 路径 S_2Df_1-1 和 S_2Df_1-2 ;
- ③ 从起始圆 C_{s2} 到达目标圆 C_{t2} , 避开障碍圆 D 的 Dubins 路径 S_2Df_2-1 和 S_2Df_2-2 .

步骤 5 逐一计算上述 8 条有效 Dubins 路径的长度, 选取其中最短路径即为单障碍条件下最短避障 Dubins 路径.

1.3 多障碍环境下避障路径规划模型

在无人机长距离飞行过程中, 有可能遇到的是多障碍同时存在的情况, 在该情况下无人机将面临更为复杂的规划问题.

多障碍环境下的避障问题的求解可以归纳如下.

在已知无人机出发点 $P_s(x_s, y_s)$ 、初始速度向量 v_s , 终点 $P_t(x_t, y_t)$, 终点速度向量 v_t , 最小转弯半径 R 和障碍圆模型 $D_k(k=1, 2, \dots, n)$ 的位置情况下, 求解从点 $P_s(x_s, y_s)$ 到 $P_t(x_t, y_t)$, 满足无人机飞行最小转弯半径约束的可避开障碍的安全最短飞行路径, 即求取从起始点 $P_s(x_s, y_s)$ 到 $P_t(x_t, y_t)$ 满足最小转弯半径约束的有向曲线.

可以证明, 该曲线是一条至少与 n 个障碍圆相切($n \in [0, k]$)的曲线, 如果将起始圆 C_s 和目标圆 C_t 作为一个有向图的起始点和目标点, 障碍圆 D_k 作为图中的各个顶点, 则可构建有向图 $G=(V, A)$, 其中 V 为数量为 $k+2$ 的非空顶点集, A 为有向路径的集合. 则本问题最终转化为求最短有向路 $(C_s, C_t)=(C_s, W, C_t)$ 的问题, 其中 W 为由该有向曲线遍历的各个障碍圆序列组成的集合, W 中各个障碍圆的顺序表明了其被遍历的顺序. 以图 4 为例来说明该问题, 该环境下的避障路径为 $(C_s, C_t)=(C_s, D_2, D_3, C_t)$. 这样就可以使用遗传算法来解决该问题. 遗传算法使用了群体搜索技术, 将种群代表一组问题解, 通过对当前种群施加选择、交叉和变异等一系列遗传操作, 从而产生新一代的种群, 并逐步使种群进化到包含近似最优解的状态. 遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架, 它不依赖于问题的具体领域, 对问题的种类有很强的鲁棒性. 该算法主要包括以下步骤.

- 步骤 1 初始化: 产生初始种群;
- 步骤 2 个体评价: 评估种群中每个染色体的

适应度;

- 步骤 3 选择: 将选择算子作用于种群, 依据适应度函数选择候选染色体;
- 步骤 4 交叉: 将交叉算子作用于种群, 产生新的子代个体;
- 步骤 5 变异: 将变异算子作用于种群, 对个体基因座上的基因值进行变动;
- 步骤 6 返回第 2 步直至达到终止条件.

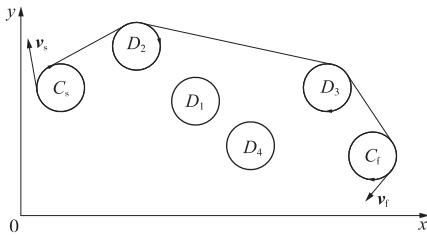


图 4 一个多障碍环境下避障的实例
Fig. 4 An example of the multi-obstacles avoidance

该算法的最关键部分是染色体编码. 在多障碍环境下, 无人机的避障路径不仅取决于所经历的障碍圆的顺序, 还与路径进入圆的方向有关. 因此考虑采用冗余二进制编码. 假设障碍数量为 N , 则需要染色体的位数为 $m=\ln N+1$, 其可表征的状态为 $2^m>N$, 则冗余的 2^m-N 个状态就可以用空位来表示. 仍以图 4 为例, 在 4 个障碍的情况下采用二进制编码需要 3 位, 则编码表见表 1.

表 1 遗传算法编码表
Tab. 1 Coding table for GA

编码	含义	编码	含义	编码	含义
000	D_1	011	D_4	110	Blank
001	D_2	100	Blank	111	Blank
010	D_3	101	Blank		

描述上述路径的一种路径是 $(D_2, D_3, \text{Blank}, \text{Blank})$, 其中使用 Blank 来补齐位数, 其染色体描述为 $(001, 010, 100, 101)$. 一个确定路径的冗余二进制编码描述是不唯一的, 即一种路径可以用多种染色体来表现, 这就是冗余二进制编码的一个优势, 它扩大了最优解的搜索空间, 使得算法可以快速收敛到最优解上.

本文选取路径长度的倒数作为适应度函数, 当路径顺序确定后, 每一条路径的计算事实上转化成了一系列的单障碍环境下的避障运算, 可以运用 1.2 节中的算法方便加以计算.

本文采用单点交叉算子. 在进化计算的后期, 为了提高收敛速度, 防止局部最优, 加入修正概率参

数 $p_{c_1}, p_{c_2}, p_{m_1}, p_{m_2}$, 对交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 定义如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{c_1} - \frac{(p_{c_1} - p_{c_2})(\xi' - \xi_{avg})}{\xi_{max} - \xi_{avg}} & \xi' \geq \xi_{avg} \\ p_{c_1} & \xi' < \xi_{avg} \end{cases}, \quad (4)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m_1} - \frac{(p_{m_1} - p_{m_2})(\xi_{avg} - \xi)}{\xi_{max} - \xi_{avg}} & \xi \geq \xi_{avg} \\ p_{m_1} & \xi < \xi_{avg} \end{cases}. \quad (5)$$

式中: ξ_{max} 为群体中个体适应度的最大值; ξ_{avg} 为迭代适应度的平均值; ξ' 为两个交叉个体的适应度的较大值; ξ 为变异个体的适应度的值。

1.4 无人机实时避障规划模型与算法

建立无人机搜索模型, 假设无人机的前向搜索区域为一个半径为 R_c , 开角为 θ 的扇形区域, 如图 5 所示。当障碍圆进入搜索区域后, 认为驱动事件出现, 于是无人机对当前避障策略进行重规划。

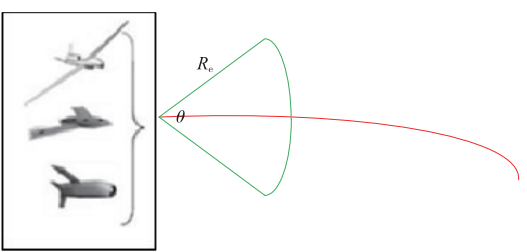


图 5 无人机搜索模型
Fig. 5 Explore model of UAV

该实时避障模型的算法流程如图 6 所示。

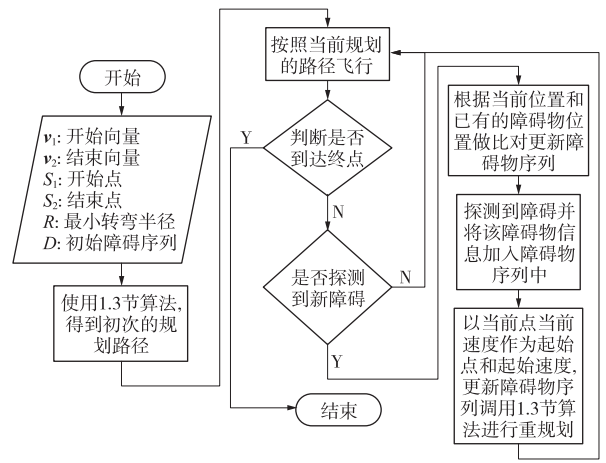


图 6 无人机实时避障模型算法流程
Fig. 6 Flow chart of the algorithm for UAV's real-time multi-obstacles avoidance model

2 仿真分析

2.1 单障碍环境下避障规划模型仿真分析

假设无人机飞行参数满足表 2 的约束。

表 2 无人机性能参数
Tab. 2 Parameters of UAV

参数	赋值
出发位置坐标/m	(0, 500)
出发点速度向量/(m · s ⁻¹)	(0, 50)
目标位置坐标/m	(3 000, -500)
出发点速度向量/(m · s ⁻¹)	(-30, -40)
匀速速度/(m · s ⁻¹)	50
最小转弯半径/m	100

分别假设在坐标位置为 (1 600, -200) m 和 (1 850, 50) m 处存在半径为 200 m 的障碍, 使用 1.2 节算法进行仿真得到避障路径分别如图 7、图 8 所示。

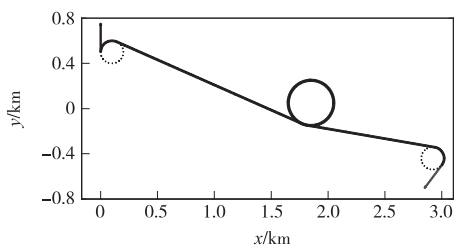


图 7 障碍中心坐标为 (1 600, -200) m 情况下无人机避障路径
Fig. 7 Path of obstacle avoidance with the obstacle's center at (1 600, -200) m

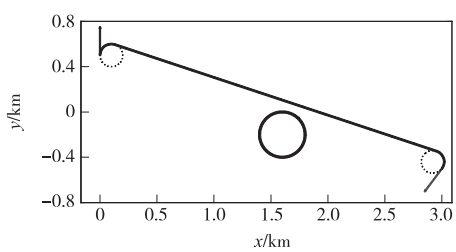


图 8 障碍中心坐标为 (1 800, 100) m 情况下无人机避障路径
Fig. 8 Path of obstacle avoidance with the obstacle's center at (1 800, 100) m

2.2 多障碍环境下避障规划模型仿真分析

假设无人机飞行参数满足表 2 约束, 障碍坐标见表 3。根据 1.3 节算法, 形成染色体编码列表如表 4 所示。修正参数 $p_{c_1} = 0.9, p_{c_2} = 0.6, p_{m_1} = 0.1, p_{m_2} = 0.01$, 经过遗传算法计算, 所获得无人机避障路径如图 9 所示。

表 3 障碍区域坐标

Tab. 3 Lists of the obstacle's position

障碍序号	中心点坐标/m	障碍半径/m
D_1	(500,750)	200
D_2	(2 500,-500)	150
D_3	(1 750,-200)	200
D_4	(1 200,-300)	150
D_5	(1 250,500)	200

表 4 遗传算法编码表

Tab. 4 Coding table for GA

编码	含义	编码	含义	编码	含义
000	D_1	011	D_4	110	Blank
001	D_2	100	D_5	111	Blank
010	D_3	101	Blank		

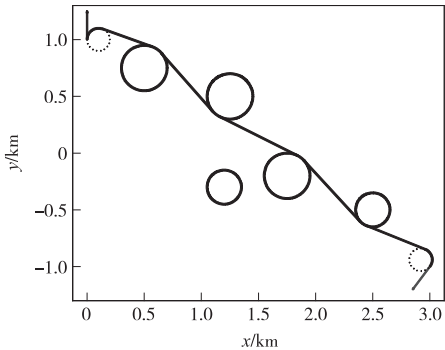


图 9 多障碍环境下无人机避障路径
Fig. 9 UAV's path for multi-obstacles avoidance

2.3 无人机实时避障规划模型仿真

假设无人机飞行参数满足表 2 约束,障碍中心点坐标随机生成. 根据 1.4 节算法进行仿真,计飞行器出发时刻为 $t=0$,仿真步长设为 0.1 s,则飞行器在接下来时刻的飞行轨迹如图 10~图 13 所示.

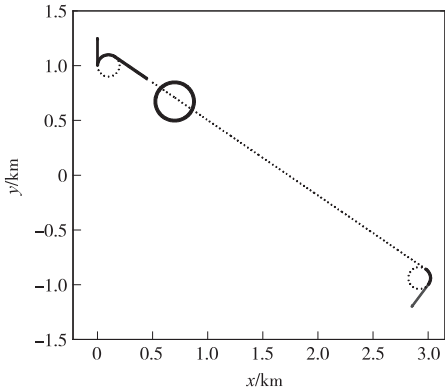


图 10 $t=19.1$ s 时发现第 1 个障碍
Fig. 10 The 1st obstacle was detected when $t=19.1$ s

$t=0$ s 时,飞行器按照 1.2 节中算法进行路径规划,开始飞行;在 $t=19.1$ s 时发现第 1 个障碍 D_1 ,此时飞行器坐标为 (500,881) m, D_1 圆心为

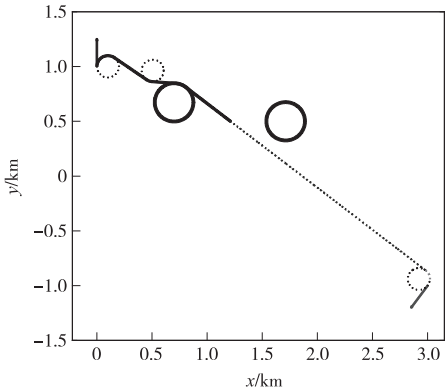


图 11 $t=47.9$ s 时发现第 2 个障碍
Fig. 11 The 2nd obstacle was detected when $t=47.9$ s

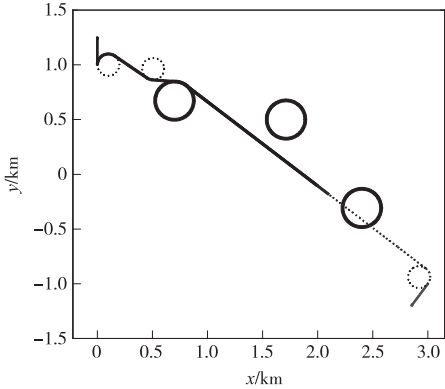


图 12 $t=85.3$ s 时发现第 3 个障碍
Fig. 12 The 3rd obstacle was detected when $t=85.3$ s

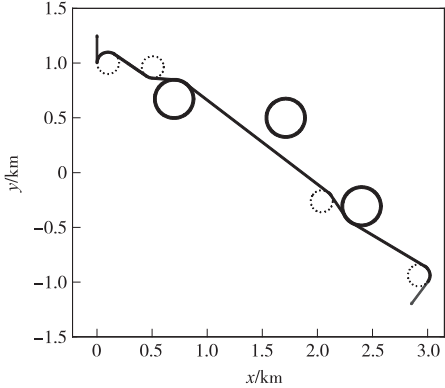


图 13 完整的避障路径
Fig. 13 Final path for real-time multi-obstacles avoidance

(700,673) m,飞行器进行第 1 次路径重规划,如图 11 所示;在 $t=47.9$ s 时发现第 2 个障碍 D_2 ,此时飞行器坐标为 (1 211.8,668.5) m, D_2 圆心为 (1 712, 500) m,由于第 2 个障碍并不在飞行路径上,飞行器不进行路径重规划,如图 12 所示;在 $t=85.3$ s 时发现第 3 个障碍 D_3 ,此时飞行器坐标为 (2 100,-183) m, D_3 圆心为 (2 400,-308) m,飞行器进行第

2次路径重规划,如图13所示;飞行器再未探索到新的障碍,飞抵目标点结束飞行。

3 结 论

研究了单障碍环境下基于Dubins路径的无人机飞行器避障算法,并利用遗传算法将其推广到多障碍环境下,使之能解决飞行器多障碍避障路径规划问题。在上述算法的基础上,提出了一种可用于飞行器实时航路重规划的避障算法,以解决飞行器在飞行过程中的实时避障的问题。通过仿真表明,上述算法原理正确,可以解决多障碍环境下无人机避障策略的实时生成的问题,其生成的路径相较传统避障算法获取的路径而言,考虑了飞行器自身的运动学特性,因而在实际工程应用中有很好的实用性。

参考文献:

- [1] Ducard G, Kulling K C, Geering H P. A simple and adaptive online path planning system for a UAV[C]// Proceedings of 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens, Greece: [s. n.], 2007:1-6.
- [2] Ju H S, Tsai C C. Design of intelligent flight control law following the optical payload[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing&Control. Taipei: [s. n.], 2004:761-766.
- [3] Lee J, Huang R, Vaughn A, et al. Strategies of path-planning for a UAV to track a ground vehicle[C]// Proceedings of IEEE Conference on Autonomous Intelligent Networked systems. Menlo Park, USA: [s. n.], 2003: 602-607.
- [4] Enomoto K, Yamasaki T, Takano H, et al. Automatic following for UAVs using dynamic inversion[C]// Proceedings of SICE Annual Conference 2007. [S. l.]: SICE, 2007:2240-2246.
- [5] Cao Chengyu, Hovakimyan N, Kaminer I, et al. Stabilization of cascaded systems via L1 adaptive controller with application to a UAV path following problem and flight test results[C]// Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York: [s. n.], 2007:1787-1792.
- [6] Dubins L E. On plane curves with curvature[J]. Pacific J Math, 1961, 11(2): 47:1-481.
- [7] Yeol J W, Ryu Y S, Montalvo M A. Shortest trajectory planning of wheeled mobile robots with constraints[C]// 2005 IEEE Proceedings in Networking, Sensing and Control. Tucson, USA: [s. n.], 2005:883-888.
- [8] Thomaschewski B. Workspaces of continuous robotic manipulators[D]. German: TU Ilmenau, 2002.
- [9] Shanmugavel M. Path planning of multiple autonomous vehicles [D]. Cranfield, UK: Cranfield University, 2007.
- [10] Pachikara A J, Kehoe J J, Lind R. A path-parameterization approach using trajectory primitives for 3-dimensional motion planning[C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Chicago, Illinois, USA: [s. n.], 2009:1035-1041.

(责任编辑:刘雨)