A 3D Flying Path Simulation Method Based on Aircraft's Six-Degree-of-Freedom Model

ZUO Zhifang, GAO Yuliang, LI Yuehua, LIN Meiqing

Air Force Radar Academy, Wuhan, China

Abstract: This paper presents a method based on the aircraft's six-degree-of-freedom model to generate a 3D flying path that is capable of reflecting the motion characteristics of different aircrafts. In this method, firstly, the given flying paths in both the horizontal and the vertical surfaces are integrated into the spatial 3D flying path by utilizing the interpolation algorithm and the spline function; also, the inclination, deflection angle and radius of curvature of the flying path are calculated. Secondly, in light of the aircraft model and parameters of the flying path, the deviation between the next position of the aircraft and the set flying path is calculated; adjustments will also be made on the parameters of the aircraft with the feedback function to obtain the minimum value of the deviation, when the coordinate position and speed of the aircraft will be recorded and a new flying path will be generated consequently. Finally, to make the flying path more close to the real one, the Gaussian white noise is utilized to dispose the new flying path to simulate the disturbance factors, like the atmospheric turbulence. Simulation results have proven that this method is able to preferably respond to motion characteristics of different types of aircrafts and features a higher use value.

Keywords: three-dimensional track; mechanical properties; six degrees of freedom model; interpolation algorithm; error feedback

基于飞行器六自由度模型的三维航迹模拟方法

左治方，高玉良，李跃华，蔺美青

空军雷达学院，武汉，中国，430019

摘　要：为了生成能够反映不同飞行器运动特性的三维航迹，本文提出了一种基于飞行器六自由度模型的航迹产生方法。该方法首先利用插值算法和样条函数将水平面和铅垂面内给定的平面航迹合成为空间三维航迹，并计算航迹倾角、偏转角、曲率半径等航迹参数。然后结合飞行器模型和航迹参数，计算飞行器下一点出现的位置及与给定航迹的偏差，并通过反馈函数对飞行器参数进行调节，使航迹偏差达到最小值，记录此时飞行器的坐标位置及速度信息，即可生成新的航迹。最后为使航迹更加逼真，利用高斯白噪声对新航迹进行处理以模拟大气湍流等扰动因素。仿真结果表明该方法能较好的反应不同类型飞机的运动特性，有较高的实用价值。

关键词：三维航迹；机动特性；六自由度模型；插值；误差反馈

1 引言

飞机航迹模拟，是进行各种雷达情报数据处理、融合算法和跟踪算法等研究的前提，同时各种雷达模拟器的主要部分，在军事训练中具有重要意义。目前用来生成模拟航迹的方法存在许多的缺陷。文献[1]提出了利用三次样条曲线来模拟航迹,虽然能模拟目标各种运动的航迹,可是这种方法却忽略了目标运动特性;文献[2]提出利用直线段和弧线段组合来模拟航迹,这样只能近似地反应出飞机的位置,不能正确的反应飞机当前的状态 ,尤其是在飞机拐弯时直接按照两段线的节点进行转弯,不能真实显示飞机的运动状态,同样也不能很好地描述空中目标的真实运动。文献[3，4]提出一种基于运动状态方程和状态方程的航迹模拟方法，但两种方法均将飞机看做质心来处理，忽略了飞机的气动特性，不能很好的模拟飞机的机动特性。针对这些不足,本文提出了一种基于飞机六自由度模型的航迹模拟方法,仿真结果能比较真实反应飞机的运动状态。

2 总体设计

2.1 方案原理

在空情仿真中，往往会根据战术要求预先制定好

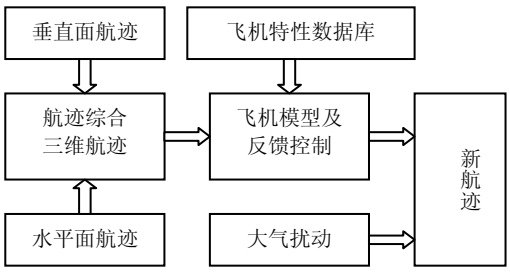


图 1. 航迹模拟软件结构

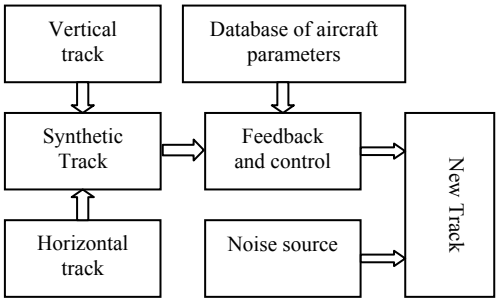


Figure 1. Process of 3D flying path simulation method

航迹，设定飞机沿该航迹飞行。直接输入飞机的各种飞行参数既不够直观又难以操作，很难反映战术需要。基于以上原因本文提出了一种航迹模拟的新方法。该方法可直接在地图上绘制航迹，然后根据航迹中包含的参数对飞机进行控制，从而达到既可以真实的模拟飞机航迹，又可以直观的反映战术想定的目的。算法的总体结构如图 1 所示：

2.2 各主要单元的作用

平面航迹和高度航迹绘制模块用来采集航迹的地理坐标并进行存储。

航迹综合模块：首先对平面航迹和高度航迹进行平滑滤波去除航迹绘制中的噪声，具体算法见文献[5]，将平面航迹和高度航迹通过插值算法合成三维航迹，然后进行样条插值，使航迹二阶可导。

飞机参数数据库主要为飞机模型计算提供飞机的各种性能参数，软件使用者可以从中选择不同的飞机类型进行航迹模拟。

飞机模型及状态控制模块根据空间航迹的角度和位置等参数计算飞机的速度、加速度等信息，并预测下一点的位置，进而进行误差控制。

新航迹数据产生模块：主要对前一级模块输出的速度、坐标信息进行插值以计算某一特定时刻飞机的坐标。为了使航迹的模拟更加接近实际情况，本算法还在航迹数据中加入噪声以模拟由于空气扰动等原因引起的飞机起伏。

3 算法流程

步骤：

1) 绘制平面航迹、高度航迹。
2) 数据点过滤及曲线光滑。
3) 利用插值算法合成三维航迹。
4) 设定飞机初始参数。
5) 计算航迹倾斜角和航迹偏转角。
6) 根据航迹倾斜角和航迹偏转角以及飞机的当前状态计算飞机的下一点航迹位置、速度、加速度、飞机滚转角等，判断计算出的参数是否超出飞机的性能范围。若是进行步骤（7），否则进行步骤（8）。
7) 修改飞机滚转角、迎角、速度，计算步骤（6）
8) 将步骤（6）计算出的参数作为下一次计算的当前状态，计算步骤（5）。

4 航迹模拟滑算法

4.1 航迹平滑算法

航迹平滑算法主要包括噪声点的去除和 B 样条逼近。

去除噪声点方法见参考文献[6]

三次 B 样条模型：

$$\begin{cases} x = a_1 t^3 + b_1 t^2 + c_1 t + d_1 \\ y = a_2 t^3 + b_2 t^2 + c_2 t + d_2 \end{cases}$$

式中，t 为量化在[0，1]区间上的局部参数，（x,y）为 B 样条上的曲线。

B 样条曲率：

$$C_v(t) = \frac{2(3a_2b_1t^2 - 3a_1b_2t^2 + 3c_1a_2t - 3c_2a_1t + b_2c_1 - b_1c_2)}{[(3a_1t^2 + 2b_1t + c_1)^2 + (3a_2t^2 + 2b_2t + c_2)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

4.2 航迹插值算法

目前对于空间三维航迹的模拟多使用公式法或者直接指定每小段航迹的高度，这些方法都不便于三位航迹直观的体现。本文中提出的航迹合成方法可以将水平面航迹和铅垂面航迹直接转化为三维航迹，既便于操作又直观形象。

平面航迹坐标为（xk,yk）

$$l_k^{'} = \sum_{i=1}^{k} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

$$i = 0, 1, \ldots, n$$

式中，l’k 为（xk,yk）对应的航迹长度，l0=0。

铅垂面航迹坐标为（ln,hn）

978-1-935068-04-4 © 2009 SciRes.

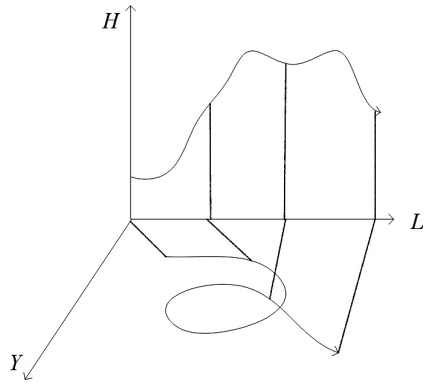


图 2. 航迹插值算法示意图

Figure 2. Track interpolation algorithm

设 ln-1<l'k<ln 则 l'k 对应的高度 h'n 为 h'n=H(l'k) H 为铅垂面航迹的 B 样条函数。又因为（xk,yk）与 l'k 一一对应如图 2 所示。

4.3 飞机数学模型

基本假设：

1) 机体方向与飞行速度方向一致即：

飞机无侧滑，偏航角等于航迹偏转角，飞机迎角和发动机安装角均很小，飞机俯仰角等于航迹倾角。

2) 飞机看作刚体且飞机质量恒定。

航迹坐标系中的质心动力学方程：

所以（xk,yk）处的三维航迹坐标为（xk,yk,h'n）。

$$\begin{cases} m\dfrac{dv}{dt} = P\cos(\alpha+\varphi_p)\cos\beta - Q - mg\sin\theta \\ mv\dfrac{d\theta}{dt} = P\left[\cos(\alpha+\varphi_p)\sin\beta\sin\gamma_s + \sin(\alpha+\varphi_p)\cos\gamma_s\right] + Y\cos\gamma_s - Z\sin\gamma_s - mg\cos\theta \\ -mv\cos\theta\dfrac{d\varphi_s}{dt} = P\left[-\cos(\alpha+\varphi_p)\sin\beta\cos\gamma_s + \sin(\alpha+\varphi_p)\sin\gamma_s\right] + Y\sin\gamma_s + Z\cos\gamma_s \end{cases}$$

质心运动学方程：

$$\begin{cases} \dfrac{dx_d}{dt} = v\cos\theta\cos\varphi_s \\ \dfrac{dy_d}{dt} = v\sin\theta \\ \dfrac{dz_d}{dt} = -v\cos\theta\sin\varphi_s \end{cases}$$

角度几何关系：

$$\sin\beta = [\sin\gamma\sin\vartheta\cos(\varphi-\varphi_s) + \cos\gamma\sin(\varphi-\varphi_s)]\cos\theta - \sin\gamma\cos\vartheta\sin\theta$$

$$\sin\alpha = \{[\cos\gamma\sin\vartheta\cos(\varphi-\varphi_s) - \sin\gamma\sin(\varphi-\varphi_s)]\cos\theta - \cos\gamma\cos\vartheta\sin\theta\}/\cos\beta$$

$$\cos\varphi_s = (\sin\vartheta\sin\alpha + \cos\gamma\cos\vartheta\cos\alpha)/\cos\theta$$

$$\sin(\varphi_s - \varphi) = (\sin\gamma\sin\alpha\cos\beta - \cos\gamma\sin\beta)/\cos\theta$$

4.4 航迹误差控制函数

对于盘旋等曲线航迹来说，曲率半径并不是严格

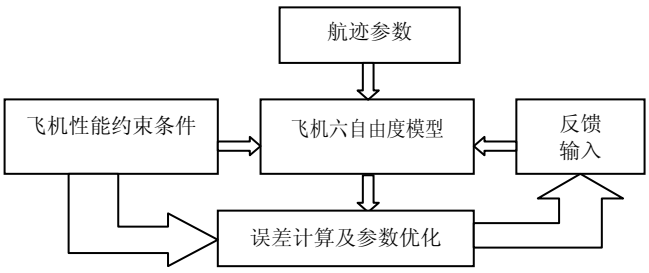


图 3. 航迹误差控制及优化流程

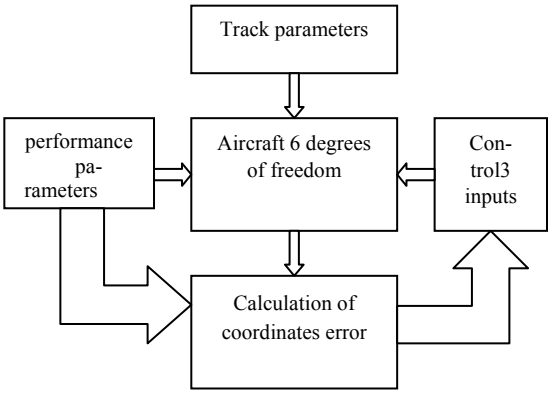
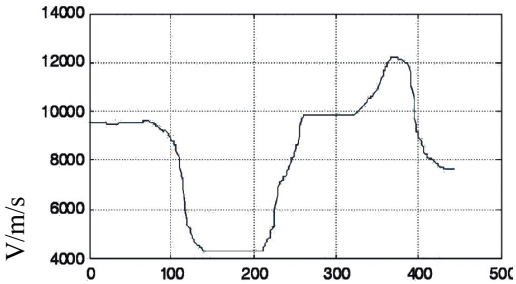


Figure 3. Error control process



4(a). 水平面内飞行航迹

Figure 4(a). Flying path in the horizontal

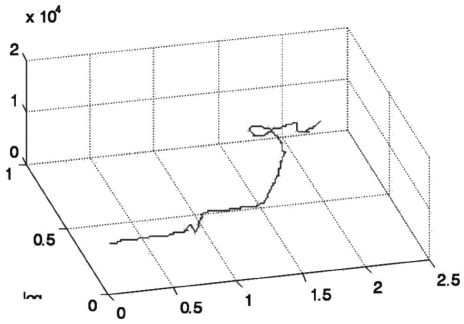


图 4 (b). 垂直面内飞行航迹

Figure 4(b). Flying path in the vertical

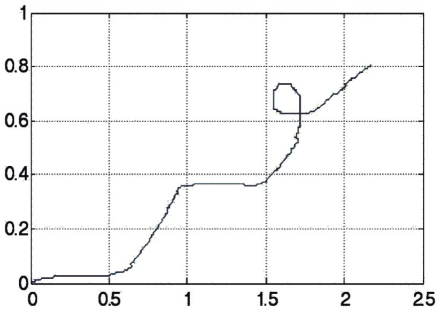


图 4(c). 合成后的三维航迹

Figure 4(c). 3D flying paths

相等的，也就是说飞机的航迹和给定的航迹是存在误差的，这里用来度量误差的大小。为使航迹误差最小就需要构造反馈函数来不断调整飞机速度、航向和姿态角等参数。

这里选取两条航迹所围面积的大小来衡量，误差反馈及控制流程如图 3 所示，详细算法见参考文献[7].

5 案例研究

该部分对本文提出的算法进行了初步仿真。图 4(a)为飞机在水平面内的航迹，图 4(b)为飞机在铅垂面内的航迹，图 4(c)为航迹综合后的三维航迹。在图 4 中航迹的基础上，选择两种不同的飞机对航迹进行了模拟，如图 5 所示。从图 5 中可以看出，采

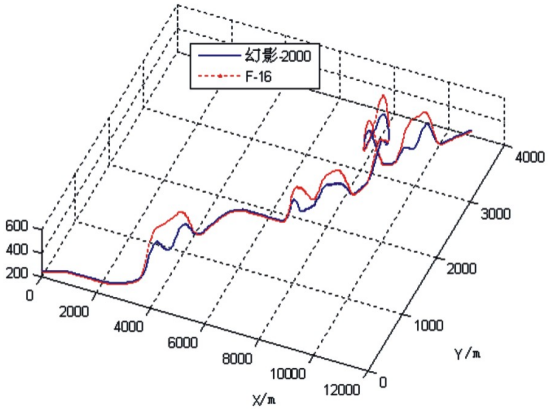


图 5. 同一航迹中不同类型飞机的速度仿真

Figure 5. Speed of different aircraft for the 3D flight path

用本文提出的方法对不同的飞机表现出不同的速度特性，其速度特性可在雷达中较好的表现出来。

致谢

衷心感谢在本文的写作过程中李跃华教授和高玉良教授给与的悉心指导和无私帮助，以及提供的许多良好的建议。

References (参考文献)

[1] Guo Nailin,Wang Jianhui. A Simulative 3D Model of Target's Trail in the Military Training Supposition[J]. Journal of System Simulation, April 2002,Vol.14, No.4.
郭乃林，王建辉. 军事训练中的三维航迹想定模型[J]. 系统仿真学报，2002 年第 14 卷第 4 期.

[2] Jin Hongbin，Xu Yu. New Method of Radar Target Track Simulation. Computer Measurement And control[J]. 2004.12(1).
金宏斌，徐毓. 一种新的雷达目标模拟方法[J]. 计算机测量与控制. 2004.12(1).

[3] Cai Yichao,Xu Yu,Jin Hongbin. Simulating Assumptions of Radar Information[J]. Journal of Airforce Radar Academy,1999,03.
蔡益朝，徐毓. 应用插值理论实现雷达空情想定模拟仿真[J]. 空军雷达学院学报，1999 年第 13 卷第 3 期.

[4] Yang Qiaoying,Ye Cui,Liu Zaiwen. Research and Raelization of Computer Simulation of Signal Source of Random Moving Multi-target[J]. Journal of Beijing Institute of Light Indusry,Sep.2000,Vol.18, No.3.
杨巧英，叶淬. 机动多目标计算机仿真信号源的研究与实现[J]. 北京轻工业学院学报，2000 年 9 月，第 18 卷第三期.

[5] Zhou Yan,Wang Zuxi,Chen Zhenyu,Li Dehua. An Adaptive Algorithm of Curve's Cmoothing[J]. Computer Engineering,April 2000,Vol.26 No4.
周焰，王祖真，陈振羽等.一种曲线平滑的自适应方法[J].计算机工程，2000 年 04 月,底 26 卷第 4 期.

[6] Han Li,Tang Di. Free Form 3D Curve Sketching and Intelligent Oversketching Algorithm[J]. Computer Engineering, Dec. 2006,Vol.27,No.24.
韩丽，唐棣.3D 自由曲线的绘制及智能修改算法[J].计算机工程与设计，2006 年 12 月第 27 卷第 24 期.

[7] 基于 Cardinals 三次样条曲线的航迹生成算法实现.

[8] Yuan Fang. The Application of Optimum Process Theory In Calculation of Optimal Trajectory For Fighter[J]. Flifht Dynamics, Mar.2000,Vol.18, No.1.
袁方，最优过程理论在飞行轨迹优化计算中的应用[J].飞行力学，2000年03月，第18卷第1期.

978-1-935068-04-4 © 2009 SciRes.