

doi: 10.7690/bgzd.2016.08.005

无人机操纵训练仿真系统

郝宇¹, 赵鹏²

(1. 河南大学物理与电子学院, 河南 开封 475004; 2. 防空兵学院导弹系, 郑州 450052)

摘要: 针对无人机操纵手训练中存在的效果不佳和训练周期长等问题, 开发了一款成本低廉的软件模拟训练系统。系统基于 DirectX 作为底层驱动, 结合无人机运动模型和传感器模型, 构建了人员仿真、环境仿真、无人机仿真、传感器仿真等多个部分, 解决了对真实坐标与经纬度坐标间的相互转换, 传感器仿真的解决方法等难点问题。该系统现已成功应用于无人机操纵的教学和相关无人机组的实践之中, 应用结果表明: 该系统仿真度高、对运行环境要求低、运行稳定可靠, 训练效果显著。

关键词: 无人机; 操纵; 训练仿真

中图分类号: TP391.99 **文献标志码:** A

Training Simulation System of UAV

Hao Yu¹, Zhao Peng²

(1. School of Physics & Electronics, Henan University, Kaifeng 475004, China;
2. Department of Missile, Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor training effect in UAV controller, developed a software simulation training system of UAV. Systems based on DirectX as the underlying driver, combined with the unmanned aerial vehicle motion and sensor model, building a personnel simulation, environmental simulation, simulation of UAV and sensor simulation and other parts solve real transformation between coordinates and latitude/longitude coordinates, sensor simulation solutions to problems. The system has been successfully applied to UAV control of teaching, results show that the system is high degree of simulation and low demand for environment, stable and reliable operation, training is effective.

Keywords: UAV; control; training simulation system

0 引言

无人机的操纵需要操纵手具备一定的操控经验和良好的心理素质。操纵经验的积累需要长时间的飞行训练。飞行训练往往受到场地、天气等因素的影响, 不仅无法保证训练时间, 而且物资和油料消耗较大, 如果出现摔机事故, 还将危及人员和财产的安全, 导致训练效果不佳, 训练周期长。随着无人机在各行业受到越来越广泛的应用, 操纵手缺乏的情况会越来越严重。

为此, 笔者开发了一款先进、高效、安全和成本低廉的无人机模拟训练系统, 用以训练无人驾驶飞机的操控人员。

1 系统结构

训练仿真系统包括对无人机系统本身的仿真, 对外界环境的三维仿真, 以及训练和评估模块。如图 1, 其总体结构采用的三维引擎为 DirectX3D。该引擎完全免费, 有较好的技术支持。

2 系统设计

2.1 飞机运动学及动力学仿真

运动学及动力学仿真采用六自由度全量飞机模

型。由于该模型没有对刚体运动模型和气动数据做线性化处理, 而是根据牛顿第二定律直接推导出六自由度全量非线性方程, 考虑了飞机的纵横向之间的耦合作用; 因此, 该模型能够更精确、更全面地反映飞机的实际运动特征^[1]。飞行动力学方程组可参见文献[1]。

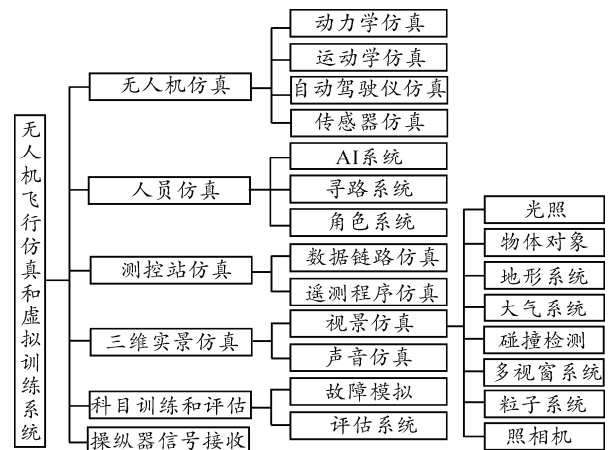


图 1 无人机仿真结构

2.2 无人机自动驾驶仪仿真

自动驾驶仪是无人机飞行控制系统的核心。对于数字式飞行控制系统, 主要模拟其控制方式和控

收稿日期: 2016-04-22; 修回日期: 2016-06-01

作者简介: 郝宇(1991—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事网络工程、信息安全研究。

制率。对于中高速无人机，一般有增稳控制方式和自主飞行方式。增稳控制方式指令信号将转换为姿态给定信号，飞机姿态保持由飞控系统完成；自主飞行方式是预先存储某些关键点位置信息，按“程控”指令后飞机可按预定航线飞行。在丢失遥控信号后自主返回起飞点附近并自行进入回收模式。

本系统完全模拟了这 2 种控制方式，并能够在操纵手控制下实现 2 种方式的切换。

2.3 环境仿真

构建一个较为逼真的虚拟环境是任何视景仿真程序都需要解决的首要问题，包括地形、天空、光照、物体甚至大气等，仿真度高的训练环境可以增强受训者的沉浸感，增强训练效果。

1) 地形：系统采用灰度图设置高程，配合贴图构建虚拟地面。由于无人机操纵者的活动范围有限，无需构建范围很大的地形效果，系统采用的地面范围是 2 km×2 km。系统采用细节贴图，即先将全局贴图贴在地面，将整个地表分成小格，在每个小格再次贴一张地面的细节图，使得地面细节更加突出，如图 2 所示。

2) 天空：采用天空盒方法构建天空。即建立四方体，在四方体的各个面贴上贴图，构成前后左右以及头顶的天空图像。这种方法简单易行，有专门的软件可以制作天空盒 6 面贴图，例如 Terragen 0.9。

3) 大气和光照：大气和光照配合能够实现多种气象效果，例如阴天、傍晚、黑夜等，以实现多种气象条件下的飞行训练。另外，系统采用粒子系统实现了雾、雨、雪的效果。

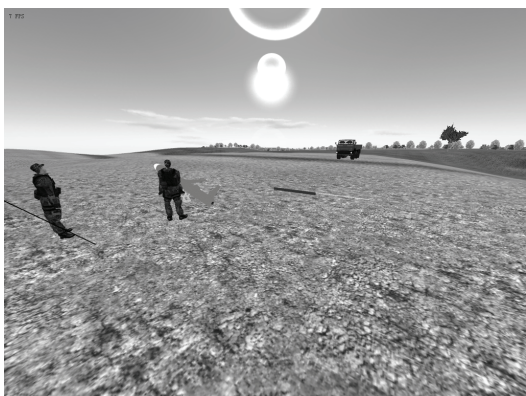


图 2 场景仿真效果

4) 开放式场景：系统提供了平原、山地、海边、沙漠等 5 个场景。为了满足受训者的特殊需求，系统实现了开放式场景，将一个场景的所有资源形成一个文件夹，采用专用配置文件记录场景中所有特性(地形高度图文件名,地面贴图名,天空贴图名称,

太阳位置,水面高度,物体对象位置……),使用者可根据需求建立场景文件夹名称,放入图像资源,编辑自己的配置文件就可生成一个新的训练场景。

2.4 人员仿真

大中型无人机操纵手不仅需要操纵飞机进行飞行训练,在地面起飞前还需要和机组其他人员配合进行起飞前的检查。在发动机的噪音干扰下,这种交流通常以各种手势进行;所以,无人机操纵手必须熟悉各种手势。系统首次在模拟程序中增加了机组其他成员,并能够作出完全真实的手势,以训练操纵手对手势的掌握程度,这在各种无人机模拟训练系统中是首次运用。

人物角色通过骨骼动画实现,角色的 AI 采用状态机模型实现,操纵手可以通过操纵盒与虚拟人物进行交互。以机体手角色为例说明建模过程,机体手在无人机起飞前的主要工作可以描述为:当无人机准备发射时,从无人机旁跑到发射操作点,蹲下连接好助推火箭点火装置和预先设置好的点火电缆,当听到自动驾驶下达“起飞”口令后,按下“发射”按钮,当无人机起飞后,站起来观察助推火箭落地位置,跑向该位置回收助推火箭,捡起火箭后返回发射地点进行后续设备维护工作。经过分析将其动作适当进行简化,将机体手的动作分为“站立”“跑”“蹲下”“按下发射按钮”“捡起助推火箭”5 个动作,即确立了机体手 5 种状态,这 5 种状态在不同情况下相互转换即形成了机体手的动作。图 3 是机体手的状态转移图,描述了其状态转移过程。程序根据此状态转移图以及当前的状态,即可完成对机体手的动作描述。

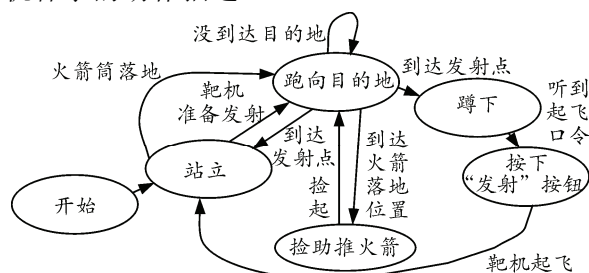


图 3 机体手自动机模型

2.5 故障设置和仿真

为了提高训练真实度,系统添加了故障模拟功能,能够模拟关键的传感器和执行机构的故障。对于完成特定功能的设备,其一般功能模型如图 4。

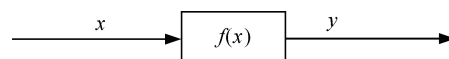


图 4 设备功能模型

当系统正常时，在输入 x 下有输出 $y=f(x)$ ；当系统出现故障时，系统输出 y 将可能有 4 种情况：

- 1) 完全失灵： y 成为一个固定值，不再随输入变化而变化；
- 2) 固定偏差： y 的输出是 $f(x)$ 与一个固定数值的叠加；
- 3) 漂移： y 是 $f(x)$ 和一个线性变化数值的叠加；
- 4) 精度变差(方差过大)：输出为白噪声，测量误差的方差超出指标。 y 是 $f(x)$ 和一个非线性变化数值的叠加。

依据上述 4 种故障现象模型，在统计分析了历年来的实际遇到的无人机故障的基础上，系统实现了飞行控制器、遥控接收机、垂直陀螺仪、高度传感器、航向传感器、舵机、GPS 接收机的故障模拟。

2.6 操纵手评估模型

由于条件限制，无人机操纵手的评估一直以来缺乏可操作的手段和方法，而本系统的评估模块以模拟训练环境为依托，实现了对操纵手的操纵进行自动评估。

经过专家对危及无人机飞行安全的错误事件进行排序，制定了如图 5 的评估指标体系。

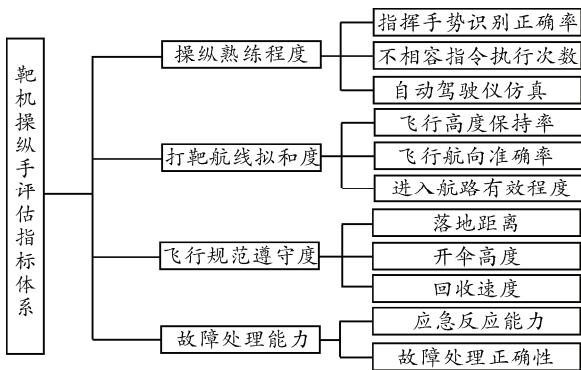


图 5 操纵手评估指标体系

仿真程序为评估模块提供模拟训练中的原始数据，评估模块通过记录的关键点行为和某些无人机重要参数结果数据，经分析判断，将上述指标体系进行量化和归一化，得到评估矩阵。通过对比常用的各种评估方法，采用训练成绩直观，评估方法简单，易于被教员接受的层次分析法处理以上指标^[2]，在训练结束后自动给出训练成绩，同时给出评语，指出受训者训练过程中的错误，以形成反馈机制。

3 系统技术难点

3.1 真实坐标转换到经纬度坐标

无人机工作过程中，多采用 GPS 作为程控飞行

的定位依据。其工作过程是 GPS 接收机收到信号，飞控解算控制量，同时将经纬度信息打包发送回地面，用作遥测信息，实时显示无人机位置。

GPS 接收机感受位置信号是以无人机精确位置为期望的随机信号。GPS 接收机收到的信号中包含无人机实际位置信息和 GPS 误差，是两者的叠加^[3]。

由于在 D3D 开发环境中，使用左手坐标系 (y 代表高度， x 代表宽度， z 轴垂直显示器屏幕表面面向内表示深度)，而 GPS 传感器给出的是 WGS-84 经纬度坐标系，则需要进行虚拟世界到经纬度坐标的转换，如图 6、图 7 所示。

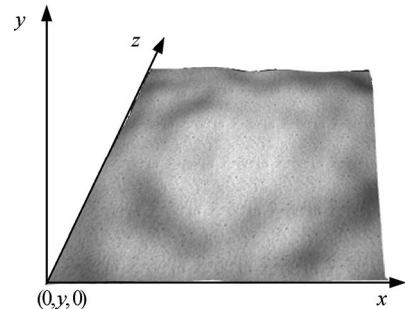


图 6 虚拟世界坐标系

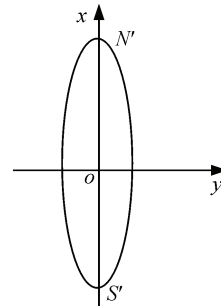


图 7 高斯投影坐标

上图显示虚拟世界坐标系的原点 $(0, 0, 0)$ 位于地形左下角，已知无人机起飞位置 (x_1, y_1, z_1) 的 GPS 经纬度坐标 (B, L, H) ，若无人机起飞后时刻 t 所在位置的虚拟世界坐标是 (x_2, y_2, z_2) ，求此时的 GPS 经纬度坐标 (B_1, L_1, H_1) 。

首先将 WGS-84 的大地坐标 (L, B) 转换为对应于 WGS-84 椭球的高斯坐标平面 (x_{84_a}, y_{84_a}) ，则时刻 t 无人机所在点的高斯平面坐标是：

$$x_{84_b} = x_{84_a} + (z_1 - z_2); \tag{1}$$

$$y_{84_b} = y_{84_a} + (x_1 - x_2). \tag{2}$$

利用高斯投影反算公式，将其转换成为 WGS-84 经纬度坐标系 (B_t, L_t) ，此坐标即为当前无人机的精确经纬度坐标。由 GPS 传感器的输出误差模型可以拟和为 AR 模型^[3]，

$$\Delta B_t - \phi_1 \Delta B_{t-1} - \phi_2 \Delta B_{t-2} = \varepsilon_t; \tag{3}$$

$$\Delta L_t - \phi_1 \Delta L_{t-1} - \phi_2 \Delta L_{t-2} = \varepsilon_t. \tag{4}$$

则时刻 t ，GPS 传感器仿真输出的结果是：

$$B_s = B_t + B_b; \quad (5)$$

$$L_s = L_t + B_f. \quad (6)$$

(B_s, L_s) 即是飞控器控制无人机程控飞行和遥测显示的依据。经过对 GPS 传感器的实测分析，认为其误差项是周期项和平稳随机项组成^[4]。

由于采用 MapX 作为遥测显示的控件，系统利用 MapX 的自带函数较为方便地实现了这一算法。

当前显示区域中心坐标(经纬度)为 (L, B) 。分别求出 $d_L = \text{distance}((L, B) - (L + \Delta L, B))$ 和 $d_B = \text{distance}((L, B) - (L + \Delta L, B))$ 。

在 D3D 虚拟空间中，以世界右下角坐标作为坐标原点 $(0, y_1, 0)$ ，可知当前无人机起飞点位置的三维坐标值 (x_2, y_2, z_2) 。假设程序中设置无人机起飞位置的经纬度坐标是 (L, B) 。起飞后某一时刻 t ，得到当前无人机三维坐标值 (x_3, y_3, z_3) ，那么此时无人机所处的经纬度坐标 $L' B'$ 有：

$$L' = (x_3 - x_1) / d_L + L; \quad (7)$$

$$B' = (y_3 - y_1) / d_B + L. \quad (8)$$

3.2 经纬度坐标转换到真实坐标

考虑到小型无人机主要用于小区域内执行任务和 GPS 导航的精度，定义这样的导航坐标系 (xoy) ，其原点 o 为起飞点位置， x 轴为正东方向， y 轴为正北方向， x 轴和 y 轴的单位为 10 m。而 GPS 采用的是 WGS-84 坐标系，故自主导航时，需要将 GPS 接收机输出的无人机当前位置在 WGS-84 坐标系中的值(经度 λ ，纬度 φ) 转换到无人机当前位置在 xoy 坐标系中的值 (x, y) ，作为飞行控制系统控制飞行轨迹的依据。已知地球赤道圈长为 40 075.36 km 和地球子午线长为 39 940.67 km，设原点 o 在 WGS-84 坐标系中的值为 $(\lambda_0^\circ, \varphi_0^\circ)$ ，无人机当前点在 WGS-84 坐标系中的值为 $(\lambda^\circ, \varphi^\circ)$ ，则 WGS-84 坐标系到 xoy 坐标系的转换公式为：

$$x = (\lambda^\circ - \lambda_0^\circ) \times \frac{40\,075.36 \times \sin(90^\circ - \varphi_0)}{360^\circ} \times 100; \quad (9)$$

$$y = (\varphi^\circ - \varphi_0^\circ) \times \frac{39\,940.67}{360^\circ} \times 100. \quad (10)$$

3.3 传感器仿真

系统对常用的机载传感器(高度、航向、速度、姿态、GPS 等)建立了输入输出的数学模型，用以模拟机上传感器的特性。由于传感器种类多样，工作原理各异，为每个传感器分析建立物理模型工作

量巨大，且不具备通用性。经过分析，笔者认为传感器的输出是标准值和误差值的叠加，由于在仿真过程中标准值已知，只需对传感器的误差进行分析建模，经过两者合成，即可以达到传感器的仿真效果。此种仿真方法，占用机时少，效果较好。

例如，对于无人机/无人机上常用的姿态感知设备垂直陀螺仪，当无人机做匀速直线运动(平飞)时，陀螺仪的输出模型可以用下式表示：

$$\left. \begin{aligned} \gamma_r &= -\gamma_f \text{sign} \dot{\beta} - \frac{H\omega_1 \cos K}{K_x} \\ \beta_r &= \beta_f \text{sign} \dot{\gamma} + \frac{H\omega_1 \sin K}{K_y} + \frac{HV}{R_e + K_y} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

式中： γ_f 是陀螺内环轴的摩擦停滞角； β_f 是外环轴的摩擦停滞角； $\dot{\beta}$ 是载机的俯仰角速度； $\dot{\gamma}$ 是载机的倾侧角速度； H 是陀螺的角动量； ω_1 是地球自转角速度； K 是载机的航向； K_x 、 K_y 是陀螺仪横向和纵向修正装置的传递系数，其值表示修正效应的强弱，物理意义是当垂直陀螺仪主轴偏离角为 1 rad 时，修正装置产生的力矩大小。

通常认为陀螺的随机数学模型是白噪声、陀螺偏置和一阶马尔可夫过程组成的，即

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_r + n_g. \quad (12)$$

式中： ε 为陀螺漂率； ε_b 为陀螺偏置； n_g 为白噪声； ε_r 为阶马尔可夫过程， $\varepsilon_r = -\tau_g^{-1} \varepsilon_r + \omega_g$ ， τ_g 为相关时间常数， ω_g 为一阶马尔可夫过程的激励白噪声^[5]。

4 结束语

该系统已经成功应用于无人机操纵的教学和相关无人机组的实践之中。通过使用，提高了操纵手的训练效率，降低了训练的消耗。该系统与使用录像和实物的传统培训系统相比，具有系统造价低、训练费用少、训练周期短、训练效果显著等特点，对无人驾驶飞机的广泛应用起到重要的推动作用。

参考文献：

- [1] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京：国防工业出版社，1984：97-99.
- [2] 冷画屏，刘永辉. 舰艇战术训练成绩评估数学模型[J]. 系统工程与电子技术，2003，25(11)：1438-1440.
- [3] 杜鹏，傅梦印，张鸿业，等. GPS 定位误差分析与建模[J]. 北京理工大学学报，1998，19(8)：456-460.
- [4] 张卫明，张炎华，钟山. 舰船 GPS 导航系统定位误差仿真[J]. 系统仿真学报，2005，17(1)：57-59.
- [5] 张宗麟. 惯性导航与组合导航[M]. 北京：航空工业出版社，2000：8.