

doi: 10.7690/bgzdh.2019.09.020

无人机编队 Dubins 航路规划及编队控制器设计

黄 坤, 张 氏, 林 云, 郑晨明

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为完成无人机编队任务并解决无人机在飞行中因干扰而造成编队任务失败的问题, 设计一种无人机编队任务的 Dubins 航路规划算法及控制器。根据无人机编队同时到达集结点的时间一致性要求, 利用解析几何方法进行航路设计, 通过分析无人机飞行状态, 设计了能够进行速度调整的控制器, 并使用六自由度无人机模型验证了航路算法及控制器的性能。仿真结果表明: 该航路算法能够解算出各种编队任务的飞行航路, 在控制器作用下能够很好地完成编队任务。

关键词: 无人机; 编队任务; Dubins 航路; 控制器; 六自由度仿真

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Dubins Path Planning and Formation Controller Design for UAV Formation

Huang Kun, Zhang Min, Lin Yun, Zheng Chenming

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to complete unmanned aerial vehicle (UAV) formation mission and solve the problem of UAV formation mission failure caused by interference in flight, a Dubins path planning algorithm and controller for UAV formation mission are designed. According to the time consistency requirement of UAV formation reaching the assembly point at the same time, the flight path is designed by analytic geometry method, and the controller which can adjust the flight speed is designed by analyzing the flight state of UAV. The performance of the route algorithm and controller is verified using a six-degree-of-freedom UAV model. The simulation results show that the algorithm can solve the flight paths of various formation missions and accomplish the formation task well under the controller.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); formation task; Dubins path; controller; six degree of freedom simulation

0 引言

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 是一种通过地面无线电遥控控制或自身飞行控制程序控制机身的自带动力的不载人飞行器。随着近年来无人机飞行控制技术的进步, 无人机在军民应用领域得到了极大的扩展, 未来的发展前景极广^[1]。笔者研究无人机编队, 使用无人机多架编队的形式而非单架执行任务, 可以使任务系统具有更强的鲁棒性和能效比^[2-3]。

1 问题描述

无人机编队航路规划的目的是为编队中每架无人机计算出一条带有首末端约束的安全可飞路径。该航路必须满足无人机速度和机动性能限制的要求^[4-6]。为了达到编队任务对时间一致性的要求, 航路生成算法应能对航路长度进行调整, 使得最终为各无人机规划出等航程的航路。

为了应对飞行过程中遇到的风扰动, 避免无人机偏离航线造成编队失败^[7-9], 设计一种侧向和前向

通道控制器, 使无人机保持较小的航线侧偏, 并根据长机的飞行状态调整速度, 以满足时间一致性要求。

2 无人机编队 Dubins 航路规划

航路规划算法可以为每架无人机解算一条安全的可飞航路。首先, 航路的长度必须满足无人机编队时间一致性约束, 即每条航路的长度必须是该架无人机的最短路径, 在此基础上, 指定航路最长者为长机, 调整其他僚机航路长度与长机一致。其次, 航路必须带有首末端航向约束^[10-12]。

目前, 经常采用的航路规划算法有蚁群算法、动态规划算法、样条插值法等。现大多数的航路规划问题并没有考虑无人机的首末端航向约束。连接空间中两位姿点间路径的最简单形式由直线段和圆弧段组成。两位姿点间的最短路径即为 Dubins 路径。Dubins 路径由 Dubins 在 1957 年完成数学证明, 定义为: 在圆弧段半径限制条件下, 2 个位姿点间的最短路径为 CLC 路径或 CCC 路径, 或是两者的

收稿日期: 2019-05-25; 修回日期: 2019-07-01

基金项目: 航空科学基金项目 (20160152001)

作者简介: 黄 坤 (1993—), 男, 山西人, 硕士, 从事无人机制导技术研究。E-mail: hk_nuaa@163.com。

子集, 路径组合中 C 表示圆弧段航路, L 表示与 C 相切的直线段航路。其中, 为满足无人机机动性要求, 圆弧段半径在计算中可选取为无人机最小转弯半径。

2.1 基于解析几何方法进行 Dubins 航路设计

分为以下 3 步:

1) 起始, 集结点圆轨迹设计。

确定起始点 P_0 , 集结点 P_3 的位置坐标以及航向信息。根据起点坐标 (x_s, y_s) 以及初始航向 ψ_s , 以 (x_s, y_s) 为圆上一点, 以半径 R (取无人机最小转弯半径) 作 2 个圆, 其中圆心位于初始航向法向的连线上, 记为 O_1, O_2 , 以式(1)计算 O_1, O_2 的圆心坐标。同样的方法可以计算出集结点轨迹圆心坐标 O_3, O_4 。

$$\left. \begin{aligned} x_{cs1} &= x_s + R \cos(\psi_s + \pi/2) \\ y_{cs1} &= y_s - R \sin(\psi_s + \pi/2) \\ x_{cs2} &= x_s - R \cos(\psi_s + \pi/2) \\ y_{cs2} &= y_s + R \sin(\psi_s + \pi/2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

分别计算起点, 终点各圆圆心距, 选取圆心距最短的 2 个圆作为轨迹圆。

2) 直线轨迹设计。

在起点、终点圆轨迹确定后, 以轨迹圆切线作为 Dubins 航路的直线轨迹。若起点、终点无人机顺时针方向一致, 选取外切线作为直线轨迹, 否则, 选取内切线。

如图 1 所示, α 为起始、终止轨迹圆心连线的斜率角 (下标 e 表示集结点信息)。

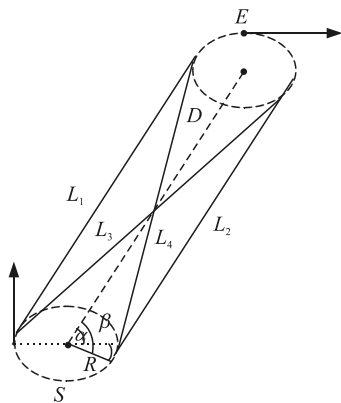


图 1 Dubins 直线路径求解

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_{ce} - y_{cs}}{x_{ce} - x_{cs}}\right) \quad (2)$$

计算圆心距 $D = \sqrt{(x_{ce} - x_{cs})^2 + (y_{ce} - y_{cs})^2}$, 有

$$\beta = \arccos\left(\frac{R}{D/2}\right) \quad (3)$$

直线轨迹切点的求解可以利用下式解得, 其中, 若直线轨迹为外共切线, $\phi = \alpha + \pi/2$, 若为内公切线, $\phi = \alpha + \beta + \pi/2$ 。

$$\left. \begin{aligned} x_{ps} &= x_{cs} + R \cos \phi \\ y_{ps} &= y_{cs} + R \sin \phi \\ x_{pe} &= x_{ce} + R \cos \phi \\ y_{pe} &= y_{ce} + R \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3) 航程计算及调整。

为满足航路设计对于时间一致性约束, 需要指定路径中一条为参考航程, 其他无人机需要调整航程。每架无人机的航路都由 3 段航路组成, 计算航路长度 $L_i = C_{i1} + L + C_{i2}$ 。取航路最长的一条记为 L_{max} , 令 L_{max} 为参考航程, 即 $L_{ref} = L_{max}$ 。则 $L_{ref} - L_i = \Delta L_i \geq 0$ 。令 $\Delta L_i = 2\pi RQ + P$ 。 L_i 计算过程如图 2 所示。

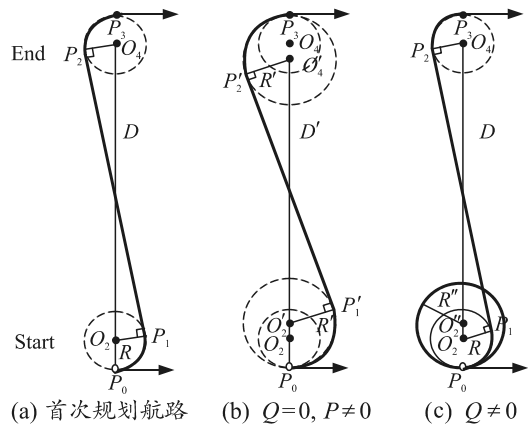


图 2 Dubins 直线路径求解

例 1: $Q \neq 0$ 从起点 P_0 开始, 先沿半径为 R' 的轨迹圆 O_2'' 飞行一圈, 到 P_0 点止 (其中半径 $R' = (2\pi R + P)/2\pi$, 圆心 O_2'' 需重新求解)。剩余的 $Q-1$ 圈, 无人机继续沿起始点轨迹圆 O_2 盘旋, 到达 P_0 后可以补偿航程差 ΔL_i 。

例 2: $Q = 0, P \neq 0$ 只需补偿 P 航段即可。笔者通过同时增大起始与终止圆半径来延长航路, 使用待定系数法求解新的轨迹圆半径 R' , 重新规划航路, 使 $L_{ref} = C_{i1}' + L' + C_{i2}'$ 。方程中只含 R' 一个待定变量, 使用待定系数法求解即可。

2.2 编队防撞策略设计

待各无人机航路生成结束后, 需要规避无人机在编队过程中的碰撞风险。笔者提出一种防撞策略, 将编队中各无人机编号 $i(1 \leq i \leq N)$, N 为无人机架

数，并指定优先级为从 1 至 N 依次降低。比较各无人机航路，若航路有交叉点，则 2 架无人机在飞行过程中会有碰撞风险。当无人机飞临交叉点，若满足 2 架无人机间距离小于 $\Delta\rho = v_i T$ (T 为响应时间，设为 10 s)，指定优先级较低的无人机减速。待机间距离大于 $\Delta\rho$ 时，该架无人机恢复正常飞行速度。

3 无人机编队控制器设计

无人机机群在集结和编队飞行过程中，由于有侧风等干扰因素的存在^[13-14]，无人机会偏离航线飞行。虽然在制导回路作用下，无人机最终会回到预定航线；但是，如果不对无人机的飞行速度进行调整，将无法同时满足编队控制时间一致性的约束，无人机编队无法同时到达集结点，继而造成编队任务失败。笔者设计了一种能够应用于编队任务各阶段的速度调整 PI 控制器，在该控制器作用下，其他无人机按照长机飞行状态实时调整自身飞行速度，进而达到编队时间一致性约束要求。

分析无人机飞行状态，假定编队时所有飞机都已到达指定高度，忽略高度通道。控制器的设计可以按 2 个通道展开：

1) 前向通道控制器：

$$e_x = k_v \Delta v + k_x \Delta x ; \quad (5)$$

$$V_{cmd} = k_p e_x + k_i \int_0^t e_x dt . \quad (6)$$

其中： $\Delta v = v_{ref} - v_i$ ， v_{ref} 为长机飞行速度， v_i 为编队中第 i 架无人机的速度； $\Delta x = (X_{ref} / v_{ref}) v_i$ ， X_{ref} 为长机距离终点的待飞距离； v_{cmd} 为当前无人机指令速度； k_v, k_x, k_p, k_i 分别为固定参数。

2) 侧向通道控制器：

$$e_y = k_\psi \Delta \psi + k_y \Delta y ; \quad (7)$$

$$\psi_{cmd} = k_p e_y + k_i \int_0^t e_y dt . \quad (8)$$

其中： $\Delta \psi = \psi_g - \psi_i$ ， ψ_g 为航路文件给定的航向角， ψ_i 表示编队中第 i 架无人机的航向角； Δy 为无人机偏离航线的侧偏距离，计算无人机在标准航线上的投影点， Δy 即为无人机当前位置与投影点的垂向距离； ψ_{cmd} 为当前无人机指令航向角。

4 仿真实验

为验证文中 Dubins 航路设计算法以及控制器，笔者以 4 架无人机组成的编队为例，使用六自由度

无人机模型进行实时仿真。笔者使用的样例无人机参数如表 1 所示。表 2、表 3 为 4 架无人机从无序状态起飞在指定编队点形成纵向一字型编队信息。

表 1 样例无人机参数

参数	数值	参数	数值
质量/kg	21	机翼面积/m ²	1.75
翼展/m	3.8	平均几何弦长/m	0.56
标称速度/(m/s)	60	修正攻角/(°)	1.55

表 2 无人机机群起飞点位置及航向信息 (°)

无人机编号	经度	纬度	航向角
(红)UAV1	101.794 200	40.855 600	90.0
(蓝)UAV2	101.724 200	40.845 600	165.0
(绿)UAV3	101.811 111	40.733 800	280.0
(亮蓝)UAV4	101.735 200	40.663 811	0.0

表 3 无人机机群编队点位置及航向信息 (°)

无人机编号	经度	纬度	航向角
(红)UAV1	102.000 000	40.7769 00	90.0
(蓝)UAV2	102.000 000	40.7764 51	90.0
(绿)UAV3	102.000 000	40.7760 02	90.0
(亮蓝)UAV4	102.000 000	40.7755 53	90.0

分析图 3 可知，应用文中的 Dubins 航路设计算法能为无人机机群很好地完成航路规划任务。同时在编队控制器的作用下，4 架无人机同时到达编队点，且前向距离误差控制在 3 m 以内，侧向距离误差控制在 1 m 内。很好地完成了编队任务，且在指定为其他编队队形时，依然能达到良好的完成效果。

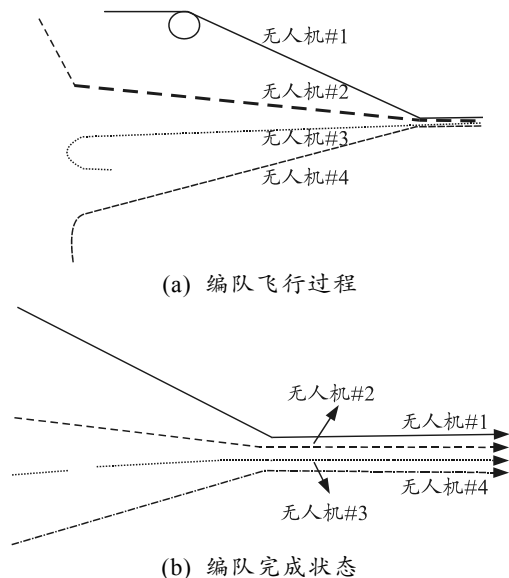


图 3 无人机编队仿真 2 维示意图

分析图 4、图 5 可知：无人机机群在大约 610 s 时收到编队指令，在编队过程中，控制器可自行调整飞行速度以达到编队时间约束。在 3 220 s 时，4 架无人机航向角收敛为指定航向，速度亦趋于稳定。

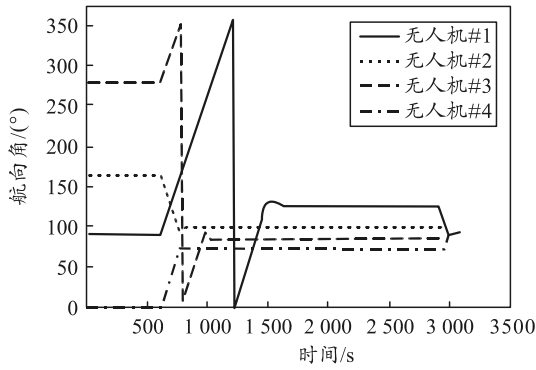


图 4 航向角

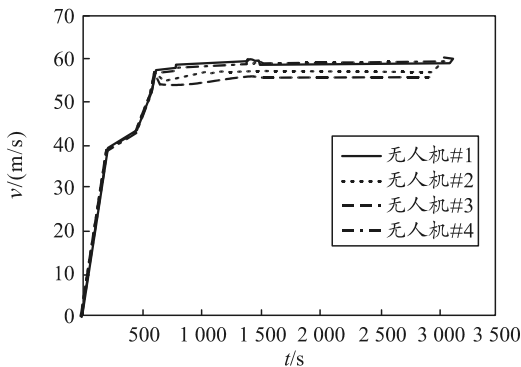


图 5 速度

5 结论

笔者研究了用于无人机编队任务的航路规划算法设计,提出了一种编队航程调整策略,设计了编队保持控制器。仿真结果表明:该方案能够解算出各种编队的飞行航路,使用控制器很好地辅助完成编队任务。

参考文献:

[1] 陈宗基,魏金钟,王英勋. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1075-1083.

[2] 祝小平,周洲,王烽,等. 无人机协同路径规划[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2013: 1-2.

[3] 欧超杰. 多无人机编队控制技术[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.

[4] FURUKAWA T, DURRANT-WHYTE H F, BOURGAULT F, et al. Time-optimal coordinated control of the relative formation of multiple vehicles [J]. Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2003, 1: 260-262.

[5] SHANMUGAVEL M, TAOURDOS A, WHITE B A, et al. Differential geometric path planning of multiple UAVs [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2007, 129(5): 620-632.

[6] SABER R O, MURRAY R M. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems [C]. The 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002: 2965-2971.

[7] 朱战霞,郑莉莉. 无人机编队飞行控制器设计[J]. 飞行力学, 2007, 25(4): 22-24.

[8] 王国强,罗贺,胡笑旋. 无人机编队管理的研究综述[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 48-49.

[9] 赵锋,杨伟,杨朝旭. 无人机紧密编队飞行控制仿真研究[C]. 中俄航空科技学术会专辑, 2012: 14-15.

[10] DUBINS L, On plane curves with curvature[J]. Pacific Journal of Mathematics, 1961, 11(2):471-481.

[11] MADHAVAN S. Path planning of multiple autonomous vwhicles[D]. Cranfield University, 2007.

[12] 吴国强. 无人机航迹跟踪控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.

[13] 吴森堂,费玉华,飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005: 46-64.

[14] CHANDLER P R, PACHTER M, RASMUSSEN S. UAV cooperative control [C]. American Control Conference. Proceedings of the 2001, Arlington, VA, USA: IEEE, 2001: 50-55.