

基于几何法的无人机航迹规划^①

常波, 王瑞

(海军航空兵学院, 葫芦岛 125001)

摘要: 针对无人机的三维航迹规划问题, 提出了一种基于几何法的航迹规划算法. 通过对无人机飞行航迹的分析, 将无人机航迹看作是由一系列直线、圆弧和螺旋线的有序组成. 研究了无人机最大过载系数、最大平飞速度、升限等性能与航迹可行性的关系, 得出生成最优航迹的限定条件. 讨论了几何法无人机航迹规划的步骤. 按照几何原理对无人机航迹进行了规划, 将无人战斗机的机动性能在航迹中充分体现出来. 计算机仿真结果表明用几何法规划的航迹具有较好的适用性.

关键词: 无人机; 航迹规划; 几何法; 航路点

Path Planning Based on Geometric Method for Unmanned Aerial Vehicles

CHANG Bo, WANG Rui

(Naval Air Academy, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to plan trajectory of unmanned aerial vehicles (UAV) in three dimensions, an algorithm based on geometric method is advanced. The path of UAV is analyzed, which could be composed by a set of lines, arcs and helixes. The relationship between path feasibility and the max over loading coefficient, velocity and height limitation of UAV is researched. And the restrict condition of optimal path is founded. The geometric method steps of programming UAV path are discussed. The path is designed by geometric method, in which UAVs flexibility is embodiment. The formulation results exhibit that paths designed by geometric method are well applicability.

Key words: UAV; path planning; geometric method; waypoint

近几十年来, 无人驾驶飞机简称无人机(UAV)得到了以美国为首的很多国家的青睐, 因而得到了较大的发展, 日本更是于 2012 年提出了以无人机为基础的第六代战斗机概念. 无人机不需要驾驶员来操纵, 省去了飞行员的培训周期, 能够更快的形成战斗力. 同时, 不需要人的具体驾驶, 无人机能够执行复杂的危险任务. 随着控制技术、传感技术、导航技术以及计算机技术的飞速发展, 无人机的自动驾驶、航迹规划与控制以及无线通信等功能也不断完善, 在不远的将来, 将会在航空领域占据重要地位.

航迹规划是无人机的关键技术, 是无人机遂行战斗任务的前提准备之一. 无人机航迹规划的算法有多种, 如 A-Star 算法、遗传算法、神经网络、Voronoi 图

法、随机路径搜索法(PRM)、人工势场法等^[1]. 几何法由 Reid A L 等人于 2005 年首次提出, 具有简单、高效的优点^[2]. 但是 Reid A L 等人在几何法中只考虑了平面内的无人机航迹规划问题. 本文基于几何法原理, 将航迹规划延伸到立体空间, 并将飞机的机动性能考虑进来, 使规划出的航迹更能体现无人机的优点.

1 几何法的基本思想

1.1 几何法航迹规划基础

所谓无人机的航迹规划是指在特定的条件下, 寻找无人机从起始点到目标点, 满足某种性能指标和某些约束的最优活动路线^[3]. 无人机的起始点与目标点以及航迹上的任一点称之为航路点 $P(x, y, z, v, \theta, \gamma)$, 其中

^① 收稿时间:2014-04-19;收到修改稿时间:2014-06-03

x, y, z 是 P 点的空间坐标, v 是无人机在 P 点的速度, θ, γ 分别是无人机的俯仰角和倾斜角. 考虑速度的方向性, 可定义每个航路点为矢量点, 方向取当前无人机的速度方向. 无人机的航迹规划则变为按照一定的约束条件将起始矢量点移动到目标矢量点.

平面中的几何法航迹规划, 主要依据以下两个不加证明的几何结论^[4].

结论 1. 对于两同方向(速度方向相同)的航路点, 无人机按直线飞行时所飞过的距离最短.

结论 2. 平面内, 在满足约束条件的情况下, 在某航路点上无人机改变方向的最短路径是按最小转弯圆运动.

为了将平面航迹规划推广到立体空间, 本文依据上述两个结论提出下面一条结论.

结论 3. 不同平面内, 由一个矢量点到达另一个矢量点的最短航迹是螺旋线.

结论 3 可以视为结论 2 与结论 1 的复合. 对于任意两个不在同一平面的两个矢量点 A 和 B 来说, 总可以找到一个半径最小的圆柱面与两个矢量相切, 如图 1 所示. 由 A 点到 B 点的运动过程, 既需要改变方向也需要改变高度. 在这个过程中, 不管是先改变高度再改航向(b 线), 还是先改航向再改高度(c 线), 其所走过的航迹均大于两者同时改变时的航迹(a 线). 显然, a 线是一段落线线, 这也是结论 3 成立的原因.

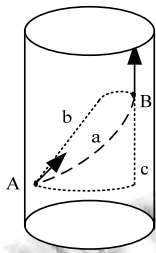


图 1 不同平面的两个矢量点的路径关系

1.2 几何法航迹规划的约束条件

无人机航迹的约束排除了人的因素, 主要受飞机性能、障碍因素、敌方威胁等因素的制约^[5]. 其中飞机性能、障碍等因素可提前预知, 但是敌方威胁却是随机的, 本文主要针对航迹的确定约束条件进行规划.

航迹中的最小转弯半径、螺旋高度等几何参数受无人机的过载系数、最大平飞速度以及升限的影响.

(1)最小转弯半径. 最小转弯半径是指无人机在水平面内做匀速圆周运动时, 圆周的最小半径即为最小

转弯半径. 飞机做转弯时的受力分析如图 2 所示.

图中 γ 表示倾斜角, Y 为升力, G 为飞机重力. 根据飞机作匀速圆周运动的力平衡方程, 可以得到转弯半径, 如公式(1)所示.

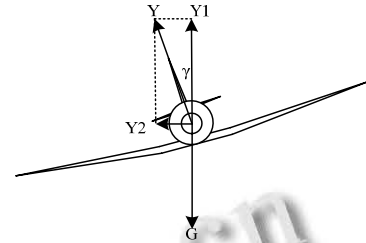


图 2 无人机转弯受力分析

$$r = \frac{v^2}{g\sqrt{n^2 - 1}} \tag{1}$$

$$n = \frac{1}{\cos \gamma}$$

式中, v 是飞机速度, n 是飞机的过载系数, r 是转弯半径. 由公式 1 可以看出, 在速度一定的情况下, 最小转弯半径取决于飞机所能承受的最大过载系数, 实际飞行中倾斜角 γ 往往小于最大过载系数所对应的倾斜角, 因而最小转弯半径为

$$r_{\min} = \frac{v^2}{g\sqrt{1/\cos^2 \gamma_{\max} - 1}}$$

得到最小转弯半径之后, 就可以规划无人机在水平面内上以最短距离改变航向. 其方法为: 以此航路点的速度方向为准, 在水平面内做一条与之垂直的直线, 此直线上必有左右两点 O_L, O_R 与航路点间距为 r_{\min} , 以 O_L 和 O_R 做圆心, r_{\min} 做半径分别画圆. 则无人机沿此两圆可以在平面内以最短路径改变 180° 的航向, 如图 3 所示.

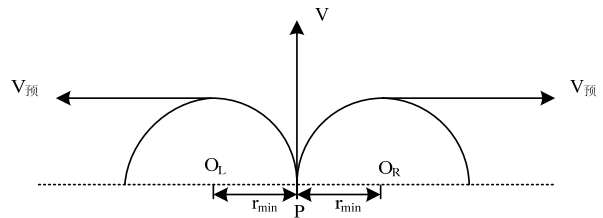


图 3 无人机水平面内最小转弯半径

(2)最佳螺旋曲线. 当无人机在水平面以外做改变方向的运动时, 可以用螺旋线来得到近似最优的航迹. 这里的近似最优是指垂直平面内航向的改变, 因为可以用斤斗来完成, 但是斤斗航迹的曲率不同, 计算量

太大, 因而用螺旋线来近似, 其他平面的航向改变即为最优.

螺旋线的两个参数半径 r 和间距 h 取决于无人机的速度、过载系数、发动机推力等性能参数. 同时, 转弯半径 r 与升高距离 h 都受限于发动机可用推力, 为达到最优, 需要联合求解. 飞行阻力、可用推力与飞机最大飞行速度关系如图 4 所示.

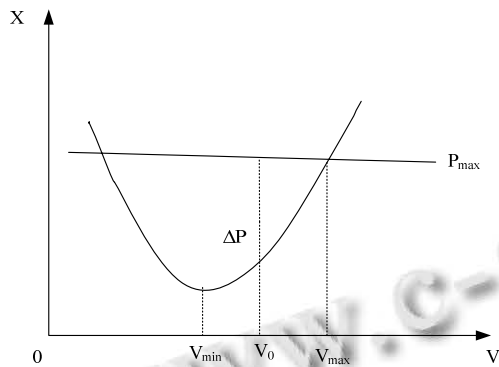


图 4 无人机飞行阻力曲线

图中, P_{max} 表示发动机最大可用推力, 随速度增加略有下降, 当阻力等于推力 $X=P$ 时, 飞机达到最大速度 V_{max} . 当飞机速度小于 V_{min} 时, 阻力速度减小而增大, 飞机处于不稳定状态, 一般不以小于 V_{min} 的速度飞行. 当无人机以速度 v_0 进入螺旋飞行时, 以等速飞行, 半径与平面内盘旋半径相同, 如公式(1)所示.

对于螺旋高度, 可用能量守恒的角度来分析, 上升的高度即无人机重力势能增加, 耗费的是发动机剩余推力做功, 无人机动能不变, 能量守恒如公式(2)所示.

$$\Delta P_w + \frac{1}{2}mv_0^2 = mgH + \frac{1}{2}mv_0^2 + X_w \quad (2)$$

式中, ΔP_w 和 X_w 分别表示剩余推力做功和飞行阻力做功, 可以分别转换为动能表示, $m(v_{max}-v_0)^2/2$ 和 $mv_\alpha^2/2$; v_α 为转弯时, 所用迎角对应的平飞速度, 则螺旋高度用公式(3)计算得到.

$$H = \frac{(v_{max} - v_0)^2 - v_\alpha^2}{2g} \quad (3)$$

2 几何法路径规划

空间中的两个航路点之间的差异, 除却姿态因素外, 主要是高度和速度两个方面, 其中速度包括方向和大小. 因而从航路点 P_1 到航路点 P_2 通过变高度和变速度来实现, 其具体过程如图 5 所示. 图 5 所示为两个

不同平面 a 和 b 中的五个航路点之间的关系.

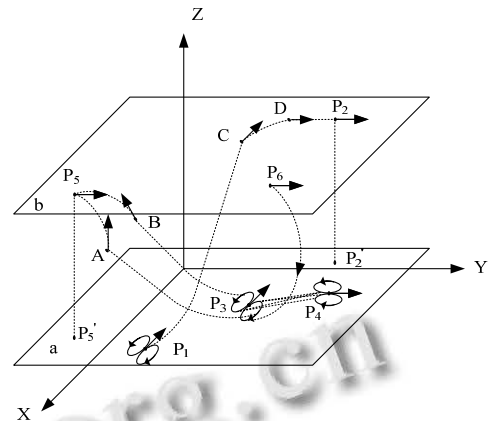


图 5 不同航路点之间的航迹

当两个航路点同在水平面内时, 如由 P_3 到 P_4 , 其航迹可以由圆弧和直线组合而成, 详细的讨论可参考相关文献[4, 6]. 这里我们主要介绍不在同一水平内的两个航路点之间的航迹规划问题.

不在同一平面内的两个航路点之间的航迹可以分为两类, (1)目的航路点在当前航路点的前方, 如从 P_1 到 P_2 ; (2)目的航路点在当前航路点的后方, 如由 P_3 到 P_5 . 如此分类是因为涉及到先变高还是先变速的问题. 第(1)种情况下, 需要先改变高度, 直线跃升到 C 点, 然后通过转弯跃升, 走过一段螺旋线到达 D 点, 理论上应选择 D 点与 P_2 点重合, 以使航迹最优. 第(2)种情况下, 则需要先改变速度方向, 通过螺旋线飞行改变方向, 之后跃升到 B 点或者 A 点, 再通过螺旋线到达 P_5 点. A 点和 B 点分别为顺时针螺旋线和逆时针螺旋线上的航路点, 事实上由 P_3 到 P_5 存在四条航迹, 通过比较其航迹的长短可以选择最优的一条. 在这里的讨论中, 难点在于航路点 A, B, C 的选取和计算. 对于由航路点 P_6 到 P_3 的情形, 则属于是下降螺旋线, 其转弯半径限制条件与平面圆周运动相同, 下降高度则不需考虑剩余推力的影响, 仅有最小下降高度的限制, 取决于 v_α .

航路点 A 为跃升终点、螺旋线的起点, 其坐标可以由最小转弯半径和高度公式, 由目标航路点 P_5 的坐标得到. A 点的速度方向应与螺旋线相切, 从而由航路点 P_3 开始在水平面的转弯角度 α_1 可以得到. α_1 为 A 点速度方向在 a 平面的投影与航路点 P_3 速度方向的夹角. 由平面 a 到 A 点跃升的上升角则为 A 点速度方向与平面 a 的夹角 α_2 . 通过以上的分析计算, 航路点 A 的坐

标确定, 路径参数也确定. 航路点 B 的确定方法与 A 点相同. 通过比较路径 P_3-A-P_3 与路径 P_3-B-P_3 的长度, 可以得到最优的路径.

由 P_1 到 P_2 的路径规划, 以及 C 点坐标的确定与 A、B 两点的确定相同. 几何法航迹规划的步骤如图 6 所示.

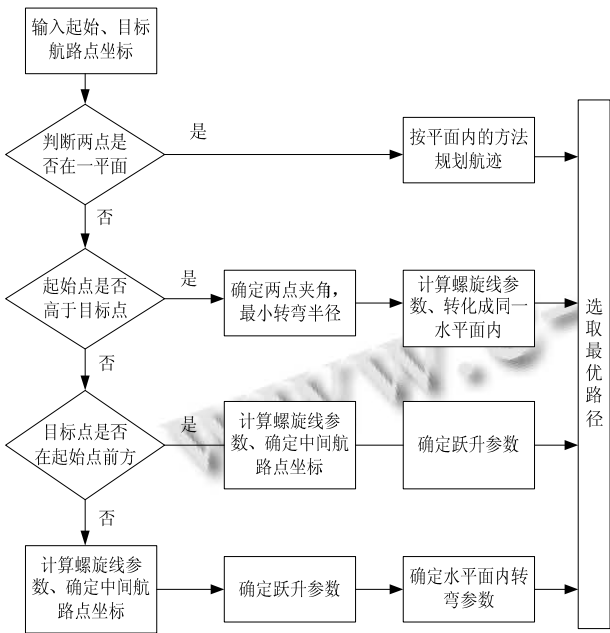


图 6 几何法无人机航迹规划步骤

3 几何法路径规划的仿真

对无人机航迹进行规划涉及到参数如表 1 所示.

表 1 无人机参数

参数	数值
升限(m)	3500
最大平飞速度(m/s)	190
水平面最大速度(m/s)	165
最大过载	10
载油量(kg)	75

取无人机的飞行空域为 $S=[0\ 500, 0\ 500, 0\ 800]$, 取空域中的四个航路点 $A(150, 160, 0, 10^\circ, 120)$ 、 $B(20, 360, 380, 110^\circ, 120)$ 、 $C(350, 380, 580, -15^\circ, 120)$ 、 $D(270, 80, 420, -85^\circ, 120)$, 坐标中前三个元素分别为三轴坐标, 单位为 km, 第四个元素表示该航路点在平面内速度的方向, 第五个元素表示速度大小, 单位 m/s. 分别规划 A 点到 B、C 两点的航迹和 D 点到 A 点的航迹, 仿真航迹如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 基于几何法的航迹规划可以完成无威胁情况下的无人机航

迹计算, 生成的航迹为最优. 其中 A 点到 C 点的航迹为两条, 其中一条是实线表示, 用于对比. 通过对比可以看出图 6 的规划步骤是正确的, 必须按此执行以达到最优航迹.

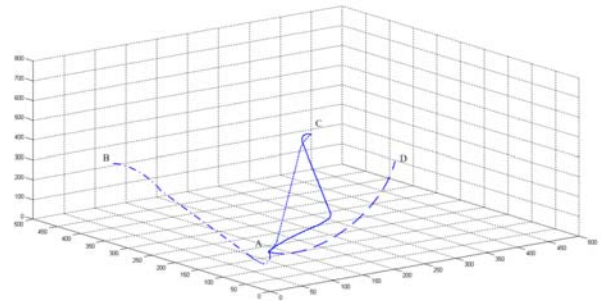


图 7 几何法无人机航迹规划仿真

为获得确定约束条件下的航迹规划, 仍取上述的 S 空域和 A、B、C 三点, 并设定空域 $S_1=[200\ 300, 250\ 350, 0\ 200]$ 和空域 $S_2=[100\ 50, 250\ 300, 100\ 50]$ 为限定空域, 分别采用几何算法、A-STAR 算法和遗传算法进行航迹规划, 如图 8 所示. 从图中可以看出, 使用几何法规划的航迹较优. 尤其是从 A 点到 B 点的过程中, A-STAR 算法和遗传算法规划的初始航迹(即 A 点的起始段)未能满足飞机的最小转弯限制, 是不可飞的. 在避障阶段, 由于几何法采用螺旋线航迹, 相比其他两种算法, 几何法规划的航迹较为平滑, 适合飞行.

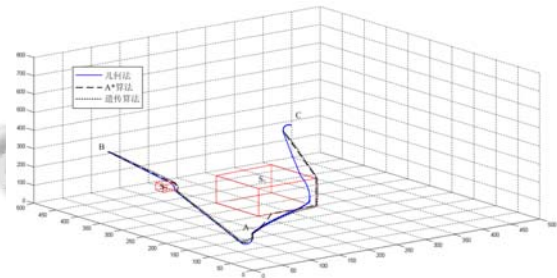


图 8 确定约束条件下航迹规划方法对比

4 结论

本文设计了一种基于几何法的无人机航迹规划方法. 几何法航迹规划的思想步骤均考虑了飞机自身的限制条件, 因而应用几何法规划的航迹是可控、可知、可飞的, 满足收敛性的要求. 同时, 在航迹的组成部分加入了螺旋线航迹, 注重了无人机在飞行中的机动性能, 也是规划的航迹更接近最优.

本文航迹规划的最大缺点是未讨论战场威胁限制, 对于固定可知的威胁, 可以用螺旋线和圆形航迹规避;

对于不可预知的威胁,则需要缩减航迹规划计算量,或结合其他方法进行航迹修改^{[7][8]}.

参考文献

- 1 唐强,张翔伦,左玲.无人机航迹规划算法的初步研究.航空计算技术,2003,33(1):125-128.
- 2 Reid AL, Meir P, Mark JM. Path planning by unmanned air vehicles for engaging an integrated radar network. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, California. 2005.
- 3 Glmorejif, Czuchry AJ. A neural network model for route planning constraint integration. IJCNN: International Joint Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ. IEEE. 1992, 3. 221-226.
- 4 王庆江,高晓光,符小卫.无威胁情况下任意两点间的无人机路径规划.系统工程与电子技术,2009,31(9): 2157-2162.
- 5 陈海汉,刘因,杜运磊.无人飞行器航迹规划研究.计算机应用,2011,31(9):2574-2576.
- 6 Yoshitani N. Flight trajectory control based on required acceleration for fixed-wing aircraft. 27th International Congress of the Aeronautical Sciences. 2010,10. 1-10.
- 7 刘新,周成平,丁明跃.无人机快速航迹规划算法.华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(4):45-48.
- 8 周克强,高晓光,白奕.改进的快速扩展随机树在航迹规划中的应用.系统工程与电子技术,2006,28(10):1538-1540.