

固定翼无人机转向避障最短轨迹问题研究

白景波¹, 屠义强¹, 田 军¹, 冯玉芳², 陈 亮³, 孙阳阳¹

¹陆军工程大学, 江苏 南京

²中国人民解放军32125部队, 山东 济南

³陆军军事交通学院汽车士官学校, 安徽 蚌埠

收稿日期: 2022年7月7日; 录用日期: 2022年8月30日; 发布日期: 2022年9月8日

摘 要

固定翼无人机飞行过程中, 遇到突发障碍威胁不能悬停只能提前转向避障, 针对如何获得转向避障最短飞行轨迹的问题, 本文根据固定翼无人机的飞行特点, 采用Dubins路径方法, 设计了满足无人机小转弯半径和飞行方向约束条件的航路。论文给出了无人机与障碍威胁区相交的判断方法, 提出了基于Dubins路径的障碍躲避策略, 仿真计算得出无人机越早做出规避动作飞行路径越短的结果。本文探讨的解决方法具备规划的路径短, 算法简便高效等特点, 可为固定翼无人机任务规划系统设计提供参考思路。

关键词

无人机, 避障, Dubins路径, 最短轨迹

Research on the Shortest Trajectory Problem for Fixed-Wing UAV Steering to Avoid Obstacles

Jingbo Bai¹, Yiqiang Tu¹, Jun Tian¹, Yufang Feng², Liang Chen³, Yangyang Sun¹

¹Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

²Unit 32125 of PLA, Jinan Shandong

³Automobile NCO Academy, Army Military Transportation University, Bengbu Anhui

Received: Jul. 7th, 2022; accepted: Aug. 30th, 2022; published: Sep. 8th, 2022

Abstract

When a fixed-wing UAV is flying, it cannot hover when it encounters a sudden obstacle threat, and

文章引用: 白景波, 屠义强, 田军, 冯玉芳, 陈亮, 孙阳阳. 固定翼无人机转向避障最短轨迹问题研究[J]. 建模与仿真, 2022, 11(5): 1265-1273. DOI: 10.12677/mos.2022.115118

the UAV can only turn to avoid obstacles in advance. Aiming at how to obtain the shortest flight trajectory for steering and obstacle avoidance, this paper uses the Dubins path method to design a flight path that satisfies the constraints of the UAV's small turning radius and flight direction according to the flight characteristics of the fixed-wing UAV. This paper presents a method for judging the intersection of UAV and obstacle threat area, and proposes an obstacle avoidance strategy based on Dubins path. The problem-solving method discussed in this paper has the characteristics of a short planning path, a simple and efficient algorithm, etc., which can provide a reference idea for the design of a fixed-wing UAV mission planning system.

Keywords

UAV, Obstacle Avoidance, Dubins Path, Shortest Trajectory

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无人机在执行任务中，有时会遇到在静态任务规划阶段无法预知的障碍威胁。固定翼无人机与旋翼无人机飞行特点不同，固定翼无人机遇到障碍威胁不能先悬停再避障，因此在接触到威胁之前，制定妥善的躲避策略来规避威胁，对确保无人机执行任务成功概率和飞行安全至关重要，相关研究可参见文献 [1]-[9]。面对突然出现的障碍威胁，时间上不允许地面控制人员对无人机进行全局路线重规划，通过调整局部轨迹方法来规避威胁，是一种较好的选择。当障碍威胁被无人机探测到时，何时通过内置算法执行规避动作，从而使得飞行轨迹最短，这个问题值得探讨。

在规避障碍威胁局部轨迹调整的设计上，如图 1 所示，无人机由 A 点飞向 B 点，圆 O_1 、 O_2 为无人机飞行高度的威胁范围，M、N 为无人机导航点。为了确定无人机导航点的位置，通常会在威胁范围之外确定一个安全圆，如图 1 虚线部分所示，而后在安全圆上选定若干导航点，如图 M、N 所示，使无人机绕过威胁区域。如果采用直线路径作为无人机飞行路径，导航点数量少时，将会导致飞行路线与威胁区域的交叉，使无人机处于威胁空间之中。增大安全圆的范围，可以使线段 MN 避免与威胁范围交叉，但一方面会使精细计算出的安全范围变成非最优，另一方面也有可能让两个安全圆重叠而导致可飞路径消失。

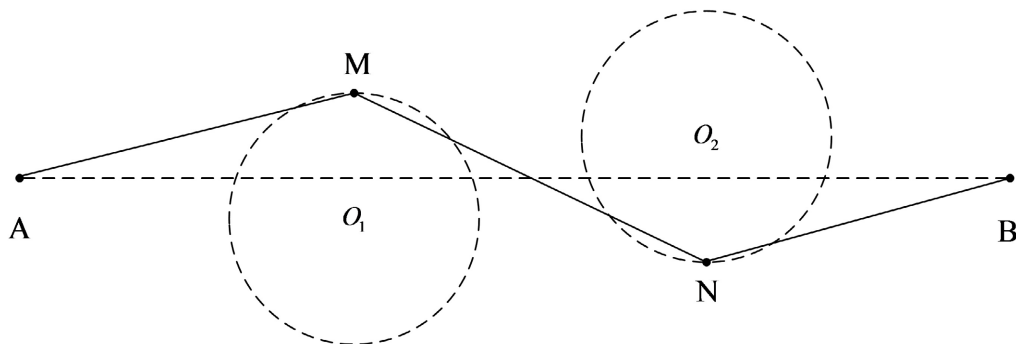


Figure 1. Straight path to avoid threats

图 1. 直线路径规避威胁示意图

在安全圆上增加导航点的数量能解决路径与威胁区域相交的问题，但增加多少个航点能够避免飞行路线与威胁空间交叉，如何确定航点的位置将又变成另一个难题。从微分角度考虑，沿着安全圆增加足够数量的航点，这些点的连线将趋于一条曲线，如图 2 所示，用一段圆弧代替安全圆上数量众多的直线段将使问题的复杂度降低。

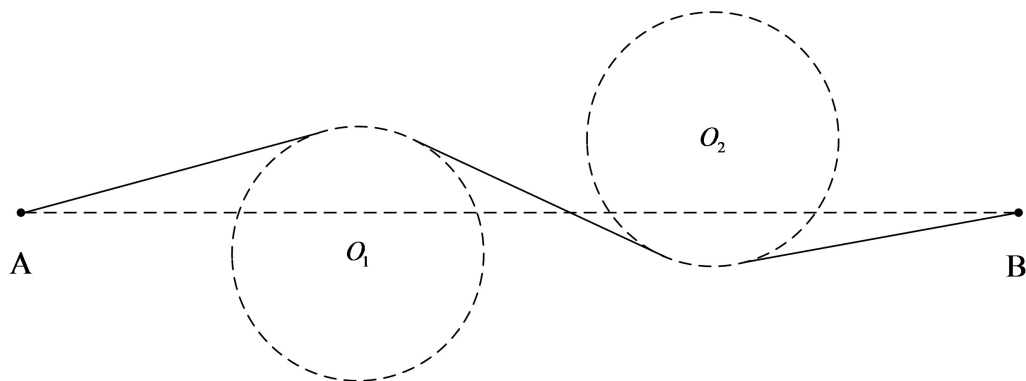


Figure 2. Combine straight and curved lines to avoid threats

图 2. 直线与曲线结合规避威胁示意图

基于以上考虑，采用直线加曲线的方法，绕过威胁是一种比较好的选择，生成这样一段曲线的方法很多，本文采用 Dubins 路径[10] [11] [12] [13]的方法。

2. Dubins 路径

1957 年，Dubins 研究了带有方向的两点的最短路径问题，不考虑曲率时最短路径为直线，考虑曲率约束时该轨迹则为圆弧[14]。Dubins 路径定义为：在最大曲率限制下，平而内两个有方向的点间的最短可行路径是 CLC 路径或 CCC 路径(如图 3 所示)，或是其子集[15]。

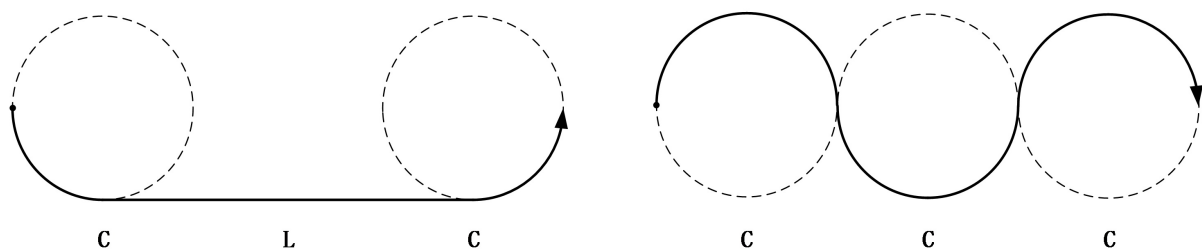


Figure 3. CLC and CCC type Dubins path

图 3. CLC 与 CCC 型 Dubins 路径

其中，C 表示圆弧段，L 表示与 C 相切的直线段。CLC 由两段圆弧及其公切线组成，CCC 路径由三段连续相切的圆弧组成。CLC 和 CCC 路径的子集为 CL、LC 和 CC。无人机传感器探测到威胁时，通常与障碍物会有一段距离，不涉及到连续调转方向来规避障碍的飞行姿态调整，因此这里只考虑 CLC 型路径。

这里采用解析几何的方法描述 Dubins 路径。根据前文所述，Dubins 路径为两段圆弧加一条公切线，其中起始和终止位置都在圆弧上，圆弧中心为曲率中心，圆弧的半径是曲率半径，在障碍区曲率半径由威胁范围确定，非威胁区曲率半径由无人机最小转向半径决定。无人机也可以选择其他非曲率半径进行转向，但以最小转向半径为曲率半径时，路径长度最短[16]。

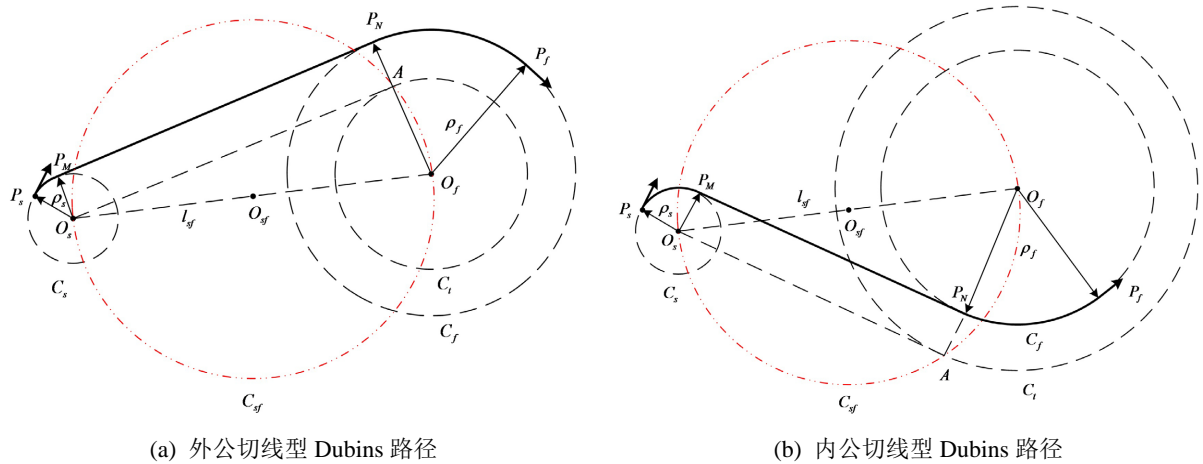


Figure 4. CLC type Dubins path
图 4. CLC 型 Dubins 路径

图 4 为 CLC 型 Dubins 路径，其中主要符号为：

$P_s(x_s, y_s, \varphi_s)$ 为起始位姿点， C_s 为起始圆， O_s 为圆心， ρ_s 为半径；

$P_f(x_f, y_f, \varphi_f)$ 为终止位姿点； C_f 为终止圆， O_f 为圆心， ρ_f 为半径；

外公切线在 C_s 和点分别在 C_f 上的切点分别为 P_M 、 P_N ；

起始圆的圆心 O_s 与终止圆的圆心 O_f 连线为 l_{sf} ；

起始曲率 $\kappa_s \leq \kappa_{\max}$ ，其中 $\kappa_s = 1/\rho_s$ ；

起始曲率 $\kappa_f \leq \kappa_{\max}$ ，其中 $\kappa_f = 1/\rho_f$ 。

确定 CLC 型 Dubins 路径主要是确定两圆公切线的切入点和切出点，如果切点不存在，CLC 型 Dubins 路径就不存在。因此，需要根据起始圆、终止圆的相对位置来考虑。其中， O_s 、 O_f 分别为起始圆和终止圆的圆心， ρ_s 、 ρ_f 分别为起始圆和终止圆的曲率半径，圆心距 $|O_s O_f| = l_{sf}$ 。

根据两圆位置关系：

- a) 两圆同心时， $l_{sf} = 0$ ， $\rho_f - \rho_s > l_{fs}$ ， $\rho_f + \rho_s > l_{fs}$ ，无公切线，不存在 CLC 路径；
- b) 两圆内切时， $l_{sf} = \rho_f - \rho_s$ ， $\rho_f - \rho_s = l_{fs}$ ， $\rho_f + \rho_s > l_{fs}$ ，有 1 条外公切线，但不存在 CLC 路径；
- c) 两圆相交时，直接由三角关系可得， $\rho_f - \rho_s < l_{fs}$ ， $\rho_f + \rho_s > l_{fs}$ ，有 2 条外公切线，存在 2 条 CLC 路径；
- d) 两圆外切时， $l_{sf} = \rho_f + \rho_s$ ， $\rho_f - \rho_s < l_{fs}$ ， $\rho_f + \rho_s = l_{fs}$ ，有 2 条外公切线，有 1 条内公切线，存在 2 条 CLC 路径；
- e) 两圆相离时， $\rho_f - \rho_s < l_{fs}$ ， $\rho_f + \rho_s < l_{fs}$ ，有 2 条外公切线，有 2 条内公切线，存在 4 条 CLC 路径。

因此，存在外切线型 CLC 路径的条件是：

$$|\rho_f - \rho_s| < l_{fs} \tag{1}$$

存在内切线型 CLC 路径的条件是：

$$|\rho_f + \rho_s| < l_{fs} \tag{2}$$

根据切线的数量，我们能够发现，无人机在同一位姿点， ϕ 方向固定情况下，能够生成 4 条可行的 CLC 型 Dubins 路径来规避威胁，如图 5 所示。

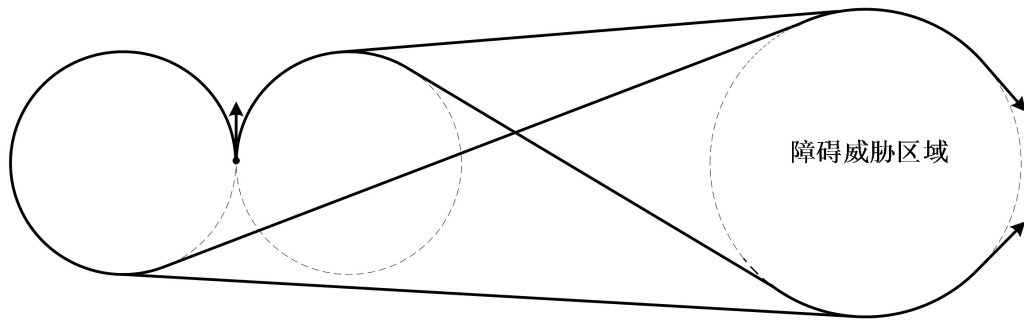


Figure 5. Generate feasible CLC Dubins path from the same pose point
图 5. 同一位姿点生成可行的 CLC 型 Dubins 路径

如果 ϕ 的方向自由, 则能够生成 8 条可行的 CLC 型 Dubins 路径。因此, 在路径规划时, 需要从每对起始圆和终止圆路径集合 $\{S_{\text{Dubins}}\}$ 的所有解决方案中, 选择最短的路径作为最终的航路。

3. 障碍威胁情况判断

无人机平飞时, 如遇突发障碍威胁, 首先确定威胁安全圆是否与飞行轨迹相交, 如与飞行轨迹相交, 则需要计算产生规避威胁的路径, 而后无人机跟随该轨迹完成规避动作, 对于那些与无人机轨迹不相交的威胁区域则不需要考虑规避的问题。因此, 判断威胁区域是否与飞行轨迹相交, 是无人机规避该障碍威胁的首要问题。

图 6 为威胁区域与无人机飞行路径相交示意图。图中, d_i 为无人机飞行路径轨迹, 与威胁圆交于点 p_{im} 、 p_{in} , 威胁圆中心到飞行路径直线段起点距离为 d_0 、到直线垂线为 d_n , ρ_0 为威胁圆的曲率半径, κ_0 为威胁圆的曲率, θ_0 为 d_0 与 d_i 的夹角。

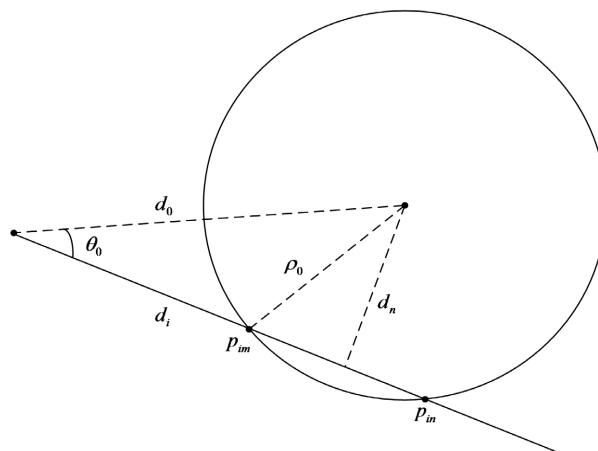


Figure 6. The straight path intersects the threat area
图 6. 直线路径与威胁区域相交

如上图, 直线与圆相交, 可得

$$\frac{d_0}{\rho_0} \leq 1 \quad (3)$$

根据余弦定理有

$$\rho_0^2 = d_0^2 + d_i^2 - 2d_0d_i \cos \theta_0 \quad (4)$$

移项得

$$d_i^2 - 2d_0d_i \cos \theta_0 + d_0^2 - \rho_0^2 = 0 \tag{5}$$

二次方程的解 d_i 为

$$d_i = d_0 \cos \theta_0 \pm \sqrt{d_0^2 (\cos^2 \theta - 1) + \rho_0^2} \tag{6}$$

d_i 的两个解对应交点 p_{im} 和 p_{in} ，其中 p_{im} 的值为 $d_0 \cos \theta_0 - \sqrt{d_0^2 (\cos^2 \theta - 1) + \rho_0^2}$ ， p_{in} 的值为 $d_0 \cos \theta_0 + \sqrt{d_0^2 (\cos^2 \theta - 1) + \rho_0^2}$ 。由于 d_i 的两个解应为实数解，因此

$$d_0^2 (\cos^2 \theta - 1) + \rho_0^2 \geq 0 \tag{7}$$

整理可得

$$\rho_0^2 - d_0^2 \sin^2 \theta \geq 0 \tag{8}$$

$d_0 \sin \theta = d_n$ ，上式可写成

$$\rho_0 \geq d_n \tag{9}$$

与公式(3)条件等价，因此当直线与威胁区相交时则存在实数解。当直线段与多个威胁区相交时，该交点可用于区分与那个威胁区相交。当检测到飞行路径与威胁区相交时，则需以最小转弯半径为曲率半径，在当前位姿点和目标点分别建立起始圆和终止圆，生成起始圆与威胁区安全圆、威胁区安全圆与终止圆相切的线段，通过生成 Dubins 路径来实现突发威胁的规避。

4. 无人机轨迹调整与最短轨迹

确定无人机会与障碍威胁相交后，无人机可采用左、右盘旋，通过 Dubins 路径的切出威胁区安全圆，避开障碍威胁直飞至导航点，如图 7 所示。

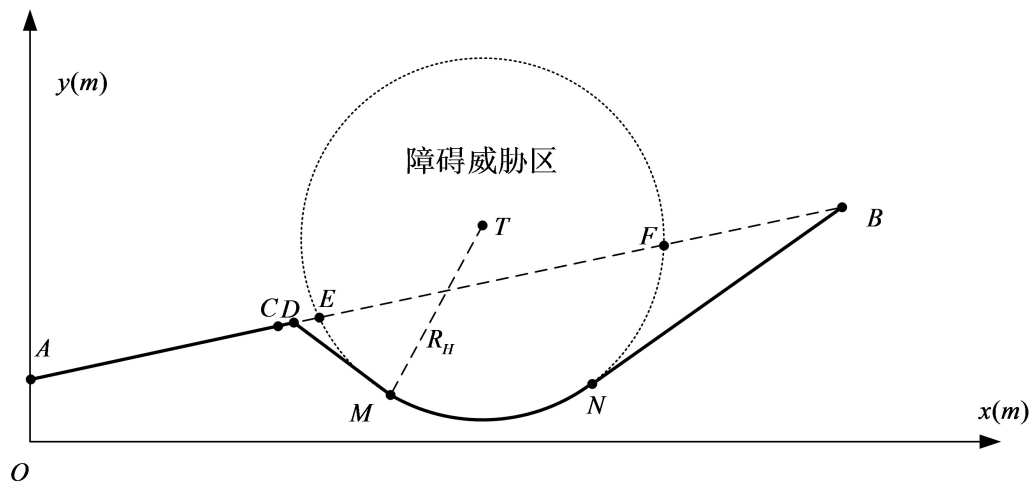


Figure 7. UAV avoid threats through Dubins path
图 7. 无人机通过 Dubins 路径规避威胁示意图

图中，无人机计划由 A 点飞至 B 点，在 C 点发现威胁后计算调整路线飞行至 D 点，接着采取右盘旋方式转向绕威胁区飞行，其中 M 为圆弧段飞行路线切入点，N 为圆弧段飞行路线切出点，而后飞行至 B 点。威胁区半径为 R_H 。

根据图 7, 无人机无论左盘旋还是右盘旋绕过威胁区, Dubins 路径直线段均为内切线, 此时还需满足公式(2) $|\rho_f + \rho_s| < l_{fs}$ 的要求, 即直飞路径还需增加一段 ρ_{\min} , 即无人机距离威胁区至少为:

$$c_{\min} = s_{\min} + \rho_{\min} \quad (10)$$

无人机在满足 c_{\min} 的情况下, 转向规避威胁时机的早晚, 对航迹长度是否有影响, 即发现障碍就向障碍威胁做切线运动还是等靠近障碍再做切线运动, 哪种策略航迹最短, 需要进一步讨论。

假设无人机在两点间由右至左运动, 飞行策略采用先直飞一定距离, 而后通过 Dubins 路径调整飞行角度到达指定目标点, 如图 8 所示。

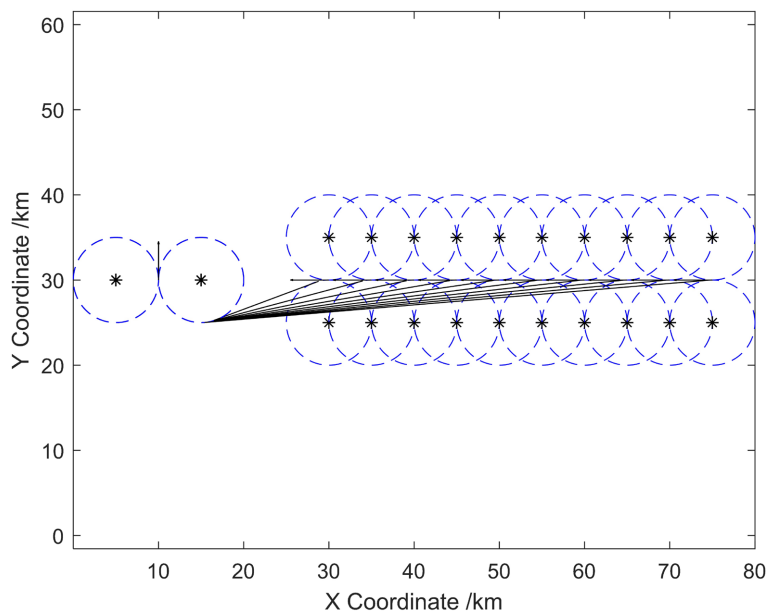


Figure 8. Dubins path generated by different turning timings
图 8. 不同转弯时机生成的 Dubins 路径

无人机飞行路径的总距离为:

$$S_{\text{Total}} = S_{\text{Straight}} + S_{\text{Dubins}} \quad (11)$$

其中 S_{Total} 为总飞行距离, S_{Straight} 为按原方向直飞路径距离, S_{Dubins} 为 Dubins 路径距离。直飞距离间隔 5km 采样一次, 通过仿真计算得到飞行路径长度如表 1 所示。

Table 1. Total flight path length
表 1. 无人机飞行路径长度表

飞距离(km)	Dubins 路径(km)	总飞行路径(km)
45.00	23.73	68.73
40.00	28.50	68.50
35.00	33.36	68.36
30.00	38.28	68.28
25.00	43.21	68.21
20.00	48.17	68.17
15.00	53.13	68.13

Continued

10.00	58.11	68.11
5.00	63.08	68.08
0.00	68.06	68.06

Dubins 路径长度与总飞行路径长度之间的关系如图 9 所示。

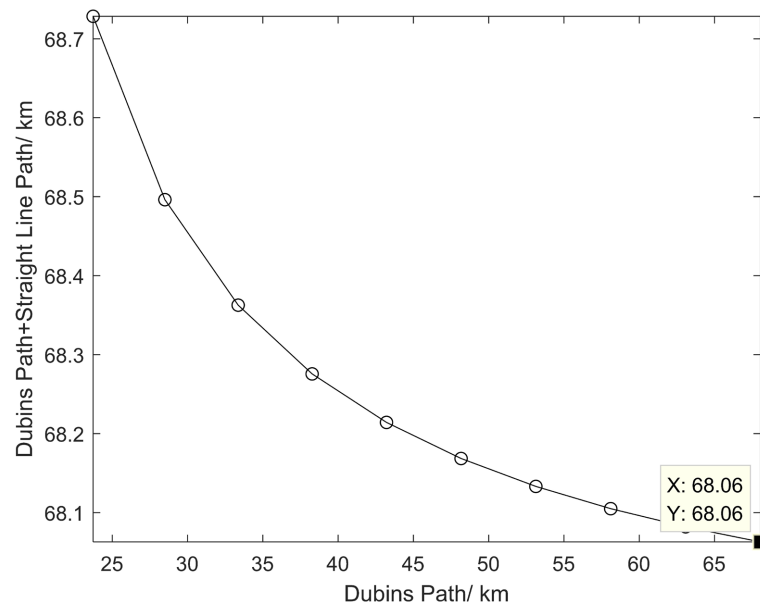


Figure 9. The relationship between Dubins path and total flight path length
图 9. Dubins 路径长度与总飞行路径长度的关系

由表 1 和图 9 可以看出，随着 Dubins 路径长度的增加，无人机飞行路径总长度变短，且减小趋势变缓。当 Dubins 路径的长度等于总飞行路径长度时，即离目标最远，按原方向直飞距离为 0 时，直接向目标圆切点方向飞行，此时总飞行路径最短。

5. 结束语

针对固定翼无人机与旋翼无人机飞行特点不同，固定翼无人机遇到障碍威胁不能先悬停再避障的问题，本文给出一种基于 Dubins 路径动态调整飞行轨迹方法，研究了 Dubins 路径的基本理论及无人机航迹与障碍威胁区相交的判断方法，给出了基于 Dubins 路径的突发威胁规避策略，并针对何时向威胁区做切线运动路径最短的问题进行了探讨。仿真计算得出随着 Dubins 路径长度的增加，无人机飞行路径总长度变短，且减小趋势变缓。当 Dubins 路径的长度等于总飞行路径长度时，即离目标最远，按原方向直飞距离为 0 时，直接向目标圆切点方向飞行，此时总飞行路径最短。即无人机越早做出规避动作飞行路径越短，该结论也符合无人机操作人员发现突发威胁时，大脑试图立刻控制无人机进行规避的应激反应。本文探讨的解决问题方法具备规划路径短，算法简便高效等特点，可为固定翼无人机任务规划系统设计提供参考思路。

参考文献

- [1] Singh, K. and Verma, A.K. (2017) Threat Modeling for Multi-UAV Adhoc Networks. 2017 *IEEE Region 10 Conference*, Penang, 5-8 November 2017, 1544-1549. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2017.8228102>

- [2] Wang, X., Yadav, V. and Balakrishnan, S.N. (2007) Cooperative UAV Formation Flying with Obstacle/Collision Avoidance. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **15**, 672-679. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.899191>
- [3] Alves Neto, A., Macharet, D.G. and Campos, M.F.M. (2010) On the Generation of Trajectories for Multiple Uavs in Environments with Obstacles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **57**, 123-141. <https://doi.org/10.1007/s10846-009-9365-3>
- [4] Shah, M.A. and Aouf, N. (2010) 3D Cooperative Pythagorean Hodograph Path Planning and Obstacle Avoidance for Multiple UAVs. 2010 *IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems*, Reading, 1-2 September 2010, 1-6. <https://doi.org/10.1109/UKRICIS.2010.5898124>
- [5] Yao, M. and Zhao, M. (2015) Unmanned Aerial Vehicle Dynamic Path Planning in an Uncertain Environment. *Robotica*, **33**, 611-621. <https://doi.org/10.1017/S0263574714000514>
- [6] Ren, P., Gao, X.-G. and Chen, J. (2014) Human-UAV Coordinated Flight Path Planning of UAV Low-Altitude Penetration on Pop-Up Threats. In: Fei, M.R., et al., Eds., *Computational Intelligence, Networked Systems and Their Applications*, Springer, Berlin, 552-561. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45261-5_58
- [7] 魏瑞轩, 何仁珂, 张启瑞, 许卓凡, 赵晓林. 基于 Skinner 理论的无人机应急威胁规避方法[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 620-624.
- [8] 温乃峰. 低空复杂环境下小型无人机的在线航迹规划算法研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [9] 冯逸雪. 3D 动态环境下的无人机智能路径规划策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [10] Tong, Y.Y., Dong, W.H. and Zhai, C.F. (2020) Multi-UAV Collaborative Online Obstacle Avoidance Track Planning. *Proceedings of the 2020 International Conference on Cyberspace Innovation of Advanced Technologies (CIAT 2020)*, Guangzhou, 4-6 December 2020, 324-329. <https://doi.org/10.1145/3444370.3444592>
- [11] Han, Q.T. (2021) Research on Cooperate Search Path Planning of Multiple UAVs Using Dubins Curve. 2021 *IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA)*, Shenyang, 22-24 January 2021, 584-588. <https://doi.org/10.1109/ICPECA51329.2021.9362518>
- [12] Marchidan, A. and Bakolas, E. (2020) Collision Avoidance for an Unmanned Aerial Vehicle in the Presence of Static and Moving Obstacles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **43**, 96-110. <https://doi.org/10.2514/1.G004446>
- [13] 刘畅, 谢文俊, 张鹏, 郭庆, 高超. 多重威胁下的无人机自主避障迹规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(4): 119-126.
- [14] La Valle, S.M. (2006) *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877>
- [15] Dubins, L.E. (1957) On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *American Journal of Mathematics*, **79**, 497-516. <https://doi.org/10.2307/2372560>
- [16] Burns, B., Blue, P.A. and Zollars, M.D. (2007) Simulation of a Real-Time Trajectory Generator for Automated Aerial Refueling with a Required Time of Arrival. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Hilton Head, 20-23 August 2007, 1. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6710>